Российская академия наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук

Научный совет
по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики

ГА-2018
≈≈≈≈≈≈

ТРУДЫ XIV ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ

Санкт-Петербург
2018

УДК 681.88/.89
ББК 32.875
Т 78

Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург, 2018. – 652 с.

ISBN

В сборнике трудов представлены доклады о достижениях отечественных и зарубежных ученых в области гидрофизики и гидроакустики. Особое внимание уделено результатам фундаментальных исследований и их внедрению при решении прикладных проблем, в том числе при разработке технологий мониторинга Мирового океана с целью исследования и освоения его ресурсов, предупреждения природных катастроф и чрезвычайных ситуаций, при изучении рельефа прибрежных акваторий и экономических зон, при обосновании методов и средств борьбы с подводным терроризмом и минной опасностью, при разработке датчиков и систем контроля и управления техногенными процессами.

Для научных работников и инженеров, а также для широкого круга специалистов, интересующихся подводной акустикой и гидрофизикой.

Конференция проводилась в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском научном центре Российской академии наук (СПбНЦ РАН) с 23 по 25 мая 2018 г.

Организации-соучредители:

Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики СПбНЦ РАН
АО «Концерн «Океанприбор» ОАО «Концерн «МПО - «Гидроприбор»

Организационный комитет:

Председатель:
д-р техн.наук А.А.Родионов
(СПбНЦ РАН)

Сопредседатель:
канд.физ.-мат.наук С.А.Смирнов
(АО «Концерн «Океанприбор»)

Члены оргкомитета:

канд.техн.наук Барбанель Б.А. (акад. РАЕН), д-р техн.наук Белов Б.П. (СПбГМТУ), Боровская А.В. (СПбНЦ РАН), д-р техн.наук Вертешев С.М. (ПГУ), канд.техн.наук Говорухин В.П. (СПбО СПП РАН), канд.техн.наук Гурьев А.В. (СПбФ ИО РАН), д-р техн.наук Гурьев Ю.В. (ВМИИ), д-р физ.-мат.наук Долин Л.С. (ИПФ РАН), д-р физ.-мат.наук Емельянов В.Н. (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им.Д.Ф.Устинова), канд.техн.наук Зенченко С.С. (ФГУП «Крыловский научный центр»), канд.физ.-мат.наук Зимин А.В. (СПбФ ИО РАН), канд.биол.наук Иванов М.П. (СПбГУ), канд.техн.наук Каверинский А.Ю. (ФГУП ЦКБ МТ «Рубин»), Кедрова Е.В. (АО «Концерн «Океанприбор»), д-р техн.наук Максимов В.В. (АО «Концерн «Океанприбор»), д-р техн.наук Малый В.В. (СПИИ РАН), акад. Нигматулин Р.И. (ИО РАН), канд.техн.наук Погудин К.Г. (ОАО «Концерн «МПО - Гидроприбор»), Покровская Н.Е. (СПбФ ИО РАН), канд.техн.наук Попов В.А. (АО «Концерн «Океанприбор»), акад. Румянцев В.А. (ИНОЗ РАН), канд.техн.наук Селезнев И.А. (АО «Концерн «Океанприбор»), канд.физ.-мат.наук Смирнов С.А. (АО «Концерн «Океанприбор»), д-р воен.наук Трушенков В.В. (ОАО «Концерн «МПО - Гидроприбор»), Тукиянен А.Н. (ОАО «СПМБМ «Малахит»), чл.-кор. РАН Филатов Н.Н. (ИВПС КарНЦ РАН), канд.техн.наук Черницкий В.В. (СПбФ ИО РАН), д-р техн.наук Щеголихин В.П. (1 ЦНИИ МО), акад. РАН Якушенко Е.И. (ВМИИ)

Авторы-составители:

д-р техн.наук Б.П.Белов, д-р техн.наук А.А.Родионов,
канд.физ.-мат.наук С.А.Смирнов, д-р физ.-мат.наук Ф.Ф.Легуша

Рецензенты:

д-р техн.наук Б.П.Белов, д-р техн.наук А.В.Богородский, канд.техн.наук С.Б.Егоров, д-р техн.наук В.Б.Жуков, д-р геогр.наук А.В.Зимин, д-р техн.наук Ю.А.Коваленко, д-р физ-мат.наук Ф.Ф.Легуша, канд.техн.наук Р.Ю.Монахов, канд.техн.наук Д.А.Никитин, д-р техн.наук Д.Б.Островский, д-р физ-мат.наук Е.Н.Пелиновский, д-р техн.наук А.А.Родионов, канд.физ-мат.наук М.А.Родионов, канд.физ-мат.наук А.С.Сафрай, канд.техн.наук Н.Н.Семенов, д-р физ-мат.наук Д.В.Чаликов, д-р физ-мат.наук Л.Б.Чубаров

ISBN

© Коллектив авторов, 2018

Russian Academy of Sciences

Saint-Petersburg research center of Russian Academy of sciences

Scientific Council on Problems of Fundamental and Applied Hydrophysics

HA-2018

≈≈≈≈≈≈

PROCEEDINGS OF XIV ALL-RUSSIAN CONFERENCE

ADVANCED TECHNOLOGIES OF HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS

Saint-Petersburg
2018

УДК 681.88/.89
ББК 32.875
Т 78

Proceedings of XIV All-Russian Conference «Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». – Saint-Petersburg, 2018. – 652 p.

ISBN

The collected articles present achievements of domestic and foreign scientists in the field of hydrophysics and hydroacoustics. Special attention is paid to the results of fundamental researches and their introduction to solution of applied problems in the following directions:

- the World Ocean monitoring technologies aimed at exploration and development of its resources, prevention of natural disasters and emergency situations;
- survey of the bottom relief of coastal water and economic areas;
- means and methods of suppression of underwater terrorism and anti-mine measures;
- designing of sensors and systems for monitoring and control industrial processes.

For scientists and engineers as well as for a wide range of specialists interested in hydrophysics and hydroacoustics.

The Conference was held in Saint-Petersburg Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences on May 23–25, 2018.

Authors-composers:
Dr.Sc. B.P.Belov,
Dr.Sc. A.A.Rodionov,
Cand.Sc. S.A.Smirnov,
Dr.Sc. F.F.Legusha

ISBN

© Collective of authors, 2018

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ: ОТ ФЛЮКТОМЕТРА АДМИРАЛА С.О.МАКАРОВА ДО ЦИФРОВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ (1881-1985 гг.)

В.А.Попов, канд.техн.наук, Р.Н.Беркутов, И.А.Селезнев, д-р техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

IMPROVEMENT OF DOMESTIC SONAR MEANS: FROM CURRENT METER INVENTED BY ADMIRAL S.O.MAKAROV TO DIGITAL AUTOMATED INTEGRATED SYSTEMS (1881-1985)

V.A.Popov, Ph.D., R.N.Berkutov, I.A.Seleznev, Dr.Sc.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

В докладе рассматривается история создания и совершенствования отечественных гидроакустических средств за период более 100 лет. Вводятся в научный оборот новые исторические данные о российских инженерах и ученых, внесших значительны вклад в гидроакустическую науку и технику, проектировавших гидроакустическое вооружение для Военно-морского флота и народного хозяйства страны. Это вооружение обеспечивает сегодня стратегический паритет с потенциальным противником и оборону России от морских угроз. Представляется краткое содержание новой книги, которая станет логическим продолжением существующих изданий об истории гидроакустики, уточняющей и дополняющей их новыми хронологическими, историческими, и техническими сведениями.

In the report history of creation and improvement of domestic sonar means during more than 100 years is considered. New historical data on Russian engineers and scientists who made considerable contribution to hydroacoustic science and engineering and created hydroacoustic arms for the Navy and national economy of the country are introduced. Today these arms provide strategic parity with the potential enemy and defense of Russia against sea threats. The summary of a new book which will become a logical continuation of the existing editions on the history of hydroacoustics specifying and supplementing them with new chronological, historical, and technical data is submitted.

В 2019 году исполняется 70 лет со дня основания НИИ-3 – первого советского научно-исследовательского института в области гидроакустики, в дальнейшей истории ставшего «ЦНИИ «Морфизприбор», а в 2005 г. преобразованного в ОАО «Концерн «Океанприбор». В связи с этой знаменательной датой необходимо вспомнить историю развития отечественной гидроакустики от ее первых шагов в XIX в. до создания первых цифровых гидроакустических комплексов для кораблей Военно-морского флота России в двадцатом.

За последнее двадцатилетие по вопросу развития отечественной гидроакустики и гидроакустической техники было опубликовано несколько книг, авторы которых в основном ограничивают временные периоды рассмотрения связьюлибо с историей создания и развития конкретных предприятий, либос описанием биографий специалистов-гидроакустиков и отдельных образцов продукции, выпущенной до начала 80-х гг.прошлого века: «Из истории отечественной гидроакустики»(СПб., ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, сборник, 1998 г.); «50лет ЦНИИ «Морфизприбор»(СПб., ЦНИИ «Морфизприбор», сборник, 1999 г.); «История гидроакустики» (Грабарь А.Г. и др., Росиздат, 2002 г.);«Корабельная гидроакустическая техника»(Корякин Ю.А. и др., СПб., «Наука», 2004 г.);«Первый в России завод гидроакустических приборов»(Комляков В.А., СПб., Политехн. ун-т, 2006).

Кроме того, при анализе и сопоставлении информации, содержащейся в указанных публикациях, выявленряд хронологических и объектовых несоответствий.

В связи с этим возникла необходимость освещения совершенствования отечественнойгидроакустической техники на более широком и непрерывном временном интервале, на фоне развития страны и ее Военно-морского флота. Представляется краткое содержание новой книги, которая станет логическим продолжением существующих изданий об истории гидроакустики, уточняющим и дополняющим их новыми хронологическими, историческими,биографическими и техническими сведениями. Материал новой книги планируется изложить в восьми главах:

глава 1 «Отечественные акустика и военная гидроакустика до 1917 г.»;

глава 2 «Отечественная военная гидроакустика в первые годы советской власти (1917-1933)»;

глава 3 «Отечественная военная гидроакустика накануне Великой отечественной войны (1934-1941)»;

глава 4 «Военная гидроакустика в период Великой отечественной войны (1941-1945)»;

глава 5 «Развитие отечественных гидроакустических средств в послевоенный период (1945-1955)»;

глава 6 «Развитие отечественных гидроакустических средств в период научно-технической революции в СССР (1956-1965)»;

глава 7 «Разработка нового поколения гидроакустических средств с использованием первых образцов цифровой вычислительной техники (1966-1975)»;

глава 8 «Создание цифровых автоматизированных гидроакустических комплексов (1976-1985)».

Считаем целесообразным более подробно довести до конференции материал первой главы.

Вице-адмирал С.О.Макаров (рис.1) при определении характеристик взаимно противоположного течения в Константинопольском проливе с парохода «Тамань», которым он командовал в 1881–1882 гг., придумал прибор − вертушку с винтом-пропеллером, на оси которого был приделан колокольчик. Этот прибор Макаров назвал флюктометром (рис.2 − фото с прибора, хранящегося в Севастопольской морской обсерватории). При стоянке судна на якоре винт-пропеллер опущенного в воду прибора вращался потоком протекающей мимо судна воды.

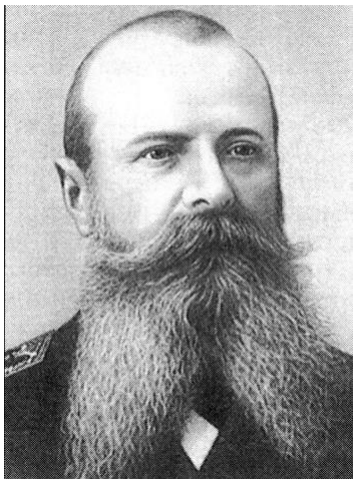


Рис. 1. Степан Осипович Макаров, вице-адмирал, флотоводец и ученый.

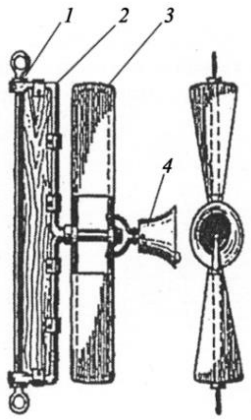


Рис. 2. Флюктометр Макарова:
1 − ось руля, *2* − перо руля,
3 − винт-пропеллер, *4* − колокольчик.

Язычок колокольчика мог колебаться только в одной плоскости. При каждом обороте винта язычок делал 2 удара. Но к одной стороне язычка была приделана резина, так что при каждом обороте винта был слышен только один удар. Считать эти удары надо было прослушивая их не с поверхности воды, а из трюма судна, при этом даже легкий шум воды на поверхности заглушал удары колокольчика. Измерения проводились на различных горизонтах. Всего проведено до 1000 измерений. Флюктометр устанавливался у поверхности. Среднее из 109 наблюдений: 36 оборотов за 12 минут, что соответствовало скорости течения 2 уз (или 103 см/с). Наибольшая скорость течения на фарватере против Константинополя составила − 3.42 уз (176 см/с).

Благодаря этим измерениям было сделано открытие: в проливе Босфор обнаружилось двойственное течение. Флюктометр по мере опускания на глубину показывал уменьшение скорости течения, на определенной глубине вода не движется. У дна − течение обратное. Направление течения определялось по отклонению натянутого троса, на котором закреплялось перо руля с флюктометром.

В дальнейшем С.О.Макаров предложил конструкциюфлюктометрадополнить телефоном и картушкой компаса. Для измерения течений в океане он рекомендовал использовать два прибора − один спускать ко дну, где наибольшая вероятность отсутствия течений, а другой держать у борта. Разность показаний дает величину скорости течения, которую надо исправлять вектором дрейфа судна. Этот метод в океанографии был назван методом Макарова. Впоследствии Фритьоф Нансен теоретически обосновал этот метод, который получил название метод Макарова −Нансена. Измерители течения, которые впоследствии создавались (например, в 1905 г. вертушка Экмана−Мерца), использовали конструкцию, предложенную С.О.Макаровым, но флюктометр С.О. Макарова **явился первым прибором гидроакустической телеметрии.**

В 1882 г. в журнале «Морской сборник» № 10 была опубликована фундаментальная статья профессора физики Петербургского университета Федора Фомича Петрушевского (1828–1904), «Звуковые сигналы». В статье рассказывается о применении с древних времен звуковой сигнализации в воздухе для обеспечения безопасности мореплавания. Там же он говорит, что в

1871 г. в России статский советник Качалов предложил в северных широтах − на мысе Святой Нос (Баренцево море) и на южной оконечности острова Гогланд (Балтийское море) − для подачи туманных сигналов установить паровые свистки. В 1800 г. французским физиком Кньяр-Патур была создана сирена, которая впервые как сигнальный прибор использована Брунсом в Нью-Йорке, а профессором Генри внедрена на маяках США и Англии в 1872 г.

Колокол, звучащий в воде, при знании фактической скорости распространения звука, может быть использован как источник сигналов для обеспечения навигации.Впервые скорость звука в морской воде, равная величине 1500 м/с, была определена М. Беданом (1820 г.). В октябре 1826 г. швейцарец Д. Колладон произвел точные опыты по исследованию распространения звука в воде на Женевском озере. Через слуховую трубу, длиной 5 метров, раструб которой был покрыт жестяной пластинкой площадью ~ 20 дм^2, звук от удара молотка о колокол четко прослушивался на расстояниях 100 и 1300 м. Звуки были слышны и просто при погружении головы в воду на расстоянии от колокола 2−2.5 км. Измеренная скорость звука составила 1435 м/с. В то же время было проведено измерение скорости звука Вертгеймером:

− в пресной воде − 1437.1 (при t = 15°C);

− в морской воде − 1453.8 (при t = 20°C).

Колладон предполагал, что при благоприятных условиях среды звук в море можно передавать на несколько сотен километров. Звуковые волны, образующиеся в воде, могут передавать колебательные движения воздуху только на небольшом расстоянии от звучащего тела по причине их полного внутреннего отражения от поверхности воды опять в воду. Далее, Ф.Ф.Петрушевский заключает, что звук отражается также и от дна. Здесь он упоминает французского физика Д.Ф.Арго (Arago), который первым предложил применить эхо от морского дна для измерения глубины моря. Петрушевский сделал вывод, что звук при незначительной глубине идет в пространстве, ограниченном сверху поверхностью воды, а снизу − дном, и отражаясь как вверху, так и внизу, не так быстро ослабевает с увеличением расстояний как в пространстве, совершенно свободном. Также ограниченные водные пространства должны быть особенно удобны для передачи звуковых сигналов, например, мелководный Финский залив. Фактически Ф.Ф.Петрушевский показал, что звуковые волны подчиняются оптическому закону Снеллиуса − преломления и отражения; кроме того, он показал возможность возникновения звукового канала для передачи информации на большие расстояния.

В статье преподавателя Военно-морской академии бывшего штурманского офицера Е.Е.Шведе «Звуковые лоты» описывается рождение в 1904 г. звукового лота – эхолота. Первый такой измеритель глубин был предложен норвежским инженером Бергграфом. Для определения глубины моря требуется 3 прибора: отправитель звука, приемник обратных звуковых волн и один точный хронометр. В 1912 г. в Германии был создан эхолот Бэма. Все первые эхолоты создавались без учета изменения скорости звука в воде, эта проблема влияла на точность измерения глубины, которая составляла около 3 % (принималась средняя величина скорости звука 1500 м/с).

В дальнейшем, в 1923 г. американскими гидрографами составлена первая карта изобат на основе эхолокации глубин (карта № 5194). Миноносец Stewart произвел промер между Сан-Франциско и мысом Дескансо (Сан-Диего): одним галсом по курсу корабля было измерено 5000 глубин за 38 дней при скорости корабля 12 уз. Таким образом, приоритет в использовании эхолокации для составления карт глубин остался на стороне американских гидрографов.

В 1923 г. на выставке, посвященной 50-летию Французского физического общества, демонстрировался первый эхолот, созданный молодым русским инженером-электриком Константином Васильевичем Шиловским (1880–1958), рис. 3, который первым, еще в 1916 г., решил задачу превращения энергии электромагнитных колебаний высокой частоты в энергию упругих колебаний, передаваемых в водную среду узким пучком, и пеленгования отраженного эхосигнала от препятствия. Прибор, созданный на этом принципе, является прообразом современного гидролокатора. В части создания электроакустического преобразователя к работам Шиловского подключился французский физик Поль Ланжевен (1872–1946), рис. 4. Первые испытания гидролокатор проходил на Средиземном море вблизи Тулона. Погруженная подводная лодка обнаруживалась на расстоянии до 2 км. После Первой мировой войны разработка гидролокатора для борьбы с подводными лодками (ПЛ) продвинулась вперед. Но приоритет К.В. Шиловского был общепризнанным.

«Компания подводных сигналов» (США, г.Бостон) подала заявки на привилегии «Система подводной сигнализации» - 10 июня 1902 г., «Прибор для воспроизведения звуковых колебаний

в воде при подводной сигнализации» − 31 января 1903 г., «Приспособление для произведения звуковых волн под водой для подводной сигнализации» − 1 мая 1904 г. и «Подводный сигнальный аппарат» − 2 июля 1905 г. Первыми представили свой проект применения подводных колоколов американцы Нил и Смолпэдж. Но окончательного успеха добился А.И.Муди из Бостона, который с 1900 г. провел ряд опытов с подводными колоколами. Всего было заявлено 3 системы подводной сигнализации колоколом разной конструкции.

Рис. 3. Константин Васильевич Шиловский, изобретатель гидролокатора.

Рис. 4. Поль Ланжевен, французский физик, член Парижской академии наук, почетный член АН СССР, член Лондонского королевского общества.

В России первые практические шаги по использованию гидроакустических средств сделали военно-морские гидрографы. На маяках Балтийского и Белого морей размещались подводные колокола и сирены и отрабатывались приемы их использования. 27 февраля 1912 г. лейтенант Александр Александрович Щенснович (1886−1942), штурманский офицер крейсера «Баян», подал заявку на изобретение «Способ определения местонахождения в море, основанный на разности скорости волн звуковых и электрических». Патент выдан 30 сентября 1914 г. за № 27432. В разработке и практическом применении этого метода принимали участие офицеры флота − штурман линкора «Севастополь» Евгений Евгеньевич Шведе (1890–1977), рис. 5, и штурман крейсера «Олег» Дмитрий Павлович Белобров (1885–1964), рис. 6. Станция, находившаяся на берегу или плавмаяке, по запросному радиосигналу с корабля автоматически запускала излучатель подводного акустического сигнала. Для определения расстояния от маяка до корабля следовало время прохождения сигнала в воде до корабельного акустического приемника умножить на заранее определенную в этом районе скорость звука в воде.

Командование Балтийского флота в 1915 г. приняло решение установить радиохроногидрофонные приемники на всех боевых судах первых двух рангов. В этом же году радиохроногидрофонные станции были установлены на маяках Сарычев, Утте, в 1916 г.− на маяке Дагеррорт, а в 1917 г. − на Либавском плавмаяке. Практически это изобретение предварило создание наших современных навигационных гидроакустических систем ПЗМ-400, ГМО-66, Шельф, Шельф-НК, основанных на применении подводных стационарных излучателей и донных маяков-ответчиков для определения места корабля не только вблизи побережья, но и в открытом океане.

Инженер Роберт Густавович Ниренберг (1877–1939), рис. 7, заведующий морской испытательной станцией беспроволочного телеграфирования в Санкт-Петербурге, направил 4 октября 1905 г. в Главный морской штаб докладную записку о целесообразности испытания и применения на флоте созданной им системы подводного акустического телеграфа. «Сущность этой системы состоит в том, что на отправительной станции вода, окружающая судно, производит колебания, соответствующие звуку определенной высоты, посредством струи воды, пропускаемой из насоса через сирену, помещаемую в подводной части корабля: эти колебания улавливаются на приемной станции монотелефоном, воспринимающим звук лишь такого тона, на какой этот монотелефон настроен. Для увеличения дальности действия, а также для телеграфирования в желаемом направлении можно помещать звуковой вибратор в фокус параболического рефлектора. Эта система телеграфирования является единственной пригодной для ПЛ».

Рис. 5. Евгений Евгеньевич Шведе.

Рис. 6. Дмитрий Павлович Белобров.

Рис. 7. Роберт Густавович Ниренберг.

Рис. 8. Михаил Николаевич Беклемишев.

В июле–августе 1905 г. Балтийским заводом на катер «Балтиец» были установлены приборы описанной системы. Излучатель − гидравлическая сирена. Приемник − на береговой станции опущена слуховая трубка, которой улавливались сигналы на расстоянии до 2-х верст. Указания по разработке и испытаниям системы давались заведующим отделом подводного плавания Балтийского завода капитаном 2 ранга М.Н. Беклемишевым, рис. 8.

5 января 1907 г. Р.Г.Ниренберг подал заявку на привилегию «Передающая станция для гидрофонического телеграфирования через воду». В январе 1908 г. Ниренберг организовал на Балтийском заводе гидрофоническую лабораторию. В мае 1908 г. при испытаниях системы на Черном море была достигнута дальность связи 6 миль. В декабре 1911 г. на Балтийском море проводилось испытание приборов подводной сигнализации системы Ниренберга, установленных на 4-х ПЛ. В 1913 г. Балтийский завод установил две станции системы Ниренберга на линейных кораблях «Три Святителя» и «Пантелеймон». В августе 1914 г. Балтийский завод разработал улучшенную конструкцию излучателя колокольного типа, который обеспечивал производство от двух до пяти ударов колокола в секунду, что позволило применять эти станции для передачи сообщений азбукой Морзе.

Из-за начала Первой мировой войны все мероприятия по доработке приборов Р.Г.Ниренберга были отложены. В 1915 г. гидрофоническая лаборатория на Балтийском заводе перестала существовать, а в марте 1916 г. образована гидрофонная часть Главного гидрографического управления Морского ведомства, руководителем которой назначен полковник Е.А.Леонтьев (1868–1919).

Успешные опыты по обнаружению подводных объектов были проведены в 1910 г. профессором Р.Фессенденом (1866–1933), США, который разработал гидроакустический излучатель большой мощности. Вибратор Фессендена возбуждался электрически на одной частоте и работал по принципу электродинамического громкоговорителя. В диапазоне 500–1000 Гц он мог

работать в режиме гидроакустического приемника и излучателя. Первый серийный вибратор Фессендена выпущен в 1911 г. фирмой «Submarine Signal» в 1911 г.

Морское министерство в 1915 г. докладывало: «В области работ по подводной сигнализации производившиеся опыты с приборами Р.Г.Ниренберга, к сожалению, не дали желаемых результатов. Наиболее удовлетворяет система проф. Фессендена, имеющая единственный недостаток − дальность действия не превышает 15 миль…» Эти приборы выписаны из Америки и установлены в 1915 г. на двух линейных кораблях, двух крейсерах, в том числе на крейсере «Аврора», двух миноносцах и в 1916 г. − на ПЛ «Рысь». Опыты на ПЛ «Рысь» выяснили полную пригодность и необходимость установки вибраторов на подводных лодках.

В 1917 г. Э.Резерфорд предложил устройство для определения направления на источник звука. Таким образом, достижения физических наук XIX – начала XX в. определили необходимость и возможность получения и передачи гидроакустической информации о подводных объектах, создания отечественных технических средств и приборов для решения проблем: обнаружения подводных лодок и мин противника, звукоподводной связи, обеспечения безопасности кораблевождения, изучения морской среды − условий распространения звука.

Анализ результатов боевой деятельности ПЛ во время Первой мировой войны показал, что они могут значительно успешнее других сил флотов нарушать океанские коммуникации, уничтожать как надводные корабли и суда, так и подводные лодки противника. Успешная боевая деятельность ПЛ вызвала быстрый рост их числа в составе флотов ведущих капиталистических государств. В процессе строительства улучшались их конструкция и вооружение. За время войны ПЛ выросли в отдельный род сил флотов, а в Германии – стали самым эффективным родом сил военного флота.

Потопление 22 сентября 1914 г. одной немецкой ПЛ в течение 1 ч 15 мин трех английских вспомогательных крейсеров, начавшиеся огромные потери судов и кораблей всех флотов стран Антанты от действий ПЛ противника послужили поводом к принятию ими экстренных мер в борьбе с угрозой из под воды. Американское и английское правительства призвали всех изобретателей и ученых своих и союзных стран к энергичной работе по изысканию средств и способов борьбы с ПЛ.

В июле 1915 г. при английском Адмиралтействе был образован Комитет изобретений и исследований для разработки приборов и способов противолодочной борьбы. Не жалея средств, англичане быстро соорудили недалеко от Эдинбурга экспериментальную станцию, где производились все опыты по подслушиванию ПЛ.

11 мая 1917 г. в Америке создан Особый совет по противолодочным приборам, а также лаборатория исследований и опытов. В шести независимых группах над созданием гидроакустических средств работали известные физики, такие как А.Милликен, Э.Резерфорд и другие. Резерфорд уже в конце года предложил конструкцию устройства для определения направления на источник подводного звука (шумопеленгатор).

По сообщениям русских военно-морских агентов (такие сообщения продолжали поступать в Россию до конца 1918 г.), многочисленные эксперименты, проведенные в мае-июне 1918 г. в районе французского порта Тулон с гидролокатором конструкции К.Шиловского и П. Ланжевена показали. что погруженная ПЛ может быть обнаружена на расстояниях до 2 км. Если в 1914 г. Шиловский и Ланжевен проводили эксперименты с конденсаторным (электростатическим) излучателем и капсульным (угольным) микрофоном, помещенным в фокус вогнутого зеркала (при этом наблюдались утечки и частые пробои из-за высокого напряжения, необходимого для работы излучателя), то в 1917 г. Ланжевен обратился к пьезоэлектрическому эффекту и использовал излучатель из кварца со стальными накладками, а также ламповые усилители, что являлось первым случаем применения электроники в гидроакустике.

В результате больших усилий ученых и инженеров разных стран к началу 1918 г. принципы и методы гидроакустического обнаружения подводных объектов и гидроакустической связи были в значительной степени выяснены.

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ

В.Б.Жуков, д-р техн.наук, А.А.Катунин, И.А.Селезнев, д-р техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

HYDROACOUSTIC TRANDUCERS BASED ON PERSPECTIVE PIEZOMATERIALS

V.B.Zhukov, Dr.Sc., A.A.Katunin, I.A.Seleznev, Dr.Sc.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

В докладе приведены результаты исследований, выполненных по заданию Фонда перспективных исследований, по созданию перспективных электроакустических преобразователей (ЭАП) из новых пьезоматериалов. Приведены результаты измерений макетов ЭАП из пьезокомпозитов, пьезопленки типа ПВДФ, пьезокомпозитов на основе сегнетоэлектрических кристаллов сульфоиодида сурьмы, показаны основные преимущества таких ЭАП, обозначены области применения новых преобразователей в гидроакустической технике.

In the report results of the research executed on the instructions of Fund of Perspective Research on creation of perspective electro-acoustic transducers (EAT) made from new piezomaterials are given. Results of measurements of EAT models made from piezocomposite, piezofilm of the PVDF type, piezocomposite based on ferroelectric crystals of sulfoiodid of antimony are given, primary benefits of such EAT are shown, field-of-useof new transducers in sonar equipment is defined.

Снижение шумности ПЛ приводит к уменьшению дальности их обнаружения современными ГАК. Увеличение апертуры гидроакустических антенн традиционных конструкций ограничено габаритами носовой оконечности. Решение задач обнаружения и целеуказания при этом возможно при применении конформных и покровных антенн, имеющих существенно большие энергетические потенциалы, нежели традиционные антенны.

Перспективным представляется использование расположенных вдоль борта конформно-покровных антенн, размеры которых могут быть весьма значительными. Важнейшей проблемой при этом является необходимость существенного снижения влияния помех работе гидроакустического комплекса.

Бортовая конформно-покровная антенна располагается в области преобладающего влияния неоднородных волн, обусловленных структурной помехой, а также помехой гидродинамического происхождения. Возможными путями обеспечения эффективной работы бортовых антенн, является использование пьезоактивной пленки ПВДФ, позволяющей создавать электроакустические приемники с большой рабочей поверхностью.

Это обеспечивает возможность уменьшения шума потока относительно акустического сигнала. Уменьшения шума потока можно достичь приемниками, превышающими по размерам длину волны потока, вследствие усреднения по площади. Это происходит вследствие того, что любая волна давления, распространяющаяся параллельно поверхности приемника, вызывает появление смежных областей разрежения и сжатия, и электрические отклики из этих областей частично уменьшают сигнал на выходе приемника. Таким образом, усреднение этих откликов по площади вызывает подавление тех компонент шума потока, длины волн которых существенно меньше размеров приемника.

За счет осреднения по площади существенно снижается влияние гидродинамической помехи на тракт ГАК.

Преимущества антенн из ПВДФ: развитая рабочая поверхность, большая помехоустойчивость, малые массогабаритные характеристики (толщина), гибкость материала и технологичность создания антенн.

Одним из важных качеств, которым должна обладать ПЛ, является акустическая скрытность, затрудняющая определение местоположения ПЛ. Для обнаружения ПЛ используется гидроакустическая аппаратура средств обнаружения.

Проблема скрытности ПЛ и автономных подводных аппаратов включает вопрос акустической заметности приемной антенны. Этот вопрос связан с наличием демаскирующих отражающих поверхностей и частичного рассеяния принятых сигналов приемной антенной ввиду недостаточного согласования выходного сопротивления ее со средой. Последнее имеет место в приемных антеннах всех типов, включая звукопрозрачные. Это явление получило название «обратного излучения» приемной антенны.

Демаскирующее свойство приемных антенн вследствие наличия отражающих поверхностей, включая активные приемо-излучающие поверхности и акустические экраны, зависит от величины коэффициента отражения

$$k_{отр} = \frac{\frac{\rho_1 c_1}{\cos\theta_1} - \frac{\rho c}{\cos\theta}}{\frac{\rho_1 c_1}{\cos\theta_1} + \frac{\rho c}{\cos\theta}},$$

где ρ, ρ_1 и c, c_1 соответственно плотности и скорости звука сред, из которой падает волна и в которую она проходит, θ, θ_1 – углы падения и преломления. У пьезокерамики плотность имеет величину ~5-7 г/см^3, а скорость звука ~$(3000-4000)$ м/с.

Как следует из формулы для коэффициента отражения, задача уменьшения акустической заметности, т.е. отражений от активных поверхностей приемных антенн, приводит к необходимости снижения волнового сопротивления $\rho_1 c_1$ активных приемно-излучающих материалов, то есть разработки и внедрения новых пьезоактивных материалов, обладающих пониженными значениями плотности и скорости звука, – такими, как пьезокомпозиты.

В отличие от традиционной пьезокерамики, пьезокомпозит имеет заполнение пьезоактивной составляющей примерно до 60%, в связи с чем его волновое сопротивление $(\rho_1 c_1)_{комп}$ отнесенное к волновому сопротивлению воды ~ в 3-4 раза меньше чем у пьезокерамики; коэффициент отражения при этом ~ в полтора раза меньше, нежели для пьезокерамики. Соответственно уменьшается демаскирующий ПЛ отраженный сигнал и повышается скрытность.

Еще одним путем снижения акустической заметности гидроакустической антенны является уменьшение массогабаритных размеров приемных элементов с использованием двуслойной конструкции, что позволяет отказаться от акустического экрана.

Высокое значение объемного пьезомодуля сегнетоэлектрических кристаллов сульфоиодида сурьмы SbSI, на порядок большее, чем у других пьезоэлектриков, дает основание для проведения работ по разработке из SbSI пьезоэлементов и электроакустических преобразователей, реагирующих непосредственно на всестороннее давление и не требующих механической трансформации звукового давления в одноосное и двухосное механическое напряжение растяжения-сжатия.

Применение материала с высоким значением объемного пьезомодуля перспективно в антеннах, предназначенных для автономных необитаемых подводных аппаратов –интенсивно развивающейся отрасли океанотехники, обеспечивающей проведение широкого спектра подводных работ, к числу которых относятся:

обзорно-поисковые работы;

океанографические исследования, мониторинг водной среды, оценка биоресурсов;

работы военного назначения.

При этом необходимо решить задачу размещения на АНПА гидроакустических антенн режима шумопеленгования значительной площади, обладающих приемлемыми весовыми характеристиками. Создание таких антенн на базе традиционных решений из пьезокерамических преобразователей невозможно, предварительные оценки показывают, что каждая из антенн (с экраном) площадью 2 м^2 будет весить около 150 кг (300 кг на оба борта). Решение задачи возможно при создании новых пьезоматериалов с меньшими массо-габаритными характеристиками.

Разработка отечественной пьезоактивной пленки ПВДФ потребовала помимо организации производства материала ПВДФ и пленки из него решения целого ряда технологических задач: разработки технологии и оборудования ориентационной вытяжки пленки для ориентации доменов, поляризации пленки в коронном разряде, нанесения токопроводящего покрытия из АМГ-6 методом вакуумного напыления. В результате получен гибкий технологичный материал с малой плотностью и приемлемыми пьезосвойствами.

В качестве подходящего пьзокомпозитного материала был разработан пьезокомпозит связности 1-3, пьезоактивная составляющая которого выполнена в виде совокупности параллельных тонких стержней из традиционной пьезокерамики, установленных на подложку и залитых связующим, имеющим плотность ~1,2 г/см^3. В зависимости от степени заполнения связующим результирующая плотность пьезокомпозита уменьшается в 2-4 раза по сравнению с плотностью сплошной пьзокерамики, а скорость звука в нем достигает ~1400-2400 м/с. Тем самым волновое сопротивление пьезокомпозита существенно приближается к волновому сопротивлению воды и обеспечивается требуемое уменьшение коэффициента отражения.

Сульфоиодид сурьмы представляет собой новый ранее не имевший применения в гидроакустике пьезоактивный материал, обладающий малой плотностью и высоким объемным пьезомодулем. Для этого материала были разработаны технология и оборудование его получения, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы чувствительных элементов, показавшие, что плотность материала в 2 раза меньше, а обьемный пьезомодуль на порядок превышает аналогичные параметры традиционной пьзокерамики. Материал имеет равномерную частотную характеристику в широком диапазоне частот и простую конструкцию, не требующую механической трансформации. Электромеханические характеристики сохраняются при воздействии высоких гидростатических давлений – успешные испытания образцов проводились разработчиками при воздействии до 70 мПа, а по информации исследователей материала работоспособность сохраняется до 700 мПа.

Традиционно используемая пьезокерамика ЦТБС-3 имеет следующие основные характеристики, которые приводим для справки:

плотность $7{,}25 \pm 0{,}25$ г/ $см^3$;

относительная диэлектрическая проницаемость 2400 ± 400;

тангенс угла диэлектрических потерь не более 1,5%;

пьезомодульd_{33} не менее $400 \pm 50 \cdot 10^{-12}$Кл/Н,$d_{31}$ не более $160 \pm 40 \cdot 10^{-12}$Кл/Н;

скорость звука 3200-3500 м/сек

коэффициент электромеханической связи(продольный) 0,65.

На основе каждого из трех новых пьезоактивных материалов были разработаны, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы.

I. Общие технические требования к чувствительным элементам на основе пьезопленок:

относительная диэлектрическая проницаемость ε в пределах 8÷12;

объемный пьезомодуль не менее $7 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н;

толщина пленки 0,1÷1,0 мм;

площадь образцов не менее 50 $см^2$;

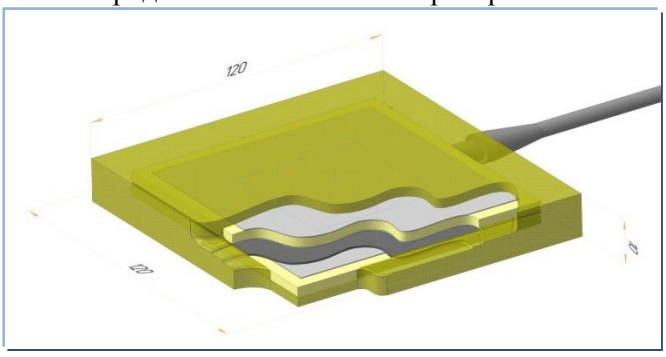
разнотолщинность не более ±15 %;

интервал рабочих температур (-4÷+30)ºС;

интервал предельных температур (-50÷+70)ºС.

Образец пленки ПВДФ с нанесенным металлическим электродом.

Макеты электроакустических преобразователей из пленки ПВДФ.

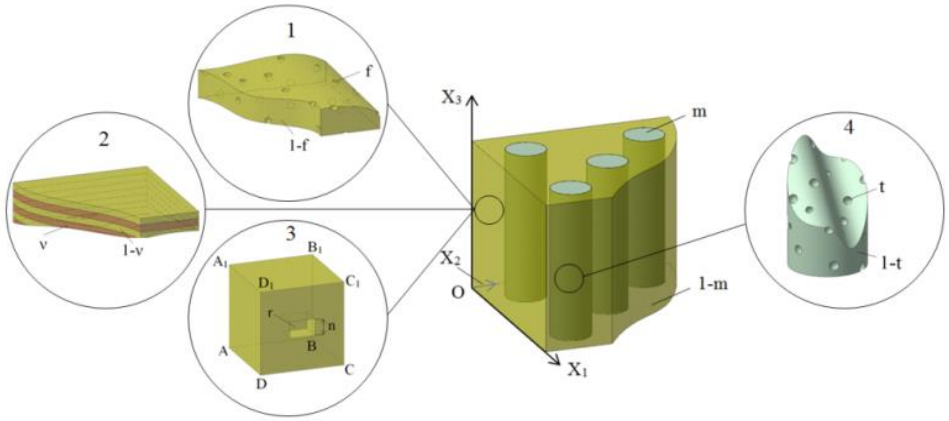


Приемник из ПВДФ.

Конструкция образца ЭАП включает:
пакеты из 16 ЧЭ на основе пьезопленки ПВДФ;
несущая пластина из листа АМГ-6;
электрический кабель;
герметичный ввод из резины;
герметизирующий слой из полиуретана.
Размеры образца ЭАП 120×120 мм;
Толщина образца ЭАП 10 мм.

II. Общие технические требования к чувствительным элементам на основе пьезокомпозита связности 1-3:

плотность 2-5 г/см^3;
относительная диэлектрическая проницаемость 200-550;
пьезомодуль d_{33} не менее $300\cdot10^{-12}$ Кл/Н, d_{31} не более $125\cdot10^{-12}$ Кл/Н;
тангенс угла диэлектрических потерь не более 2,5 %;
объемный пьезомодуль не менее $50\cdot10^{-12}$ Кл/Н;
скорость звука 1400-2450 м/с.



Построение чувствительного элемента на основе пьезокомпозита связности 1-3.

Результаты испытаний образцов ЭАП из ЧЭ на основе пьезокомпозита связности 1-3

Параметры	Требование ТЗ	
Габаритные размеры, мм	100×100, 50×50	
Электрическая емкость $C_{эл}$, пФ	не менее 900	
Чувствительность на частоте 1 кГц γ, мкВ/Па	не менее 150	
Гидростатическое давление, атм.	рабочее	60
	предельное	75
Климатические воздействия	минус 50°С − плюс 70°С	

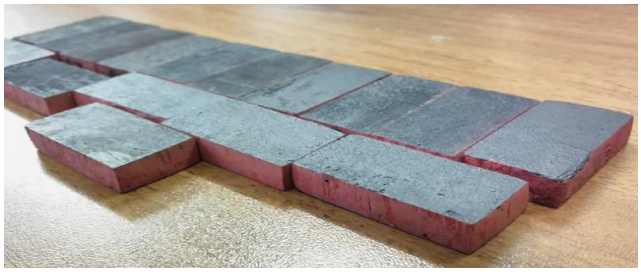
Образцы на основе пьезокомпозита размером (100×100×40) мм.

Образцы на основе пьезокомпозита размером (50×50×40) мм.

III. Общие технические требования к чувствительным элементам на основе сульфоиодида сурьмы SbSJ:

относительная диэлектрическая проницаемость ε в пределах 600-700;
объемный пьезомодуль не менее (400-500)·10^{-12} Кл/Н;
тангенс угла диэлектрических потерь не более 2-5%;
объемная чувствительность в пределах 55-65·10^{-3}В·м/Н;
температура Кюри 50±5ºС;
коэффициент электромеханической связи 0,65-0,70.

Текстуры (монокристаллы) сульфоиодида сурьмы.



Образцы чувствительных элементов.

Результаты испытаний образцов ЭАП из ЧЭ на основе сульфоиодида сурьмы

Параметры	Требования ТЗ	Результаты испытаний
Электрическая емкость $C_{эл}$, пФ	не менее 3000	3110-3140
Чувствительность на частоте 1 кГц мкВ/Па	не менее 500	516-574

Сопоставление полученных в ходе исследований образцов ЭАП с преобразователем, использующимся в серийно изготавливаемых гидроакустических антеннах того же назначения, позволило получить оценку выигрышей в применении новых материалов.

Параметр	Серийный ЭАП	ЭАП из ЧЭ на основе пленки ПВДФ	ЭАП из ЧЭ на основе пьезокомпозита связности 1-3		ЭАП из ЧЭ на основе пьезоматериала из сульфоиодида сурьмы
			50x50x40	100x100x40	
Активный импеданс пьезоматериала, кг/$м^2$с	25 10^6	1,9 10^6	3,1 10^6	3,5 10^6	6,3 10^6
Масса без учета экрана, г	495	196	105	331	410
Технологичность изготовления	средняя	высокая	высокая	высокая	средняя
Работоспособность на глубине, м	до 2 000	до 11 000	до 600	до 800	до 11 000
Чувствительность в режиме приема на частоте 1 кГц, мкВ/Па	450	220	345	410-470	600

Результаты исследований позволяют сформулировать некоторые выводы и области применения вновь созданных преобразователей для задач прикладной гидроакустики.

1. Впервые в РФ созданы гидроакустические приемные элементы на основе пьезоматериалов нового поколения – пьезопленок, пьезокомпозитов, пьезоматериалов на основе сульфоиодида сурьмы.

2. Проведенные исследования позволили сформулировать области применения разработанных преобразователей:

2.1. Приемные элементы на основе пьезопленки ПВДФ целесообразно применять при создании покровных бортовых гидроакустических антенн шумопеленгования для мобильных носителей, обладающих малыми габаритами, большей устойчивостью к воздействию гидродинамических помех. Малая толщина разработанных преобразователей позволяет формировать приемники кардиоидного типа, позволяющие минимизировать влияние помехи носителя на приемный режим ГАК. В ходе выполнения проекта создан макет фрагмента покровной антенны из преобразователей на основе пленки ПВДФ, испытания которого подтвердили основные предположения о повышении эффективности антенн ГАК, построенных на основе пленочных приемников.

2.2. Приемные элементы на основе сульфоиодида сурьмы целесообразно использовать при создании гидроакустических звукопрозрачных антенн с малыми массо-габаритными характеристиками, работающих в условиях высокого гидростатического давления. Еще одной возможностью использования таких преобразователей является применение их в гибких протяженных буксируемых антеннах малого диаметра.

2.3. Приемные элементы на основе пьезокомпозитов целесообразно использовать при создании гидроакустических антенн основных режимов ГАК с целью снижения вторичного поля, образующегося при отражении от антенн, размещенных на корпусе носителя, гидролокационных сигналов. Дополнительное поглощение обусловлено конструкцией преобразователя из пористой пьезокерамики и заполнителя, при этом обеспечивается дополнительное согласование приемных элементов ГАК со средой распространения.

Доклад подготовлен по результатам проекта «Корсар», выполненного АО «Концерн «Океанприбор» по заказу Фонда перспективных исследований в ноябре 2017 г.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМОВЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОКЕАНИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Д.Г.Левченко, д-р техн.наук, С.И.Бадулин, д-р физ-мат.наук
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

FEATURES OFGENERATION AND PROPAGATION OF NOISE SEISMOACOUSTIC FIELDS IN THE OCEANIC ENVIRONMENT

D.G.Levchenko, Dr.Sc., S.I.Badulin, Dr.Sc.
P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Рассматривается возбуждение гидроакустических шумов и микросейсм группой морских волн с переменной амплитудой. Анализируются спектры морских волн и сейсмоакустических полей. Исследуются особенности распространения полей по океаническим волноводам. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Generation of hydroacoustic noise and microseisms in a bottom by a group of sea waves with variable amplitude is considered. Spectra of sea waves and seismoacoustic fields are analyzed. Features of field propagation in oceanic waveguides are investigated. Results of experimental research are given.

Естественные шумы в толще воды, на дне и на суше (микросейсмы) определяют, как известно, порог чувствительности гидроакустических и сейсмических приборов. Одним из основных источников таких шумов в низкочастотном диапазоне (0,1 – 10 Гц) являются морские гравитационные волны [1]. Такие шумы обычно называют штормовыми микросейсмами независимо от места измерения: в воде, на дне или на континентах. Эти шумы обладают характерными свойствами: они практически не ослабляются с глубиной, распространяются на большие расстояния с малым затуханием, спектр их имеет удвоенную частоту по сравнению со спектром морских волн, форма спектра сохраняет высокую стабильность независимо от места и времени измерения.

Механизм возбуждения штормовых микросейсм стоячими гармоническими волнами в открытом океане был предложен М. Лонге-Хиггинсом в 50-х годах прошлого века и остается основным до настоящего времени [1-3]. Однако стоячая морская волна, образующаяся в результате столкновения двух бегущих волн с близкими параметрами, но с противоположными фазовыми скоростями, должна быть редким явлением в реальных акваториях. Микросейсмы же присутствуют всегда. В то же примерно время (в 60-е годы) было показано, что гармонические морские волны неустойчивы (неустойчивость Бенджамина – Фейра) и должны распадаться на группы волн (цуги), что и наблюдается в действительности [4-7].

Следует отметить, что к настоящему времени разработана нелинейная волновая теория, согласно которой могут существовать устойчивые группы бегущих морских волн с постоянной огибающей (групповые солитоны). Устойчивость группы объясняется равновесием между процессами ее расширения за счет дисперсии и сжатия за счет нелинейности. Такие группы волн описываются нелинейным дифференциальным уравнением Шредингера, которое имеет решение в виде произведения выражений для огибающей группы и заполняющих колебаний. При этом осциллирующие колебания движутся с фазовой скоростью, а огибающая с групповой [5]. В связи с этим, волны в группе пульсируют во времени и в пространстве. Обычно под огибающей солитона находится от 10 до 20 волн, причем средняя волна самая большая. Если в группе образовалось большее количество волн, то произойдет ее распад на несколько групп.

Насколько нам известно, ранее не проводилось определение вертикального давления, возбуждаемого солитоноподобными групповыми волнами и не изучалась возможность генерации ими микросейсм. В данной работе проводится исследование возможности расширения класса поверхностных морских волн, кроме стоячих, способных также порождать микросейсмы в глубоком океане. Работа является продолжением публикаций [8].

Под солетоноподобными понимаем отдельные группы морских волн, которые, как и в случае солитона огибающей, имеют достаточно узкие пространственный и частотно-временной спектры, слабую нелинейную зависимость частоты от амплитуды и характеризуются двумя временными и пространственными масштабами. Отличиями могут быть другая форма огибающей и возможная неполная компенсация дисперсии нелинейной зависимостью, что должно приводить к эволюции цуга. Однако эта эволюция должна быть достаточно медленной по сравнению с периодом осциляций в группе. Обязательным условием является возможность представления волновой группы как произведения функций зависящих только от времени или пространства.

В общем виде выражение для действительной части одномерной солитоноподобной группы волн можно представить следующим образом

$$u(t,x) = A(t)\,cos(k_1 x)\,sechk(x-ct). \quad (1)$$

Здесь $A(t)$ - переменная амплитуда, $sechk(x-ct)$ – огибающая и $cos(k_1 x)$ – заполняющие колебания. Пространственный график этой группы колебаний приведен на рис. 1. Полагаем, что $A(t)$ имеет узкий спектр, сосредоточенный вокруг центральной частоты осцилляций и ограниченный на интервале $[\omega_{min}, \omega_{max}]$. Следует отметить, что стоячую гармоническую волну $\eta(t,x) = A cos\omega t\, cos kx$ можно считать предельным случаем (1) при бесконечной огибающей и нулевой групповой скорости.

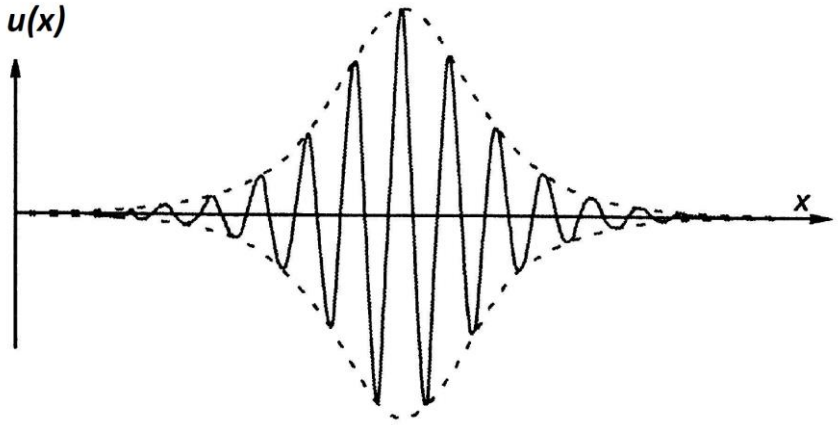


Рис. 1. Пространственный график солитоноподобной группы морских волн.

Рассмотрим вопрос возбуждения микросейсм подобной группой волн в глубоком океане. Рассматриваем плоскую волну в координатах x, z, а для сохранения объемной размерности в формулах принимаем длину волны вдоль гребня по оси y в один метр. Для простоты пренебрежем сжимаемостью воды в верхнем турбулентном слое толщиной h, примерно равной длине волны. Выделим участок морской поверхности L, равный эффективной длине группы волн (цуга) и движущийся с групповой скоростью c вдоль оси x. Поскольку в группе находится порядка 10 – 20 волн можно считать, что $L >> h$. Объем и массу группы в среднем считаем постоянными, т. к. нет источников и стоков жидкости. Полагаем, что все функции в (1) дифференцируемые и квадратично интегрируемые.

Найдем давление, оказываемое цугом волн на участке L на основание турбулентного слоя, как произведение ускорения центра тяжести цуга на его массу

$$p(t) = \rho g h + \frac{M}{L}\frac{\partial^2 z_c(t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где ρ – плотность, g – гравитационная постоянная, h – глубина турбулентного слоя, $M = \rho L h$ – удельная масса на единицу длины волны вдоль гребня и L – удельная площадь основания цуга, $z_c(t)$ – вертикальная координата центра тяжести цуга. В (2) первое слагаемое – стационарное давление, определяемое объемом воды в цуге. Второе – динамическое давление, обусловленное инерционными силами [2].

Найдем центр тяжести цуга $z_c(t)$ от основания турбулентного слоя с учетом (1) по известной формуле [9] $z_c = \int z^2(x)dx \,/ 2\int z(x)dx$

$$z_c(t) = \frac{1}{2Lh}\int^L [h + u(t,x)]^2 dx =$$

$$\frac{h}{2} + \frac{1}{L}A(t)\int^L \cos(k_1 x)\,sechk(x-ct)dx + \frac{1}{2Lh}A^2(t)\int^L [\cos(k_1 x)\,sechk(x-ct)]^2\,dx \quad (3)$$

Интеграл во втором слагаемом правой части (3) равен нулю. Следует отметить, что этот член, умноженный на массу M, определяет прямое давление внутри турбулентного слоя, которое, как известно, быстро затухает с глубиной по экспоненциальному закону. Интеграл в третьем слагаемом равен постоянной положительной величине (обозначим ее D).

Подставляем (5) в (4) и с учетом $M = \rho L h$ получаем

$$p(t) = \rho g h + \rho D\left[\dot{A}^2(t) + A(t)\ddot{A}(t)\right] = \rho g h + \tilde{p}(t), \quad (4)$$

где $\dot{A}(t)$ и $\ddot{A}(t)$ – первая и вторая производные по времени $A(t)$. Из (4) следует, что у основания турбулентного слоя имеется переменная вертикальная составляющая давления $\tilde{p}(t)$, которая должна возбуждать акустическое поле в глубине акватории.

Найдем спектр переменного давления $\tilde{p}(t)$. Согласно теореме Бореля спектр произведения функций равен свертке их спектров. Отсюда

$$F[\tilde{p}(t)] = \frac{\rho}{2}\{F[\dot{A}^2(t)] + F[A(t)\ddot{A}(t)]\} = -\frac{\rho}{4\pi}\{[\omega A(\omega)] \otimes [\omega A(\omega)] + [\omega^2 A(\omega)] \otimes [A(\omega)]\};$$

$$F[A(t)] = A(\omega); \quad F[\dot{A}(t)] = i\omega A(\omega); \quad F[\ddot{A}(t)] = -\omega^2 A(\omega). \qquad (5)$$

Здесь $F[\ ]$ – преобразование Фурье, $\otimes$ - знак свертки функций.

Следует отметить, что границы спектров функции *A(t)* и ее производных остаются одними и теми же $[\omega_{min}, \omega_{max}]$ (границы не меняются при умножении финитных спектров на число).

Из свойств свертки финитных спектров следует, что результирующий спектр состоит из двух финитных областей с границами равными сумме и разности границ исходных спектров [10]

Финитные функции: $A_1 \rightarrow [\omega_{1min},\ \omega_{1max}]$ и $A_2 \rightarrow [\omega_{2min},\ \omega_{2max}]$

$A_1 \otimes A_2 \rightarrow A_{12} \rightarrow [(\omega_{1min} + \omega_{2min}), (\omega_{1max} + \omega_{2max})]$ и $A_{21} \rightarrow [(\omega_{2min} - \omega_{1max}), (\omega_{2max} - \omega_{1min})]$. (6)

В нашем случае все спектры под знаком свертки в (5) имеют одинаковые границы $[\omega_{min}, \omega_{max}]$, поэтому в результирующем спектре давления, согласно (6), будут две области: одна, с границами $[2\omega_{min}, 2\omega_{max}]$ и вторая, в районе близких к нулю частот, с границами $[(\omega_{min} - \omega_{max}), (\omega_{max} - \omega_{min})]$. Поскольку $\omega_{max} > \omega_{min}$, то для положительных (реальных) частот границы второй области $[0, (\omega_{max} - \omega_{min})]$.

На рис. 2 условно представлены рассмотренные выше (5), (6) спектры: вверху – спектр исходного морского волнения, внизу – результирующий спектр давления, состоящий из двух областей. Одна из областей представляет собой удвоенный по частоте спектр морских волн, другая, в районе нулевых частот, может быть интерпретирована как спектр инфра низкочастотного шума (Earth's Hum – по международной классификации [11]).

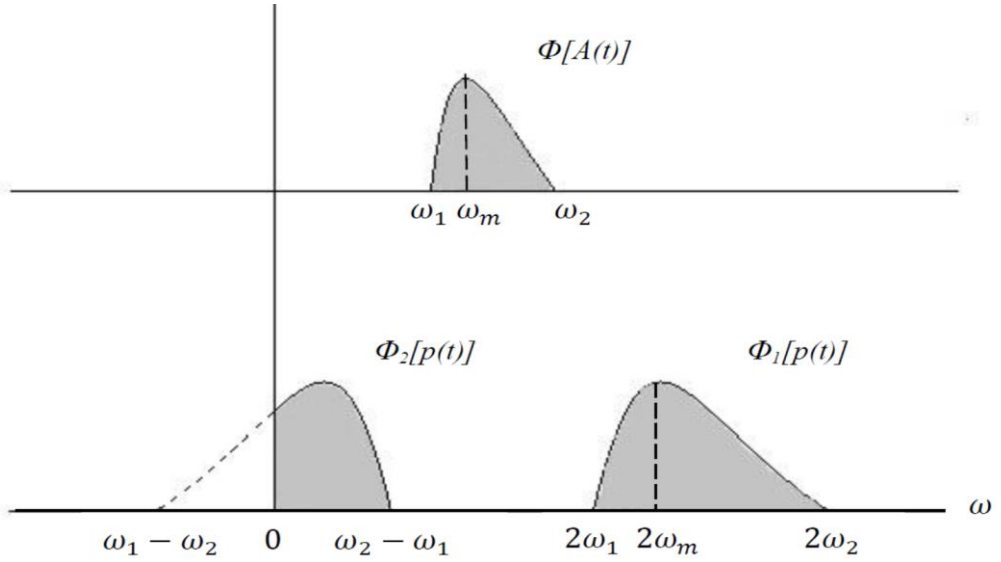


Рис. 2. Спектры морских волн (вверху) и микросейсм (внизу), (условные изображения).

Во время 45-го рейса НИС «Дмитрий Менделеев» (1989 г.) с помощью широкополосного донного сейсмографа ИО РАН была сделана восьмичасовая трехкомпонентная запись микросейсмических шумов на дне Эгейского моря ($39^0 39'$ с.ш. и $23^o 34'$ в.д., глубина 1230 м), и практически одновременно - гравитационных волн на его поверхности [12]. Во время работы станции (8-13 октября 1989 г.) был шторм (5–6 баллов).

Среднее значение периода микросейсм было равно 4,04 с при среднеквадратичном отклонении (СКО) 2,2 %. Среднее значение периода морских волн составляло 7,8 с, при СКО 6 %. Их отношение равно 1,9.

Сдвиг по фазе между сигналами микросейсм X и Z в среднем был около 90° с опережением по горизонтальному каналу. Таким образом, движение частиц дна происходило по прямым эллипсам, сильно вытянутым по горизонтали. Поэтому можно предположить, с учетом влияния водной среды, что в составе микросейсм на дне преобладали волны Релея [9].

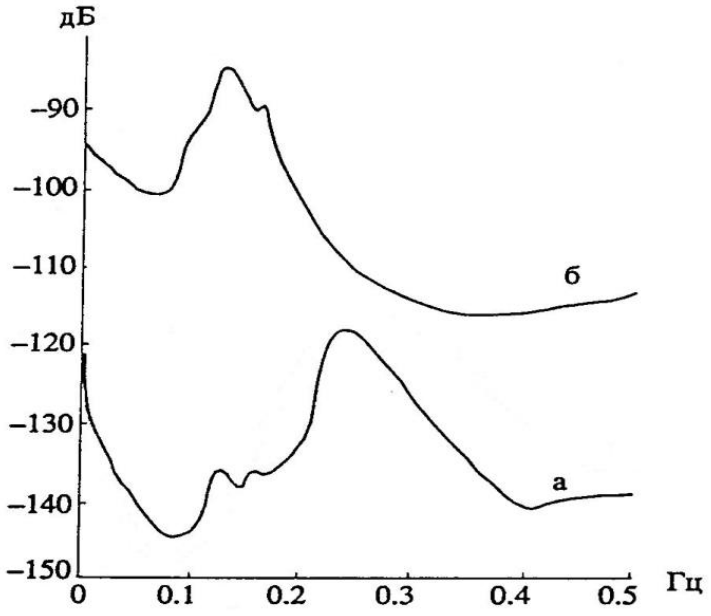


Рис. 3. Спектры микросейсм (а) и морских волн (б) по регистрации сейсмографом ИО РАН в Эгейском море. Максимумы спектров находятся на частотах 0,25 Гц и 0,13 Гц соответственно.

Отношения средних амплитуд микросейсм по осям составляли X : Y : Z = 16 : 1 : 2, а отношения средних движений морских волн по осям - X : Y : Z = 25 : 1 : 5. Отсюда можно сделать вывод, что направление распространения волн Релея в составе микросейсм совпадало с направлением ветра и морских волн.

Литература

1. Longuet-Higgins M. S. Can Sea waves cause microseisms? Proc. Symposium on Microseisms. Washington D.C., N.A.S. – N.R.C. Publ. № 306. 1952. P. 74-86.
2. Hasselmann, K. A. Statistical Analysis of the Generation of Microseisms // Rev. Geophys. 1963. V. 1. P. 177-210.
3. Бреховских Л.М. Звуковые волны под водой, обусловленные поверхностными волнами в океане// Физика атмосферы и океана. 1966. Т. II. №9. С. 970-980.
4. Benjamin T. B. and Feir J. The disintegration of wave trains on deep water, Journ.Fluid Mech., v.27, 417-430, (1967).
5. Захаров В.Е., Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости, ПМТФ. 1968. №2. , 86-94.
6. Додд Р., Эйлбек Д., Гиббон Д., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988, 694 с.
7. Островский Л.А., Потапов А.И. Введение в теорию модулированных волн. М.: Физматгиз. 2003. 400с.
8. Левченко Д. Г., Егоров И. В. О возбуждении штормовых микросейсм прогрессивными морскими волнами с переменной амплитудой. Доклады XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. 2013. С. 203-206.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука. 1980. С.422-450.
10. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Связьиздат. 1985. 188 с.
11. Rhie J., and Romanowicz B. A study of the relation between ocean storms and the Earth’s hum. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2006. V.7, N.10. doi:10.1029/2006GC001274. P. 1-23.
12. Жданов М.А., Левченко Д.Г., Соловьев С.Л. Об измерении донных сейсмических шумов в диапазоне 0,01-10 Гц // Океанология. 1993. Т. 33. № 2. С. 299-303.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОРСКИХ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л.С.Долин, канд.физ-мат.наук, О.В.Копелевич[1], д-р физ-мат.наук, А.Г.Лучинин, д-р физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

NEW RESULTS OF MARINE HYDRO-OPICAL STUDIES

L.S.Dolin, Ph.D., O.V.Kopelevich[1], Dr.Sc., A.G.Luchinin, Dr.Sc.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
[1]P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Дан краткий обзор основных достижений последнего десятилетия в области морских гидрооптических исследований, в первую очередь отечественных. Выделены четыре основных направления: 1. Оптические свойства морской воды и их изменчивость в зависимости от гидрофизических процессов; 2. Распространение света в море и характеристики подводных световых полей от естественных и искусственных источников излучения; 3. Дистанционные методы исследований и мониторинга морей и океанов, включая спутниковые; 4. Видение подводных объектов. По каждому разделу рассматриваются новые методы и аппаратура для проведения исследований, а также наиболее важные полученные результаты. Большое внимание уделяется арктическим морям, где наиболее ярко проявляются климатические изменения; отмечается комплексный подход, осуществляемый в арктических экспедициях, проводимых в последние годы. Обсуждаются новые методы расчета световых полей и оптических сигналов, оптические методы измерения характеристик ветрового волнения, использование лидаров для измерения оптических свойств воды и картографирования дна океана, принципы построения перспективных систем подводного видения и адаптивные методы наблюдения дна через взволнованную водную поверхность.

A brief review of the main achievements of the last decade in the field of marine hydro-optical research, primarily Russian ones, is given. Four main directions are defined: 1. Seawater optical properties and their variability depending on hydro-physical processes; 2. Light propagation in the sea and characteristics of underwater light fields from natural and artificial sources of radiation; 3. Remote sensing, including satellite, for research and monitoring of the seas and oceans; 4. Vision of underwater objects. For each direction, new methods and equipment for research are considered, as well as the most important results obtained. Special attention is paid to the Arctic seas, where the most pronounced climate change has been observed. A comprehensive approach to the Arctic studies being performed in recent years, is mentioned. New methods for calculating the light fields and optical signals, as well as measuring the characteristics of wind waves, the seawater optical properties and mapping the ocean floor are considered; the principles for constructing prospective underwater vision systems, and adaptive methods for observing the bottom through the rough sea surface are discussed.

В [1] был дан обширный обзор основных задач и направлений оптики океана, включая полученные результаты до 2007 г. В нашем обзоре представлены новые результаты последнего десятилетия. Из-за ограниченного объема, обзор не может претендовать на полноту; мы лишь отметим основные достижения без детального их описания. Вынуждены также ограничиться только основными ссылками на публикации последнего десятилетия, в первую очередь содержащие достаточно полные списки литературы.

Оптические свойства морской воды. Прежде всего, отметим существенный прогресс в разработке новых методов и средств измерений оптических характеристик, обеспечивающих возможность исследования их пространственных и временных изменений различных масштабов.

Автономные профилирующие биогеохимические буи Арго (BGC-Argo floats). Использование таких буев позволило за последние несколько лет резко увеличить количество измеренных вертикальных профилей биооптических и биогеохимических параметров, в том числе в удаленных районах и в периоды неблагоприятных погодных условий, когда судовые измерения невозможны. В зависимости от поставленных задач, измерения профилей программируются на 1, 2, 3, 5 или 10 дней; буй всплывает с «парковочной» глубины 1000 м; разрешение по вертикали – 10 м между 1000 и 250 м, 1 м между 10 и 250 м, 0.2 м между 10м и поверхностью. Набор датчиков обеспечивает, помимо температуры и солености, измерения вертикальных профилей облученности сверху для 3-х длин волн (380, 412 и 490 нм), фотосинтетически активной радиации ФАР, флуоресценции хлорофилла и окрашенного органического вещества, показателя рассеяния назад. В [2] представлены интересные результаты по выявлению «биооптических аномалий» в Мировом океане по данным измерений показателей диффузного ослабления $K_d(380)$ и $K_d(490)$ (анализировались около 3 тыс. профилей BGC-Argo).

Подводные планеры (Underwater Gliders). Так же как буи Арго, глайдеры осуществляют вертикальное профилирование изменением своей плавучести, но одновременно смещаются по горизонтали с помощью специальных крыльев, обеспечивающих горизонтальную составляющую движения. При типичной скорости горизонтального смещения 25 см/с глайдер на горизонтальных масштабах порядка 1 км позволяет исследовать фронты и вихри, а на меньших про-

странственных масштабах внутренние волны и турбулентность [3, 4]. На современных глайдерах, наряду с датчиками температуры и солености, устанавливают оптические измерители, в частности, ФАР, измерители биолюминесценции, флуоресценции и рассеяния назад.

Спутниковые сканеры цвета. Для исследования пространственно-временной изменчивости биооптических характеристик морей и океанов, автономные буи Арго и глайдеры являются хорошим дополнением к спутниковым сканерам цвета, давая возможность охватить измерениями почти всю толщу океана (до 6-7 км), однако сканеры цвета остаются основным инструментом исследования наиболее важного и интересного подповерхностного слоя, позволяя практически одновременно наблюдать большие акватории и получать долговременные ряды наблюдений. Спутниковые сканеры цвета можно подразделить на две категории: (1) глобальные с полосой охвата более 1000 км, позволяющие за 1-2 дня получать полное покрытие Мирового океана с пространственным разрешением порядка 0.3-1 км; (2) сканеры с пространственным разрешением 1-30 м и полосой охвата лишь до 40 км (http://www.ioccg.org/, www.eohandbook.com). Из глобальных сканеров, данные которых находятся в свободном доступе, продолжают работать MODIS-Terra и MODIS-Aqua, запущенные еще в декабре 1999 и мае 2002 г., также VIIRS/Suomi NPP (с октября 2011 г.), но появились два новых сканера. Это VIIRS/NOAA-20 и OLCI на европейском спутнике Sentinel 3A. Последний представляет собой усовершенствованный вариант известного европейского сканера MERIS, имеет полосу охвата 1270 км, два варианта пространственного разрешения 300 и 1200 м, 21 спектральный канал в диапазоне 400-1020 нм.

Вышеперечисленные сканеры работают на полярных орбитах, но есть и геостационарный сканер цвета GOCI, который держит под наблюдением площадь порядка 6 млн. кв. км (центральная точка 130^{o}в.д., 36^{o}с.ш.) с пространственным разрешением 500 м и осуществляет ежечасные измерения (8 спектральных каналов в диапазоне 400-865 нм).

Из сканеров 2-й категории назовем Landsat 7 и Landsat 8, имеющие полосу охвата 185 км и пространственное разрешение 30 м, а также MSI на европейском спутнике Sentinel 2 с полосой охвата 290 км и пространственным разрешением 10м (60 м для спектральных каналов при проведении атмосферной коррекции). Данные этих приборов находятся в свободном доступе. Можно также назвать российский прибор Геотон-Л1 на спутниках «Ресурс-П» № 1 и 2, пространственное разрешение которого в пяти спектральных полосах не хуже 3—4 м при ширине полосы 38 км (но эти данные в ограниченном доступе).

Использование данных спутниковых сканеров цвета для оценки биооптических характеристик поверхностного слоя вод морей и океанов. Этой проблеме посвящено большое количество публикаций – ограниченность объема не позволяет уделить ей здесь должное внимание. Публикации, посвященные морям России, широко представлены в Трудах конференций «Современные проблемы оптики естественных вод», которые проводились с 2001г. Ниже будут указаны отдельные статьи по этой и другим проблемам из Трудов последних конференций [5-7].

Судовые и авиационные дистанционные оптические измерители биооптических характеристик. Эти измерители подразделяются на пассивные, измеряющие спектральные характеристики выходящего из водной толщи солнечного излучения, и активные (лидары), которые зондируют водную толщу короткими лазерными импульсами.

Перспектива ближайшего будущего для пассивных измерителей – их использование с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА); концепция компактного акустооптического гиперспектрометра, предназначенного для БПЛА, представлена в [7] (Пожар и др., с.140-144).

Океанографические лидары подразделяются на «временные» и флуоресцентные. Первые основаны на измерении и последующей обработке временной зависимости «эхо-сигнала», формирующегося в результате рассеяния назад в водной толще зондирующего импульса; вторые - на измерении и анализе спектральных характеристик импульса обратного рассеяния, содержащих информацию о количественном и качественном составе флуоресцирующих компонентов морской воды.

«Временные» лидары дают возможность определять вертикальную структуру первичных оптических характеристик (ПГХ). Однако их определение затрудняется тем, что эхо-сигнал, возникающий при зондировании водной толщи лазерным импульсом, в общем случае зависит от целого набора ПГХ. Поэтому оценка значений ПГХ по сигналам одноканального лидара требует использования априорных данных об оптических свойствах воды в заданном районе океана. Роль таких данных могут выполнять регрессионные связи между ПГХ [8], позволяю-

щие свести решение обратной задачи к определению одной оптической характеристики, например, показателя ослабления. Однако использование этих регрессий при построении самого алгоритма обработки эхо-сигнала может приводить к большим ошибкам в определении показателя ослабления. Поэтому возникла необходимость разработки лидаров, приспособленных для измерения определенных ПГХ без привлечения дополнительной информации об оптических свойствах воды. К их числу относятся поляризационные лидары, которые разрабатываются и в судовом варианте и для использования с авианосителей. Новый морской поляризационный лидар ПЛД-1, предназначенный для исследования стратификации гидрооптических характеристик водной толщи, регистрации и оценки характеристик внутренних волн, обнаружения находящихся в толще воды объектов, представлен в статье Глухова и др. ([7], с.127-131). В этой статье также даны ссылки на отечественные и зарубежные разработки предыдущих лет.

В [9] показана возможность использования лидара с переменным апертурным углом фотоприемника или переменной базой «излучатель – приемник» для измерения частотно–контрастной характеристики (ЧКХ) водного слоя заданной толщины и восстановления показателя рассеяния и передней части индикатрисы рассеяния по измеренной ЧКХ. Располагая указанными данными, другие ПГХ можно оценивать с помощью упомянутых регрессий без риска получения результата, погрешность которого заметно отличается от погрешности самих регрессий.

В [6] представлен новый судовой лидар «ГИДРОБИОНТ», особенность которого совмещение поляризационного и спектрального измерительного каналов (Гольдин и др., с.160-165). В этом же выпуске описан малогабаритный судовой ультрафиолетовый флуоресцентный лидар, предназначенный для экспрессных определений в морской воде различных поглощающих и рассеивающих компонентов, а также пленок на морской поверхности; с его помощью можно проводить измерения даже с малых плавсредств (Пелевин и др., с.179-184).

Комплексные биооптические исследования в Арктике. В прошедшее десятилетие ИО РАН проводит систематические биооптические исследования в арктических морях России. В качестве примера приведем 68-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» летом 2017г. [10]. Комплекс оптических измерений в этом рейсе включал измерения на дрейфовых станциях и непрерывно на ходу судна с помощью проточной системы. На дрейфовых станциях измерялись вертикальные профили температуры и показателя ослабления света посредством погружаемого прозрачномера, отбирались пробы воды с выбранных горизонтов для лабораторных определений спектров флуоресценции ОРОВ и пигментов фитопланктона лазерным спектрометром, а также спектров поглощения морской воды, фильтратов и взвешенных частиц посредством измерителя спектрального поглощения с интегрирующей сферой. Комплекс световых измерений, выполнявшийся в светлое время суток, включал измерения спектрального состава солнечного излучения, выходящего из водной толщи, с помощью плавающего спектрорадиометра, поверхностной и подводной ФАР, спектральных величин поверхностной и подводной облученности приборами Li-COR и RAMSES. С помощью проточного флуориметра непрерывно измерялись флуоресценция хлорофилла Хл и ОРОВ, а также температура и соленость соответствующими датчиками. К сожалению, сплошная облачность на протяжении большей части экспедиции препятствовала получению спутниковых данных, и только в конце рейса появились «окна», благодаря которым удалось, в частности, получить представление о расположении кокколитофоридных цветений и провести там комплексные исследования. Более удачными в отношении спутниковых наблюдений оказались предыдущие рейсы 2014-2016 гг. [11]. Подобный комплексный подход использовался при проведении биооптических исследований в других арктических морях, при этом очень эффективным оказалось совместное использование данных непрерывных измерений на ходу судна с помощью проточной системы и спутниковых наблюдений. Интересные результаты таких исследований в Карском море, выполненных в летне-осенних рейсах НИС «Профессор Штокман» в 2013-2014 гг., представлены в [6] (Гольдин и др., с.17-21), а также в [7] (Глуховец и др., с.57-61).

Световые поля в море. Основные достижения в теоретических исследованиях подводных световых полей были связаны с установлением закономерностей распространения в море сложных оптических сигналов**.** В рамках автомодельного решения уточненного малоуглового приближения уравнения переноса излучения исследованы частотные зависимости фазовой и групповой скоростей волн фотонной плотности в анизотропно рассеивающей мутной среде типа морской воды. Показано, что по отношению к этим волнам мутная среда обладает аномаль-

ной дисперсией, а их фазовая и групповая скорости зависят от расстояния до источника излучения. Рассмотрена возможность временной фокусировки волн фотонной плотности при линейной частотной модуляции излучаемого импульса. Показано, что зависимость показателя ослабления волны фотонной плотности от ее частоты препятствует полному сжатию модулирующего сигнала (Лучинин, Долин [6, с.35-39]). Методом Монте-Карло исследована структура светового поля, создаваемого в морской воде точечным мононаправленным импульсным источником. Подтверждены основные дисперсионные эффекты, предсказанные в рамках приближенных решений нестационарного уравнения переноса излучения. Рассчитана форма импульса на оси пучка и в его приосевой области с разрешением по времени до одной пикосекунды. Показано, что при увеличении дальности наблюдается расщепление импульса на две части, формируемые баллистическими и многократно рассеянными фотонами. В области параметров, соответствующих расщеплению импульса, в спектре импульса формируется минимум, а поперечное распределение амплитуд спектральных гармоник имеет минимум на оси пучка [12]. В лабораторных условиях выполнено исследование частотных и фазовых характеристик гармонических составляющих нестационарных сигналов при распространении в модельных средах различной мутности [13]. Показано, что оптическая теорема взаимности накладывает определенные ограничения на характеристики «функции размытия пучка» (ФРП) - светового поля, создаваемого в мутной среде точечным мононаправленным источником. Дана математическая формулировка условия «скрытой» симметрии ФРП, вытекающей из теоремы взаимности, и предложен универсальный метод устранения погрешностей симметрии и повышения точности приближенных моделей ФРП, используемых для расчета световых полей в море (Долин [6, с.21-26]).

Дистанционные оптические методы диагностики поверхностного волнения. Оптический мониторинг водной среды с самолетов, спутников, судов, морских платформ и берега **в условиях естественного освещения** открывает широкие возможности для получения количественных данных о ветровом волнении, оптических свойствах воды и характеристиках дна на мелководье. Наиболее детальную информацию о **ветровом волнении** дают оптические устройства, действие которых основывается на анализе изображения водной поверхности, наблюдаемой в отраженном свете неба под скользящими углами. К их числу относятся, в частности, оптические волнографы ИПФ РАН (прибор «ДОСА» и система формирования мультиспектральных изображений водной поверхности в координатах «дальность – время» на основе ПЗС – фотоприемников), с помощью которых в морских условиях была исследована изменчивость пространственных спектров волнения (в диапазоне длин волн от сантиметров до метра) под влиянием различных факторов (Титов и др. [6, с.250-253]). Другой интересный способ диагностики поверхностного волнения позволяет определять пространственно–временную корреляционную функцию вектора уклонов поверхности путем обработки изображений определенных тест – объектов, наблюдаемых через границу раздела воздух – вода (Weber ([5, p. 230-233]).

Негативное влияние водной поверхности на **видимость дна водоемов** проявляется в рефракционных искажениях изображения дна (вызванных преломлением света на поверхности) и появлении в нем аддитивной помехи в виде изображения самой водной поверхности. Алгоритмы коррекции рефракционных искажений изображения дна с использованием изображения водной поверхности в качестве источника информации о ее рельефе в момент наблюдения дна были предложены достаточно давно. К настоящему времени принципиальная возможность такой коррекции подтверждена лабораторными и полунатурными экспериментами [14,15]. Эффективным средством подавления аддитивной помехи при наблюдении дна под скользящими углами может служит поляризационный фильтр, что создает предпосылки для формирования широкоугольных изображений дна путем совместной обработки результатов его фотографирования в неполяризованном и поляризованном свете (Долин, Турлаев [7, с.175-181]).

Лидарная батиметрия основывается на измерении разности времен прихода эхо - сигнала от дна и опорного сигнала, возникающего в результате отражения зондирующего импульса от поверхности и приповерхностного слоя воды. Максимальное значение измеряемой лидаром глубины в зависимости от энергетического потенциала лидара, оптических свойств воды и отражательных характеристик дна может меняться в пределах от нескольких десятков до единиц метров. Лидарный метод батиметрии перестает работать и при очень малых глубинах вследствие наложения донного сигнала на опорный. Для решения этой проблемы предлагается использовать специальные алгоритмы обработки указанных сигналов (вейвлет- анализ), а также

методы лазерной батиметрии, основанные на эффекте полного внутреннего отражения света от нижней стороны водной поверхности. Этот эффект может проявляться в изменении временной структуры приходящего от дна сигнала (появлении второго отраженного импульса) и в изменении структуры изображения дна, освещенного лазерным лучом (появлении в нем «гало»). Показано, что батиметрия с использованием двукратно отраженного от дна сигнала или изображения «гало» позволит существенно уменьшить минимальное значение глубины водоема, поддающейся измерению лидарным методом, и даст возможность повысить точность регистрации линии раздела «вода - суша» (Долин [7, с.102-107].

Лазерное наблюдение подводных объектов. Развитие теория лидарного наблюдения объектов через взволнованную водную поверхность было направлено в основном на поиск эффективных методов коррекции рефракционных искажений изображения, возникающих в результате преломления света на границе раздела вода - воздух. Были предложены новые принципы построения системы видения со сканирующим импульсным пучком подсветки, которые позволят снизить негативное влияние волнения и рассеяния света в воде на качество получаемого изображения. Искажения изображения, формируемого такой системой, обусловлены в основном случайными изменениями угла преломления лазерного пучка на поверхности и могут быть устранены, если известно истинное направление входа пучка в воду. Информацию об угле преломления пучка предложено извлекать из углового распределения яркости света, рассеянного подповерхностным слоем воды [16]. Показано, что такой метод формирования изображения позволит существенно улучшить разрешающую способность лазерной системы видения, размещенной на воздушном носителе.

Были теоретически исследованы возможности улучшения разрешающей способности подводных лазерных систем видения за счет использования импульсов подсветки ультракороткой длительности или модулирующих сигналов сверхвысокочастотного диапазона. Разработана методика непосредственного расчета оптических передаточных функций таких систем, уровней помехи обратного рассеяния и коэффициентов передачи полезного сигнала (Лучинин, Кириллин [7, с.5-10]. Методика основана на применении метода Монте-Карло и позволяет учитывать влияние разброса фотонов по путям пробега на пространственно-временную структуру световых полей, формирующих изображение наблюдаемых подводных объектов. Возможности применения частотной модуляции пучков подсветки в подводных системах видения исследованы теоретически с использованием приближенных аналитических решений уравнения переноса излучения [17] и в лабораторных экспериментах с использованием модельных рассеивающих сред [18].

Традиционная область применения средств подводного наблюдения – это изучение флоры и фауны Мирового океана, поиск объектов на морском дне и контроль его экологического состояния, строительство и ремонт подводных сооружений, аварийно-спасательные работы. Вместе с тем, эти средства можно использовать и для изучения верхнего слоя океана – определения характеристик ветрового волнения [19], обнаружения пленок ПАВ (Мольков, Долин [6, с.219-224]), оценки показателей поглощения и рассеяния приповерхностного слоя воды [20]. Указанная информация получается путем обработки двух элементов изображения нижней стороны водной поверхности – подводной солнечной дорожки (искаженного волнением изображения Солнца) и круга Снеллиуса - подводного изображения небосвода. Характеристики волнения (дисперсия и пространственно–временной коэффициент корреляции уклонов поверхности) определяются по случайным реализациям изображения поверхности, а ПГХ – по ее накопленному изображению.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00897) и гранта РНФ №14-50-00095 (направление «Взаимодействие физических, биологических и геологических процессов в береговой зоне, прибрежных акваториях и внутренних морях»).

Литература

1. Левин И.М. Перспективные направления развития оптических дистанционных методов исследования океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2008. №1. С.14-47.
2. Organelli E., Claustre H., Bricaud A., Barbier M., Uitz J., D'Ortenzio F., Dall'Olmo G. Bio-optical anomalies in the world's oceans: An investigation on the diffuse attenuation coefficients for downward irradiance derived from Biogeochemical Argo float measurements // J. Geophys. Res. Oceans, 122, doi:10.1002/2016JCO12629. P.1-22.
3. Rudnick D.L., Davis R.E., Eriksen C.C., Fratantoni D.M., Perry M.J. Underwater Gliders for Ocean Research // Marine Technology Society Journal. 2004. V.38, N.1. P.48-
4. Rudnick D.L. Ocean Research Enabled by Underwater Gliders // Annual Review of Marine Sciences. V.8. P.519-541.

5. Proceedings of the YII International Conference «Current problems in Optics of Natural Waters (ONW 2013)». 2013. 258p.
6. Труды VIII Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». 2015. 298с.
7. Труды IX Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». 2017. 242с.
8. Левин И.М., Копелевич О.В. Корреляционные связи между первичными гидрооптическими характеристиками в диапазоне 550 нм // Океанология. 2007. Т.47. № 3. С. 344-348.
9. Dolin L.S. Theory of lidar method for measurement of the modulation transfer function of water layers // Applied Optics. 2013. V. 52, No. 2, P. 199- 207.
10. Копелевич О.В., Артемьев В.А., Глуховец Д.И., Муравья В.О., Салинг И.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В Оценка биогеохимических характеристик поверхностного слоя вод Баренцева моря летом 2017 г. по оптическим данным // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва: ИО РАН. 2017. Т. IV. С.87-91.
11. Глуховец Д.И., Копелевич О.В., Салинг И.В., Артемьев В.А., Паутова Л.А., Ланге Е.К., Кравчишина М.Д. Биооптические характеристики вод поверхностного слоя Балтийского, Норвежского и Баренцева морей по судовым и спутниковым данным летом 2014-2016 гг. // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 410-418.
12. Luchinin A.G. and Kirillin M.Yu. Temporal and frequency characteristics of a narrow light beam in sea water. Applied Optics, **55**(27), (2016) DOI: 10.1364/AO.55.007756. 7756-7762
13. Cochenour B., Dunn K., Laux A., and Mullen L. Experimental measurements of the magnitude and phase response of high-frequency modulated light underwater // Appl. Opt. **56**, 4019-4024 (2017).
14. Levin I.M., Savchenko V.V., Osadchy V.Ju. Correction of an image distorted by a wavy water surface: laboratory experiment // Applied Optics. 2008. V.47, № 35, P. 6650-6655.
15. Турлаев Д.Г., Долин Л.С.. О наблюдении подводных объектов через взволнованную водную поверхность: новый алгоритм коррекции изображений и лабораторный эксперимент // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 370-376.
16. Лучинин А.Г. Принципы построения «идеальной» системы видения через взволнованную поверхность // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. С. 281-290.
17. Лучинин А.Г., Долин Л.С. Модель системы подводного видения со сложно модулированным пучком подсветки // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 50. №4. 2014. С. 468-476.
18. Mullen L., Lee R., and Nash J. Digital passband processing of wideband-modulated optical signals for enhanced underwater imaging // Appl. Opt. **55**, C18-C24 (2016).
19. Вебер В. Л. Использование явления полного внутреннего отражения света для диагностики морского ветрового волнения // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 6 , С. 530-540.
20. Долин Л.С., Мольков А.А. О возможности определения оптических свойств воды по изображению круга Снеллиуса // Изв. вузов. Радиофизика.2017. Т. 60, № 1 , С.13 -25.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЦУНАМИ НА БЕРЕГА И СООРУЖЕНИЯ

А.И.Зайцев[1,2], канд.физ-мат.наук, М.А.Клячко[3], канд.техн.наук, А.А.Куркин[2], д-р физ-мат.наук,
Е.Н.Пелиновский[2,4,5], д-р физ-мат.наук, А.С.Ялчинер[6], проф.
[1]Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
[2]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия
[3]АНО «Региональный альянс для анализа и уменьшения бедствий», Санкт-Петербург, Россия
[4]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
[5]Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики, Москва, Россия
[6]Технический университет Среднего Востока, Департамент гражданского строительства, Исследовательский центр океанской инженерии, Анкара, Турция

TSUNAMI ACTION ON COASTS AND CONSTRUCTIONS

A.I.Zaytsev[1,2], Ph.D., M.A.Klyachko[3], Ph.D., A.A.Kurkin[2], Dr.Sc., E.N.Pelinovsky[2,4,5], Dr.Sc., A.C.Yalciner[6], Ph.D.
[1]Special Research Bureau for Automation of Marine Research FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
[2]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia
[3]ANO «Regional Alliance for Analysis and Prevention of Disaster», St. Petersburg, Russia
[4]Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
[5]National Research University – Higher School of Economics, Moscow, Russia
[6]Middle East Technical University, Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Research Center, Ankara, Turkey

Дан обзор современных методов оценки цунами опасности и расчетов воздействия цунами на берега и сооружения. Приводятся примеры расчета проектных высот волн цунами с заданной обеспеченностью и карт заливания побережий волнами цунами, необходимые для эвакуации населения и обеспечения устойчивой работы портов и гаваней. Выделены характеристики силового воздействия волн цунами, которые уже «встроены» в вычислительные пакеты волн цунами. Даны примеры расчета силовых характеристик волн цунами в ряде акваторий.

The review of modern methods of tsunami risk evaluation and tsunami influence on the coasts and constructions estimation is given. Examples of computations of the design tsunami wave heights with given return period and tsunami flooding charts are demonstrated. Such charts are necessary for creating evacuation maps and mitigation of tsunami hazards in ports and harbors. The characteristics of tsunami influence incorporated in existing tsunami computer codes are discussed. Several examples of computation of tsunami forces for real harbors are given.

Цунами представляют собой длинные волны, возникающие в море вследствие подводных землетрясений, извержений подводных вулканов, подводных оползней, резкого изменения метеорологических условий и др. Около 80 % цунами возникают на периферии Тихого океана. При средней глубине океана 4 км скорость распространения цунами около 200 м/с. Имея высоту в открытом океане 1-2 м, на мелководье высота цунами могут увеличиваться до десятков метров и уходить вглубь суши на несколько километров. Крупнейшее катастрофическое событие в Индийском океане 26 декабря 2004 г. оказалось наиболее разрушительным за всю историю человечества: погибло более 200 тыс. человек. Цунами 2011 года в Японии привело к крупнейшей технологической катастрофе на атомном реакторе. Проблема цунами актуальна для России; цунами часто проявляются на Дальнем Востоке, однако они встречаются в Черном и Каспийском морях. Известны одиночные случаи цунами в Балтийском и Баренцевом морях. Именно поэтому во всем мире активизировались работы по оценке цунамириска, включающим разработку схем цунамирайонирования, карт эвакуации населения, укрепление существующих и проектирование специальных сооружений, способных ослабить действие волн цунами. В нашей стране с 2018 года введен в действие Свод правил № 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденный 23 июня 2017 года Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Аналогичные документы разрабатываются и в других странах. Выпущены также два специальных выпуска журнала РАН «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» (№№ 3 и 4 за 2017 г), посвященные воздействию цунами на берега и сооружения. Настоящий обзор посвящен изложению основных методов, лежащих в основе оценки цунами риска.

Долговременная оценка цунами опасности. На первых этапах оценки цунами опасности делались достаточно примитивно: выбиралась сейсмоактивная зона вблизи побережья, которая аппроксимировалась обобщенным очагом цунами, и затем рассчитывались высоты волн в ближайших точках побережья (см., например [1]). При этом имеющиеся данные наблюдений цунами использовались только для корректировки обобщенного очага цунами. В дальнейшем по аналогии с ветровыми волнами начал рассматриваться ряд наблюдений цунами, для которого строились кривые: частота повторяемости-высота волны. Однако цунами достаточно редкое

событие по сравнению с аномально большими ветровыми волнами, так что статистика цунами для многих пунктов не является представительной. Оригинальный подход был развит В. Кайстренко, который предложил так называемую двух-параметрическую схему цунами-районирования, основанную на вероятностном анализе наблюдений цунами и численном моделировании цунами в пункты, где нет наблюдений [2]. На этой основе сделаны оценки высот волн цунами на Дальнем Востоке России на период в 100 лет, которые непрерывно уточняются [3]. Этот метод, к сожалению, применим к районам с относительно частой повторяемостью цунами, и неприменим, например, к Черному морю, где за всю историю было около 50 случаев цунами, информация по которым весьма расплывчата. Особо остро эта проблема встала для бассейна Индийского океана, где вообще не было службы предупреждения цунами из-за почти полного отсутствия оных за последние 100 лет. Сейчас разрабатывается другая технология оценки цунами опасности, получившая название PTHA (Probability Tsunami Hazard Assessment). Она основана на прогностическом каталоге сильных землетрясений на период в десятки тысяч лет с последующим расчетом характеристик цунами от каждого такого возможного события. Так, например, синтетический каталог цунамигенных землетрясений в Средиземном море содержит 84 920 землетрясений с магнитудой $M > 6.5$ на период 100 000 лет [4]. Последующие затем расчеты такого большого количества сценариев цунами весьма затратны, и поэтому проводятся на относительно грубых сетках (шаг около 4 км) с исключением зоны наката (точнее, с использованием аналитических формул линейной теории для пересчета в высоту волны на берегу). На рис. 1 (см. вклейку) показана рассчитанная частота повторяемости высот цунами области Египта, где будет сооружена АЭС российскими специалистами. Как видим, проектная высота волн с вероятностью 10^{-4} (на период в 10000 лет) составляет 6.5 м. Разумеется, эта оценка весьма усредненная, и далее необходимо выполнить более детальные расчеты (на более крупных сетках с шагом несколько метров) характеристик цунами на берегу, в том числе и с учетом проектируемых конструкций, что и будет описано в презентации.

Карты заливания берега волнами цунами. В качестве примера расчета воздействия цунами на крупные хозяйственные объекты рассмотрим проблему устойчивой работы порта Хайдарпаша (Hyydarpasa) расположенного в районе мегаполиса Стамбул (Турция). Данный порт выбран в качестве тестового в рамках международного европейского проекта ASTARTE, в котором принимали участие авторы доклада. Для этого пришлось приготовить сначала детальные карты морского дна и побережья, так чтобы обеспечить шаг по пространству до 1 м. Затем был выбран «проектный» наиболее вероятный сценарий цунами, для которого и выполнены все расчеты. Расчеты распространения цунами в Мраморном море проводились на вложенных сетках с шагами от 90 м до 1 м в рамках уравнений мелкой воды с помощью вычислительного комплекса NAMI-DANCE, прошедшего верификацию на международном уровне. Результаты расчетов показывают, что головная волна цунами достигает области порта через 5 минут после землетрясения, так что времени на объявление тревоги цунами и эвакуации населения практически нет. После 20 минут произойдет наибольшее затопление порта. Рис. 2 (см. вклейку) показывает зону максимального затопления в порту Хадрапаша. Максимальные значения высот волн в районе порта находятся в диапазоне 4.5 - 6 м, максимальная протяженность зоны затопления 340 м на одном из доков в порту (юго-восточная часть). Важно указать здесь, что расчеты не учитывают возможное изменение уровня воды в случаях ветрового нагона или барометрических эффектов. Текущие значения скоростей течения превышают 6 м/с в некоторых местах, особенно в области, ограниченном двумя параллельными волнорезами. Моделирование показывает, что волна двигалась параллельно волнорезам. Сильный водный поток у волнореза из насыпи щебня, возможно, вызовет обвал и разрушение волнорезов, что приведет к увеличению уровня затопления цунами. Такие возможные сценарии с разрушением волнорезов требуют отдельного моделирования. Отметим, что данный порт является самым большим контейнерным портом в Мраморном море, и большое количество контейнеров обычно присутствуют в зоне причала. Большие суда (контейнеровозы), пришвартованные в гавани, могут сопротивляться водному движению, и влиять на зону затопления. Их размер превышает размер сетки и, в принципе, они должны учитываться в расчетах, что пока не сделано. С другой стороны, необходимо учитывать перемещение сильным потоком плавающих объектов, таких как грузовые суда, паромы, контейнеры и т.д. Они также могут повредить некоторые сооружения около берега. Выбранная область исследования является очень урбанизированной и в ней много объектов в прибрежной зоне, поэтому разрушения могут оказаться весьма большими. Устойчивость работы

порта Хадрапаша важна для Стамбула. Операции по порту не должны быть надолго свернуты после цунами. Поэтому прогноз возможных повреждений в порту волнами цунами крайне необходим для увеличения устойчивости работы порта и снижения убытков от цунами. Более подробное изложение полученных результатов можно найти [5].

Силовые характеристики воздействия волн цунами на одиночные преграды. Расчеты уровней затопления и скоростей потока в волнах цунами сейчас стали общепринятыми и проводятся всеми известными вычислительными комплексами, решающими уравнения мелкой воды и их дисперсионные обобщения. Расчеты же силовых характеристик цунами проводятся существенно реже. В практике расчета нагрузок от ветровых волн они считаются на втором этапе, когда волновой режим в море известен и его легко пересчитать в любую точку гавани. Этот путь практически неприемлем для цунами. Волны цунами - это длинные волны, масштаб которых сопоставим с размерами прибрежных сооружений (гаванями и портами), так что нельзя пересчитать волновое поле с открытого моря на проектируемую точку строительства с помощью простых номограмм (работающих для коротких волн в рамках метода геометрической оптики), как это делается для ветровых волн. Поэтому проектирование крупных объектов в прибрежной зоне должно всегда сопровождаться моделированием волнового режима с учетом возводимого сооружения, поскольку меняются резонансные свойства акваторий и положения экстремумов волн. Только для относительно простых конструкций можно выполнять расчеты волнового поля независимо от сооружений, а уж потом рассчитывать отдельно нагрузки на них. Такая ситуация, в частности, реализуется в случае одиночных вертикальных преград малого (по сравнению с длиной волны цунами) диаметра. В некоторых случаях диаметр опоры настолько мал, что она является «подсеточной», и возмущение, вносимое объектом, практически не сказывается на распределение элементов волнового поля. Именно в таких случаях можно пользоваться классическими формулами для сил и моментов сил. В частности, сила давления в гидростатическом приближении есть

$$F_h = \frac{1}{2}\rho_w g D S, \tag{1}$$

где ρ_w – плотность морской воды, D – полная глубина воды (с учетом высоты волны), S – площадь поперечного сечения (по направлению распространения волны). Как видим, расчет силы давления при известной высоте волны цунами не представляет трудностей и все характеристики сооружения (диаметр, или ширина стенки) определяют только численный коэффициент в формуле (1).

Волновой поток при цунами является турбулизованным и тело в водном потоке испытывает силу лобового сопротивления, которая аппроксимируется формулой

$$F_f = \frac{1}{2}\rho_w C_D u^2 S, \tag{2}$$

где C_D – коэффициент лобового сопротивления, который сейчас легко найти в справочниках, а u есть скорость течения в расчетной точке без учета конструкции. Таким образом, и силу сопротивления также легко посчитать, используя данные моделирования цунами в акватории.
Соотношение двух компонент сил воздействия на одиночную преграду малого диаметра, как это видно из (1) и (2) определяет так называемое “гидродинамическое воздействие”, пропорциональное числу Фруда Fr [6, 7]

$$HD = \frac{F_f}{F_h} = C_D \frac{u^2}{g\,D} = C_D F_R{}^2 \qquad Fr = \frac{u}{\sqrt{g\,D}} \tag{3}$$

и этот параметр полностью определяется волновым потоком. Расчет числа Фруда позволяет судить о соотношении сил воздействия на сооружения. Вычисление всех параметров, перечисленных выше, легко «встраивается» в любой вычислительный комплекс, и в частности, это уже сделано в нашем комплексе NAMI-DANCE.

Для демонстрации расчетов силовых характеристик был выбран бассейн длиной 2000 м и шириной 1000 м с максимальной глубиной 50 м (рис. 3, см. вклейку). Жилая постройка на берегу отделена от воды защитной стенкой (дамбой) высотой 4 м. На глубине 10 м имеется волнорез. Уклон дна в бассейне 1:20. Стоит отметить, что здания и другие прибрежные структуры считаются зафиксированными, то есть они не смещаются во время воздействия волны, также предполагается, что дно не размывается волнами цунами. На вход бассейна подавался одиночный синусоидальный гребень высотой 4 м с различными периодами. Шаг сетки составлял 2 м в x и y

направлениях. Расчеты числа Фруда представлены на рис. 3. Волновой поток всегда является сверхкритическим, и сила лобового сопротивления всегда превышает силу давления. Видно также, что жилая постройка оказывается затопленной, хотя перелив воды непосредственно через дамбу и слабый. Для более эффективной защиты дамба должна быть более протяженной, что удорожает строительство в прибрежной зоне. Более подробно результаты расчетов числа Фруда для ряда конкретных заливов приведены в работах [8].

Перемещение донных осадков. Волны большой амплитуды вызывают движение наносов, меняющих морфологию морского дна и берегов (см., например, [9]). Для их анализа необходимо решать уравнения транспорта наносов [10], что усложняет вычисления. Между тем, интенсивность транспорта наносов можно грубо характеризовать числом Рауза, названном по имени Hunter Rouse) [11], см. также энциклопедическую статью. https://en.wikipedia.org/wiki/Rouse_number. Это безразмерное число используется для характеристики профиля концентрации взвешенных частиц под действием водного потока [9, 10]. Математически число Рауза определено как отношение скорости падения взвешенных частиц W_s к сдвиговой скорости неоднородного по вертикали водного потока u_*

$$R_0 = \frac{W_s}{\beta \kappa u_*}, \tag{4}$$

где k - постоянная Кармана (равная 0.4) и β - отношение вихревой вязкости к вихревой диффузии (приблизительно равное 1). Величина скорости падения частиц зависит от их характеристик

$$W_s = \frac{8\nu}{d}\left[\sqrt{1+\frac{(s-1)gd^3}{72\nu^2}}-1\right], \tag{5}$$

где s – отношение плотности частиц к плотности воды (примерно 2.6), d - средний размер частицы (зерна), g – ускорение силы тяжести, и ν - кинематическая вязкость (10^{-6} м^2/с). Сдвиговую скорость можно грубо связать со скоростью течения воды [11]

$$u_* = U\sqrt{\frac{f}{8}}, \tag{6}$$

где f - коэффициент трения Дарси, изменяющийся в диапазоне (0.006–0.039). Предполагается, что он равен 0.01 в случае цунами [Анцыферов и Касьян, 1986]. Средний размер зерна (d) для акватории принят равным 0.3 мм [12]. В наших расчетах все значения констант приняты неизменными для бассейна, но естественно их легко менять, зная свойства донного грунта. В результате, число Рауза обратно пропорционально скорости водного потока с точностью до константы. Принято считать, что инициирование движения наносов происходит при числах Рауза около 7, в диапазоне 2.5–7.5 происходит движение влекомых наносов (bed-load). Движению взвешенных осадков соответствуют числа Рауза 0.8–1.2. При меньших значениях числа Рауза происходит сильное движение донных осадков, приводящее к значительным деформациям дна [11]. Рассчитывая скорость водного потока и определяя число Раузе, мы можем судить о характере донных процессов. Для районов интенсивного изменения морфологии дна можно затем выполнить отдельное моделирование количественных характеристик транспорта наносов, используя модели [10, 13].

Пример расчета вхождения волны цунами в бухту показан на рис. 4, где приведено распределение максимальных скоростей (слева) и значений числа Раузе (справа). Согласно диапазону изменения числа Рауза, о котором говорилось выше, во внешнем углу бассейна) должно происходить изменение дна. Отсюда следует, что волны цунами приводят к значительному перемещению донных отложений, меняющих рельеф дна. Другие примеры расчета параметра Рауза приведены в статьях [12, 14]. В заключение укажем, что на наш взгляд, использование числа Рауза в вычислительных комплексах решения уравнений мелкой воды позволяет без особых трудностей определить зоны интенсивного транспорта наносов, характеристики которого могут быть рассчитаны на следующем этапе в рамках транспортных уравнений.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 5.4568.2017/6.7 и № 5.5176.2017/8.9), а также при финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и грантов РФФИ (16-01-00267 и 17-05-00067), проекта ASTARTE (FP7 No: 603839).

Литература

1. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ РАН, 1982.
2. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР // Тихоокеанский ежегодник. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9-17.
3. Кайстренко В.М. Количественная оценка цунамиопасности и карты цунами районирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10. № 3. С. 39-55.
4. Sørensen M.B., Spada M., Babeyko A., Wiemer S., Grünthal G. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea // Journal of Geophysical Research. 2012. V. 117. B01305.
5. Aytore B., Yalciner A.C., Zaytsev A., Cankaya Z.C., Suzen M.L. Assessment of tsunami resilience of Haydrapasa port in the Sea of Marmara by high resolution numerical modeling // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. No. 1. P. 139-150
6. Ozer C. Investigation of Hydrodynamic Demands of Tsunamis in Inundation Zone, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2007, 124 p.
7. Ozer C., Yalciner A.C. Sensitivity Study of Hydrodynamic Parameters during Numerical Simulations of Tsunami Inundation // Pure Applied Geophysics. 2011. doi10.1007/s00024-011-0290-6.
8. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A. Investigation of Tsunami Hydrodynamic Parameters in Inundation Zones with Different Structural Layouts // Pure Applied Geophysics. 2015. V. 172. P. 931–952.
9. Kioka W.R. Long period oscillations in a harbour caused by typhoon//J.Mar.Sci.Eng. 2016. V.4. P. 55-1- 11.
10. Jeong W.M.; Chae J.W.; Park W.S.; Jung K.T. Field measurements and numerical modelling of harbour oscillations during storm waves // In Coastal Engineering; ASCE, 1996. P. 1268–1279.
11. Анцыферов С.М., Косьян Р.Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М.: Наука, 1986.
12. Kian R., Velioglu D., Yalciner A.C. and Zaytsev A. Effects of Harbor Shape on the Induced Sedimentation L-Type Basin // Journal of Marine Science and Engineering. 2016. V. 4. P. 55-65
13. Bellotti G.; Franco L. Measurement of long waves at the harbor of Marina di Carrara, Italy // Ocean Dynamic. 2011. V. 61. P. 2051–2059.
14. Зайцев А.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ялченир А., Киан Р. Исследование влияния формы залива на отложение донных осадков под воздействием волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10. № 3. С. 73-77.

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРИЛИВНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

А.В.Зимин[1], д-р геогр.наук, А.А.Родионов[1], д-р техн.наук, Д.А.Романенков[1], к.геогр.наук, О.А.Ататджанова[1,2], Е.И.Свергун[1,2], А.А.Коник[1,2]
[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский филиал, Москва, Россия
[2]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

SUBMESOSCALE PROCESSES AND TIDAL PHENOMENA IN THE ARCTIC SEAS

A.V.Zimin[1], Dr. Sc., A.A.Rodionov[1], Dr. Sc., D.A.Romanenkov[1], Cand.Sc., O.A.Atatdzhanova[1,2], E.I.Svergun[1,2], A.A.Konik[1,2]
[1]P.P. Shirshov Institute of oceanology, Russian Academy of sciences, Moscow, Russia
[2]Russian State Hydrometeorological university, St.-Petersburg, Russia

На обширном материале высокоразрешающих контактных и дистанционных наблюдений за 2006–2016 годы проведено комплексное исследование короткопериодной изменчивости гидрологических полей и субмезомасштабных процессов в приливных арктических морях. Создана база данных судовых наблюдений и получены числовые оценки изменчивости температуры, солености и течений на масштабах меньше приливного цикла в различных по гидрологическим условиям районах Белого моря. На основе обработки данных спутниковых радиолокационных и инфракрасных сенсоров с привлечением данных судовых наблюдений установлены особенности пространственно-временной изменчивости характеристик субмезомасштабных структур, синоптической и мезомасштабной фронтальной динамики в Белом, Баренцевом и Карском морях. Совместное использование результатов контактных и спутниковых наблюдений позволило получить оценки особенностей турбулентного обмена на масштабах приливного цикла, учитывающие влияние субприливных явлений.

A comprehensive study of short-period variability of hydrological fields and sub-mesoscale processes in the tidal Arctic seas was carried out on the extensive material of high-resolution contact and remote observations for 2006–2016. A database of ship observations has been created and numerical estimates of the variability of temperature, salinity and currents at scales less than the tidal cycle in the various regions of the White Sea in terms of hydrological conditions have been obtained. Based on the processing of satellite radar and infrared sensors data with the use of ship observations data, the features of the spatio-temporal variability of the characteristics of sub-mesoscale structures, synoptic and mesoscale frontal dynamics in the White, Barents and Kara seas have been established. The joint use of the results of contact and satellite observations made it possible to obtain estimates of the features of turbulent exchange at scales of the tidal cycle, taking into account the influence of sub-tidal phenomena.

Наблюдения последних лет позволили обнаружить значительную изменчивость температуры, солености и течений на масштабах от сотен метров до единиц километров и от долей часа до суток. Она связывается с короткопериодными внутренними волнами, малыми вихревыми структурами, фронтальной динамикой. Эти процессы и явления относятся к субмезомасштабным [1, 2]. Процессы такого масштаба не принадлежат в полной мере ни к трехмерным, ни к гидростатическим [3] и при этом являются переходным звеном (в энергетическом аспекте) от мезомасштабных процессов к мелкомасштабным [1].

В силу сложности теоретического описания и трудностей экспериментальных наблюдений субмезомасштабных процессов обусловленная ими изменчивость гидрофизических полей оказалась недостаточно изученной в прошлые десятилетия. Это относится к морям российской Арктики, где в последние годы отмечаются заметные изменения климатических характеристик вод. Недостаток знаний препятствует эффективному прогнозированию гидрологических условий, важных для решения прикладных задач, имеющих значительное оборонное и хозяйственное значение для развития Арктической зоны Российской Федерации. Особенно остро стоит данный вопрос в связи с широкомасштабным развитием хозяйственной деятельности по разведке и добыче углеводородного сырья в Баренцевом и Карском морях и повышением объема перевозок по Северному морскому пути [4, 5].

В условиях современного меняющегося климата в морях Северного Ледовитого океана увеличивается безледный период, и использование спутниковых данных в сочетании с целенаправленными экспедиционными работами позволяет на систематическом материале за теплый сезон года оценить особенности распространенности субмезомасштабных структур на акватории сразу нескольких арктических морей.

В работе сделана попытка на основе систематических высокоразрешающих контактных и дистанционных наблюдений установить пространственно-временные закономерности субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в приливных арктических (Белом, Баренцевом и Карском) морях на фоне процессов большего масштаба.

Методологическую основу работы составлял подход, базирующийся на получении и комплексной обработке результатов разнородных высокоразрешающих по времени и пространству контактных и дистанционных наблюдений, путем их сопоставления, картографирования, ста-

тистического анализа, а также теоретического анализа факторов и процессов, формирующих изменчивость гидрофизических полей на субмезомасштабном интервале изменчивости в приливном море.

Исходными данными для исследования являлись: данные учащенных по времени и пространству наблюдений на океанографических полигонах и разрезах, выполненные в летние сезоны 2006–2014 гг. в различных по гидрологическим условиям районах по методике, защищенной авторским свидетельством [6]; радиолокационные изображения: Envisat ASAR, Radarsat-1, Radarsat-2 за 2007, 2009–2012 гг.; данные по температуре поверхности моря MODIS Aqua и Terra за 2010 г., суточные данные температуры продукта GHRSST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis за 2007 и 2011 гг. Дополнительно привлекались открытые архивы данных моделирования баротропного прилива и метеорологические карты приземного анализа.

Выявлено [7], что максимальный вклад в короткопериодную изменчивость гидрофизических полей в Белом море наблюдается в интервале от 8 мин до 2 ч в области приповерхностного пикноклина вблизи фронтальных зон. Показано, что эта изменчивость связана преимущественно с прохождением пакетов короткопериодных (нелинейных) внутренних волн и малых вихревых структур.

Установлено [8, 9], что короткопериодные внутренние волны в Белом море регулярно встречаются в южной части пролива Горло, в Двинском заливе и вокруг Соловецких островов. Аналогично в Баренцевом море районы регулярной генерации внутренних волн находятся к западу от арх. Земля Франца-Иосифа (у западного мыса о. Земля Александры), к северо-востоку и северо-западу от арх. Шпицберген, на выходе из пролива Карские Ворота и в южной части моря вблизи Воронки Белого моря. В Карском море основные районы наблюдения волн находятся в проливе Карские Ворота, над юго-восточной частью Новоземельской впадины и к северо-востоку от м. Желания.

По данным контактных измерений, выполненных в выделенных по спутниковым данным районах Белого и Баренцева моря, установлено [10], что за сутки в каждом из них отмечается от 50 до 150 волн. Их средняя высота меняется от 2 до 6 м. Наиболее часто регистрируются волны с периодами от 8 до 24 мин. Их средняя высота меняется от 2 до 6 м. Максимальная высота зарегистрированных волн достигла 17.9 м (Белое море). Регулярность наблюдений короткопериодных внутренних волн в контактных данных в определенную фазу прилива M_2 подтверждает вывод о преимущественно приливном физическом механизме их образования.

Оценки вероятности появления экстремальных внутренних волн один раз месяц показали, что максимальные из них ожидаются в Белом море, в районе Западной Соловецкой салмы (28 м), на южной границе пролива Горло в Белом море и в южной части Баренцева моря (за тот же период они составляют немного более 10 м). Прохождение пакетов подобных экстремальных волн приводит к резкой перестройке вертикальной структуры вод [7] и может оказывать влияние на установленные на дне гидротехнические сооружения. Скорости придонных течений, индуцируемых интенсивными внутренними волнами в относительно мелководных районах шельфа, могут составлять от 7 до 17 см/с. Соответственно они способны размывать илистые и песчаные грунты и могут оказать влияние на устойчивость подводных гидротехнических сооружений.

Установлено [11], что вихри встречались почти на всей акватории указанных морей (рис.1). Районами наибольшей встречаемости вихрей в Белом море были Двинский залив, область севернее Соловецких островов и вдоль Терского берега. В Баренцевом море – южная часть моря, районы к западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, возле восточного берега острова Западный Шпицберген, между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа, и в Карском море – между северной частью архипелага Новая Земля и полуостровом Ямал, в районе о-вов Уединения и Свердрупа.

Максимальная частота встречаемости вихрей наблюдается для вихрей с размерами близкими к оценкам первого бароклинного радиуса деформации (внутреннего радиуса Россби). Вихри с диаметрами менее 6 км, которые мы относим к субмезомасштабу, встречались чаще всего в Карском море – в 95 % случаев. В Белом море они регистрировались примерно в 80 % случаев, в Баренцевом – около 85 %. Также есть случаи, когда вихри имели диаметры до 25 км (в частности, в Баренцевом море). Средний диаметр вихрей варьировал от 2.4 км в Карском море до 4.7 км в Белом море.

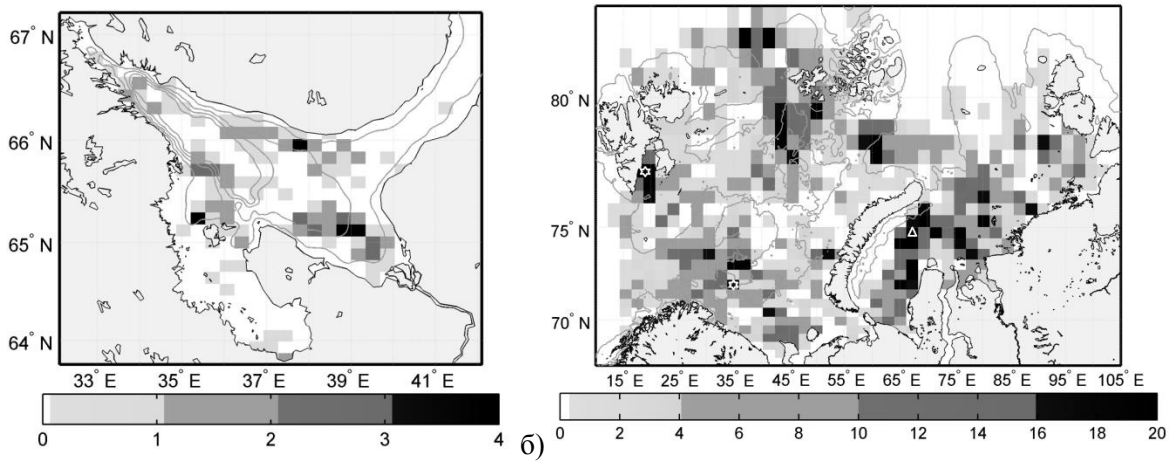


Рис. 1 – Распределение количества вихревых структур в штуках на единицу площади на акватории Белого (а), Баренцева и Карского (б) морей.

В исследуемых морях механизмами формирования вихревых структур, по-видимому, являются динамика и неустойчивость фронтов различного происхождения, а также топографические эффекты. Пик наибольшей вихревой активности наблюдался в июле для Баренцева и Белого морей и в августе – для Карского моря. Отметим, что в Карском и Белом морях значительное количество вихрей располагается вблизи фронтальных зон речных плюмов, причем в Карском море максимум речного стока по климатическим нормам приходится на август, а в Белом море – на июль. Тот факт, что максимальная встречаемость вихрей во всех морях имела место вблизи фронтальных зон и соответствовала месяцам наибольшей активности гидрологических фронтов, должен мотивировать дальнейшие исследования закономерностей изменчивости фронтов и ее связи с вихревой динамикой в Арктике.

Идентифицированы положения фронтальных разделов и описана их динамика на различных временных интервалах [12, 13]. По данным спутниковых наблюдений установлено, что интенсивная синоптическая изменчивость поверхностных фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним за лето и не отражают особенности внутрисезонного хода фронтальной динамики.

Показана роль фронтов [13] в динамике короткопериодных волн и субмезомасштабных вихрей: значительное число субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн детектируются во фронтальных зонах или вблизи них. Субмезомасштабные вихревые структуры регистрируются преимущественно внутри стоковых и прикромочных фронтальных зон; повышение вихревой активности происходит на пике трансформации стоковых фронтов. Максимальное число короткопериодных внутренних волн детектируется, когда фронты на поверхности четко сформированы.

Показано [7, 14], что максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной встречаемости субмезомасштабных вихрей или короткопериодных внутренних волн. Под влиянием интенсивных короткопериодных внутренних волн вертикальный и горизонтальный обмен под пикноклином усиливается в два раза.

В работе показано, что субмезомасштабная изменчивость гидрофизических полей океана является важной составляющей передачи энергии от крупно- и мезомасштабных процессов в океане к мелко- и микроструктурным.

Оценки характеристик внутренних волн в Баренцевом и Белом морях выполнены в рамках гранта РФФИ (проект № 18-05-00965-А). Остальные работы выполнены в рамках государственного задания по теме № 0149-2018-0014.

Литература

1. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. Spirals on the Sea // P.Roy.Soc. AMath.Phy. 2000. V. 456. P.1217–1280.
2. Lévy M., Ferrari R., Franks P.J.S., Martin A.P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, N L14602. doi:10.1029/2012GL052756.
3. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime, Geophys. Monogr./ Ed. by M.W.Hecht and H.Hasumi. 2008. Vol. 177. P. 17–38, AGU, Washington, D.C. doi:10.1029/177GM04.
4. Матишов Г.Г., Брехунцов А.М., Дженюк С.Л. Исследования Карского моря на современном этапе освоения российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2013. № 1(9). С. 4–11.

5. Кондратов Н.А. Территориальные особенности размещения и добычи минеральных ресурсов в российском секторе Арктики // Географический вестник // Geographicalbulletin. 2016. № 3(38). С. 35–48.
6. Зимин А.В. Методика выполнения натурных экспериментов по исследованию короткопериодных внутренних волн в морях Северо-Европейского бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
7. Зимин А.В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С.104–120.
8. Zimin A.V., Kozlov I.E., Atadzhanova O.A., Chapron B. Complex monitoring of short-period internal waves in the White Sea. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 951–960. doi: 10.1134/S0001433816090309.
9. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B. SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas. In Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International. 2015. pp. 947–949.
10. Свергун Е.И., Зимин А.В. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 13–19. doi:10.7868/S2073667317020022.
11. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 2. С. 80–90.
12. Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В., Козлов И.Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7. № 3. С. 29–41.
13. Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Козлов И.Е. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 1. С. 59–72.
14. Zimin A.V. Short-period variability of hydrophysical fields and internal wave characteristics during a semidiurnal tidal cycle on the White Sea shelf. Oceanology. 2013. Vol. 53. No 3. pp. 259–268. doi: 10.1134/S0001437013020173.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ БИОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗУБАТЫХ КИТОВ

М.П.Иванов[1], канд.биол.наук, А.А.Родионов[2], д-р техн.наук, В.Е.Стефанов[1], канд.биол.наук,
Ю.А.Толмачев[1], д-р физ-мат.наук
[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

PROSPECTS OF CREATION OF BIOACOUSTICS' COMPLEX FOR COGNITIVE STUDIES OF TOOTHED WHALES

M.P.Ivanov[1], Ph.D., A.A.Rodionov[2], Dr.Sc., V.E.Stefanov[1], Ph.D., Y.A.Tolmachev[1], Dr.Sc.
[1]Saint-Petersburg State University, Russia
[2]P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Исследование когнитивных функций морских млекопитающих — это новая область знаний, которая позволит начать подробную расшифровку сигналов эхолокации и коммуникации. Полученные данные должны позволить создать многоканальные сверхширокополосные системы приема в различных диапазонах частот и синтезировать гидроакустические сигналы зубатых китов. Использование подводного монитора представления видеоинформации животному и подводного видеонаблюдения за животным в сочетании с системой акустического мониторинга и синтеза гидроакустических сигналов является основой создания биоакустического комплекса для исследования вербальных конструкций.

The study of cognitive functions of marine mammals is a new field of knowledge, which will make possible detailed decoding of echolocation and communication signals. The data obtained allow creating multi-channel UWB systems with different frequency ranges and synthesizing hydroacoustic signals of toothed whales. The possibility to use underwater monitor for presenting video information to animals and underwater video monitoring of animals in combination with the system of acoustic monitoring and hydroacoustic signals synthesis allows one to create complex IBAC for the study of verbal constructions.

Исследование коммуникационного поведения китообразных имеет большую историю. Начало исследований акустики дельфинов было положено еще в 1961 году [1], однако вплоть до настоящего времени основные вопросы так и остались нерешенными. Несмотря на очевидную вокализацию животных, использующих акустику как основной канал для получения информации о среде обитания, поиска пищи, ориентации и общения между собой [2], до сих пор не существует однозначной интерпретации коммуникационных сигналов и соответствующих им двигательных поведенческих реакций.

Основная трудность в проведении таких исследований заключается в отсутствии методологии изучения коллективного целенаправленного взаимодействия высших животных в лабораторном эксперименте. Этот существенный разрыв между желанием изучать вербальные способности животных и «философией» прямого эксперимента постепенно восполняется. Сегодня с помощью условно-рефлекторных методик физиологи научились подробно исследовать сенсорную систему животных. Однако путь от изучения сенсорной системы к изучению когнитивных функций животных оказался более длинным, чем предполагалось. Изучение их памяти, внимания, эмоций, способности к счету, коммуникации с помощью хеморецепторов, коммуникации на основе анализа поз и вербальной коммуникации – это все изучение когнитивных функций. В настоящее время изучение когнитивных функций зависит от поиска и выбора модели (т.е. животного), позволяющей анализировать вербальное коммуникационное поведение.

Поиск модели, а именного животного, основано на взаимосвязи сенсорных систем изучаемого и изучающего. Вербальное поведение сообщества обусловлено эволюцией изучаемого объекта, в том числе влиянием внешних обстоятельств важных для выживания вида.

Рассматривая дельфина как модель для изучения вербального поведения, перечислим взаимосвязанные сенсорные функции с человеком, изучающим данное животное. Китообразные - высшие стадные животные. Для эффективного выживания этого вида наиболее удачной является коллективная охота. У китообразных отсутствует ольфакторная (обонятельная) система: несколько месяцев в году они живут в условиях отсутствия света (полярные районы), а «освещение» пространства в водной среде происходит за счет собственного звукового источника. В этих суровых условиях наиболее предпочтительна вербальная связь между особями с помощью акустических сигналов в различных частотных диапазонах.

Для большинства млекопитающих ольфакторная система является предпочтительным каналом передачи информации, т.к. не требует мгновенного присутствия коммуникантов. В данном случае связь между особями разнесена во времени и пространстве. Связь на основе хеморецеп-

ции в водной среде существует, но ограничена дальностью. Тактильная система связи исключительно контактная. Зрительная система зависит от времени суток, времени года и глубины погружения животных. Таким образом, предпочтительным для дистантной и быстрой передачи информации в любое время суток и при любой освещенности остается акустический канал.

Обязательным условием успешности коммуникационных экспериментов является предварительное прохождение стадии отбора животных. Любознательность дельфинов и готовность выступать в роли активного наблюдателя является первостепенным критерием отбора животных для экспериментов по исследованию вербального поведения. Поэтому нужна методика отбора наиболее инициативных, «интеллектуально» развитых, а также максимально заинтересованных в коллективной работе и совместном выполнении различных задач животных (в том числе вместе с человеком). В итоге мы получим полностью адекватных особей для выполнения любых специализированных задач повышенной сложности. Указанная методика предполагает эксперимент по провокации вербального взаимодействия, возникающей в ответ на обстановку неопределенности и эмоциональной нестабильности. Обстановка неопределенности может быть временно́й или объектной, например, смоделированной с помощью создания помех животным, выполняющим определенную задачу и вынуждая их к кооперации, т.е. необходимости «договориться», кто выполняет задание в конкретный момент времени [3] в групповом эксперименте. В таком случае у дельфинов-наблюдателей возникает сильная эмоциональная реакция нереализованного действия в связи с невозможностью вмешаться в процесс решения задачи дельфином-респондентом. Дельфинов вынужденно погружают в ситуацию неопределенности, в результате чего они приходят в состояние эмоциональной нестабильности, что неизбежно выражается в акустических и двигательных реакциях вербального поведения [4].

Учитывая пространственные характеристики поля излучения, понятно, что акустический объем импульса на малых дальностях будет очень маленьким и зарегистрировать пакет импульсов без искажений практически очень сложно. Изучение когнитивных функций связано с разработкой психофизиологических методик, которые, прежде всего, направлены на отбор животных для последующих экспериментов. Известные методики не позволяют с достаточной точностью и достоверностью исследовать сигналы коммуникации. Поэтому необходимо введение новых технологий обучения животных, что связано с созданием технических средств и программных решений взаимодействия различных устройств. Технические решения связаны с цифровыми технологиями подводного видеонаблюдения и передачи необходимой видеоинформации в водную среду. Создание обратной связи видеонаблюдения, трансляция видеоизображения в сочетании с системой акустической многоканальной регистрации сигналов дельфина и синтеза акустических последовательностей, имитирующих сигналы животных, открывают новые возможности биоакустического эксперимента.

Таким образом, для исследования когнитивных функций дельфинов необходимо создать специализированный стенд с подводной частью, необходимой животному для контакта с объектом визуально и акустически, а также устройством, необходимым для работы экспериментатора с аналогичным визуальным и акустическим обеспечением. Назовём его специализированный стенд для исследования когнитивных функция морских млекопитающих (ССИКФ).

ССИКФ оснащается необходимыми техническими средствами обеспечения видео и гидроакустического каналов с адресной передачей данных — дельфин-оператор, оператор-дельфин. Причем, в данных сочетаниях под оператором подразумевается на стадии обучения животного человек-оператор; а во время эксперимента робот-оператор. Робот оператор должен быть обучен создавать и анализировать поведенческие конструкции экспериментального животного. Поведенческие конструкции формируются на основе множества сценариев, разрабатываемых в зависимости от необходимых исследовательских решений.

Накопленные исследовательские решения реализуются в интеллектуальное программное обеспечение обработки видеоинформационного потока с необходимым набором правил принятия решений и библиотекой вербального соответствия. Видеопоток анализируется на предмет соответствия двигательного поведения животного с поставленной задачей и акустического подтверждения. Вербальный поток анализируется на основе библиотеки сигналов коммуникации морских млекопитающих с поставленной задачей и необходимостью включения дуплексной акустической связи.

На данном этапе исследований необходимо решить задачи аппаратного обеспечения, работающего в реальном масштабе времени. Системы дуплексной акустической связи формируются постепенно, начиная от лабораторного эксперимента по коммуникационному взаимодействию

и создания библиотеки акустически специализированных сигналов. В процессе решения перечисленных задач создается морской полигон с необходимой автоматизацией оборудования и разработкой технических решений сверхширокополосных систем излучения и приема, имитируя дистантные сенсорные системы. В конечном итоге, реализация подобного специализированного стенда позволит осуществить видеоконференцию между животными, находящимися в удаленных точках бассейна или вольера, а в последующем в разных точках нашей планеты.

Обеспечение аппаратными средствами экспериментального отсека необходимо контролировать с максимальной осторожностью при использовании пониженного напряжения питания всех подводных и надводных устройств, снабженного автоматикой отключения питания при повышенной влажности.

Таким образом, изучение когнитивных функций дельфинов возможно только с помощью комплекса дуплексных информационных каналов. Это позволит в условиях лабораторного эксперимента управлять двигательным, эхолокационным и коммуникационным поведением. Известны эксперименты с изображением на экране телевизора, установленного под водой (за стеклянной стенкой) [6], которые показали положительный результат зрительного контакта между человеком и дельфином. Разработка более совершенной системы взаимодействия человека и дельфина на основе новых технологий с использованием специализированных технических средств позволяет расширить возможности информационных каналов. В наших исследованиях такие каналы коммуникации создавались с помощью подводного компьютерного монитора и видеокамеры, акустического синтезатора сигналов дельфина, непрерывного акустического мониторинга и специализированного программного обеспечения, осуществляющего взаимодействие различных устройств. Для изучения возможности применения технических средств в условиях соленой воды нами проведены пробные эксперименты с использованием специального комплекса автоматизации эксперимента и подводного монитора для трансляции различных видеосюжетов. Управляющий компьютер обеспечивает создание связи между различными устройствами: приемника сигналов эхолокации, системы управления включением/выключением монитора, синтеза акустических стимулов. Программируемое взаимодействие между различными устройствами обеспечивает обратную связь между животным и сюжетом на экране с помощью непрерывного мониторинга потока сигналов эхолокации и использования их для управления включением/выключением монитора или управлением масштабом, количеством фигур и т.д. В процессе организации информационных потоков с помощью разработанного программного обеспечения можно формировать поведенческие акты на основе самообучения или подражательного рефлекса. Подражательный рефлекс не требует мгновенного пищевого подкрепления, а достигнутый положительный результат подчас является подкреплением сам по себе.

Полученный результат имитационного двигательного поведения показал состоятельность сюжета викарного научения у белух [6]. В этих экспериментах отчетливо выражены когнитивные функции, с помощью которых обеспечивается целенаправленное внимание, процесс познания окружающего мира и взаимодействия с ним.

Сюжет с включением обратной связи при синхронизации игровых видео сюжетов с акустической активностью увеличил время удержания внимания дельфинов у монитора, но не вызвал ожидаемой акустической коммуникационной реакции.

Совершенно иной возникает ответная двигательная и акустическая реакция на зрительный образ с веб-камеры. Даже без акустического и пищевого подкрепления наблюдалось точное соответствие изображения акустической последовательности сигналов коммуникации. Последующий анализ массива биоакустических сигналов показал, что выделяются три стабильных пакета импульсов, которые повторяются в различных фрагментах при демонстрации изображения с веб-камеры и во время трансляции акустического модулированного шумового стимула. Акустические серии длительностью 10—20 секунд состояли из пакетов импульсов различной длительности с временно̀й модуляцией (1—100 мс) между широкополосными импульсами в пакетах. Отобранные пакеты с тремя различными временными структурами формируют различные акустические серии с помощью комбинирования их во времени (перестановки и повторения). Эти акустические серии импульсов имеют некоторое сходство с результатами, изложенными в работе [7]. Заметим, что в полученных сериях коммуникационных сигналов отсутствовали частотно-модулированные длинные импульсы, которые использовались как сигналы коммуникации в экспериментах с *OrcinusorcaL* [8].

Современные цифровые технологии создают новую технологическую базу взаимодействия экспериментатора с животным, находящегося под водой. Удобное и легкое оборудование дает

возможность провести серию аналогичных опытов в различных дельфинариях. Основная цель создания автономного комплекса — это сбор доказательной базы сигналов коммуникации при использовании веб-камеры, демонстрации на подводном мониторе различных видеофрагментов и фотографий знакомых и незнакомых особей.

С помощью программного обеспечения формируется взаимодействие различных устройств в реальном масштабе времени, проводится фильтрация и обработка гидроакустической информации, синтезируются необходимые гидроакустические сигналы, обрабатывается видеоинформация и формируются видеосюжеты, соответствующие алгоритму исследования.

На основе программы планируемых экспериментов появляется возможность исследовать: весь класс сигналов эхолокации с помощью ультракоротких сверхширокополосных импульсов; назначение частотно-модулированных и частотно-манипулированных сигналов; возможности акустической мимикрии и диапазон таких возможностей у различных видов зубатых китов; диапазон викарного научения с помощью видео и акустических фрагментов; когнитивное взаимодействие конструкции «человек-дельфин»; когнитивное взаимодействие конструкции в одном бассейне «дельфин-дельфин», знакомых животных; когнитивное взаимодействие конструкции в одном бассейне «дельфин-дельфин», незнакомых животных; когнитивное взаимодействие конструкции в одном вольере «дельфин-дельфин», знакомых животных; когнитивное взаимодействие конструкции «дельфин-дельфин», удаленных животных; когнитивное взаимодействие конструкции «дельфин-дельфин-человек».

Для проведения такого крупномасштабного эксперимента практически все проверено и накоплен соответствующий опыт. Создано многоканальное автономное устройство регистрации сверхширокополосных сигналов в высокочастотной, среднечастотной и низкочастотной области. Такое многоканальное разделение позволяет улучшить соотношение сигнал/помеха в каждом отдельном диапазоне частот. Далее необходимо фильтровать, выделять информационные признаки и накапливать сигналы коммуникации в базе данных. На основании полученной ответной акустической реакции животного на конкретный видеопоток синтезируется практически любой из известных нам гидроакустических сигналов зубатых китов: ультракороткие импульсы или их последовательности (пакеты) с необходимой время-импульсной модуляцией; длинные частотно-модулированные (манипулированные) сигналы с необходимой модуляцией изменения частоты; составные сигналы – пакеты высокочастотных импульсов с разными законами модуляции скважности; составные сигналы – пакеты высокочастотных импульсов и частотно-модулированных длинных импульсов. В зависимости от видео и акустического сюжетов программируются видеопотоки любой сложности, которые передаются на различные расстояния. Экспериментатор на своем комплексе отслеживает двигательную реакцию животного на предъявляемые видеофрагменты и акустические конструкции и принимает решение о дальнейшей работе с животным при решении различных задач обнаружения, распознавания подводных объектов с помощью эхолокации и коммуникации на различных дистанциях.

Благодаря использованию программного продукта распознавания человеческой речи и базе данных сигналов коммуникации появилась возможность создавать акустические конструкции, выполняющие функции посредника между человеком и дельфином, т.е. устройство — вербальный посредник. Таким образом, создание видеоконференции между удаленными дельфинами или между дельфином и человеком — перспектива недалекого будущего.

Литература

1. Lilly J.C., Miller A.M. Vocal exchanges between dolphins // Science. 1964. 134, N 3493.
2. *Белькович В. М., Дубровский Н. А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. Л., 1976.
3. Иванов М.П., Дроган Е.В. Эксперимент по исследованию коммуникации китообразных /8/ Эл. журнал. Ученые записки физического факультета, 2014. № 5. 145351.
4. Иванов М.П. Изучение коммуникации дельфина: методика, двигательные и акустические показатели // Журнал Эволюционной биохимии и физиологии, 2009, т.45, № 6, С.575-582.
5. Herman L.M., Tavolga W.N. The communication systems of cetaceans // Cetacean behavior: Mechanisms and functions / Ed. Herman, L. M. New York.: Wiley Interscience, 1980. P.149-209.
6. Иванов М.П., Дроган Е.В., Никитина А.А. Исследование акустического поведения белухи (*Delphinapterusleucas*) при акустической стимуляции во время демонстрации видеообразов // Сб. науч. труд. VIII международной конференции Морские Млекопитающие Голарктики. Т.1. Санкт-Петербург. 22-27 сентября 2014. С. 203-209.
7. Belikov R.A., Bel'kovich V.M. Communicative pulsed signals of beluga whales in the reproductive gathering of Solovetskii Island in the White Sea // Acoustical Physics, 2008. V. 54. № 1. P.115–123.
8. Dudok van Hee W.H., Kamminga C. and J.D. van der Toorn. An experiment in two-way communication in *Orcinus orca L* // Aquatic Mammals, 1982, V. 9, № 3. P.69-82.

ПАССИВНАЯ ГИДРОЛОКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМ

Л.Е.Гампер, канд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

PASSIVE SONAR LOCALIZATION OF NOISE SOURCES USING EXTENDED FOCUSING RECEIVING SYSTEMS

L.E.Gamper, Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Средства обзора, обнаружения и пассивного определения координат излучающей цели в зоне Френеля с использованием широкоапертурных приемных систем (ПС) сегодня недооценены и недоиспользованы. Приведены материалы практического и экспериментального опыта, полученные на испытаниях в полигонах Ладоги и Белого моря с использованием макетов приемных систем и промышленных образцов антенн. Материал может быть интересен разработчикам режимов пассивной гидролокации, главным конструкторам, инженерам и программистам, а также аспирантам, заинтересованным в инновационной тематике.

Means of observation, detection and passive sonar localization of an emitting target in the Fresnel zone using wide-aperture receiving systems are underestimated and underutilized today. The article describes results of practical work and experimental testing which were held in Ladoga and the White Sea using prototype receiving systems and industrial antenna designs. The material can be of interest to developers of passive sonar modes, to chief designers, engineers and programmers, as well as graduate students interested in the area of innovations.

Задача определения координат цели относится к области пассивной гидролокации в ближней зоне излучения источника с круговым (сферическим, цилиндрическим) волновым фронтом. Назначение таких систем – быстрое определение координат, управление торпедным оружием, определение параметров движения цели.

Все существующие и прогнозируемые методы пассивной локации определяются в рамках двух подходов: «*а*» – интуитивный, двухэтапный, косвенный: Bangs W.J., Schultheiss [1], Hassab J.C., Bousher R.E, P.M. Lawrence C. Ng., Y. Bar-Salomon и др.– измерение взаимных задержек сигнала на антеннах и затем вычисление координат, «*б*» – оптимальный, одноэтапный, прямой: Schultheiss [2], J.-P. Le Cadre [3], K. Brinkmann [4] и др. – непосредственное определение координат путем оптимальной оценки параметров выборки измерений и фокусировки ПС в точку предполагаемого расположения цели.

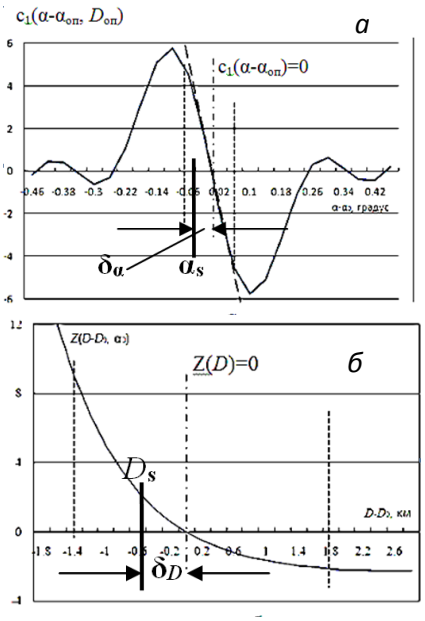
Пространственная избирательность отклика широкоапертурной приемной системы. В основе алгоритмов обнаружения и обзора в секторе углов и интервале дистанций лежит уравнение максимального отношения правдоподобия (МОП) а определения координат–уравнение оценки максимального правдоподобия (ОМП) [5, 6]. На рис. 1*а* и *б* (см. вклейку) виден пологий «пьедестал», образованный составляющей из суммы квадратов модулей сигналов с выходов антенн. Ширина этого пьедестала определяется характеристиками направленности антенн и он не участвует в определении дальности. На его фоне выделяются «лепестки», образованные суммой взаимно-корреляционных моментов когерентной составляющей сигнала, которые и являются «материалом» для определения координат цели. В общем случае трехкоординатной задачи отклик приёмной системы (ПС) является четырехмерной пространственной фигурой, которую можно представить двухкоординатными сечениями соответствующими плоскостями при фиксированной третьей координате, они характеризуют пространственную избирательность отклика ПС на сигнал источника излучения или нескольких источников.

Картина $\mathbf{z_{\alpha D}\{\alpha, D;\ \varphi = const\}}$ и графики главных сечений сигнальной отметки $\mathbf{z_{\alpha}\{\alpha;\ \varphi, D = const\}}$ и $\mathbf{z_{D}\{D;\ \alpha, \varphi = const\}}$ обеспечивают решение задач обзора и обнаружения цели в заданном секторе курсовых углов и интервале дистанций и наведение трактов точного отсчета координат и автосопровождения цели (АСЦ) по двум координатам (α, *D*).

На рис. 2 (см. вклейку) показан пример сигнальной отметки (СО) одиночной цели трехантенной ПС при изотропном поле помехи в плоскости {азимут/дистанция} на индикаторе обзора (*а*) с главными сечениями СО по направлению (под индикаторной картиной), по дальности (справа от картины) и в аксонометрии (*б*). Определяющими параметрами СО являются: острота главного максимума в сечениях по направлению и по дальности (рис. 2*а*) и его превышение над полем боковых лепестков (рис. 2*б*) и распределенной помехи. Эти параметры определяют пространственное разрешение и вероятность правильного обнаружения цели. При наличии в поле

помехи анизотропной составляющей, например мешающей цели, целесообразно использование многоэлементных ПС и адаптивные методы обработки, как показано на рис. 3 (см. вклейку).

Оценка координат Уравнение оценки максимального правдоподобия (ОМП) получают путем дифференцирования по искомой координате θ (направления или дальности) натурального логарифма условной плотности распределения $L(X(\theta)\big|_{H_1}$, где H_1 – гипотеза наличия цели [5, 7]. Алгоритм дискриминатора координаты θ включает сумму попарных произведений частотных составляющих выходных напряжений всех антенн ПС, умноженных на частоту и на фазовый коэффициент $\exp[j\omega((t_m(\theta,r_m) - t_n(\theta,r_n))]$, m, n= 1, …, M, компенсирующий разность времен прихода сигнала к антеннам m и n, r_m – вектор координат приемников или центров антенн с весом $w_{mn\theta}=\partial(t_m(\theta,r_m) - t_n(\theta,r_n))/\partial\theta$. Алгоритм один и тот же для всех координат и отличается лишь весовыми коэффициентами [$w_{mn\theta} = w_{mn\alpha}$, $w_{mn\beta}$ или w_{mnD}], учитывающими геометрию системы «источник-приемники» [7].



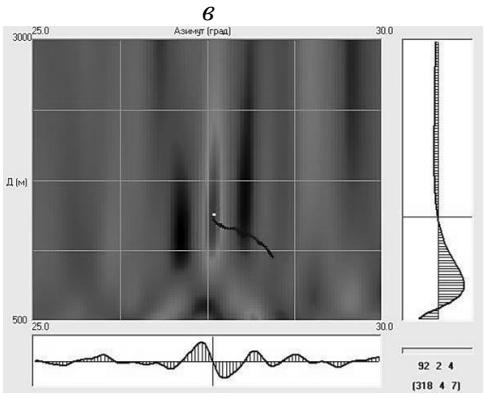


Рис. 4. Выходные характеристики дискриминаторов направления (*а*) и дальности (*б*). Пример автосопровождения цели по двум координатам (*в*)

Влияние условий распространения. На рис. 5 (см. вклейку) показаны сигнальная отметка и трасса автосопровождения цели в течении 300 с при испытаниях приемной системы из трёх локальных разнесенных антенн в Белом море. Излучатель широкополосного сигнала опускался с борта дрейфующего судна, приемная система расположена на погруженной платформе, движущейся со скоростью ≈ 3 ÷ 5 узлов. Глубина погружения излучателя $H_и$= 90 м, глубина ПС $H_п$= 100 м. Дальность 6.5 км. На рис. 5 хорошо видны осцилляции оценки координат, особенно дальности, в процессе движения приёмной системы относительно излучателя. Эти осцилляции явно структурированы и значительно превышают флуктуации, обусловленные шумовой помехой с расчетами по ММП. Аналогичные результаты имеют место в других водоёмах (Ладога), а также их можно найти в зарубежных публикациях [Бринкман]. Эти осцилляции не совместимы с принципом «быстрого определения координат и параметров движения цели» и ограничивают точность и дальность действия ПГЛ.

Исследования показали, что причиной осцилляций оценок координат являются упругие колебания волнового (временного) фронта сигнала при распространении в неоднородной и подвижной среде. При значительных расстояниях до источника, когда стрела прогиба дуги составляет 10–20 мм (время пробега 7–14 мкс), отклонения временно́го (волнового) фронта от правильной сферы на ≈ ± 5 мкс (фактические измерения) приводят к тем ошибкам, которые мы видим на рис. 5.

Приведенные материалы экспериментальных исследований в Белом море и в Ладожском озере указывают на то, что трёх-элементные ПС являются не «лучшими», а «минимально-необходимыми», т.е. наихудшими. Уменьшить осциллирующую погрешность оценки дальности вида рис. 5 можно путем использования многоэлементных ПС, M>3.

Выводы: 1. Пассивная гидролокация является новым для ВМФ РФ перспективным гидроакустическим вооружением. 2. Для максимальной реализации потенциальных возможностей пассивной гидролокации целесообразно использовать многоэлементные линейные бортовые ПС в широкой полосе приёма и оптимальные алгоритмы обработки на основе методов фокусирования ПС.

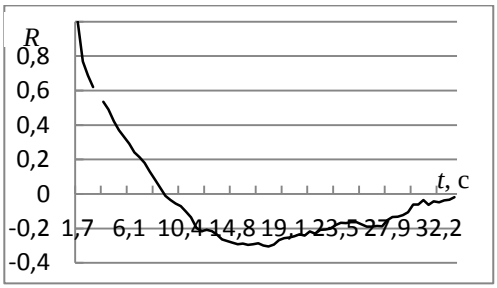


Рис. 6. Коэффициент автокорреляции $R_{\alpha}(t)$ временно́й последовательности $\tau_{13}(t)$ => $\alpha(t)$.

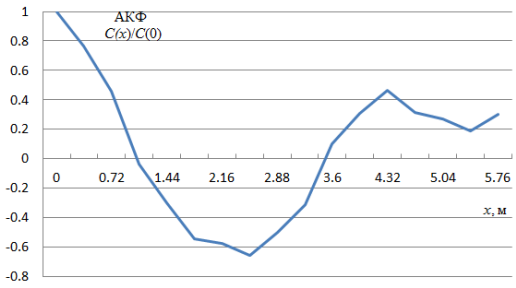


Рис. 7. Коэффициент автокорреляции *пространственной* последовательности отклонений ВФ от дуги окружности.

В данной работе использованы экспериментальные материалы А.М. Иванова, программы обработки и результаты исследования О.С. Поповой, К.В. Манова, М.А. Филободченко с участием автора.

Литература

1. Hassab J.C., Bousher R.E. Optimum Estimation of Time Delay by a Generalized Correlator. IEEE Trans. on ASSP, vol. ASSP-27(4), pp. 373-380, August 1979.
2. Bangs W.J., Schultheiss P.M. Space-Time Processing for Optimal Parameter Estimation. // Proc of NATO Advanced Study Institute on Signal Processing. University of Technology, Longhbirough, U.X., Aug.-Sept. 1972.
3. Le Cadre J.-P., Performance Analysis of Wavefront Curvature Methods for Range Estimation of a Moving Source. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 31. No. 3 july 1995.
4. Brinkmann K. “Sea Trial Resalts for the Expanded Flank Array”. ATLAS Elektronic (Германия). Материалы конференции UDT 2015. Дайджест заруб.прессы ВМС и кораблестроение № 76, 2016, с. 77.
5. Гампер Л.Е. Оптимальная пространственно-временная обработка в системах пассивной гидролокации с разнесенными антеннами // Сб. Гидроакустика. 2009. Вып.10. С. 49−60.
6. Способ пассивного определения координат источников излучения. Патент № 2507531. Россия. ОАО «Концерн «Океанприбор». МПК J01S 3/80. Приоритет 08.11.2012, зарегистрирован 20.02.14 г.
7. Способ пассивного определения координат движущегося источника излучения. Патент № 2623831. Россия. ОАО «Концерн «Океанприбор». МПК J01S 3/80. Приоритет 08.11.2012 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ

М.А.Иванов, А.М.Иванов, канд.техн.наук, И.А.Селезнев, д-р техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

EXPLOITATION RESULTS OF EXPERIMENTAL MEASURING SYSTEM IN PASSIVE LISTENING SONAR MODE

M.A.Ivanov, A.M.Ivanov, Ph.D., I.A.Seleznev, Dr.Sc.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

В докладе рассматриваются результаты работ с использованием экспериментальной измерительной системы (ЭИС), предназначенной для проверки в натурных условиях алгоритмов пассивной гидролокации.

In the report results of using experimental measuring system intended for checking in natural conditions passive listening algorithms are considered.

Существенным недостатком пассивной гидролокации была невозможность оценки дистанции до цели, что вынуждало применять режим активной гидролокации, который нарушал скрытность подводных лодок (ПЛ). Для решения этой задачи в середине 1960-х годов в США были созданы первые образцы ГАС пассивного определения дистанции.

Сегодня практически на всех современных ПЛ зарубежных ВМФ как атомных, так и неатомных (США, Франции, Германии, Великобритании, Норвегии и т.д.) широко применяются гидроакустические комплексы с бортовыми антеннами. Данные системы позволяют определить дистанцию до цели по ее шумоизлучению, не производя специального маневрирования, причем за достаточно небольшое время (единицы – десятки секунд) и с высокой точностью. Такие системы в зарубежной литературе имеют название «Raploc».

На отечественных ПЛ до последнего времени такие системы отсутствовали, хотя исследовательские работы по данной тематике велись, в том числе и в АО Концерн «Океанприбор».

В последние 10 лет работы по данной тематике в АО Концерн «Океанприбор» были возобновлены, и был сделан важный шаг от теоретических исследований данного вопроса к его практической реализации. В рамках ОКР «Гидропоиск» впервые разнесенные бортовые антенны были испытаны на Ладожском испытательном полигоне Карельского филиала АО «Концерн «Океанприбор» и в акватории Белого моря. Данная система получила название «Экспериментальная измерительная система» (ЭИС). Отметим, что составные части ЭИС разрабатывались при участии Санкт-Петербургского Государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) в рамках работ по постановлению правительства РФ №218 от 09.04.10 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования».

Бортовая измерительная система проектировалась для решения двух основных задач - определение дистанции в пассивном режиме в реальном времени без специального маневрирования и регистрация поля помех в местах предполагаемой установки перспективных бортовых антенн.

Регистрация собственного поля помех была необходима, так как эффективность работы гидроакустического комплекса с бортовыми антеннами в значительной мере зависит от уровня собственных помех, определяемых воздействием неоднородного шума корабля на эти антенны. Источниками собственного шума могут быть работающие судовые механизмы и системы, гребной винт, гидродинамические процессы, возникающие на корпусе при движении, жизнедеятельность экипажа. Вклад каждого из них зависит от типа и конструкции корабля, скорости его хода, взаимного расположения источников собственного шума и антенн и т.п.

Эти источники создают акустические поля, влияющие на эффективную работу антенн. Как правило, такие поля неоднородны по своей структуре. Математическое описание таких полей очень сложная задача. И хотя бы частичное описание таких полей позволило бы получить сведения о помехах в местах размещения бортовых антенн и разработать дополнительные методы снижающие влияние помехи, что делает регистрацию поля помех очень важной задачей для ЭИС.

Кратко опишем структуру ЭИС. В состав ЭИС входит забортная и бортовая аппаратура. Структурная схема ЭИС приведена на рис. 1.

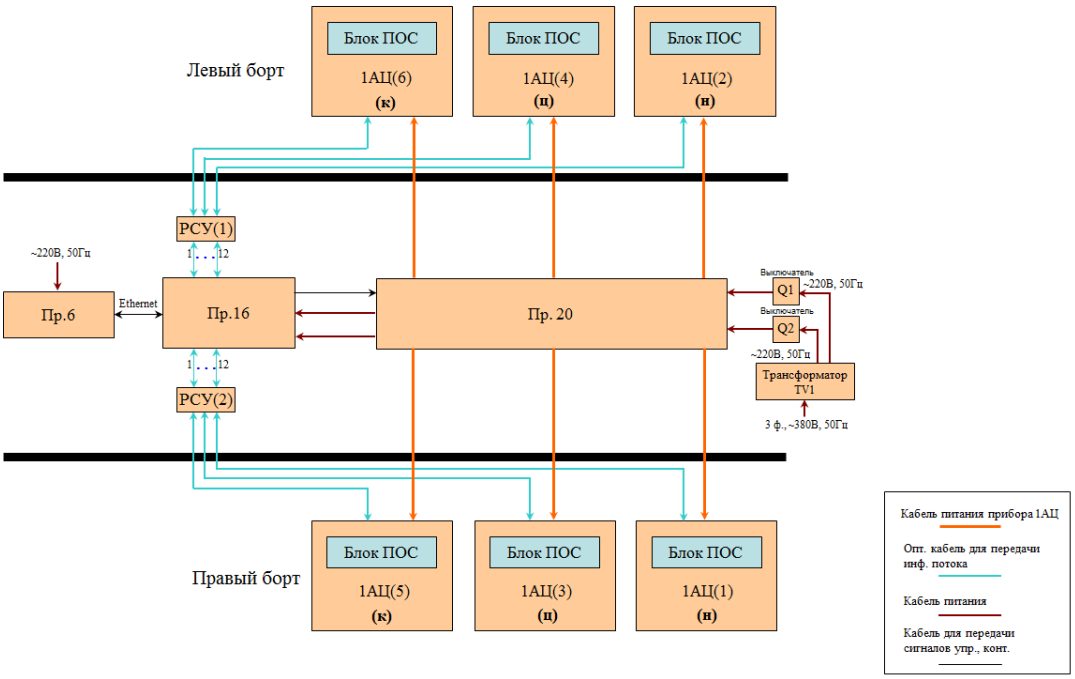


Рис. 1. Структурная схема ЭИС.

Забортная аппаратура состоит из шести акустических антенн - приборов 1АЦ (по три прибора на каждый борт платформы). В состав приборов 1АЦ входят модули аналогово-цифровой предварительной обработки сигналов. Размещение основной части аппаратуры предварительной обработки непосредственно в приемной антенне позволяет существенно сократить объем аппаратуры, размещаемой в прочном корпусе, а передача информации от приборов, осуществляемая по оптической линии связи - повысить помехозащищенность и сократить количество кабелей, входящих в прочный корпус от забортных антенн.

Прибор 1АЦ состоит из двух слоев приемников, что позволяет при необходимости реализовать кардиоидную характеристику направленности. Приборы 1АЦ расположены по правому и левому борту платформы по три прибора с каждой стороны. Приборы 1АЦ расположены на расстоянии ~20 метров друг от друга, чуть ниже ватерлинии (рис. 2).

Бортовая аппаратура состоит из прибора цифровой обработки, контроля и управления (пр.16), одноэкранного сенсорного навесного пультового прибора (пр.6), прибора электропитания (пр.20) и двух распределительно согласующих устройств (РСУ), предназначенных для соединения и распределения оптических цепей.

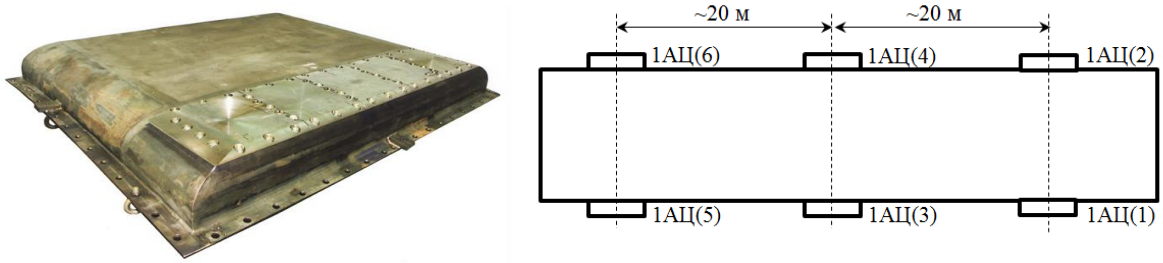


Рис. 2. Прибор 1АЦ и его размещение на платформе.

Поскольку основной задачей ЭИС являлась проверка возможности определения дистанции в пассивном режиме в реальном времени без специального маневрирования, а не менее важным фактором, влияющим на эффективность работы таких систем, является точность установки бортовых антенн, то для решения задачи определения дистанции в пассивном режиме необходимо было определить координаты всех приемных элементов антенны с достаточно высокой точностью. Для определения координат приемных элементов были измерены координаты кон-

трольных точек, нанесенных на внешнюю поверхность корпуса каждого прибора 1АЦ. Измерения выполнены с помощью измерительной системы Leica на базе тахеометров TDM 5005 с погрешностью измерений ±(3 – 4) мм. Рассчитанные координаты приемных элементов приборов 1АЦ были учтены в программном обеспечении ЭИС.

Отметим некоторые моменты, связанные с эксплуатацией системы после ее установки.

Экспериментальные исследования с использованием ЭИС проводились в период времени с октября 2012 г. по август 2014 г.

Осенью 2012 г. в измерительном бассейне АО Концерн «Океанприбор», а затем на Ладожском испытательном полигоне Карельского филиала АО «Концерн «Океанприбор» были выполнены замеры чувствительности приемных каналов приборов 1АЦ по тональному сигналу.

На Ладожском полигоне, а затем в акватории Белого моря по близким надводным объектам получены оценки дистанции, хорошо согласующиеся с данными, полученными в результате визуального наблюдения, и данными радиолокатора. Траектория движения объекта представлена на рис. 3. Начало координат на рис.3 соответствует центру средней антенны 1АЦ.

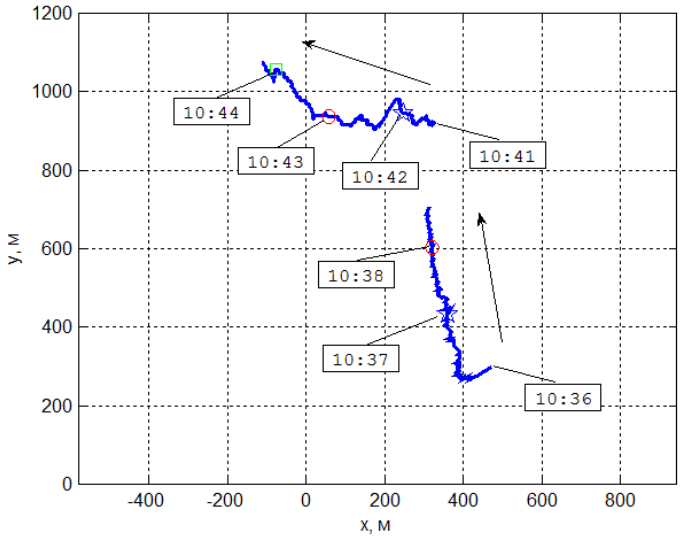
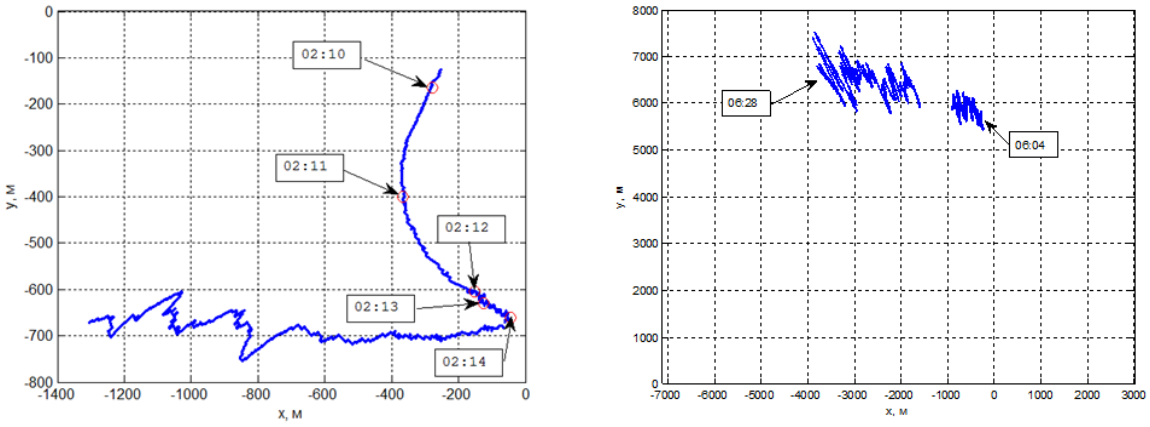


Рис. 3. Траектория движения объекта.

В июне 2014 г. в заглубленном положении платформы сделаны записи сигналов при движении надводного объекта и платформы близкими курсами. Расстояние до объекта составляло ~600 м. Оценка дистанции, сделанная с помощью ЭИС, показала хорошее совпадение с дистанцией, полученной активной системой ближней локации – с точностью до нескольких метров. На рис. 4а показана траектория движения объекта в данном эпизоде.



а) б)

Рис. 4. Траектория движения.

Также в 2014 г. выполнены работы по имитатору шумового сигнала на дальностях от 5 км до 7 км для проверки точности определения дистанции в пассивном режиме. На рис. 4б показа-

на траектория движения имитатора. СКО, вычисленное от оценок дистанции ЭИС составляет от 2,3 % в начале эпизода до 5,7 % в конце. Основной причиной смещения оценки дальности, скорее всего, является ошибка при измерении положения приемных антенн на корпусе платформы.

Эксплуатация ЭИС показала, что уязвимым местом в системе является оптический интерфейсный модуль, в дальнейшем ему надо уделять больше внимания.

Выводы:

полученные с помощью ЭИС данные позволяют сделать вывод о принципиальной работоспособности метода оценки дистанции в пассивном режиме с использованием разнесенных антенн в натурных условиях;

ошибки определения дистанции в пассивном режиме не более 10 %;

необходимо продолжить работы по измерению фактического уровня корабельной акустической помехи в районах размещения бортовых антенн для различных проектов ПЛ и при необходимости организовать работы по снижению помех пассивными и активными методами, в том числе организовать работы по разработке новых шупопоглащающих материалов и технических средств, обеспечивающих виброразвязку антенн от корпусных конструкций;

ЦКБ-проектантам желательно предусматривать места для размещения разнесенных антенн на борту носителя ГАК, обеспечивающие наилучшие характеристики работы системы.

Литература

1. Иванов А.М., Селезнев И.А. Система гидроакустического мониторинга акватории в местах размещения нефтегазодобывающих платформ в районе арктического шельфа. СПб.: Научно-техн. ж. Морские информационно-управляющие системы, №1(2), 2013
2. Гампер Л.Е. О точности методов пассивной гидролокации с разнесенными бортовыми антеннами. СПб.: Научно-техн. сб. Гидроакустика. Вып.9, 2009. С. 34
3. Гампер Л.Е. Оптимальная пространственно-временная обработка в системах пассивной гидролокации с разнесенными антеннами. СПб.: Научно-техн. сб. Гидроакустика. Вып.10, 2009. С. 49
4. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. СПб.: Судостроение, 1988.
5. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988..
6. Иванов В.С. Излучение звука элементами судовых конструкций – СПб.: Судостроение, 1993
7. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. – СПб.: Наука, 2004.

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИХ И БЫСТРЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

Г.С.Малышкин, д-р техн.наук
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

FEATURES AND PERSPECTIVES OF CLASSICAL AND FAST PROJECTIVE ADAPTIVE ALGORITHMS OF SIGNAL DETECTION

G.S.Malyshkin, Dr.Sc.
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Анализируются условия, при которых «быстрые» алгоритмы обеспечивают ослабление мешающего действия сильных сигналов при обнаружении слабых сигналов, приводятся дополнительные факторы, при которых проявляются преимущества «быстрых» алгоритмов.

Conditions for weakening masking effects of strong signals for detection of weak signals are analysed. Advantages of fast adaptive algorithms are discussed.

Адаптивные алгоритмы известны почти 50 лет, их преимущества нашли применение в различных областях науки и техники, эти достижения стали классикой в области радиоэлектроники [1-2]. Особенность тактических ситуаций гидроакустики заключается в том, что имеется малый энергетический запас для обнаружения слабых сигналов и соотношение с энергией мешающих сигналов таково, что даже малая часть энергии мешающих сигналов, не нейтрализованная при обработке, достаточна для того, чтобы слабый сигнал не преодолел порог обнаружения и был пропущен. Поэтому при построении адаптивных алгоритмов необходимо искать дополнительные возможности ослабления маскирующего действия сильных сигналов, в том числе с использованием дополнительных физических признаков в распространяющихся сигналах. И такие признаки есть - это элементы стабильности (частичной когерентности [3], [4]) флюктуаций акустического поля. Подавление мешающего действия сильных сигналов целесообразно проводить «быстрыми» алгоритмами, основанными на использовании «коротких» выборок [5], [6], [7], которые могут усилить подавление не только когерентной, но и рассеянной составляющих мешающего акустического поля. Анализ путей реализации этого эффекта показал, что алгоритмы на его основе могут быть реализованы несколькими способами, в том числе очень экономными в вычислительном отношении и удобными для отображения результатов.

Анализ типовых математических операций над входной выборкой при реализации, как классических [1], [2], так и быстрых алгоритмов показывает, что классические алгоритмы требуют формирования выборочной оценки корреляционной матрицы с объемом выборки не менее $4L$, а быстрые реализуются при объёме выборки K меньше L-числа элементов адаптивной антенны после разбиения общего диапазона частот на $r=\overline{1,R}$ адаптивных групп по K частот в каждой. Построение пеленгационного рельефа проводится в рамках общей суммы (1) (классические алгоритмы) или с помощью короткой выборки (сумма в квадратных скобках) для быстрых проекционных алгоритмов

$$\hat{\mathbf{R}}(r,T_a)=\frac{1}{T_aK}\sum_{t=1}^{T_a}\left[\sum_{p=1}^{K}X(r,p,t)X^{*T}(r,p,t)\right]==\sum_{l=1}^{L}\lambda_l(r)U_l(r)U_l^{*T}(r), \qquad (1)$$

В соотношении (1) корреляционная матрица полного ранга формируется суммированием выборок, отличающихся по частоте (суммирование по p) и по времени (суммирование по t). После суммирования по времени формируется матрица полного ранга и проводится ее спектральное разложение на собственные числа $\lambda_l(r)$ и собственные векторы $U_l(r)$. Суммирование по p проводится при $K<L$ (короткая выборка), то есть частные суммы формируют матрицы неполного ранга $\hat{\mathbf{R}}(r,t)$, которые тоже можно разложить на K собственных чисел λ_{kt} и собственных векторов $U_k(r,t)$ на каждом интервале СА t. Операция подавления мешающих сигналов реализуется ослаблением (коррекцией) весовых коэффициентов при собственных векторах, порождённых сильными сигналами в адаптивных группах, и суммированием выходных сигналов этих групп в пеленгационном рельефе общем для всего частотного диапазона [6, 7].

При построении адаптивных алгоритмов (рис.1) возможна реализация адаптивных процедур с использованием, как классических алгоритмов, когда корреляционная матрица формиру-

ется (кривые 1 и 2 после нормирования) и корректируется (кривая 3) на больших объёмах выборки, либо с использованием процедуры подавления на коротких выборках (быстрые алгоритмы кривые 4 и 5). Кривая 3 соответствует единичным собственным числам (0 дБ).

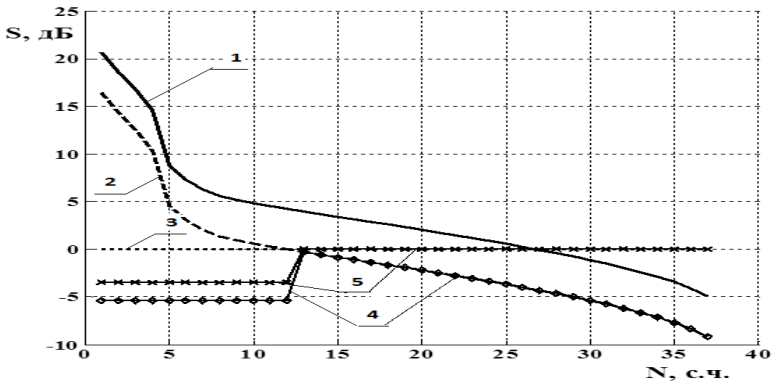


Рис. 1. Управление собственными числами для подавления сильных сигналов.

На рис. 2 приведён пример, когда в выборочной оценке корреляционной матрицы (кривые 1 и 2) проявляется её мешающее действие, присутствующее на рисунке а) и слабый сигнал не виден. Однако после подавления старшего собственного числа остаётся ослабленное мешающее действие её рассеянных составляющих, маскирующих слабые сигналы, в результате на рисунке 2б) отчётливо проявляется слабый сигнал, поступающий из направления, синус которого равен 0.5.

а) б)

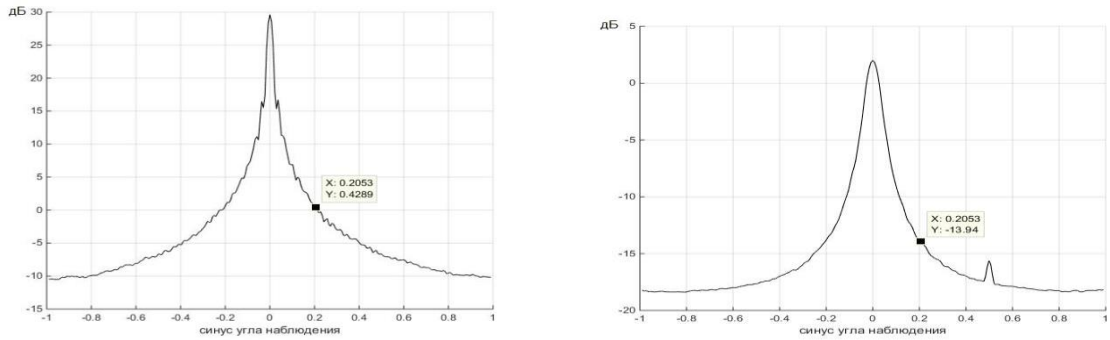


Рис. 2. Пеленгационные рельефы интенсивного источника а) до и б) после подавления когерентной компоненты.

Предметом доклада является рассмотрение возможности ослабление маскирующего действия рассеянных составляющих путём использования элементов стабильности рассеянного поля. Это позволяет существенно снизить остаточный уровень мешающего действия интенсивного источника за счёт использования индивидуальных особенностей текущих конкретных выборочных данных, поступающих на антенну при наличии стабильных флюктуаций поля.

Рассмотрим акустическое поле одного источника, содержащего как когерентную, так и рассеянную компоненту. На плоскую антенну, состоящую из 96 элементов (вертикальных гирлянд), из направления перпендикулярного оси антенны, поступает один широкополосный однолучёвый сигнал, интенсивность спектрального отсчёта которого равна 1000 на одном элементе антенны. Полоса приёма на одном интервале спектрального анализа состоит из 2257 спектральных отсчётов с равномерным спектром, относительная полоса каждого спектрального отсчёта равна $dF = \frac{\Delta F}{f_0}$=0.000163. при средней частоте рассматриваемого диапазона F=0.8546 f_0, где f_0-проектная частота антенны, соответствующая межэлементному интервалу антенны, равному половине длины волны на этой частоте;

ΔF - полоса приёма одного спектрального отсчёта.

Коэффициент когерентности сигнала равен $\gamma = 0.72$ (интенсивность рассеянного поля на элементе антенны равна 280). Пространственно-временная-частотная функция корреляции искажений рассеянного поля $\Gamma(q,l,p_l,p_r,t_t,t_k)$ представляется произведением частотной $N^{(p_l-p_r)}$, пространственной $Q^{(q-l)}$ и временной $T^{(t_l-t_k)}$ функций корреляции, аппроксимированных экспоненциальными зависимостями в соответствии с выбранными при расчётах интервалами частотной, пространственной и временной корреляции функции искажений

$$\Gamma(q,l,p_l,p_r,t_t,t_k) = \gamma + (1-\gamma)Q^{|q-l|}N^{|p_l-p_r|}T^{|t_t-t_k|}. \quad (2)$$

Корреляционные параметры флюктуаций рассеянного поля определяются величинами N, Q, T, которые задают уровень корреляции искажений между соседними элементами по частоте, в пространстве и по времени, а при большей разнице номеров эти параметры возводятся в степень, равную разнице номеров.

Для организации адаптивной обработки весь частотный диапазон из 2257 спектральных отсчётов был разбит на 61 адаптивный поддиапазон по 37 спектральных отсчётов каждый. Затем формировались различные варианты выборочных оценок корреляционных матриц и последующее их спектральное разложение, и проведен анализ собственных чисел для этих вариантов, при различных физических параметрах воздействующего поля.

Ослабление мешающего сигнала проводилось с использованием корреляционной матрицы искажений по частоте, на базе которой затем строятся быстрые проекционные алгоритмы для выделения слабого сигнала. Для классических алгоритмов параметры рассеянного поля дополнительно зависят от корреляции искажений по времени на последовательных интервалах спектрального анализа.

На рис. 3 представлены значения суммы всех собственных чисел каждого варианта (ось ординат) рассматриваемых алгоритмов в зависимости от $K/\Delta N_k$ - соотношения между размером интервала адаптации K и интервалом частотной корреляции флюктуаций ΔN_k (определяется видом физического процесса, формирующего рассеяние) поля, имитируемого в рассматриваемом модельном эксперименте.

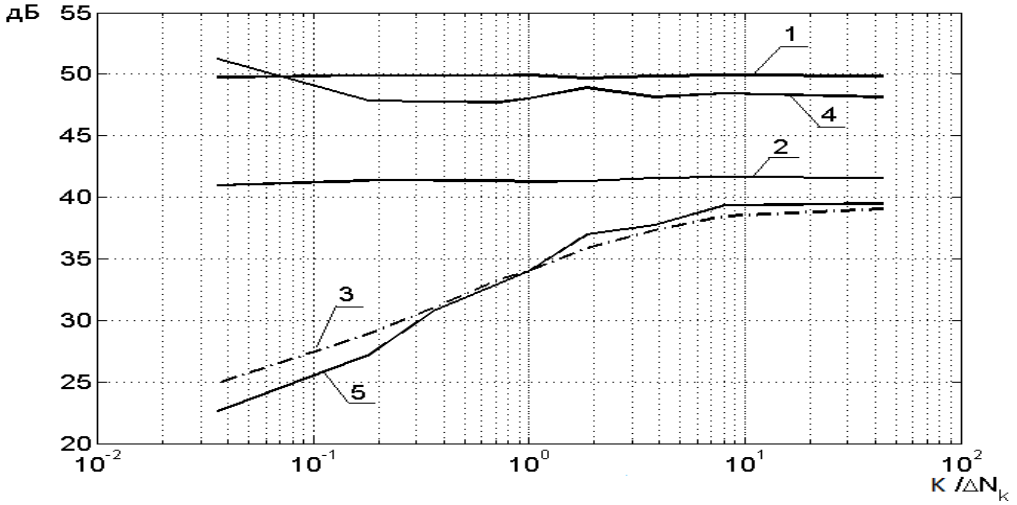


Рис. 3. Распределение суммы собственных чисел корреляционных матриц для различных вариантов их вычисления и корректировки. $\gamma = 0.72; T = 0.95$, $Q = 0.97$, K =37.

Кривые 1 и 4 определяют общую энергию мешающего воздействия от одного источника (при использовании полноразмерных и коротких матриц, соответственно) неадаптивных алгоритмов без мер подавления мешающего сигнала. Кривая 2 характеризует остаточную энергию такого воздействия после подавления мешающего влияния источника ослаблением старшего собственного числа сильно усреднённой корреляционной матрицы, заданной формулой (1). Кривые 3 и 5 характеризуют остаточную энергию рассеянного поля после подавления мешающего сигнала алгоритмами с «короткими» выборками в секциях полноразмерной матрицы (в квадратных скобках в(1)) и «коротких» матрицах, соответственно. Эти варианты показывают

возможность значительного дополнительного подавления мешающего сигнала (до 7 и более дБ) если интервала формирования адаптивных выборок выбран меньше интервала корреляции флюктуаций.

Физической основой для ослабления маскирующего действия рассеянных составляющих является близость флюктуационных искажений в короткой выборке, в результате чего их совместное действие приводит к участию рассеянной компоненты в формировании первого собственного числа и собственного вектора выборочной матрицы, который далее подавляется алгоритмом как единое целое. В результате формируется эффект слежения за суммарным мешающим сигналом, который выражен (в большей или меньшей степени) в зависимости от количества флюктуаций на интервале адаптации. При наличии трёх и более независимых флюктуаций на интервале адаптации ($K / \Delta N_k > 3$) эффект индивидуального слежения за выборкой резко ослабевает и далее исчезает, при этом подавляется только меньшая часть рассеянного поля, близкая по направлению прихода к направлению прихода когерентной части сигнала, остаётся селекция только по направлению прихода. При ($K / \Delta N_k < 3$) формируется дополнительный механизм ослабления рассеянной части акустического поля за счёт присоединения значительной части энергии рассеянной составляющей к главному собственному числу, формируемому когерентной составляющей мешающего сигнала, так что дальнейшей пространственной фильтрации подвергается меньшая часть рассеянного поля мешающего источника.

Подводя итог, отметим перспективные стороны быстрых проекционных алгоритмов:

возможность лучшего ослабления мешающего влияния локальных мешающих сигналов;

расширение области применения адаптивных методов на быстро меняющиеся, в том числе импульсные, процессы в активных режимах за счёт сокращения объёма адаптивной выборки;

большую простоту реализации и представления результатов наблюдения за счёт реализации адаптивных процедур с использованием корреляционных матриц размером меньше числа элементов антенны в 2.5-3 раза.

Литература

1. Capon J. High resolution frequency–wavenumber spectral analysis // Proc. IEEE. 1969. V. 57. P. 1408–1418.
2. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. 1986. V. AP_34. №3. P. 276–280.
3. Лаваль Р., Лабаск И. Влияние неоднородностей и нестабильностей среды на пространственно-временную обработку сигналов. В книге «Подводная акустика и обработка сигналов». М., Мир, 1985, стр. 43-68.
4. Бреховских Л.М., Андреева И.Б. и др. Акустика океана. М.: Наука, 1974.
5. Черемисин О.П., Ратынский М.В., Комов А.А., Пушин А.Е. Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации//Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 2. С. 259-263.
6. Малышкин. Г.С., Кузнецова А.С., Сидельников Г.Б. Обнаружение слабых гидроакустических сигналов на основе быстрых проекционных алгоритмов. «Акустический журнал», т.62, №2, 2016, с. 237-246.
7. Малышкин Г.С. Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов. «Акустический журнал», т.63, №2, 2017, с. 237-246.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ В АКТИВНОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ

Б.П.Белов, д-р техн.наук, Н.Н.Семенов, канд.техн.наук, Е.С.Шилина[1], М.М.Шилин[1]
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия
[1]АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

FURTHER DEVELOPMENT OF ADAPTIVE NOISE SUPPRESSION IN ACTIVE SONAR

B.P.Belov, Dr.Sc., N.N.Semenov, Ph.D., E.S.Shilina[1], M.M.Shilin[1]
Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
[1]JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Рассмотрены новые подходы компенсации локальных помех гидролокатора. Проведено исследование устойчивости рассмотренных алгоритмов к флуктуациям амплитуды локальных помех при их различном уровне давления и угловом положении.

New approaches of suppression of local sonar noise are considered. Research of stability of the considered algorithms to fluctuations of local noise amplitude is conducted at their various pressure level and angular position.

Работа гидролокатора всегда сопряжена с выделением полезного гидроакустического сигнала из помехового фона. Основными типами помех активного гидролокатора являются ходовые помехи, реверберация, естественные и искусственные шумы моря. К последним, помимо шумов дальнего и ближнего судоходства и индустриальных шумов, можно отдельным классом можно отнести локальные источники помех – шумы движителей и искусственно создаваемые сигналы других подводных аппаратов.

Поскольку помехи значительно затрудняют обнаружение полезного сигнала и ухудшают точность оценки параметров сигнала, с ними необходимо бороться. На данный момент известно большое количество способов борьбы с естественными и искусственными помехами, действующими на вход гидролокатора. Среди них можно отметить две группы:

оптимальные алгоритмы, основанные на непосредственном обращении матрицы корреляции помех на элементах антенны. К ним относятся алгоритмы непосредственного обращения матрицы корреляции (НОМ), MVDR [1] или алгоритм Кейпона [2], MUSIC (алгоритм Шмидта) и др. Используются они в основном для стационарных помех и при известных параметрах сигнала, поскольку в ином случае, когда матрица корреляции неизвестна, алгоритмы перестают быть оптимальными.

квазиоптимальные алгоритмы, частично рассмотренные в работах [3-6] и позволяющие подавлять произвольные помехи. Развитие данных алгоритмов идёт по двум направлениям:

адаптивное оценивание обратной матрицы корреляции сигналов между элементами антенны [7-9], позволяющее с высокой точностью подавлять стационарные помехи;

когерентная компенсация помех, то есть когерентное вычитание шума из аддитивной смеси сигнала с шумом [10].

Данная работа является продолжением исследований по поиску оптимального способа борьбы с естественными и искусственными помехами работе активного гидролокатора. Целью настоящей работы является изучение эффективности подавления локальных источников помех (ЛП) и коррелированных естественных помех различными алгоритмами компенсации помех (АКП) с точки зрения последующего обнаружения полезного сигнала активным гидролокатором. В работе сравниваются:

1. алгоритм непосредственного обращения корреляционной матрицы помех на примерах несобственно-структурных алгоритмах НОМ и MVDR [1];
2. 4-канальный АКП с формированием фазовых центров (ФЦ) на антенной решётке;
3. 4-канальный АКП с аппаратной защитой главного максимума (ЗГМ) рабочего канала антенны с когерентной компенсацией помех [10].

Для оценки эффективности подавления помех различными алгоритмами была построена численная имитационная модель сигналов и помех, среды распространения, антенны гидролокатора, а также системы цифровой обработки сигналов в гидролокаторе. Структурная схема модели представлена на рис. 1. Все вычисления проводились во временной области в общей полосе частот.

Гидролокатор в имитационной модели мог посылать зондирующий сигнал элементами антенны, на основании которого формировался полезный сигнал и помехи для каждого элемента антенной решётки гидролокатора. Все компоненты сигналов и помех суммировались на приём-

ных элементах, преобразовывались условно в электрический сигнал и поступали на АЦП и алгоритмы обработки сигналов, включающие полосовую фильтрацию, адаптивный компенсатор помех и обнаружитель полезного сигнала.

Входные воздействия на антенну гидролокатора содержали ходовые, реверберационные, локальные помехи, а также полезный эхо-сигнал. Математическая модель формирования полезного сигнала и помех описана в [11]. Полезный сигнал и ЛП моделировались в виде прямого луча, отражений и рассеяния от границ среды, а также рассеяния неоднородностями среды. Сигнал и ЛП моделировались в ближней зоне и расстояния до них соответственно были равны 1000 м и 800 м. Спектральная плотность давления (СПД) локальных помех изменялась в пределах от 20 до 70 Па/√Гц. В качестве антенны использовалась 52-элементная плоская решётка, с межэлементным расстоянием, равным 0,5 длины волны на рабочей частоте f_p, с шириной рабочей полосы 20% от f_p.

Исследование проводилось при фиксированном направлении полезного сигнала 5° и следующих условиях:

1. последовательное изменение углового положения ЛП для определения локальных минимумов характеристики направленности антенны (ХН) при СПД помехи 40 Па/√Гц (результаты моделирования представлены на рис. 2);
2. последовательное увеличение СПД одной ЛП, находящейся в боковом поле ХН, для определения граничных значений СПД, подавляемых каждым алгоритмом;
3. последовательное увеличение СПД двух ЛП, находящихся в боковом поле ХН, для определения граничных значений СПД, подавляемых каждым алгоритмом;
4. перенесение ЛП из бокового поля в главный лепесток ХН антенны гидролокатора и последовательное увеличение СПД двух ЛП, находящихся в боковом поле ХН, для определения граничных значений СПД, подавляемых каждым алгоритмом.

В процессе выполнения работы оценивалась возможность обнаружения полезного сигнала и подавления ЛП каждым из алгоритмов при приближении ЛП к полезному сигналу.

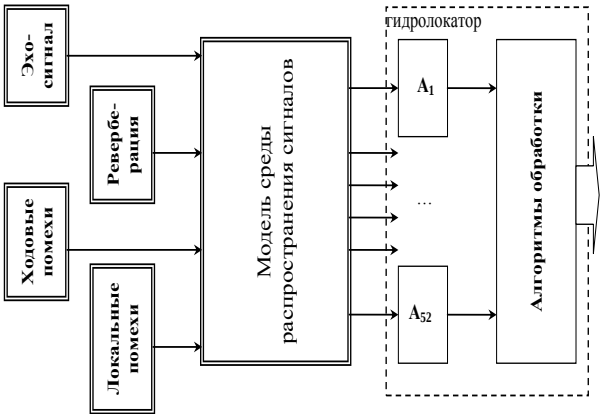


Рис. 1. Структура модели сигналов и помех.

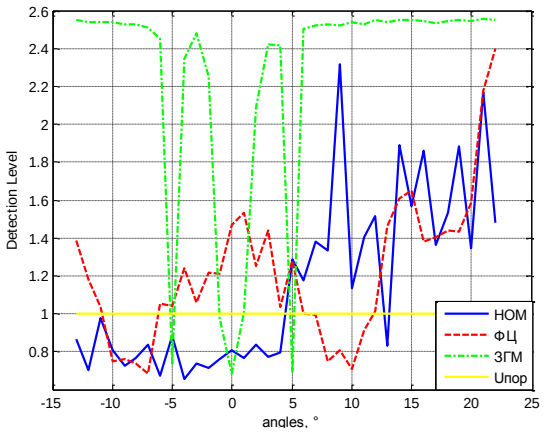


Рис. 2. Зависимость уровня обнаружения от положения ЛП при СПД 40 Па/√Гц.

На рис. 2 представлена зависимость уровня обнаружения (Detection Level) от углового положения ЛП (по оси абсцисс отложены углы (angles) в градусах). Считается, что помеха успешно подавлена и сигнал обнаружен при превышении $U_{пор}$ значением уровня обнаружения, который равен отношению максимального выброса сигнала к СКО. Из рисунка чётко видно, что алгоритм с НОМ плохо работает при нестационарных помехах, форма его графика связана с тем, что полезный сигнал смещён относительно оси ХН, реверберация нестационарная и остальные помехи неравномерно распределены по пространству. Алгоритм с ФЦ имеет широкие минимумы ХН в направлении -9° и 9°, а алгоритм с ЗГМ имеет узкие нули в нулевом направлении, в направлении полезного сигнала (5°) и симметрично ему -5°.

Для дальнейшего исследования пеленг на ЛП в боковом поле был принят равным 14° и 20°, что обеспечивает их нахождение вне нулей ХН каждого из рассматриваемых алгоритмов.

На рис. 3 представлена зависимость уровня обнаружения от СПД одной ЛП, находящейся в боковом поле ХН на пеленге 14°. На рис. 4 представлена зависимость уровня обнаружения от СПД (изменялась синхронно) двух ЛП, находящихся в боковом поле ХН на пеленге 14° и 20°.

На рис. 5 представлена зависимость уровня обнаружения от СПД (изменялась синхронно) двух ЛП, одна из которых находится в боковом поле ХН на пеленге 14°, а другая – в главном лепестке ХН на пеленге 3°.

На рис. 6 представлена зависимость уровня обнаружения от положения ЛП: одна ЛП в боковом поле на пеленге 14°, другая ЛП последовательно перемещается из бокового поля в главный лепесток и обратно. СПД помехи, как и в начальном случае, составляет 40 Па/√Гц.

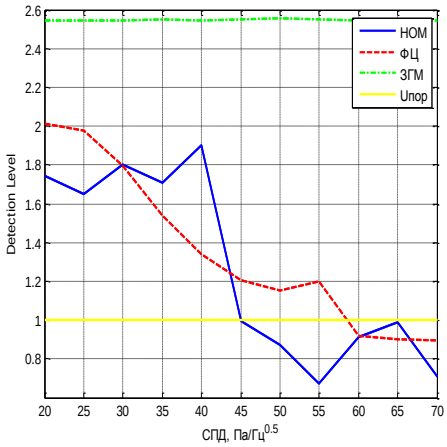


Рис. 3. Зависимость уровня обнаружения от СПД одной ЛП.

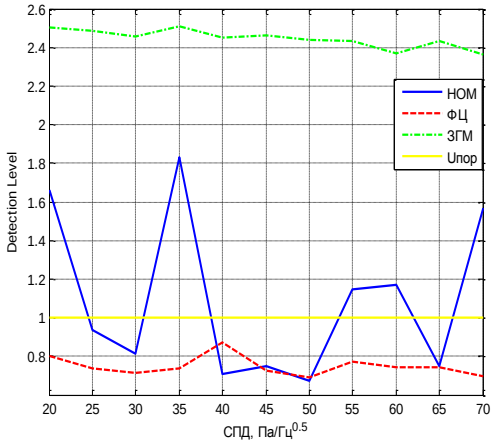


Рис. 4. Зависимость уровня обнаружения от СПД двух ЛП в боковом поле ХН.

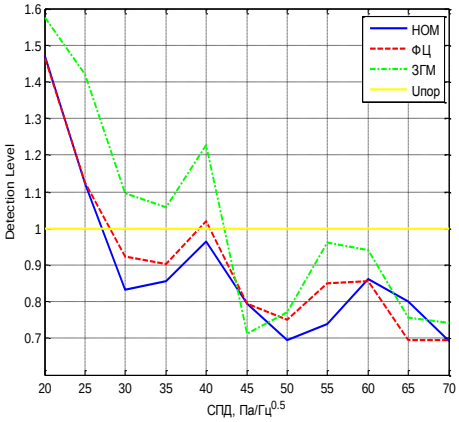


Рис. 5. Зависимость уровня обнаружения от СПД двух ЛП на пеленгах 14° и 3°

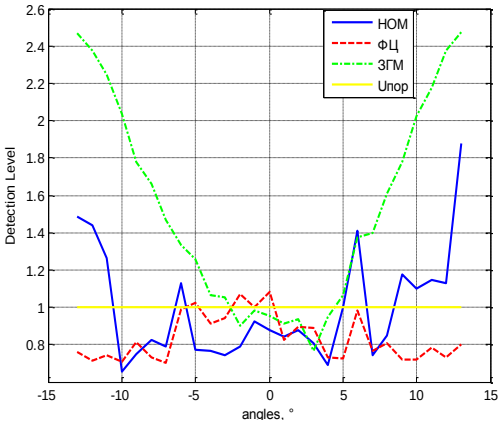


Рис. 6. Зависимость уровня обнаружения от положения первой ЛП, при стационарном пеленге на вторую ЛП 14°

Анализируя полученные результаты моделирования можно сделать следующие выводы:

алгоритм адаптивной компенсации помех с НОМ плохо работает с нестационарными помехами. В случае, когда ЛП находятся только в боковом поле ХН, достаточно СПД в 45-50 Па/√Гц для того, чтобы АКП перестал подавлять помехи. В случае нахождения ЛП одновременно в боковом поле и в главном лепестке, работа алгоритма прекращается уже при СПД в 25-30 Па/√Гц;

алгоритм адаптивной компенсации помех с ФЦ хорошо подавляет помехи в главном максимуме (при наличии лишь одной ЛП) и в боковом поле ХН (на направлениях, не совпадающих с минимумами ХН его компенсационных каналов). При наличии одной ЛП в боковом поле АКП перестаёт функционировать при СПД помехи ≥60 Па/√Гц. При наличии двух ЛП (в боковом поле и главном максимуме ХН одновременно), обнаружение полезного сигнала происходит лишь при СПД, не превышающей 25 Па/√Гц. Это говорит возможности подавления помех, находящихся в главном лепестке ХН антенны гидролокатора. Однако наличие двух ЛП в боковом поле парализует работу АКП и обнаружения сигнала не происходит;

алгоритм адаптивной компенсации помех с ЗГМ лучше всего работает при нахождении ЛП в боковом поле. Однако даже нахождение сигнала и помехи в главном лепестке ХН не выводит из строя данный АКП при СПД помех до 45 Па/√Гц. При совпадении направлений помехи и

сигнала, компенсации помехи не происходит, в отличие от АКП с ФЦ, где при нахождении помехи на пеленге 5° она отлично подавляется и эхосигнал от цели обнаруживается.

Проведённое исследование показало слабую эффективность подавления локальных нестационарных и коррелированных естественных помех алгоритмом АКП с НОМ. Алгоритм АКП с ФЦ может подавлять 2 ЛП небольшой мощности, находящихся в главном лепестке и боковом поле. При увеличении мощности излучения и/или уменьшении дистанции алгоритм становится менее эффективным. Более высокая мощность излучения, характерная для помех, находящихся на более близком расстоянии к гидролокатору, не становится преградой для обнаружения сигнала гидролокатором с АКП с ЗГМ. Он эффективно подавляет помехи, находящиеся как в боковом поле, так и в главном максимуме ХН антенны гидролокатора.

В исследовании рассмотрен лишь краткий набор исходных данных, который требуется увеличить для проведения более детального анализа рассмотренных алгоритмов компенсации помех.

Литература

1. Van Trees H.L. Optimum Array Processing. NY:Wiley & Sons, 2002.
2. Кейпон Дж. Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением. ТИИЭР, 1969, № 8.
3. Йонушаускайте Р.С., Семенов Н.Н. Эффективность различных адаптивных компенсаторов помех активного гидролокатора с учётом разброса чувствительности элементов антенной решётки. // Труды XXI Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж: НПФ «САКВО́ЕЕ». 2015, с.1332-1344.
4. Семёнов Н.Н., Шилина Е.С. Исследование эффективности подавления помех от нестационарных источников. Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2016». – РАН, СПб, 2016, с. 339-342. ISBN 978-5-00-105015-5.
5. Семёнов Н.Н., Шилин М.М. Преимущества методов сверхразрешения при телеуправлении подводным роботом. Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. ГА-2016». РАН, СПб, 2016, с. 328-330. ISBN 978-5-00-105015-5.
6. Йонушаускайте Р.С., Семёнов Н.Н. Различные подходы к компенсации локальных помех, приходящих на антенну гидролокатора. Труды VII научно-практической конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения», Волгоград: НИИ Гидросвязи "Штиль", 2015. с.278-286.
7. Малышкин Г.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы при разрешении слабых гидроакустических сигналов. Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2016». – РАН, СПб, 2016, с. 336-339. ISBN 978-5-00-105015-5.
8. Малышкин Г.С., Сидельников Г.Б. Анализ натурных данных классическими и быстрыми проекционными алгоритмами в сложных помеховых ситуациях. Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2016». – РАН, СПб, 2016, с. 333-335. ISBN 978-5-00-105015-5.
9. Йонушаускайте Р.С., Семёнов Н.Н. Различные подходы к компенсации локальных помех, приходящих на антенну гидролокатора. Труды VII научно-практической конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения», Волгоград: НИИ Гидросвязи "Штиль", 2015.
10. Applebaum S. P. and D. J. Chapman. Adaptive arrays with main beam constraints. IEEE Trans. Antennas Prop., 24:650-662, 1976.
11. Белов Б.П., Миронов И.В., Семенов Н.Н. Адаптивный компенсатор помех гидролокатора, работающий во временной области. // Труды XI всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2012», СПб.: Наука, 2012, с. 378-382.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГИДРОЛОКАТОРОВ ОСВЕЩЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ОБСТАНОВКИ

А.А.Войтов, А.Ю.Корнеев, Ю.А.Корнеев, канд.техн.наук, Р.К.Хаметов, канд.техн.наук
Кировский филиал АО «Концерн «Океанприбор», Кировск, Ленинградская обл., Россия

ANALYSIS OF PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF AUTOMATIC SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS FOR SONARS OF NEARBY ENVIRONMENT SURVEILLANCE

A.A.Voitov, A.Yu.Korneyev, Yu.A.Korneyev, Ph.D., R.K.Hametov, Ph.D.
Kirovsk Branch of JSC «Concern «Oceanpribor», Kirovsk, Leningrad region, Russia

Проанализированы характеристики типичных реверберационных помех и сигналов, рассеянных объектами разных классов, полученные в результате многочисленных натурных экспериментов. Подробно обсуждаются вопросы обеспечения устойчивости алгоритмов обнаружения объектов разной пространственной структуры, функционирующих в условиях нестационарных фоновых помех с априорно неизвестными характеристиками.

As a result of numerous field experiments, characteristics of typical reverberation interference and signal scattered by different objects are analyzed. Stabilization issues of detection algorithms of diverse spatial structure objects are discussed in the context of non-stationary background interference with priory unknown characteristics.

Основные проблемы, возникающие при разработке высокоавтоматизированных гидролокационных систем обнаружения и идентификации объектов, обусловлены следующими причинами:

нестационарностью характеристик реверберационных помех, (характерно для донной и поверхностной реверберации);

большим динамическим диапазоном обрабатываемых сигналов;

априорной неопределенностью модулирующих функций интенсивности помех;

априорной неопределенностью пространственных размеров, формы и ориентации обнаруживаемых объектов и навигационных препятствий.

Классификация помех и сигналов, обнаруживаемых ГЛ ОБО. Объекты, обнаруживаемые и идентифицируемые (классифицируемые) гидролокатором освещения ближней обстановки (ГЛ ОБО), имеют существенно отличающиеся пространственные характеристики и структурные особенности.

Классы обнаруживаемых объектов и помех можно разделить на 4 группы.

Кл.1. Малые объекты, близкие к точечным по сравнению с размерами элемента разрешения гидролокатора, например, - швартовая бочка, якорная мина. Точечным считается объект, геометрические размеры которого меньше, чем размеры пространственного элемента разрешения гидролокатора.

Кл.2. Подводная лодка (ПЛ).

Кл.3. Надводный корабль (НК).

Для объектов 2 и 3 классов отражения формируются как от корпуса судна, так и от «спутного» следа (шлейфа), образуемого движущимся судном.

Протяженность обнаруживаемого ГЛ ОБО шлейфа зависит от скорости объекта и может достигать 1…3 км. От судна на стопе или на очень малом ходу отражения формируются только от корпуса протяженного объекта, длина которого в зависимости от класса и ракурса может быть 100-200 метров.

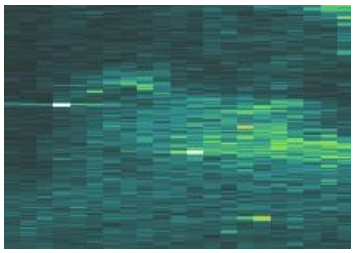
Кл.4. Реверберационные помехи, подразделяемые в свою очередь на поверхностную, объемную и донную реверберацию.

Поверхностная реверберация обусловлена волнением водной поверхности (рис.1е). Даже небольшие волны на морской поверхности (высотой 10-20 см) формируют на ГЛ-изображении заметные отражения. При более сильном морском волнении структуру водной поверхности можно представить двумасштабной моделью - крупные ветровые волны и небольшие капиллярные волны [1]. При этом степень отражения ГЛ-сигнала от разных участков морских волн различна, что формирует на ГЛ-изображении более сложную характерную картину двумасштабного волнения.

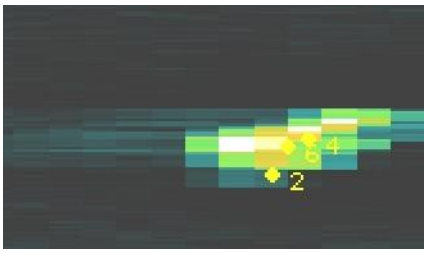
Объемная реверберация обусловлена присутствием в водной толще различных организмов, пузырьков воздуха. Акустические волны отражаются мелкими ракообразными, стаями (косяками) рыб.

Донная реверберация формируется неровностями рельефа дна и различными донными отложениями. «Пересеченность» рельефа дна, разная степень заиленности приводит к неоднородности (нестационарности) отражений от дна.

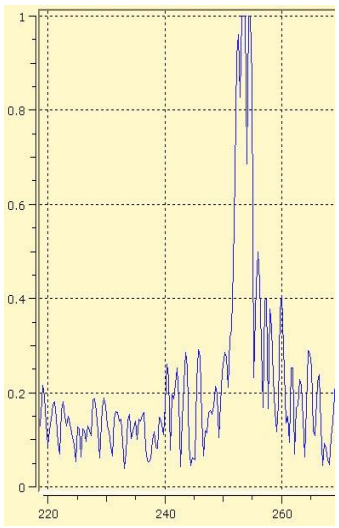
На рис.1 приведены примеры сигналов, отраженных объектами разных классов. На рис.1 а), б) и в) по вертикали отложены дискреты дальности, а по горизонтали – характеристики направленности (ХН).



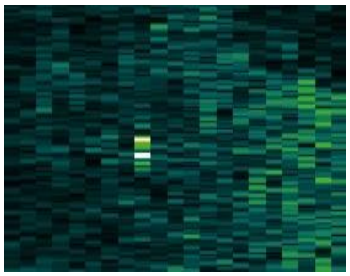
(а) Точечные объекты



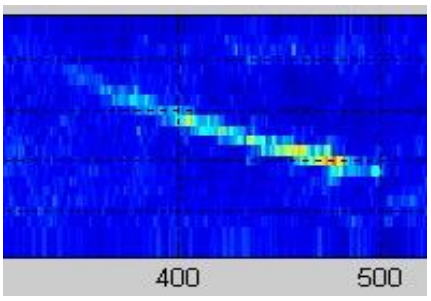
(в) Локально-протяженный объект



(д) Развертка сигнала по дальности в 14-ой ХН. Отражение от швартовой бочки. Дистанция – 253 метра. Сигнал флюктуирует.



(б) Точечный объект - швартовая бочка (сверху)



(г) Шлейф от подводного подвижного объекта (сверху). Протяженность Шлейфа ~1300 метров

(е) Шероховатая морская поверхность и шлейф за движущимся катером (снизу)

ж) Структура морского волнения, формирующего поверхностную реверберацию

Двухмасштабная шероховатая морская поверхность (слева)

Рис.1. Примеры сигналов, отраженных объектами разных классов.

На рис.1а показаны несколько точечных объектов, на рис.1б – одиночный точечный объект – швартовая бочка. Данный объект формирует отраженный сигнал, раздробленный по дальности на два дискрета, между которыми заметен провал интенсивности отраженного сигнала (в 1-2 дискрета дальности). Такая ситуация обусловлена многопутным распространением отраженных ГЛ-сигналов, а замирание между отдельными отметками – интерференцией сигналов. Этот же объект, что и на рис.1б, представлен на рис.1д, но уже в виде амплитудной развертки сигнала по дальности (отраженный от цели сигнал попадает в 14-ю ХН горизонтального веера лучей). Дистанция до объекта 253 метра, протяженность отметки от объекта - около 5 метров. Отраженный от швартовой бочки сигнал заметно флюктуирует, что вызвано интерференцией парциальных отраженных сигналов - от бочки, якорной цепи, которая крепит бочку, и якоря.

На рис.1в показан локально-протяженный объект (ЛПО), который на ГЛИ выглядит как группа близко расположенных отметок. ГЛ-изображение, приведенное на рис.1в, соответствует

обнаружению локально-протяженного объекта, отраженный сигнал от которого принимается не только главными, но и боковыми лепестками характеристик направленности антенной системы. Указанные особенности отраженных сигналов требуют их всестороннего анализа и учета при проектировании алгоритмов обработки ГЛ-информации.

Рис.1 г развернут по отношению к другим рисункам: по горизонтали отложены дискреты дальности, а по вертикали – ХН, при этом шкала дальности редуцирована. На данном рисунке показан шлейф от движущегося объекта (объект движется относительно изображения слева направо). Протяженность шлейфа составляет на данном слайде около 1300 метров. На рис.1е приведено изображение шероховатой морской поверхности и шлейф за движущимся катером. На рис.1ж показана структура двумасштабной шероховатой морской поверхности.

Модели сигналов, рассеянных реальными объектами. На рис.3 представлены структурные модели сигналов, рассеянных «типовыми» реальными объектами, порождающие одиночные точечные, одиночные локально-протяженные, множественные отметки первого и второго типов и протяженные раздробленные отметки.

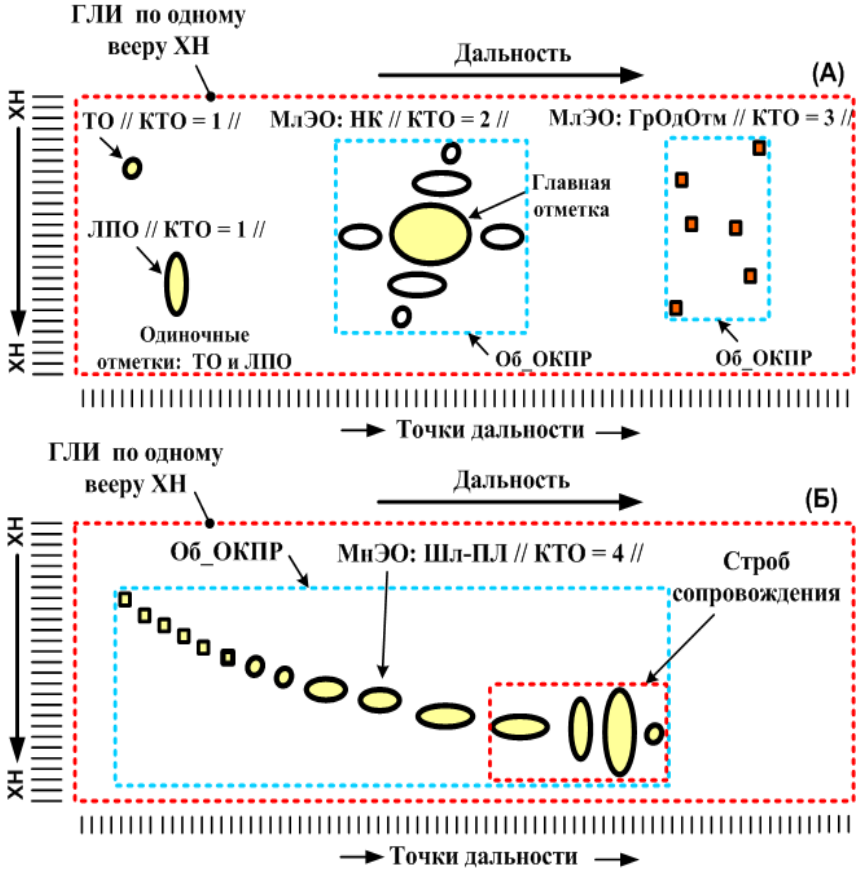


Рис. 3. Модели рассеянных реальными объектами сигналов.

Особенности распределений отсчетов реверберационных помех и сигналов. Распределение отсчетов огибающей сигналов на выходе узкополосного тракта обработки (приемника) может существенно варьироваться. Это обуславливается как особенностями (характеристиками) тракта обработки, так и особенностями поверхностей, на которых происходит рассеяние сигналов.

Приведем примеры таких ситуаций:

идеальный линейный детектор на выходе узкополосного тракта. В этом случае отсчеты огибающей подчиняются распределению Релея,

идеальный квадратичный детектор на выходе узкополосного тракта. В этом случае отсчеты огибающей подчиняются экспоненциальному распределению.

В реальных ситуациях детектор не является строго линейным или квадратичным, а его характеристики могут совмещать особенности характеристик как линейного, так и квадратичного

детектора. В таком случае распределение может быть описано «комбинированным» законом и содержит в себе особенности разных распределений. При модификациях ГЛ-изображения, например, при редукции изображения по дальности с использованием экстремальных статистик на коротких временных интервалах, распределение экстремальных отсчетов отличается от исходного релеевского [2]. Распределение огибающей отраженных от морской поверхности сигналов не является релеевским, оно имеет более длинный правый скат плотности распределения [1].

Заключение

В статье приведены примеры фрагментов ГЛ-изображений, поясняющих неоднородность компонентов, формирующих помехо-целевую обстановку. Представлена классификация объектов, обнаруживаемых ГЛ ОБО, а также компонентный состав нестационарных помех, присутствующих на изображении.

Проведенный анализ особенностей ГЛ-изображений и сцен позволяет перейти к построению устойчивых алгоритмов обнаружения объектов при наличии нестационарных помех с априорно неизвестными характеристиками. На основе приведенного анализа в [3] рассмотрены возможные варианты реализации процедур оценивания полей параметров гладких помех при наличии на ГЛИ точечных и локально-протяженных дискретных помех.

Литература

1. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.. Ветровое волнение в Мировом океане. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3-х томах, т.3, 1976.
3. Войтов А.А., Корнеев А.Ю., Корнеев Ю.А., Хаметов Р.К. Разработка алгоритмов первичной и вторичной обработки информации в гидролокаторах освещения ближней обстановки (*см. статью в настоящем сборнике*).

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОЛОКАТОРАХ ОСВЕЩЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ОБСТАНОВКИ

А.А.Войтов, А.Ю.Корнеев, Ю.А.Корнеев, канд.техн.наук, Р.К.Хаметов, канд.техн.наук
Кировский филиал АО «Концерн «Океанприбор», Кировск, Ленинградская обл., Россия

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR PRIMARY AND SECONDARY INFORMATION PROCESSING IN SONARS OF NEARY ENVIRONMENT SURVEILLANCE

A.A.Voitov, A.Yu.Korneyev, Yu.A.Korneyev, Ph.D., R.K.Hametov, Ph.D.
Kirovsk Branch of JSC «Concern «Oceanpribor», Kirovsk, Leningrad region, Russia

Рассматриваются вопросы адаптивного обнаружения объектов на фоне нестационарных помех с априорно неизвестными характеристиками. Представлена общая структура реализации алгоритмов адаптивного обнаружения. Предлагаются и детально рассматриваются алгоритмы адаптивно-непарметрического обнаружения.

Issues of adaptive objects detection against background of non-stationary interference with priory unknown characteristics are considered. General structure of adaptive detection algorithms implementation is presented. Algorithms of adaptive non-parametric detection are elaborated.

Основной проблемой, решаемой при разработке систем обработки гидролокационной информации, является преодоление априорной неопределенности характеристик и текущих особенностей помехо-целевой обстановки, в условиях которой функционирует гидролокатор освещения ближней обстановки (ГЛ ОБО).

Наиболее результативный подход к решению указанной проблемы состоит в параметрической и структурной адаптации алгоритмов обработки.

Общая структура устойчивых алгоритмов адаптивного обнаружения. Рис. 1 раскрывает проблемы реализации адаптивных алгоритмов обнаружения и пути преодоления априорной неопределенности характеристик помехо-целевой обстановки.

В качестве входных данных для алгоритмов обнаружения используется двумерное (в данном случае) гидролокационное изображение, которое имеет две основные составляющие: нестационарный фон и объекты на этом фоне. Компоненты нестационарного фона представлены в блоке 3 на рис.1: гладкие помехи (ГП) – их интенсивность может быть аппроксимирована гладкими функциями; дискретные помехи (ДП) – это неоднородности с быстро изменяющейся по координатам интенсивностью. К таким помехам относятся отражения от береговой черты, донных неоднородностей.

Дискретными по структуре являются также и объекты, перечисленные в блоке 4 на рис.1: точечные объекты (ТО), локально-протяженные объекты (ЛПО), протяженные объекты (ПрО). Дискретные помехи по этой классификации можно отнести к протяженным объектам.

В реальных ситуациях детектор не является строго линейным или квадратичным, а его характеристики могут совмещать параметры линейного и квадратичного детектора. В таком случае распределение не может быть строго описано одним законом, а содержит в себе особенности разных распределений. Порог обнаружения адаптивно сформированный с учетом простой ***однопараметрической*** модели распределения (Релей или экспоненциальное), не будет соответствовать реальным помехам, вследствие этого и уровень ложной тревоги будет отличаться от значения, заданного оператором.

Поскольку распределения реальных помех и параметры реальных систем обработки ГЛ-сигналов точно не известны, а характеристики помех нестационарны, необходимо ввести более универсальную модель распределения гладких помех, описываемую двумя параметрами: параметрами положения и размаха (бл.6 рис.1).

В блоке 7 задается модель поля заданного квантиля $C_{Флт}$ ложной тревоги стьюдентизованного ГЛИ. Стьюдентизованное ГЛИ - это изображение, над которым произведена процедура стационаризации как по параметру среднего (центрирование), так и по параметру размаха флюктуаций (нормированное на размах флюктуаций ГЛИ). Поле заданного квантиля удобнее вычислять именно для стьюдентизованного изображения.

Необходимо отметить, что при использовании данной модели предполагается, что процедура стационаризации реализовалась «идеально» и поэтому поле квантиля для данной модели имеет или постоянный уровень или небольшие отклонения от постоянного значения.

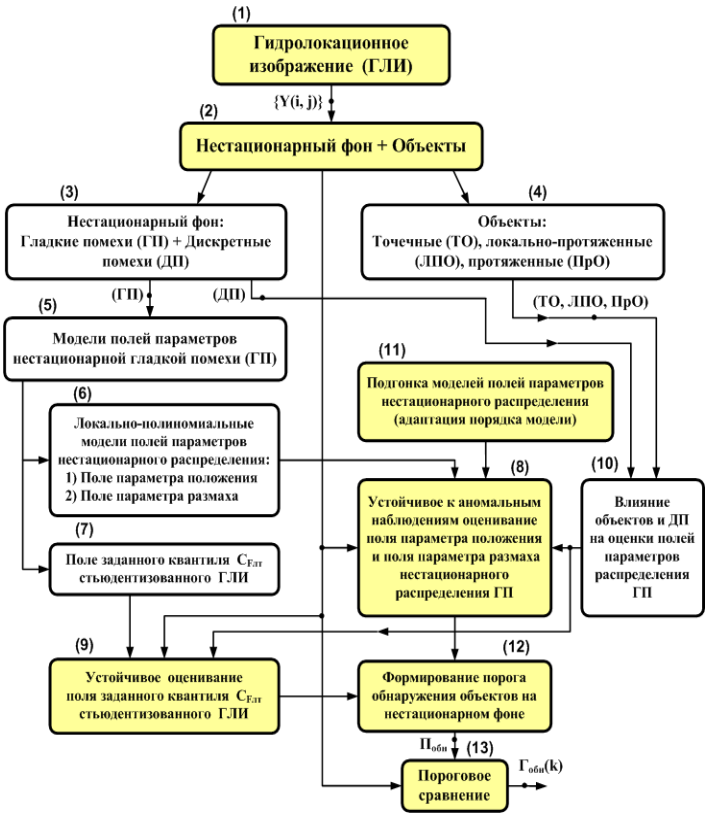
Как было отмечено выше, объекты (бл.4) и дискретные помехи (бл.3) имеют похожие структуры, отличающиеся от структуры гладких помех. Блоки 3…7 и 10 на рис.1 описывают

модели полезных сигналов (объектов) и помех, а также их взаимное влияние, но не содержат алгоритмов для их обработки. Описание последующих блоков непосредственно относится к функционированию алгоритмов обработки. В блоках 8 и 9 учитывается влияние выбросов дискретных помех и объектов, описанное в блоке 10, и выполняется устойчивое к таким аномальным наблюдениям оценивание. Наличие ДП и объектов при оценивании параметров распределений ГП нестационарного ГЛИ приводит к необходимости использования при оценивании алгоритма категоризации обучающей выборки (категоризация - отбраковка аномальных отсчетов с замещением).

Основываясь на полученной устойчивой (категоризованной) оценке полей параметра положения $\{m^{к}_{у}(i, j)\}$, параметра размаха $\{\sigma^{к}_{у}(i, j)\}$ [2] и заданного квантиля $\{C_{Fлт}(i, j)\}$ [3] в блоке 12 выполняется устойчивое формирование порога обнаружения объектов $П_{обн}(i, j)$ на нестационарном фоне:

$$Y(i, j) \begin{array}{c} \Gamma_{обн} = 1 \\ >< \\ \Gamma_{обн} = 0 \end{array} П_{обн}(i, j) = m^{к}_{у}(i, j) + C_{Fлт}(i, j)\, \sigma^{к}_{у}(i, j) \qquad (1)$$

$$Y_{ст}(i, j) = [Y(i, j) - m^{к}_{у}(i, j)] / \sigma^{к}_{у}(i, j) \begin{array}{c} \Gamma_{обн} = 1 \\ >< \\ \Gamma_{обн} = 0 \end{array} П^{ст}_{обн}(i, j) = C_{Fлт}(i, j) \qquad (2)$$



Функции блоков:

блок 8 - реализует устойчивое оценивание поля параметра положения и поля параметра размаха нестационарного распределения ГП;

блок 9 - осуществляет устойчивое оценивание поля заданного квантиля $C_{Fлт}$ стьюдентизованного ГЛИ;

блок 10 - описывает влияние объектов и ДП на оценку полей параметров распределения гладких помех;

блок 11 – реализует согласование порядка постулированной полиномиальной модели и порядка реальной модулирующей функции фона.

Рис. 1. Общая структура реализации алгоритмов адаптивного обнаружения.

В блоке 13 (рис.1) производится пороговое сравнение отсчетов поля исходного ГЛИ $\{Y(i, j)\}$ со сформированным с использованием помехозащищенных алгоритмов порогом $П_{обн}(i, j)$. При этом может быть реализовано сравнение как исходного поля $\{Y(i, j)\}$ с нестационарным порогом (1), так и стационаризованного поля $\{Y_{ст}(i, j)\}$ с порогом, соответствующим заданному квантилю $C_{Fлт}(i, j)$ (соответствующему ложной тревоге) распределения (2). На выходе блока 13 формируются решения об обнаружении по каждой k-ой отметке $\Gamma_{обн}(k)$.

При формировании полиномиальных регрессионных моделей полей параметров $\{m^{к}_{у}(i, j)\}$, $\{\sigma^{к}_{у}(i, j)\}$ указываются порядки полиномов, которыми описываются поля параметров распределения нестационарного фона (бл.6 и бл.8 на рис.1) [4].

Реализация алгоритмов сопровождения объектов. Проведенные натурные эксперименты, анализ условий работы алгоритмов обнаружения и автоматического захвата отметок на сопровождение показали, что традиционный координатный алгоритм сопровождения отметок [5] должен быть дополнен алгоритмом ассоциирования отметок с трассами по идентификационным признакам (ИДП) отметок. В ***вектор*** ИДП каждой отметки входят следующие параметры: а) размеры проекций следов отметок на оси координат; б) максимальная и средняя амплитуды отметки; в) площади следов отметок на порогах сегментации; г) объемы отметки над порогами сегментации; д) отношение С/Ш отметки; е) структурные характеристики отметки.

При реализации алгоритмов автозахвата и сопровождения отметок применяется алгоритм ассоциирования отметок с трассами с использованием вектора ИДП. Ассоциирование отметки с трассой производится путем сравнения метрик нескольких отметок, попавших в строб захвата или сопровождения, и с трассой ассоциируется та отметка, метрика которой является минимальной. При этом метрика не должна превышать порога ассоциирования. Мерой сходства отметок с трассами, т.е. с отметками предыдущих циклов, уже ассоциированных с трассой, является метрика, формируемая из компонент вектора ИДП текущей отметки и компонент опорного вектора ИДП. Опорный вектор ИДП формируется осреднением на скользящем окне (5…6 циклов зондирования) компонент векторов ИДП отметок, ассоциированных с трассой.

$$Metr1b = \sum_{j} [| \text{ИДП}(i, j, k_i, s) - \text{ИДП}_{acc}(i-1, j, s)| / \text{ИДП}_{acc}(i-1, j, s)] \qquad (3)$$

В выражении (3) приняты обозначения: i - номер обзора, k_i - номер отметки в стробе на i-ом обзоре, s – номер строба, j-я компонента вектора ИДП. ИДП (i, j, k_i, s) j-я компонента вектора ИДП k_i отметки на i-ом обзоре в s-ом стробе, $\text{ИДП}_{acc}(i-1, j, s)$ – j-я компонента вектора ИДП на (i-1)-ом обзоре для отметки, ассоциированной с s-ой трассой. от номера цикла (обзора).

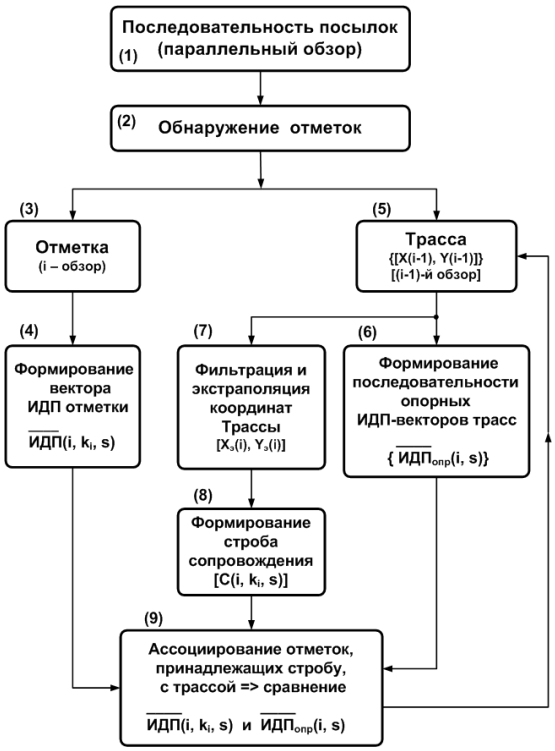


Рис.2 (слева). Пояснение алгоритма ассоциирования отметок с трассами, использующего идентификационные признаки отметок.

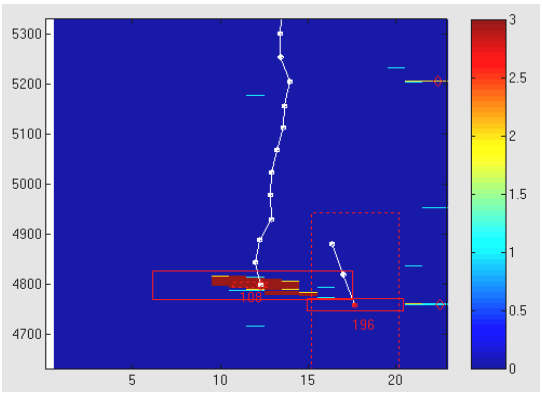


Рис. 3. Трасса сопровождаемого объекта, 25-ый цикл. Показано сегментированное на порогах h1, h2, h3 ГЛ-изображение и стробы сопровождения.

На рис. 2 поясняется структура алгоритма ассоциирования отметок с трассами, использующего идентификационные признаки отметок и оценки средних значений ИДП. На рис. 3 показана трасса объекта на 25-м цикле сопровождения. На рисунке приведено сегментированное на порогах h1, h2, h3 ГЛ-изображение и стробы сопровождения. На рис.4 приведены графики последовательностей компонент идентификационных признаков сопровождаемой отметки, снятые на трассе длиной в 80 циклов, т.е. представлены зависимости компонент вектора ИДП сопровождаемого объекта

В состав компонент вектора ИДП, описывающего особенности каждой отметки, входили: а) максимальная и средняя по следу отметки амплитуда, б) площади сечений отметки на трех

порогах сегментации, в) объемы отметки над порогами сегментации, г) максимальные и средние сечения следа отметки по дальности и курсовому углу, д) протяженность следа отметки по дальности и курсовому углу.

На рис. 4 в 8-ой и 9-ой клетках объединенных графиков (снизу - в центре и справа) приведены зависимости метрики и порога ассоциирования отметки с трассой от номера цикла.

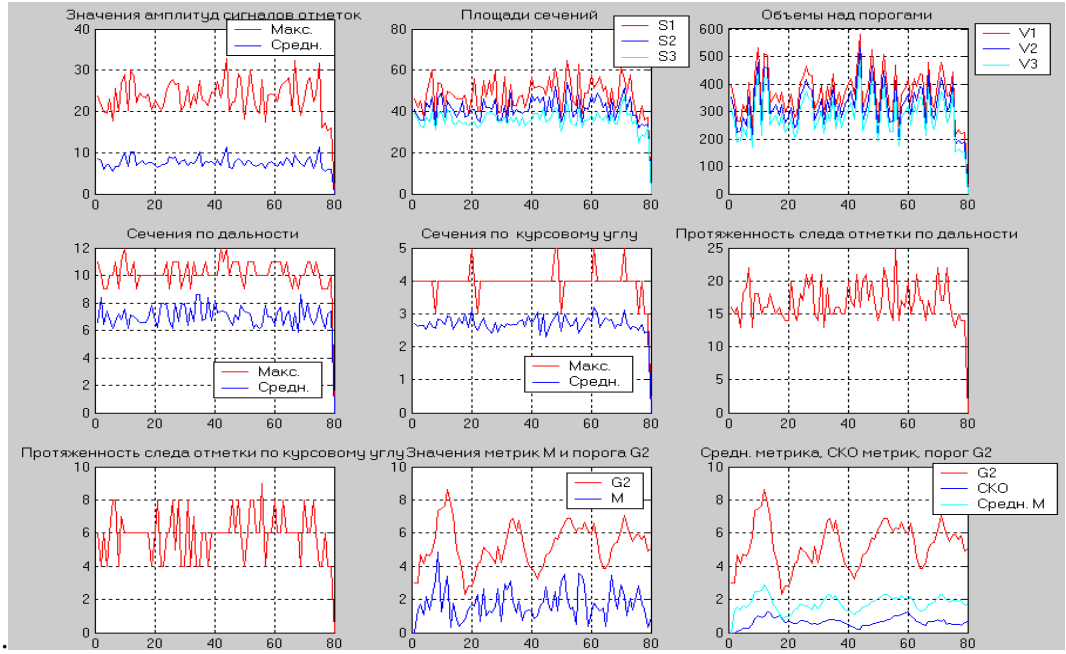


Рис. 4. Графики последовательностей компонент идентификационных признаков сопровождаемой отметки, снятые на трассе длиной в 80 циклов.

Заключение

1. Применительно к гидролокаторам освещения ближней подводной обстановки рассмотрены вопросы реализации перспективных алгоритмов первичной и вторичной обработки ГЛ-информации.

2. Алгоритмы включают внутриобзорную последетекторную обработку ГЛ-информации – обнаружение, измерение координат отметок, формирование идентификационных признаков отметок, а также реализацию алгоритмов межобзорной обработки, обеспечивающих автоматический захват и сопровождение отметок.

3. При реализации алгоритмов адаптивного обнаружения для обеспечения устойчивости процедур оценивания параметров полей фоновых отражений применены робастные алгоритмы, позволяющие существенно снизить влияние на формируемые оценки параметров ГЛИ аномальных выбросов, присутствующих в обрабатываемых массивах отсчетов ГЛ-изображения.

4. Для стабилизации вероятности ложных тревог при нестационарном гладком фоне используются полиномиальные модели полей параметров распределений гладких помех.

5. Для обеспечения надежности алгоритмов автоматического захвата и сопровождения объектов в многоцелевых ситуациях применены алгоритмы анализа и классификации отметок, а также алгоритмы межобзорного отождествления отметок по набору идентификационных признаков, формируемых на этапе первичной внутриобзорной обработки ГЛ-информации.

Литература

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3-х томах, т.3, 1976.
2. Козлов Н.Н., Корнеев Ю.А., Мазин Ю.В. Категоризация данных при адаптивном обнаружении сигналов. – Труды / ЛИАП, -Л.:1979, вып.24.
3. Помехозащищенный обнаружитель сигналов обзорного гидролокатора. Заявка на патент №2013152376 от 26.11.2013 г. Войтов А.А., Казаков Б.М., Корнеев А.Ю., Корнеев Ю.А., Хаметов Р.К.
4. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980.
5. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГИДРОЛОКАТОРАХ БОКОВОГО ОБЗОРА

А.А.Войтов, А.Ю.Корнеев, Ю.А.Корнеев, канд.техн.наук, А.Ю.Зилинберг, канд.техн.наук
Кировский филиал АО «Концерн «Океанприбор», Кировск, Ленинградская обл., Россия

DEVELOPMENT OF IMAGE PROCESSING ALGORITHMS FOR SIDE-SCAN SONARS

A.A.Voitov, A.Yu.Korneyev, Yu.A.Korneyev, Ph.D., A.Yu.Zilinberg, Ph.D.
Kirovsk Branch of JSC «Concern «Oceanpribor», Kirovsk, Leningrad region, Russia

Статья посвящена разработке алгоритмов автоматической обработки изображений, которые формируются на выходе приемника ГЛБО. Рассмотрены алгоритмы стационаризации изображений, повышения контрастности объектов с низкой контрастностью, обнаружения объектов на снимках (кадрах) ГЛБО, классификации и идентификации обнаруженных объектов. Представлены примеры алгоритмической обработки и выбора объектов с характерной (типовой) структурой.

The article focuses on development of automatic processing algorithms for images, which are formed at the output of side-scan sonar receiver. Algorithms considered are algorithms for image stationarization, contrast enhancement of low-contrast objects, detection of objects on side-scan sonar images, classification and identification of detected objects. Examples of algorithmic processing and selection of objects with characteristic (typical) structure are presented.

Вводные замечания. Применительно к гидролокаторам бокового обзора (ГЛ БО) в докладе рассматривается комплекс алгоритмов автоматической обработки информации, позволяющих в условиях реверберационных помех – донных, объемных с априорно неизвестными и нестационарными характеристиками, обеспечить устойчивое автоматическое обнаружение, измерение координат и идентификацию объектов и навигационных препятствий, а также выявить особенности рельефа морского дна.

Для вновь проектируемых ГЛ-систем характерной чертой является существенное повышение уровня автоматизации обрабатываемой информации, применение "интеллектуальных" алгоритмов обработки, использование баз данных, баз знаний, экспертных систем.

Основные проблемы, которые возникают при разработке высокоавтоматизированных ГЛ-систем, обусловлены следующими причинами:

нестационарностью характеристик реверберационных помех (что характерно для донной и поверхностной реверберации), большим динамическим диапазоном обрабатываемых сигналов, изменчивостью характеристик помех в зоне обзора;

априорной неопределенностью модулирующих функций, распределений реверберационных помех и их параметров;

априорной неопределенностью пространственных размеров, формы и ориентации обнаруживаемых ГЛ БО объектов.

К задачам, решаемым ГЛ БО, относятся:

1) Обнаружение точечных и локально-протяженных объектов на морском дне, в толще воды. Обнаружение объектов производится на фоне донной и объемной реверберации;

2) Измерение координат и анализ структуры обнаруженных объектов;

3) Автоматическая классификация (идентификация) обнаруженных объектов по ряду признаков. Идентификационные признаки объектов формируются на этапе первичной обработки ГЛ-информации (этап первичной обработки ГЛИ включает обнаружение объектов интереса, формирование идентификационных признаков обнаруженных объектов, измерение координат объектов).

В высокоавтоматизированных и автоматических системах проблемы априорной неопределенности и нестационарности сигнально-помеховой обстановки могут быть решены при применении адекватных условиям ГЛ-наблюдения алгоритмов обработки ГЛ-изображений.

Алгоритмы обработки «в целом» состоят из: алгоритмов первичной обработки, включающих обнаружение объектов интереса на ГЛ-изображении, формирование идентификационных признаков (ИДП), измерение координат объектов); алгоритмов вторичной обработки, включающих классификацию /интерпретацию/ объектов интереса по сформированному набору идентификационных признаков) [1].

Набор применяемых при обработке ГЛ-информации методов достаточно широк и определяется условиями формирования принимаемых ГЛ-сигналов, особенностями ГЛ-сцен и сигнально-помеховых обстановок. К широко применяемым методам и алгоритмам относятся:

а) методы статистической обработки ГЛ-изображений,

б) методы фильтрации полей с засорениями,

в) методы непараметрической статистики,

г) робастное оценивание характеристик случайных процессов и полей,

д) параметрическая и непараметрическая адаптация,

е) методы линейного и нелинейного регрессионного анализа.

Все перечисленные выше методы обработки используются в алгоритмах первичной обработки ГЛ-информации с выхода приемника ГЛ БО.

Алгоритмы первичной обработки ГЛ-информации в ГЛ БО. Особенностями объектов обнаружения являются: большой диапазон размеров (площадей) объектов: от единиц пикселей до сотен и тысяч пикселей по площади (т.е. обнаруживаемые объекты не являются точечными); пиксели, принадлежащие объекту (объектам), на индикаторе ГЛ БО могут быть как светлее, так и темнее яркости фона (из-за наличия теней).

Эти две особенности заставляют специальным образом конструировать алгоритм обнаружения. При этом алгоритм обнаружения должен быть по возможности близок к максимально эффективному в вариативных ситуациях ГЛ-наблюдения.

В этом пункте рассматриваются две группы алгоритмов: алгоритмы обнаружения, использующие различия гистограмм ПСИ, и алгоритмы обнаружения, использующие скользящие оценки медианы ГЛИ в качестве опорного ГЛИ (т.е. опорной сцены).

Алгоритмы обнаружения, использующие различия гистограмм ПСИ. Обнаружение производится на ГЛИ ГЛ БО, разделенном на ПСИ. Основная идея такого алгоритма состоит в следующем:

а) при разбиении всего ГЛИ образ объекта с неизвестной структурой и размерами разбивается на группу ПСИ,

б) далее анализируется каждый ПСИ ГЛИ на сходство его характеристик с характеристиками фона (фонов). Одна из сложностей при реализации такого алгоритма - измерение характеристик *неоднородного* фона (реверберационных помех).

Данный алгоритм предлагается использовать при обнаружении объектов с неизвестной структурой на дне, в толще воды, на поверхности. Работа алгоритма комментируется на рис.1, где показаны девять соседних ПСИ, по которым формируются гистограммы $G(p|k,l)$ (p – номер дифференциального коридора; (k, l) – координаты ПСИ на ГЛИ). На рис.2 показана группа из девяти гистограмм ПСИ G(k, l), соответствующих рисунку 1. Важными параметрами, описывающими гистограммы, являются оценки среднего значения и медианы (медианы более устойчивы к небольшим аномалиям структуры ПСИ).

Рассмотрим варианты решающих статистик (РС), используемых для обнаружения различий гистограмм ПСИ:

$$Z_0(k,l)=\sum_{p=0}^{p_{\max}}\left|G_1(p|k,l)-G_2(p|k,l)\right| \qquad (1) \qquad Z_1(k,l)=\sum_{p=0}^{p_{\max}}\left|p-\hat{m}_{cp}\right|\cdot\left|G_1(p|k,l)-G_2(p|k,l)\right|, \qquad (2)$$

Статистика Z_0 - соответствует методу контраста. Решающая статистика Z_1 может использоваться для выделения границ (скачков) разделов структур фонов. Вместо оценок среднего $\hat{m}$ в выражении (2) могут быть использованы оценки медианы $\hat{M}e$.

РС Z_1 «чувствительна» к различиям гистограмм на их «хвостах». Важно заметить, что различия, обусловленные отличиями в структуре изображения в ПСИ, возникают в основном на «хвостах» гистограммы (см.рис.1 и рис.2).

В решающей статистике Z_2 благодаря квадрату в выражении (3) еще более подчеркиваются различия на «хвостах» гистограмм при использовании РС Z_2 по сравнению со статистикой Z_1:

$$Z_2(k,l)=\sum_{p=0}^{p_{\max}}(p-\hat{m}_{cp})^2\cdot\left|G_1(p|k,l)-G_2(p|k,l)\right| \qquad (3)$$

В качестве гистограммы G_2 может использоваться как гистограмма соседнего ПСИ (центральная гистограмма на рис.1), так и синтезированная из *нескольких* соседних с G_1 гистограмм. Например, «средняя» гистограмма из двух соседних (левой и правой) с G_1. Более целесообразно в качестве $G_2(p|k,l)$ формировать $G_{\tilde{n}}(p|k,l)$ (опорная гистограмма) по группе ПСИ на скользящем окне, где кластер однородных ПСИ должен окружать ПСИ с объектом.

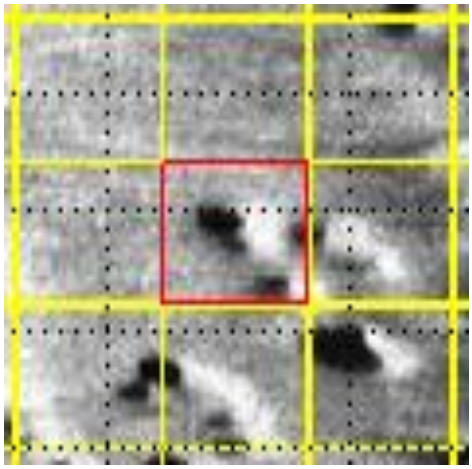


Рис.1. Разбиение ГЛ-изображения на ПСИ. Представлен фрагмент ГЛИ с группой из 9-ти ПСИ. В центре – выбранный для анализа ПСИ с объектом интереса (красный контур)

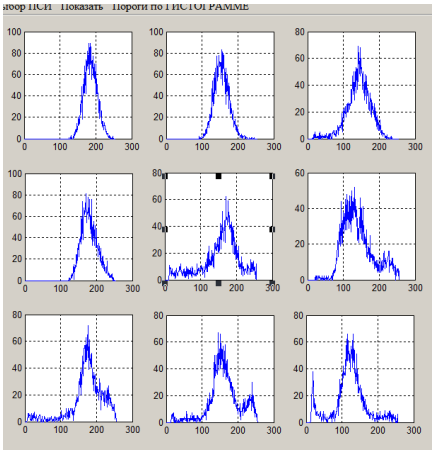


Рис.2. Гистограммы группы из девяти соседних ПСИ.
В центре группы – гистограмма выбранного для анализа ПСИ (отмечена точками)

Выражение (4) отображает решающую статистику, которая предполагает нахождение размаха отсчетов в одном и том же (k, l)-ом ПСИ (либо непосредственно по самому ПСИ, либо по гистограмме, сформированной по ПСИ):

$$Z_{ext}(k,l) = \underset{(i,j)\in AnПСИ}{Max}[y(i,j)] - \underset{(i,j)\in AnПСИ}{Min}[y(i,j)] = Max(dk \in Gist) - Min(dk \in Gist) \qquad (4)$$

Z_0, Z_1, Z_2, Z_{ext} – решающие статистики, формируемые из отсчетов поля ГЛИ на интервале ПСИ (интегральные статистики).

Алгоритмы обнаружения, использующие в качестве опорной сцены скользящие оценки медианы ГЛИ. Данный вариант алгоритма обнаружения обладает характерной особенностью, которая заключается в том, что он позволяет не только обнаружить объект интереса, но и выделить его границы (контур) /в отличие от алгоритмов варианта 2.1, где определяется лишь факт наличия объекта (аномалии) в конкретном ПСИ или в группе смежных ПСИ/.

В данном алгоритме предполагается, что в данном ПСИ (либо на апертуре из нескольких ПСИ) формируется и используется в качестве опорного ГЛИ оценка медианы, которая по принципу формирования «автоматически» обладает устойчивостью к возможным аномалиям.

Варианты двух решающих статистик таковы:

$$Z_1(i,j) = \left| y(i,j) - \hat{Mey}_{H_0}(i,j|k,l) \right| \qquad (5)$$

$$Z_2(i,j) = [y(i,j) - \hat{Mey}_{H_0}(i,j|k,l)]^2 \qquad (6)$$

$Z_1(i, j)$ – модуль отклонения отсчета ГЛИ от оценки ***опорной*** сцены в (i, j)-точке,

$Z_2(i, j)$ – квадрат модуля отклонения отсчета ГЛИ от оценки ***опорной*** сцены в (i, j)-точке.

Блок-схема реализации алгоритмов обнаружения с использованием решающих статистик, формируемых по выражениям (5) и (6), приведена на рис.3.

В тезисах на рис. 4.1…4.12 (см. вклейку) для реальной ГЛ-сцены «Шхуна на дне» рассматриваются результаты реализации (выполнения) представленных на блок-схеме рис. 3 ***частных*** алгоритмов обработки ГЛИ ГЛ БО.

Результаты реализации частных алгоритмов обработки ГЛИ ГЛБО (см. вклейку)

Заключение

1. Рассмотрена общая структура алгоритмов автоматичсекой обработки ГЛ-изображений применительно к гидролокаторам бокового обзора.

2. Реализация алгоритмов базируется на формировании сцен заднего плана, использование которых позволяют реализовать корректную тенеграфическую обработку изображений с последующей идентификацией объектов на дне по их структуре.

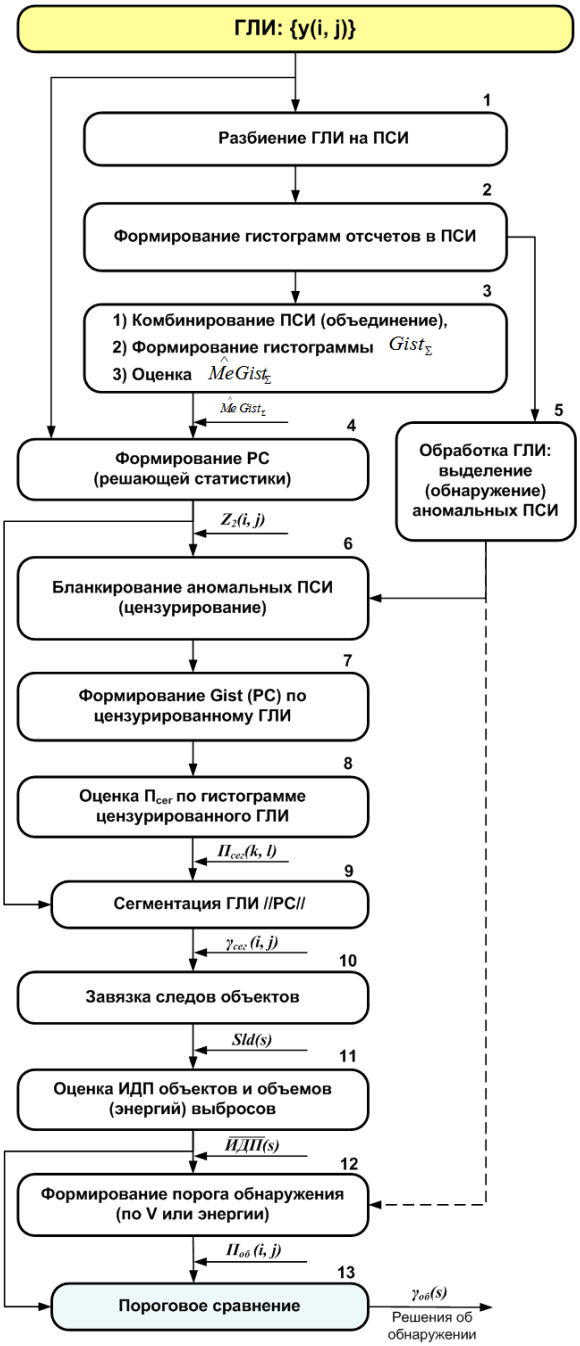


Рис.3. Блок-схема алгоритма обнаружения объектов и формирования ИДП объектов

блок 1 - разбиение ГЛИ на ПСИ,

блок 2 – формирование гистограмм отсчетов в ПСИ

блок 3 – формирование группы (кластера) ПСИ, окружающих аномальный ПСИ. В блоке 3 реализуются операции:

- комбинирование (объединение) ПСИ в кластер, окружающих «аномальный» ПСИ, для увеличения объема статистики,
- формирование суммарной гистограммы $Gist_\Sigma$,
- оценка медианы гистограммы $Gist_\Sigma$,

блок 4 – формирование решающей статистики (РС) по формулам (5) или (6),

блок 5 – обработка ГЛИ: выделение (обнаружение) аномальных ПСИ. Работа алгоритма в данном блоке реализуется по ***варианту 1*** (см. текущий подраздел) реализации алгоритмов обнаружения с использованием различий гистограмм,

блок 6 –бланкирование аномальных ПСИ (цензурирование), в результате чего из анализа «убираются» отсчеты РС из аномальных ПСИ. Таким образом, на блок 7 подаются гистограммы ПСИ, сформированные по ПСИ с забланкированными (цензурированными) аномальными отсчетами,

блок 7 – формирование гистограмм по всему цензурированному ГЛИ, (но более целесообразный вариант – формирование гистограммы по области, расположенной «недалеко (вокруг)» от анализируемого ПСИ),

блок 8 – оценка порога сегментации по гистограмме цензурированного ГЛИ для (k, l)-го ПСИ,

блок 9 – сегментация ГЛИ. В этом блоке принимаются решения о сегментации РС в каждом пикселе,

блок 10 – завязка следов объектов,

блок 11 – оценка ИДП объектов и объемов (энергий) выбросов,

блок 12 – формирование порога обнаружения (по объему или энергии) для каждого пикселя,

блок 13 – реализуется пороговое сравнение и формируется решение об обнаружении s-ой отметки.

Литература

1. Войтов А.А., Калинина К.А., Корнеев Ю.А., Хаметов Р.К. Интерпретация ГЛ-сцен при реализации алгоритмов автоматической обработки ГЛ-информации // Тр.конф. ГА-2016, с.56-59.

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ СИГНАЛОВ ПО ВРЕМЕНИ В АКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОСТОГО СИГНАЛА

Б.П.Белов, д-р техн.наук, Н.Н.Семенов, канд.техн.наук, М.М.Шилин[1], Е.С.Шилина[1]
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия
[1]АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

OVER-RESOLUTION OF SIGNALS IN TIME IN ACTIVE LOCATION WHEN USING A SIMPLE SIGNAL

B.P.Belov, Dr.Sc., N.N.Semenov, Ph.D., M.M.Shilin[1], E.S.Shilina[1]
Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
[1]JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Рассматривается возможность существенно повысить разрешающую способность согласованного фильтра по времени при использовании простого тонального сигнала. Приводятся примеры разрешения двух близко расположенных по времени сигналов при использовании сверхразрешения и без него.

Possibility of significantly increasing resolution of the matched filter in time using a tone signal is considered. Examples of resolution of two closely spaced signals are given when using superresolution and without it.

В настоящее время для локации отражающих объектов могут использоваться как простые (с произведением длительности сигнала на эффективную ширину спектра близким 1, обычно протяжённые во времени узкополосные посылки), так и сложные (с базой много большей 1) сигналы. Достоинствами простых сигналов являются простота излучения, удобство спектрального разделения подвижных и неподвижных объектов, хорошая отражательная способность на объектах сложной формы, но при этом эффективное разрешение двух отражённых сигналов по времени оказывается возможным только при расстоянии, соответствующему по времени не меньше чем половина длительности сигнала. Сложные сигналы имеют хорошую разрешающую способность по времени, по частоте, но при отражении от объектов сложной формы могут терять когерентность и лишаться своих достоинств, а также приём сложных сигналов даже от подвижных объектов локации всегда производится на фоне реверберации, что снижает отношение сигнал-помеха. И для простых и для сложных сигналов разрешающая способность по времени определяется эффективной шириной спектра, но для практического применения такой разрешающей способности может быть недостаточно.

В известных существующих локаторах и патентах использование узкополосных зондирующих сигналов, несмотря на многочисленные достоинства, ограничено низкой разрешающей способностью по времени (дистанции). Такими узкополосными сигналами могут быть как простые (гармонические) зондирующие сигналы, так и относительно узкополосные сложные (модулированные), ширина полосы которых много меньше несущей частоты сигнала.

Типовой тракт локатора (рис. 1) представляет собой генератор сигнала посылки (6); усилитель мощности (5); посылку сигнала антенной (1) в сторону объекта локации (7); приём отраженного от объекта локации сигнала на приёмную антенну (1) с последующим его проведением через блок предварительной обработки сигнала, АЦП (2); согласованный с сигналом посылки фильтр (3), максимизирующий отношение сигнал-помеха; обнаружитель (4) и далее блок управления и обработки информации.

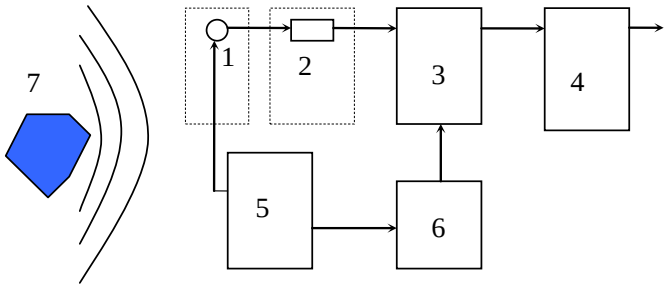


Рис. 1. Обобщённая структура гидролокатора.

Для увеличения разрешающей способности предлагается дополнить структуру гидролокатора блоком модификации опорного сигнала в корреляционном приёмнике (согласованного с сигналом посылки фильтра). В качестве опорного сигнала используется не когерентная копия сигнала посылки, а модифицированная в спектральной области копия. Цель данной модифика-

ции – расширение спектра сигнала за счёт частичного подавления центральной несущей и управляемое усиление боковых лепестков спектра.

Из [1] следует, что оптимальный алгоритм обнаружения детерминированного сигнала на фоне аддитивного «белого» шума (а в ограниченной полосе приёма можно помеху считать равномерной или «белой») предписывает сравнение с порогом корреляционного интервала

$$y(t) = \int_0^T s(\tau)x(t-\tau)d\tau\,, \qquad (1)$$

где *x(t)* – входной сигнал, *y(t)* – выходной сигнал, *s(t)* – АЧХ фильтра, совпадающая по значениям с сигналом посылки.

Технически такой оптимальный согласованный фильтр может быть реализован как корреляционный приёмник. Принимаемый сигнал поступает на линию задержки, где перемножается с опорным сигналом и суммируется. Обработка сигнала может производиться как во временной, так и в частотной области. Для перехода в частотную область перед блоком согласованной фильтрации устанавливается блок преобразования Фурье.

На выходе согласованного фильтра при приёме отражённого сигнала, когда в качестве сигнала посылки используется простой сигнал в виде протяжённого во времени гармонического колебания, получается сигнал, показанный на рис. 3. Причем на рис. 2 показана сумма двух простых сигналов, разнесённых по времени, на фоне помех. На рис. 3 видно, что на выходе согласованного фильтра (отклик фильтра) принятые сигналы неразличимы по времени – они дают один общий отклик. Разрешающей способности по времени такого сигнала недостаточно, чтобы различить эти два сигнала.

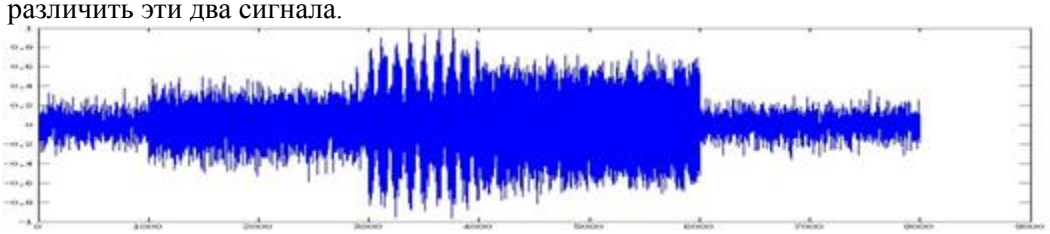


Рис. 2. Пример осциллограммы суммы двух простых сигналов.

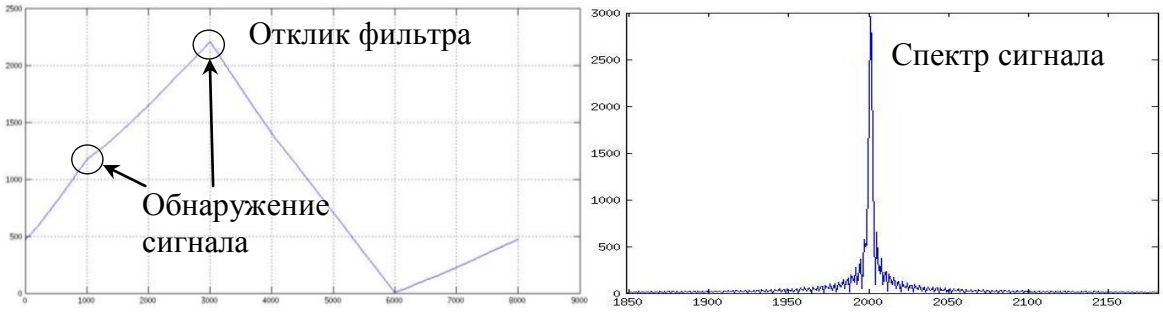


Рис. 3. Пример разрешающей способности и спектра простого сигнала без сверхразрешения.

Таким образом, недостатком простого сигнала является ширина главного максимума, пропорциональная длительности сигнала посылки. Чем длиннее сигнал, тем шире функция неопределенности на приёме. Уменьшение длительности сигнала приводит к уменьшению энергии сигнала посылки и невозможности его обнаружения на фоне помех, поэтому короткие сигналы посылки на практике не используются. Поэтому задача состоит в уменьшении ширины главного максимума функции неопределенности (разрешающей способности по времени) без уменьшения длительности сигнала посылки. Аналогичные рассуждения справедливы и для сложных сигналов посылки, для которых необходимо увеличить разрешающую способность.

Известно, что разрешающая способность гидролокатора по времени определяется эффективной шириной его спектра:

$$\Omega_{эфф} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}(\omega-\omega_0)^2 S^2(\omega)d\omega}{\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}S^2(\omega)d\omega}}, \quad (2)$$

где S(ω) – спектр сигнала, ω0 – центральная частота сигнала.

Тогда разрешающая способность по времени

$$\tau \approx \frac{1}{\Omega_{эфф}}, \quad (3)$$

и разрешающая способность по дистанции $\Delta d = c \cdot \tau$, где c – скорость распространения сигнала.

Таким образом, разрешающая способность по дистанции обратно пропорциональна эффективной ширине спектра сигнала. А так как рассматриваемые простые и узкополосные сложные сигналы имеют узкий спектр, у них плохая разрешающая способность по дистанции.

Чтобы улучшить разрешающую способность таких сигналов необходимо искусственно расширить их спектр. Для этого необходимо при сохранении фазовой структуры спектра изменить его амплитуду на краях диапазона и подавить в центре. Хорошо изученным и удобным инструментом для параметрического управления параметрами результирующего спектра являются оконные функции. Хотя обычно их используют во временной области, чтобы воздействовать на частотный спектр, предлагается, используя свойства обратимости преобразования Фурье (с точностью до постоянного множителя), использовать их в частотной области, чтобы воздействовать на параметры сигнала во временной области.

Спектр зондирующего сигнала (как простого, так и модулированных сложных) представляет собой спектр несущей частоты и две боковые полосы модуляции. Для простого сигнала модуляцией является только ограничение сигнала по времени, имеющее спектр прямоугольного импульса, то есть sin(2πt/T)/(2πt/T), где t – время, T – длительность посылки.

Для сложных сигналов – каждая боковая полоса представляет спектр модулирующего сигнала (вещественный или мнимый).

Так как необходимо частично подавить центральную частоту (спектр несущей) и подчеркнуть модуляцию сигнала, предлагается использовать две зеркальные оконные функции, соприкасающиеся на центральной частоте принимаемого сигнала, как показано на рис. 4. При этом край оконной функции, оказавшийся на центральной частоте, подавляет её, а боковые полосы модуляции усиливает, что позволит расширить эффективный спектр сигнала, сохранив при этом его спектральную фазовую структуру (информацию о задержках сигнала во времени). Управляя формой и шириной оконной функции можно менять эффективную ширину сигнала, и, как следствие, разрешающую способность по времени.

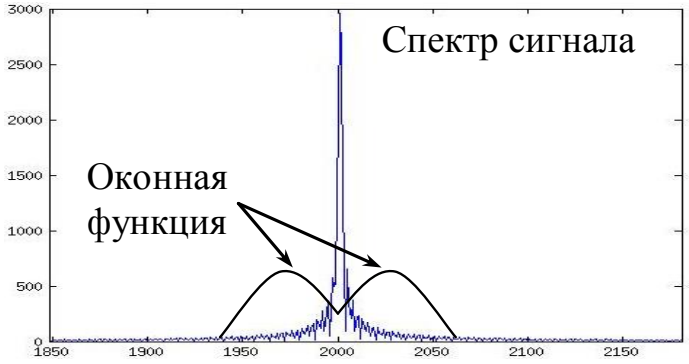


Рис. 4. Модификация спектра оконными функциями.

Для спектральных преобразований опорного сигнала необходимо задать тип оконной функции, её длину (в количестве спектральных отсчётов) и в некоторых оконных функциях дополнительные значения. Длина оконной функции определяет эффективный спектр опорного сигнала, тип оконной функции позволяет управлять формой результирующего сигнала на выходе корреляционного приёмника, а дополнительные значения, управляющие формой оконной функции, позволяют изменять форму и уровень боковых лепестков сигнала на выходе корреля-

ционного приёмника. Но при расширении эффективного спектра опорного сигнала в корреляционном приёмнике увеличивается количество помех, влияющих на результирующий сигнал, что приводит к необходимости выбирать тип и параметры оконной функции под текущую сигнально-помеховую ситуацию. Сам корреляционный приёмник может быть реализован как во временной, так и в частотной области. Для построения корреляционного приёмника во временной области необходимо произвести обратное преобразование Фурье над модифицированным спектром опорного сигнала и использовать полученные значения в качестве импульсной характеристики корреляционного фильтра.

Результат использования модификации спектра опорного сигнала показан на рис. 5, где хорошо видно, что при том же, что и на рис. 3, принятом сигнале разрешающая способность повысилась во много раз, что позволило разделить отражённые сигналы по времени (и как следствие по дистанции).

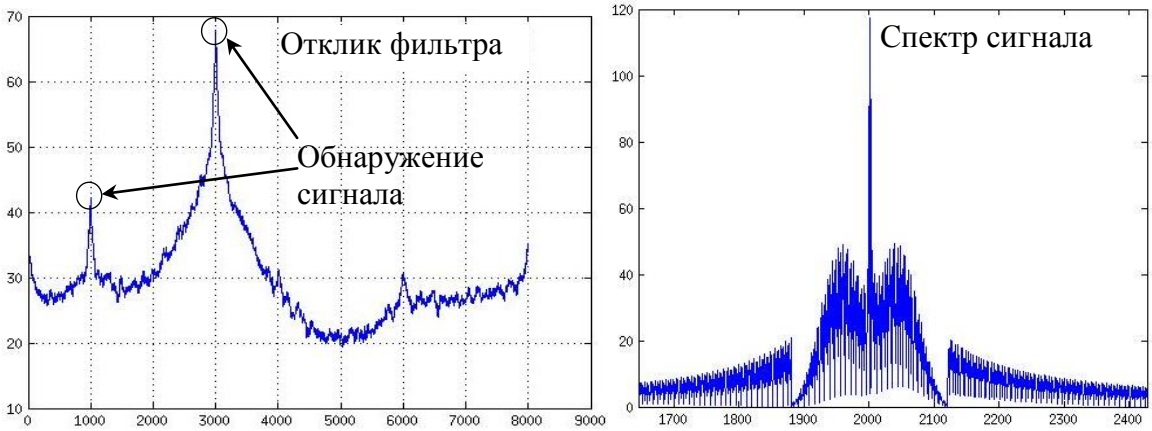


Рис. 5. Пример разрешающей способности и спектра сигнала со сверхразрешением.

Таким образом, модификация спектра опорного сигнала в корреляционном приёмнике существенно увеличивает разрешающую способность локатора по дистанции, как видно на рис. 5, что позволяет разделять близко расположенные сигналы и обнаруживать их на фоне близко расположенных по пространству помех, повысить разрешающую способность определения местоположения объектов, а также повысить помехоустойчивость и чувствительность обнаружителя.

Литература

1. Roy R., Kailath T. ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. “IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Process.” 1989, Vol. 37, No. 7.
2. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Том 1. Оптимальные методы – СПб.: Электроприбор, 2009. – 400 с.
3. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. М., «Сов. Радио», 1974, 360 с.
4. Stoica P, Moses R. L. Introduction to Spectral Analysis. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 1997, 319 p.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОКУСИРОВКИ ПОЛЯ В МУЛЬТИСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ВИДЕНИЯ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

А.И.Хилько, д-р физ-мат.наук, И.П.Смирнов, канд.физ-мат.наук, К.А.Сидоров
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

OPTIMAL FOCUSING OF PHIELD IN MULTISTATIC SYSTEMS OF HIGH-FREQUENCY ACOUSTIC VISION IN THE SEA ENVIRONMENT

A.I.Khil'ko, Dr.Sc., I.P.Smirnov, Ph.D., K.A.Sidorov
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Исследованы методы построения оптимальных мультистатических акустических изображений в океанических волноводах. Используется лучевое представление поля. Рассмотрены способы амплитудно-фазовой фокусировки поля в заданную область рефракционного волновода. Показано, что задача оптимальной фокусировки поля и реконструкции изображений может быть приближенно сведена к задаче фокусировки наиболее мощных и стабильных волновых компонент.

Methods of construction of the optimal multistatic acoustic images in oceanic waveguides are investigated. Lay representation of a field is used. Ways of amplitude-phase focusing of a field in the set area of refractive waveguide are considered. It is shown that the problem of optimum focusing of a field and reconstruction of images can be approximately presented to a problem of focusing of the most powerful and stable wave component.

Для реализации перспективных мультистатических систем зонального высокочастотного (ВЧ) подводного наблюдения, возникает проблема адаптации ее параметров к условиям наблюдения [1]. Такая адаптация, прежде всего, состоит в селективном излучении и приеме высокоинтенсивных и высококогерентных волноводных компонент гидроакустического (ГА) поля. Это возможно при использовании текущей океанологической информации при оптимальном выборе положения и размеров решеток и обеспечения адаптивной подстройки их апертурных распределений к изменяющимся во времени характеристикам ГА-волновода, реверберационным помехам и шумам. Кроме того, необходима подстройка к вариациям формы излучающих и приемных решеток, возникающих из-за влияния подводных течений. Необходимые уникальные для каждой геометрической проекции пространственно-частотные апертурные множители могут быть синтезированы с помощью модели формирования ГА-сигналов в океаническом волноводе. Параметры такой модели должны усваивать оперативную океанологическую информацию о текущем состоянии ГА-волновода, то есть адаптироваться к условиям наблюдения. При ВЧ мультистатическом наблюдении с помощью набора пространственно разнесенных вертикальных излучающих и приемных решеток возбуждаются сложно-модулированные ГА-импульсы в виде согласованных с волноводом пучков.

Постановка задачи. В таких мультистатических системах зонального наблюдения для оптимального излучения и приема направленных ВЧ зондирующих ГА-сигналов должна обеспечиваться *фокусировка энергии в устойчивые, слабозатухающие волноводные компоненты поля*. Кроме геометрических проекций, при наблюдении в океаническом волноводе формируются и волноводные проекции, представляющие собою водные пучки, пучки, отражающиеся от поверхности океана, а также от донной поверхности. При этом результирующее изображение пространственно локализованной неоднородности формируется путем накопления всех геометрических и волноводных проекций. Для каждой проекции с учетом текущих океанологических данных выполняется фокусировка в точку предполагаемого положения наблюдаемой неоднородности. Такие гипотезы выбираются с использованием априорной информации о возможном районе поиска. Значения параметров наблюдаемой неоднородности, такие, как координаты, скорость и направление движения и т.д., принимаются как решения для тех гипотез, для которых мощность решающего правила принимает максимальное значение. Критерием оптимального управления мультистатической системы наблюдения является максимизация рассеянного неоднородностью акустического сигнала, что можно доиться путем фокусировки зондирующих сигналов в точку расположения неоднородности, а также максимального накопления рассеянных сигналов каждой приемной решеткой, то есть, фокусировкой при накоплении вторичных источников приемной решеткой.

Поскольку ВЧ мультистатическое наблюдение осуществляется в рефракционном волноводе, в каждую предполагаемую точку расположения наблюдаемой неоднородности энергию можно сфокусировано передать по множеству различных лучевых траекторий. Поскольку

ослабление поля в соответствующих лучевых каналах существенно отличается, возникает задача оптимизации фокусировки многоволнового поля.

Метод оптимальной фокусировки ГА поля. Для анализа оптимальной фокусировки поля в различные лучевые каналы рассмотрим конечный набор из K не взаимодействующих друг с другом точечных когерентных монохроматических излучателей, погруженных в рефракционный волновод (излучающая антенна, ИА). Вводя векторы комплексных коэффициентов возбуждения $\vec{v}$ и амплитуд полей $\vec{a}$ от отдельных излучателей в точке наблюдения (r,z), запишем суммарное поле ИА в виде скалярного произведения

$$\hat{A}(r,z;\vec{v}) = \sum\nolimits_{k=1}^{K} \hat{v}_k^* \hat{a}_k(r,z) = \langle \vec{a}(r,z), \vec{v} \rangle. \qquad (1)$$

Рассмотрим задачу управления полем ИА, считая вектор $\vec{v}$ управляющим. Целью управления назначим максимизацию модуля амплитуды суммарного поля (1) в заданной точке наблюдения $\mathbf{R} = (r_{\mathbf{R}}, z_{\mathbf{R}})$:

$$J(\vec{v}) \equiv \left|\hat{A}(r_{\mathbf{R}}, z_{\mathbf{R}}; \vec{v})\right| = \left|\langle \vec{a}_{\mathbf{R}}, \vec{v} \rangle\right| \to \max_{\vec{v} \in U}, \qquad (2)$$

где $\vec{a}_{\mathbf{R}} \equiv \vec{a}(r_{\mathbf{R}}, z_{\mathbf{R}})$, $U \subset \mathbf{C}^K$ — множество допустимых значений управляющего вектора $\vec{v}$. Рассмотрим случай *амплитудно-фазового* управления, когда варьируются как амплитуды, так и фазы коэффициентов возбуждения излучателей:

$$U = U_q \equiv \left\{ \vec{v} \ : \ |\vec{v}|_q^q \equiv \sum\nolimits_{k=1}^{K} |v_k|^q \le 1 \right\}, \ 1 \le q < \infty, \qquad (3)$$

$U_\infty = \left\{ \vec{v} : |\vec{v}|_\infty \equiv \max_k |v_k| \le 1 \right\}$. Решением задачи (2) в случае (3) служит вектор с компонентами $\left(\vec{v}_{\text{opt}}^{(q)}\right)_k = \left|(\vec{a}_{\mathbf{R}})_k\right|^{p-1} / |\vec{a}_{\mathbf{R}}|_p^{p-1} \exp\left(i(\psi_{\mathbf{R}})_k\right)$, где $p = q/(q-1)$, $(\psi_{\mathbf{R}})_k$ — фаза комплексной амплитуды поля $(\vec{a}_{\mathbf{R}})_k$ от k-го излучателя в точке $\mathbf{R}$. В частности, для $q = 2$, решение принимает вид $\vec{v}_{\text{opt}}^{(2)} = \vec{\alpha}_{\mathbf{R}} \equiv \vec{a}_{\mathbf{R}} / |\vec{a}_{\mathbf{R}}|_2$, т.е. совпадает с направлением $\vec{\alpha}_{\mathbf{R}}$ вектора $\vec{a}_{\mathbf{R}}$. При $q = \infty$ оптимальное управление записывается в форме $\left(\vec{v}_{\text{opt}}^{(\infty)}\right)_k = \exp\left(i(\psi_{\mathbf{R}})_k\right)$, то есть определяется исключительно фазами компонент поля $\vec{a}_{\mathbf{R}}$ и не зависит от их амплитуд. Аналогично выражается через параметры вектора $\vec{a}_{\mathbf{R}}$ оптимальное управление и в случае *фазового управления* ИА, когда $U = U_{\text{phase}} = \left\{ \vec{v} \ : \ |\vec{v}_k| = 1, \ k = \overline{1,K} \right\}$, то есть $\vec{v} = \left\{ e^{i\psi_1}, \ldots, e^{i\psi_K} \right\}$, где ψ_k — фаза k-го излучателя. На практике выбор множества допустимых управлений U определяется конструктивными особенностями излучающей антенны, доступностью и надежностью информации о поле $\vec{a}_{\mathbf{R}}$. Использованные выше множества $U_{\text{q,phase}}$ привлекают простотой решения оптимизационной задачи. Однако упрощенный подход к постановке задачи управления (2) уязвим с целого ряда позиций: решения задач выражаются через параметры поля $\vec{a}_{\mathbf{R}}$, для вычисления которого необходимы надежные данные о свойствах волновода; сама постановка задачи (2) подразумевает когерентность полного поля в масштабе апертуры излучающей антенны, что в реальности может выполняться только для отдельных компонент и в ограниченных временных промежутках; практическое применение данных решений ограничено необходимостью постоянного контроля за состоянием волновода, параметры которого в реальности случайно изменяются во времени; эти решения могут оказаться сложными в технической реализации вследствие сложности задаваемых ими распределений фаз и амплитуд возбуждения отдельных излучателей. Поэтому представляет интерес найти более простые в реализации управления, использующие минимальную информацию о волноводе и мало уступающие оптимальным по значениям функционала. По-существу, речь идет о таком выборе множества управлений в (2), при котором допустимые управления зависели бы только от стабильных компонент вектора $\vec{a}_{\mathbf{R}}$, устойчивых по отношению к флуктуациям параметров волновода. Выделим в $\vec{a}_{\mathbf{R}}$ те составляющие $\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\text{st})}$, которые могут считаться стабильными, представим полное поле в виде суммы $\vec{a}_{\mathbf{R}} = \vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\text{st})} + \vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\text{nst})}$ и

рассмотрим вспомогательную задачу $J^{(\mathrm{st})}(\vec{v}) \equiv \left|\hat{A}^{(\mathrm{st})}(r_{\mathbf{R}}, z_{\mathbf{R}}; \vec{v})\right| = \left|\left\langle \vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{st})}, \vec{v} \right\rangle\right| \to \max\limits_{\vec{v}\in U}$. Решения такой вспомогательной задачи $\vec{v}_{\mathrm{st}}$ записываются так же, как и решения исходной задачи (2) $\vec{v}_{\mathrm{opt}}$, но уже через параметры вектора $\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{st})}$, то есть они зависят только от стабильных компонент вектора $\vec{a}_{\mathbf{R}}$.

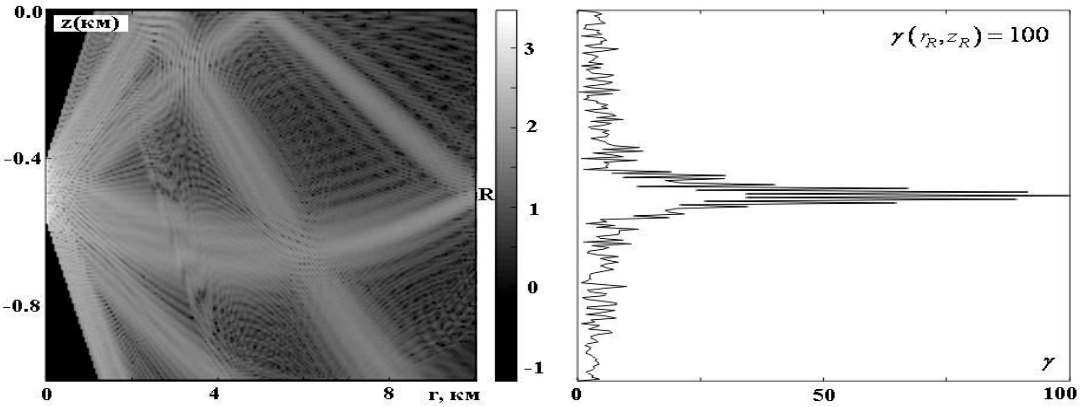


Рис.1. Оптимальное управление $\vec{v}_{\mathrm{opt}}^{(2)} = \vec{a}_{\mathbf{R}} / \left|\vec{a}_{\mathbf{R}}\right|_2$, распределения $\lg\gamma$ в волноводе (слева) и γ в вертикальном сечении ***R***.

Поэтому их можно условно назвать стабильными управлениями. Конечно, они не обязаны быть решениями задачи (2). Однако можно ожидать, что в случае значительного превышения амплитуд стабильных полей над амплитудами нестабильных, разность $\delta J = J(\vec{v}_{\mathrm{opt}}) - J(\vec{v}_{\mathrm{st}}) \geq 0$ будет малой, то есть стабильные управления будут почти оптимальны. Вводя функцию $\gamma(r, z; \vec{v}_{\mathrm{st}}) = 10^2 \left|\hat{A}(r, z; \vec{v}_{\mathrm{st}})\right| / \left|\hat{A}(r_{\mathbf{R}}, z_{\mathbf{R}}; \vec{v}_{\mathrm{opt}})\right|$, которая характеризует распределение амплитуды поля в волноводе при $\vec{v} = \vec{v}_{\mathrm{st}}$, получаем числовую характеристику относительной эффективности стабильного управления $\gamma = \gamma(r_{\mathbf{R}}, z_{\mathbf{R}}; \vec{v}_{\mathrm{st}}) = 10^2 J(\vec{v}_{\mathrm{st}}) / J(\vec{v}_{\mathrm{opt}})$. В случае $U = U_2$ при $\left|\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{nst})}\right|_2 << \left|\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{st})}\right|_2$ имеем простую оценку $\gamma \cong 1 - \left|\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{nst})}\right|_2 \left|\left\langle \vec{\alpha}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{nst})}, \vec{\alpha}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{st})} \right\rangle\right| / \left|\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{st})}\right|_2$. Для иллюстрации рассмотрим задачу о фокусировке поля частоты $f = 1$ кГц, создаваемого вертикальной антенной из $K = 30$ эквидистантно расположенных излучателей. Антенна погружена в волновод глубиной в 1 км с унимодальным профилем скорости звука $c(z)$, и показателем преломления, описываемым формулой $n(z) = c_0 / c(z) = \sqrt{1 - (z - z_0)^2 / h^2}$, $0 \leq z \leq -1$, где $c_0 = 1.5$ км/с, $z_0 = -0.3$ км, $h = 5$; расстояние между излучателями $4\lambda = 4c_0 / f$, координата верхнего излучателя $z_1 = -0.4$ км.

Скорость продольных волн в жидком дне возьмем равной 1515 м/с, плотность грунта 1200 кг/м^3. Возьмем в качестве точки нацеливания $\mathbf{R} = (r_{\mathrm{R}}, z_{\mathrm{R}})$, $r_{\mathbf{R}} = 10$ км, $z_{\mathbf{R}} = -0.5$ км. Рассмотрим оптимальное и стабильное управление (рис.1, 2). Выбирая в качестве стабильной волны чисто водную компоненту (левый верхний график на рис. 2), получаем стабильное управление в форме $\vec{v}_{\mathrm{w}}^{(2)} = \vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{w})} / \left|\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{w})}\right|_2$. Фазы и амплитуды коэффициентов возбуждения излучателей представлены, соответственно, на среднем и правом верхних графиках рис. 2; распределения $\gamma(r, z; \vec{v}_{\mathrm{w}}^{(2)})$ даны на нижних графиках рис. 2. Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что стабильное управление значительно более регулярно в сравнении с оптимальным (рис. 1); при этом проигрыш в значении функционала не превышает 17%.

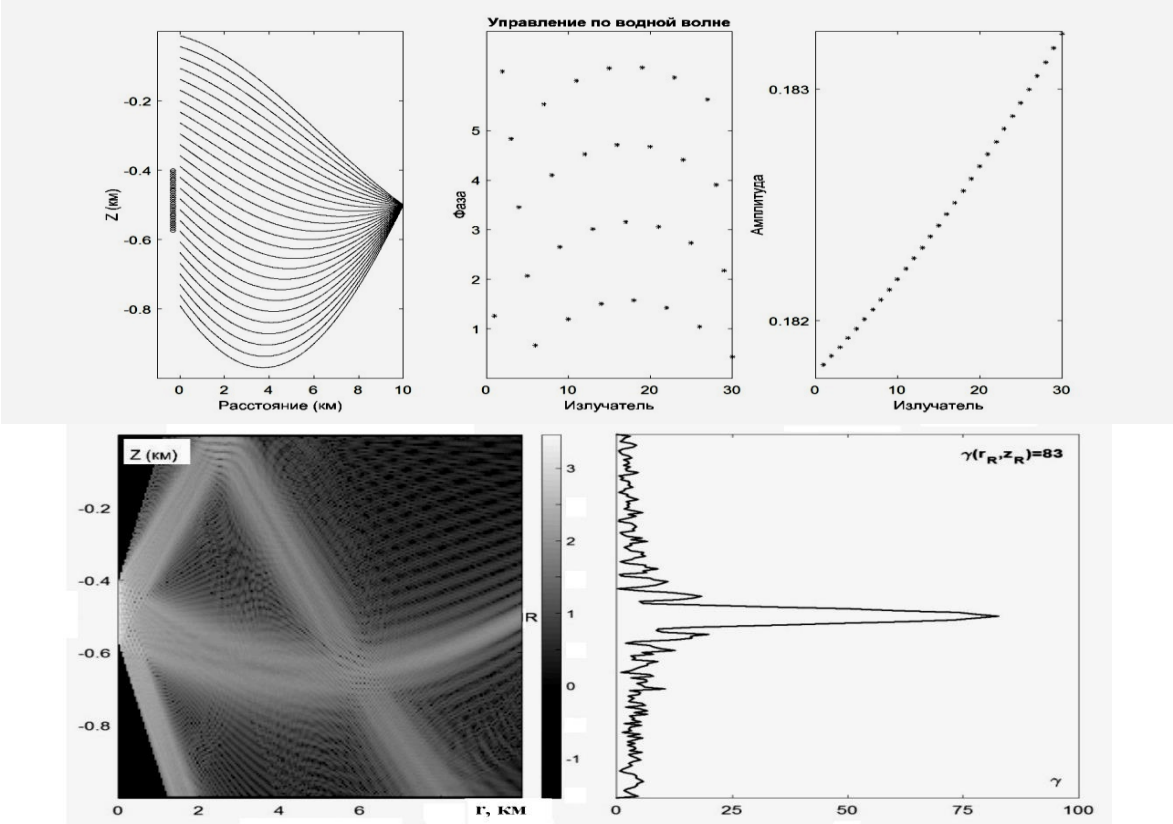


Рис.2. Стабильное управление по водной волне $\vec{v}_{\mathrm{w}}^{(2)} = \vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{w})} / \left|\vec{a}_{\mathbf{R}}^{(\mathrm{w})}\right|_2$ (верхний ряд: траектории водных лучей, выходящих из целевой точки, фазы и амплитуды управления $\vec{v}_{\mathrm{w}}^{(2)}$; нижний ряд: распределения $\lg\gamma$ в волноводе и γ в вертикальном сечении **R**).

Заключение. При ВЧ ГА мультистатическом наблюдении в рефракционном океаническом волноводе, фокусирующей излучающей решеткой в каждую предполагаемую точку расположения наблюдаемой неоднородности, энергию поля можно передать как оптимально (рис.1), так и по отдельным лучевым каналам. Аналогичная ситуация реализуется и при фокусировке приемной решетки в ту же точку. Как показывают оценки, при использовании только водных каналов, в сравнении с оптимальным вариантом фокусировки обеспечивается большая регулярность (ослабление случайных вариаций). При этом проигрыш в значении функционала, то есть ослабление величины фокусированного поля по сравнению с оптимальным вариантом фокусировки оказывается относительно малым. Таким образом, можно сделать вывод, что при мультистатическом ВЧ ГА наблюдении согласованная с полем фильтрация (фокусировка), может осуществляться с использованием только отдельных высоко когерентных слабозатухающих волноводных компонент. При этом ослабляются требования к априорной информации в виде текущих данных оперативной океанологии [1].

Работа поддержана РФФИ (проект №18-02-00128).

Литература

1. Хилько А.И., Коваленко В.В., Малеханов А.И. и др. Принципы и методы мониторинга Мирового океана на основе сетевой интегрированной системы распределенных согласованных со средой сенсоров // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». - 2012. - С.5-7.

ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕГКОВОДОЛАЗОВ ПО ИЗЛУЧАЕМЫМ ИМИ ПОДВОДНЫМ ШУМАМ

С.В.Горовой[1], В.И.Коренбаум, д-р техн.наук, А.Е.Костив, канд.техн.наук, А.Д.Ширяев, канд.физ-мат.наук, А.Е.Бородин, канд.техн.наук, А.А.Тагильцев, канд.техн.наук, В.М.Дорожко, канд.физ-мат.наук, А.Ю.Фершалов, канд.техн.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
[1]Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

POSSIBILITIES OF DIVERS DETECTION BY THEIR EMITTED UNDERWATER NOISES

S.V.Gorovoy[1], V.I.Korenbaum, Dr.Sc., A.E.Kostiv, Ph.D., A.D.Shiryaev, Ph.D., A.E.Borodin, Ph.D., A.A.Tagiltcev, Ph.D., V.M.Dorozhko, Ph.D., A.Yu.Fershalov, Ph.D.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
[1]Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Обнаружение легководолазов под водой актуально в антитеррористических целях и при охране объектов марикультуры от несанкционированного проникновения браконьеров. Для этого можно использовать собственные дыхательные шумы, излучаемые легководолазами в воду. В условиях гидроакустического бассейна в дыхательных шумах водолаза-аквалангиста зарегистрированы мощные сигналы с частотой повторения, соответствующей дыхательному ритму. При регистрации в натурных условиях продемонстрирована возможность обнаружения этих гидроакустических сигналов на дистанциях до 300 м.

Detection of submerged divers in water is important for antiterrorist purposes and for the protection of mariculture objects from unauthorized intrusion of poachers. For this aims it is possible to use own breathing noises of scuba diver, emitted into water. In the study of scuba diver in hydroacoustic basin powerful respiratory noises with a repetition rate corresponding to the respiratory rhythm are recorded. When registered in real sea conditions the possibility of detecting these acoustic signals at distances up to 300 m is demonstrated.

Пассивный гидроакустический контроль состояния легководолазов и отслеживание их перемещений в пределах эксплуатируемой акватории актуальны для обеспечения безопасности подводной деятельности, а также для предотвращения проникновения террористов и браконьеров со стороны воды. Собственные дыхательные шумы, излучаемые водолазом в воду, могут использоваться с этой целью. Ранее для решения указанной проблемы исследовался только высокочастотный диапазон выше нескольких кГц [1–4]. Однако позже нами были найдены низкочастотные (ниже 1 кГц) признаки подводных шумов легководолазов в их ближнем поле [5, 6].

Целями этой работы являлось дальнейшее изучение низкочастотных шумов, излучаемых в воду водолазами с дыхательным снаряжением открытого типа (акваланг), и исследование возможностей применения этих шумов для обнаружения погруженного водолаза, и контроля его состояния и перемещений внутри мелководной акватории.

Для этого были последовательно выполнены измерения шумов водолаза-аквалангиста в гидроакустическом бассейне и реальных условиях морских погружений в мелководных акваториях.

Шумы водолаза-аквалангиста в гидроакустическом бассейне. Шумы водолаза-аквалангиста, зарегистрированные в гидроакустическом бассейне, представлены на рис.1.

Водолаз-аквалангист в дыхательном аппарате АВМ (АО «КАМПО», РФ) был подвешен в центре бассейна, при этом он находился в состоянии покоя, без движения ластами, и дышал в обычном режиме. Два гидрофона были помещены у дна бассейна, один на дистанции 3 м от водолаза-аквалангиста (рис.1 – нижний график), другой на удалении 10 м (рис.1 – верхний график). Отклики гидрофонов после усиления регистрировались на 16-канальном электронном самописце PowerLab (ADInstruments) с частотой дискретизации 10 кГц. Спектральный анализ и вычисление спектрограмм выполнено в пакете программ SpectraLab (Sound Tech.). Спектрограммы откликов гидрофонов представлены на рис.1.

В соответствие с рис.1 в регистрируемых шумах наблюдаются мощные сигналы с частотой повторения 0,12 Гц, соответствующей ритму дыхательных маневров. Превышение уровня шумов дыхания над фоном до 30 дБ. Наблюдается заметное расширение спектра сигнала вблизи от источника – 3 м, по сравнения с гидрофоном на дистанции 10 м. В полосе 40–70 Гц отмечается самое начало выдоха, видимо связанное с отрывом пузыря выдыхаемого воздуха от дыхательного аппарата. Основной широкополосный сигнал выдоха сосредоточен в полосе частот 150–1150 Гц, начинается чуть позже, и поэтому, видимо, связан с шумом всплывающих пузырьков. Высокочастотный сигнал в полосе частот 3,5–4,7 кГц явно связан с шумами на вдохе и определяется, по всей видимости, срабатывание редуктора высокого давления дыхательного аппарата. Выявленные акустические эффекты позволяют оценивать дыхательный ритм и соот-

ношение продолжительностей фаз вдоха и выдоха, что является важными физиологическими параметрами для оценки состояния водолаза.

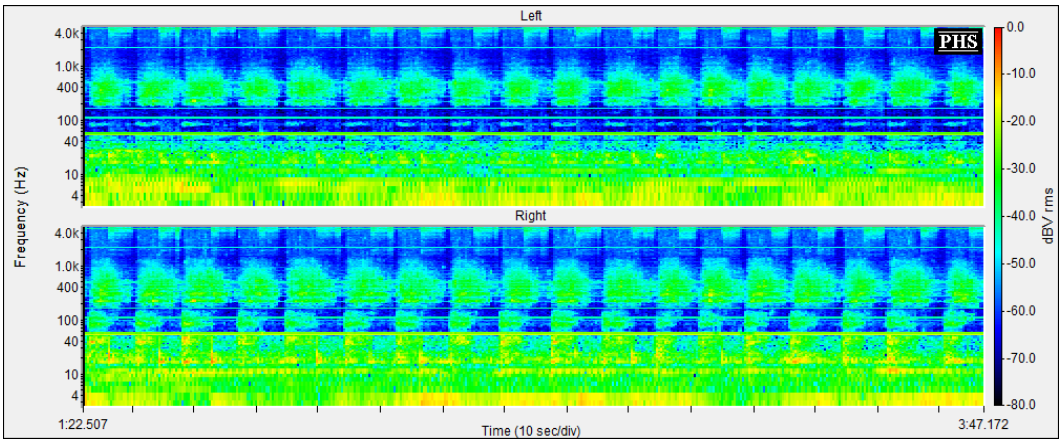


Рис. 1. Спектрограммы откликов гидрофонов, помещенных у дна бассейна, на шумы дыхания обездвиженного водолаза-аквалангиста: верхняя диаграмма (Left) – отклик гидрофона, находящегося на дистанции 10 м от водолаза, нижняя диаграмма (Right) – отклик гидрофона, находящегося на дистанции 3 м от водолаза.

Шумы водолаза-аквалангиста в условиях реального морского погружения. Дыхательные шумы водолазов-аквалангистов записывались во время мелководных погружений на 7–8 м (глубина места 10 м) в заливе Петра Великого около Владивостока. Шумы регистрировались двумя вышеупомянутыми гидрофонами, установленными у дна акватории (около 10 м) и разнесенными между собой на 16 м. Сигналы после предусиления передавались по кабелю длиной 100 м, усиливались и регистрировались на 16-канальном электронном самописце PowerLab (ADInstruments) с частотой дискретизации 10 кГц. Спектральный анализ и вычисление спектрограмм выполнено в пакете программ SpectraLab (Sound Tech.). Спектрограммы откликов гидрофонов для одного из фрагментов записи представлены на рис.2.

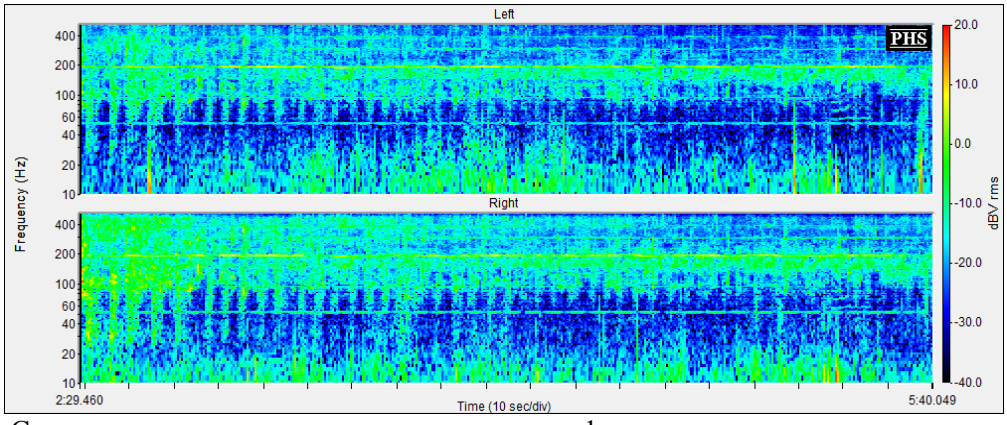


Рис. 2. Спектрограммы откликов двух донных гидрофонов, разнесенных на расстояние 16 м, при уходе водолаза-аквалангиста на ластах на дистанцию около 150 м с приблизительной скоростью 0,5 м/с.

Взаимно-корреляционные функции откликов этой пары гидрофонов рассчитаны с помощью специально разработанного программного обеспечения. Перемещение легководолаза в пределах акватории контролировалось с помощью GPS-приемника, установленного в герметичном буйке, буксируемом водолазом на фале длиной 8-10 м по поверхности воды.

В реальных морских условиях оценены абсолютные уровни шумоизлучения водолазов-аквалангистов в дыхательном снаряжении АВМ (АО «КАМПО»), Aeris (AquaLung). При приведении к дистанции 1 м они составили 0,18–0,6 Па/Гц^{0,5}.

При регистрации в натурных условиях дыхательных шумов водолаза-аквалангиста на фоне шумов акватории в частотном диапазоне 60–300 Гц оказывается возможным отслеживать на

спектрограммах акустические признаки дыхательных маневров, связанные с шумом всплывающих пузырьков, на дистанциях до 100–200 м (рис.2). Эти сигналы позволяют оценить дыхательный ритм водолаза, который для фрагмента, показанного на рис.2, составляет около 0,3 Гц.

Те же самые акустические признаки позволяют мониторировать перемещения водолаза-аквалангиста, определяя задержки времени максимумов коэффициента взаимно-корреляционной функции (Rxy) двух гидрофонов на трассах, наблюдаемых на коррелограммах (рис.3, см. вклейку). Дистанция между геометрическим центром пары гидрофонов и буйком с GPS-приемником, буксируемым водолазом при его перемещении по акватории на этом же интервале времени показаны на рис.4. Отдельно на рис.5 показаны временные задержки максимумов взаимно-корреляционной функции двух гидрофонов (синий цвет) в сопоставлении с задержкой времени, рассчитанные по данным GPS (красный цвет), а также величины коэффициента взаимной корреляции, полученные в ходе того же маневра на том же интервале времени.

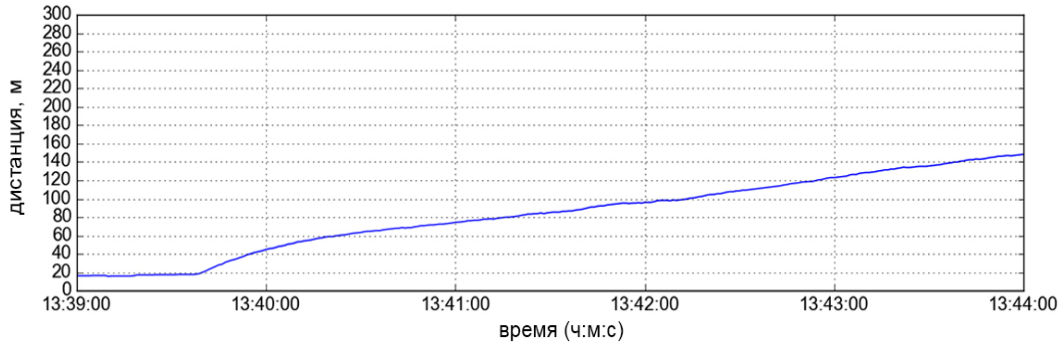


Рис. 4. Дистанция по данным GPS между геометрическим центром пары гидрофонов и буйком (с GPS-приемником), буксируемым водолазом на интервале времени, показанном на рис.3.

Согласно виду графиков рис.5 (см. вклейку) акустические временные задержки и задержки времени, рассчитанные по данным GPS (определяющие пеленги) выравниваются на дистанции около 45 м и далее очень близко следуют друг за другом до дистанции около 150 м. На этом интервале дистанций величина коэффициента взаимной корреляции откликов двух гидрофонов составляет 0,4–0,6, тогда как по фоновым шумам акватории эта величина не превышала 0,3.

Похожие трассы задержек максимумов на коррелограммах (аналогичных, показанной на рис.3) для легководолазов в дыхательном снаряжении открытого типа могут быть прослежены до дистанций 300 м. Это делает возможным и триангуляционное определение местоположение водолаза-аквалангиста с помощью нескольких пар гидрофонов.

Выводы. Таким образом, подводные дыхательные шумы легководолазов в дыхательном снаряжении открытого типа (акваланг) могут успешно использоваться для пассивного обнаружения и мониторинга водолазов в интересах обеспечения безопасности подводных погружений и предотвращения проникновения террористов и браконьеров со стороны воды.

Исследование частично поддержано НИР № гос. рег. АААА-А17-117030110041-5 по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы и Программой фундаментальных исследований «Дальний Восток», проект 18-1-004.

Литература

1. Sutin A. Salloum H., Delorme M. et al. Stevens passive acoustic system for surface and underwater threat detection // Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security. 2013. Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ, United States, 6698999, 195–200.
2. Donskoy D., Sedunov N, Tsionskiy M. Variability of SCUBA diver's acoustic emission // Proceedings of SPIE. 2008. 6945:694515–694515–11.
3. Sutin A., Bruno M., Salloum H. et al. Passive acoustic diver detection in a Dutch harbor // Technical Report. Stevens Institute of Technology, TNO Defence, Safety and Security, USA – Netherlands. 2012.
4. Fillinger L. Zampolli M. Hunter A. Passive diver detection using a random array // Proceeding of the Waterside Security Conference, Singapore. 2012.
5. Korenbaum V., Gorovoy S., Tagiltcev A. et al. The possibility of passive acoustic monitoring of a scuba diver // Doklady Earth Sciences. 2016.V.466. No.2. P.187–190.
6. Gorovoy S., Korenbaum V., Borodin A. et al. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2016. V.24. 070020.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ ПОМЕХ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «БРОКЕР-ИПФ»

А.С.Иваненков, канд.физ-мат.наук, А.А.Родионов, канд.физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT OF METHODS FOR SUPPRESSION OF INFRASOUND INTERFERENCES IN THE HYDROACOUSTIC MEASUREMENT SYSTEM «BROKER-IAP»

A.S.Ivanenkov, Ph.D., A.A.Rodionov, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

В работе исследуются свойства помех в диапазоне частот 5–20 Гц (инфразвуковых) в гидроакустической измерительной системе с кабельной антенной решеткой «Брокер-ИПФ». На экспериментальных данных показано, что в этом диапазоне частот присутствуют два основных типа помех: сверхнизкочастотная (максимум спектра на примерно на 1 Гц) квазистационарная помеха; импульсные помехи различной природы. Показано, что данные помехи могут вносить заметные искажения в измеряемые уровни звукового поля в определенное время суток, что связано, по-видимому, с приливными/отливными течениями. Для подавления этих типов помех разработаны специальные методы, эффективность которых продемонстрирована на экспериментальных данных.

The properties of interference in the frequency range of 5-20 Hz (infrasound) for hydroacoustic measurement system with cable antenna array "Broker-IAP" were studied. By investigation of the experimental data it was shown that in this frequency range there are two basic types of interference: ultra-low frequency (maximum of spectrum is about 1 Hz) quasi-stationary interference; impulse noise of different origin. It is shown that these interferences can cause noticeable disruptions in the measured levels of the sound field at a certain time of day, which is connected, apparently, with the tidal currents. To suppress these interferences special techniques have been developed whose effectiveness has been demonstrated on experimental data.

Требования к уровням подводного шума кораблей новых поколений в последние годы ужесточаются [1]. При этом возникает потребность в средствах измерения, способных с заданной погрешностью зарегистрировать низкие уровни шумов [2–4]. До недавнего времени все измерения в России проводились с помощью систем, состоящих из одиночных гидрофонов, устанавливаемых на заданном расстоянии от траектории измеряемого объекта. В 2008 г. в ИПФ РАН была разработана многоэлементная вертикальная измерительная система «Брокер-ИПФ» [4]. Разработанная система обладает высокой пространственной избирательностью и значительным выигрышем в отношении сигнал/шум (ОСШ) по сравнению с одиночными элементами, что позволяет использовать её для акустического измерения современных кораблей. В то же время, использование многоэлементных систем может представлять определенные сложности в низкочастотном диапазоне частот (5–20 Гц), связанные с возможностью существования в этом диапазоне достаточно интенсивных помех. Помехи в этом диапазоне могут быть вызваны вибрациями гидрофонов, возникающими при механических колебаниях кабельной антенны как струны с закрепленными концами. Причиной таких колебаний могут быть, например, приливные и отливные течения. В России исследования такого рода помех (тем более для конкретной измерительной системы) не проводились. Таким образом, целями настоящей работы являются: 1. исследование и классификация низкочастотных помех в системе «Брокер-ИПФ»; 2. выявление причин возникновения этих помех; 3. оценка степени их влияния на погрешность измерения уровня подводного шума; 4. разработка методов подавления таких помех.

Приём сигналов в комплексе «Брокер-ИПФ» осуществляется вертикальной гидроакустической антенной решеткой (АР) из 42-х гидрофонов с переменным межэлементным расстоянием. Обработка сигналов в этой системе осуществлялась отдельно по нескольким подсистемам, представляющим собой эквидистантные подрешетки, гидрофоны которых входят в общую антенну. Такие АР имеют разную длину и предназначены для проведения измерений в разных частотных диапазонах, определяемых межэлементным расстоянием соответствующей АР. В настоящей работе будут анализироваться сигналы с 29 последовательных гидрофонов, составляющих большую часть приёмной системы и вместе образующих апертуру длиной около 100 м. Принимаемые соответствующими подсистемами сигналы будут объединяться в один многомерный сигнал, соответствующий одной неэквидистантной решетке. Для исследования и классификации помех, присутствующих на гидрофонах системы, были выбраны несколько записей фоновой помехи, произведенных в течении двух дней на гидроакустическом полигоне в Белом море. При рассмотрении энергетических характеристик поля, в работе будут приводить-

ся лишь относительные уровни сигналов, представляющие реальную амплитуду поля в паскалях, умноженную на некоторый коэффициент.

Одной из особенностей исследованных сигналов является сильное изменение их мощности в течение суток. Качество акустического измерения кораблей зависит от мощности внешнего фона, поэтому возникает вопрос об эффективном времени проведения измерения, когда фоновая помеха минимальна. На рис. 1 представлен график зависимостей средней по элементам мощности сигнала в зависимости от времени. Зависимости представлены в дБ для четырёх записей, сделанных в разное время. Для удобства сигналы данных измерений представлены на единой временной оси и изображены разными типами линий. Как видно из зависимости, средний уровень сигналов значительно меняется от записи к записи. При этом, как показал анализ, средний уровень сигналов относительно слабо меняется от гидрофона к гидрофону (это изменение не превышает нескольких децибел), что говорит об относительной равномерности распределения энергии принимаемого сигнала по глубине. Как оказалось, изменение среднего уровня сигналов в течении суток связано с временем приливов и отливов: максимальный уровень принимаемого сигнала соответствует моменту времени, когда вода полная, минимальный – когда вода малая.

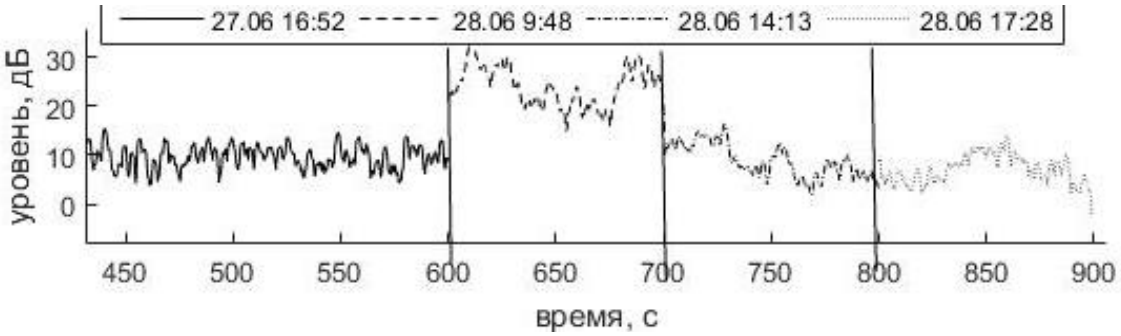


Рис. 1. Средняя мощность по гидрофонам принятого сигналов в зависимости от времени для четырёх записей, выполненных в разные моменты времени. Для удобства отдельные записи объединены на одной временной оси. Интервал усреднения по времени – 1 с.

Спектральный анализ записей показал наличие в диапазоне от 2 до 5 Гц значительного превышения уровня спектральной плотности мощности (СПМ) (порядка 40 – 60 дБ) над остальной частью спектра. Мощность сигналов в данном частотном диапазоне фактически определяет общую мощность сигналов. На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов в зависимости от номера гидрофона для одной из записей. На осцилограммах нетрудно заметить чередование максимумов и минимумов значений сигналов, имеющих регулярный временной сдвиг в зависимости от номера гидрофона. Такая зависимость может быть следствием влияния одного из типов упругих волн, распространяющихся по антенне и вызывающих вибрации гидрофонов. Отметим, что скорость распространения таких возмущений отличается от скорости распространения звука в среде и является разной для подрешеток с одинаковым межэлементным расстоянием, что может быть обусловлено конструктивными особенностями антенны. Также было обнаружено, что данный тип возмущений отвечает за максимум СПМ в диапазоне от 1 до 8 Гц и изменение его уровня коррелирует с изменением среднего уровня сигнала на рис. 1. Такого рода колебания присутствуют во всех записях и определяют основную часть энергии сигнала. При значительной локализации основной энергии данных волн в узком частотном диапазоне, стоит отметить, что эти колебания распространяются и на другие частоты. В связи с этим, частотная фильтрации данного типа помехи может быть неэффективной. В настоящей работе предлагается метод фильтрации таких волн, основанный на вычислении точной временной зависимости мешающих колебаний. Из рис. 2 видно, что сигнал упругих колебаний имеет определенную задержку на каждом из элементов. Как оказалось, эти задержки могут быть вычислены за счет максимизации результата суммирования сигналов со всех элементов, сдвинутых во времени на определенные значения. При этом максимум будет соответствовать введению обратных задержек.

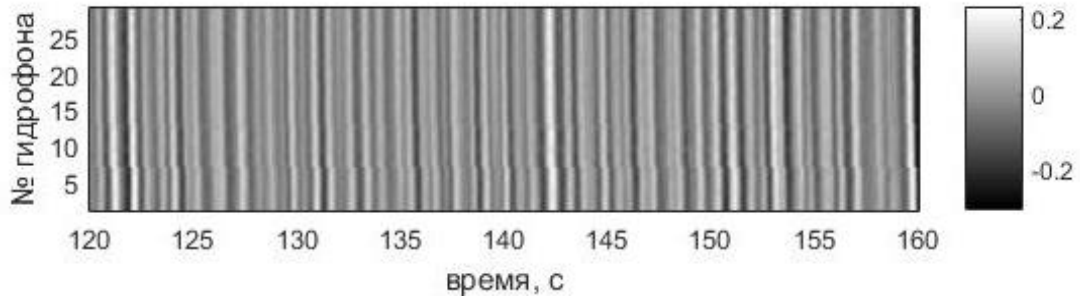


Рис. 2. Пример осциллограмм принятых гидрофонами сигналов.

Оценкой временной формы сигнала помехи является среднее по элементов принятых сигналов, предварительно сдвинутых во времени с ученом найденных задержек. Предлагаемый в работе метод фильтрации заключается в вычитании из принятых сигналов оценки сигнала помехи, полученного накоплением по всем приемным элементам. На рис. 3 представлены осциллограммы сигналов на гидрофонах с применённой фильтрацией.

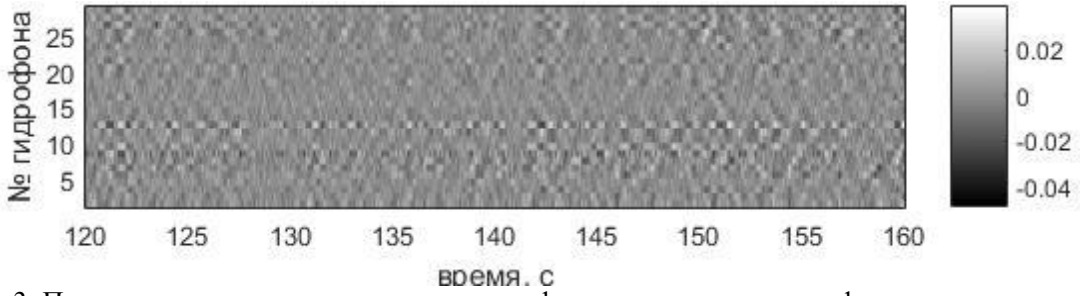


Рис. 3. Пример осциллограмм принятых гидрофонами сигналов после фильтрации помех, вызванных механическими колебаниями.

Как видно из рисунка, уровень сигналов на всех элементах за счёт вычитания помехи сильно уменьшается и пропадает периодическая зависимость, характерная для принятого сигнала на рис. 2. На рис. 3 приводятся примеры усредненных по гидрофонам СПМ принятых сигналов с предложенной фильтрацией и без. Как видно, уровень СПМ при применении фильтрации значительно уменьшается (около 20 дБ) в области инфразвуковых частот. Представленные результаты говорят об эффективности предложенного метода.

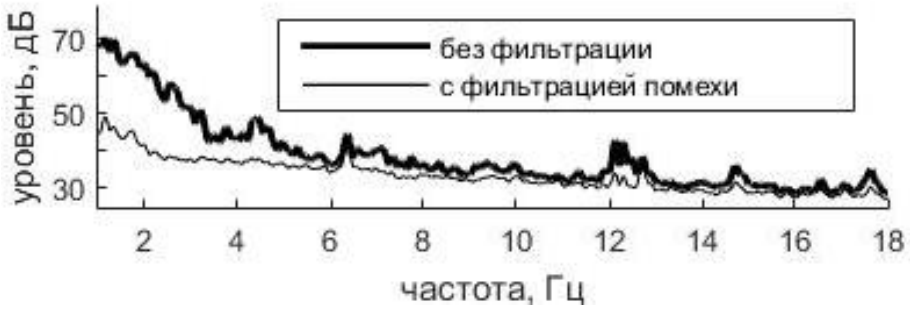


Рис. 3. Усредненные по гидрофонам СПМ сигналов с фильтрацией помех, вызванных упругими колебаниями (тонкая кривая), и без фильтрации (жирная кривая).

Другой особенностью обработанных данных является наличие в них нерегулярных выбросов, спектр которых локализуется в районе 10–90 Гц. Средняя мощность таких помех может превышать среднюю мощность сигнала на 20 дБ и существенно искажать результат измерений. Пример спектра в зависимости от номера элемента сигнала одного из таких выбросов представлен на рис. 4. Учитывая нерегулярность таких выбросов, одним из методов борьбы с ними может быть клиппирование сигнала: удаление из обработки участка временной реализации, содержащей помеху. Недостатком такого подхода является необходимость создания автоматической процедуры клиппирования, включающей задачу обнаружения импульсов. При ошибках

в обнаружении, а также при большом количестве импульсов, может теряться большая часть сигнала, необходимая для измерения. Другим средством борьбы с импульсными выбросами может быть использование методов оценки дисперсии гауссового процесса, устойчивых к импульсным помехам (см., например, [5]). Данные методы подтвердили свою эффективность при оценке уровня подводного шума кораблей на экспериментальных данных.

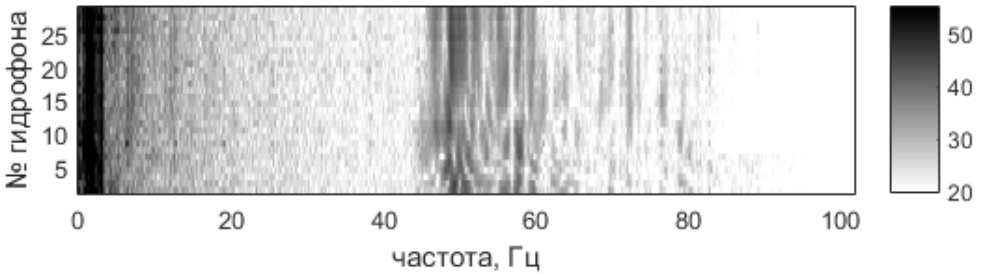


Рис. 4. СПМ принятых сигналов в зависимости от номера элемента при наличии импульсного выброса.

Заключение. В настоящей работе были рассмотрены различные типы помех, возникающих в измерительной многоэлементной системе «Брокер-ИПФ» в инфразвуковом диапазоне частот. Было показано, что наибольший вклад в общую мощность вносят помехи, порожденные упругими колебаниями кабельной системы гидрофонов. Интенсивность таких колебаний зависит от времени измерения, что связано, предположительно, с изменением суточных течений. В работе показано, что данный тип помех, существенно искажающий результат измерений, может быть эффективно исключён из принятого сигнала. Результаты исследования, представленные в работе, могут быть использованы для борьбы с помехами как при модернизации существующих многоэлементных кабельных гидроакустических систем (таких, как «Брокер-ИПФ» [4] и «Нева-ИПФ» [3, 6]), так и при создании новых.

Литература

1. Acoustic Ecology Institute Spotlight Report, 2008, ‘Ocean Noise: Science Findings and Regulatory Developments in 2007’, The Acoustic Ecology Institute, Santa Fe, NM, USA.
2. Orlov D., Fiks G., Fiks I., Korotin P., Turchin V. 2008, ‘Adaptive beamforming applied to underwater acoustic measurements’, Proceedings of the 9th European Con-ference of Underwater Acoustics (organized in the framework of the Acoustics’08 Paris Conference). 1, 333-338.
3. Бармак А.С, Коротин П.И., Слижов А.Б., Турчин В.И., Чащин А.С. Комплекс для измерения параметров гидроакустического поля СИ ГАП «НЕВА-ИПФ». Морская радиоэлектроника, №1, 2011., с. 20-24.
4. Матвеев А.Л., Коротин П.И.. О возможности оценивания параметров траектории слабого гидроакустического источника с помощью вертикальной антенны. Сборник трудов XX сессии РАО. - М.: ГЕОС, 2008, с.292-296.
5. Родионов А.А., Турчин В.И. Оценки дисперсии гауссового процесса, устойчивые к импульсной помехе // Изв. вузов. Радиофизика, 2005, т. 48, № 1, с. 76–85.
6. Бармак А.С., Коротин П.И., Салин Б.М. Корабельный комплекс для измерения параметров гидроакустического поля СИ ГАП "НЕВА-ИПФ". Труды конференции «Гидроакустика», 2016 г., стр. 69-74.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОКАТОРА СЕКТОРНОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ ДО МОРСКОГО ДНА

М.А.Бородин, канд.техн.наук, Р.К.Хаметов, канд.техн.наук
Кировский филиал АО «Концерн «Океанприбор», Кировск, Ленинградская область, Россия

THE APPLICATION OF SECTOR SCAN SONAR FOR DETERMINATION OF DISTANCE TO SEA-BOTTOM

M.A.Borodin, Ph.D., R.K.Khametov, Ph.D.
Kirovsk Branch of JSC «Concern «Oceanpribor», Kirovsk, Leningrad region, Russia

Рассмотрены вопросы реализации опции определения дистанции до морского дна в гидролокаторе переднего обзора для автономного необитаемого подводного аппарата. Представлены результаты экспериментальных исследований.

The problems of using forward looking sonar for autonomous underwater vehicle for determination of distance to sea bottom are considered. The results of experimental investigation are presented.

Ограниченный объем полезной нагрузки многоцелевого автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) определяет набор устанавливаемых на нем технических средств, в том числе и гидроакустических. Высвобождение некоторой части полезного объема АНПА возможно при расширении функциональных возможностей гидролокатора переднего обзора (ГПО), предназначенного для обнаружения препятствий в направлении движения, путем интеграции опции определения дистанции от АНПА до дна и отказе от установки на АНПА многолучевого эхолота (МЛЭ). Традиционно ГПО используется для обзора пространства впереди по курсу движения АНПА и предлагаемой опцией не обладает.

ГПО аналогично МЛЭ определяет дистанций между антенной и поверхностью дна в некоторой полосе обзора с последующим преобразованием в значения отстояний АНПА от поверхности дна для формирования цифровой модели рельефа (ЦМР) дна на этапе постобработки данных.

Стоит отметить, что для реализации съемки рельефа дна с помощью АНПА необходимо обеспечить заданную точность определения текущих географических координат АНПА, а также иметь данные о текущей глубине АНПА (его отстояние от границы раздела «воздух-вода») для последующего расчета глубины морского дна обследуемой акватории.

Далее под термином «съемка рельефа дна» будем понимать процедуру получения отстояний АНПА от поверхности морского дна в полосе обзора, совокупность которых является оценкой рельефа морского дна.

Для реализации опции определения дистанции до морского дна в ГПО целесообразно использовать параллельно-последовательный способ обзора пространства, позволяющий обеспечить большую дальность действия при более высокой разрешающей способности по угловым координатам [1]. Кроме того, важным преимуществом указанного способа обзора пространства является возможность получения данных о рельефе дна с упреждением, а также существенное расширение полосы обзора вдоль направления движения по сравнению с МЛЭ. Расширение полосы обзора вдоль направления движения также позволяет повысить скорость движения АНПА при выполнении съёмки, что увеличивает её производительность и уменьшает влияние возмущений водной среды на прямолинейность траектории движения АНПА.

Рассмотрим требования к основным тактическим параметрам ГПО, выполнение которых необходимо для успешной реализации опции определения дистанции до морского дна.

Сектор обзора в горизонтальной плоскости (ГП) должен быть достаточно широким (более ±45º) для осуществления маневра уклонения от препятствий в направлении движения [2], а также обеспечения достаточно большого размера осматриваемой площади морского дна для повышения производительности сбора гидроакустических данных. Сектор обзора в вертикальной плоскости (ВП) необходимо ограничить значениями ±30º…±35º по следующим причинам.

Во-первых, расширение сектора обзора в ВП с целью повышения интенсивности сигналов, рассеиваемых поверхностью дна в направлении на ГПО нецелесообразно. На рис.1 в качестве примера показана зависимость коэффициента обратного рассеяния (КОР) донного грунта от угла скольжения для частоты 100 кГц. Отмечаем, что с увеличением угла скольжения к поверхности морского дна при расширении сектора обзора значения КОР увеличиваются достаточно медленно (область «плато»), поэтому энергетический выигрыш будет минимальным.

Во-вторых, расширение сектора обзора в ВП потребует усложнения конструкции гидро-

акустических антенн ГПО и значительно затруднит их размещение на АНПА, а также приведёт к уменьшению дальности действия. Угловая разрешающая способность в ГП и ВП должна быть высокой, менее 1.5º, поскольку влияет на размеры элемента пространственного разрешения формируемой ЦМР дна.

Для обеспечения параллельно-последовательного обзора пространства гидроакустическая антенна навигационного ГПО должна состоять из двух ортогонально расположенных многоэлементных акустических блоков – излучающего (блока ИЗ) и приёмного (блок ПР).

Для освещения зоны обзора ГПО с угловыми размерами $\varphi_1 \times \theta_1$ требуется сформировать $M=\varphi_1/\Delta\varphi_{изл}$ пространственных каналов в ВП и $K=\theta_1/\Delta\theta_{пр}$ пространственных каналов в ГП, соответственно. Под пространственным каналом понимается область пространства, образованная пересечением характеристики направленности (ХН) блока ИЗ и одной из веера ХН блока ПР, из которой получают гидролокационную информацию. Угловые размеры области пространства, относящейся к одному пространственному каналу, составляют $\Delta\varphi_{изл} \times \Delta\theta_{пр}$, где $\Delta\varphi_{изл}$ и $\Delta\theta_{пр}$ – значения ширины ХН блока ИЗ и блока ПР, соответственно (см. рис.2).

За один цикл зондирования длительностью T получают гидролокационную информацию по одному пространственному каналу в ВП и по K пространственным каналам в ГП. За M циклов зондирования последовательно просматривают все пространственные каналы в ВП, таким образом, время обзора пространства составляет $T_0=M \times T$. На больших шкалах дальности при высокой разрешающей способности по углу в ВП время обзора существенно увеличивается, (например, M>10) и необходимо использовать способы сокращения времени обзора пространства, рассмотренные в работе [3].

Из всей совокупности пространственных каналов в ВП для оценки рельефа дна предполагается использовать пространственные каналы с углами наклона в ВП -10º…-35º, поскольку сигналы от дна в пространственных каналах с меньшим углом наклона имеют весьма малую интенсивность.

Оценку рельефа дна в направлении движения АНПА в отличие от МЛЭ предлагается выполнять по кадрам гидролокационного изображения (ГЛИ), каждый из которых представляет собой данные по M пространственным каналам в ВП для фиксированного пространственного канала в ГП [4].

Предлагается следующий алгоритм определения дистанции до поверхности дна по каждому из кадров ГЛИ:

получение кадра ГЛИ;

фильтрация по длительности;

фильтрация по амплитуде;

фильтрация по данным от внешних систем (датчик давления);

процедура кластеризации отметок от дна;

пересчет дистанции до поверхности морского дна в значение отстояния АНПА от дна;

коррекция данных на профиль скорости звука по глубине, на бортовую и килевую качку.

Поясним некоторые, на наш взгляд, важные особенности предложенного алгоритма.

Фильтрация по длительности заключается в оценке длительности каждого из выделенных эхо-сигналов и её сравнении с пороговым значением, определяемым длительностью излучённого в водную среду сигнала с учётом его растяжения при распространении, что позволяет отфильтровать импульсные помехи небольшой длительности. Фильтрация по амплитуде заключается в пороговой обработке амплитуд отобранных на предыдущем этапе обработки эхо-сигналов с целью выделения эхо-сигналов от дна и объектов в толще воды.

При наличии данных об отстояниях от границ раздела «вода-дно» (от эхолота) и «воздух-вода» (от датчика давления) выполняется фильтрация выделенных эхо-сигналов по величине отстояния от указанных границ раздела. Процедура кластеризации отметок от дна состоит в разделении полученных эхо-сигналов на пространственные кластеры по признаку минимума межэлементного расстояния между соседними отметками, базирующийся на предположении пространственной связанности эхо-сигналов от дна.

Далее выполняется коррекция выделенных эхо-сигналов для учёта рефракции, обусловленной отличием профиля скорости звука по глубине от постоянного, а также углов бортовой и килевой качки. После раздельной обработки всех кадров ГЛИ (по всем пространственным каналам в ГП) информация объединяется для последующего формирования ЦМР дна на этапе постобработки.

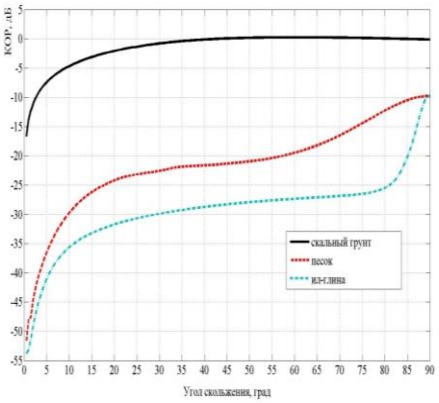


Рис. 1. Зависимость КОР от угла скольжения.

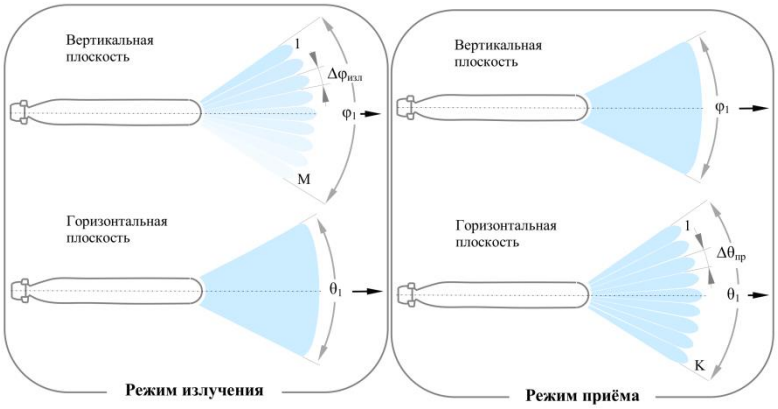


Рис. 2. Обзор пространства, реализуемый ГПО.

Предложенный подход к реализации опции определения дистанции до поверхности дна был опробован в макете ГПО, разработанного в АО «Концерн «Океанприбор». На рис.3 и 4 (см. вклейку) приведён пример гидроакустических данных за один цикл зондирования, полученных при натурных испытаниях макета ГПО на Ладожском полигоне Концерна, со следующими обозначениями: 1 – отметка от границы раздела «воздух-вода»; 2 – отметка от границы раздела «вода-дно»; 3 – отметка от берега; 4 – отметка от искуственного отражателя, размещённого в водной среде; 5 – отметка от кильватерного следа катера с установленным макетом ГПО.

На рис.3 показаны данные по всем пространственным каналам в ВП для фиксированного пространственного канала в ГП (кадр ГЛИ) в координатах «угол в ВП – наклонная дальность», а на рис.4 – данные по всем пространственным каналам в ГП для фиксированного пространственного канала в ВП в координатах «угол в ГП – наклонная дальность».

На рис.5 (см. вклейку) представлена предварительная ЦМР дна в координатах «горизонтальная дальность – путевая дальность – глубина», полученная путем применения алгоритма определения дистанции до поверхности дна по каждому из кадров ГЛИ макета ГПО за один цикл зондирования.

Макет ГПО размещался на забортном устройстве катера, и отстояние от границы раздела «воздух-вода» было известным. Предварительный характер ЦМР дна обусловлен отсутствием учета фактического значения среднего уровня морской поверхности, а влияния качки катера. На рис.5 также можно наблюдать отметку от цели, размещенную над поверхностью дна (область желтого цвета) присутствующую также на рис.3-4. Данные на рис.3-5 отображаются согласно цветовой палитре, в которой синий цвет соответствует минимальной амплитуде сигнала, а жёлтый – максимальной.

Полученный рельеф на ЦМР дна (рис.5) согласуется с имеющими данными по району испытаний. В настоящее время ведутся работы по созданию опытного образца ГПО с опцией определения дистанции до дна для перспективных многоцелевых АНПА.

Литература

1. Хаметов Р.К. Трехкоординатные гидролокаторы переднего обзора для автономных необитаемых подводных аппаратов // Научно-технический сборник «Гидроакустика», 2015. Вып.22. С.59-63.
2. Смирнов С.А. Впередсмотрящий 3D гидролокатор для обеспечения безопасного плавания в районах арктического шельфа // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 27-29 мая 2008 г. СПб.: Наука, 2008. С.103-105.
3. Бородин М.А. Анализ способов сокращения времени обзора пространства в гидролокационных средствах // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 24-26 мая 2016 г. СПб.: Наука, 2016. С.82-84.
4. Бородин М.А. Алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевом эхолоте // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 22-24 мая 2012 г. СПб.: Наука, 2012. С.375-378.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ НАУЧНЫМИ ЭХОЛОТАМИ «СЕКТОР» (КБМЭ «ВЕКТОР») И EY500 (SIMRAD)

А.Н.Долгов, канд.техн.наук, А.Н.Куценко, канд.техн.наук, М.А.Раскита, канд.техн.наук
ООО «КБ морской электроники «Вектор», Таганрог, Россия

RESULTS OF COMPARATIVE HYDROACOUSTIC SURVEY CARRIED OUT WITH SCIENTIFIC ECHOSOUNDER «SECTOR» (VECTOR MARINE ELECTRONICS, LTD) AND EY500 (KONGSBERG MARITIME AS SIMRAD)

A.N.Dolgov, Ph.D., A.N.Kutsenko, Ph.D., M.A.Raskita, Ph.D.
Vector Marine Electronics, Ltd., Taganrog, Russia

Доклад посвящён демонстрации результатов совместной сравнительной гидроакустической съёмки по оценке рыбной биомассы, выполненной во внутреннем водоёме. При выполнении гидроакустической съёмки одновременно использовались научный эхолот EY500 норвежской фирмы Simrad (Kongsberg Maritime AS), зарекомендовавший себя как международный эталонный инструмент для проведения количественной оценки рыбных запасов, и первый отечественный научный многолучевой эхолот «Сектор», разработанный в КБМЭ «Вектор» по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009-2016 г.г.». Показана высокая степень совпадения полученных результатов, что свидетельствует о достижении цели импортозамещения и возможности применения отечественной научной гидроакустической аппаратуры для проведения гидроакустических съёмок на мелководье и во внутренних водоемах.

The report describes demonstration of results of a joint comparative hydroacoustic survey on the fish biomass assessment in an inland water body. Norwegian scientific echosounder EY500, Simrad (Kongsberg Maritime AS), which proved to be an international reference tool for the quantitative fish stock assessment, was used at the hydroacoustic survey simultaneously with the first domestic multi-beam scientific echosounder "Sector", developed by Vector Marine Electronics, Ltd. within the bounds of Federal Target program "Development of Civil Marine Equipment for 2009-2016". High degree of the obtained results coincidence is shown, which indicates the achievement of the goal of import substitution and the possibility of using domestic scientific hydroacoustic equipment for carrying out hydroacoustic surveys in shallow water and in inland water body.

Описываемая в настоящем докладе совместная гидроакустическая съёмка проводилась на экспериментальном полигоне Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО») на реке Осуга (глубиной до 15 м) в акватории Вазузского водохранилища, примыкающего к Зубцовскому рыбозаводу (Зубцовский район, Тверская обл., 56°04′29,78″ с.ш., 34°27′51,88″ в.д), в которой обитают пресноводные рыбы: уклея, плотва, лещ и краснопёрка. Сетка из 20 галсов по акватории реки, по которым производилась гидроакустическая съёмка, показана на рис. 1 [1].

Совместная гидроакустическая съёмка производилась специалистами:

ФГБНУ «ВНИРО» с применением однолучевого научного (с расщеплённым лучом) эхолота (НЭЛ) EY500 (выбранного в качестве референсного) норвежской фирмы Simrad (Kongsberg Maritime AS) [2], зарекомендовавшей себя как производителя международных эталонных гидроакустических инструментальных средств для проведения количественной оценки рыбных запасов;

ООО «КБМЭ «Вектор» с применением первого отечественного научного многолучевого эхолота (НМЭЛ) «Сектор», разработанного в этом КБ по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» [3, 4].

В качестве плавсредства использовалась моторная лодка «Воронеж-К» с подвесным мотором Yamaha 9.9 FMHS. Подводный блок НМЭЛ «Сектор» и гидроакустическая (ГА) антенна НЭЛ EY500 размещались совместно на забортном устройстве НМЭЛ «Сектор» на правом борту, как показано на рис. 2, дистанция между антеннами не превышала 30 см.

Совместная гидроакустическая съёмка производилась для сравнения результатов эхоинтегрирования и эхосчета по данным НМЭЛ «Сектор» с результатами, полученными по данным НЭЛ EY500. Для того чтобы параметры эхолотов были максимально близки, в НМЭЛ «Сектор» программным способом была сформирована однолучевая круговая характеристика направленности с расщеплённым лучом, ширина которой по результатам калибровки составила 11,7 градусов по уровню минус 3 дБ. Ширина характеристики направленности НЭЛ EY500 по уровню минус 3 дБ по результатам калибровки составила 11,6 градусов; длительности зондирующего импульса: НЭЛ EY500 – 600 мкс, НМЭЛ «Сектор» – 512 мкс. Различием эхолотов является разная рабочая частота: НЭЛ EY500 – 70 кГц, НМЭЛ «Сектор» – 200 кГц.

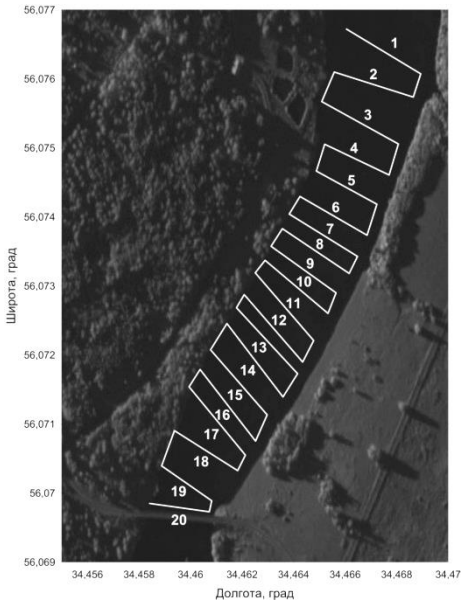


Рис.1. Галсы ГА съёмки.

Рис.2. Антенны «Сектор» и EY500.

Перед проведением гидроакустической съёмки выполнялась калибровка эхолотов по эталонной карбид-вольфрамовой сфере диаметром 38,1 мм в соответствии с классической методикой калибровка научной гидроакустической аппаратуры [5]. Сила цели эталонной сферы в условиях проведения съёмок рассчитывалась с помощью программы «Калькулятор силы цели», разработанной в ООО «КБМЭ «Вектор» [6]. В результате калибровки выполнялась корректировка коэффициентов усиления и смещения главных акустических осей характеристик направленности эхолотов.

Для итоговой оценки записей эхосигналов, полученных при проведении гидроакустических съемок, использовалась постпроцессинговая система (ППС) EchoView ver.3.50, разработанная австралийской компанией SonarData и широко используемая многими зарубежными и Российскими НИИ Росрыболовства и РАН для решения задач количественной оценки гидробионтов. Для осуществления возможности экспорта гидроакустических данных НМЭЛ «Сектор» в ППС EchoView в ООО «КБМЭ «Вектор» разработана собственная ППС [7] с возможностью экспорта ГА данных в фалы формата *.hac, разработанного Международным советом по исследованию моря как международного стандарта хранения и обмена гидроакустическими данными [8].

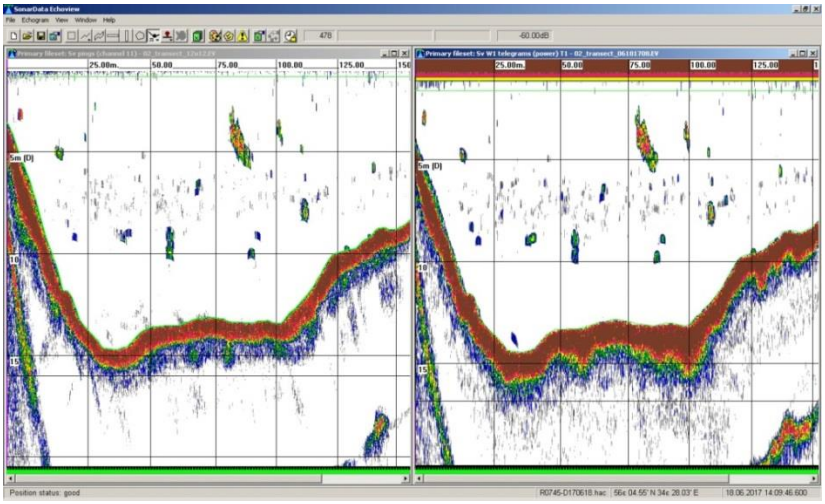
Для селекции эхосигналов от отдельных рыб и расчетов их силы цели (TS) использовался алгоритм «Single target detection – split beam (method 1)», подробно представленный в работах [9-12]. Настройки алгоритма для обоих эхолотов были идентичными. Селекция одиночных целей и расчёт их TS необходимы для оценки рыбной биомассы методом эхосчёта.

Для оценки рыбной биомассы методом эхоинтегрирования по гидроакустическим данным эхолотов рассчитывался коэффициент NASC – Nautical area scattering coefficient, измеряемый в $м^2$/$миля^2$ [13], являющийся мерой силы обратного объёмного рассеяния единицей площади морской поверхности.

Анализ записанных эхограмм эхолотом EY500 и НМЭЛ «Сектор» показал высокое сходство между ними. Количество регистрируемых рыб и рыбных косяков полностью совпало. Некоторое отличие в отображении по протяженности и интенсивности эхосигналов объясняется разными рабочими частотами эхолотов. На рис. 3 представлены примеры эхограмм с рыбными записями эхолотом EY-500 и НМЭЛ «Сектор».

На рис. 4 показана итоговая гистограмма распределения TS рыб по всем галсам гидроакустической съемки, рассчитанная по данным НМЭЛ «Сектор» и НЭЛ EY500 с помощью ППС EchoView. На рис. 5 показано итоговое распределение NASC по всем галсам гидроакустической съемки.

На рис. 6 представлено количество распознанных одиночных рыб, а на рис. 7 – среднее значение силы цели по всем галсам съёмки.



а) НМЭЛ «Сектор» б) НЭЛ EY500

Рис. 3. Примеры эхограмм рыбных концентраций НМЭЛ «Сектор» и НЭЛ EY500.

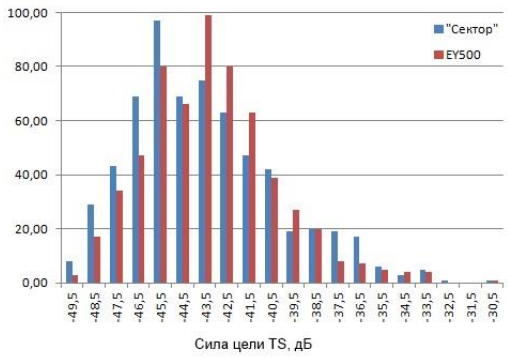


Рис. 4. Итоговая гистограмма распределения силы цели (TS) рыб по всем галсам съемки.

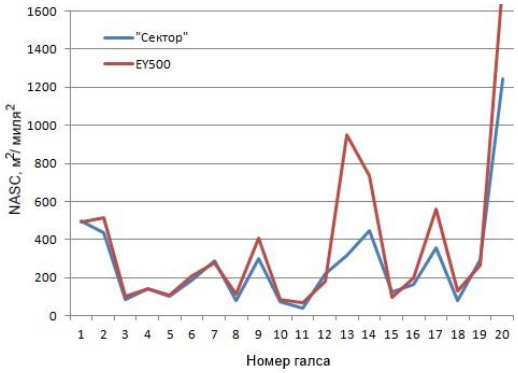


Рис. 5. Итоговое распределение NASC по всем галсам съемки.

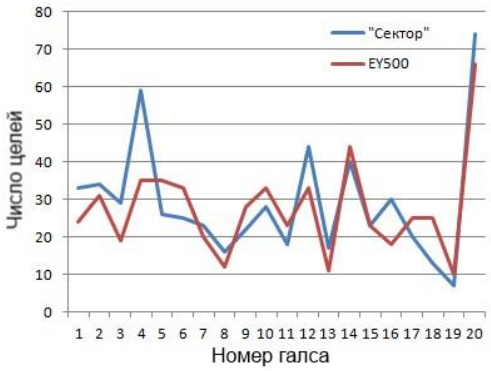


Рис. 6. Распределение числа обнаруженных целей по всем галсам съемки.

Рис. 7. Итоговое распределение среднего значения силы цели (TS) рыб по всем галсам съемки.

Следует отметить, что характер огибающих линий гистограмм распределений TS рыб, рассчитанные по данным НМЭЛ «Сектор» и НЭЛ EY500 близки (рис. 4), общее количество распознанных одиночных рыб НМЭЛ «Сектор» и НЭЛ EY500 практически совпадают (рис. 6). Еще большее совпадение в результатах расчета наблюдается при анализе результатов обработки «сырых» данных сравниваемых гидроакустических систем для каждого галса гидроакустической съемки. Рассчитанные значения NASC и TS для каждого галса практически совпадают (рис. 5 и рис. 7).

На основании полученных результатов можно утверждать, что разработанный НМЭЛ «Сектор» успешно выдержал испытание сравнением с признанным зарубежным научным эхолотом EY500 при проведении совместной гидроакустической съёмки. Разработанные аппарат-

ная часть, математическое, алгоритмическое [14] и программное обеспечение НМЭЛ «Сектор» соответствуют требованиям, предъявляемым к научной гидроакустической аппаратуре. Соответственно, можно утверждать, что разработан первый импортозамещающий отечественный аналог зарубежной научной гидроакустической аппаратуры для проведения гидроакустических съёмок при выполнении количественной оценки запасов водных биоресурсов на мелководье и во внутренних водоемах.

Литература

1. Руководство по проведению гидроакустических съёмок. – М. ВНИРО, 1984.
2. Методическое пособие по использованию научного эхолота ЕК500/Сост. Гаврилов Е.Н., Игнашкин В.А., Ратушный С.В. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. – 134 с.
3. Долгов А.Н., Третьяков С.В., Раскита М.А., Куценко А.Н., Гончаров С.М. Разработка и испытания портативного гидролокатора секторного обзора // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования / ОАО ЦНИИ «Курс», 2015. № 4. С. 125 – 134.
4. Долгов А.Н., Третьяков С.В., Раскита М.А., Абдурахманов Г.М., Теймуров А.А., Гаджиев А.А. Результаты гидроакустических съёмок в водоёмах рыбоводческого хозяйства с применением научного портативного гидролокатора секторного обзора (ПГЛС) «Сектор». Журнал «Рыбное хозяйст-во» №2 2016 г. С. 73-77.
5. Абдурахманов Г.М., Теймуров А.А., Гаджиев А.А., Долгов А.Н., Третьяков С.В., Раскита М.А., Куценко А.Н., Третьяков С.В. Экспериментальная проверка в Каспийском море возможности применения научного многолучевого эхолота на НИС «Исследователь Каспия» для обнаружения рыб в широкой полосе обзора. Журнал «Юг России: экология, развитие» Том 11 № 4 2016 г. С. 46-55.
6. Simmonds J., MacLennan N. Fisheries acoustics; Theory and practice, 2nd ed., Blackwell Science, Oxford, 2005. – 437 pp.
7. Раскита М.А., Куценко А.Н., Самотков О.В. Калькулятор силы цели. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618243.
8. Программное обеспечение системы постпроцессинговой обработки результатов подсчёта рыб (ПО постпроцессинга). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610782.
9. McQuinn I. H., Reid D., Berger L., Diner N., Heatley D., Higginbottom I., Andersen L. N., Langeland O., Lapierre J. P. Description of the ICES HAC Standard Data Exchange Format, Version 1.60. ICES Cooperative Research Report No. 278, 86 pp. December 2005.
10. Soule, M., Barange, M. and Hampton, I. (1996) Potential improvements to current methods of recognizing single targets with a split-beam echosounder. ICES Journal of Marine Science, 53: 237-243.
11. Soule M., Barange M. and Hampton I. (1995) Evidence of bias in estimates of target strength obtained with a split-beam echosounder. ICES Journal of Marine Science, 52: 139-144.
12. Soule M., Barange M., Solli H. and Hampton I. (1997) Performance of a new phase algorithm for discriminating between single and overlapping echoes in a split-beam echosounder. ICES Journal of Marine Science, 54: 934-938.
13. Ona E. and Barange M. (1999) Single Target Recognition. ICES Cooperative Research Report, 235: 28-43.
14. MacLennan D.N., Fernandes P.G., Dalen J. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. ICES Journal of Marine Science, 59: 365 – 369. 2002.
15. Долгов А.Н., Куценко А.Н., Раскита М.А. Разработка алгоритма селекции пелагических целей в научном многолучевом гидролокаторе секторного обзора. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2014. – стр.527-530.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО ПОРТАТИВНОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОДНОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТА С РАСЩЕПЛЁННЫМ ЛУЧОМ

А.Н.Долгов, канд.техн.наук, А.Н.Куценко, канд.техн.наук, М.А.Раскита, канд.техн.наук
ООО «КБ морской электроники «Вектор», Таганрог, Россия

GOALS AND OBJECTIVES OF IMPORT-SUBSTITUTING PORTABLE MULTIPURPOSE RESEARCH SPLIT-BEAM ECHO SOUNDER CREATION

A.N.Dolgov, Ph.D., A.N.Kutsenko, Ph.D., M.A.Raskita, Ph.D.
Vector Marine Electronics, Ltd., Taganrog, Russia

Доклад посвящён обоснованию разработки импортозамещающего портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота (МИЭЛ) с расщеплённым лучом. Описываются задачи, решаемые МИЭЛ, такие как оценка численности и размерного ряда выращиваемой в садках рыбы для усовершенствования методов индустриальной аквакультуры, и выполнение гидроакустических съемок для количественной оценки запасов ВБР во внутренних водоемах и прибрежных морских акваториях.

The provides substantiation of development of import substituting portable multipurpose research split beam echo sounder (MRE). The tasks to be solved by MRE, such as estimation of number and size of fish grown in cages for the industrial aquaculture methods improvement, as well as carrying out hydroacoustic surveys on the fish biomass assessment in inland waters and coastal marine areas are described.

На сегодняшний день оценка запасов морских промысловых видов рыб в России проводится, в основном, с применением зарубежных однолучевых эхолотов с расщепленным лучом. Такие эхолоты позволяют проводить измерение размерного ряда обнаруженных одиночных рыб (эхосчет) и интегрирование накопленных гидроакустических данных для расчета распределения биомассы по площади и глубине обследуемой акватории (эхоинтегрирование).

Традиционно такое оборудование применяется при проведении морских исследований (на глубинах от 50 до 800 м). Проблема учета водных биоресурсов во внутренних водоемах не менее актуальна, чем для морских исследований, и в дальнейшем в связи с развитием аквакультуры будет только обостряться. Поэтому необходимо создание портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота с расщепленным лучом для оценки запасов водных биоресурсов, позволяющего осуществлять одновременное обнаружение и подсчет рыб размером не менее 10 см в условиях мелководья (на глубинах от 1,5 до 50 м) при размещении аппаратуры на малых плавсредствах, включая небольшие катера и шлюпки.

Не менее актуальными являются задачи сопряженные с исследованием распределения и подсчета количества и размеров рыб, такие как (рис. 1):

определение мест рыбных концентраций на водоемах с целью повышения эффективности любительского и спортивного рыболовства, оценка рыбопродуктивности водоемов (рекреационное рыболовство);

автоматизированный контроль роста рыб в садках, их количества, размерного ряда и оптимизация процесса кормления рыб (совершенствование технологий индустриальной аквакультуры);

промышленное рыболовство во внутренних водоемах и в прибрежных морских зонах;

оценка распределения водных биоресурсов в районах буровых платформ, платформ добычи газа и нефти, коллекторах очистных сооружений и в других районах действия антропогенных факторов (экологический мониторинг потенциально опасных водных районов по состоянию водных биоресурсов);

изучение и количественная оценка водных биоресурсов (ВБР) промысловых акваторий (количественная оценка ВБР), а также оценка эффективности рыбозащитных устройств в зонах влияния электростанций на местный ихтиоценоз.

Согласно экспертной оценке количество организаций вовлеченных в решение перечисленных задач в России составляет порядка 750 (табл. 1).

При решении этих задач сегодня все чаще применяется недорогой портативный многоцелевой исследовательский эхолот EK-15 фирмы Simrad (Норвегия), который позиционируется производителем как многоцелевой исследовательский эхолот. Однако за счет того, что у него простая антенна - с нерасщепленным лучом (single-beam), то этот эхолот не позволяет полноценно решать обозначенные выше задачи, в частности задачу определения силы цели и далее размер рыбы. Недорогих и доступных для широкого круга потребителей отечественных и зарубежных гидроакустических средств, для эффективного решения указанных задач нет. Поэтому создание недорогого портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота с

расщепленным лучом, обладающего общепринятыми в мировом научном сообществе инструментарием количественной оценки биомассы – эхосчетом и эхоинтегрированием, является актуальной и инновационной разработкой, направленной на решение задач развития технологий аква и марикультуры, экологического мониторинга, рекреационного рыболовства, и находится в сфере государственных интересов.

Рис. 1. Задачи, решаемые портативным многоцелевым исследовательским однолучевым эхолотом.

Таблица 1. Оценка потенциальных потребителей многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота.

№	Категории потребителей	Задачи, решаемые с помощью МИЭЛ	Потенциальные потребители МИЭЛ	Кол-во, не менее
1	НИИ Росрыболовства, НИИ РАН и ГосНИОРХ	Исследования и количественная оценка запасов ВБР во внутренних водоемах и прибрежных зонах промышленного рыболовства	ФГБНУ: «ВНИРО», «АтлантНИРО», «ПИНРО», «КамчатНИРО», «КаспНИРХ», и др.	20
2	Владельцы малых рыболовных судов (количество судов)	Промышленное рыболовство во внутренних водоемах и в прибрежных морских зонах	В настоящее время неизвестны, оценка взята из численности малых РС в РФ	100
3	Предприятия, занимающиеся искусственным выращиванием рыбы.	Индустриальное производство рыбы в садках (индустриальная аквакультура)	Рынок не сформирован	300
		Пастбищная аквакультура в открытых водоемах. Рекреационное рыболовство.	Рынок не сформирован	300
4	Государственные, общественные и другие организации, осуществляющие экологичес-кий мониторинг водных ресурсов	Экологический мониторинг техногенно опасных для водных биоресурсов акваторий. Работы аналогичны п.1, различаются только конечные цели.	Рынок не сформирован	30

Для решения поставленной задачи специалистами ООО «Конструкторское бюро морской электроники «Вектор» (ООО «КБМЭ «Вектор», г. Таганрог) было разработано техническое задание на выполнение опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота с расщепленным лучом и согласовано с одним из потенциальных потребителей – ФГУП «Всероссийским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии» (ФГБНУ «ВНИРО», г. Москва). Государственным заказчиком работы выступил Департамент судостроительной промышленности и морской техники Министерства промышленности и торговли Российской федерации, выставивший работу на открытый конкурс по государственной программе «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013-2030 годы». Актуальность работы была также отмечена Федеральным агентством по рыболовству и департаментом охраны и ис-

пользования объектов животного мира и водных биологических ресурсов Ростовской области. Победителем в конкурсе стало малое предприятие ООО «КБМЭ «Вектор», участвовавшее ранее в рамках ФЦП «РГМТ на 2009-2016гг» в разработке научного портативного многолучевого гидролокатора секторного обзора для подсчета рыб в ограждённых районах прибрежных морских зон рыболовства и во внутренних водоемах [2].

Целями ОКР «Разработка и изготовление импортозамещающего портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота с расщепленным лучом», шифр «МИЭЛ», являются:

– разработка, изготовление и проведение испытаний портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота с расщепленным лучом (МИЭЛ) в натурных условиях;

– выполнение работ по Подпрограмме 1 «Развитие судостроительной науки» Государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013-2030 годы» технологическому направлению №5 «Технологии создания морского радиоэлектронного оборудования и систем управления («Судовое приборостроение»)».

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие основные задачи:

– провести патентные исследования для обеспечения мирового уровня разработки отечественного импортозамещающего портативного многоцелевого исследовательского однолучевого эхолота с расщепленным лучом;

– разработать технико-экономического обоснования создания МИЭЛ;

– разработать технический проект МИЭЛ;

– разработать рабочую конструкторскую и программную документацию опытного образца МИЭЛ, ориентированной на возможность производства научных эхолотов на российских предприятиях;

– изготовить опытный образец МИЭЛ;

– разработать программу и методику испытаний опытного образца МИЭЛ;

– подготовить и провести предварительные испытания опытного образца МИЭЛ;

– провести корректировку конструкторской документации по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца с присвоением литеры «О»;

– подготовить и провести испытания опытного образца МИЭЛ в натурных условиях;

– провести корректировку конструкторской документации по результатам приемочных испытаний с присвоениеv документации литеры «$О_1$»;

– разработать эксплуатационную документацию опытного образца МИЭЛ;

– разработать проект технических условий МИЭЛ.

Разрабатываемый портативный многоцелевой исследовательский однолучевой эхолот с расщепленным лучом не уступает по своим тактико-техническим характеристикам зарубежной аппаратуре подобного класса, а по некоторым и превосходит (табл. 2, здесь приведено сравнение ТТХ МИЭЛ с наиболее используемыми на сегодняшний день в научном сообществе эхолотами фирмы Simrad – EK15 и EY60).

В соответствии с утвержденными в государственном контракте сроками (табл. 3), на декабрь 2017 года, выполнены патентные исследования, технико-экономическое обоснование, разработан комплект документации технического проекта, выполнен обзор информации по размерно-видовому составу внутренних водоёмов и анализ проектов научно-исследовательских судов и маломерных плавсредств для размещения МИЭЛ. Разработан макет многоцелевого исследовательского эхолота МИЭЛ (рис. 2). Ведётся разработка опытного образца многоцелевого исследовательского эхолота МИЭЛ, алгоритмов и ПО первичной и вторичной обработки гидроакустических сигналов, а также разработка комплекта рабочей конструкторской и программной документации.

В конце ОКР предусмотрена передача шести опытных образцов МИЭЛ в опытную эксплуатацию. С этой целью были заключены предварительные соглашения об опытной эксплуатации (на 2 года) со следующими организациями:

– ФГБНУ «Всероссийский НИИ рыбного хозяйства и океанографии» (Росрыболовство);

– ФГБНУ «Каспийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства» (Росрыболовство);

– ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова» (РАН);

- ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина» (РАН);
- Южный Научный Центр РАН;
- ФГБОУ ВПО «Дагестанский Государственный университет» (Минобрнауки России).

Таблица 2. Сравнение тактико-технических характеристик (ТТХ) МИЭЛ с портативными зарубежными аналогами.

№	ТТХ	Simrad EK15	Simrad EY60	МИЭЛ
1.	Тип системы	Многоцелевой исследовательский эхолот	Научный эхолот	Многоцелевой исследовательский эхолот
2.	Рабочая частота	200 кГц	120 кГц (ES120-7C)	200 кГц
3.	Тип луча	Single beam (максимальный метод пеленгования)	Split beam (максимальный + фазовый методы пеленгования)	Split beam (максимальный + фазовый методы пеленгования)
4.	Ширина ХН	28 °	7 °	20 °
5.	Длительность зондирующих сигналов	от 80 до 1240 мкс	от 64 до 8192 мкс	от 32 до 1024 мкс
7.	Диапазон дальности	200 м	440 м	не менее 200 м
8.	Эхосчет	да	да	да
9.	Эхоинтегрирование	да	да	да
10.	Количество преобразователей в комплексе	до 15 шт.	до 4 шт.	до 15 шт.
11.	Определение размерного ряда	нет	да	да
12.	Стоимость серийного изделия	~500 тыс. руб. (в зависимости от курса рубль/доллар)	~4 млн. руб. (в зависимости от курса рубль/доллар)	не более 800 тыс. руб.

Таблица 3. Основные этапы и сроки выполнения ОКР «МИЭЛ».

Номер этапа	Наименование этапа	Сроки выполнения
1	Разработка технического проекта и рабочей конструкторской документации	С даты заключения государственного контракта – 10 декабря 2017 г.
2	Изготовление опытного образца.	11 декабря 2017 г. – июнь 2018 г.
3	Испытания и корректировка документации опытного образца.	июль 2018 г. – 30 ноября 2018 г.

Рис. 2. Макет многоцелевого исследовательского эхолота МИЭЛ.

Литература

1. Федеральный закон от 2 июля 2013 г. № 148-ФЗ «Об аквакультуре (рыбоводстве) и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Долгов А.Н., Третьяков С.В., Раскита М.А., Куценко А.Н., Гончаров С.М. Разработка и испытания портативного гидролокатора секторного обзора // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования / ОАО ЦНИИ «Курс», 2015. № 4. С. 125 – 134.

ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ЛЕДОВОГО КЛАССА

В.М.Агафонов, канд.физ-мат.наук, А.Н.Антонов, канд.физ-мат.наук, П.Д.Груздев[1], Д.А.Зайцев, Д.А.Преснов[2], канд.физ-мат.наук, А.Л.Собисевич[2], Л.Е.Собисевич[2], д-р техн.наук
Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия
[1]АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

ICE-CLASS GEO-HYDROACOUSTIC MEASURING BUOYS

V.M.Agafonov, Ph.D., A.N.Antonov, Ph.D., P.D.Gruzdev[1], D.A.Zaitcev, D.A.Presnov[2], Ph.D., A.L.Sobisevich[2], L.E.Sobisevich[2], Dr.Sc.
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia
[1]JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Peterburg, Russia
[2]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia

Представлены результаты разработки, создания опытных образцов и натурных испытаний геогидроакустических измерительных буев нового поколения. Они предназначены для использования как самостоятельно, при проведении акустических, гидроакустических и геоакустических измерений в море, или на суше, так и в составе распределенных антенных систем ледового класса, предназначенных для мониторинга покрытых дрейфующими льдами морских акваторий Арктики. Геогидроакустический ледовый буй представляет законченный информационно-измерительный автономный прибор, в составе которого предусмотрено применение как сменных приемных модулей – векторных гидроакустических и широкополосных молекулярно-электронных приемников нового поколения, так и авторских средств оцифровки геогидроакустической информации, записи во внутреннюю память и последующей оперативной передачи получаемых научных данных. Результаты лабораторно-стендовых испытаний показали высокие технические возможности разработанных геогидроакустических буев нового поколения.

Results of development, creation of prototypes and full-scale tests of geo-hydroacoustic measuring buoys of the new generation are presented. They are designed to be used independently for acoustic, hydroacoustic and geoacoustic measurements in the sea or on land, as well as a part of distributed ice-class antenna systems intended for monitoring of the Arctic waters covered with drifting ice. The geo-hydroacoustic ice buoy is a complete information and measuring stand-alone device, which includes the use of removable receiving modules - vector hydroacoustic and broadband molecular-electronic receivers of a new generation, as well as original tools for digitizing geo-hydro-acoustic information, recording in internal memory and subsequent operational transmission of obtained scientific data. The results of laboratory-bench tests showed high technical capabilities of the newly developed geo-hydroacoustic buoys.

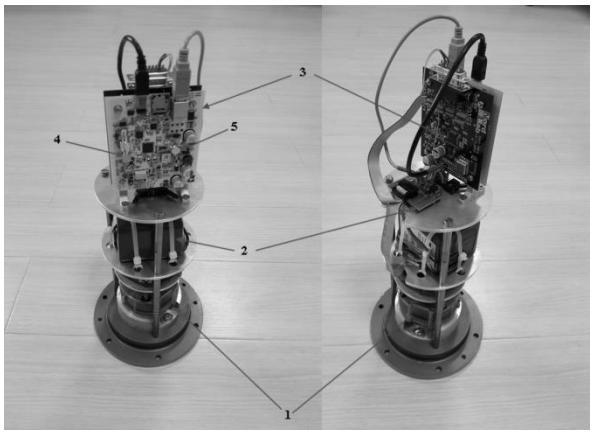
Задача освоения Арктики является сегодня одной из приоритетных для развития Российской Федерации и ставит перед нашими учёными ряд интереснейших проблем. Последние достижения в этой области [1] позволяют одновременно изучать характеристики морского дна, водного слоя и ледового покрова путём измерения полного геогидроакустического поля при помощи сейсмических и векторных гидроакустических приёмников [2]. Развитие предложенной технологии потребовало разработки нового измерительного прибора – вмораживаемого геогидроакустического буя, который позволяет вести измерения одновременно и на льду и в водной среде. При этом основное внимание уделялось построению нового поколения воспринимающих элементов для широкополосных геогидроакустических буев ледового класса.

Принципы работы и устройство геогидроакустического измерительного модуля. Геогидроакустический измерительный модуль предназначен для осуществления автономной регистрации сейсмогидроакустических сигналов в слоистых средах типа «морское дно - водный слой - ледовый покров» в течение нескольких недель, когда производится накопление и передача данных по проводному или беспроводному интерфейсу. При этом обеспечивается удаленный контроль надлежащей работы автономного модуля, который используется самостоятельно или в составе единой телесейсмической информационно-измерительной антенной системы ледового класса. В состав устройства функционально входит три основных блока, рис.1а, аналоговый однокомпонентный молекулярно-электронный измеритель типа СМЕ-4211V (1), источник тока, обеспечивающий работу всех узлов системы (2), регистратор сейсмогидроакустических сигналов типа NDAS-8224 (3).

Аналоговый сейсмогидроакустический датчик (1) работает на принципах молекулярно-электронного переноса [3, 4]. Внешние возмущения вызывают перетекание рабочей жидкости датчика через электрохимическую ячейку. Возникновение конвективного потока в преобразователе меняет установившийся в системе характер распределения концентрации основных носителей заряда, что и вызывает вариации катодного тока, эквивалентные внешнему возмущающему сигналу. Проведенные испытания показали, что сейсмогидроакустические датчики, построенные по технологии МЭП, являются чрезвычайно надежными приборами, они не требуют

специальных методик при транспортировке и установке, не требуют обслуживания, арретирования и центрирования массы и хорошо подходят для полевых измерений, а также быстрого развертывания измерительных сетей в море и на суше [4]. Технические параметры типового сейсмогидроакустического датчика представлены в Таблице 1.

Источник питания построен на основе использования цилиндрических литий-ионовых элементов питания. Общий размер аккумулятора, упакованного в единый корпус, составляет 51x56x77 mm, а общая емкость батареи при комнатной температуре ~7000 mAh. Номинальное напряжение, выдаваемое батареей, 9–12,6 В. Поскольку цифровой блок (3) и аналоговый молекулярно-электронный измеритель (1) имеют разные напряжения питания (+5 и +12 В, соответственно), предусмотрена специальная плата согласования, преобразующая напряжение батареи в +5 В, питающих цифровой регистратор.

а 

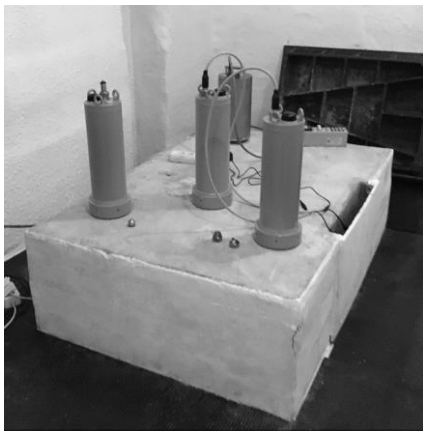
б 

Рис. 1. а) Устройство геогидроакустического модуля. 1 – аналоговый молекулярно-электронный вертикальный сейсмический датчик, 2 – литий-ионовая батарея емкостью 7000 миллиампер-часов с платой согласования, 3 – 24 разрядный регистратор сейсмических сигналов, 4 – разъем подключения внешней антенны Wi-Fi, 5 – разъем подключения внешней антенны GPS; б) Геогидроакустических буи, установленные на калибровочном постаменте в помещении подземной обсерватории Сейсмической службы РАН (г. Обнинск 30.08.2017).

Таблица 1. Параметры молекулярно-электронного датчика.

Полоса частот	0.033 (30 сек) - 50 Гц
Коэфф. преобразования	2000 В/(м/с) - дифф. выход
Макс. регистрируемый сигнал	± 5,0 мм/с
Интегральный шум в полосе 0.033 - 50 Гц	76 нм/сек
Питание / потребление сейсмометра	10.5-30 В DC / 12 мА (стандартная)
Температурный диапазон работы	(-40 +55 °C)
Допустимый угол установки	± 15 °
Вес	0.4 кг

Регистратор (3) предназначен для использования в составе автономных систем сбора данных с батарейным питанием. Он основан на аналого-цифровом преобразователе типа сигма-дельта с 22 эффективными разрядами. Частота оцифровки выбирается из диапазона: 1, 10, 50, 100, 250, 500, 1000 Гц. Применяемый модуль отличается малым энергопотреблением - менее 300 мВт в процессе регистрации, что позволяет при заданных габаритах устройства существенно увеличить время автономной работы. Для передачи данных и конфигурирования системы используются проводное USB или беспроводное Wi-Fi соединение, разъем (4) на рис. 1а, а 32 Гб внутренней памяти позволяют вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. В регистраторе имеются цепи для подачи тестовых сигналов на сейсмические датчики, а также питание ±2,5 В. Интегрированный модуль GPS позволяет синхронизировать сейсмические события с точным мировым временем, автономно запускать и останавливать запись по

заданному расписанию, идентифицировать пространственную точку расположения измерительного модуля на земной поверхности для индивидуализации модулей в телесейсмической сети. Геогидроакустический измерительный модуль помещен в прочный пылевлагозащищённый корпус со степенью защиты не ниже IP 68.

Лабораторно-стендовые испытания геогидроакустического измерительного модуля. Сверка трех образцов геогидроакустических буев ледового класса выполнялась на постаменте Геофизической службы РАН в г. Обнинск с 30.08.2017 по 08.09.2017. В качестве эталонного прибора использовался велосиметр Streckeisen STS-1V/VBB, который является чувствительным элементом постоянно действующей сейсмической станции Обнинск (OBN), кроме того были проанализированы данные с велосиметра Guralp CMG-3ESP. На рис. 2 представлено сопоставление частотных характеристик, заявленных изготовителями, с частотными характеристиками геогидроакустического буя с установленным датчиком СМЕ.

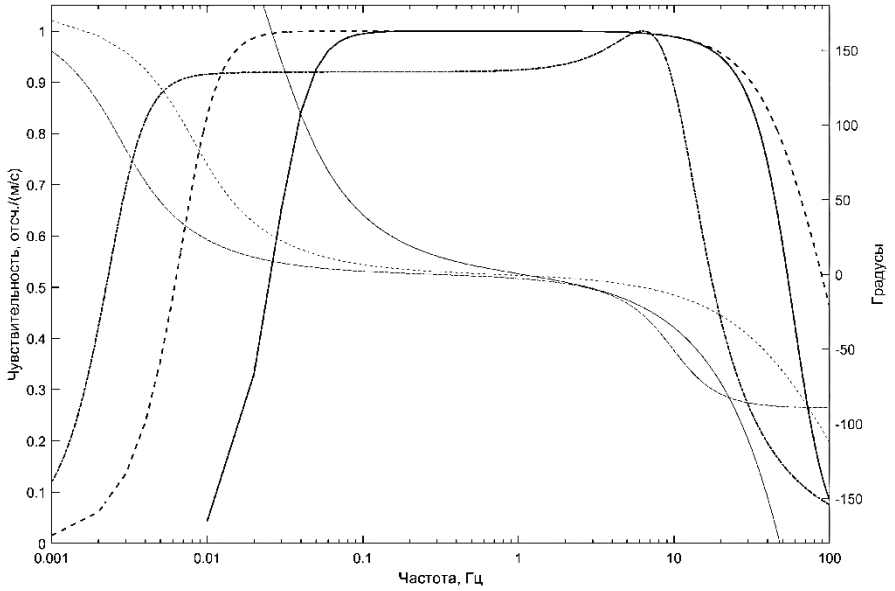


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика – темные цвета; фазо-частотная характеристика – светлые цвета. Сплошная линия – СМЕ; пунктирная линия – Guralp; штрих-пунктирная линия – Streckeisen.

Велосиметры Streckeisen и Guralp имеют приемлемую чувствительность вплоть до периодов 250 и 100 секунд соответственно, имеющиеся данные ограничены частотой Найквиста сверху - 10 и 20 Гц. В настоящей работе рассматривается частотный диапазон 0,03-10 Гц. Сейсмостанции расположены в месте, защищенном от посторонних шумов лесополосой. Сам геофизический постамент находится на глубине ~20 м, температура в помещении измерительной камеры~12°С (рис. 1б).

Наиболее интересное событие, произошедшее в мире за время измерений — это землетрясение магнитудой 8,1, произошедшее в Мексике 08.09.2017 в 04:49 по всемирному времени. На рис. 3 представлена синхронная (по макс. знач.) запись этого события всеми тремя приемниками, отфильтрованная в частотном диапазоне 0,03-10 Гц, с учетом представленной на рис. 1 частотной характеристики прибора СМЕ. Записи других приборов не калибровались, так как их АЧХ и ФЧХ можно считать линейными в указанной полосе частот. Обращает на себя внимание более низкая по сравнению с эталонными приборами чувствительность СМЕ на периодах больше 20 секунд. Этот недостаток может быть исправлен применением другого калибровочного коэффициента, что сделает записи абсолютно идентичными. Необходимо также отметить, что запись Guralp’а оказалась зашкалена на периодах выше 20 с.

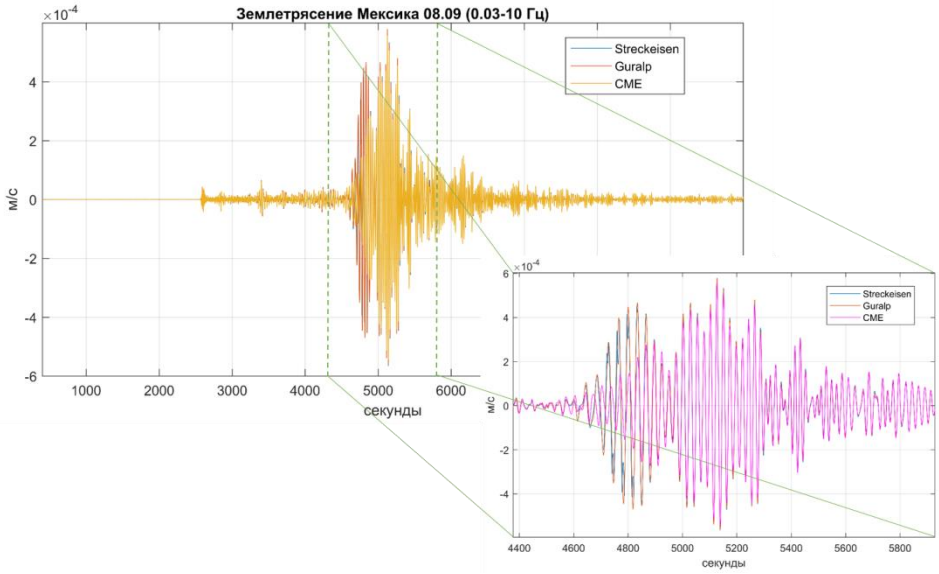


Рис. 3. Запись землетрясения, произошедшего 08.09.2017 в Мексике.

Результаты испытаний наглядно демонстрируют, что применяемый в геогидроакустическом буе чувствительный элемент нового поколения, по точности и надежности не уступает мировым приборам аналогичного назначения. Сегодня молекулярно-электронные преобразователи начинают применяться в сейсморазведке на суше [5], под водой [6], а также в научно-исследовательских работах по изучению структуры геогидроакустических полей в слоистых средах. Отметим, что они прошли первые успешные испытания в ледовых условиях, приближенных к условиям арктических полей [7].

Таким образом, учитывая изложенное, можно утверждать, что авторским коллективом создан не имеющий пока мировых аналогов автономный информационно-измерительный модуль, который, являясь универсальным сейсмогидроакустическим измерителем, найдет широкое применение как на суше, так и в море, в том числе и при наличии сплошного ледового покрова.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке: Российского Фонда Фундаментальных Исследований гранты №№ 16-29-02046, 17-47-500074 и Гранта Президента Российской федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

Литература

1. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С., Лиходеев Д.В., Агафонов В.М. Геогидроакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96, № 3. С. 31-46.
2. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И., Илюшин Я.А. Особенности формирования векторно-фазовой структуры шумовых полей океана // Акустический журнал. 1993 Т. 39, № 3. С. 455-466.
3. Agafonov V.M., Neeshpapa A.V., Shabalina A.S. Electrochemical Seismometers of Linear and Angular Motion. Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. С. 1-19.
4. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 1. С. 5-18.
5. Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 3. С. 5-19.
6. Антонов А.Н., Авдюхина С.Ю., Егоров И.В., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Шабалина А.С. Широкополосная сейсмическая станция для сейсморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии- 2017». 2017. С. 64-67.
7. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2017 Т. 81, № 1. С. 76-80.

ОЦЕНКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ НОСИТЕЛЯ ПОДВОДНОЙ АППАРАТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

П.Л.Гапоненко, В.О.Орлов, Г.В.Теверовский, канд.техн.наук, С.Г.Цыганков, д-р техн.наук,
В.П.Щеголихин[1], д-р техн.наук
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия
[1]НИИ К и В ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург, Россия

ASSESSMENT OF INSTRUMENTAL ERROR OF THE CARRIER OF UNDERWATER EQUIPMENT OF MEASURING SONAR SUITE OF NEW GENERATION

P.L.Gaponenko, V.O.Orlov, G.V.Teverovsky, Ph.D., S.G.Tsygankov, Dr.Sc., V.P.Shchegolikhin[1], Dr.Sc.
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia
[1]Research Institute of Shipbuilding and Armament of Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russia

Рассмотрена конструкция и исследованы метрологические характеристики носителя подводной аппаратуры измерительного гидроакустического комплекса нового поколения со значительно меньшими значениями инструментальной погрешности, чем у аналогичной аппаратуры.

The design is considered and metrological characteristics of the carrier of underwater equipment of measuring sonar suite of new generation with considerably smaller values of instrumental error, than of similar equipment are investigated.

Для минимизации погрешности измерений значений уровней звукового давления в морской среде был создан носитель подводной аппаратуры (НПА) измерительного гидроакустического комплекса нового поколения [1]. В области гидроакустических измерений снижение инструментальной погрешности измерительных комплексов представляет собой сложную научно-техническую и инженерную задачу. Чувствительный элемент – гидрофон – необходимо располагать в водной среде, таким образом, чтобы обеспечивалась стабильность его пространственной ориентации и местоположения. Для этого гидрофон необходимо помещать в некоторый носитель, удерживающий его в пространстве, а также содержащий необходимую аппаратуру для передачи питания и сигнальной информации по кабельным линиям связи. Взаимодействие конструктивных элементов носителя гидрофона с падающим на него измеряемым акустическим сигналом может приводить к значительным искажениям, то есть вызывать заметные погрешности измеряемых параметров гидроакустического поля.

Описание конструкции корпуса НПА. Корпус НПА (рисунок 1) располагается стационарно на акватории морского гидроакустического полигона и представляет хорошо обтекаемое тело с хвостовым стабилизатором, имеет незначительную положительную плавучесть. Обтекатель НПА изготовлен из полиэтилена высокого давления с плотностью практически равной плотности воды. В оконечностях НПА установлены плавучести. Центры плавучестей спроектированы так, что в воде они расположены выше центра масс НПА. Плавучести имеют скосы в направлении к нижней части НПА, что обеспечивает переотражение падающих акустических сигналов в сторону от измерительного гидрофона. Удержание НПА в водной среде осуществляется за узду, к которой крепится кабель. Узда крепится к корпусу НПА при помощи втулок, обеспечивающих ее свободное вращение. Точки установки креплений узды в корпусе находятся на линии, проходящей через центр масс НПА, заполненного водой. Центр симметрии двух точек крепления узды расположен на одной вертикали с центром плавучести и центром масс НПА, таким образом, что центр плавучести находится выше, а центр масс ниже центра симметрии. Благодаря данному конструктивному решению, НПА при воздействии подводных течений смещается, сохраняя горизонтальное положение без крена и дифферента и, таким образом, обеспечивается стабильность горизонтального положения НПА в воде. Это объясняется тем, что под воздействием возможных подводных течений различной скорости, узда свободно вращается в точках крепления и изменяется угол между уздой и отдифферентованным корпусом НПА, который остается в строго горизонтальном положении.

Устойчивость НПА к низкочастотным вибрациям обеспечивается механическим фильтром в виде большого объёма корпуса НПА, заполненного водой, и, как следствие, его большой инерционной массой. Поскольку НПА находится в воде, то при смещениях корпуса его инерционная масса еще возрастает за счет присоединённой массы воды. При смещениях носителя присоединенная масса воды увеличивает его инерционность, что обеспечивает полное подавление во входном канале гидрофона шумов неакустического характера в рабочем диапазоне частот, которые обусловлены воздействием на кабель и корпус НПА возможных подводных течений.

Таким образом, конструкция корпуса НПА обеспечивает горизонтальное положение гидрофона в воде, защищает его от вибрационных и гидродинамических шумов подвески во всем рабочем диапазоне частот.

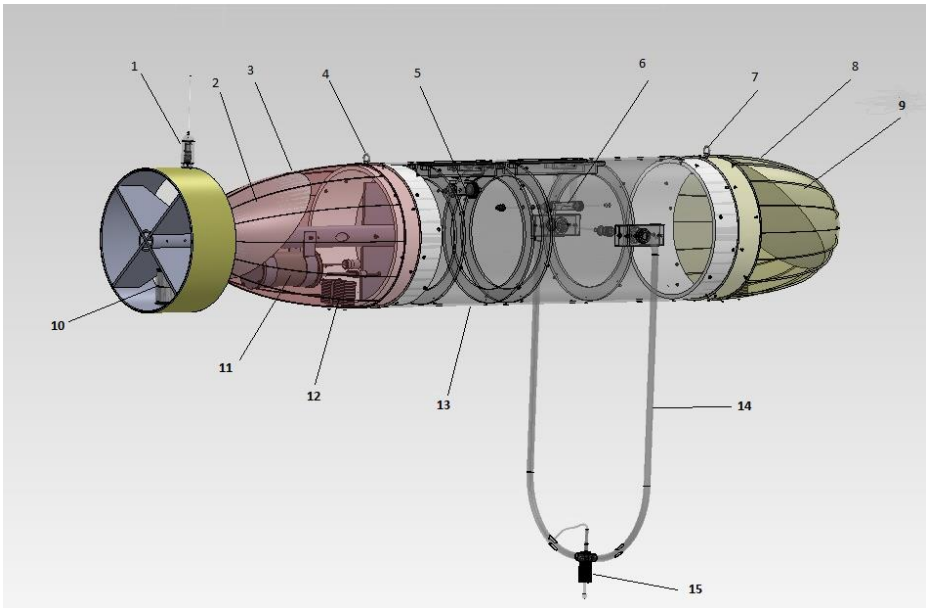


Рис. 1. Носитель подводной аппаратуры:
1 – свето-радиомаяк, 2 – кормовая плавучесть, 3 – кормовой обтекатель, 4 – рым гайка, 5 – датчик давления, 6 – предварительный усилитель с гидрофоном ГГ26, 7 – носовая рым гайка, 8 – носовой обтекатель, 9 – носовая плавучесть, 10 – излучатель, маяк наведения, 11 – контейнер ПУ, 12 – кормовой груз, 13 – корпус ПУ, 14 –дуга, 15 –входной разъём ПУ.

Погрешность, вызванная влиянием корпуса НПА. Поскольку гидрофон размещен внутри полиэтиленового корпуса, имеющего плотность близкую к плотности воды, но несколько отличающуюся от нее, было оценено влияние корпуса НПА на метрологические характеристики помещённого в него гидрофона. Для этого была поставлена и решена задача о дифракции плоской волны на тонкостенном цилиндре, заполненном водой. Была также проведена оценка погрешности измерений уровней звукового давления, возникающая из-за вязкого затухания акустического сигнала в полиэтилене высокого давления. Показано, что погрешность измерений, возникающая за счёт некоторого рассогласования акустических импедансов воды и полиэтилена, не превышает значения 0.2 дБ. Данная величина является частотно независимой в исследуемом диапазоне, так как параметры плотности и скорости звука в воде и полиэтилене в этом диапазоне не зависят от частоты и угла падения звуковой волны в пределах измерительной зоны.

Также была рассмотрена и решена задача оценки фильтрующих свойств оболочки, заполненной водой, по отношению к шумам неакустического происхождения, таких как шумы обтекания, то есть рассмотрены свойства полиэтиленового корпуса как эффективного фильтра шумов неакустической природы. При проведении исследований было теоретически показано, что конструкция корпуса НПА обеспечивает заданное положение гидрофона в воде, защищает его от вибрационных и гидродинамических шумов подвески, и практически не оказывает влияния на акустические шумы верхнего полупространства.

Погрешность, вызванная неравномерностью характеристики направленности гидроакустической головки гидрофона. Как было отмечено выше, конструкция корпуса НПА обеспечивает стабильное заданное положение гидрофона в воде. Поскольку измерение уровней подводного шума производится в вертикальной плоскости в районе траверза НПА, при этом гидрофон имеет стабильное заданное положение в пространстве, то наибольшее влияние на погрешность измерения оказывает неравномерность характеристики направленности головки в вертикальных плоскостях.

При гарантированно стабильном горизонтальном положении корпуса в воде, размещение рабочей зоны головки обеспечивается наиболее благоприятным образом, так что погрешность неравномерности диаграммы направленности в вертикальной плоскости:

не более 0.5 дБ на частотах инфразвукового и звукового диапазонов;
не более 1.0 дБ на частотах ультразвукового диапазона.

Погрешность, вызванная влиянием аппаратуры, размещенной внутри корпуса НПА. Внутри корпуса НПА, помимо гидрофона, размещен контейнер с аппаратурой, необходимый для обеспечения функционирование НПА. Размещение контейнера внутри НПА выбрано таким образом, чтобы отраженные и дифрагированные на нем сигналы оказывали на гидрофон минимальное воздействие.

Контейнер НПА имеет цилиндрическую форму и расположен таким образом, что сигнал, отраженный от боковой поверхности цилиндра, рассеивается равномерно в стороны от гидрофона. Крышка цилиндрического контейнера расположена вертикально, таким образом сигнал, приходящий со стороны верхней полусферы, отражаясь от крышки не попадает на гидрофон. При этом на гидрофон может воздействовать сигнал, возникающий из-за дифракции гидроакустического поля на крышке контейнера НПА и торцевой поверхности датчика давления. Для оценки влияния на метрологические характеристики гидрофона была поставлена и решена задача о дифракции гидроакустического поля на крышке контейнера НПА и торцевой поверхности датчика давления (рисунок 2).

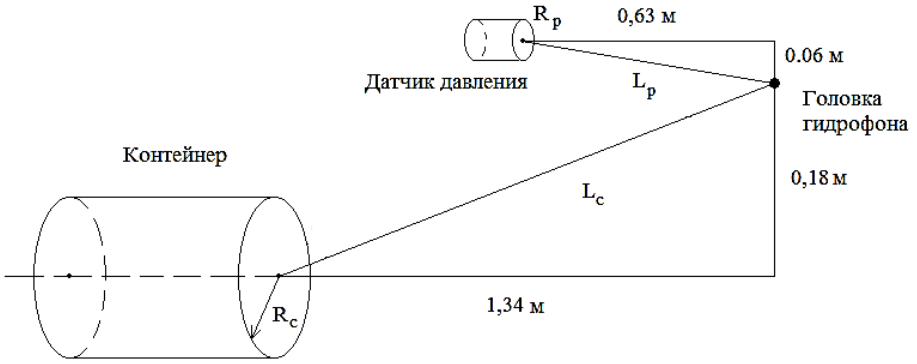


Рис. 2. Взаимное расположение гидрофона, контейнера с аппаратурой и датчика давления.

Строгая теория дифракции основывается на применении принципа Гюйгенса-Гельмгольца [2], согласно которому значение полного акустического поля в некоторой точке P определяется по значениям этого поля и его нормальной производной на некоторой вспомогательной замкнутой поверхности, охватывающей эту точку:

$$\varphi(P) = -\frac{1}{4\pi}\oint_S \left[\varphi(Q)\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{e^{ikrPQ}}{r_{PQ}}\right) - \frac{\partial\varphi}{\partial n}(Q)\frac{e^{ikrPQ}}{r_{PQ}} \right] dS_Q \qquad (1)$$

где $\varphi = \varphi_p + \varphi_d$ – полный акустический потенциал, который складывается из потенциала φ_p падающей плоской волны и потенциала φ_d дифрагированного поля; $\partial/\partial n$ обозначает производную вдоль внутренней нормали к поверхности; Q – точка на поверхности S; r_{PQ} – расстояние от точки Q до точки P.

При этом в области, ограниченной поверхностью, нет источников поля и объектов, на которых может происходить его рассеяние.

Разделение поля на падающую и дифрагированную части преобразует (1) в интегральное уравнение относительно дифрагированного поля, которое с использованием граничных условий на рассевающих объектах, условия Мейкснера на множестве (множествах) нарушения гладкости рассеивающих поверхностей и условия излучения формирует строгую задачу дифракции, разрешимую в исключительно редких случаях. По этой причине для оценки погрешности, вызванной именно дифракцией измерительных данных на гидрофоне, используется эвристический метод Кирхгофа.

С использованием данного подхода были выполнены расчеты значений погрешности, вызванной влиянием дифракции гидроакустического поля на торцевой поверхности датчика давления и крышке контейнера НПА, для следующих отклонений направления на источник сигна-

ла относительно вертикали НПА – 5^0, 10^0, 15^0, 20^0. Наибольшее значение погрешности, вызванной влиянием дифракции гидроакустического поля на датчике давления и контейнере НПА, соответствует углу падения звука на торец датчика давления и контейнера НПА 20^0 относительно вертикальной и не превышает 0.2 дБ (рисунок 3).

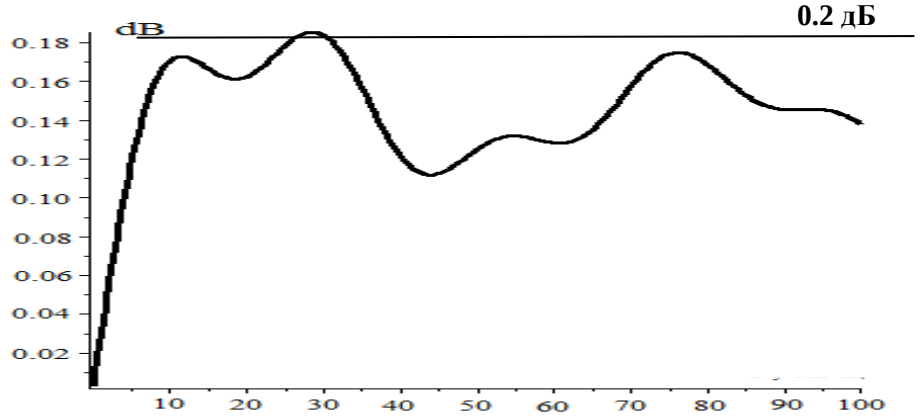


Рис. 3. Погрешность, вызванная влиянием дифракции гидроакустического поля на датчике давления и контейнере НПА.

Выводы. В результате выполненных исследований были определены основные составляющие инструментальной погрешности измерения уровней звукового давления в воде НПА и определены их максимальные значения.

Значения максимальной инструментальной погрешности измерений звукового давления в воде НПА составляют:

0.5 дБ в инфразвуковом и звуковом диапазонах частот;

1.0 дБ в ультразвуковом диапазоне частот.

Таким образом, инструментальная погрешность измерений звукового давления в воде НПА главным образом зависит от характеристик погрешности гидроакустической головки гидрофона. Для дальнейшего снижения погрешности и расширения функциональных возможностей измерительной гидроакустической аппаратуры необходима разработка гидрофона, обладающего более равномерной характеристикой направленности.

Литература

1. Цыганков С. Г., Ильин С. А. Изобретение «Носитель аппаратуры измерительного гидроакустического комплекса». Патент № 2639846 РФ, Зарегистрирован 22.12.2017 г., Бюл. № 36.
2. Х. Хёнл, А. Мауэ, К. Вестпфаль. Теория дифракции. М.: Мир, 1964.

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ БЕССТРОБОВОГО СПОСОБА ДЛЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

А.А.Светличная, канд.техн.наук
НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Россия

THE STYDY OF NON-STROBE METHOD FOR MULTI-TARGET AUTOMATIC TRACKING

A.A.Svetlichnaya, Ph.D.
Naval Research Center of Electronics, St. Petersburg, Russia

Выполнен анализ применимости предлагаемого бесстробового способа для многоцелевого автоматического сопровождения в условиях воздействия интенсивных помех. По результатам имитационного моделирования показано, что применение данного способа позволяет повысить надежность автоматического сопровождения близкорасположенных целей.

The analysis of applicability of the suggested non-strobe method for multi-target automatic tracking in the conditions of influence of intensive noise is carried out. By means of imitating modeling it is shown that application of this method allows to increase reliability of multi-target automatic tracking.

В реальных условиях работы ГАС воздействие интенсивных помех приводит к пропаданию отметок сопровождаемых целей и появлению ложных отметок, что существенно снижает надежность многоцелевого автоматического сопровождения.

Целью данного доклада является анализ применимости предлагаемого бесстробового способа для автоматического сопровождения близкорасположенных целей в условиях воздействия интенсивных помех.

Наличие нескольких близкорасположенных целей в зоне ответственности ГАС может привести к пересечениям их траекторий при автоматическом сопровождении, в результате чего возможно снижение точностей оценки траекторных параметров и срыв автоматического сопровождения. Пропадание отметок сопровождаемых целей, как и присутствие ложных отметок существенно усложняют процесс многоцелевого автоматического сопровождения.

Предлагаемый бесстробовый способ автоматического многоцелевого сопровождения, основан на последовательном критерии принятия решения [1, 2].

Согласно данному способу, каждой j-ой сопровождаемой траектории сопоставляют условный вес W_{ij} $(i-\text{цикл обработки})$, представляющий собой накапливаемый от цикла к циклу логарифм отношения правдоподобия, который сравнивают с двумя порогами H_1 и H_2, определяемыми заданными вероятностями правильного $P_{\text{обн}}$ и ложного $F_{\text{лт}}$ обнаружения траектории:

$$H_1 = \lg\left(\frac{P_{\text{обн}}}{F_{\text{лт}}}\right) - \lg\left(\frac{1-P_{\text{обн}}}{1-F_{\text{лт}}}\right), \quad (1)$$

$$H_2 = 0. \quad (2)$$

Условный вес W_{ij} определяется следующим рекуррентным выражением:

$$W_{ij} = W_{\text{i}j-1} + X_{ij}dw_{+ij} + \left(1 - X_{ij}\right)dw_{-}, \quad (3)$$

где X_{ij}=1 - в случае обнаружения отметки цели, X_{ij} =0 - если отметка не была обнаружена,

$$dw_{-} = \lg(1 - p_c), \quad (4)$$

p_c - вероятность обнаружения отметки цели,

$$dw_{+ij} = G_{ij} lg \frac{1-(1-p_n)(1-p_c)}{p_n}, \quad (5)$$

$$G_{ij} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{z_{ij}} e^{-\frac{t^2}{2}}dt, \quad (6)$$

$$z_{ij} = \frac{|x_{ij} - Xe_{ij}|}{\sqrt{2\sigma_c}}, \quad (7)$$

p_n- вероятность обнаружения ложной отметки; x_{ij} и Xe_{ij} - измеренное и экстраполируемое значения координаты цели в текущем i-ом цикле обработки для j-й траектории.

Отметка считается обнаруженной, если принимаемый сигнал превышает регулируемый порог обнаружения. В случае обнаружения любой отметки ее принадлежность конкретной сопровождаемой траектории определяется максимальным значением G_{ij}. Условный вес такой траектории увеличивают на величину положительного приращения dw_{+ij} и сравнивают с верхним порогом H_1. Если порог превышен, то траектория далее считается обнаруженной. После принятия решения об обнаружении траектории цели условный вес траектории далее не повы-

шают. Если верхний порог не превышен, траектория считается необнаруженной и ее данные хранят в памяти системы.

Для всех траекторий, находящихся на обнаружении или сопровождении, данные о которых хранят в памяти системы и к которым на текущем цикле обработки не были присоединены обнаруженные отметки, условный вес уменьшают на величину отрицательного приращения $dw_$, вычисляемого согласно выражению (4). Полученные таким образом значения условных весов сравнивают с нижним порогом H_2 и, если он не превышен, то принимают решение о прекращении автоматического сопровождения соответствующих траекторий.

Измеренные координаты каждой обнаруженной отметки подвергают процедуре сглаживания (оценке) с использованием, например, фильтра Калмана и экстраполяции в соответствии с выбранной моделью движения цели (линейной).

Согласно описанному способу была разработана имитационная модель системы бесстробового автоматического сопровождения двух близкорасположенных целей, движущихся по параллельным траекториям, расстояние между которыми равно $R12$.

В качестве показателей эффективности были рассмотрены усредненные относительные ошибки оценки (сглаживания) и экстраполяции по дальности ($\sigma' Ds_i$, $\sigma' De_i$), достижимые при автоматическом сопровождении первой траектории [4]:

$$\sigma Ds_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{M}(Ds_{ni}-Dист_i)^2}{(M-1)\sigma D^2}}, \qquad \sigma De_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{M}(De_{ni}-Dист_i)^2}{(M-1)\sigma D^2}}, \tag{8}$$

где n=1..M (M=100), n - номер испытания; Ds_{ni} - сглаженные, De_{ni} - экстраполируемые и $Dист_i$ - истинные значения дальности для i-го цикла обработки при n-м испытании; σD – СКО (измерительная ошибка)по дальности.

На рис.1-4 представлены рассчитанные по результатам имитационного моделирования зависимости указанных ошибок сглаживания σDs_i (сплошная линия) и экстраполяции $\sigma' De_i$(точки) по дальности от числа циклов обработки i. При расчетах полагали $P_{\text{обн}}$ =0.9, $F_{\text{лт}}$=10^6, p_c=1,0.9, $R12$=5σD. Рисунки слева (а) соответствуют известному последовательному способу сопровождения [1] , справа (б) – бесстробовому способу [2].

Результаты моделирования, представленные на рис.1,2, получены при сопровождении одной цели, на рис.3,4 – двух целей в отсутствие (рис.1-3) и при наличии ложных отметок (рис.4)

Как следует из результатов моделирования, при бесстробовом сопровождении даже одной цели точность сопровождения повышается. Так, если при последовательном сопровождении относительные ошибки сглаживания по дальности в нашем случае достигают 0.45 – 0.5σD, то при бесстробовом сопровождении – 0.4–0.45σD.

Снижение вероятности обнаружения отметок цели (p_c= 0.9) ведет к росту ошибок сопровождения (рис.1, 2). Заметим, что с увеличением расстояния между целями процесс автоматического сопровождения становится более устойчивым.

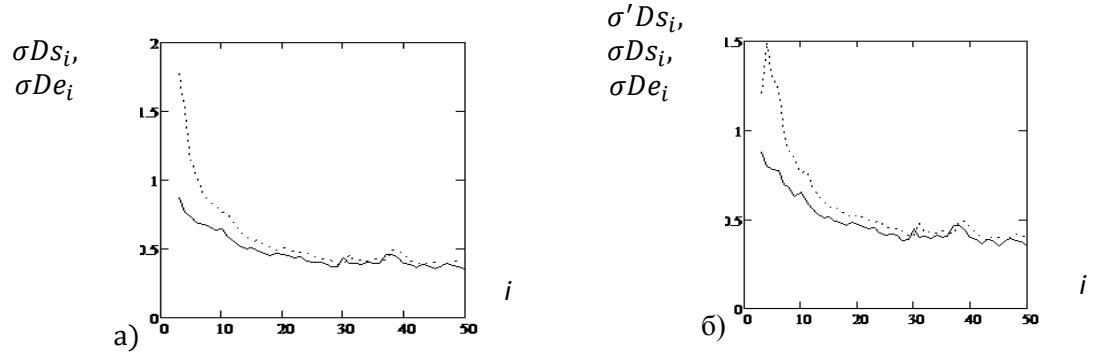


Рис. 1. Зависимости σDs_i и σDe_i от i при последовательном (а) и бесстробовом (б) сопровождении одной цели в отсутствие ложных отметок, p_c= 1.

Присутствие второй цели (рис.3) приводит к росту ошибок сопровождения, в нашем случае до 20% и более, особенно на начальном участке трассы при малом числе контактов с целью. При этом бесстробовый способ позволяет получить более устойчивое автоматическое сопровождение в том числе и на начальном участке трассы.

Присутствие ложных отметок, как следует из рис.4, может привести к существенному увеличению ошибок сопровождения. При последовательном способе процесс автоматического со-

провождения становится неустойчивым, в результате чего возможен срыв сопровождения (в нашем случае при *i*>34). При бесстробовом способе рост ошибок сопровождения незначителен (срыва сопровождения в нашем случае не наблюдается), что свидетельствует о более высокой помехозащищенности данного способа.

Таким образом, применение бесстробового способа повышает надежность процесса автоматического сопровождения подвижных целей и позволяет получить ошибки сглаживания, не превышающие измерительных ошибок даже на начальном участке траектории, а на участке устойчивого сопровождения ошибки сглаживания практически не превышают 0.4-0.5σD.

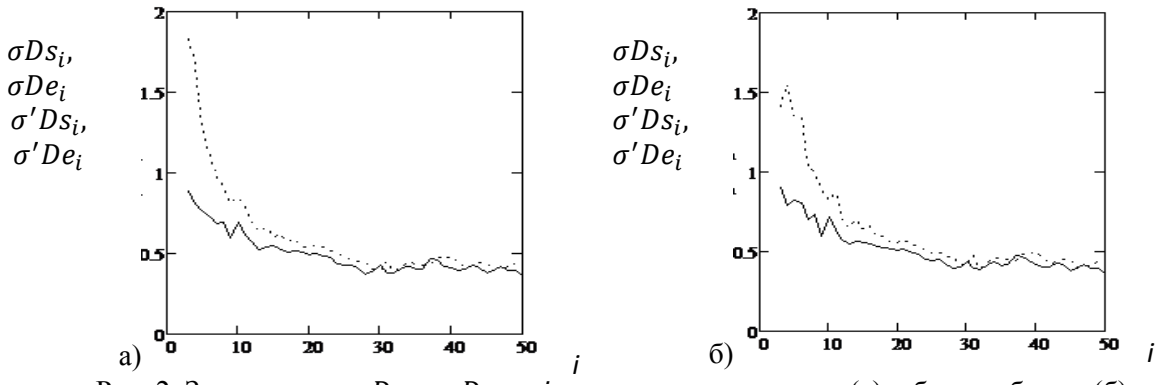


Рис. 2. Зависимости σDs_i и σDe_iот i при последовательном (а) и бесстробовом (б) сопровождении одной цели в отсутствие ложных отметок, p_c= 0.9.

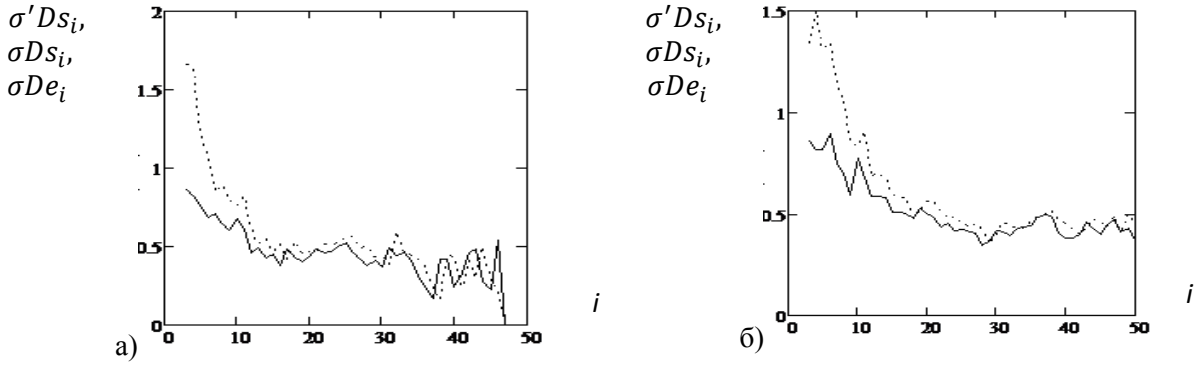


Рис. 3. Зависимости σDs_i и σDe_i от i при последовательном (а) и бесстробовом (б) сопровождении двух целей в отсутствие ложных отметок, p_c= 0.9.

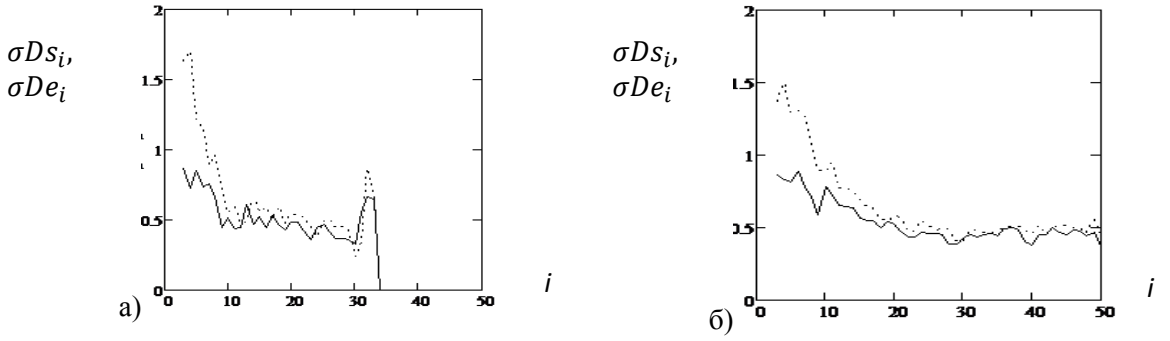


Рис. 4. Зависимости σDs_i и σDe_iот i при последовательном (а) и бесстробовом (б) сопровождении двух целей при наличии ложных отметок, p_c= 0.9.

Литература

1. Кузьмин С.З.. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. Радио, 1974, - 432с.
2. Светличная А.А., Яковлева З.В.. Способ бесстробового автоматического сопровождения подвижной цели. Патент №2551356 С1, G01S 7/41 от 21.04.2015.
3. Светличная А.А. Оценка эффективности многоцелевого автоматического сопровождения при использовании алгоритма последовательного анализа. Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Вып.12. СПб, 2017.
4. Светличная А.А. Исследование надежности многоцелевого автоматического сопровождения. Труды XIII Всероссийской конференции. Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. СПб, 2016. – 516 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ ГИДРОЛОКАЦИОННАЯ УСТАНОВКА С ЗОНДИРУЮЩИМИ СИГНАЛАМИ ТИПА ЧАСТОТНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В.Н.Трофимов
ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Россия

LABORATORY HYDROACOUSTIC DEVICE ARRANGEMENT WITH PROBING SIGNALS SUCH AS DISCRETE FREQUENCY SEQUENCES

V.N.Trofimov
Federal State Unitary Enterprise «State Research Institute of Aviation Systems», Moscow, Russia

В докладе представлена лабораторная гидролокационная установка, входящая в состав стенда масштабного физического гидроакустического моделирования радиолокационных станций, использующая зондирующие сигналы типа дискретных частотных последовательностей (ДЧП) с приемом эхо-сигналов в промежутках между излучаемыми импульсами. Рассматриваются характеристики и особенности использования ДЧП в радио и гидролокационных системах. Приведено описание гидролокационной установки, позволяющей в режиме синтезирования апертуры получать изображения объектов высокого разрешения. Представлены результаты моделирования - изображения объектов с высоким линейным разрешением.

The report presents laboratory hydroacoustic device, which is a part of facility for scaled physical hydroacoustic simulation of radar stations, using probing signals such as discrete frequency sequences (DFS) with the reception of echo signals in the intervals between the radiated pulses. The report discusses characteristics and use of DFS in radio and sonar systems. Description of the hydroacoustic device with synthetic aperture capable to obtain object images with high resolution is presented. The results of modeling are represented as images of objects with high linear resolution.

Лабораторная гидролокационная установка (ЛГУ) входит в состав стенда масштабного физического гидроакустического моделирования (МФГМ) радиолокационных (РЛ) систем.

Назначение и задачи МФГМ. МФГМ основано на подобии волновых процессов для электромагнитных и акустических сигналов. Стенд МФГМ может быть использован для оценки отражающих характеристик протяженных объектов РЛ наблюдения (самолетов, кораблей и т.п.), а также при разработке новых РЛ станций высокого и сверхвысокого разрешения, работающих в режимах синтезирования апертуры (СА). Эхо-сигналы, получаемые на стенде МФГМ, записываются в цифровом виде и далее используются для математического моделирования РЛ станций (РЛС) или в специальных цифровых имитаторах РЛ сигналов для полунатурного моделирования РЛС.

Исследования с использованием стендов МФГМ проводились в нашей стране и за рубежом, начиная приблизительно с 60-ти десятых лет прошлого века. Описания стендов МФГМ и результаты исследований приводятся в ряде работ (например, [1], [2] и [3]). При проведении МФГМ используются модели объектов, выполненные в волновом масштабе, который равен отношению длины волны ультразвукового сигнала, используемого на моделирующем стенде, к длине волны электромагнитного сигнала моделируемой РЛС. С развитием вычислительной техники для оценки отражающих характеристик протяженных объектов РЛ наблюдения и расчета РЛ эхо-сигналов стали в основном применять математическое моделирование. Тем не менее, МФГМ имеет свои преимущества по сравнению с математическим моделированием, так как является по своей сути натурным экспериментом, и может быть использовано при разработке новых перспективных РЛ систем различных типов (сверхширокополосные РЛС, многопозиционная и пассивная когерентная локация и т.п.).

Основные характеристики и требования к аппаратуре стенда МФГМ. Одним из основных требований к аппаратуре стенда МФГМ является получение минимально возможных значений волнового масштабного коэффициента для работы с моделями протяженных объектов больших размеров. Для уменьшения волнового масштаба необходимо использовать зондирующие ультразвуковые сигналы с наименьшей длиной волны. Моделирующие сигналы также должны обеспечивать высокое разрешение по дальности и иметь коэффициент широкополосности не менее, чем аналогичный коэффициент зондирующих сигналов моделируемой РЛС.

Уменьшение длины волны при МФГМ в основном ограничивается поглощением ультразвука в воде, величина которого имеет квадратичную зависимость от частоты. Например, для частоты ультразвуковых сигналов порядка 5 МГц и расстояния между акустическими антеннами и моделью 1 м, поглощение сигналов на пути распространения сигналов до модели и обратно будет составлять приблизительно 10 дБ.

Для компенсации поглощения сигналов необходимо повышать энергию зондирующих сигналов. В гидролокаторах обычно применяются широкополосные зондирующие импульсы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). На стенде МФГМ применение ЛЧМ сигналов большой длительности ведет к увеличению минимального расстояния между акустическими антеннами и моделью и, соответственно, росту общего поглощения сигналов.

Целесообразным представляется использование на стенде МФГМ сигналов типа дискретной частотной последовательности (ДЧП) с приемом эхо-сигналов в промежутках между излучаемыми импульсами, которые согласно классификации из [4] относятся к третьей группе РЛ сигналов. Зондирующий сигнал типа ДЧП представляет собой последовательность из N_F радиоимпульсов, каждый из которых имеет длительность τ и собственную несущую частоту, которая выбирается из ряда:

$$F_0 , F_0 + dF, F_0 + 2dF, \ \ldots F_0 + dF(N_F - 1),$$

где F_0 – минимальное значение несущей частоты радиоимпульса, $dF = 1/\tau$.

Среднее значение частоты сигнала типа ДЧП определяется: $F_c = F_0 + (dF\ N_F)/2$.

Порядок следования импульсов с разными частотами в ДЧП может быть произвольным, но его надо учитывать при обработке эхо-сигналов. Период следования импульсов $T_П$ может иметь любое значение. Разрешение по дальности dR сигналов типа ДЧП определяется формулой:

$$dR = c\ \tau / 2\ N_F,$$

где c – скорость распространения сигнала.

Зондирующие сигналы типа ДЧП целесообразно применять, например, в РЛС картографирования небольшой дальности, устанавливаемых на беспилотных летательных аппаратах, так как они позволяют использовать более простую приемопередающую аппаратуру. Данные сигналы применяются в РЛС с инверсным режимом СА для получения РЛ изображений самолетов [5].

На стенде МФГМ сигналы типа ДЧП обеспечивают получение малой протяженности «мертвой зоны» и снижение требований к приемопередающей аппаратуре ЛГУ.

Структурная схема стенда МФГМ, его работа и основные характеристики. Обобщенная структурная схема стенда МФГМ показана на рис. 1.

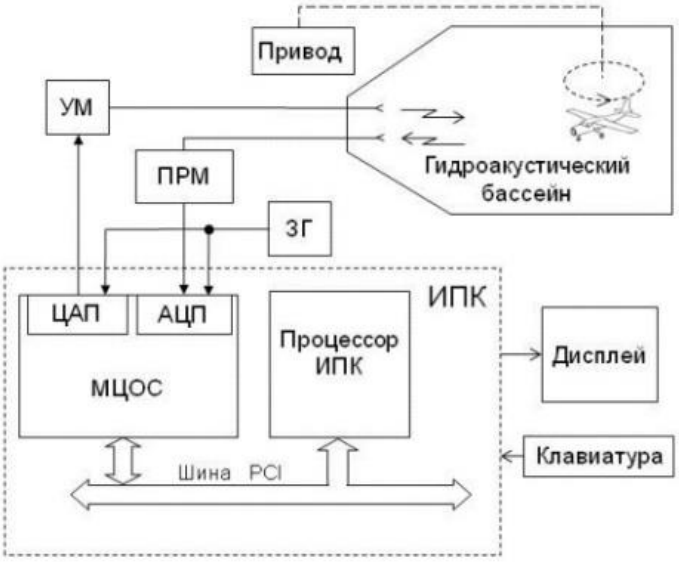


Рис. 1. Структурная схема стенда МФГМ.

Стенд включает в свой состав: ЛГУ, гидроакустический бассейн, управляемый электромеханический привод с оборудованием для крепления гидроакустических моделей.

Аппаратура ЛГУ состоит из индустриального персонального компьютера (ИПК), модуля цифровой обработки сигналов (МЦОС) с установленными на нем цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователями (ЦАП и АЦП соответственно), усилителя мощности (УМ), приемника ультразвуковых сигналов (ПРМ), задающего генератора (ЗГ), приемной и передающей

акустических антенн. В состав стенда также входят несколько лабораторных источников постоянного тока, необходимых для работы аппаратуры.

Работа стенда МФГМ заключается в получении и записи ультразвуковых эхо-сигналов, отраженных от масштабной модели для их последующего использования при математическом и полунатурном моделировании РЛС. Формирование зондирующих сигналов осуществляется путем прямого цифрового синтеза. Ввод и преобразование эхо-сигналов в цифровую форму производится непосредственно на несущей частоте ультразвуковых сигналов. Обработка сигналов проводится с помощью программ, имеющихся в МЦОС и ИПК.

Параметры зондирующих сигналов (F_0, N_F, dF, τ, $T_П$) задаются программно. Для получения изображений, представленных в данной работе, использовались следующие параметры сигналов:

- среднее значение несущей частоты ультразвуковых сигналов F_c = 4.5 МГц;
- среднее значение длины волны ультразвуковых сигналов λ = 0,33 мм;
- число импульсов в ДЧП N_F = 32;
- длительность импульса τ = 40 мкс;
- дискрет перестройки несущей частоты dF = 25 кГц;
- период повторения импульсов $T_П$ = 640 мкс;
- число зондирований, используемых для получения одного изображения, N_{CA} = 128.

Полоса зондирующего сигнала ($W = N_F\,dF$) равна 800 кГц (18% от F_c), и соответствует полосе пьезоэлектрических преобразователей. Такая полоса обеспечивает получение разрешения по дальности dR, равного приблизительно 1 мм.

Скорость вращения модели определяет величину разрешения по азимуту. При указанных выше характеристиках зондирующих сигналов для получения одинаковых значений линейного разрешения по дальности и в перпендикулярном направлении (dR = 1мм) модель должна вращаться со скоростью 7,2 град/с.

На данном стенде МФГМ используется гидроакустический бассейн небольшой емкости (100 л). Рабочая зона, в которой необходимо размещать модель имеет небольшие размеры (15х15см), а расстояние от нее до акустических антенн выбирается в пределах 40 - 60 см.

Используемая на стенде длина ультразвуковой волны (0,33 мм) при моделировании РЛ систем 3-х сантиметрового обеспечивает волновой масштаб, равный 1:100.

Результаты МФГМ. На рис.2 представлены результаты моделирования – изображения объектов для линейного разрешение по дальности и по азимуту на ультразвуке, равного 1 мм.

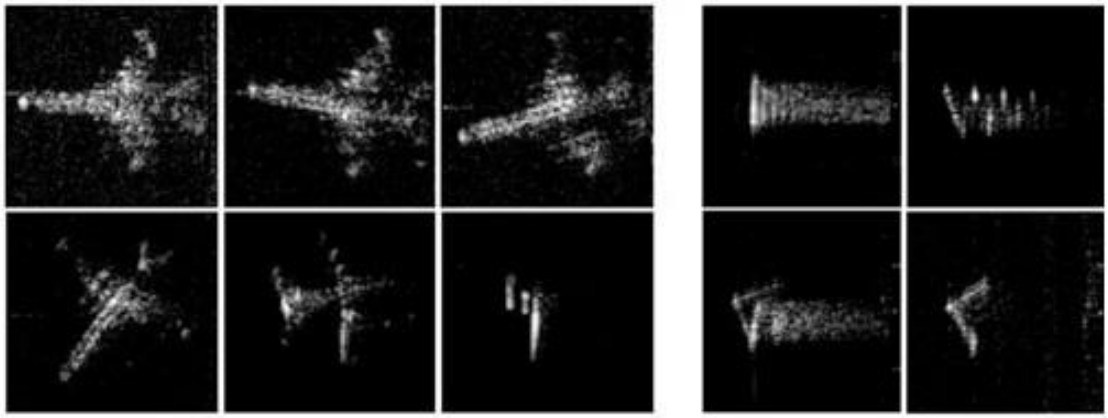


Рис. 2. Изображения, полученные на стенде МФГМ.

Слева показаны смоделированные РЛ изображения (РЛИ) самолета А-7 «Корсар» 2 , имеющего длину 14 м и размах крыльев 11 м, с использованием гидроакустической модели в масштабе 1:100. Представленные РЛИ получены для различных ракурсов. Облучение модели производилось с левой стороны (горизонтальное направление соответствует дальности до объекта). Моделируемое линейное разрешение для РЛС 3-х сантиметрового диапазона длин волн равно 10 см. На рис. 2 представлены только части полного РЛИ, формируемого ЛГУ, которые содержат объект наблюдения. Полное РЛИ состоит из 200 дискретов по дальности и 128 дискретов по азимуту.

Модели для МФГМ необходимо изготавливать из материалов, хорошо поглощающих ультразвук (эбонит, дерево и т. п.), с применением специальных покрытий для получения высокой отражающей способности их поверхности. Данная модель самолета была изготовлена из эбонита с использованием химического меднения поверхности и последующего хромирования.

Для сравнения справа на рис. 2 показаны изображения бруска из алюминиевого сплава, полученные при тех же условиях, как изображения самолета. В сечении брусок имеет размер 25 мм х 25 мм. На изображениях видны паразитные сигналы в виде шлейфов и ярких точек, которые образуются за счет внутренних переотражений ультразвуковых сигналов, проникающих внутрь объекта.

Заключение. Зондирующие сигналы типа ДЧП позволяют получать широкополосные и сверхширокополосные зондирующие сигналы большой энергии с использованием более простой аппаратуры по сравнению с локаторами, использующими другие типы сигналов. К их достоинствам также можно отнести применение для сжатия по дальности алгоритмов БПФ, что позволяет снизить нагрузку на процессор обработки сигналов и обеспечивает низкий уровень боковых лепестков.

Если в ЛГУ использовать набор пьезоэлектрических преобразователей, которые имеют различные средние частоты и переключаются при излучении и приеме импульсов ДЧП, то можно получать большие значения коэффициентов широкополосности сигналов.

Как и в радиолокации, характеристики зондирующих сигналов типа ДЧП с приемом эхосигналов в промежутках между излучаемыми импульсами вызывают трудности при их использовании в обзорно-поисковых гидролокаторах с СА, но они могут найти применение в гидролокаторах с инверсным режимом СА.

Сигналы данного типа целесообразно применять в гидролокационных системах, в которых объект исследования находится на относительно небольшом расстоянии от антенн. Кроме ЛГУ для МФГМ к таким устройствам можно отнести, например, иммерсионные сканеры.

Литература

1. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П. и др. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Научно-технические серии. 2000. Вып. III. Радиолокация и радиометрия. № 2. С. 5-64.
2. Семин А.И., Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование радиолокационных систем получения и обработки радиолокационных изображений высокого разрешения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 4. С.143-157.
3. Андреев А.Ю., Засухин С.О., Милаев А.В., Яковлева Е.С. Использование ИСАР-метода на стенде гидроакустического моделирования для получения радиолокационных портретов морских объектов с высоким разрешением // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 68. С 99-106.
4. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы (теория и применение). М.: Советское радио, 1971. 289 с.
5. Митрофанов Д.Г., Построение двумерного изображения объекта с использованием многочастотного зондирующего сигнала // Измерительная техника. 2001. № 2. С. 57-63.

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СИГНАЛЫ С НУЛЕВОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИЕЙ

Д.Е.Лейкин, канд.физ-мат.наук
НПП «Форт XXI», Королев, Московская обл., Россия

APERIODIC PULSE SIGNALS WITH ZERO AUTOCORRELATION

D.E.Leikin, Ph.D.
Scientific Production Enterprise «Fort XXI», Korolev, Moscow region, Russia

Минимизация уровня боковых лепестков автокорреляционной функции зондирующего сигнала – одна из приоритетных задач, решаемых на этапе разработки активных гидролокационных систем. В докладе сообщается о возможности синтеза апериодических импульсных сигналов с дельта-образной автокорреляционной функцией без боковых лепестков. Приводятся примеры сигналов конечной длительности с исчезающе малым уровнем апериодической автокорреляции за пределами узкого (по сравнению с длительностью сигнала) центрального максимума. Обсуждаются свойства и возможности практического применения сигналов данного типа.

Minimizing off-peak autocorrelation of probing signal is a high priority problem in sonar design. This paper reports on the synthesis of delta-correlated aperiodic sequences. The topic is illustrated by providing several examples of finite signals, whose off-peak non-cyclic autocorrelation is vanishingly small. Properties and practical applications of the reported type of signals are discussed.

Применение сложных широкополосных сигналов, допускающих высокую степень сжатия во времени, позволяет значительно повысить дальность действия, пространственное разрешении и помехоустойчивость гидролокационных систем, не прибегая к увеличению пиковой мощности излучения, которая зачастую лимитируется передающим трактом и/или требованиями скрытности. Для расширения полосы сигнала применяется, например, модуляция кодовыми последовательностями с хорошими автокорреляционными свойствами. Качество сжатия модулированного сигнала характеризуется степенью близости апериодической автокорреляционной функции (АКФ) модулирующего кода к δ-функции. Основная проблема при использовании апериодических кодовых последовательностей (например, кодов Баркера [1]) связана с высоким уровнем боковых лепестков АКФ, который обычно сравним с обратной длиной кода (для кода Баркера максимальной длины 13 он составляет -22 дБ).

Цель обсуждаемой работы состояла в синтезе кодов, обеспечивающих эффективное подавление боковых лепестков АКФ зондирующего сигнала до уровня порядка -100 дБ.

Для решения поставленной задачи был разработан метод синтеза вещественных числовых последовательностей $\{A_n\}$, обладающих идеальными автокорреляционными свойствами:

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_{n+p} A_{n+q} = \delta_{pq}\,, \qquad \delta_{pq} = \begin{cases} 1, & p = q \\ 0, & p \neq q \end{cases}. \tag{1}$$

Ключевое требование к синтезируемым последовательностям заключалось в том, чтобы элементы A_n с номерами, превышающими некоторое конечное число *N*, стремились к нулю быстрее, чем по экспоненциальному закону:

$$\lim_{n \to \pm\infty} \left(A_n \cdot e^{+|n|} \right) = 0\,. \tag{2}$$

Как оказалось, в классе (1-2) всегда можно найти коды с любым наперед заданным числом компактно локализованных элементов конечной величины. Это позволило синтезировать коды, которые при произвольной конечной длине обладают корреляционными свойствами, сколь угодно близкими к идеальным – благодаря стремительному убыванию элементов A_n по величине при $|n| \to \infty$ задачу синтеза удалось свести к процедуре усечения бесконечного числа исчезающе малых членов на хвостах последовательности (1). Поскольку усечение «хвостов» кода не приводит к уширению центрального пика АКФ, оптимальное число удерживаемых элементов A_n определяется из требований, предъявляемых к уровню боковых лепестков последней.

На рис.1-2 приведены примеры последовательностей с одинаковой эффективной длиной 11, которые были синтезированы по описанному алгоритму при ограничениях на допустимый уровень боковых лепестков в -320 дБ (рис.1) и -120 дБ (рис.2). Соответствующие значения критического параметра *N* составили *N* = 30 (для уровня -320 дБ) и *N* = 10 (для уровня -120 дБ).

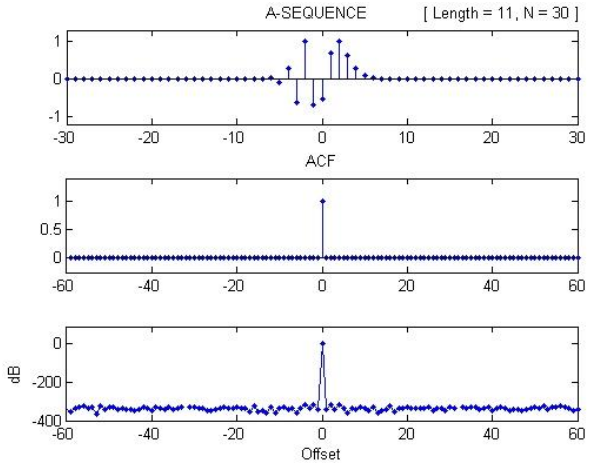


Рис. 1. Синтезированная кодовая последовательность с эффективной длиной 11(*вверху*) и ее АКФ в линейном (*в центре*) и логарифмическом (*внизу*) масштабах. Уровень боковых лепестков АКФ составляет -320 дБ.

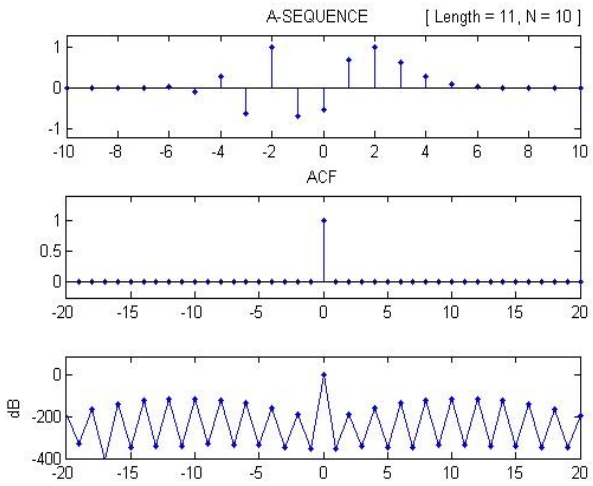


Рис. 2. Последовательность из рис.1 после усечения до N = 10 (*вверху*) и ее АКФ в линейном и логарифмическом масштабах. Уровень боковых лепестков АКФ составляет -120 дБ.

На рис. 4 приведен пример последовательности значительно большей эффективной длины (~50), синтезированной при ограничении на уровень боковых лепестков АКФ в -200 дБ.

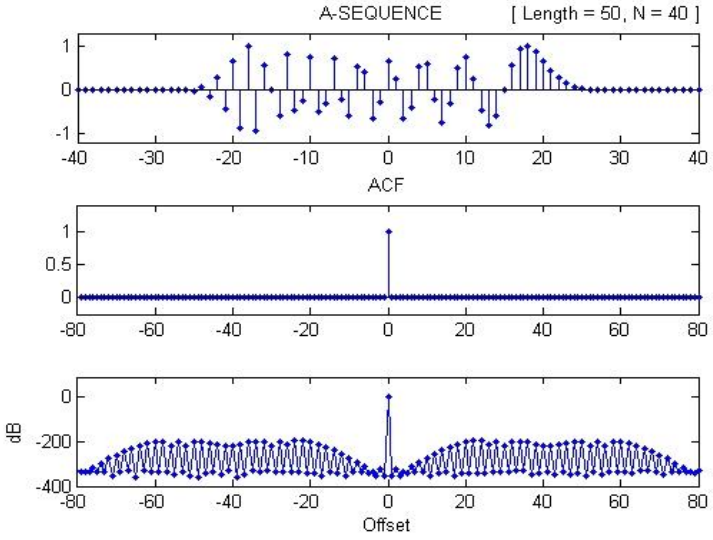


Рис. 3. Кодовая последовательность с длиной 50 (*вверху*) и ее АКФ в линейном и логарифмическом масштабах. Уровень боковых лепестков АКФ составляет менее -190 дБ.

Обратим внимание, что уровень боковых лепестков АКФ синтезированной описываемым методом последовательности (рис.2) примерно в 100000 раз (т.е. на 100 дБ) ниже уровня боковых лепестков АКФ рис.4 АКФ кода Баркера длины 11 (рис.4), нашедшего широкое применение в радиолокации и системах связи.

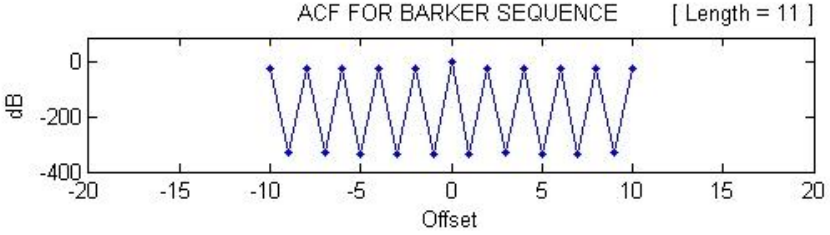


Рис. 4. Автокорреляционная функция кодовой последовательности Баркера длины 11. Уровень боковых лепестков АКФ составляет - 21 дБ.

На рис.5 приводится сравнение АКФ апериодических импульсных сигналов, полученных модуляцией тональной посылки кодом Баркера длины 11 и кодом сопоставимой длины, синтезированным описанным методом. Несмотря на малую эффективную длительность сигнала, составляющую всего 77 периодов несущей (11 чипов по семь периодов в каждом), уровень боковых лепестков АКФ при модуляции предложенным кодом оказался в среднем в 10000 раз (на 80 дБ) ниже, чем при модуляции кодом Баркера.

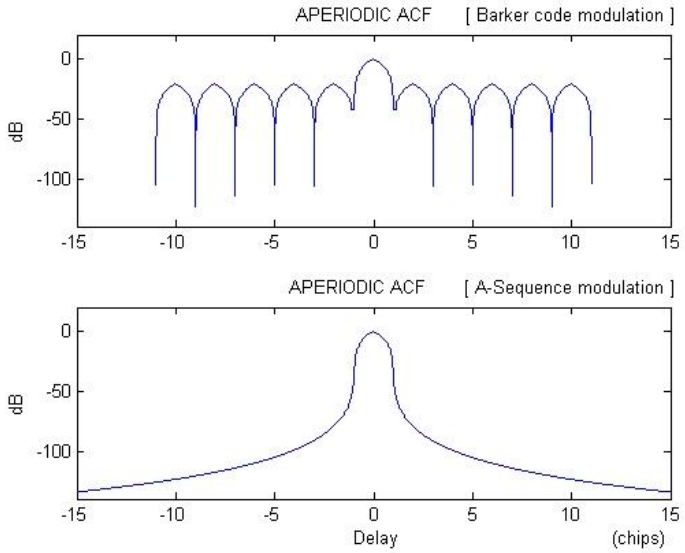


Рис. 5. Огибающая апериодической АКФ зондирующего сигнала, модулированного кодом Баркера (*вверху*), и кодом, представленным на рис.2 (*внизу*). Длительность чипа в обоих сигналах составляет семь периодов несущей. (*Логарифмический масштаб*).

Приведенные примеры демонстрируют возможность синтеза сигналов с произвольно высоким коэффициентом сжатия (определяемым длиной используемого модулирующего кода) и беспрецендентно низким уровнем боковых лепестком апериодической АКФ.

Краткие выводы

– рассмотренный метод позволяет синтезировать последовательности с корреляционными свойствами, сколь угодно близкими к идеальным даже при малой длине кода;

– в отличие от кодов Баркера, рассмотренные последовательности не имеют ограничений на длину кода и, следовательно, на коэффициент сжатия сигнала во времени;

– эффективность описываемых кодов проиллюстрирована синтезом зондирующего сигнала с уровнем боковых лепестков АКФ в 10000 раз меньшим, чем при использовании кода Баркера сопоставимой длины;

– изложенные результаты позволяют предположить, что рассмотренный класс кодовых последовательностей может найти применение в активных системах, к помехоустойчивости и разрешающей способности которых предъявляются чрезвычайно жесткие требования.

Литература

1. Skolnik M. Introduction to radar systems. McGraw-Hill, 2002.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦВК ГАК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕДИНЫХ И РАЗЛИЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Р.О.Лунин, Н.В.Мальцева, канд.техн.наук, Г.Ц.Селеджи, канд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

SINGULARITIES OF DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CENTRAL COMPUTER SYSTEM OF SONAR SUITE USING UNIFORM AND DIFFERENT COMPUTING MEANS

R.O.Lunin, N.V.Maltseva, Ph.D., G.C.Selegi, Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

ЦВК современных ГАК представляет собой многомашинный вычислительный комплекс. Каждая машина является многопроцессорной вычислительной системой, функционирующей в реальном масштабе времени. На примере изготовленного изделия рассматриваются сложности, возникающие при проектировании, разработке и отладке программного обеспечения ЦВК, в состав которого входят различные вычислительные средства. Предлагается структура ЦВК, построенного на единых отечественных вычислительных средствах типа «Эльбрус».

Central computer system (CCS) of modern sonar suite is a multimachine computer system. Each computer is a multiprocessor computing system functioning in real time. In the report requirements to means of perspective sonar suites are formulated. On the example of the manufactured article complexities arising at designing, working out and debugging of software for CCS which structure includes various computing means are considered. CCS structure, based on uniform domestic computing means "Elbrus" is proposed.

Цифровой вычислительный комплекс (ЦВК) современных гидроакустических комплексов (ГАК) представляет собой многомашинную вычислительную систему, в состав которой входят средства вычислительной техники (СВТ) и программное обеспечение (ПО) ЦВК. Под СВТ принято понимать машины (ЭВМ), входящие в состав ГАК. ПО ЦВК является совокупностью ПО всех входящих в него ЭВМ. В свою очередь, каждая ЭВМ является многопроцессорной вычислительной системой, функционирующей в реальном масштабе времени.

Программное обеспечение, используемое при разработке корабельных приборных систем и комплексов, разделяется на общее (ОПО) и прикладное (ППО). Прикладное программное обеспечение является неотъемлемой частью изделия, обеспечивая реализацию тех или иных его (изделия) функций.

ОПО – программный продукт, который является неотъемлемой частью средств_вычислительной техники и должен поставляться вместе с ними. ОПО должно обеспечивать:

тестирование и начальный пуск СВТ;

разработку прикладного ПО;

отладку и сопровождение прикладного ПО;

функционирование прикладного ПО.

Например, в состав вычислительного комплекса ВК-27.05 [1] разработки ЗАО «МЦСТ», являющимся базовым для ряда изделий Концерна «Океанприбор», входит общее программное обеспечение «Эльбрус» [2].

Составными частями ОПО «Эльбрус» являются:

1) Операционная система «Эльбрус», в том числе:

ядро операционной системы «Эльбрус»;

специальные модули и утилиты ОС «Эльбрус»;

средства поддержки пользовательского интерфейса.

2) Система программирования, в том числе:

система тестовых и диагностических программ;

система тестирования ОС;

комплекс сервисных и пользовательских программ;

высокопроизводительные библиотеки;

программа начального старта.

Прикладное программное обеспечение, разрабатываемое с помощью ОПО, структурно можно разделить на системное (СПО), функциональное (ФПО) и ПО системы отображения, регистрации данных и управления (СОРДиУ).

СПО обеспечивает связь между ОПО и ФПО. ФПО разрабатывается на языке высокого уровня и, в общем случае, не должно зависеть от СВТ. СОРДиУ разрабатывается на базе системы X-Window, входящей в состав ОПО.

Изготавливаемые в настоящее ЦВК современных ГАК включают в себя интегрированный пульт управления и приборы обработки данных от антенн (обобщенная структура представлена на рис.1).

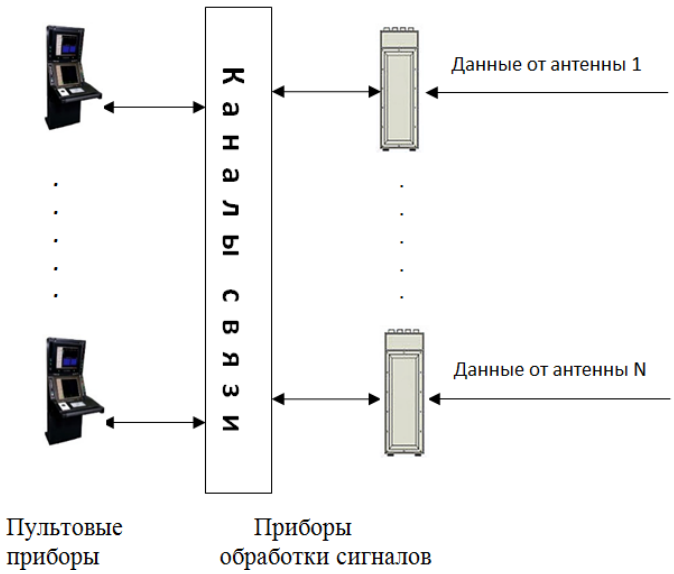


Рис. 1. Обобщенная структура ЦВК современного ГАК.

Интегрированный пульт управления состоит из нескольких приборов разработки НПО «Марс» [3]. По требованию заказчика приборы изготовлены на платформе Intel и работают под управлением отечественной ОС МСВС разработки ВНИИНС им. Соломатина [4].

Приборы обработки данных от антенн изготовлены на отечественных процессорах R1000 [5], с архитектурой SPARC-V9, и работают под управлением отечественной ОС «Эльбрус» [6] (R1000 и ОС «Эльбрус» - продукция ЗАО «МЦСТ»).

Использование в составе ЦВК изделий, функционирующих на разных аппаратных платформах, порождает две задачи.

Первая - преобразование данных (изменение порядка байт в слове) при их передаче между ЭВМ, которое увеличивает загрузку процессоров на 1-2 %.

Вторая – использование уже на уровне ФПО различных системных библиотек для оптимизации исполняемого кода. Унификации программного кода можно достичь посредством использования библиотек, следующих стандарту POSIX. Такие библиотеки утяжеляют программу и не позволяют использовать все возможности оптимизации, закладываемые в современных версиях компиляторов. Как следствие, зачастую, для каждой платформы используются оригинальные версии системных библиотек, что ограничивает переносимость программ внутри изделия. При использовании унифицированных версий системных библиотек время исполнения программы может увеличиться на 5-20%, достигая в некоторых случаях до 100%.

Однако основные проблемы возникают из-за использования в разных ЭВМ разных операционных систем.

ПО ЦВК представляет собой многопроцессную многомашинную вычислительную систему, функционирующую в реальном масштабе времени на нескольких десятках процессоров. Каждый процесс включает в себя несколько параллельных потоков исполнения. Обеспечение синхронизации и взаимодействия всех потоков ложится на СПО. ОПО предоставляет лишь средства синхронизации и взаимодействия.

Обе операционные системы - ОС МСВС и ОС «Эльбрус» построены на базе ядра ОС Linux. Несмотря на наличие стандарта POSIX, оптимальные средства синхронизации и взаимодействия потоков реализованы в ОС МСВС и ОС «Эльбрус» архитектурно-ориентировано, т.е. по-разному. Вопросы использования ОС «Linux» в системах реального времени при создании ОС «Эльбрус» подробно изложены в [7]. Оптимальные средства межмашинного взаимодействия также различны, как и версии X-Window. Заметим, что X-Window является самостоятельным программным продуктом, хотя и включена в состав ОС.

Использование различных ОС приводит к необходимости создания и сопровождения двух версий СПО. СПО, хотя и не велико по объёму, (2-3% от общего объёма ПО изделия) требует на создание и сопровождения каждой версии ~10% общей трудоёмкости создания и сопровождения всего ПО изделия. Очень существенно, что разработка и сопровождение СПО требует наличия высококвалифицированных системных программистов на всех этапах жизненного цикла изделия.

Изложенные трудности существенно сокращаются, если в рамках одного изделия использовать единые СВТ и ОС, например, ВК-27.05 и ОС «Эльбрус». Для этого достаточно применять в комплексах пультовые приборы той же фирмы, разрабатываемые на базе «Эльбрус» [3]. Кроме этого, параллельно решается актуальная задача импортозамещения - отказ от процессоров на базе Intel.

В заключение, приведем основные характеристики используемых в настоящее время в разработках Концерна средств СВТ.

Каждый пультовой прибор содержит два однопроцессорных 2-ядерных (архитектуры Intel) модуля с тактовой частотой 1,3Ггц. Пиковая производительность прибора не превышает 5,2 GFLOPS.

Каждый прибор обработки содержит один 4-процессорный модуль, в каждом процессоре – 4 ядра архитектуры SPARC с тактовой частотой 1Ггц. Пиковая производительность прибора не превышает 16 GFLOPS.

Общая производительность ЦВК составляет не более 100 GFLOPS.

В то же время, в 2016 году ЗАО «МЦСТ» запустило в серийное производство 8-ядерный микропроцессор «Эльбрус-8С» с пиковой производительностью 250 GFLOPS на ядро. Процессоры могут быть объединены в модули по 4 штуки, а в состав ЭВМ могут быть включены до 2 модулей по 4 процессора в каждом [8]. На рис.2 приведена обобщенная структура перспективного ЦВК ГАК с использованием СВТ на базе микропроцессора «Эльбрус-8С».

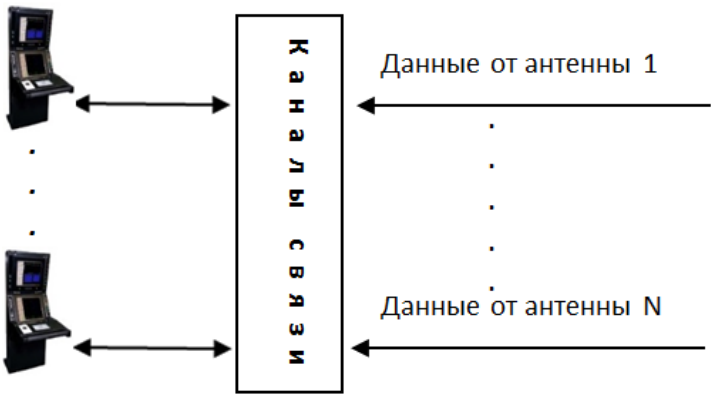


Рис. 2. Обобщенная структура перспективного ЦВК ГАК.

Таким образом, производительность даже одномодульной машины в десятки раз превосходит производительность существующего комплекса и позволяет в перспективе сократить число ЭВМ в изделии до числа требуемых пультовых приборов.

Литература

1. Вычислительный комплекс ВК-27.05. Руководство по эксплуатации. ТВГИ. 466535.015-27.05 РЭ – М.: ЗАО «МЦСТ», 2013.
2. Общее программное обеспечение «Эльбрус. ТВГИ.00311-05 – М.: ЗАО «МЦСТ».
3. ФНПЦ АО «НПО «Марс. Официальный сайт компании.- http://concern-agat.ru/o-kontserne/predpriyatiya-i-dzo/npo-mars.html (дата обращения 25.01.2018).
4. ОАО «ВНИИНС». Официальный сайт компании. - http://vniins.ru (дата обращения 25.01.2018).
5. Микросхема МЦСТ-R1000//MCST.ru: официальный сайт ЗАО «МЦСТ» (дата обращения 25.01.2018).
6. Операционная система «Эльбрус». ТВГИ.00316-10 99 63 - М.: ЗАО «МЦСТ».
7. Семенихин С.В. и др. ОС linux и режим реального времени. // Вопросы радиоэлектроники, серия ЭВТ, вып.3, 2009г.
8. ЗАО «МЦСТ». Официальный сайт компании. – http://mcst.ru (дата обращения 25.01.2018).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В.А.Александров, д-р техн.наук, В.А.Майоров, канд.техн.наук, В.В.Басов
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

INVESTIGATION OF IMPEDANCE CHARACTERISTICS OF CANALS OF TRANSFERTING TRACTS BASED ON ACTIVE EQUIVALENT SCHEMES OF SUBSTITUTION OF HYDROACOUSTIC CONVERTERS

V.A.Aleksandrov, Dr.Sc., V.A.Majorov, Ph. D., V.V.Basov
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Представлены результаты исследования импедансных характеристик каналов передающих трактов на основе активных эквивалентных схем гидроакустических преобразователей. Приведены результаты расчета значений импеденса преобразователя и его изменения в условиях внешнего воздействия. Полученные данные могут быть использованы для решения вопросов согласования усилителя с нагрузкой при возбуждении пьезокерамического преобразователя и для коррекции амплитудно-фазового распределения сигналов фазированной антенной решетки.

Results of the research of impedance characteristics of channels of transmission subsystems based on active equivalent circuits of hydroacoustic transducers are presented. Results of calculating the values of the transducer impedance and its variation under external influence are presented. The data obtained can be used to solve the problems of matching the amplifier with the load when the piezoceramic transducer is excited and to correct the amplitude-phase distribution of phased array signals.

Для формирования направленного излучения в водную среду в современных гидроакустических системах используются фазированные антенные решетки (ФАР), состоящие из дискретных гидроакустических преобразователей (ГАП). Основными характеристиками гидроакустического передающего тракта (ПТ) являются акустическое давление и диаграмма направленности. Управление этими характеристиками достигается путем создания необходимого амплитудно-фазового распределения по каналам тракта с помощью многоканального генераторного устройства [1, 2]. При этом предполагается, что каналы возбуждения имеют заданные, принципиально одинаковые характеристики, а также что каналы независимы и не имеют связей по электрическому и акустическому полям и не связаны через конструктивные элементы антенны.

На практике в многоканальных трактах присутствуют существенные взаимосвязи между каналами (взаимное влияние), а каналы не являются идентичными. Эти факторы искажают результирующие характеристики изготовленной антенны, что может привести к невыполнению требований к ПТ как по развиваемому акустическому давлению, так и по диаграмме направленности. Для расчета нагрузочных и выходных характеристик ГАП необходимо учитывать как индивидуальные импедансные характеристики, так и параметры под воздействием внешних факторов, связанных с размещением ГАП в раскрыве ФАР и с взаимным влиянием каналов излучения в случае многоканальной дискретной гидроакустической антенны.

В составе многоканальной дискретной фазированной решетки, где вся совокупность излучателей с различными амплитудами и фазами возбуждения влияют на каждый отдельный преобразователь, импеданс ГАП может изменяться значительным образом. Вынуждающая сила, действующая на каждый преобразователь, определяется взаимным влиянием между преобразователями, результирующая величина которого в рамках линейной модели находится на основе принципа суперпозиции в рамках активной эквивалентной схемы замещения ГАП.

Достоинством активных эквивалентных схем замещения является возможность учета эффекта взаимного влияния введением в колебательную систему источника вынуждающей силы без изменения собственных параметров ГАП.

Оценка взаимного влияния гидроакустических преобразователей может быть произведена по наведенному напряжению холостого хода $U_{хх}$ на разгруженный преобразователь с разомкнутыми выводами при заданном возбуждении остальных каналов ФАР либо по результирующему току короткого замыкания $I_{кз}$ наведенного на короткозамкнутый преобразователь. При этом комплексная величина наведенного потенциала либо тока определяется суперпозицией взаимного влияния отдельных преобразователей. Для q-го преобразователя в составе N-канальной излучающей антенны определим результирующее влияние от совокупности каналов ФАР:

$$U_{\text{хх}q} = \sum_{i=1}^{N} U_{\text{хх}iq} \text{ при } i \neq q$$
$$I_{\text{кз}q} = \sum_{i=1}^{N} I_{\text{кз}iq} \text{ при } i \neq q, \quad (1)$$

где $U_{\text{хх}iq}$ - напряжение холостого хода, наведенное i-ым преобразователем на q-й преобразователь, $I_{\text{кз}iq}$ - ток короткого замыкания, наведенный i-ым преобразователем на q-й преобразователь.

Далее может быть обеспечен переход к эквивалентному генератору напряжения либо тока для активной схемы замещения q-го преобразователя в составе многоканальной дискретной акустической антенны. В результате, воздействие на преобразователь внешней вынуждающей силы для заданной рабочей частоты можно учесть, добавив в рабочий контур полной схемы замещения источник напряжения или источник тока (рис. 1). Особенностью включения эквивалентного генератора тока является параллельное соединение с сопротивлением излучения, что требует разделения активного сопротивления рабочего контура на составляющие сопротивления механических потерь $R_{\text{м}}$ и сопротивления излучения $R_{\text{и}}$, характеризующее передачу акустической энергии. В общем случае схемы эквивалентны, в дальнейшем для анализа предложено использовать активную схему замещения с источником напряжения.

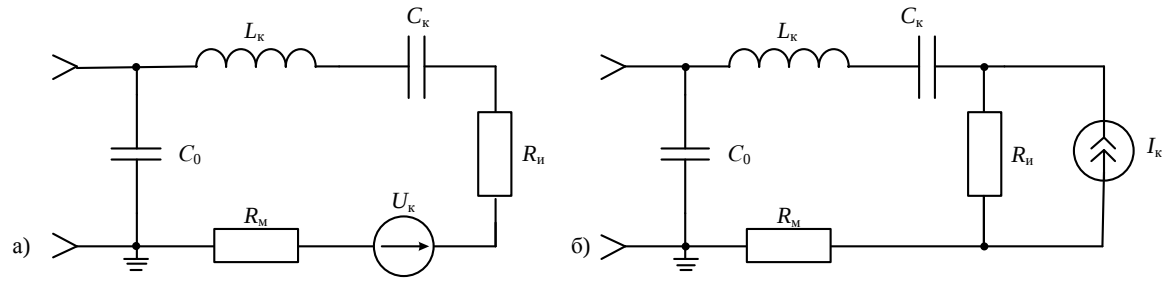


Рис. 1. Активные эквивалентные схемы замещения однорезонансного преобразователя с эквивалентным генератором напряжения а) и тока б).

В этом случае сопротивления $R_{\text{м}}$ и $R_{\text{и}}$ могут быть заменены на их суммарное значение $R_{\text{к}}=R_{\text{м}}+R_{\text{и}}$. Для дальнейшего анализа и расчета импеданса преобразователя, видимого со стороны внешнего генератора сигнала U_1, можно предложить к рассмотрению схему, приведенную на рис. 2.

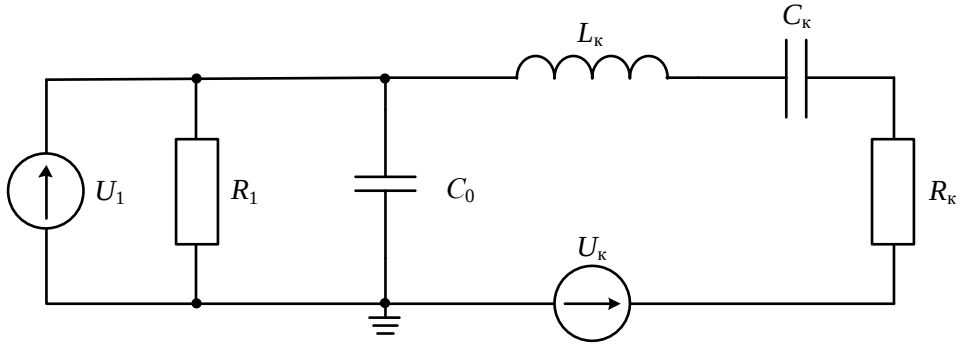


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема для расчета видимых нагрузочных характеристик ГАП с учетом внешнего воздействия.

Расчет импедансных характеристик ГАП на основе эквивалентной схемы рис. 2 осуществляется по формуле (2), полученной методом с непосредственным применением законов Ома и Кирхгофа.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j \cdot \omega \cdot C_0 + \frac{U_1 - U_к}{U_1 \cdot \left(j \cdot \omega \cdot L_к + 1/(j \cdot \omega \cdot C_к) + R_к \right)}} \qquad (2)$$

Для иллюстрации, на рис. 3 и рис. 4 (см. вклейку) представлены результаты расчета модуля и аргумента импеданса преобразователя, видимого со стороны внешнего генератора сигнала U_1 без учета внешнего воздействия ($U_к$=0) и с учетом внешнего воздействия. В ходе расчета приняты следующие исходные данные: амплитуды внешнего генератора сигнала U_1 и источника внешнего воздействия $U_к$ одинаковы и равны 1 В, R_1=100 кОм, C_0=170 нФ, $L_к$=16 мГн, $C_к$=21 нФ, $R_к$=100 Ом, $\omega = 2\pi \cdot f$, где частота f взята в диапазоне 4 кГц – 13 кГц.

Из графиков рис. 3 и рис. 4 видно значительное изменение модуля и аргумента импеданса преобразователя, вызванное влиянием на него других преобразователей.

Проведенные расчеты показывают необходимость учета взаимного влияния преобразователей при работе в составе многоканальной дискретной излучающей антенны, как для решения задачи согласования выходов многоканального генераторного устройства с ГАП, так и для оценки выходных параметров сигнала возбуждения каналов ФАР. Модели активных эквивалентных схем замещения ГАП позволяют оценить параметры взаимного влияния по результатам экспериментальных измерений характеристик каналов антенны и обеспечивают возможность аналитической оценки видимого импеданса излучателя в полосе рабочих частот. В дальнейшем определение эквивалентных генераторов соответствующих взаимному влиянию совокупности ГАП дискретной излучающей антенны могут быть использованы для корректировки амплитудно-фазового распределения выходных напряжений каналов гидроакустического передающего тракта.

Литература

1. Артым А.Д., Усилители класса Д и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. М., Связь, 1980, 209 с.
2. Александров В.А., Майоров В.А., Полканов К.И., Патент РФ 2188498, Гидроакустический передающий тракт. Приоритет 05.03.2001.
3. Кузнецов Г.Н., Александров В.А., Островский Д.Б., Киселев П.А. Патент РФ 2346294, Способ коррекции амплитудно-фазового распределения возбуждения многоканальной гидроакустической антенны. Приоритет 09.04.2007.
4. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Л., Судостроение, 1984, с.259-278.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

К.В.Игнатьев, С.А.Калашников
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE CENTRALIZED SOURCES OF SECONDARY POWER SUPPLY OF THE ASDIC EQUIPMENT

K.V.Ignatiev, S.A.Kalashnikov
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Представлены результаты разработки ключевых стабилизированных конверторов с ФИМ для модулей централизованного электропитания. Обосновано использование квазирезонансных траекторий для уменьшения потерь энергии и для улучшения показателей электромагнитной совместимости в импульсных источниках вторичного электропитания. Разработаны принципы формирования мягких траекторий для двухканальных схем ключевого преобразования. Исследованы особенности применения обратной связи по выходному импульсному напряжению и току для повышения стабильности выходных характеристик и ограничения максимального выходного тока. Приведены результаты экспериментальных исследований модулей централизованного электропитания с улучшенными энергетическими характеристиками.

Results of development of the key stabilized converters with pulse-phase modulation for modules of centralized power supply are provided. Use of quasi-resonant trajectories for reduction of energy loss and for improvement of electromagnetic compatibility in pulsed sources of secondary supply sources is validated. Principles of relaxed trajectories formation for two-channel schemes of key conversion are developed. Features of application of feedback on output pulse voltage and current for increase of stability of output characteristics and restriction of maximum output current are investigated. Results of pilot studies of modules of centralized power supply with the improved power characteristics are given.

Мощность, потребляемая трактами электропитания (ТЭП) современных гидроакустических комплексов (ГАК) измеряется сотнями кВт. При такой энергоёмкости аппаратуры повышение КПД источников вторичного электропитания является актуальной задачей реализации приборов централизованной части ТЭП. Современная тенденция развития структуры энергопотребления в ГАК связана с всё более широким применением в составе приборов функциональной аппаратуры (ФА) децентрализованных модулей ИВЭП, электропитание которых осуществляется от централизованных шин постоянного стабилизированного напряжения ограниченной номенклатуры. В результате достигается минимизация потерь энергии в источниках вторичного электропитания в распределённых приборах подсистем ГАК при повышении требований, предъявляемых к аппаратуре централизованной части ТЭП.

Основными звеньями трактов электропитания становятся модули вторичного преобразования напряжения (ВПН), обеспечивающие преобразование энергии объектовой сети переменного или постоянного тока в энергию вторичных стабилизированных напряжений централизованных шин электропитания приборов ФА. Модули ВПН при номинальной выходной мощности 1-3 кВт должны обеспечивать удовлетворительное качество вторичного напряжения (стабильность не хуже 2 %, высокочастотные и низкочастотные пульсации не более 0,5%) для номинальных значений типоряда (27;110;220;300)В. В модулях должны обеспечиваться ограничение тока включения напряжения сети электропитания и стабилизацию выходного тока для заряда ёмкости входных фильтров потребителей, в условиях достижения в номинальных режимах КПД не менее 90%.

В отсутствии опыта создания высокоэффективных модулей ВПН такого типа комплектование приборов ТЭП ряда изделий АО «Концерн «Океанприбор» производилось продукцией сторонних поставщиков, качество которых в отдельных случаях не отвечало условиям применения для изделий спецтехники. Ситуация изменилась с освоением АО «НИИ «Бриз» модулей ВПН собственной разработки. Реализация новых принципов построения ключевых преобразователей напряжения позволила существенно улучшить энергетические характеристики и показатели качества устройств силовой электроники для гидроакустики при обеспечении собственного производства и высокой надежности модулей ВПН.

Задача формирования стабилизированного выходного напряжения с гальванической развязкой для ВПН средней мощности (до единиц кВт) при нестабилизированном питании от сети объекта наилучшим образом решается применением ключевых конверторов (КСК) с высокой стабильностью выходного напряжения.

Оконечные каскады КСК, как правило, выполняются по симметричной мостовой схеме (рис.1), содержащей по две стойки транзисторов и диодов. Симметричная схема обеспечивает

возможность управления транзисторными стойками мостовой схемы противофазными импульсными сигналами типа меандр $V_{1.1}$, $V_{1.2}$ и $V_{2.1}$, $V_{2.2}$, сдвинутыми по фазе пропорционально результирующему сигналу $V_{ШИМ}$. В результате фазоимпульсной модуляции импульсных сигналов V_1 и V_2 в диагонали мостовой схемы формируется знакопеременное импульсное напряжение V с регулируемой длительностью импульсов. Таким образом, на выходе высокочастотного трансформаторно-выпрямительного устройства (ТВУ) в условиях непрерывного выходного тока образуется импульсное напряжение $V_Н$, соответствующее исходному сигналу $V_{ШИМ}$. Стабилизация и регулирование выходного сигнала КСК могут быть обеспечены использованием комбинированной обратной связи по импульсному сигналу с выхода выпрямителя и выходному напряжению. В отдельных случаях дополнительно может быть использована параметрическая зависимость входного и выходного напряжения посредством соответствующего изменения длительности импульсов с ШИМ.

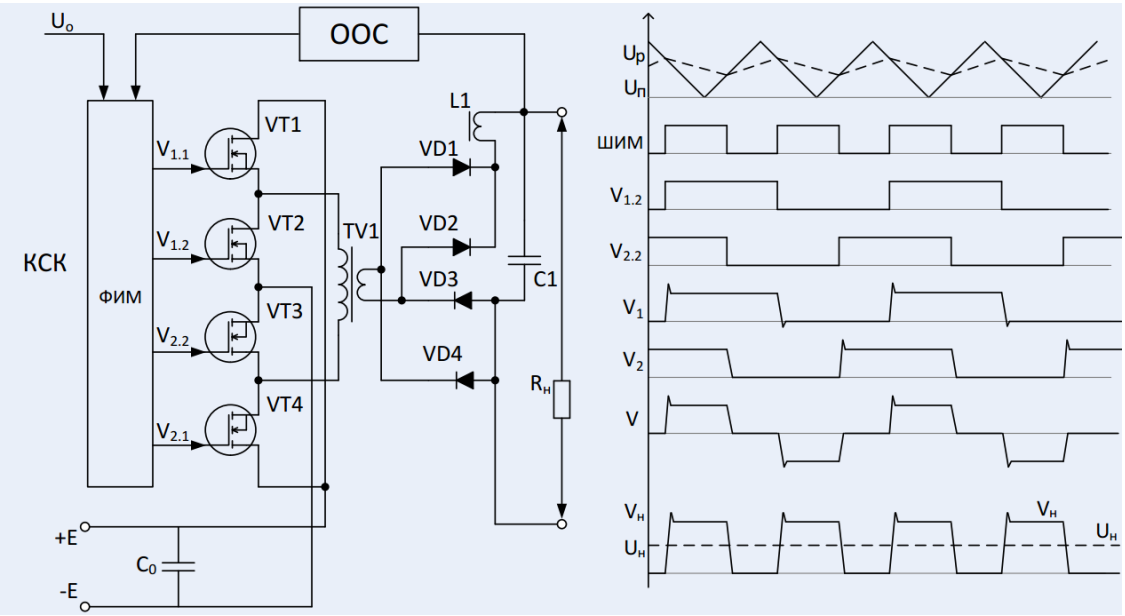


Рис.1. Оконечный каскад КСК и временные диаграммы сигналов, поясняющие его работу.

До настоящего времени сторонние разработчики ИВЭП предпочитают использование ШИМ в КСК [1], несмотря на сложности управления транзисторами, особенно в режимах малой модуляции, например, соответствующей ограничению выходного тока. В частности такой вид модуляции является неотъемлемой частью ИВЭП разработки фирмы «Александр-Электрик», имеющие выраженные ограничения по реализации режима стабилизации выходного тока.

Предложенные технические решения позволили устранить выделенный недостаток и открыли новые возможности улучшения характеристик модулей ВПН. Сегодня схемотехнические решения КСК бурно развиваются в направлении использования высокоэффективной элементной базы, реализации квазирезонансных траекторий переключения. В последнее время для низковольтного выхода КСК при значительном токе нагрузки ((30-60)А) внедряются схемы синхронных выпрямителей на полевых транзисторах.

Основными техническими преимуществами схемы КСК [2] собственной разработки является использование квазирезонансных траекторий переключения, обеспечивающих уменьшение динамических потерь энергии и улучшение показателей электромагнитной совместимости в условиях изменения нагрузки в широких пределах от холостого хода до короткого замыкания. При этом достигается значительное повышение КПД и уменьшение тепловыделения.

Схема ВПН новой разработки (рис.2) содержит фазо-импульсный преобразователь (ФИП) 1, два канала ключевых усилителей мощности КУМ 2 и 3, блокировочные конденсаторы 4, 5 и 6, 7, дроссели и конденсаторы 12, 13 и 14, 15 для раскачки параллельных высокочастотных (ВЧ) токов, последовательный дроссель 8, трансформатор 9, выпрямитель 10 и выходной фильтр нижних частот (ФНЧ) 11.

Особенностью работы устройства является использование энергии запасенной в дросселях 12, 13, от параллельной раскачки ВЧ токов, для плавного перезаряда блокировочных конденсаторов 4, 5 и 6, 7, а также собственных ёмкостей ключевых элементов после выключения проводящего транзистора за время задержки включения следующей диагонали ключевых элементов.

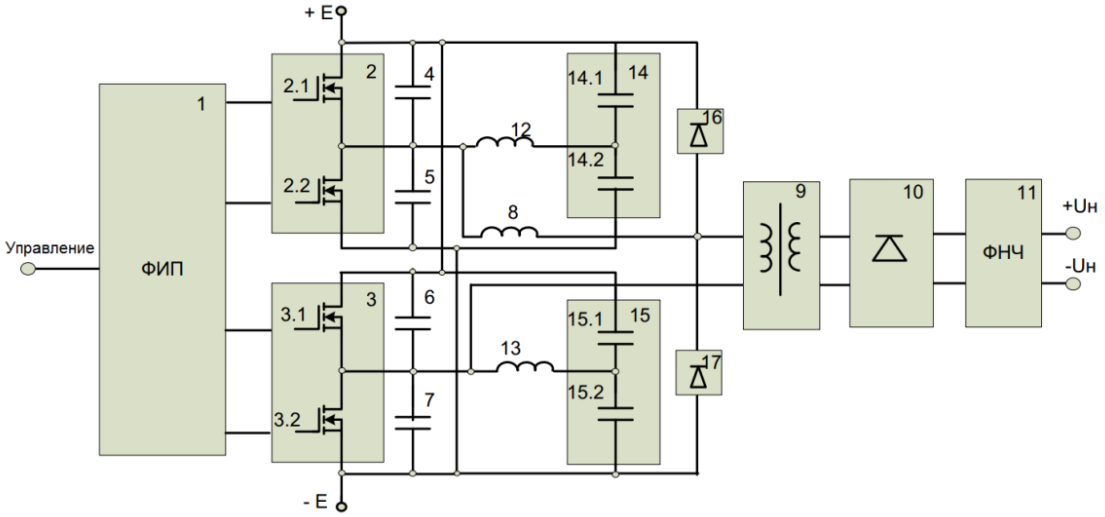


Рис. 2. Схема модуля ВПН.

При фазоимпульсной модуляции на выходе каналов ключевого усиления формируется симметричное напряжение типа "меандр", что соответствует нарастанию тока дросселей 12, 13 к моменту переключения до максимальной величины

$$I_{LMAX} = ET/8L_б,$$

где E – напряжение питания; T – период переключений; $L_б$ – индуктивность дросселя.

Обеспечение квазирезонансных траекторий переключений достигается при выполнении условия:

$$(I_{LMAX} - I_{HMAX})^2 L_б/2 \geq E^2 C/2,$$

где I_{HMAX} – выходной ток ФНЧ, приведённый к выходам КУМ; C – суммарная ёмкость выхода КУМ.

При этом достигается гарантированное формирование квазирезонансных траекторий переключений транзисторов каналов КУМ с минимальными динамическими потерями энергии во всём диапазоне изменения нагрузки, в том числе и в режиме короткого замыкания. Для значительного превышения максимального выходного тока от его номинального значения имеет место избыточная величина амплитуды ВЧ тока для формирования квазирезонансных траекторий переключений транзисторов каналов КУМ, что обуславливает дополнительные потери в номинальных режиме. В разработанном устройстве реализованы специальные меры, позволяющие ограничить величину максимального тока в режиме перегрузки на уровне не более 20% сверх его номинального значения для поддержания амплитуды ВЧ тока на минимально достаточном уровне.

Обеспечение квазирезонансного режима работы КСК устраняет ВЧ помехи, связанные с "жёсткой" коммутацией транзисторов, что улучшает условия электромагнитной совместимости модуля ВПН с функциональной аппаратурой, включая и тракты многоканальных гидроакустических приёмных устройств, весьма критичных к такому виду помех. Для потребителей такого вида также важна минимизация низкочастотных (НЧ) пульсаций в напряжении вторичного электропитания, что имело место в модулях предшествующих разработок. В модулях разработки АО«НИИ«Бриз» применена комбинированная обратная связь по импульсному сигналу напряжения с выхода выпрямителя и выходному напряжению. Примененный метод подавления НЧ пульсаций позволил подавить гармоники напряжения электропитания переменного тока до (0,1-0,2)%.

Таким образом, в модуле ВПН новой разработки совокупность реализованных мер обеспечивает уменьшение потерь энергии и улучшение показателей ЭМС. В результате улучшаются энергетические характеристики и показатели качества устройства в широком диапазоне изме-

нения нагрузки и регулировки выходного напряжения. Так при использовании известных КСК [1] при частоте переключения (50-100)кГц КПД не превышает 87% при относительной амплитуде ВЧ помех в шинах выходного напряжения не менее (1-2)%, а потери энергии в режиме холостого хода достигают (10-15)% от номинальной выходной мощности. Применение предлагаемого технического решения обеспечивает повышение КПД до (89-94)% при относительной амплитуде ВЧ пульсации не более (0,3-0,5)% и уменьшение относительных потерь в режиме холостого хода до уровня не более 2% от номинальной выходной мощности.

Результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик модуля ВПН разработки АО «НИИ «Бриз» представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Номинальный режим.

Eo, В	**350**	**400**	**450**	**500**	**550**	**600**	**630**
Io, А	3,625	3,21	2,888	2,635	2,43	2,249	2,16
Uн, В	26,8	26,96	27,12	27,27	27,4	27,51	27,58
Iн	43,87	44,07	44,20	44,40	44,73	44,80	44,93
Po, Вт	1268,75	1284	1299,6	1317,5	1336,5	1349,4	1360,8
Pн, Вт	1175,6	1188,0	1198,7	1210,8	1225,7	1232,4	1239,3
η, %	92,7	92,5	92,2	91,9	91,7	91,3	91,1

Таблица 2. Режим короткого замыкания.

Eo, В	**300**	**350**	**400**	**450**	**500**	**550**	**600**	**630**
Io, А	0,35	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,23
Iн	48,67	49,00	49,20	49,33	49,47	49,60	49,67	49,67
Po, Вт	105	108,5	116	121,5	125	132	138	144,9

Литература

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М: Техносфера, 2005г., 602с.
2. Патент РФ 2586567. Ключевой преобразователь напряжения // В.А.Александров, А.П.Буянов, К.В.Игнатьев. Приор. 19.02.2015г.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ КЛЮЧЕВОЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Ю.В.Казаков, С.А.Калашников, Л.В.Маркова
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

KEY BROADBAND POWER AMPLIFIER FOR RESEARCH OF HYDROACOUSTIC RADIATORS

U.V.Kazakov, S.A.Kalashnikov, L.V.Markova
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Представлены результаты разработки и испытаний широкополосных усилителей мощности для исследований гидроакустических преобразователей звукового и ультразвукового диапазонов частот. Обоснована предпочтительность применения ключевых усилителей при работе на комплексную нагрузку. Показана эффективность применения многоканальной широтно-импульсной модуляции для расширения частотного диапазона усиливаемых сигналов. Приведены характеристики и описание разработанного и изготавливаемого прибора широкополосного усилителя мощности.

Results of development and tests of broadband power amplifiers for research of hydroacoustic transducers of sound and ultrasonic frequency ranges are provided. Preference of use of key amplifiers during the work on complex loading is proved. Efficiency of application of multichannel pulse width modulation for extension of the amplified signals frequency range is shown. Characteristics and description of the developed and manufactured device of the wideband power amplifier are provided.

Испытания образцов гидроакустических преобразователей (ГАП) являются неотъемлемой частью проектирования приборов излучающих антенн, особенно при внедрении новых материалов и конструктивных решений. Здесь исследование импедансных характеристик и проверка прочности конструкций в режимах возбуждения, близких к номинальным, имеют принципиальное значение для выбора варианта реализации.

С учетом многообразия ГАП с рабочими частотами в диапазоне от 0,1 до 100 кГц и импедансом (20-500) Ом, задача экспериментальных исследований требует использования специального оборудования и, прежде всего, наличия широкополосного усилителя мощности. Ранее для этих целей применялись генераторы мощных сигналов (ГСМ) на ламповых линейных усилителях класса В. Наряду с известными недостатками, обусловленными большими габаритами (объем примерно 300 дм^3, масса более 120 кг) и тепловыделением (до 700 Вт), ламповые усилители обладали универсальностью применения при выходной мощности до 500 ВА, частотном диапазоне (0,1-50) кГц и динамическом диапазоне 40 дБ. С заменой мощных ламповых усилителей в составе гидроакустической передающей аппаратуры сначала на тиристорные генераторы, а затем на транзисторные ключевые усилители мощности (КУМ), традиционные ГСМ устарели, т.к. не позволяли обеспечить физическое моделирование канала излучающего тракта. Кроме того, к настоящему времени весь технический парк ГСМ практически пришел в негодность.

Попытки использования нового испытательного оборудования, в том числе зарубежного производства, выполненного на транзисторных линейных усилителях, выявили сложности согласования с каналами гидроакустической антенны, комплексный импеданс которых имеет выраженную емкостную проводимость при коэффициенте активной мощности $\cos\varphi=(0{,}1\text{-}0{,}5)$. Кроме того, даже лучшие образцы таких устройств, например усилитель 800A3B производителя «AR RF/Microwave Instrumentation», мощностью 800 ВА, имеют значительные габариты (порядка 80 дм^3) и тепловыделение (до 400 Вт). Здесь уместно обратиться к соотношению (1), определяющему относительные потери энергии линейного усилителя класса В при работе на комплексную нагрузку с коэффициентом активной мощности $\cos\varphi$:

$$P_{\text{п}}=m(4-m\pi\cos\varphi)/\pi, \qquad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ – отношение мощности тепловыделения к полной выходной мощности усилителя; $m=(0\div1)$ – относительная амплитуда входного напряжения.

При работе на нагрузку с весьма малым значением $\cos\varphi \le 0{,}3$ тепловыделение в линейном усилителе может даже превышать полную выходную мощность. Выделенное обстоятельство объясняется отсутствием рекуперации реактивной составляющей энергии нагрузки и необходимостью ее рассеяния на остаточных напряжениях звеньев линейного усиления.

Принципиальным преимуществом при работе на комплексную нагрузку обладают ключевые усилители с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), определенные как усилители класса *D* [1]. В таких устройствах рекуперация энергии через открытые полупроводниковые прибо-

ры является основой принципа действия. При этом остаточные напряжения на ключевых элементах весьма малы и слабо зависят от направления протекания выходного тока.

Широтно-импульсная модуляция предполагает формирование последовательности импульсов, модулированных по длительности, с частотой следования значительно (более чем в 10 раз) превышающих верхнюю частоту усиливаемого сигнала. После ключевого усиления по мощности полезные составляющие модулированного импульсного напряжения такого вида могут быть эффективно выделены на нагрузке широкополосными фильтрами нижних частот. Канал ключевого усилителя с использованием современной элементной базы может быть выполнен на двух мощных полевых транзисторах, включенных в полумостовую схему оконечного каскада [2]. Транзисторы управляются противофазно широтно-модулированными импульсами. В результате в схеме формируется импульсное напряжение с поочередным замыканием выходного тока через транзисторы. Для устранения сквозных токов транзистор-транзистор используется задержка включения, во время которой ток протекает через рекуперативные (обратные) диоды, в качестве которых возможно применение собственных диодов полупроводниковых приборов.

Наличие импульсных изменений потенциалов напряжений и контуров тока связаны с динамическими потерями энергии, а остаточные напряжения открытых транзисторов определяют статические потери усилителя класса *D*. В результате мощность тепловыделения в таком устройстве находится как сумма двух составляющих $P_д$ и $P_с$, соответственно пропорциональных частоте переключений f и усреднённому собственному сопротивлению открытых ключевых элементов $R_к$. Относительные потери в этом случае определяются известными приближенными соотношениями [3]:

$$p_п = mf((2\tau_д + t_ф)/2\pi + fC_кZ + R_к/Z, \quad (2)$$

где $\tau_д$, $t_ф$ – постоянные времени восстановления диодов и фронтов импульсов, $C_к$, $R_к$ – собственная ёмкость ключевых элементов и усредненное сопротивление, Z – модуль импеданса нагрузки.

С ростом частоты ШИМ в ключевом усилителе ультразвукового диапазона доминируют динамические потери энергии. Так, например, при относительном уровне сигнала m=0,5 и частоте переключений f=100 кГц, для типовых значений: $\tau_д$=100 нс; $t_ф$=50 нс; $C_к$=1 нФ; $R_к$=0,1 Ом; $Z_н$=50 Ом – динамические потери могут достигать 20%, в то время как статические потери не превышают 0,2%. Такой уровень динамических потерь оказывается неприемлемым при реализации мощного испытательного оборудования.

До настоящего времени большинство малогабаритных усилителей класса *D* рассчитаны на звуковой диапазон до 20 кГц и имеют ограниченные возможности согласования с нагрузкой.

В сложившихся условиях, создание специального испытательного оборудования, включающего широкополосные усилительные устройства, в том числе ультразвукового диапазона, было выделено одной из актуальных задач технического перевооружения предприятия АО «Концерн «Океанприбор». Эта задача успешно решена АО «НИИ «Бриз», ведущим предприятием в области устройств силовой электроники для гидроакустики.

В основу технических решений высокоэффективных широкополосных усилителей положено использование возможностей многоканальной ШИМ. Применение многоканальных схем ключевого усиления позволяет получить на входе результирующего фильтра низких частот суммарное импульсное напряжение, весьма близкое по форме к полезному выходному сигналу. При этом достигается кратное увеличение суммарной частоты переключений по сравнению с отдельным каналом ключевого усиления.

Схема ключевого усилителя с четырёхканальной ШИМ при трансформаторном суммировании мостовых оконечных каскадов приведена на рис.1а. Для управления полевыми транзисторами используются противофазные сигналы V_1 и $\overline{V}_1$, V_2 и $\overline{V}_2$, V_3 и $\overline{V}_3$, V_4 и $\overline{V}_4$, полученные в результате сравнения входного сигнала U с рядом пилообразных импульсных напряжений $U_{п1}$, $U_{п2}$, $U_{п3}$, $U_{п4}$, равномерно сдвинутых по фазе. Временные диаграммы сигналов, поясняющие работу ключевого усилителя на примере четырёхканальной симметричной ШИМ при суммарной частоте переключений ω_N=4ω=12Ω, иллюстрируются на рис.1б. (где ω=2πf – частота переключений отдельного канала, Ω - частота усиливаемого сигнала).

В каждой мостовой схеме реализуется формирование разнополярных импульсов $V_{1\text{-}2}$ и $V_{3\text{-}4}$, соответствующих двухканальной ШИМ и, соответственно, удвоению частоты переключений. При этом суммарное напряжение двух мостовых схем, формируемое на выходе трансформаторного сумматора *TV*1, *TV*2 соответствует четырёхканальной ШИМ с четырёхкратным увели-

чением частоты и уменьшением амплитуды высокочастотных составляющих, что улучшает условия выделения фильтром низких частот (*L*1, *L*2, *C*1) полезных составляющих сигнала на нагрузке.

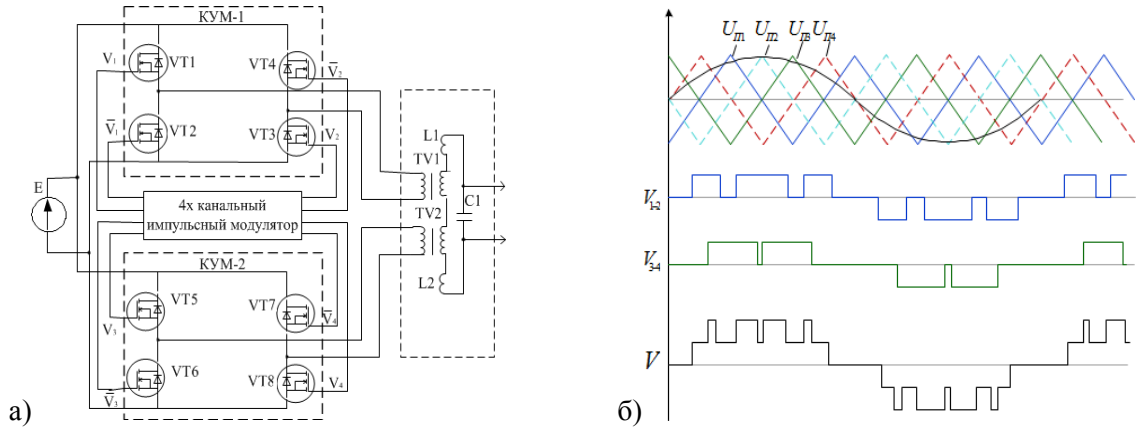


Рис.1. Схема четырехканального усилителя с ШИМ (а) и временные диаграммы сигналов, поясняющие работу (б).

Применение известной методики оценки потерь энергии в этом случае позволяет определить относительное тепловыделение в отдельном канале, и в целом для усилительного устройства следующим соотношением:

$$p_{\text{п}}=f/N((2\tau_{\text{д}}+ t_{\text{ф}})/2\pi m+C_{\text{к}}Z/m)+R_{\text{к}}/Z \qquad (3)$$

Переход к многоканальным схемам ключевого усиления позволяет кратно уменьшить доминирующие динамические потери энергии при условии улучшения спектрального состава суммарного импульсного напряжения на входе фильтра нижних частот.

Другим фактором улучшения энергетических характеристик и показателей качества усилителей класса *D* с многоканальной ШИМ является переход к пониженному напряжению электропитания *E*=(25-100) В. Соответственно уменьшаются потери на перезаряд собственной ёмкости ключевых элементов. Дополнительно появляется возможность использования низковольтовых (до 200 В) сильноточных (до 30 А) полевых транзисторов, например типа IRFP4668, имеющих весьма быстрый собственный обратный диод. ($\tau_{\text{д}}$=50 нс) и малую длительность фронта переключений ($t_{\text{ф}}\leq$30 нс) при собственной ёмкости $C_{\text{к}}$ не более 0,5 нФ.

Совокупность технических решений, связанных с применением многоканальной ШИМ и понижения напряжения электропитания, позволяет более чем на порядок сократить динамические потери энергии, что принципиально значимо для перехода к ультразвуковому диапазону с верхней рабочей частотой до 100 кГц.

В результате, для высокочастотных схем ключевого усиления может быть обеспечено оптимальное соотношение статических и динамических потерь энергии при $P_{\text{д}}$ = (1-2) % и $P_{\text{с}}$ = (0,5-1) %. При этом, даже с учетом потерь энергии в устройствах согласования и фильтрации, относительные потери энергии могут быть не более (4-6) %.

Создание функционально и конструктивно законченных приборов широкополосных усилителей мощности требует включения в их состав устройств силового и сервисного электропитания, по удельным показателям близких к устройствам усиления. Несмотря на двукратное увеличение габаритов и тепловыделения, такой подход оправдан удобством применения испытательного оборудования в стендовых и объектовых условиях.

Рассмотренные принципы построения широкополосных ключевых усилителей звукового и ультразвукового диапазона положены в основу создания специального испытательного оборудования для исследования ГАП. В настоящее время в АО ”НИИ ”Бриз” разработан и прошел испытания прибор УМ НЧ (усилитель мощности низкочастотный) с номинальной мощностью 500 ВА и полосой частот от 0,1 кГц до 100 кГц. Внешний вид прибора и основные технические характеристики представлены в табл.1 и на рис.2.

В рамках поставленной задачи поддиапазонного согласования, принята схема переключений двух поддиапазонов с реализацией в УМ НЧ раздельных групп усилителей с перекрытием диапазонов рабочих частот. В условиях такой структуры реализации, приборы усилителей

мощности обеспечили ранее недостижимые показатели КПД 90 % при удельной мощности порядка 30-60 Вт/дм^3, что значительно (в 3-5 раз) позволило сократить габариты и тепловыделение ранее используемого испытательного оборудования при сохранении преимуществ высокого качества, широкополосности выходных сигналов, удобства применения в стендовых и объектовых условиях.

Таблица 1. Основные характеристики УМ НЧ.

Наименование параметра		Значение
Максимальная выходная мощность, не менее, ВА		800
Максимальное выходное напряжение (по поддиапазонам), не менее, В	0,1-10 кГц 0,1-20 кГц 10-100 кГц	300 150 70
Динамический диапазон усиления, дБ		40
Максимальный уровень входного сигнала, В		1
ШхГхВ, мм		450x360x140
Масса, кг		20

Рис.2. Прибор УМ НЧ.

Литература

1. Артым А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. М.: Связь. 1987 г.
2. Патент РФ № 2573229. Модуль ключевого усилителя мощности. /В.А. Александров, П.А. Киселёв, А.В. Куреной. Приоритет от 15.12.2014, Опубликован в БИ 17.12.2015.
3. Александров В.А., Калашников С.А., Киселев П.А.. Потери энергии в усилительных устройствах гидроакустических передающих трактов// Труды VI международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», СПб: Наука, 2002. С.360-364.

КЛЮЧЕВЫЕ НОРМАЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

В.А.Александров, д-р техн.наук, К.В.Игнатьев, С.А.Калашников
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

KEY VOLTAGE NORMALIZERS OF POWER SUPPLY OF SONAR EQUIPMENT

V.A.Aleksandrov, Dr.Sc., K.V.Ignatiev, S.A.Kalashnikov
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Рассмотрены особенности электропитания наиболее энергоемкой гидроакустической аппаратуры. Показана целесообразность применения централизованных узлов устранения перенапряжений, пусковых токов и экстратоков при неисправности потребителей. Приведены результаты разработки технических решений ключевых нормализаторов напряжений, обеспечивающих режимы ограничения выходного тока и напряжения. Представлены данные оценки режимов работы и приведены рекомендации по применению ключевых нормализаторов напряжения в централизованных трактах электропитания.

Features of power supply of the most power-intensive sonar equipment are considered. Reasonability of application of centralized nodes of elimination of overvoltage, starting currents and extra currents at fault condition of consumers is shown. Results of development of technical solutions of key voltage normalizers providing modes of output current and voltage restriction are given. Estimates of operation modes and recommendations on the use of key voltage normalizers in centralized subsystems of power supply are provided.

Функциональная аппаратура гидроакустических комплексов (ГАК) характеризуется значительной мощностью потребления в условиях жестких требований к габаритам и тепловыделению модулей и приборов системы электропитания. При этом задача проектирования средств силового и сервисного электропитания в корабельных условиях усугубляется широким диапазоном изменения напряжения объектовой электросети, а также наличием кратковременных перенапряжений и импульсных коммутационных помех (ИКП). Так, например, для объектовой сети переменного тока ~3ф, 50 Гц, 380 В нестабильность напряжения электропитания не превышает (+7, –25) % при наличии кратковременных перенапряжений более 25 % и ИКП амплитудой до 800 В. Для объектовой сети постоянного тока (175-320) В кратковременные перенапряжения достигают 450 В при амплитуде ИКП до 1000 В.

Выделенный диапазон максимальных перенапряжений принципиально влияет на выбор схемотехнических решений и элементной базы для реализации модулей вторичного электропитания, во многом определяя массо-габаритные показатели, надежность и энергетическую эффективность аппаратуры ГАК. Ранее диапазон изменения напряжения объектовой сети непосредственно определял тепловыделение линейных стабилизаторов напряжения, КПД которых не превышает (30-50)%. Для суммарного энергопотребления функциональной аппаратуры ГАК в десятки и сотни кВт соизмеримые показатели тепловыделения средств вторичного электропитания приводили к двукратному увеличению габаритов приборов бортовой части гидроакустического вооружения надводных кораблей и подводных лодок.

Преодолеть кризис развития устройств силовой электроники для гидроакустики позволило широкое использование ключевых преобразователей напряжения (КПН), КПД которых достигает 90-95%. Однако эффективность таких устройств также заметно снижается при существенном (в ряде случаев кратном) превышении напряжения электропитания номинальных значений. Кроме того характерной особенностью таких устройств является необходимость использования входного конденсатора удельной емкостью, как правило, не менее 1 мкФ/Вт. Соответственно, для отдельных трактов электропитания при мощности потребления десятки кВт суммарная входная емкость достигает 10 000 мкФ, что требует реализации специальных мер ограничения токов включения напряжения объектовой сети. При этом для ряда потребителей большой мощности с целью предотвращения расширения возможной зоны выхода из строя децентрализованных потребителей целесообразно реализовать отключение неисправных каналов при сохранении функционирования остальной части аппаратуры.

Выделенные задачи ограничения максимальных перенапряжений, плавного включения напряжения объектовой сети и отключения неисправных потребителей наиболее эффективным образом решаются применением ключевых нормализаторов напряжения (КНН) различных модификаций. Диапазон перенапряжений на входе КНН определяется структурой построения централизованной части тракта электропитания (ТЭП). Как правило, для подавления ИКП используются централизованные звенья на основе различных схем ограничения амплитуды им-

пульсов, например, с включением между шинами электропитания силовых стабисторов. Такие звенья позволяют уменьшить перенапряжение до (50-70)% от номинального напряжения. В результате с учетом кратковременных перенапряжений задачей КНН является стабилизация максимального выходного напряжения при двукратном увеличении напряжения в сети электропитания. При этом предъявляются требования возможного увеличения выходного напряжения не более чем на (5-10)%, что требует введения отрицательной обратной связи глубиной не менее 20-30 дБ.

В общем случае, звено КНН представляет собой ключевой регулятор напряжения (КРН), ограничивающий перенапряжения первичного электропитания и транслирующий на выход напряжение не более максимально допустимого уровня.

Традиционно, однотактный прямоходовой КРН с бестрансформаторным выходом (рис.1) использует модуляцию длительности импульсов (ШИМ) для регулировки и стабилизации выходного напряжения [1,2]. Сигнал ШИМ формируется в результате сравнения разностного сигнала U_p с опорным пилообразным напряжением, чем обеспечивается компенсационный метод регулирования с отрицательной обратной связью (ООС). Выходной ток I_L КРН определяется импульсным напряжением V подключенным через дроссель L1 к емкостному фильтру C1 и нагрузке $R_н$. В условиях непрерывного тока дросселя во время импульса ток замыкается через транзистор VT1 ($i_т$), а во время паузы через диод VD1 ($i_д$). В результате изменения длительности импульса изменяется выходной ток дросселя и напряжение на нагрузке. При введении комбинированной ООС по импульсному напряжению и напряжению на нагрузке в КРН может обеспечиваться глубина ООС (16-20 дБ), что позволяет реализовать стабилизацию выходного напряжения. При необходимости схема КРН может быть дополнена ООС по выходному току, чем достигается режим ограничения выходного тока при перегрузке либо при начальном заряде емкости нагрузки.

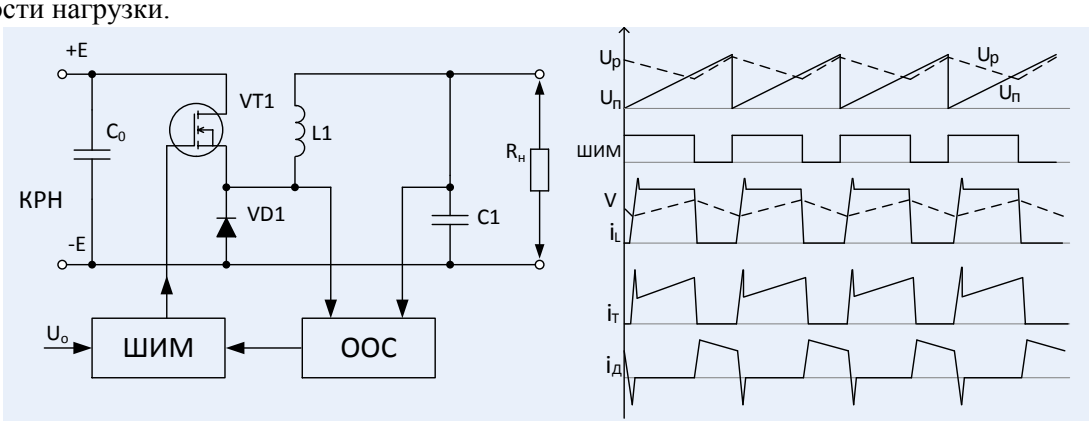


Рис. 1. Оконечный каскад однотактного ключевого регулятора
и временные диаграммы сигналов, поясняющие его работу.

Необходимое увеличение глубины ООС в КРН для решения задач нормализации напряжения может достигаться применением асинхронной модуляции [3], где формирование ШИМ сигнала обеспечивается релейным элементом (РЭ-коммутатор с амплитудным гистерезисом) по результату сравнения заданного опорного сигнала с сигналом обратной связи. Для реализации режимов ограничения выходного напряжения или выходного тока могут быть использованы интегральный сигнал обратной связи по выходному импульсному напряжению или сигнал с датчика тока дросселя выходного фильтра.

При асинхронной ШИМ (АШИМ) период переключений КНН может изменяться в широких пределах согласно известному соотношению [3]:

$$T = \frac{4\delta \cdot \tau_u}{U\,(1-U)},$$

где τ_u – постоянная времени интегрирования, δ – относительная ширина гистерезиса, $U = U_н/E_{max}$ – относительное напряжение на нагрузке.

Здесь следует обратить внимание на две важные закономерности. Для режима ограничения напряжения на уровне $U_н = U_{max}$ при уменьшении перенапряжения наблюдается увеличение периода переключений и перехода канала КРН в открытое состояние для $U_н \le U_{max}$.

Аналогичным образом обеспечивается существенное увеличение периода переключений и малых значений U в режимах перегрузки и короткого замыкания.

Выделенное обстоятельство позволяет существенно уменьшить динамические потери энергии в экстремальных режимах и практически минимизировать тепловыделение в номинальном режиме.

Вместе с тем переход к АШИМ существенно затрудняет применение многоканальных схем КПН, позволяющих реализовать потенциал многоканальной ШИМ при кратном увеличении суммарной частоты переключений и значительном уменьшении пульсаций тока потребления.

Разработана и исследована оригинальная схема двухканального КНН с АШИМ с взаимной синхронизацией каналов. Функциональная схема такого устройства приведена на рис.2а, временные диаграммы, иллюстрирующие режим регулирования выходного напряжения на рис.2б. При этом введение перекрестных связей через дифференцирующие цепи с выходов релейных элементов обеспечивают практически противофазную работу каналов ключевого усилителя. В результате минимизируются высокочастотные пульсации входного и выходного тока КНН.

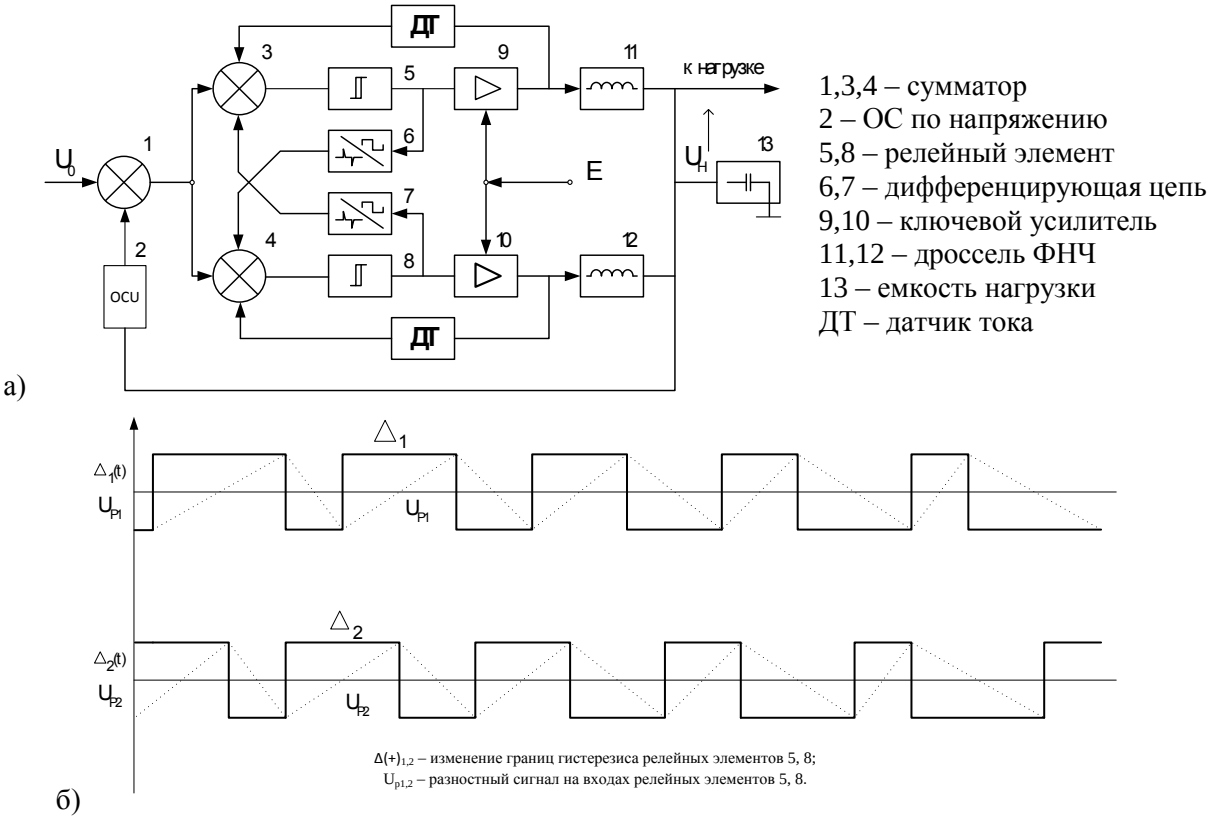


Рис. 2. Функциональная схема двухканального КНН с АШИМ (а) и диаграммы сигналов режима регулирования выходного напряжения двухканального КНН с АШИМ (б).

Проведены исследования математической и физической моделей двухканального КНН, результаты которых подтвердили эффективность применения предложенной схемы в режимах ограничения выходного напряжения и выходного тока. Реализованы модули КНН на высоковольтных IGBT и MOSFET транзисторах, рассчитанные на номинальную выходную мощность 15 кВт при максимальном выходном напряжении (630±10) В и условиях перенапряжений по электропитанию до 1000 В. В режиме перегрузки достигается ограничение максимального выходного тока до 40 А. Предложенные технические режимы внедрены в трактах силового электропитания генераторных устройств большой мощности таких изделий как, «И-А-Б», «Кижуч», «Олимп», «Минотавр».

Литература

1. Александров В.А., Басов В.В., Никитин К.К. Корабельные судовые средства электропитания // Гидроакустика. 2016. Вып. 26. С.95-103.
2. Александров В.А., Куликов А.В., Полухина А.М. Результаты проектирования и апробация приборов многоканальных широкополосных усилителей с трактом электропитания от сети объекта// XII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Труды конференции СПб: Наука. 2014. С.126-129.
3. Александров В.А. и др. Длительность импульсных процессов в усилителях со смешанной широтно-импульсной модуляцией// Вопросы судостроения, серия Общетехническая. Вып. 69. С.68-73.

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ТРАКТАХ

Е.Ю.Ермолаева[1], С.А.Калашников, П.А.Киселев[1]
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия
[1]АО «НИИ «Бриз», Санкт- Петербург, Россия

FEATURES OF APPLICATION OF SIGNALS WITH PHASE MODULATION IN THE HYDROACOUSTIC RADIATING SUBSYSTEMS

E.U.Ermolaeva[1], S.A.Kalashnikov, P.A.Kiselev[1]
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia
[1]JSC «SRI «Briz», St. Petersburg, Russia

Рассмотрены особенности фазовой модуляции сигналов возбуждения гидроакустических излучающих антенн. Исследованы переходные процессы в гидроакустических преобразователях (ГАП) с использованием полных электрических схем замещения и определены минимально допустимые периоды фазовой модуляции. Показано, что применение временной регулировки амплитуды сигналов возбуждения позволяет уменьшить длительность результирующих переходных процессов при минимизации экстремальных амплитудных токов и напряжений ГАП. Приведены данные применения переходной частотной модуляции сигнала для улучшения показателей фазовой манипуляции применительно к использованию высокоэффективных ключевых генераторных устройств.

Features of phase modulation of drive signals of the hydroacoustic radiating antennas are considered. Transition processes in sonar transducers (ST) with use of full electric equivalent circuits are investigated and minimum admissible periods of phase modulation are defined. It is shown that application of temporary adjustment of amplitude of drive signals allows to reduce duration of the resulting transition processes at minimization of extreme amplitude currents and voltage of ST. These applications of transitional frequency modulation of signal for improvement of indicators of phase shift keying in relation to use of highly effective key generating devices are given.

Частотно-модулированные и фазомодулированные сигналы широко используются в гидроакустике для обеспечения режимов гидролокации и гидросвязи. В последнее время повсеместное применение получили фазоманипулированные сигналы, реализующие инверсию фазы излучаемых акустических колебаний как для расширения потенциала когерентной отработки в системах подводного наблюдения, так и для передачи цифровой информации по гидроакустическому каналу, а также ряда других задач позволяющих улучшить тактикотехнические характеристики гидроакустического вооружения. Причем в большинстве случаев реализация технических мероприятий в этом направлении не учитывает особенности генерирования сигналов с резкими частотными и фазовыми изменениями в мощных передающих трактах, возбуждающих гидроакустические излучающие антенны.

Первый опыт использования фазоманипулированных сигналов в тиристорных генераторных устройствах режима гидролокации изделия «Полином» отмечен неоднократными выходами из строя каналов передающего тракта. Только после реализации комплекса мер по повышению устойчивости тиристорных генераторов и ограничению фазовых скачков сигналов управления не более чем на $\pi/8$ была обеспечена безотказная работа изделия в режиме излучения сложных сигналов такого вида.

С переходом к транзисторным генераторным устройствам на основе ключевых усилителей мощности возможности генерации сложных широкополосных сигналов были существенно расширены. Для новых разработок передающей аппаратуры режимов гидролокации и звукоподводной связи применены усилители класса D с динамическим ограничением выходного тока [1], что обеспечивает их устойчивую работу в условиях резкого изменения параметров входных сигналов и импеданса нагрузки. Последнее обстоятельство позволило ввести режимы генерации фазоманипулированных сигналов, не предусмотренные на стадии разработки передающей аппаратуры. При этом определение минимального периода фазовой манипуляции проведено без учета переходных процессов в генераторных устройствах и излучающих антеннах. Соответственно не реализованы технические мероприятия по минимизации временных и амплитудных ударов сигналов в согласующих устройствах и гидроакустических преобразователях.

Для устранения выделенных недостатков и оптимизации режимов работы излучающих трактов обратимся к особенностям применения фазовой манипуляции в мощных генераторных устройствах. В общем случае фазоманипулированный синусоидальный сигнал частотой ω может быть определён выражением:

$$U(t) = m \cdot \sin(\omega t) \cdot H(\Omega t),$$

где $H(\Omega t) = sign[\sin(\Omega t + \Theta)]$.

Как правило, ключевая функция *H(Ωt) = {1;-1}* имеет частоту Ω изменения существенно ниже частоты *ω* сигнала. Для ряда задач требуется минимизация отношения *ω/*Ω, что, в отсутствии понимания переходных процессов в цепях излучающего тракта, реализуется в ущерб надежности работы генераторных устройств и достижению требуемой инверсии фазы гидроакустического сигнала. При этом пренебрегается существенное обогащение спектра генерируемого сигнала, особенно значимое для энергетически эффективных мощных генераторов на основе ключевых усилителей мощности.

В простейшем случае фазовой манипуляции аналогового квазигармонического сигнала, спектр результирующего напряжения с учетом известного разложения *H(t)* в ряд тригонометрических функций определяется соотношением:

$$U(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2m}{n\pi} cos(\omega_n t + \varphi_n),$$

где $\omega_n = \omega \pm n\Omega$ для *n = (1, 3, 5,…).*

При использовании ключевого генераторного устройства. Формирующего импульсный сигнал типа меандр, спектр результирующего напряжения *V(t)* обогащается верхними гармоническими и комбинационными составляющими с частотами $\omega_{nk} = k\omega \pm n\Omega$ где *k = (1, 3, 5,…)*:

$$V(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8m}{n\pi^2} cos(\omega_{knt} + \varphi_{kn}).$$

Еще более усложняется спектральный состав результирующего импульсного напряжения в случае применения ключевого усилителя с широтно-импульсной модуляцией (усилители класса D) [2].

В этом случае в спектре исходного квазигармонического сигнала присутствует комбинационные составляющие с частотами $l\omega_0 \pm k\omega$, группирующиеся вокруг гармоник частоты ШИМ-преобразования, которая, как правило, значительно выше частоты $\omega \leq 0{,}1\omega_0$. Вместе с тем, усилители класса D по качеству выходных сигналов после фильтров нижних частот весьма близки к линейным усилителям напряжения, что упрощает анализ их работы в режимах усиления фазоманипулированного сигнала.

Временные диаграммы выходных напряжений оконечных каскадов генераторов на основе линейных усилителей, ключевых генераторов и усилителей класса D для фазоманипулированных сигналов приведены на рис.1а-в. Иллюстрация временных диаграмм показана для целочисленного соотношения частот $N = \omega/\Omega$ и совпадении фаз модулирующего сигнала и ключевой функции фазовой манипуляции. Известные моменты инверсии фазы позволяют использовать временное управление амплитудой, плавно уменьшая и увеличивая уровень сигнала до и после фазовой манипуляции. При этом возможно принципиальное уменьшение экстремальных значений токов и напряжений во время переходных процессов, связанных с изменением фазы сигнала возбуждения гидроакустического преобразователя.

Для анализа переходных процессов может быть использована модель канала излучающего тракта (рис.2), включающего полную эквивалентную схему замещения ГАП и эквивалентный генератор напряжения фазоманипулированного сигнала с выходным фильтром нижних частот (ФНЧ), параметры которого определяются типом усилительного устройства. В рамках энергоэффективных ГУ возможно применение КУМ с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) и с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Основные переходные процессы связаны с наличием высокодобротного рабочего контура нагрузки $L_k\, C_k\, R_k$, где параметр *Q*, как правило, превышает 3…5. Что для резонансной частоты возбуждения $\omega = \omega_k$ соответствует длительности переходных процессов T_k:

$$T_k \cong \frac{2\pi}{\omega} Q_k,$$

где $Q_k = \frac{1}{Rk} \cdot \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$ – добротность контура.

В меньшей степени на переходные процессы влияют параметры ФНЧ, обеспечивающего выделения на нагрузку полезного сигнала возбуждения ГАП. Здесь длительность переходных процессов $T_ф$ определяется соотношением:

$$T_ф \cong \frac{2\pi}{\omega_ф} Q_ф, \text{ где } Q_ф = R_k / \sqrt{\frac{L_0}{C_0}},\ \omega_ф \cong \omega_k.$$

Собственная частота фильтра определяется типом примененного КУМ. Для случая КУМ с АИМ $\omega_ф \cong \omega_k$. Для КУМ с ШИМ заданная индуктивность дросселя $L_ф$ при собственной емкости ГАП C_0, выбирается из условий:

$$\omega_{\text{ф}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{ф}} C_0}} > 2\omega_k.$$

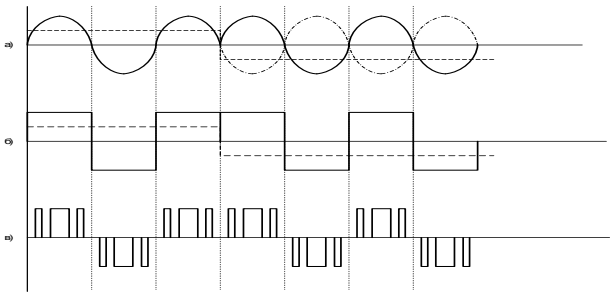


Рис. 1. Временные диаграммы выходных напряжений ГУ.
а - линейный усилитель, б - ключевой генератор, в - ключевой усилитель с ШИМ.

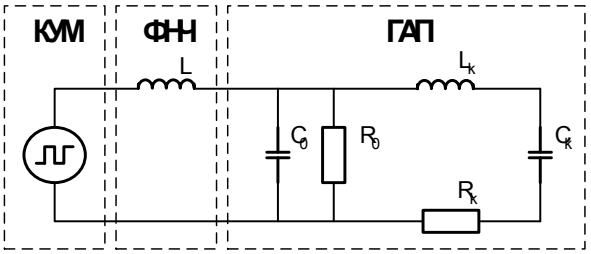


Рис. 2. Модель канала излучающего тракта.
КУМ – ключевой усилитель мощности
ФНЧ – фильтр нижних частот
ГАП – гидроакустический преобразователь.

В результате наличие ФНЧ увеличивается длительность переходных процессов примерно на величину $T_\phi = 2\pi R_k C_0$.

Таким образом, суммарный временной интервал T_n, необходимый для инверсии фазы сигнала с минимальным периодом T_{min} фазовой манипуляции, может быть оценен из условия $T_{min} \geq T_n \approx T_k + T_\phi$.

Предложенная методика оценки минимального периода фазовой манипуляции для излучающего тракта подтверждена данными численных расчетов проведенных для высокочастотного ГУ изделия «Фактор» при ГАП с центральной частотой $\omega_k \approx 75$ *кГц* и добротностью $Q_k \approx 4$. При расчетах принята модель ГУ на основе КУМ с ШИМ с постоянной времени $T_\phi \approx 2\pi/\omega_k$. Результаты численных расчетов при фазовой манипуляции напряжения на входе ФНЧ и напряжения на активной составляющей нагрузки иллюстрируется на рис.3а (см. вклейку), выходного тока на рис.3б. Анализ расчетных зависимостей показывает завершение переходных процессов через $T_n \approx T_k + T_\phi = 4T_p$, где $T_p = 2\pi/\omega$ – период рабочего сигнала.

Также следует отметить значительные изменения амплитуды выходного тока, максимальные значения которого более чем на 50 % превышают уровень амплитуды в установившемся режиме.

Устранить экстремальные изменения выходного тока усилителя при переходных процессах позволяет использование временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) до и после момента фазовой манипуляции. На диаграммах сигналов, представленных на рис.4 (см. вклейку), показано, что при введении ВАРУ на интервале 2-3 периода рабочей частоты обеспечивается плавное уменьшение и нарастание выходного тока, практически без увеличения длительности переходного процесса $T_п$.

Интересным направлением смягчения переходных процессов при фазовой манипуляции выходного сигнала ключевых генераторов является применение переходной частотной модуляции. Для инверсии фазы импульсного напряжения достаточно провести изменение периода переключений на (10…25) % во временном интервале (10 – 4) периода выходного сигнала. В результате обеспечивается минимизация переходных процессов не хуже, чем в случае использования ВАРУ в усилителях класса D при некотором увеличении минимального периода фазовой манипуляции.

Проведенный анализ убедительно показывает необходимость реализации технических мероприятий для уменьшения экстремальных режимов работы мощных ключевых генераторных и усилительных устройств при формировании фазоманипулированных сигналов возбуждения гидроакустических преобразователей. При этом существенно улучшаются условия работы передающих трактов в условиях допустимого увеличения минимального периода фазовой манипуляции.

Литература

1. Пат.РФ 2574813 «Многоканальный ключевой усилитель класса D». В.А. Александров, Ю.В. Казаков, С.А. Калашников. Приор.15.12.2014, опубл. 14.01.2016.
2. Артым А.Д. «Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании». М.: Связь. 1980. 209с.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

К.В.Игнатьев, Ю.В.Казаков, Л.В.Маркова
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

FEATURES OF USE OF FEEDBACK KEY AMPLIFIERS WITH PULSE-WIDTH MODULATION

K.V.Ignatiev, U.V.Kazakov, L.V.Markova
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Показаны преимущества многоканальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в широкополосных ключевых усилителях мощности. Выделена особенность реализации многоканальных схем ключевого усиления в части уменьшения относительной величины ВЧ-составляющих в суммарном выходном сигнале. Обоснованы преимущества применения интегральной ШИМ в передающих устройствах такого типа и доказана возможность кратного увеличения глубины обратной связи (ОС). Приведены иллюстрации зависимостей коэффициента петлевого усиления для ключевых усилителей с 1-,2-,4-канальной ШИМ.

Benefits of multichannel pulse width modulation (PWM) in broadband key power amplifiers are shown. Feature of implementation of multichannel schemes of key amplification regarding reduction of relative value of HF components in a total output is marked out. Benefits of application of integral PWM in transmitting devices of this kind are validated and possibility of multiple increase in amount of feedback is proved. Illustrations of dependences of coefficient of loopback gain for key amplifiers from 1-,2-, 4-channel PWM are given.

При разработке передающей аппаратуры гидроакустического тракта одним из основных критериев, определяющих габариты, особенности конструкции и выбор схемотехнических решений усилительных устройств, является фактор потери энергии, связанный с процессом преобразования электроэнергии бортовой (первичной) сети в энергию сигналов возбуждения излучающих антенн.

Знание факторов, определяющих потери в мощных широкополосных усилителях гидроакустических сигналов, позволяет не только рассчитать энергетическую эффективность аппаратуры передающих трактов, но и решать задачи эффективного теплоотвода, выбора способа усиления и применение подходящей по назначению элементной базы.

В условиях отсутствия методических рекомендаций по использованию способов усиления в гидроакустическом передающем тракте (ГАПТ), разработчик до настоящего времени ошибочно отдает предпочтение линейным усилителям мощности как более простым в построении. Причем в ряде случаев характеристики качества выходных сигналов достигаются в ущерб надежности и энергетической эффективности ГАПТ.

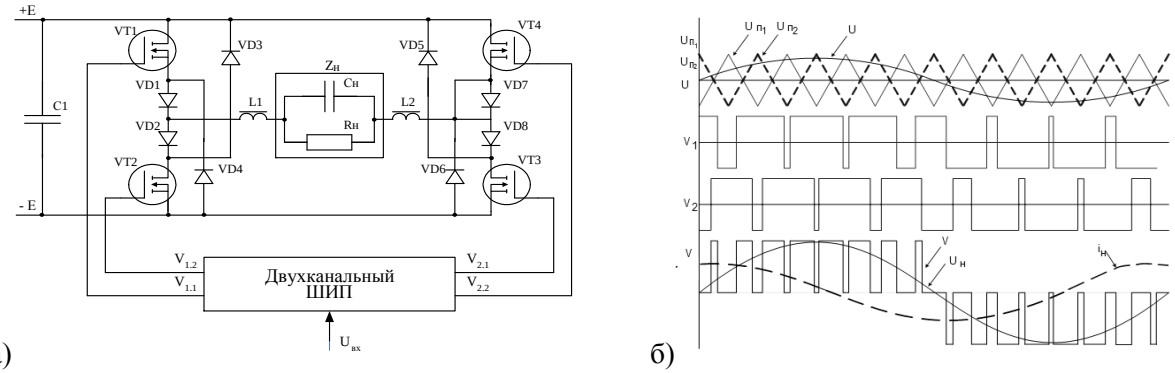
Кроме низкой эффективности, линейные усилители мощности имеют еще один принципиальный недостаток, не преодоленный до настоящего времени, связанный с отсутствием возможности рекуперации энергии из реактивной составляющей нагрузки, что крайне важно для усилительных устройств, нагрузкой которых является гидроакустический преобразователь. Устранить этот недостаток позволяет переход к усилительным устройствам с рекуперацией реактивной энергии нагрузки при построении широкополосных ГАПТ.

Такими свойствами обладают усилительные устройства класса D [1], где ключевое усиление по мощности модулированных импульсных последовательностей обеспечивается посредством чередования циклов передачи и рекуперации электроэнергии, достигается их принципиальное отличие от линейных усилителей мощности. В ключевом режиме работы полупроводниковые приборы имеют малые остаточные напряжения и осуществляют коммутацию тока дросселя ФНЧ в соответствии с широтно-модулированными импульсными сигналами управления в циклах потребления и возврата энергии источника электропитания. Таким образом, метод ключевого усиления обеспечивает возбуждение нагрузки и рекуперацию энергии из ее реактивной составляющей при малых потерях энергии на ключевых элементах.

Существенно расширить потенциал усилителей класса D позволяет внедрение метода многоканальной ШИМ, основанного на формировании ряда последовательностей импульсов, модулированных по длительности и равномерно сдвинутых по фазе. Наиболее простым образом такой метод реализуется для синхронной ШИМ. Модулированные импульсные последовательности определяются при сравнении низкочастотного модулирующего сигнала с рядом опорных пилообразных напряжений, равномерно сдвинутых во времени. Таким образом, в результате сложения выходных сигналов каналов ключевого усиления с модуляцией такого вида, образу-

ется суммарное импульсное напряжение улучшенной формы при существенном уменьшении высокочастотных компонент в спектре выходного сигнала.

На рис. 1 иллюстрируются мостовая схема ключевого усилителя и временные диаграммы сигналов для двухканальной ШИМ, показывающие преимущества перехода к многоканальным схемам в части повышения суммарной частоты переключений и улучшения формы результирующего импульсного напряжения.



а) б)

Рис. 1. Структурная схема мостового ключевого усилителя с двухканальной ШИМ (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу (б).

Ключевые усилители класса D с ШИМ, наряду с высокой эффективностью, имеют специфические искажения сигналов, связанные с неидеальностью полупроводниковых приборов в ключевом режиме работы, уровень которых может достигать 7%. Для оценки показателей качества выходных сигналов ключевых УНЧ следует отличать два вида искажений: первый вид искажений – нелинейные искажения, связанные собственно с дискретизацией аналогового сигнала и определяемые видом метода импульсного преобразования в предположении идеальности устройств ключевого усиления; второй вид искажений связан в первую очередь с неидеальностью ключевых элементов, наличием задержек переключения, остаточными напряжениями на транзисторах и диодах в открытом состоянии, эффектом «обрыва тока» дросселя ФНЧ.

Для уменьшения искажений первого вида необходима оптимизация методов импульсного преобразования с возможностью перехода к многоканальной ШИМ для увеличения отношения частоты дискретизации к верхней частоте усиливаемого сигнала. Искажения второго вида могут быть уменьшены оптимизацией схемотехнических решений и режимов работы устройств ключевого усиления, а также введением обратной связи (ОС). До настоящего времени этому виду искажений уделялось недостаточное внимание, что препятствовало обоснованному выбору вида и глубины ОС.

Для устранения искажений, обусловленных неидеальностью ключевых элементов в условиях работы на комплексную нагрузку с изменяющимся в широких пределах импедансом, наиболее эффективным средством является применение обратной связи по импульсному напряжению через интегрирующее звено. Схема усилителя с интегральной ШИМ приведена на рис. 2.

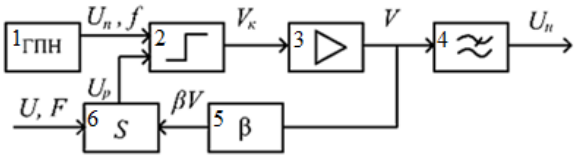


Рис. 2. Функциональная схема усилителя с интегральной ШИМ.
1- генератор опорного пилообразного напряжения; 2- сравнивающее устройство; 3- усилитель; 4- ФНЧ; 5- петля ОС; 6- усилитель разностного сигнала.

Особенностью метода ключевого усиления с интегральной ШИМ является формирование последовательности импульсов по результату сравнения усиливаемого сигнала и сигнала обратной связи.

Проникновение высокочастотных (ВЧ) компонент сигнала ОС через интегратор в тракт формирования модулированной импульсной последовательности приводит к дополнительной модуляции длительности и фазового положения импульсов. Повышение глубины обратной связи связано с ростом ВЧ составляющих сигнала на входе широтно-импульсного преобразователя

(ШИП), наличие которых существенно изменяет условия формирования импульсного напряжения. Для ключевых УНЧ с интегральной обратной связью, ВЧ составляющие разностного сигнала являются результатом интегрирования входного сигнала u и сигнала отрицательной обратной связи $U_{\text{ос}}$:

$$U_{\text{и}}(t) = U_{\text{и}}(t_0) + \int_{t_0}^{t}[u(t) - U_{\text{ос}}(t)]dt/\tau_{\text{и}};\ U_{\text{ос}} = \beta E_0 E(t),$$

где $U_{\text{и}}$ - напряжение разностного сигнала на выходе интегратора, β, $\tau_{\text{и}}$ - коэффициент передачи обратной связи и постоянная времени интегрирования, $E(t)$, E_0 - нормированная функция и амплитуда импульсного сигнала.

Для одноканального ключевого усилителя оценка предельной глубины ОС определяется при максимально допустимом значении коэффициента петлевого усиления на частоте переключений:

$$\gamma = \frac{\beta E_0 T}{U_{\text{пм}}\tau_{\text{и}}} < \gamma_{\text{ВЧ}} = \min[1/(1+U); 1/(1-U)],$$

где T, $U_{\text{пм}}$- период и амплитуда опорного пилообразного напряжения, U=u/E_0- нормированное значение входного сигнала U=(1… -1).

Ранее проведенные исследования показывают ограничение величины коэффициента петлевого усиления при симметричной одноканальной ШИМ значением γ_{max}=2, что соответствует глубине обратной связи не более 10 дБ при частоте сигнала не более 0,1 от частоты переключений. Вместе с тем, до настоящего времени не определены особенности применения интегральной многоканальной ШИМ и не исследованы возможности повышения глубины интегральной обратной связи.

В первом приближении соотношения, определяющие предельную глубину ОС такого типа для одноканального ключевого усилителя, могут быть использованы для оценки устойчивости от режима ВЧ возбуждения для отдельных зон суммарного импульсного сигнала при многоканальной ШИМ, в которых выделяется последовательность импульсов с кратно (в N раз) уменьшенной относительной амплитудой импульсов и повышенной частотой следования. В результате имеет место повышение границ устойчивости работы в N раз. Расчетные зависимости граничных значений петлевого коэффициента усилений на частоте отдельных каналов для одно-, двух- и четырехканальной ШИМ приведены на рис. 3б (см. вклейку). Соответствующие зависимости глубины интегральной ОС для относительной частоты Ω/ω при значениях γ=2;4;8, соответствующих условиям устойчивости работы для одно-, двух- и четырехканальных ключевых усилителей с интегральной ШИМ, иллюстрируются на рис. 3а.

Проведенные исследования подтверждают возможность кратного увеличения глубины интегральной ОС при внедрении многоканальной ШИМ, что существенно расширяет возможности применения такого метода компенсации для уменьшения нелинейных искажений в ключевых усилителях большой мощности. Отмеченное обстоятельство особенно важно для разработки широкополосных передающих трактов режимов гидросвязи. В таких устройствах десятикратное уменьшение гармонических искажений выходных сигналов имеет принципиальное значение для повышения качества и надежности передачи информации по гидроакустическому каналу. Таким образом, применение многоканальных ключевых усилителей с интегральной ШИМ можно выделить как основное направление реализации широкополосных передающих устройств с улучшенными энергетическими характеристиками и показателями качества сигналов возбуждения гидроакустических излучающих антенн. Из графиков видно, что для устойчивой работы усилителя при 1-канальной ШИМ γ<4, для 2-канальной γ<8, для 4-канальной γ<16.

Таким образом, обеспечивается достижение глубины ОС (20-30) дБ, что позволяет повысить качественные характеристики выходного сигнала широкополосных усилителей мощности с ШИМ до уровня нелинейных искажений, не превышающих 1,5 %.

Уменьшение нелинейных искажений при реализации интегральной ОС обеспечивает повышение распознаваемости сигналов режима связи, что в свою очередь позволяет повысить дальность связи или уменьшить уровень излучаемой мощности. При этом, незначительный уровень внеполосных составляющих в спектре излучаемых сигналов уменьшает фактор демаскирования при активных режимах работы гидроакустических станций.

Литература

1. Артым А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. М.: Связь. 1980.
2. Алексанян А.А., Галахов В.А., Можейко В.Л. Устойчивость усилителя низкой частоты класса D с отрицательной обратной связью// Радиотехника. 1988. N 3.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

А.К.Батанов, Б.М.Бродский, канд.техн.наук, А.И.Машошин, д-р техн.наук
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

NEW TECHNOLOGIES OF SUBMARINE SONAR ANTENNAS DEVELOPMENT

A.K.Batanov, B.M.Brodski, Ph.D., A.I.Mashoshin, Dr.Sc.
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Излагаются новые технологии создания гидроакустических антенн для подводных лодок, которые позволят обеспечить повышение их электроакустических и эксплуатационных характеристик, а также технологичности их изготовления, испытаний и монтажа на носителе.

The presented new technologies of submarine sonar antennas development ensure the improvement of their electro-acoustical and operational characteristics and manufacturability.

Гидроакустические антенны (ГАА) являются основным элементом гидроакустических комплексов подводных лодок (ПЛ). Известно образное изречение бывшего директора ЦНИИ "Морфизприбор" Н.Н.Свиридова: "Гидроакустический комплекс не может быть лучше своей антенны". Учитывая это, развитию ГАА необходимо уделять первостепенное внимание. Это развитие должно осуществляться в направлениях повышения:

– электроакустических характеристик;

– технологичности изготовления, испытаний и монтажа на ПЛ и, как следствие, снижение их стоимости;

– эксплуатационных характеристик.

Целью доклада является изложение новых технических и технологических решений создания приёмных ГАА, которые позволят обеспечить продвижение в перечисленных направлениях.

Рассматриваются многоэлементные ГАА с электронным сканированием как с пьезокерамическими, так и с волоконно-оптическими гидроакустическими приёмниками (ГАП). Вследствие ограниченности размеров доклада рассматриваются технологии повышения характеристик только забортных приборов ГАА.

Повышение электроакустических характеристик ГАА

К новым техническим и технологическим решениям, обеспечивающим повышение электроакустических характеристик ГАА относятся:

– повышение помехоустойчивости ГАА за счет сокращения амплитудного разброса ГАП;

– повышение виброустойчивости ГАП путем изменения его конструкции;

– уменьшение коэффициента звукоотражения ГАА за счет применения звукопоглощающих экранов;

– расширение секторов обзора ГАА в горизонтальной и вертикальной плоскостях путем применения безобтекательной конструкции ГАА.

Рассмотрим перечисленные решения подробнее.

Для сокращения амплитудного разброса пьезокерамических ГАП целесообразно воспользоваться следующими мерами:

– повысить в 3 раза частоту резонанса ГАП, что позволит весь рабочий диапазон частот ГАА расположить на линейной (плоской) части частотной характеристики пьезоэлементов. Для этого необходимо разработать новый тип пьезокерамики;

– разработать технологию более точного (в 1,5-2 раза) измерения параметров пьезокерамических блоков (ПКБ), поступающих с завода-изготовителя керамики. Технология состоит в применении для контроля параметров ПКБ, вместо традиционно используемого прижимного устройства типа "крокодил", прижимного электрического контакта, имеющего малую присоединенную массу (не более 0,3 г) и высокую гибкость;

– распределять ПКБ, поступающие с завода-изготовителя, на группы с идентичной (с точностью до ±2%) чувствительностью в каждой группе с последующим комплектованием ГАП из ПКБ таким образом, чтобы суммарная чувствительность всех ГАП ГАА была идентичной. Следует заметить, что данная технология комплектования ГАП, кроме решения главной задачи – достижения идентичности амплитудных характеристик ГАП, обеспечит практически безотходное использование всей партии ПКБ, поступившей с завода-изготовителя;

– разработать конструкцию блока ГАП, обеспечивающую снижение взаимного влияния смежных ГАП;

– разработать технологию заполнения внутреннего объема блока ГАП полимерным материалом, исключающую газовые включения в целях создания однородного звукопрозрачного слоя.

Повышение виброустойчивости ГАП может быть достигнуто применением встроенных в ГАП упругих полимерных стержней из вибропоглощающего материала, позволяющих снизить коэффициент динамичности ГАП и, как следствие, повысить виброустойчивость ГАП на 10-20 дБ в зависимости от частоты, что будет гарантировать их работоспособность в составе бортовых антенн ПЛ.

Для уменьшения коэффициента звукоотражения ГАА необходимо применять звукопоглощающий экран, изготавливаемый из композитных материалов и микросфер.

Повышение технологичности и эксплуатационных характеристик ГАА

Повышение технологичности и эксплуатационных характеристик ГАА может быть достигнуто за счет следующих технических решений:

– создание носовой конформной ГАА без прочной капсулы, что позволит освободить значительные объемы в носовой части ПЛ для размещения полезного оборудования;

– использование в качестве поставочного модуля ГАА жесткого фрагмента антенны, включающего звукопрозрачный корпус в виде ажурной решётки, между горизонтальными и вертикальными ребрами которой размещены пьезокерамические либо волоконно-оптические ГАП, звукопоглощающий акустический экран, опирающийся на решетку обтекатель в виде пластины из звукопрозрачной резины, и гермоконтейнер с аппаратурой предварительной обработки сигнала (АПОС). Причем в случае применения волоконно-оптических ГАП гермоконтейнер с АПОС будет отсутствовать. Достоинствами данной конструкции поставочного модуля по сравнению с использованием поставочных модулей в виде шлангов являются:

– отсутствие традиционного обтекателя, накрывающего всю антенну и являющегося корабельной конструкцией, что обеспечит: расширение секторов обзора ГАА (ввиду отсутствия падения звукопрозрачности обтекателя на малых углах скольжения); повышение ремонтопригодности ГАА (ввиду возможности ремонта путем замены поврежденных модулей ГАА); сокращение стоимости постройки заказа;

– высокая точность установки ГАП (ввиду их крепления к жесткой раме);

– сокращение количества поставочных модулей, узлов кабельных соединений в приборе, узлов крепления на заказе, кабелей, вводимых в прочный корпус;

– сокращение трудоемкости изготовления, испытаний и монтажа ГАА на ПЛ.

Заключение

Новые технологии создания гидроакустических антенн для подводных лодок, рассмотренные в докладе, обеспечат существенное повышение их электроакустических и эксплуатационных характеристик, а также технологичности изготовления, испытаний, монтажа и ремонта гидроакустических антенн на заказе.

ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

А.К.Батанов, Б.М.Бродский, канд.техн.наук, А.А.Кузьмин
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

A PROMISING DESIGN OF SONAR ANTENNA FOR SUBMARINE

A.K.Batanov, B.M.Brodskiy, Ph.D., A.A.Kuzmin
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Предлагается конструкция антенного модуля, совмещенного со звукопрозрачным в широкополосном диапазоне частот обтекателем, обладающая достаточной прочностью для эксплуатации на носителях.

Design of antenna module combined with sound transparent in a broadband frequency range dome strong enough for use on submarines is presented.

Гидроакустические антенны (ГАА) являются основным элементом гидроакустических комплексов подводных лодок (ПЛ) и их развитию необходимо уделять первостепенное внимание. Одним из направлений этого развития является повышение технологичности изготовления и монтажа ГАА на ПЛ, а также их эксплуатационных характеристик.

Целью доклада является описание перспективной конструкции ГАА, удовлетворяющей этим требованиям.

Предполагаемая конструкция ГАА развивает концепцию конформных антенн без прочной капсулы. Ее отличием от предыдущих разработок конформных антенн является сотовая конструкция (рис.1). Сотами ГАА являются однотипные модули, включающие: звукопрозрачный корпус в виде ажурной решётки, между горизонтальными и вертикальными ребрами которой размещены пьезокерамические либо волоконно-оптические гидроакустические приемники (ГАП); звукопоглощающий акустический экран; опирающийся на решетку обтекатель в виде пластины из звукопрозрачной резины; и гермоконтейнер с аппаратурой предварительной обработки сигнала (АПОС). Причем в случае применения волоконно-оптических ГАП гермоконтейнер с АПОС отсутствует.

Достоинствами данной конструкции антенного модуля по сравнению с использованием шланговых антенных модулей являются:

– отсутствие традиционного обтекателя, накрывающего всю антенну и являющегося корабельной конструкцией, что обеспечивает: расширение секторов обзора ГАА (ввиду отсутствия падения звукопрозрачности обтекателя на малых углах скольжения); повышение ремонтопригодности ГАА (ввиду возможности ремонта путем замены поврежденных модулей ГАА); сокращение стоимости постройки ПЛ;

– высокая точность установки ГАП (ввиду их крепления к жесткой раме);

– сокращение количества поставочных модулей, узлов кабельных соединений в приборе, узлов крепления к корпусу ПЛ, кабелей, вводимых в прочный корпус;

– сокращение трудоемкости изготовления, испытаний и монтажа ГАА на ПЛ.

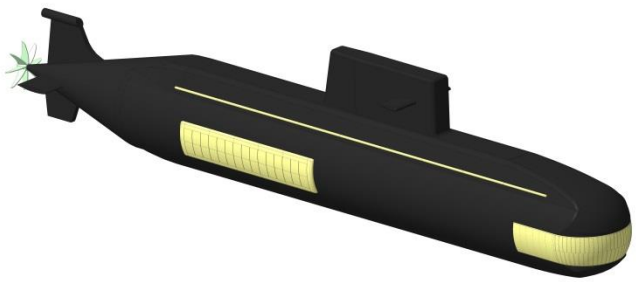


Рис. 1. Вид носовой конформной и протяженной бортовой антенн на корпусе ПЛ.

Остановимся отдельно на преимуществах предполагаемой безобтекательной конструкции ГАА.

К обтекателям ГАА предъявляются 2 противоречивые требования:

– высокая прочность;

– звукопрозрачность в рабочем диапазоне частот и в заданном секторе курсовых углов.

Недостатками существующих обтекателей как элементов корабельной конструкции являются:

- недостаточная звукопрозрачность при малых углах скольжения прихода сигнала;
- низкая ремонтопригодность;
- высокая стоимость изготовления и монтажа на ПЛ.

В предлагаемой конструкции ГАА обтекатель входит в состав каждого антенного модуля, чем одновременно обеспечивается его высокая звукопрозрачность, прочность, а также технологичность изготовления. Покажем это.

Известно [1], что рассеяние волн на препятствиях тем меньше, чем меньше соотношение размеров препятствия и длины волны. В связи с этим, необходимо построить ажурные ребра жесткости, путем деления каждого ребра на ряд мелких ребер, обеспечив размеры сечения каждого элемента значительно меньшим длины звуковой волны. Расчеты показывают, что в этом случае на частотах до 8,0 кГц потери звукопрозрачности вследствие рассеяния на верхних поясках ребер жесткости не превышают единиц процентов.

Обтекатель, входящий в состав антенного модуля, изготавливается в виде жесткой звукопрозрачной резиновой пластины, опирающейся на металлические полосы системы крепления, расположенные вдоль и поперек между гидроакустическими приемниками, и механически соединяющейся с ними. Выбор материала обтекателя с коэффициентом звукопрозрачности 0,95 ± 0,05 в широком диапазоне частот основывался на образцах резины трех марок: 51-2708, 7-3825 и 51-1019.

На рис.2 (см. вклейку) и в табл.1 приведены характеристики этих марок резины.

Таблица 1. Характеристики трех марок резины.

Показатель	Марка резины		
	7-3825-В	51-1019	51-2708
Твердость по шкале Шор А, ед. ГОСТ 263	85	88	90
Условная прочность, кг/см^2 ГОСТ 270	124	192	136
Относительное удлинение, % ГОСТ 270	200	200	100

Из рис.2 и табл.1 следует, что максимальной звукопрозрачностью обладает резиновая пластина марки 51-2708, имеющая высокую твердость по шкале Шор А и сравнительно низкое относительное удлинение при растяжении.

Предполагается, что использование в качестве обтекателя звукопрозрачной резины марки 51-2708 толщиной порядка 50 мм обеспечивает углы обзора антенны вплоть до 80^0 от нормали к ее поверхности. Для подтверждения этого были проведены акустические испытания в г/а бассейне макета антенного модуля с резиновой пластиной 51-2708 толщиной 50 мм.

На рис.3 (см. вклейку) представлены измеренные характеристики направленности макетного образца антенного модуля без обтекателя и с обтекателем в виде резиновой пластины марки 51-2708 толщиной 50 мм. Из рассмотрения рис.3 следует, что искажение характеристики направленности макета вследствие применения резинового обтекателя не превышает 2 дБ.

Литература

1 Шейнман И.Л., Шейнман Л.Е., Шендеров Е.Л. Звукопрозрачность обтекателей гидроакустических антенн. – СПб: Технолит, 2008.

2 Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Ленинград: Судостроение, 1980.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В АНТЕННЫХ РЕШЁТКАХ

Н.М.Иванов, Е.В.Кондаков
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, НКТБ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MUTUAL COUPLING WITHIN SONAR ARRAYS

N.M.Ivanov, E.V.Kondakov
Institute of High Technologies and Piezotechniks SFedU, R&D Design Office «Piezopribor»,
Rostov-on-Don, Russia

Разработан и реализован автоматизированный способ измерения матрицы собственных и взаимных проводимостей излучателей в антенных решётках. Изготовлен макетный образец аппаратуры. Выполнены измерения матрицы собственных и взаимных проводимостей шестнадцатиэлементного (4×4) макета антенной решётки в воздухе и в воде для оценки влияния конструкции на взаимодействие излучателей. Приводятся результаты измерений. Эти результаты используются для расчёта спектров собственных и вносимых проводимостей излучателей при произвольном распределении возбуждающих напряжений, частотных зависимостей потребляемой и механической мощности и для оценки электромеханического КПД.

A technique of self- and mutual admittance matrix measurement of antenna array is suggested. Prototype implementation device is described. 16 element square (4×4) antenna array matrix is measured for 'in air' and 'in water' arrangement to estimate mutual coupling caused by mechanical structure of the array. Measured data is used to calculate terminal impedances for arbitrary excitation voltage vectors, electrical and mechanical power frequency response calculation and electromechanical efficiency estimation.

Будем рассматривать ААР с электрической стороны как линейную систему с M входами. Полагая, что на каждом входе присутствуют гармонические напряжения и токи с комплексными амплитудами U_m и I_m соответственно, $m \in [1, M]$, вследствие линейности системы запишем [1, 2]

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}\mathbf{U}, \text{ или } I_m = \sum_{k=1}^{M} Y_{mk} U_k \qquad (1)$$

где **I, U** – векторы размером $M \times 1$ с элементами I_m, U_m соответственно, **Y** – матрица собственных и взаимных проводимостей решётки размером $M \times M$ с элементами Y_{mk}. Тогда импеданс m - го элемента в составе решётки с учётом взаимного влияния есть

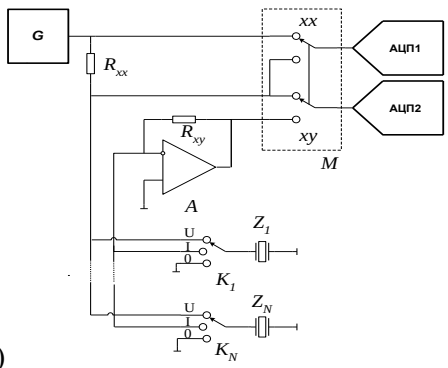
$$Z'_m = U_m / I_m = U_m \Big/ \sum_{k=1}^{M} Y_{mk} U_k \qquad (2)$$

Вместо матрицы проводимостей **Y** может быть использована матрица собственных и взаимных импедансов **Z** с элементами Z_{mk}. Тогда $\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{I}$ и $Z'_m = \sum_{k=1}^{M} Z_{mk} I_k / I_m = Z_{mm} + Z''_m$, где $Z''_m = \sum_{k \neq m}^{M} Z_{mk} I_k / I_m$ –вносимый импеданс. Матрицы **Z** и **Y** обратны друг к другу: $\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1}$. Это позволяет, измерив одну из них, вычислить другую.

Положим $U_k = U_0 \delta_{kq}$, где δ_{mk} – символ Кронекера, $q \in [1, M]$ –произвольный, но фиксированный индекс. Тогда $I_m / U_0 = Y_{mq}$, и, следовательно, подав на преобразователь с индексом q напряжение U_0, а все остальные переведя в режим короткого замыкания, так, чтобы $U_k = 0$ при $k \neq q$, и измерив токи в цепях всех преобразователей, можно определить q–й столбец матрицы **Y**, а для измерения всей матрицы следует придавать поочерёдно индексу q значения из множества $[1, M]$.

Структурная схема измерителя приведена на рис. 1а. Измеритель содержит генератор переменного напряжения G, преобразователь “ток–напряжение”, выполненный на операционном усилителе A, два набора измерительных резисторов R_{xx} и R_{xy}, два когерентных АЦП, входы которых подключаются через мультиплексор M, и коммутатор антенных элементов, состоящий из переключателей K, число которых соответствует максимально возможному числу элементов у антенн, подлежащих измерению. Устройство работает следующим образом. Для из-

мерения собственной проводимости Y_{xx} антенный элемент с номером x посредством своего переключателя K_x, установленного в положение "U", соединяется с генератором G через измерительный резистор R_{xx}. При этом образуется делитель, напряжения на входе и выходе которого через мультиплексор М, установленный в положение xx, регистрируются двухканальным АЦП и передаются в управляющий компьютер для дальнейшей обработки. Остальные антенные элементы остаются в режиме короткого замыкания, поскольку их переключатели K находятся в положении "0". Проводимость измеряемого элемента вычисляется из соотношения $Y_{xx} = \left(U_G / U_x - 1\right) / R_{xx}$, где U_G и U_x –отсчёты дискретных комплексных спектров напряжений на входе и выходе делителя, полученные в результате дискретного преобразования Фурье выборок АЦП. Для измерения взаимной проводимости Y_{xy} антенный элемент с номером x посредством своего переключателя K_x, установленного в положение "U", через резистор R_{xx}, выполняющий теперь роль токоограничивающего, соединяется с генератором G. Другой антенный элемент с номером y посредством своего переключателя K_y, установленного в положение "I", соединяется со входом преобразователя "ток–напряжение", коэффициент преобразования которого определяется измерительным резистором R_{xy}. Также, преобразователь обеспечивает виртуальное замыкание измеряемого элемента. Остальные антенные элементы остаются короткозамкнутыми своими переключателями K, находящимися в положении "0". Напряжение на возбуждаемом элементе и напряжение с выхода преобразователя "ток–напряжение" через мультиплексор M, установленный в положение "xy", регистрируется двухканальным АЦП. Взаимная проводимость измеряемой пары вычисляется по формуле $Y_{xy} = U_y / \left(U_x R_{xy}\right)$, где U_x и U_y – соответственно отсчёты комплексных спектров напряжений на возбуждаемом элементе и на выходе преобразователя "ток–напряжение", полученные в результате дискретного преобразования Фурье выборок АЦП.



а)

б)

Рис. 1. Структурная схема измерителя (а) и внешний вид аппаратуры (б).

Аппаратура, реализующая описанный метод (рис. 1б), состоит из измерительного блока, конструктивно выполненного в виде металлического чемодана. Внутри него собраны измерительная схема, многоканальный коммутатор, система автономного питания. На лицевой панели находится набор клемм для подключения измеряемой антенны. Управление работой, вычисление и отображение результатов осуществляется портативным компьютером, на котором выполняется специально разработанное программное обеспечение.

На рис. 2 приведены результаты измерений собственных и взаимных проводимостей шестнадцатиэлементного (4×4) макета антенной решётки в воздухе и в воде.

Из рис. 2 видно, что неравенство $\left|Y_{mk}\right| << \left|Y_{mm}\right|$ выполняется при $m \neq k$ и любых m. Тогда матрицу $\mathbf{Z}$ можно рассчитать по приближённой формуле

$$Z_{mk} \approx \left(\delta_{mk} - \left(1 - \delta_{mk}\right) Y_{mk} / Y_{kk}\right) / Y_{mm},$$

из которой следует, что условие $|Y_{mk}| << |Y_{mm}|$, $m \neq k$, гарантируем малость взаимных электрических импедансов $Z_{mk} = -Y_{mk}/(Y_{mm}Y_{kk})$, $m \neq k$, по сравнению с собственными $Z_{mm} = 1/Y_{mm}$.

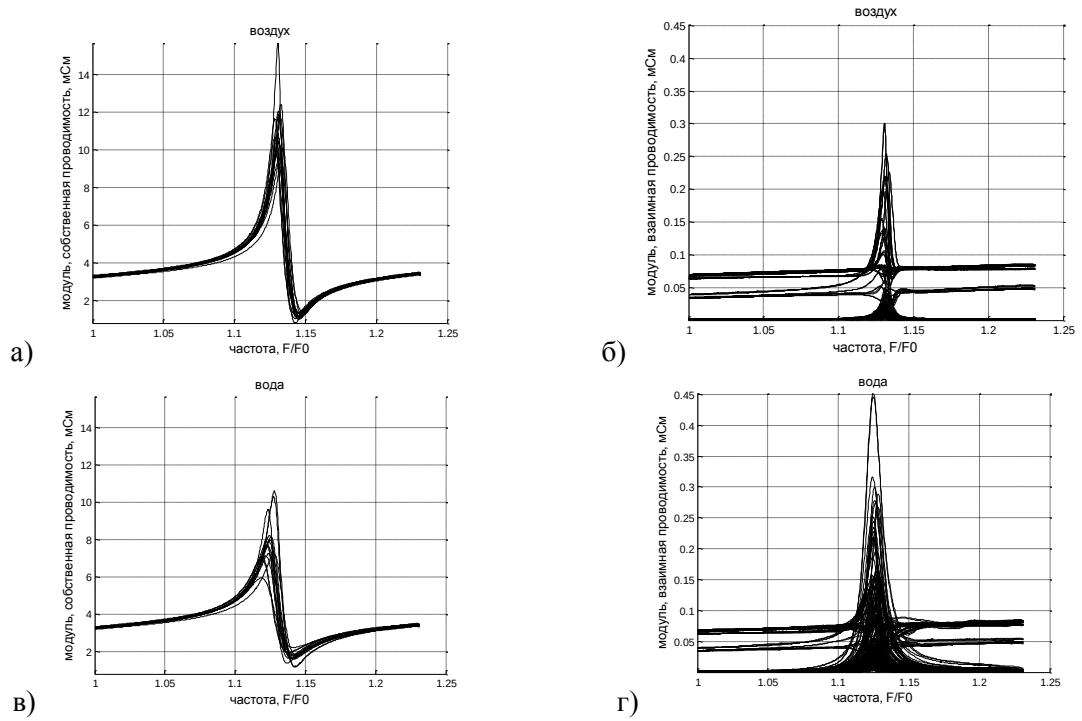


Рис. 2. Модули собственных (а, в) и взаимных (б, г) проводимостей в воздухе (а, б) и в воде (в, г).

Рассмотрим возможность использования результатов электрических измерений для оценки акустических параметров ААР [4]. В одномерной модели пьезоэлемента в жёстком экране сила f_m, действующая на рабочую поверхность пьезоэлемента m–го преобразователя в составе решётки, и её колебательная скорость ξ_m связаны соотношением [3]

$$f_m = \Xi_m \xi_m - N_m U_m, \tag{3}$$

где Ξ_m –механический импеданс, N_m –коэффициент электромеханической трансформации. В силу линейности системы можно утверждать, что векторы $\mathbf{f}$ и $\boldsymbol{\xi}$ связаны соотношением $\mathbf{f} = -\mathbf{T}\boldsymbol{\xi}$, где $\mathbf{T}$ –матрица размером $M \times M$, которая связана с матрицей собственных и взаимных импедансов излучения ААР. Возвращаясь к процедуре измерений, соотношения (3) вместе с выражением для тока, протекающего через пьезоэлемент, запишем в виде

$$\sum_{q=1}^{M} \left(\Xi_m \delta_{mq} + T_{mq}\right) \xi_{qk} = N_m U_{mk},$$

$$I_{mk} = i\omega C_m^S U_{mk} \delta_{mk} + N_m \xi_{mk}.$$

где ω –круговая частота, C_m^S –ёмкость зажатого пьезоэлемента, а индекс $k \in [1, M]$ нумерует амплитудно–фазовые распределения напряжений, возбуждающих решётку последовательно во времени. Полагая $U_{mk} = U_0 \delta_{mk}$, вводя проводимости $y_{mk} = N_m \xi_{mk} / U_0$, матрицу $\tilde{T}_{mk} = T_{mk}/(N_m N_k)$ и электрический импеданс $\tilde{\Xi}_m = \Xi_m / N_m^2$, пишем:

$$\sum_{q=1}^{M} \left(\tilde{\Xi}_m \delta_{mq} + \tilde{T}_{mq}\right) y_{qk} = \delta_{mk}, \tag{4}$$

$$Y_{mk} = i\omega C_m^S \delta_{mk} + y_{mk}.$$

Импеданс $\tilde{\Xi}_m$ определяется при $\tilde{T}_{mq} = 0$, т.е. по измерениям в воздухе:

$$\tilde{\Xi}_m = 1/\left(Y_m^{(0)} - i\omega C_m^S\right)$$

где $Y_m^{(0)}$ –проводимость m–го преобразователя, измеренная в воздухе на частоте ω. Тогда из (4) можно найти матрицу $\tilde{T}_{mk}$:

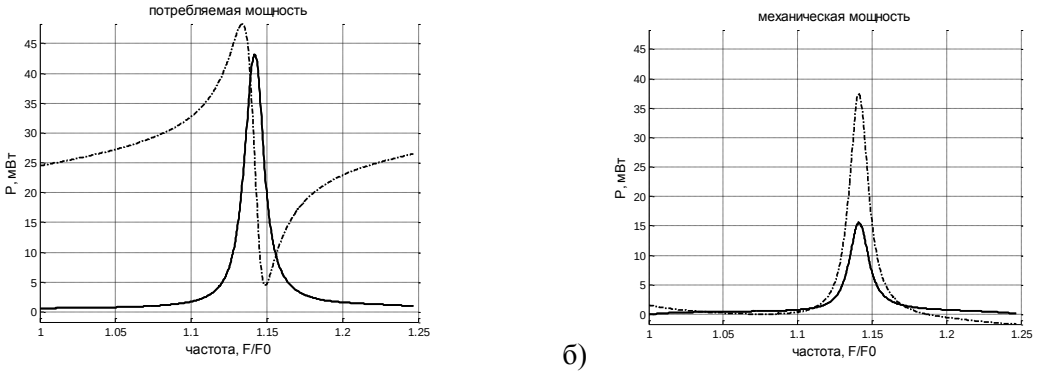
$$\tilde{T}_{mk} = y_{mk}^{-1} - \tilde{\Xi}_m \delta_{mk}, \;\; y_{mk} = Y_{mk} - i\omega C_m^S \delta_{mk}. \tag{5}$$

По известной матрице $\tilde{T}_{mk}$ находим механическую мощность, развиваемую всеми пьезоэлементами антенны:

$$P_M = \frac{1}{2}\sum_{m,k} \xi_m^* T_{mk} \xi_k = \frac{1}{2}\left(\sum_{m,k} U_m y_{mk}^* U_k^* - \sum_m \tilde{\Xi}_m \left| \sum_k y_{mk} U_k \right|^2 \right) \tag{6}$$

и отношение $\eta_{ME} = \mathrm{Re}(P_M)/\mathrm{Re}(P_E)$ активной механической мощности к активной потребляемой антенной электрической мощности $P_E = \frac{1}{2}\sum_{m,k} U_m^* Y_{mk} U_k$. Как видно из рис. 2, модель жёсткого экрана может считаться удовлетворительной в достаточно грубом приближении, поскольку взаимные проводимости исследуемой ААР в воздухе хотя и малы, но вполне сопоставимы с таковыми в воде. Тем не менее, соотношения (5,6) могут использоваться для оценки механических параметров антенны по измерениям с электрической стороны.

На рис. 3 приведены рассчитанные частотные зависимости активной и реактивной компонент полной мощности, потребляемой антенной, и механической мощности при синфазном равноамплитудном возбуждении антенны при амплитуде напряжения 1 В. Для отношения η_{ME} (электромеханического КПД), в котором P_M и P_E просуммированы по частоте, получено разумное значение $\eta_{ME} = 0{,}382$.



а) б)

Рис. 3. Мощность, потребляемая антенной (а), и механическая мощность. Сплошная линия – активная мощность, штрихпунктирная – реактивная.

Таким образом, в настоящей работе предложены способ измерения полной матрицы собственных и взаимных электрических импедансов преобразователей многоэлементных гидроакустических антенных решёток и схема его практической реализации. На основе выполненных исследований разработаны и описаны состав, структурная схема и принципы функционирования аппаратуры, реализующей предложенный способ. Рассмотрен вопрос об использовании результатов электрических измерений для оценки акустических параметров ААР.

Литература

1. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
2. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984.
3. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990.
4. Aronov B. Experimental method for investigating the acoustical interaction between transducers // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119. №6. P. 3822–3830.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ

С.Н.Галий, В.К.Доля, канд.техн.наук, В.Н. Митько, Э.Г.Шмидт[1], канд.техн.наук
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, НКТБ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия
[1]АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

INFLUENCE OF THE CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF HIGH-FREQUENCY ARRAY ON BEAM PATTERN PARAMETERS

S.N.Galiy, V.K.Dolya, Ph.D., V.N.Mitko, E.G.Shmidt[1], Ph.D.
Institute of High Technologies and Piezotechniks SFedU, R&D Design Office «Piezopribor»,
Rostov-on-Don, Russia
[1]JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы влияния и выбора оптимальных параметров слоя герметизации в применении к гидроакустической линейной антенной решётки.

Influence and choice of optimal parameters of the sealing layer in application to the hydroacoustic linear array are considered.

Одним из наиболее важных параметров гидроакустических устройств наблюдения подводной обстановки (многолучевые эхолоты, эхолокаторы секторного обзора и т.д.) является величина сектора обзора (сканирования), которую в большинстве случаев стремятся сделать как можно большей. Сектор обзора при применении линейной антенной решетки (АР) ограничивается несколькими факторами: рост боковых лепестков при отклонении основного лепестка характеристики направленности (ХН), расширение основного лепестка в связи с уменьшением действующего раскрыва в направлении поворота и наличие направленных свойств элементов АР. Таким образом, сектор сканирования во многом определяется ХН в плоскости сканирования отдельного элемента АР, а также шагом расположения и возможным взаимным влиянием элементов АР. Как правило, на практике АР изготавливают из элементов, расположенных в плоскости сканирования, с шагом $\lambda_в/2$ ($\lambda_в$ – длинна волны на рабочей частоте). Предполагается, что в этом случае (при отсутствии сильного влияния элементов АР друг на друга) ширина ХН элемента будет не менее 90° что, в конечном итоге, обеспечит сектор сканирования того же порядка при допустимом уровне боковых лепестков.

Однако экспериментальные исследования, проведенные для некоторых макетов высокочастотных АР, показали, что ширина ХН по уровню минус 3дБ отдельных элементов АР с волновым размером ~$\lambda_в/2$ колеблется от 50° до 60°. Реализация наиболее простой идеи расширения ХН путем значительного уменьшения волнового размера элемента (вплоть до $\lambda_в/10$) не приводит к ожидаемому результату и, следовательно, не может быть использована на практике.

Целью настоящей работы является анализ возможных причин, приводящих к значительному сужению ХН отдельного элемента в составе АР и выработка некоторых рекомендаций по конструированию АР.

В данной работе рассматривается АР под следующие технические требования:

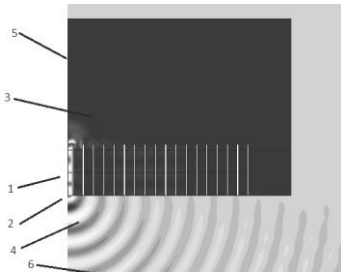
- рабочая частота…… 390 кГц;
- сектор сканирования, не менее…… 90°;
- ширина ХН в плоскости перпендикулярной плоскости сканирования…… 30°.

Исследования режимов работы элемента АР и АР в целом, проводились путем численного решения двумерной (плоско-деформированной) краевой задачи методом конечных элементов. С целью подтверждения адекватности двухмерной задачи, некоторые расчеты повторно проведены на полной трехмерной модели, а также проведены натурные испытания макетных образцов АР. Расчет ХН элемента АР и АР в дальней зоне выполняется с использованием интеграла Гельмгольца-Кирхгофа [1]. Окончательно заключения о справедливости результатов, полученных численным решением, принимались после проведения измерений ХН макетных образцов. Расчетная модель представлена на рис. 1.

Для ускорения процесса расчета, модель представлена в виде половины АР с заданными соответствующими условиями симметрии. Модель состоит из элементов АР – пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), общего герметизирующего слоя, полиуретанового демпфера и водной среды. Детали конструкции АР (проводники, крепежные элементы и т.д.), не оказывающие значительного влияния на параметры АР, не включены в расчетную модель.

АР набрана из монолитных ПЭП оптимальных геометрических размеров [2] с поперечной поляризацией и секционированными электродами [3], позволяющими эффективно возбуждать ПЭП

на первой и второй моде колебаний без применения коммутирующих устройств. ПЭП в АР расположены с шагом $\lambda_в \approx ½$. Расчет параметров ПЭП ведется для одного центрального элемента, все остальные ПЭП электрически закорочены.



1 – ПЭП, 2 – герметизирующий слой, 3 – полиуретановый демпфер, 4 – вода, 5 – линия симметрии, 6 – линия расчета интеграла Гельмгольца-Кирхгофа

.Рис. 1. Расчетная модель АР с результатами расчета (показано в твердом теле – относительное смещение, в воде – акустическое давление).

Изначально проведен расчет только теоретически возможного варианта конструкции АР, в которой ПЭП непосредственно контактируют со средой (герметизирующий слой отсутствует). Полученные данные (рис. 2, 3) использованы для оценки влияния герметизирующего слоя на параметры ПЭП и АР в целом.

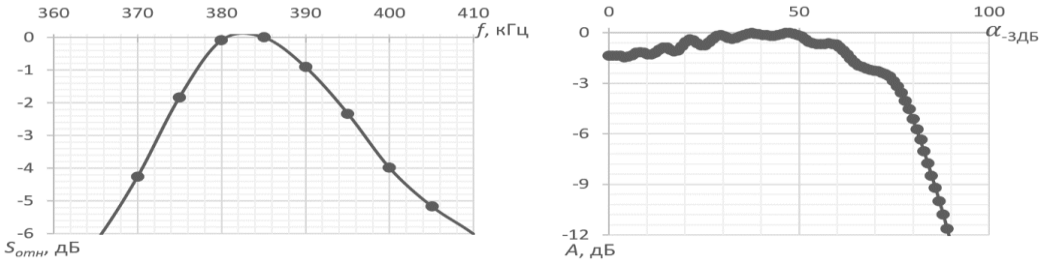


Рис. 2. АЧХ и ХН ПЭП в составе АР.

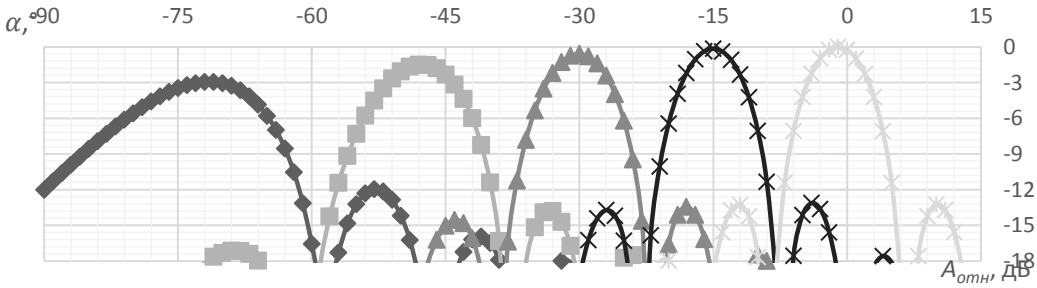


Рис. 3. Компенсированные ХН АР по направлению 15°, 30°, 45°, 65°.

Расчеты показали, что параметры ПЭП соответствуют ожидаемым – ширина ХН и сектор сканирования АР более 100°.

Во второй модели АР герметизирующий слой выполнен в виде монолитной пластины из полиуретана. Использование относительно простой конструкции герметизирующего слоя продиктовано соображениями технологичности, а значит, и высокой повторяемости параметров ПЭП в составе АР. В качестве материала герметизирующего слоя использован полиуретан типа СПБ-ХП-80, отличительной особенностью (данного типа полиуретана) является его малая механическая добротность ($Q \approx 1{,}2$). Ввиду того, что в качестве герметизирующего слоя возможно применение других марок полиуретана (СКУ-ПФЛ-100, ТФ-235, ПУ-3К и т.д.), обладающих близкими по значению параметрами (ρ, c_l, c_t), но имеющее более высокое значение механической добротности, проведены так же расчеты для ряда значений добротностей материала герметизирующего слоя (Q = 1,2; 3; 6; 12). Результаты расчета представлены на рисунках 4, 5, 6. На графике (рисунок 4) отчетливо видны области значений $h_П$=0,5; 1,3 мм (при $Q > 3$), когда наблюдаются значительное сужение ширины ХН. Рассмотрев характер колебания излучающей поверхности герметизирующего слоя (рисунок 6), можно сделать вывод о том, что причиной сужения ширины ХН является возникающие при опре-

деленных значениях – $h_П$ «паразитные», ярко выраженные, поперечные колебания поверхности герметизирующего слоя (см. рисунок 6).

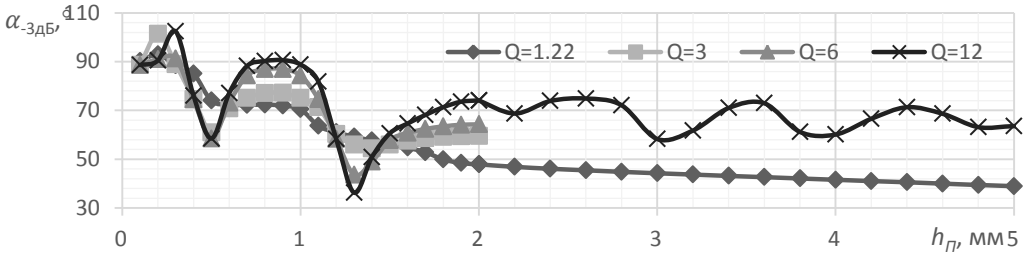


Рис. 4. Ширина ХН ПЭП при различных значения механической добротности материала герметизирующего слоя.

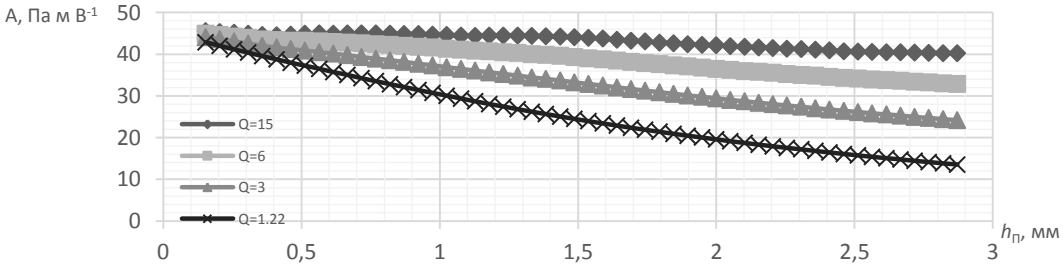


Рис. 5. Чувствительность ПЭП от $h_П$ при различных значения механической добротности материала герметизирующего слоя.

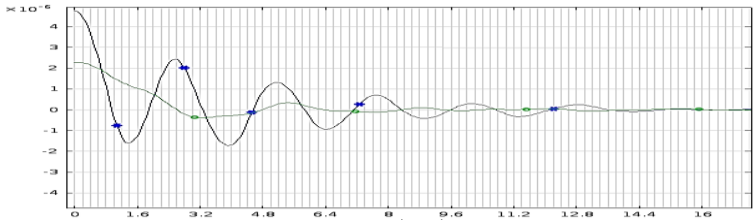


Рис. 6. Смещение излучающей поверхности герметизирующего слоя (при $h_П$=0.55, 1.3 мм).

Применение низкодобротного (Q < 1,2) материала герметизирующего слоя приводит к демпфированию поперечных паразитных колебаний, тем самым «сглаживая» зависимость ширины ХН от $h_П$, кроме того, ширина ХН ПЭП монотонно убывает при увеличении величины $h_П$, предположительно из-за увеличения вносимых потерь материалом герметизирующего слоя. Также, можно отметить снижение чувствительности ПЭП при увеличении $h_П$ (рисунок 5), что несомненно, напрямую связано с добротностью материала герметизирующего слоя.

Проведен расчет трехмерной конечно элементной модели параметров ПЭП в составе АР, в которой ПЭП установлены на общем герметизирующем слое, материал слоя – полиуретан марки СКУ-ПФЛ-100. На рисунке 7 представлен график зависимости ширины ХН от толщины слоя.

Для подтверждения полученных теоретических результатов моделирования изготовлен макетный образец восьми элементной АР, в которой герметизирующий слой изготовлен из полиуретана марки СКУ-ПФЛ-100, изменение толщины слоя производилось шлифовкой. На рисунке 8 приведены экспериментальные данные для двух центральных элементов АР. Исследование проведено для нескольких значений толщин накладок в диапазоне от 0.5 до 0.23 длин волн в материале герметизирующего слоя.

Выводы

1. На режим работы элемента АР и его характеристики большое влияние оказывает толщина герметизирующего слоя и параметры материала, из которого он изготовлен.

2. Значение механической добротности материала герметизирующего слоя оказывает влияние на характер зависимости ширины ХН от толщины слоя. В качестве материала герметизирующего слоя лучше всего применять высокодобротные материалы, способные обеспечить широкую ХН ПЭП при определенных значениях $h_П$. Кроме того, при использовании высокодобротных материа-

лов для изготовления герметизирующего слоя, ПЭП будет обладать большей чувствительность в сравнении с герметизирующим слоем из низкодобротного материала, при равных толщинах.

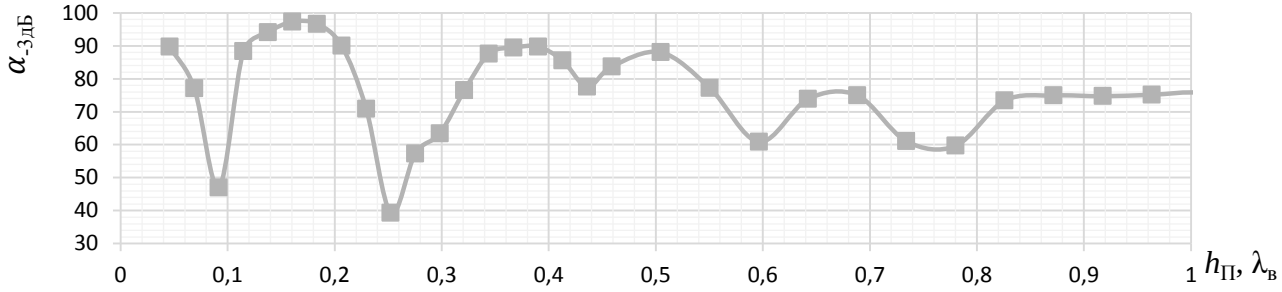


Рис. 7. Зависимость ширины ХН ПЭП от толщины герметизирующего слоя.

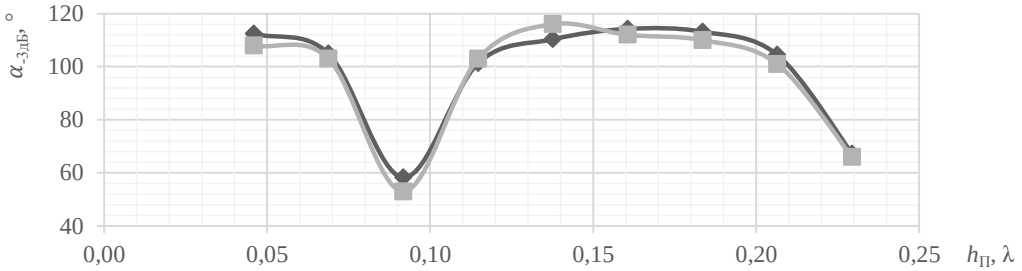


Рис. 8. Зависимость ширины ХН элемента АР от толщины герметизирующего слоя.

3. Наличие провалов значений ширины ХН, при определенных значениях $h_П$, ограничивает частотный диапазон АР, в котором сохраняется широкий сектор сканирования. Предлагается выбирать толщину герметизирующего слоя $h_П$, при котором значение ширины ХН остается наибольшим для заданных частотных диапазонов.

4. Результаты проведенных натурных экспериментов на макетном образце АР показали хорошее совпадение с данными, полученными при численном решении двух и трехмерных краевых задач. Разработанные модели АР и методики анализа влияния параметров герметизирующего слоя на работы ПЭП в составе АР и АР в целом, позволяют проводить оптимизацию параметров слоя. Кроме того, предлагается на разработанных моделях продолжить исследования по оценки влияния элементов конструкции на параметры высокочастотных ПЭП и АР в целом не только для линейных АР, но и для других типов антенн (дуговые, цилиндрические и т.д.).

Литература

1. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. – СПб.: Наука. 2004.
2. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики. — Л.: Судостроение, 1972.
3. Галий С.Н., Доля В.К., Митько В.Н. Оптимизация высокочастотного широкополосного гидроакустического преобразователя линейной антенной решетки. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестер-История, 2014.
4. Митько В.Н., Иванов И.М., Милославский Ю.К. Многочастотный пьезоэлектрический преобразователь. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестер-История, 2014.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ В СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБТЕКАТЕЛЯХ

В.З.Голдовский, канд.техн.наук, К.А.Румянцев
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

FEATURES OF FORMATION OF VIBROACOUSTIC INTERFERENCE IN FIBERGLASS SONAR DOMES

V.Z.Goldovsky, Ph.D., K.A.Rumyantsev
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

В процессе экспериментальных исследований выявлено наличие в стеклопластиковом обтекателе составляющей корабельных акустических помех, поведение которой в пространственной области и в динамике не подчинялось ни одной из существующих закономерностей. Методом конечных элементов установлено, что причиной возникновения этой составляющей помех является звукоизлучение распространяющейся по обтекателю продольной волны, вызванной трансформацией изгибной волны в узле соединения обтекателя с корпусом носителя

In the process of experimental tests, the presence of a component of ship acoustic noise inside a fiberglass sonar dome was revealed, whose behavior in the spatial domain and in dynamics did not obey any of the existing regularities. The finite element method modelling has established that the cause of this interference component is the sound emission of propagating longitudinal wave caused by the transformation of the flexural wave in the joint node of the dome with the carrier body.

В процессе исследований акустических помех в обтекателе со стеклопластиковой звукопрозрачной оболочкой, наряду с характерными максимумами углового распределения помех при ориентации антенны на кромки коффердама (±150°), являющиеся дифракционными источниками шума носителя, были обнаружены соизмеримые с ними на докритических скоростях хода аналогичные максимумы помех в рабочем диапазоне углов обзора антенны, при ориентации ее в направлениях курсовых углов примерно ±120° (см. 1).

Предположение о том, что эти максимумы могут образоваться в результате двух актов отражения дифракционного шума, вначале от поверхности антенны и затем от внутренней поверхности обтекателя не подтвердилось, поскольку динамика их изменения в зависимости от скорости хода носителя различна (см. 2).

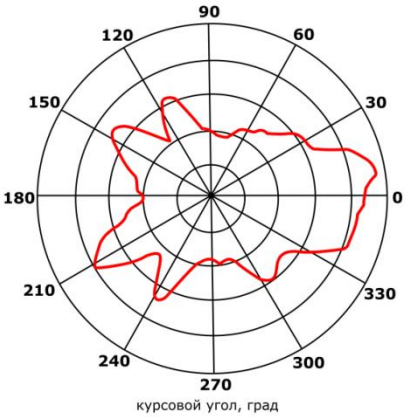


Рис. 1. Угловое распределение уровней помех.

Рис. 2. Зависимость уровней помех от скорости хода: 1, 2 – максимумы на курсовых углах ±150° и ±120°.

Это свидетельствует о различных физических механизмах их формирования. Поскольку направления этих максимумов составляют примерно ±30° относительно нормали к поверхности обтекателя, что соответствует резонансу совпадений для продольных волн [1], была сформулирована гипотеза о том, что эти максимумы обусловлены звукоизлучением распространяющихся по обтекателю продольных волн, которые в свою очередь вызваны действием внутренних сил, возникающих при распространении изгибных волн по корабельным конструкциям в узлах их соединения со стеклопластиковым обтекателем [2]. Другими словами, во фланцевом соединении корпуса с обтекателем происходит трансформация направлений действующих сил из нормального, обусловленного изгибными колебаниями «на входе» конструкции, в силы произвольного направления, содержащие компоненту, направленную в плоскости обтекателя, которые вызывают в нем продольные волны. Продольная компонента силы вызывает в обтекателе

интенсивные продольные колебания, которые, в свою очередь, создают звукоизлучение в направлении, соответствующем совпадению скорости следа в звуковой волне, бегущей вдоль пластины, со скоростью продольной волны в пластине. Изложенные выше соображения о физическом механизме возникновения и звукоизлучения продольных волн косвенно подтверждаются в работе [3], в которой рассмотрены особенности излучения звука пластиной, возбуждаемой точечной силой, направленной под произвольным углом к пластине, а также в работе [4], где отмечается, что обусловленная продольными колебаниями «вытекающая» звуковая волна «засвечивает» зону акустической тени за экраном, приводя тем самым к эффекту акустического «короткого замыкания» между разделенными экраном областью источника шума и защищаемой областью пространства.

Возвращаясь к 2, следует отметить, что с учетом вышеизложенной трактовки становится понятной различная зависимость от скорости хода уровней дифракционных «шумовых» максимумов и, для краткости изложения, «продольных» максимумов в угловом распределении помех на выходе антенны. На докавитационных скоростях хода «шумовые» и «продольные» максимумы растут практически одинаково и пропорционально 1÷2 степени роста скорости хода, что характерно для шума и вибраций главных двигателей, соответственно.

На кавитационных скоростях хода уровни «шумовых» максимумов увеличиваются пропорционально 4÷5 степени роста скорости хода, что характерно для кавитационного шума движителя, тогда как «продольные» максимумы сохраняют 1÷2 степень роста, поскольку обусловлены вибрациями главных двигателей.

Для проверки вышеизложенной гипотезы был проведен численный эксперимент методом конечных элементов (МКЭ). Общий вид конечно-элементной модели представлен на 3.

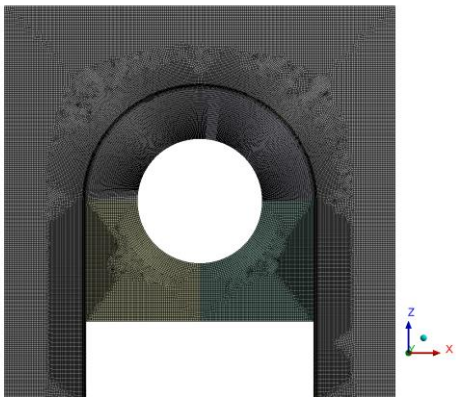


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели антенны в обтекателе.

Данная модель содержит заполненную водой стеклопластиковую обшивку обтекателя с антенной в жестком экране и металлический коффердам, заполненный воздухом. В качестве источника возбуждения в модели используется сосредоточенная гармоническая сила, создающая поперечные колебания в металлических конструкциях и распространяющиеся через фланцевое соединение по обшивке обтекателя. Для исключения влияния прямого излучения металлических конструкций во внутреннюю камеру обтекателя переборка коффердама изолирована от внутреннего объема идеальным отражающим экраном (граничное условие $P = 0$). Расчеты по данной модели выполнялись с помощью программного пакета ANSYS 17.2.

В результате выполнения расчетов по вышеописанной модели было определено поле комплексных акустических давлений $\dot{P}$ внутри камеры обтекателя (вещественная компонента поля $Re(\dot{P})$ показана на рис. 4, см. вклейку).

По вышеприведенным результатам численного моделирования был рассчитан выходной сигнал пространственного канала антенны. Для этого комплексные амплитуды давления на поверхности жесткого цилиндрического экрана последовательно складывались в пределах рабочего сектора антенны, фазовой компенсацией по формуле:

$$P_{\text{вых}} = \left| \sum_{i=1}^{n} (A_i \cdot p_i) \right| \qquad (1)$$

где n – число приемников в рабочем секторе антенны; A_i – коэффициент возбуждения i-го приемника, определяемый по [5]; p_i – комплексная амплитуда сигнала на выходе i-го приемника, определенная в ходе моделирования.

Вычисления по формуле (1) выполнялись для каждого угла поворота рабочего сектора антенны в интервале 0÷360°. В результате данных вычислений получена зависимость амплитуды выходного сигнал пространственного канала антенны от угла поворота рабочего сектора, приведенная на рис. 5 (выделена синим) (см. вклейку) вместе с результатом измерений (выделены красным).

Из рис. 5 видно, что на смоделированном сигнале наблюдаются добавочные максимумы в районе углов ±120°, сопоставимые по амплитуде с максимумами на углах ±150°, соответствующим кромкам коффердама. Таким образом, результаты моделирования подтверждают вышеизложенную гипотезу о причинах возникновения добавочных максимумов.

Также следует отметить, что определенная по результатам моделирования передаточная функция между уровнями вибраций корпусной конструкции и уровнями помех в обтекателе не более чем на 6 дБ отличается от аналогичной экспериментально полученной характеристики, что является дополнительным подтверждением правомерности физического механизма образования виброакустических помех такой природы.

Литература

1. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Ленинград: Судостроение, 1972.
2. Кирпичников В.Ю. Вибровозбудимость конструкций и пути ее уменьшения. Санкт-Петербург. 2014.
3. Кирпичников В.Ю. Савенко В.В. Излучение звука бесконечной пластиной, возбуждаемой точечной силой, направленной под произвольным углом к пластине // Труды ЛКИ, 1982.
4. Голдовский В.З. Коровкин А.Н.. Дифракция звука на широком экране с упругой пластиной // Акустический журнал, Вып. 5, 1986. стр. 675-679.
5. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антеннн. Ленинград: Судостроение, 1973.

ХОДОВОЙ ШУМ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ МАЛОГАБАРИТНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЙ НА ЕГО КВАЗИКОНФОРМНУЮ АНТЕННУ

В.Р.Гессен, канд.техн.наук, В.П.Дмитриченко, канд.техн.наук
АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

PROPELLING NOISE IN THE NOSE END OF A SMALL-SIZE UNDERWATER VEHICLE (UV) ACTING UPON ITS CONFORMAL ANTENNA

V.R.Gessen, Ph.D., V.P.Dmitrichenko, Ph.D.
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Представлены основные результаты разработки и натурных испытаний квазиконформной антенны с цилиндрической поверхностью. Отражены результаты анализа измерений ходового шума подводного аппарата лучами и каналами этой антенны. Оценены некоторые составляющие шума.

The paper presents the basic results of development and full-scale test of the quasiconformal antenna with cylindrical surface. The results of analysis of UV propelling noise measurements using the antenna beams and channels are represented. Some noise components are evaluated.

В гидроакустических системах скоростных малогабаритных подводных аппаратов (МПА) традиционно используются носовые планарные гидроакустические антенны. Эти антенны обеспечивают сектор уверенного обзора пространства от оси МПА до ± 45°, чего в некоторых случаях недостаточно. Увеличение сектора обзора до ± 90° возможно при формировании в носовой части конформной антенны. Для оценки потенциальных возможностей такой антенны в АО «Концерн «МПО–Гидроприбор» был разработан и изготовлен образец, фотография которого перед формированием обвода головной части МПА представлена на рис. 1.

Рис. 1. Фотография квазиконформной антенны перед её герметизацией и формированием обвода.

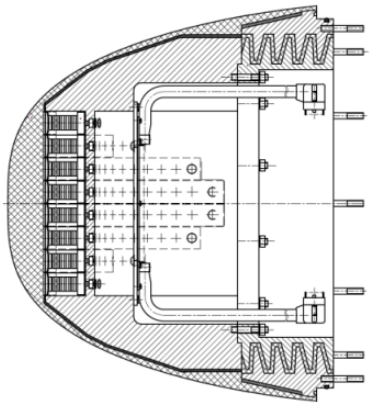


Рис. 2. Чертёж конструктивной компоновки квазиконформной антенны.

Апертура антенны выполнена в виде многоэлементной антенной решётки, преобразователи которой расположены по цилиндрической поверхности с радиусом ~ 205 мм, в связи с чем конструкция этой антенны, как не полностью повторяющая форму головной части МПА, названа «квазиконформная». Такая конфигурация антенной решётки позволяет обеспечить сектор обзора в азимутальной плоскости до ± 90°. Конструктивная компоновка антенны представлена на рис. 2.

Антенная решётка состоит из 124 стержневых армированных преобразователей, обеспечивающих широкую полосу частот. Обтекатель антенны выполнен из звукопрозрачного полиуретана, обеспечивающего герметизацию антенны и формирование обвода головной части МПА. Блок пьезопреобразователей установлен в корпусе, внутри которого размещён электронно–цифровой формирователь рабочих каналов антенны и регистратор ходовой помехи описанный в [1].

Одной из проблемных задач использования такой антенны в составе МПА является отсутствие необходимых данных по сравнительной оценке уровней ходового шума и вызываемой им ходовой помехи (ХП) информационным системам МПА на носовой и бортовых частях антенны. Для разрешения этой задачи были проведены натурные испытания на МПА-лаборатории с

оценкой ходового шума на различных преобразователях и рабочих «пятнах» антенны. Такие рабочие «пятна» представлены в заштрихованном виде на развёртке апертуры антенны (рис.3), на которой приведена также нумерация каналов (преобразователей) антенны, по которым производилась регистрация ХП при проведении испытаний. Сформированные рабочие «пятна» содержат по 16 преобразователей. На носовом рабочем «пятне» сформирована ХН, совпадающая по направлению с осью МПА, а на боковых – отвернутые на углы ± 79 от оси.

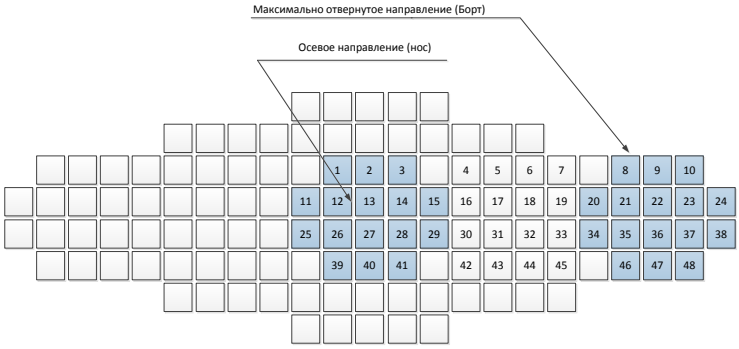


Рис. 3. Развёртка апертуры квазиконформной антенны.

Оценка уровня ходового шума на выходе преобразователей антенны и сформированных на ней носовой и бортовой групп преобразователей была произведена по результатам 2–х испытаний при движении МПА-лаборатории на скоростях V узлов (1 испытание) и 1.3 V узлов (2 испытание). В процессе испытаний, проведённых в акватории Ладожского озера, было предусмотрено движение МПА на горизонтах по глубине 20, 40, 60, 80, 100 и 120 м при погружении и на горизонтах 100, 80, 60, 40 и 20 м при всплытии. Глубина места в районе испытаний составляла ~ 150 м.

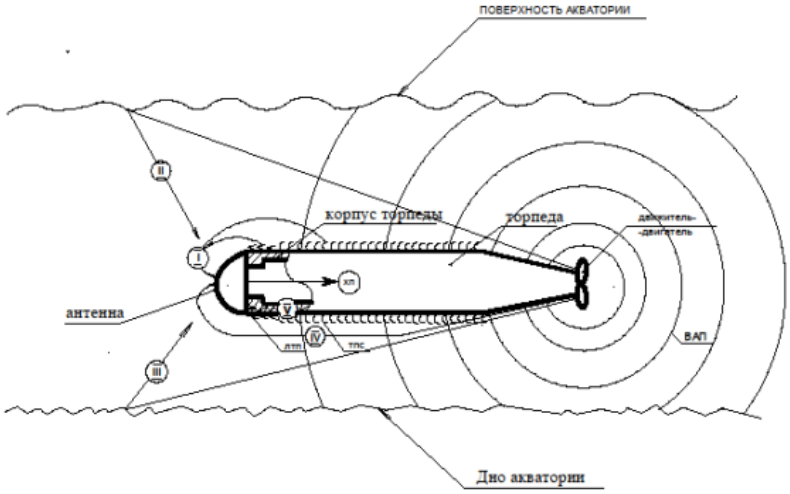


Рис. 4. Схема разделения шума на составляющие.

Анализ полученных результатов испытаний производился основываясь на проведённых ранее для планарных антенн МПА исследованиях полагая, что шумы воздействуют на преобразователи (элементы) антенны в виде 5 основных составляющих:

турбулентная от шума гидродинамических источников пограничного слоя (ПС) набегающего на носовую оконечность МПА потока жидкости – зоны ламинарно–турбулентного перехода (ЛТП) и турбулентного ПС (ТПС) (составляющая I);

дифракционная (дальняя дифракция) от рассеянного поверхностью моря или его дном шума кормовых источников внешнего акустического поля (ВАП) МПА, воспринимаемого боковым полем ХН антенны (составляющие II, III);

дифракционная (ближняя дифракция), порождаемая шумами, распространяющимися вдоль корпуса МПА от кормовых источников ВАП и воспринимаемыми её носовой антенной (составляющая IV);

структурная от корпусной вибрации торпеды, проникающей на преобразователи антенны по конструктивным связям (составляющая V).

Регистрация ХП производилась по выходу отдельных каналов (преобразователей) №№ 1-48 антенны и трём сформированным апертурам из 16 элементов в каждой: центральный, промежуточный и боковой лучи. Направления максимумов характеристик направленности (ХН) этих лучей относительно продольной оси МПА составляют соответственно 0^o, 40^o и 79 .

Результаты анализа зарегистрированных каналами и лучами квазиконформной антенны ходовых шумов выявили ряд зависимостей шума от: глубины хода МПА; скорости хода; местоположения каналов, апертур лучей в конструкции; частоты работы антенны; ХН элементов антенны (каналы-слабонаправленные, лучи-узконаправленные); уровня ВАП МПА.

Результатами испытаний установлено, что зависимость шума от глубины хода МПА наблюдается, что иллюстрирует график на рис. 5 (по оси *x* Дб).

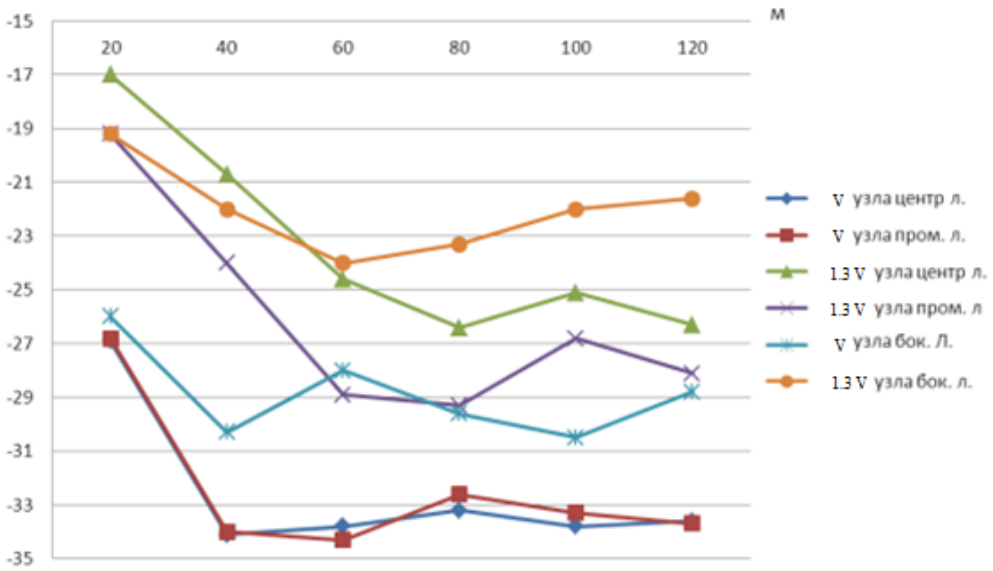


Рис. 5. График зависимости уровней ХП от глубины хода МПА для центрального, промежуточного и бокового лучей.

Результаты количественной оценки составляющих ходового шума для каналов (преобразователей) апертуры антенны представлены на рис.6. На нем приведены ХП для глубин хода 20 м и 60 м, оценка структурной составляющей ХП по лабораторно–стендовым испытаниям, а также оценка доли ХП на глубине 60 м, остающейся после вычитания из этой ХП составляющей дальней дифракции ВАП на верхней границе акватории. Вычитание составляющей дальней дифракции проведено энергетически исходя из допущения, что на глубине хода 20 м эта составляющая доминирующая, а на глубине хода 60 м она в три раза меньше, следуя закону её изменения 1/H (H глубина хода МПА). Полученный результат вычитания показывает, что даже на глубине хода 60 м в условиях «мелкого моря» ХП, регистрируемая конформной антенной, определяется составляющей дальней дифракции ВАП на верхней границе акватории. Причём зона антенны, где эта составляющая преобладает в ходовом шуме, составляет примерно $\pm 67^o$ в горизонтальной плоскости от геометрической оси МПА. На углах более 67^o ХП определяется составляющей ближней дифракции предположительно источников шума турбулентного происхождения. Характерно, что в области этих углов по оценкам может располагаться зона ламинарно–турбулентного перехода пограничного слоя МПА в виде кольцевой зоны, опоясывающей антенну по периметру, охватывающим каналы № 24, 38 (см. рис.3). Именно по этим боковым каналам при глубине хода 100 м наблюдаются большие уровни ХП по сравнению с уровнями центрального канала во всем исследованном диапазоне частот.

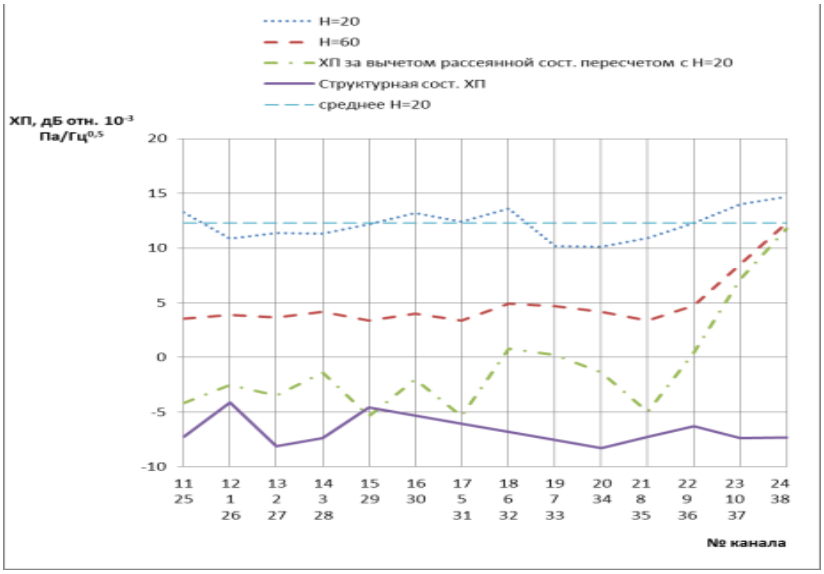


Рис. 6. График распределения ХП и её составляющих
по каналам (преобразователям) апертуры антенны.

Анализ полученных результатов указывает на следующее:

– зависимость от скорости хода МПА V уровня ходового шума, регистрируемого преобразователями квазиконформной антенны и сформированными лучами, близка к закону $V^{3...4}$. Это указывает на гидродинамическую природу источников шума;

– по результатам испытания на скоростях V и 1.3V узла установлено, что уровень ходового шума для бокового луча на 3…6 дБ выше, чем для центрального луча;

– повышенный уровень ходового шума для бокового луча обусловлен высокими уровнями шума принимаемого его периферийными каналами (№№ 24 и 38), уровень по которым в исследованном диапазоне частот на 5…15 дБ выше по сравнению с центральным № 13 каналом антенны, что с высокой вероятностью вызвано действием на периферийные каналы ближнего поля псевдозвуковых возмущений зоны ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя.

Литература

1. Баяндина С.А., Рыклин Ю.Л. О методике регистрации ходовой помехи.\\Подводное морское оружие, 2016, Вып.2(28).
2. Белов Б.П., Гессен В.Р., Дмитриченко В.П., Евдонина Н.И. Снижение ходовых помех – наша работа. «ЦНИИ «Гидроприбор» и его люди за 60 лет». Т.11. - СПб., СПбИИ РАН «Нестор-История», 2005.

Научные сообщения

О ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТАЦИИ К РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ ПОМЕХЕ В АБСОЛЮТНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛАГАХ

К.П.Львов
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

ON THE POSSIBILITY OF ADAPTATION TO REVERBERATION INTERFERENCE IN THE ABSOLUTE DOPPLER LOGS

K.P.Lvov
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Рассмотрены зависимости для интенсивности ближней объемной реверберации, являющейся помехой приему, и донной реверберации – полезному сигналу, применительно к абсолютному доплеровскому лагу. Относительное измерение помехи и экстраполирование интенсивности помехи совместно с относительным измерением интенсивности помехи и сигнала позволяет произвести адаптацию длительности импульса с учетом интенсивности реверберационной помехи на сеансе работы лага.

Influence of intensity of nearby volume reverberation, which is noise to the reception, and bottom reverberation on a useful signal, when discussing absolute Doppler lag is considered. Relative measurement of noise and extrapolating of noise intensity together with relative measurement of intensity of noise and signal allows pulse duration adaptation taking into account intensity of reverberation disturbance on the log operation session.

Известно, что доплеровский принцип измерения скорости движущихся объектов реализуется наиболее эффективно (по точностному и энергетическому критериям) при излучении непрерывного зондирующего сигнала. Однако из-за явления объемной реверберации, используется импульсное излучение сигнала. Импульсный режим излучения приводит к неполному использованию времени сеанса работы лага для измерения доплеровской частоты эхосигнала, являющийся донной реверберацией и, следовательно, к снижению точности измерения скорости и пройденного пути носителя [1, 2].

Выражение для интенсивности реверберационной помехи (ближней объемной реверберации) применительно к доплеровским лагам имеет вид

$$I_v(r) = \frac{W m_v V}{4\pi r^4} 10^{-0.2\beta r}, \quad (1)$$

где m_v - коэффициент обратного объемного рассеяния, W - излученная акустическая мощность, $V = \pi(\Delta\theta_{0.7} r)^2 c\tau / 8$ - озвученный объем воды, $\Delta\theta_{0.7}$ - ширина главного максимума характеристики направленности антенны на уровне 0.7, как правило $\Delta\theta_{0.7} \approx (3..4)^0$, r - расстояние до создающего реверберацию слоя воды, c - скорость звука в воде, τ - длительность зондирующего импульса, β - коэффициент пространственного затухания. Коэффициент обратного объемного рассеяния m_v может изменятся в зависимости от частоты, времени суток, сезона, глубины, района Мирового океана и других факторов на несколько порядков (несколько десятков децибел) и может составлять $10^{-5}...10^{-11}$ $м^{-1}$ (-50…-110 дБ). Коэффициент пространственного затухания β зависит в основном от частоты [1, с.108, с. 114; 2, с. 158 - 161; 3, с. 250 - 255].

Интенсивность эхосигнала имеет вид

$$I_s(R) = \frac{m_b W}{4\pi R^2} 10^{-0.2\beta R}, \quad (2)$$

где m_b - коэффициент обратного донного рассеяния, W - излученная акустическая мощность, R - наклонная дальность до дна, β - коэффициент пространственного затухания. Выражение (2) имеет место при условии для длительности импульса τ

$$\tau >> 2H\Delta\theta_{0.7} tg(\theta)/(c*\cos(\theta)) \text{ и } \tau < H/(c*\cos(\theta)), \quad (3)$$

где H – глубина ($R = H/\cos(\theta)$), θ - угол наклона характеристики направленности антенны к вертикали [2, с. 8 - 9].

Коэффициент обратного донного рассеяния m_b может изменяться в районах Мирового океана от 0 до -30 децибел. Диапазон возможных значений отношения m_b / m_v может составить $10^3...10^7$ м [1, с.114; 2, с. 19].

Указанные возможные значения коэффициентов обратного объемного рассеяния, обратного донного рассеяния, приводят к трудностям прогнозирования интенсивностей эхосигнала и реверберационной помехи в тех или иных конкретных условиях Мирового океана.

Соотношение между интенсивностями эхосигнала и реверберационной помехой на интервале приема эхосигнала должно быть

$$I_s(R) = q^2 I_v(R), \tag{4}$$

где q - коэффициент распознавания, т.е. отношение по напряжению. Значение коэффициента распознавания определяется алгоритмом измерения доплеровской частоты [1, с.106; 2, с. 142].

Наименьшая интенсивность объемной реверберации имеет место в холодных водах. Для иллюстрации на рис. 1 показан импульс излучения (прямоугольная форма), реверберационная помеха и полезный эхосигнал доплеровского лага. Запись произведена в северной акватории Ладожского озера на глубинах более 150 метров, температура воды на поверхности около 10 градусов. Усиление приемного тракта постоянно, отношение с/ш >> 1, частота заполнения импульса 250 кГц. Из рассмотрения рис.1 видно, что интенсивность объемной реверберации мала и длительность импульса может быть увеличена примерно в два раза. При разработке импульсного доплеровского лага была принята рекомендуемая, постоянная скважность около трех [1, 2].

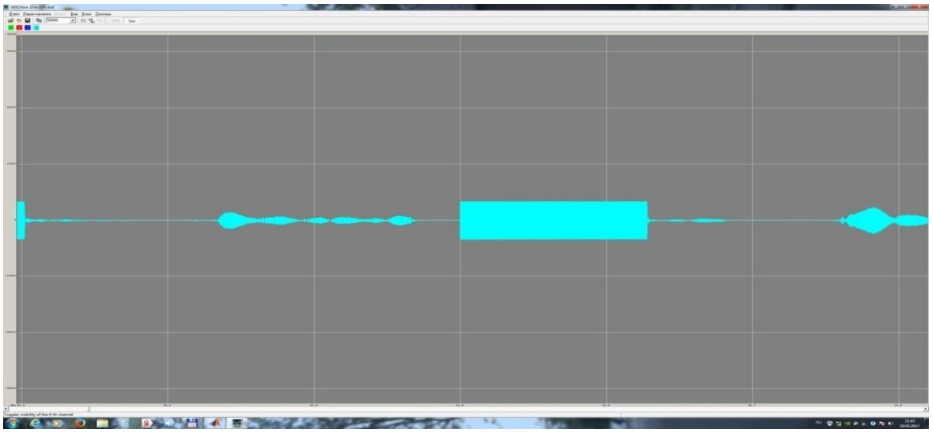


Рис. 1. Осциллограмма сигналов.

Из рассмотрения (1), следует, что при фиксированных (постоянных) значениях параметров лага W, $\theta_{0.7}$, коэффициента усиления приемного тракта и постоянстве на сеансе работы лага характеристик среды c, m_v и β, интенсивность при фиксированном r пропорциональна озвученному объему воды

$$V = \pi(\Delta\theta_{0.7} r)^2 c\tau / 8, \tag{5}$$

что в свою очередь пропорционально длительности импульса τ.

Реверберационный процесс, как и любой квазигармонический случайный процесс, может быть представлен в виде, например, [4, с. 103]

$$V(t) = E(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t)],$$

$E(t)$ - огибающая, характеризующая изменение во времени амплитуды сигнала, ω_0 - центральная частота, $\varphi(t)$ - текущая фаза. Квадрат огибающей (интенсивность сигнала на выходе приемного тракта) записывается как

$$E^2(t) = V_c^2(t) + V_s^2(t),$$

где $V_c(t)$ и $V_s(t)$ низкочастотные квадратурные составляющие.

Относительное измерение интенсивностей (1) и (2) производится при установки τ согласно (3). Время начала приема определяется значением $\tau + \tau/2$, дискретность приема $\tau/2$. Время окончания приема определяется, как $(2R/c) + \tau$. Для интервала приема от дна $2R/c < t < (2R/c) + \tau$ необходимо экстраполирование реверберационной помехи, например, многочленами. Результат измерения и

экстраполирования $E^2(t)$ усредняется для 8…10 циклов излучение/прием. Тогда измеренный коэффициент распознавания определяется как

$$\hat{q}^2 = \frac{\hat{I} - \hat{I}_v}{\hat{I}_v},$$

где $\hat{I}$ - усредненная интенсивность суммы сигнала и помехи на интервале приема от дна, $\hat{I}_v$ - усредненное экстраполированное значение помехи на интервале приема от дна. Так как $\hat{I}_v$ прямо пропорционально τ согласно (1) при фиксированных (постоянных) значениях параметров лага и постоянстве на сеансе работы лага характеристик среды, требуемая длительность зондирующего импульса равна $\tau_д = \frac{q^2}{\hat{q}^2}$.

Адаптация длительности импульса излучения к интенсивности реверберационной помехи дает максимально возможное полезное время сеанса работы лага для измерения доплеровской частоты, что увеличивает точность измерения скорости и пройденного пути носителя (надводный корабль, подводная лодка, различные подводные аппараты). Практическая реализация изложенной процедуры адаптации не требует значительных вычислительных затрат процессора ЦОС.

Литература

1. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Наука. СПб., 2004.
2. Богородский А.В., Яковлев Г.В., Корепин Е.А., Должиков А.К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. Гидрометеоиздат. Л., 1984.
3. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Судостроение. Л., 1978.
4. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Судостроение. Л., 1983.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ГИДРОАКУСТИКИ ПРИ ОСВЕЩЕНИИ БЛИЖНЕЙ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Ю.В.Белоус, канд.техн.наук
АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

SOLUTIONS OF PROBLEMS OF HYDROACOUSTICS AT NEARBY UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE

Yu.V.Belous, Ph.D.
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы оптимизации алгоритмов работы порогового обнаружителя пространственных каналов гидроакустической станции и алгоритмов трассового анализа, обнаруженных гидроакустической станцией подводных объектов. Оптимизация проводится с целью получения устойчивого сопровождения специфических малоразмерных подводных объектов на фоне интенсивных помех, в том числе реверберационных.

Problems of optimizing operation algorithms of a threshold detector of sonar system spatial channels and the algorithms of the path analysis of underwater objects detected by the sonar system are considered. Optimization is carried out in order to obtain sustainable support for specific small-sized underwater objects against background of intense interference, including reverberation.

Современные подходы при решении проблемных задач в гидроакустике позволяют значительно снизить уровни первичных и вторичных гидроакустических полей кораблей, носителей подводных диверсантов, обитаемых и необитаемых подводных аппаратов. Соответственно эффективность гидроакустических средств обнаружения, не адаптированных к современным реалиям падает. Особенно это касается средств обнаружения малоразмерных целей в прибрежной зоне, где наблюдаются повышенные уровни реверберационных и шумовых помех. Это определяет необходимость поиска и реализации новых методов, повышающих эффективность гидроакустических средств освещения обстановки в современных условиях. Нашим коллективом были разработаны и внедрены эффективные методы выделения слабых сигналов на фоне сильных реверберационных помех, а также способы формирования узких диаграмм направленности антеннами малых волновых размеров.

В течение последнего года усилия нашего коллектива были направлены на решение проблемы неустойчивости трассового сопровождения малоразмерных подводных объектов.

Исследование этой проблемы выявили недостатки построения алгоритма порогового обнаружителя эхосигнала от цикла к циклу локации в естественных условиях распространения на этапе первичной обработки, а также устойчивости алгоритма построения трассы цели на этапе вторичной обработки.

Проблема алгоритма порогового обнаружителя эхосигнала проявляется при существенном изменении условий распространения гидроакустического сигнала от цикла к циклу приемоизлучения из-за интенсивного волнения, подводных течений и неравномерной помехе различной природы в морской акватории. Недостаток алгоритма заключался в пропуске полезного сигнала на фоне помехи при большой нестационарности отношения сигнал/помеха.

С целью наглядности этого эффекта на рис.1 представлена характерная реализация цикла приема одного пространственного канала ГАС с наличием сильных и слабых эхосигналов от подводных объектов и ревреберационной помехи. Реверберационная помеха сосредоточена между 180 и 250 отсчетами. Слабые эхосигналы находятся после 40, 80, 280 и 320 отсчета. Красной линией на рис.1 изображен график статического адаптивного алгоритма порогового обнаружителя. Синей линией изображен график динамического адаптивного алгоритма порогового обнаружителя.

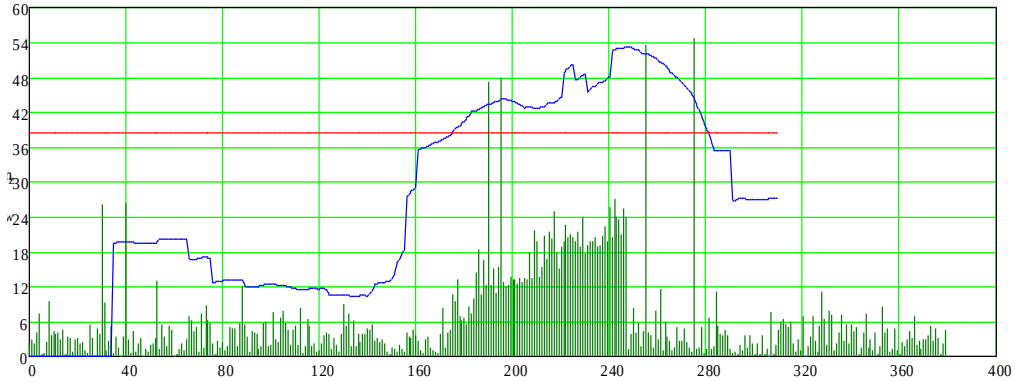


Рис. 1. График исходного алгоритма динамического адаптивного порогового обнаружителя.

Была проведена доработка математической и логической составляющих в алгоритме порогового обнаружителя эхосигнала, что позволило избежать пропуска полезного сигнала в выше описанных условиях с малым отношением сигнал/помеха и, что самое важное, с сохранением значения вероятности ложной тревоги [1, 2].

Результат работы модернизированного алгоритма динамического порогового обнаружителя представлен на рис.2. Из графика работы алгоритма порогового обнаружителя, представленного синей линией, видно обнаружение слабых полезных сигналов, местоположение которых описано ранее.

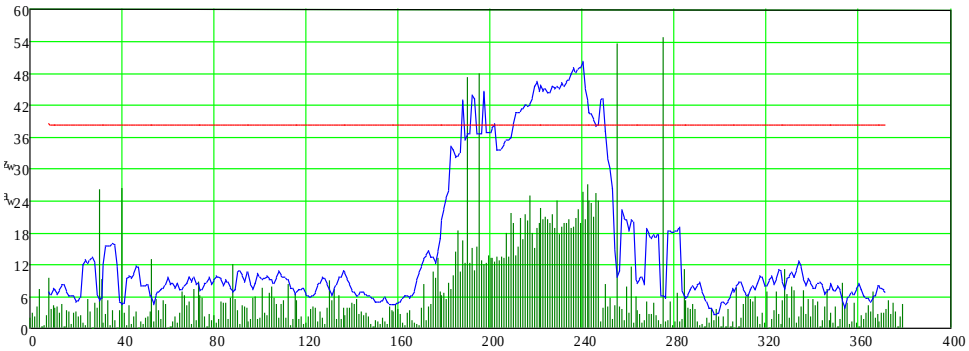


Рис. 2. График модернизированного алгоритма динамического адаптивного порогового обнаружителя.

Еще одной проблемой неустойчивости трассового сопровождения малоразмерных подводных объектов являлись недостатки алгоритма трассового анализа, обеспечивающего сопровождение обнаруженных объектов. Недостаток этого алгоритма заключался в некорректном взаимодействии составных частей между собой: завязка трассы, разветвлении трассы, восстановления трассы. Этот недостаток проявлялся из-за особенностей отражающих свойств специфических малоразмерных подводных объектов.

С целью устранения описанных недостатков была откорректирована логика взаимодействия составных частей алгоритма трассового анализа и применен более сложный математический аппарат регрессии и экстраполяции [3, 4].

На рис.3 графически представлена эмпирически разработанная система стробов с приоритетами, соответствующими позиционным номерам стробов.

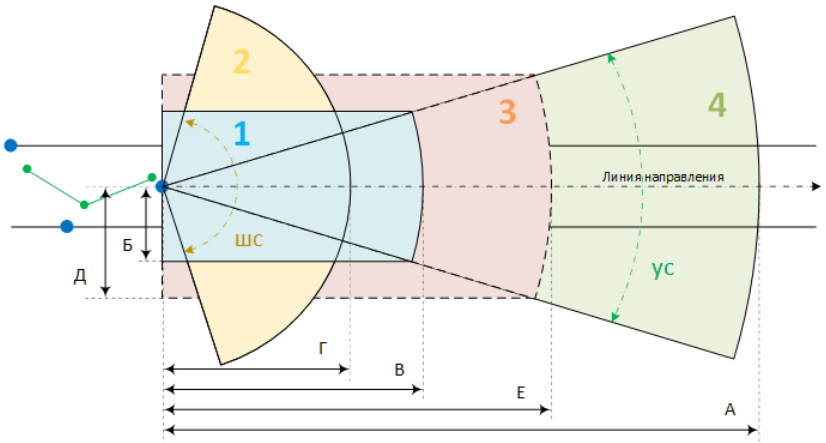


Рис. 3. Система стробов алгоритма трассового анализа.

Используемым в алгоритме стробам присвоены следующие условные наименования:

1. строб минимальной хаотичности;
2. широкий ближний строб захвата маневра;
3. средний строб захвата при небольшом числе пропусков;
4. узкий строб захвата при большом числе пропусков.

Система стробов строится из последней добавленной в трассу точки (точка начала стробов). В качестве центральной оси выбирается направление движения, полученное из уравнения линии направления. Прочие размеры определяются переменными:

V - текущая мгновенная скорость;

V_{max} - максимальная возможная скорость объекта;

Δt - время прошедшее с момента добавления предыдущей точки;

$t_ц$ - время цикла обзора;

УС - угол раскрытия узкого строба;

ШС - угол раскрытия широкого строба;

К - множитель для расчета крыльев захвата поворота;

Размер А - максимальная дальность $A = \Delta t \cdot V_{max}$;

Размер Б - полуширина зоны безусловного принятия $Б = t_ц \cdot V_{max}$;

Размер В - предельная дальность зоны безусловного принятия $B = Б / \sin(УС/2)$;

Размер Г - размер крыльев захвата поворота $Г = К \cdot Б$;

Размер Д - полуширина расширенной зоны захвата поворота $Д = E \cdot \sin(УС/2)$;

Размер Е - Предсказанное удаление $E = \Delta t \cdot V$.

Новые методы математически согласованной корреляционной обработки сигнала, повышающие отношение сигнал-помеха на пороговом обнаружителе и оптимизированный алгоритм трассового анализа опробованы на Гидроакустической станции обнаружения и сопровождения подводных объектов «Маяк-2014», устанавливаемой в Крыму с положительными результатами.

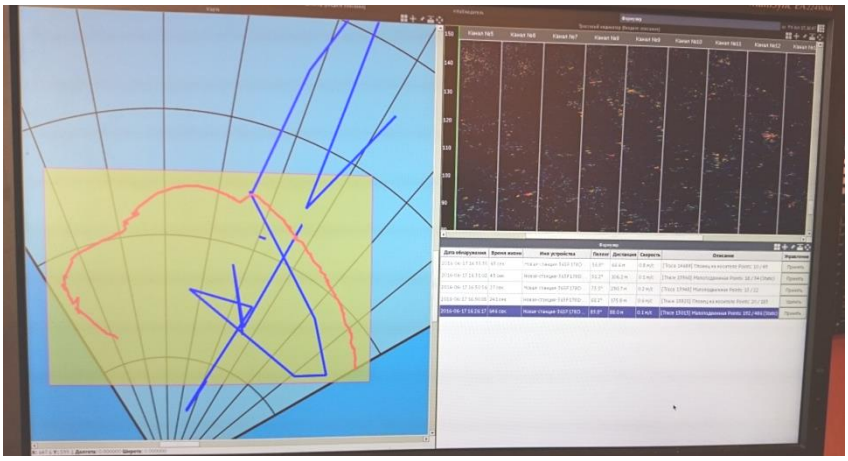


Рис. 4. Монитор АРМ ГАС «Маяк-2014».

Результат решения выявленных проблем представлен на рис.4, где изображен монитор автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора ГАС «Маяк-2014». В левой части экрана, на индикаторе тактической обстановки видны линии, отображающие трассы трех проходов специфических малоразмерных подводных объектов. Трассы лишены недостатков прерывания и ветвления.

В результате серийного производства и эксплуатации ГАС «Маяк-2014» получен научный и технологический задел, позволивший приступать к созданию новой Гидроакустической станции обнаружения и сопровождения малоразмерных подводных объектов «Маяк-МБ».

Литература

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.
2. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1993.
3. Верховых Н.С. Вторичная и третичная обработка информации. СПб, ВМА, 1996.
4. Мироненко М.В. Статистические методы синтеза гидролокационных средств обнаружения и определения КПДЦ. Владивосток, ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2002. − 217 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ В МЕЛКОМ МОРЕ

А.В.Гринюк, В.Н.Кравченко, канд.техн.наук, Ю.В.Махнев, О.И.Пискунова, канд.техн.наук,
А.Т.Трофимов, д-р техн.наук
АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Московская область, Россия

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF LF REVERBERATION IN SHALLOW WATER

A.V.Grinyuk, V.N.Kravchenko, Ph.D., Y.V.Makhnev, O.I.Piskunova, Ph.D., A.T.Trofimov, Dr.Sc.
JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Moscow region, Russia

На основании экспериментальных данных исследуются статистические характеристики низкочастотной реверберации в мелком море. Оценены законы спадания, спектрально энергетические характеристики и плотность вероятности реверберационной помехи в диапазоне частот ниже 250 Гц при использовании различных зондирующих сигналов.

On the base of experimental data LF reverberations in shallow water statistical characteristics are investigated. Roll-off function, spectral characteristics and probability density of reverberation are estimated in frequency range below 250 Hz when different sounding pulses are used.

Низкочастотная акустическая томография в мелком море из-за малых потерь распространения гидроакустических сигналов, их высокой пространственно-временной когерентности позволяет достичь больших дальностей её действия. Однако возможности таких систем ограничиваются наличием реверберационной помехи, основной из которых является донная реверберация. В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований донной реверберации в мелком море глубиной порядка 200 м в диапазоне частот (235 – 255) Гц в условиях летней гидрологии при использовании вертикальных приёмных и излучающих антенн. Во время проведения этих экспериментов осуществлялся также приём гидроакустических сигналов на расположенные на больших чем приведено в работе [1] дальностях (до 100 км) донные приёмные антенные решётки. Уровень принимаемых сигналов был достаточен для проведения анализа реверберационных помех. Кроме того, в том же районе мелкого моря глубиной порядка 230 м производилось зондирование моря различными сигналами в диапазоне частот (72 – 92) Гц с использованием одиночного излучателя акустической мощностью 100 Вт, опущенного с находящегося в дрейфе судна на глубину 50 м. Приём сигналов осуществлялся на донные приёмные антенные решётки, удалённые от излучателя на (22 – 90) км.

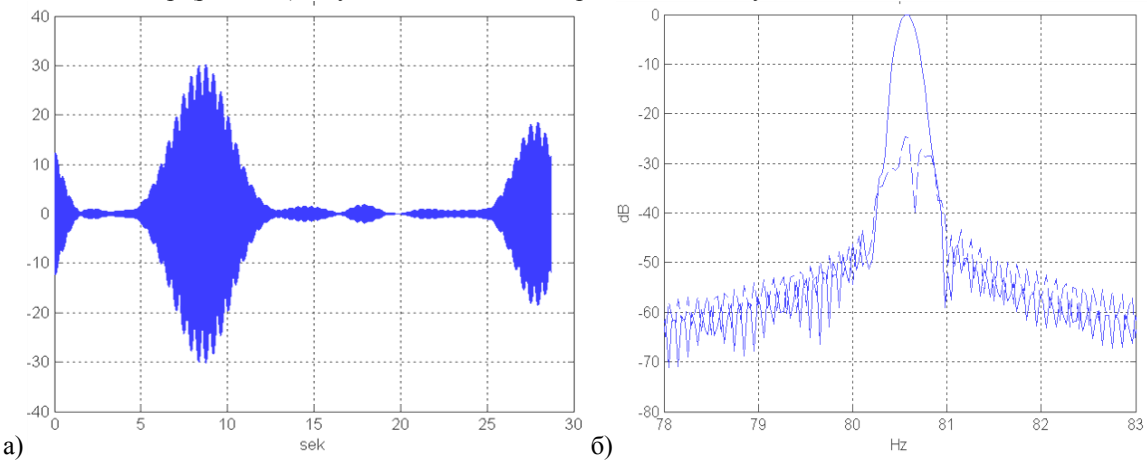
На рис. 1а приведен пример принимаемого донной антенной решёткой тонального аподизированного зондирующего сигнала длительностью 10 секунд на частоте 82 Гц на удалении от излучателя 23 км; спектры (рис. 1, б) прямого зондирующего сигнала (непрерывная кривая) и реверберации (пунктирная кривая) после пространственной обработки сигналов фазированной 30-тиэлементной донной антенной решёткой, скомпенсированной в направлении, отличающегося от направления на прямой сигнал на 20°. Из рис. 1 видно, что ширина спектра реверберации практически равна ширине спектра зондирующего сигнала, что позволяет надеяться на возможность эффективной отстройки от реверберационной помехи с помощью доплеровской фильтрации принимаемых сигналов.

На рис. 2а приведена огибающая окончания принятого зондирующего сигнала длительностью 10 секунд на частоте 82 Гц и закон спада реверберации (рис. 2, б) с аппроксимацией функцией вида:

$$\sigma_r(t) = \sigma_{r0} \cdot \frac{1}{1+\alpha \cdot t^{\beta}}, \quad (1)$$

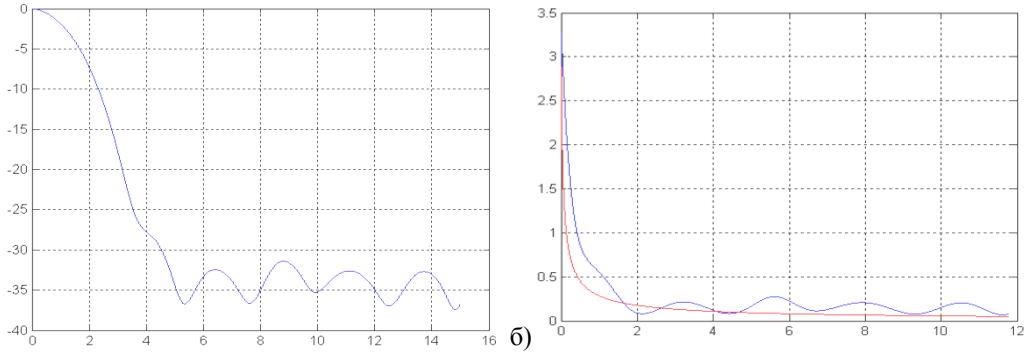
где $\alpha = 12{,}5$ и $\beta = 0{,}75$.

Рис. 3а демонстрирует временную реализацию прямого зондирующего сигнала на частоте 245 Гц и реверберации в широкой полосе частот на одиночном приёмнике 16-тиэлементной донной антенной решётки и их спектр (рис. 3, б) на удалении 94 км от вертикальной излучающей антенны.



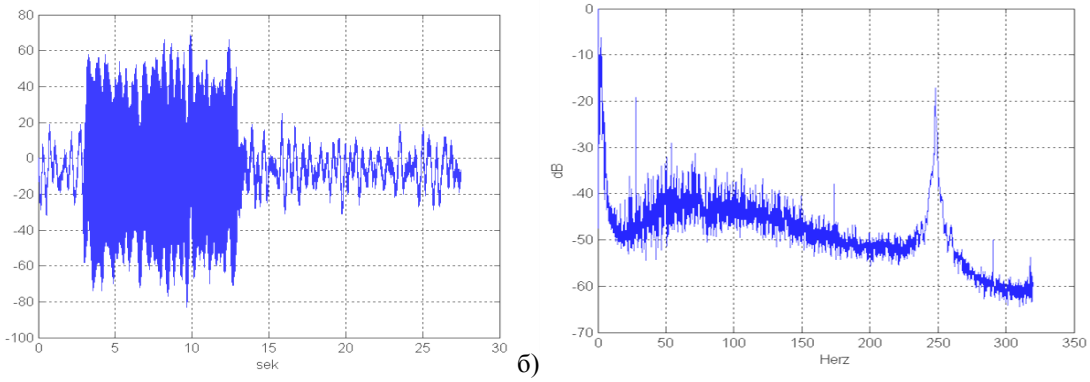
а) б)

Рис. 1. Тональный аподизированный сигнал длительностью 10 секунд на частоте 82 Гц и спектры прямого зондирующего сигнала (непрерывная кривая) и реверберации (пунктирная кривая) после пространственной обработки сигналов фазированной 30-тиэлементной донной антенной решёткой, скомпенсированной в направлении, отличающегося от направления на прямой сигнал на 20°.



а) б)

Рис. 2. Огибающая принятого зондирующего импульса и аппроксимация закона спада реверберации.



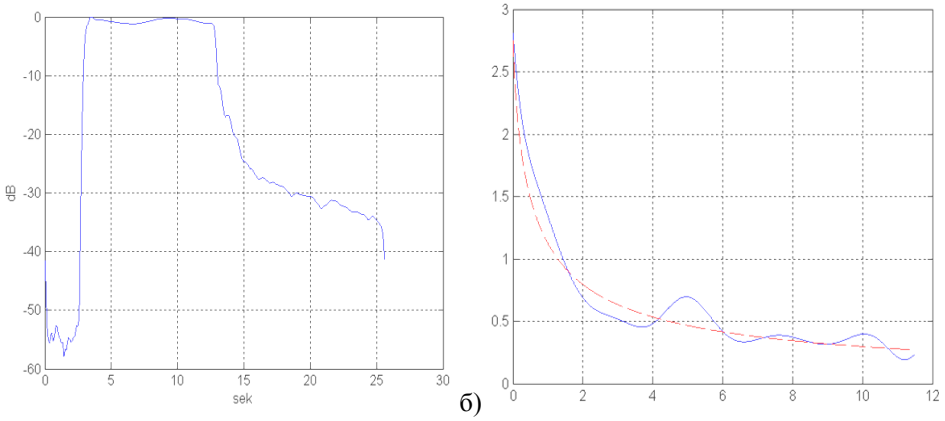
а) б)

Рис. 3. Временная реализация прямого зондирующего сигнала на одиночном приёмнике 16-тиэлементной донной антенной решётки и реверберации в широкой полосе и их спектр на удалении 94 км от вертикальной излучающей антенны.

На рис. 4а приведены огибающая принятого тонального прямоугольного импульса на частоте 245 Гц и аппроксимация закона спада реверберации (рис. 4, б) вида (1) с параметрами $\alpha = 2{,}5$ и $\beta = 0{,}75$.

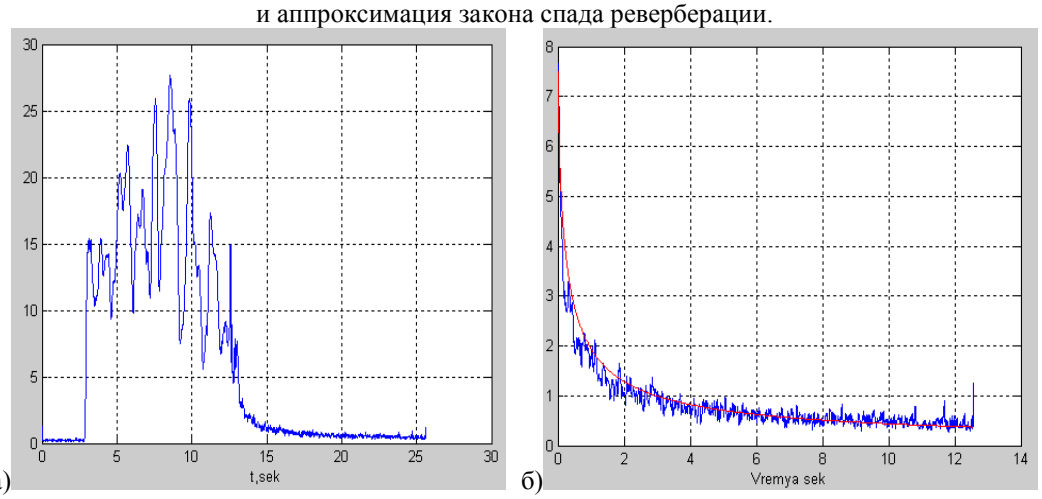
Рис. 5а иллюстрирует пример экспериментальной оценки усредненной по 16 гидрофонам огибающей ЛЧМ сигнала, огибающей реверберации ЛЧМ сигнала и ее аппроксимации (рис. 3, б) с параметрами $\alpha = 0{,}023$ и $\beta = 0{,}75$.

На рис. 6 для того же зондирующего сигнала приведен пример оценки плотности распределения огибающей реверберации, которая с большой достоверностью подчиняется закону Рэлея. Следовательно, при равномерном распределении начальной фазы мгновенное значение реверберации будет подчиняться Гауссовскому закону.



а) б)

Рис. 4. Огибающая принятого тонального импульса на частоте 245 Гц
и аппроксимация закона спада реверберации.



а) б)

Рис. 5. Усредненная по 16 гидрофонам донной антенной решетки огибающая ЛЧМ сигнала, огибающая реверберации ЛЧМ сигнала и её аппроксимация с параметрами $\alpha = 0{,}023$ и $\beta = 0{,}75$.

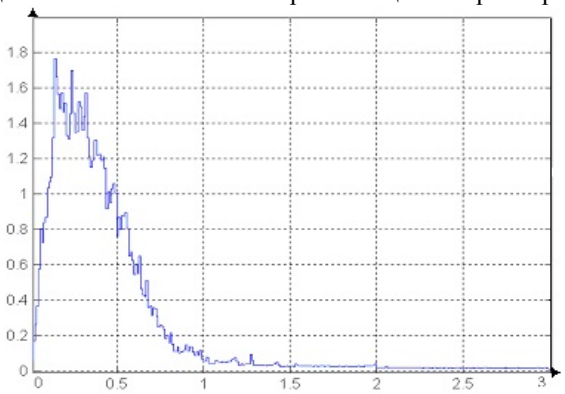


Рис. 6. Оценка плотности распределения огибающей реверберации.

На основании вышерассмотренных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Ширина спектра низкочастотной реверберации в мелком море практически равна ширине спектра зондирующего сигнала, что позволяет надеяться на возможность эффективной отстройки от реверберационной помехи с помощью доплеровской фильтрации принимаемых эхосигналов.
2. Закон спада низкочастотной реверберационной помехи может быть аппроксимирован гиперболической функцией с параметрами, зависящими от частоты.
3. Плотность вероятности мгновенных значений реверберации в мелком море может быть аппроксимирована Гауссовским законом.

Литература

1. Стромков А.А., Лучинин А.Г., Хилько А.И. Исследование низкочастотной донной реверберации в мелком море. Акустический журнал, т.54, №4, 2008.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГИДРОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО РАДИОУПРАВЛЯЕМОГО КАТЕРА

В.И.Каевицер, д-р техн.наук, А.П.Кривцов, канд.физ-мат.наук, И.В.Смольянинов, А.В.Элбакидзе
Фрязинский Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

EXPERIMENTAL SONAR SYSTEM OF LOCAL POSITIONING OF THE AUTONOMOUS RADIO-CONTROLLED POWERBOAT

V.I.Kaevitser, Dr.Sc., A.P.Krivtsov, Ph.D., I.V.Smolyaninov, A.V.Elbakidze
Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Branch in Fryazino, Fryazino, Russia

Рассмотрено применение гидролокационного метода локального позиционирования гидроакустического комплекса при обследовании донной поверхности малого водоема с помощью дистанционно управляемого катера. Метод основан на измерении дальности до объекта и вычислении углов прихода эхо-сигналов на две или более разнесенные антенны с большой базой. Для увеличения энергетики применены ЛЧМ - зондирующие сигналы. Показана возможность практического использования данного метода для географической привязки получаемых аппаратурой катера акустических изображений и профилограмм. Представлены результаты натурных испытаний экспериментальной системы позиционирования.

The data presented is a result of research of the application of the sonar method of sonar device local positioning, which has been obtained conducting the survey of the bottom surface of a small water basin by means of a remotely controlled powerboat. The method is based on measuring distance to the object and calculating angles of arrival of echoes to two or more spaced antennas with a large base. To increase the power, chirp-sounding signals are used. The research demonstrates the possibility of practical use of the method for geo-referencing of acoustic images and profilograms received by the equipment of the powerboat. Results of the experimental positioning system testing are presented.

В настоящее время существует немало средств, позволяющих решать задачу определения местоположения в пространстве того или иного физического объекта. При работах в открытом море на больших акваториях и глубинах для позиционирования гидролокационного комплекса и определения его географического положения, как правило, используется глобальная навигационная система GPS. При хорошей видимости спутников и использовании алгоритмов коррекции дифференциального режима в этой системе удается снизить погрешность определения координат объекта в горизонтальной плоскости до 1-2 метров. С другой стороны, на точность сигнала GPS влияют массивная облачность, магнитные бури и прочие неблагоприятные факторы. Вместе с тем в границах определенных территорий - при обследовании гидротехнических сооружений и подводных объектов вблизи береговой линии, при выполнении детальной съемки рельефа дна малых водоемов, вместо GPS могут использоваться более простые системы локального позиционирования. Эти системы, лишенные недостатков присущих GPS или ГЛОНАСС, способны решать задачи определения местоположения с точностью вполне достаточной для промерных работ в обследуемой акватории [1].

Назначение и принцип работы. В основе работы рассматриваемой системы позиционирования лежит принцип определения координат цели по имеющимся измерениям дальности до нее от двух (или более) фиксированных точек [2, 3]. Так, зная результаты измерения расстояний от позиционируемого устройства до хотя бы трех стационарных точек, его местоположение по отношению к ним определяется путем решения стандартной задачи триангуляции. При наличии измерений дальности только до двух точек сначала расчетным путем находятся угловые координаты объекта, и уже по ним вычисляется его положение, привязанное к географическим координатам.

Рассмотренный в работе вариант системы локального позиционирования предназначен для определения местоположения мобильного устройства (катера) в пределах конкретной территории по измерениям расстояния от него до двух приёмных антенн расположенных вблизи берега (см. рис. 1).

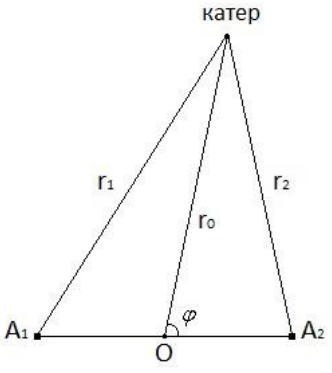


Рис. 1. Схема определения углового положения катера по измерениям дальности до него от стационарных акустических датчиков A_1 и A_2. База интерферометра $A_1A_2 = d$.

В состав комплекса входит устанавливаемый на дистанционно управляемом катере мобильный модуль, пара расположенных вблизи берега гидроакустических антенн A_1 и A_2, управляющий компьютер и специальное программное обеспечение. Передача данных на мобильное устройство и управление катером происходит по цифровому помехозащищенному радиоканалу. Измерение расстояния от катера до антенн проводится по акустическому каналу с применением ЛЧМ сигналов. С целью проверки и контроля работы системы позиционирования в состав комплекса входил приемник спутниковой навигации. Блок схема аппаратуры комплекса с внешними датчиками навигационной информации приведена на рис. 2. В аппаратуре использованы модули и программное обеспечение, описанные в [4].

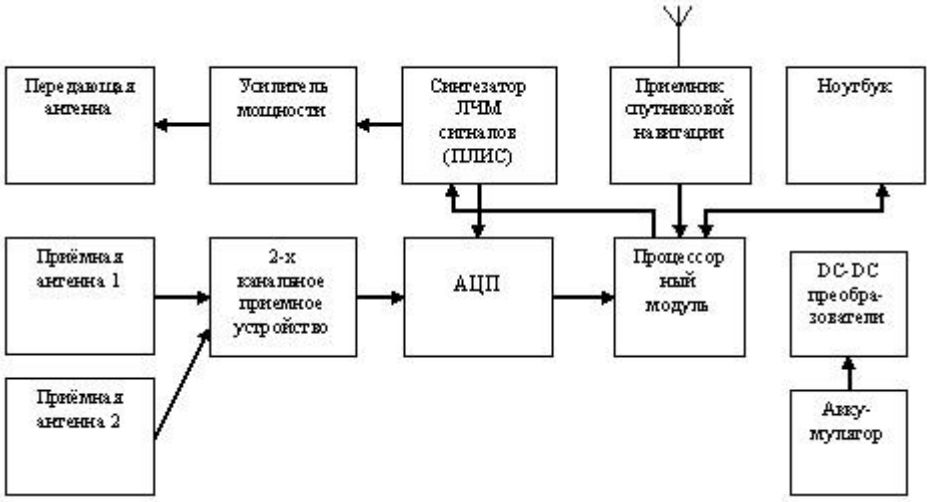


Рис. 2. Структурная схема аппаратуры комплекса.

Тестирование системы позиционирования. Для оценки возможности практического применения предложенной системы позиционирования было выполнено ее тестирование при работах в прибрежной зоне небольшого водоема. В ходе испытаний катер, оборудованный мобильным модулем, перемещался по обследуемой акватории и его координаты фиксировались береговой приемной станцией, состоящей из двух разнесенных на небольшое расстояние гидроакустических антенн и управляющего компьютера. Полученная информация регистрировалась и в дальнейшем подвергалась обработке.

На рис. 3, для примера, приведены данные по измерению расстояния от катера до приемных антенн A_1 и A_2 на одном из галсов. График на Рис. 4 показывает вычисленное по этим данным угловое положение аппарата относительно середины базы интерферометра (точка О на рис. 1).

Точность измерения дальности в этой системе определяется параметрами применяемых акустических сигналов, алгоритмами их обработки, а также погрешностями измерения скорости звука в акустических каналах антенн A_1 и A_2. В условиях эксперимента (при наличии неопределенности измерения скорости звука ΔC/C ~ 0.01) относительная погрешность измерения дальности была $(\Delta r_0/r_0) \approx 0.01$.

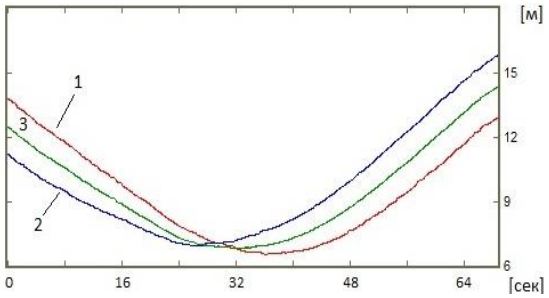


Рис. 3. Измеренные расстояния: 1 и 2 – от катера до антенн A_1 и A_2, 3 – расстояние, вычисленное от катера до начала координат (точка О на рис. 1).

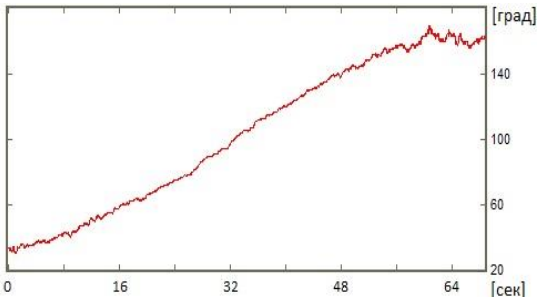


Рис. 4. Вычисленное угловое положение катера относительно начала координат. База интерферометра d = 3.08 м.

На точность определения углового положения катера в значительной степени влияет его ориентация по отношению приемным антеннам. На рис. 5 представлены графики изменения погрешности углового положения катера в зависимости от угла φ (см. рис. 1). Кривые 1 соответствуют ошибке в определении углового положения при известной скорости звука вдоль акустического канала. Кривая 2 показывает эту же ошибку при наличии неопределенности скорости звука ΔC/C=0.01. На рис. 5а вычисления выполнены для базы d = 3.08 м. На рис. 5б при расчетах база была взята равной 10 метрам.

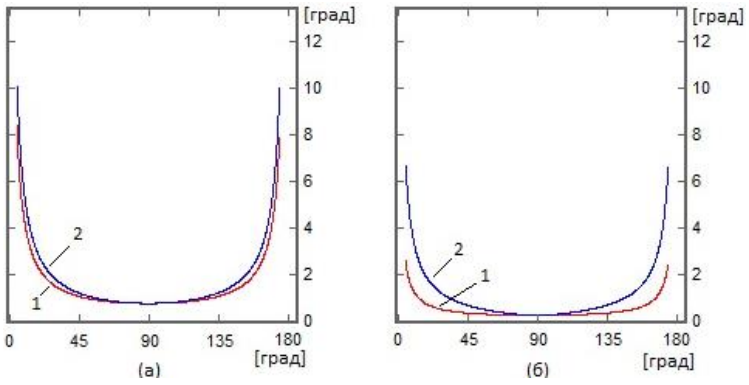


Рис. 5. Интервал неопределенности углового положения объекта в зависимости от угла φ.

Из графиков видно, что наилучшее измерение углового положения наблюдается в направлении перпендикулярном базе интерферометра ($\varphi = 90^{\circ}$). В диапазоне от 45° до 135° погрешность измерения углового положения объекта увеличивается незначительно. В направлениях вдоль базы ($\varphi = 0^{\circ}$,$\varphi = 180^{\circ}$) определение углового положения объекта становится практически невозможным. Очевидно, что точность измерения угла повышается с увеличением расстояния между антеннами A_1 и A_2 (см. Рис. 5б).

Заключение. Испытания предложенной системы локального позиционирования показали возможность ее применения для определения местоположения мобильного оборудования на открытых акваториях (в рамках границ развернутой системы позиционирования) с точностью достаточной для выполнения поисковых и промерных гидролокационных работ. Технические возможности системы допускают ее применение в качестве резервной системы позиционирования, а также в условиях, где использование GPS / ГЛОНАСС приемников невозможно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-07-00612.

Литература

1. «Стандарты МГО на гидрографические съемки». Специальная публикация № S-44, Международная гидрографическая организация, 5-е издание, Монако, 2008.
2. Васин В.В., Власов О.В., Григорин-Рябов В.В., Дудник П.И., Степанов Б.М. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения). М.: Советское радио, 1970.
3. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970.
4. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Дистанционно управляемый катер с гидролокатором бокового обзора для картографирования дна малых водоемов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 10. С.80-91.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ НА ВХОДЕ ГИДРОЛОКАТОРА ПО ЭЛЕМЕНТАМ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ, РЕАЛИЗОВАННОЕ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Б.П.Белов, д-р техн.наук, Н.Н.Семенов, канд.техн.наук, М.М.Шилин[1], Е.С.Шилина[1]
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия
[1]АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

DIGITAL FORMING OF SONAR ANTENNA DIRECTION IN TIME DOMAIN

B.P.Belov, Dr.Sc., N.N.Semenov, Ph.D., M.M.Shilin[1], E.S.Shilina[1]
Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
[1]JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Сравнивается два варианта моделирования сигналов и помех на входе гидролокатора – во временной или спектральной области, причём последняя распространена очень широко. Но и во временной и в спектральной области моделирование возможно как по выходам каналов антенны с указанием интегральных параметров таких каналов, так и по элементам многоэлементной антенны гидролокатора. Второй подход позволяет моделировать характеристики направленности антенны и ее помехоустойчивость для произвольного расположения элементов. Сравнивается вычислительная сложность алгоритмов.

Two versions of the simulation of signals and interference at the sonar input are compared - in time domain or spectral domain, the latter being is widely used. Both in time and spectral domains simulation is possible both on the outputs of the antenna channels, indicating the integral parameters of such channels, and on the elements of the multi-element sonar antenna. The second approach allows to simulate antenna directivity characteristics and its noise immunity for arbitrary arrangement of elements. Computational complexities are compared.

На вход имитационной модели гидролокатора поступает полезный сигнал и помехи, структура модели сигналов и помех приведена на рис. 1. Так как модель гидролокатора имеет на входе элементы антенной решетки, то модель сигналов и помех должна генерировать независимые сигналы и помехи для каждого элемента.

Входные воздействия на рис. 1 содержат ходовые, реверберационные, локальные помехи, а также полезный эхо-сигнал.

Основные выражения, необходимые для описания сигналов и помех, были хорошо описаны в [1]. Рассмотрим различные варианты реализации модели сигналов и помех.

1. Расчёт энергетических соотношений на входе антенны. Такой подход является самым популярным и эффективным для быстрой оценки технической реализуемости гидролокатора и основан на уравнении гидролокации, предложенным Уриком в [2]:

DL=SL-2TL+TS-NL,

где DL – уровень обнаружения сигнала, дБ, SL – уровень источника, дБ, TL – потери на распространение, дБ, TS – сила цели, дБ, NL – уровень шумовой помехи, дБ.

Энергетический расчёт не позволяет формировать сложную структуру сигналов и помех, особенности характеристики направленности многоэлементной антенны с неравномерным распределением весов и задержек и так далее.

2. Формирование сигналов и помех по каналам внутри гидролокатора. Не требователен к вычислительным ресурсам, даёт хорошие результаты моделирования в достаточно простых сигнально-помеховых ситуациях, но оказывается достаточно сложно реализуемым при наличии в модели большого количества локальных по пространству источников помех и сигналов.

3. Формирование сигналов и помех на входах элементов антенны гидролокатора. Данный вариант наиболее близок по способу формирования сигналов и помех в гидролокаторе к процессам, происходящим в реальном мире, поэтому не ограничен ни количеством источников сигналов и помех, ни алгоритмами последующей обработки гидроакустической информации [3], но при этом достаточно требователен к вычислительным ресурсам.

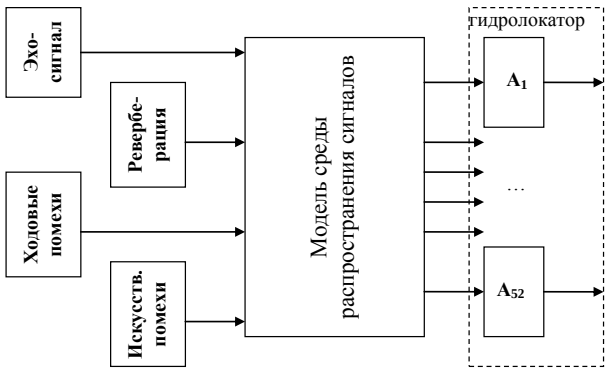


Рис. 1. Структура модели сигналов и помех.

Рассмотрим реализуемость модели сигналов и помех на элементах гидролокатора при вычислениях во временной области без ограничений по ширине спектра рабочих частот и сравним количество вычислений с частотной обработкой.

Одна из наиболее часто встречающихся задач в модели формирования сигналов и помех на элементах антенны – необходимость передискретизации сигналов на дробный коэффициент. Производится она для того, чтобы сформировать заданную задержку для конкретного сигнала на заданный элемент антенны.

Наиболее популярный способ передискретизации цифрового сигнала – в спектральной области. Он подразумевает вычисление БПФ сигнала на выходах элементов с последующим умножением коэффициентов спектра на экспоненты, имитирующие временну́ю задержку. Данный способ имеет несколько ограничений:

полученный таким образом спектр теряет возможность восстановить сигнал во временно́й области после ОБПФ на границах между буферами и делает невозможным использовать данный способ без дополнительных преобразований для генерации потока данных по каналам во временной области в интересах последующей обработки;

при большом числе каналов (например, число элементов антенны порядка 50 и число пространственных каналов 30–60) необходимость двойного преобразования из временно́й области в частотную и обратно для каждого канала делает данный способ очень ресурсоёмким как по количеству необходимой памяти, так и по количеству вычислений. К тому же данный способ практически не поддаётся независимой параллельной обработке.

Альтернативным способом передискретизации сигнала для формирования каналов фазированной антенной решётки является обработка во временно́й области. Для этого необходимо обеспечить введение заданной задержки для каждого элемента антенной решётки, зависящей от координаты центра элемента и угла компенсации. Из теоремы Котельникова следует, что по дискретным отсчётам сигнала, удовлетворяющего условию Найквиста, можно восстановить любое мгновенное значение сигнала, т.е.

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k \cdot \Delta) \frac{\sin(\pi / \Delta \cdot (t - k \cdot \Delta))}{(\pi / \Delta \cdot (t - k \cdot \Delta))}, \quad (1)$$

где Δ – интервал дискретизации, $s(t)$ – значение сигнала в момент времени t.

Практически данное преобразование может быть реализовано с помощью КИХ-фильтра со следующими коэффициентами [4]:

$$H_i = \frac{\sin\left(\pi \cdot (i - \tau / T)\right)}{\left(\pi \cdot (i - \tau / T)\right)}, \quad (2)$$

где T – интервал дискретизации, i – номер отсчёта в буфере, τ – требуемая задержка. Данный фильтр называется sinc-фильтром, так как его коэффициенты вычисляются с помощью функции $\mathrm{sinc}(x)=\sin(x)/x$. Но как следствие эффекта Гиббса при конечном числе коэффициентов фильтра передаточная характеристика имеет характерную нелинейность, уменьшить которую необходимо оконной функцией, например функцией Хэмминга.

Моделирование показало, что для реализации данного фильтра с коэффициентом нелинейности не более 0.1% достаточно использовать 50…70 коэффициентов фильтра. Но так как общее количество вычислений для формирования M каналов из N элементов составит в общем случае $M \cdot N \cdot 50$ умножений на каждый интервал дискретизации, для практического использования желательно уменьшить количество вычислений. Чтобы это сделать, достаточно вспомнить, что коэффициенты КИХ-фильтра повторяют коэффициенты идеального фильтра низкой частоты (ФНЧ). Таким образом, заменив идеальный ФНЧ на асимптотически близкий к нему ФНЧ, построенный на базе БИХ-фильтра, можно добиться низкой неоднородности и линейной фазочастотной характеристики на всем диапазоне рабочих частот при невысоком порядке фильтра (достаточно фильтра третьего порядка). Методика расчёта коэффициентов БИХ-фильтра для передискретизации описана в [5]. Тогда количество вычислений уменьшится до $M \cdot N \cdot 6$ (для БИХ фильтра 3-го порядка требуется 3 умножения в числителе, 3 в знаменателе) на каждый интервал дискретизации входного сигнала и окажется существенно меньше, чем при использовании формирования фазированных каналов в спектральной области.

Оценка вычислительных затрат. Чтобы сравнить вычислительную сложность обработки во временной и спектральной области были построены численные модели входных сигналов гидролокатора и всех процессов обработки сигнала внутри него на основе информации из источников [6, 7]. Условия расчёта были следующими: частота дискретизации 80 кГц; частота несущей 20 кГц; кодирование – фазоманипулированная последовательность длиной 127 символов; длительность сигнала 127 мс; антенная решётка 52 элемента; волнение моря 4 балла; тип дна – песчаное дно; радиус объёмных неоднородностей 2 м; дистанция до объекта локации 1500 м; количество локальных источников помехи – 10; расстояние до источников – от 500 м до 2000 м. Форма спектра сигнала каждого источника зависит от расстояния. Учитываются эффекты Доплера от движения носителя гидролокатора и источников.

Для формирования моделей сигналов и помех используем следующие варианты моделирования:

1. **Спектральная обработка без переноса спектра**. Все сигналы и помехи формируются в спектральной области, там же суммируются, после чего либо передаются на обработку в модели гидролокатора без обратного преобразования, либо преобразуются обратным преобразованием Фурье к сигналам во временной области.

2. **Спектральная обработка с переносом спектра**. Все сигналы и помехи формируются в спектральной области на низких частотах, после чего спектр переносится на рабочую частоту дополнением спектра нулями, и методом обратного преобразования Фурье восстанавливается сигнал во временной области. На практике используется редко.

3. **Временная обработка без переноса спектра**. Сигнал формируется изначально на рабочей частоте, все преобразования соответствуют своим физическим аналогам, точность моделирования заранее может быть рассчитана, но при этом данный метод требователен к вычислительным ресурсам.

4. **Временная обработка с переносом спектра**. Так как сигналы и помехи в гидролокаторе относительно узкополосные, можно формировать их в виде узкополосного низкочастотного сигнала, суммировать на элементах антенны, и только после этого методом гетеродинирования переносить на рабочую частоту гидролокатора. Используется для уменьшения количества вычислений, так как при обработке низкочастотного сигнала можно использовать меньшую частоту дискретизации.

5. **Смешанная обработка без переноса спектра**. Так как некоторые преобразования требуют меньше вычислений при обработке во временной области (передискретизация, например), а другие – в спектральной обработке (сложная фильтрация), можно совмещать достоинства тех и других методов при смешанной обработке. Важно только, чтобы вычисления преобразования Фурье не составляли существенной части всех вычислений.

Ниже приведём сравнительную таблицу для разных вариантов моделирования (табл. 1). В качестве цифрового параметра указана вычислительная сложность в миллионах умножений с накоплением в секунду (MMACs).

Таблица 1. Сравнительная таблица количества вычислений для различных алгоритмов

Тип обработки	Фазирование, Доплер	Спектральные искажения	Сумма, MMACs	Примечание
Спектральная без переноса спектра	2 415	31.2	2446.2	Сигнал после формирова-ния снова во временной области
Спектральная с переносом спектра	440	5.1	445.1	Наименьшее число вычислений, наихудшее ОСП
Временная без переноса спектра	1 240	4 112	5 352	Наибольшее число вычислений, наилучшее ОСП и возможности
Временная с переносом спектра	214.8	622.6	837.4	
Смешанная без переноса спектра	1 240	5.1	1 245.1	Наилучшая производительность среди методов без переноса спектра

Как видно из таблицы, для заданных входных параметров наименьшее количество вычислений требует спектральная обработка с переносом спектра. Именно такой метод лучше всего подходит для систем с ограниченным количеством вычислительных ресурсов.

Обработка во временно́й области без переноса спектра является оптимальной по возможностям и отсутствию искажений, после неё возможно использование любых измерителей параметров сигнала, но она требует наибольшего количества вычислений.

Асимптотически близкой по ОСП на выходе к обработке во временной области без переноса спектра является смешанная обработка, требующая в 10 раз меньше вычислений. При этом фазирование и доплеровские смещения частоты производятся во временной области, а сложная фильтрация (спектральные искажения) производится в спектральной.

Литература

1. Найт У.С., Придэм Р.Г., Кей С.М. Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах // ТИИЭР. 1981. Т.69, № 11. С.84–154.
2. Урик Р.Д. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 446 с.
3. Applebaum S.P., Chapman D.J. Adaptive arrays with main beam constraints. IEEE Trans. Antennas Prop. 24:650–662. 1976.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Изд.2. М.: Бином, 2006. 652 с.
5. https://ccrma.stanford.edu/~jos/resample/
6. Белов Б.П., Семенов Н.Н. и др. Система автоматизированного проектирования антенн и расчета помех. Изд.2. СПбГМТУ, 2010. 196 с.
7. Информационные технологии в радиотехнических системах / Под ред. И.Б. Федорова. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2004. 766 с.

ВИБРОУСТОЙЧИВЫЕ ПРИЁМНИКИ ДЛЯ БОРТОВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

А.К.Батанов, Б.М.Бродский, канд.техн.наук, А.В.Цветков, А.А.Кузьмин, В.С.Жуменков
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

SHAKEPROOF RECEIVERS FOR ONBOARD SONAR ANTENNAS

A.K.Batanov, B.M.Brodskiy, Ph.D., A.V.Tsvetkov, A.A.Kuzmin, V.S.Zhumenkov
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Описывается конструкция гидроакустического приемника, устойчивая к вибрационным помехам, воздействующим на бортовые антенны подводных лодок.

The design of shakeproof sonar receiver resistant to vibration noise influencing onboard acoustic antennas is discussed.

Многоэлементные гидроакустические антенны состоят из антенных модулей, в совокупности образующих антенную решетку. Каждый антенный модуль состоит из обтекателя, одного или нескольких гидроакустических приемников (пьезокерамических, волоконно-оптических, композитных), акустического экрана, линий электрических либо волоконно-оптических коммуникаций и корпуса.

Одним из основных требований к антенному модулю гидроакустической антенны, размещаемой на мобильном носителе, является виброустойчивость входящих в его состав гидроакустических приемников (ГАП), т.е. их способность надежно принимать слабые акустические сигналы, излучаемые объектами поиска в условиях воздействия вибрационных помех носителя, передаваемых на ГАП через узлы крепления антенных модулей к корпусу носителя [1].

Основные типы ГАП, входящие в состав многоэлементных гидроакустических антенных модулей содержат амортизирующие устройства, предназначенные для снижения уровня вибрационных помех и выполнены в виде:

– цилиндрический приемник (условное обозначение ГФ-20), оснащенный полимерными амортизаторами, расположенными с каждого торца приемника;

– приемник (условное обозначение ГФ-10А), содержащий резиновые втулки, установленные по углам прямоугольной конструкции;

– дисковый приемник (условное обозначение ГФ-5), содержащий металлические элементы крепления к несущей конструкции, расположенные по нейтральной линии колебательной системы.

Однако, амортизирующие устройства, содержащиеся в перечисленных ГАП, имеют достаточно высокую жесткость, что не позволяет достичь существенного снижения частоты собственных колебаний системы, тем самым повышая чувствительность преобразователей к вибрации и снижая помехоустойчивость антенных решеток.

В работе [2] рассмотрены и исследованы способы снижения динамических нагрузок колебательных систем. Показано, что эффективное снижение вибрационных помех достигается при снижении частоты собственных колебаний в 3-6 раз по отношению к частоте возмущающих колебаний. Отношение частоты собственных колебаний системы и частоты колебаний, воздействующих на систему, называется коэффициентом динамичности системы. Помехоустойчивость ГАП возрастает при уменьшении его коэффициента динамичности. В работе [3] показано, что наилучшие демпфирующие свойства гасителя колебаний реализуются при рассогласовании частот изгибных колебаний двух одинаковых приемников не менее чем в 2 раза.

Целью доклада является описание разработанной авторами виброустойчивой конструкции ГАП. Отличие этой конструкции от известной состоит в наличии встроенных в ГАП амортизаторов, позволяющих снизить коэффициент динамичности ГАП за счет входящих в их состав упругих полимерных стержней в единой герметичной оболочке, заполненной вибропоглощающим материалом.

Испытания по определению чувствительности ГАП к вибрации проводились в частотном диапазоне от 0,07 до 2,4 кГц, согласно схеме расстановки и подключения оборудования, приведенной на рис.1.

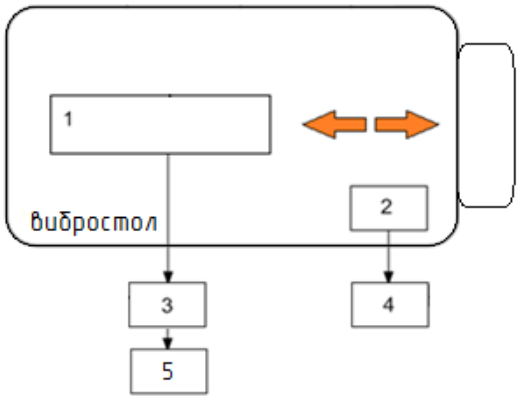


Рис. 1. Схема расстановки и подключения оборудования к вибрационной установке в испытательном центре.

На рис.1 изображены: 1 – макет испытуемого приемного модуля, состоящий из 6-ти ГАП в единой герметичной резиновой оболочке, заполненной вибропоглощающим материалом; 2 – контрольно-измерительный акселерометр; 3 – усилитель измерительный; 4 – ЭВМ с ТПО управления вибрационной установкой; 5 – цифровой запоминающий осциллограф.

На рис.2 представлены усредненные по всем каналам частотные характеристики виброчувствительности ГАП без амортизаторов и ГАП со встроенными амортизаторами при воздействии вибрации в один g, где g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Из рассмотрения рис.2 следует, что, как и следовало ожидать, виброчувствительность обоих типов ГАП снижается с ростом частоты.

Разность ординат кривых, приведенных на рис.2, изображена на рис.3.

Из рис.3 следует, что применение описанного технического решения повышает виброустойчивость ГАП в среднем на 10-20 дБ. Особенно эффективна предложенная конструкция в низкочастотном диапазоне.

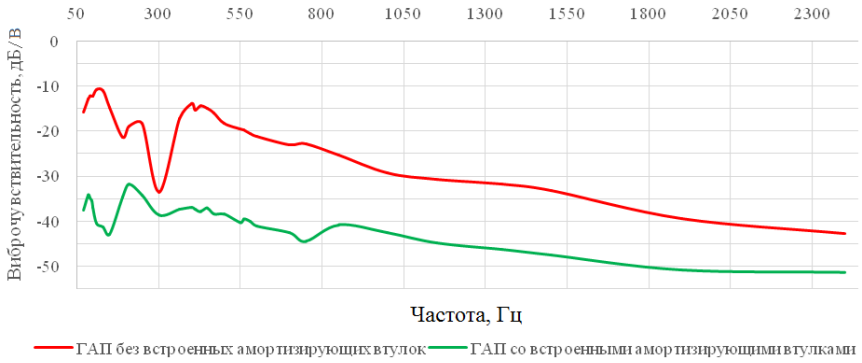


Рис. 2. Частотные характеристики виброчувствительности ГАП макета приемного модуля.

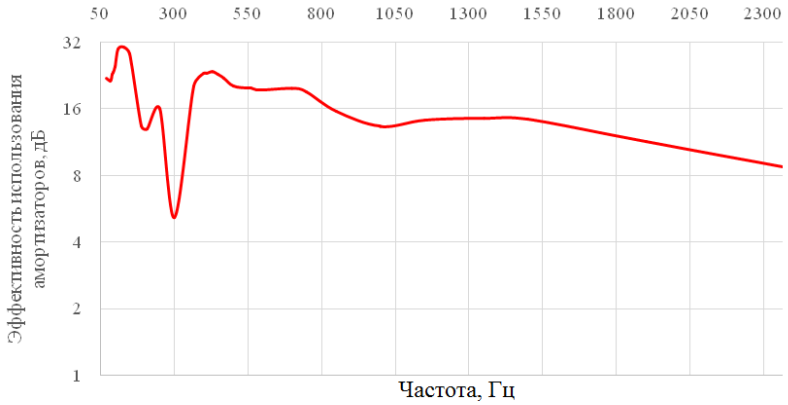


Рис. 3. Частотная зависимость отношения значений виброустойчивости встроенных амортизаторов в конструкции ГАП по отношению к виброустойчивости преобразователей без встроенных амортизаторов.

Литература

1 Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Ленинград: Судостроение, 1980.
2 Степанов А.Г. Динамика машин. – Екатеринбург: УРоРАН, 1999.
3 Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. – Владимир, 2001.

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ

Б.М.Бродский, канд.техн.наук, А.А.Кузьмин, А.В.Семенова
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

METHODS OF PIEZOCERAMIC RECEIVER PARAMETERS VARIATION REDUCTION

B.M.Brodskiy, Ph.D., A.A.Kuzmin, A.V.Semenova
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Предлагается комплекс методов снижение разброса параметров пьезокерамических приемников.

The complex of methods intended to reduce piezoceramic receiver parameters variation is proposed.

Помехоустойчивость многоэлементных фазированных гидроакустических решёток во многом зависит от идентичности параметров составляющих их элементарных приемников.

В ходе исследований в работе [1] были рассмотрены цилиндрические и плоские соединители, представляющие собой контактные пары.

Целью работы является изложение комплекса методов, объединенных в многоэтапную процедуру, которая позволила бы обеспечить минимальный разброс амплитудных характеристик гидроакустических приемников (ГАП), входящих в состав многоэлементной гидроакустической антенны.

Рассмотрим эти методы.

1. Использование пьезокерамических блоков (ПКБ) с частотой резонанса, не менее чем в 3 раза превышающей верхнюю частоту рабочего диапазона частот (РДЧ). Это позволяет весь РДЧ ГАП расположить на линейной (плоской) части частотной характеристики ПКБ, обеспечив тем самым слабую зависимость амплитудных характеристик ПКБ от частоты [2].

2. Применение новой технологии более точного (в 1,5-2 раза) измерения параметров ПКБ, поступающих с завода-изготовителя керамики. Технология состоит в применении для контроля параметров ПКБ, вместо традиционно используемого прижимного устройства типа "крокодил", специально разработанного прижимного электрического контакта, имеющего малую присоединенную массу (не более 0,3 г) и высокую гибкость.

3. Распределение ПКБ, поступивших с завода-изготовителя, на группы с идентичной (с точностью до ±2%) чувствительностью в каждой группе с последующим комплектованием ГАП из ПКБ таким образом, чтобы суммарная чувствительность всех ГАП одного антенного модуля была идентичной. На рис.1 для примера приведена гистограмма распределения чувствительности ПКБ в партии, поступившей с завода-изготовителя пьезокерамики.

Следует заметить, что данная технология комплектования ГАП, кроме решения главной задачи – достижения идентичности амплитудных характеристик ГАП, обеспечивает практически безотходное использование всей партии ПКБ, поступившей с завода-изготовителя.

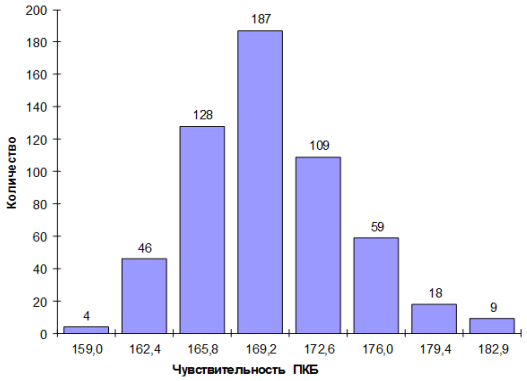


Рис. 1. Гистограмма распределения чувствительности ПКБ в партии, поступившей с завода-изготовителя пьезокерамики.

4. Применение конструкции блока ГАП, обеспечивающей снижение взаимного влияния смежных ГАП. Предлагается конструкция макетного образца приёмного блока, состоящего из набора ГАП, размещенных в резиновом шланге с металлической сеткой (ШАМС), имеющем поперечное сечение в виде овала. В поперечном сечении ШАМСа каждая пара преобразователей размещена вдоль большей оси этого овала, что позволяет сформировать также овальную характеристику направленности приемного канала, большая ось которой перпендикулярна большой оси овала. Это позволяет уменьшить взаимное влияние смежных приемных каналов в условиях плотного размещения преобразователей на антенне.

5. Применение технологии заполнения внутреннего объема блока ГАП двухкомпонентной полимерной композицией полиуретана, исключающей газовые включения в целях создания однородного звукопрозрачного слоя и обеспечивающей неравномерность характеристики направленности не более 2 дБ на верхней частоте РДЧ.

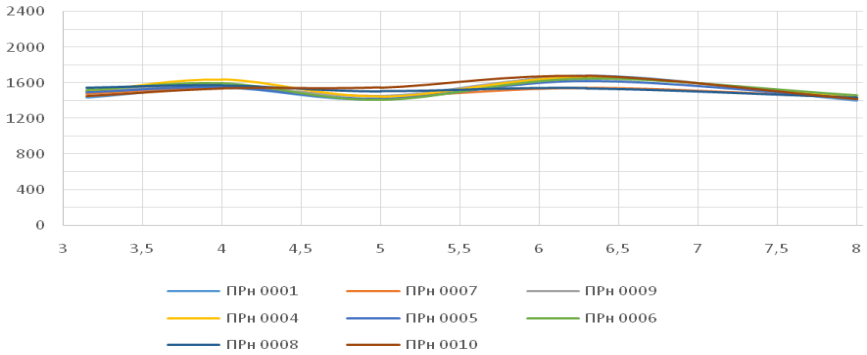


Рис. 2. Частотная характеристика восьми макетных образцов приемных блоков.

В результате описанных методов разброс чувствительности ГАП в макетных образцах приемных модулях не превышает 4%.

Для подтверждения этого вывода на рис.2 приведены типовые частотные характеристики чувствительности к звуковому давлению восьми макетных образцов приемных блоков, входящих в состав одного антенного модуля.

Литература

1 И.Б. Бондаренко и др. Соединители и коммутационные устройства. - Санкт-Петербург: ИТМО, 2007.
2 Г.М. Свердлин Гидроакустические преобразователи и антенны. – Ленинград: Судостроение, 1980.

МОЩНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.К.Бритенков, канд.физ-мат.наук, Б.Н.Боголюбов, канд.техн.наук, В.А.Фарфель, С.А.Смирнов, В.А.Перфилов
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

POWERFUL LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC TRANSDUCERS: PROBLEMS OF DESIGN, MANUFACTURING AND DEVELOPMENT PROSPECTS

A.K.Britenkov, Ph.D., B.N.Bogolyubov, Ph.D., V.A.Farfel, S.A.Smirnov, V.A.Perfilov
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Создание эффективных низкочастотных излучателей в гидроакустике уже более полувека является актуальной задачей. Изготовление и настройка мощных низкочастотных гидроакустических излучателей требуют с одной стороны, оптимального согласования системы возбуждения преобразователя, и с другой стороны – проведения предварительных расчётов для решения проектно-конструкторских задач для решения противоречивой проблемы зависимости размеров излучателя от его КПД, полосы излучаемых частот и акустической мощности.

Development of effective low-frequency hydroacoustic radiators has been an urgent task for more than half a century. Production and tuning of high-power low-frequency hydroacoustic radiators requires, on the one hand, optimal coordination of the transducer excitation system, and on the other hand - preliminary calculations to solve design tasks and the contradictory problem of the radiator size dependence on its efficiency, frequency band and acoustic power.

Приложения низкочастотной гидроакустики. Освоение мирового океана накладывает специфические требования на дальность действия используемых технических средств. Устойчивая связь на больших расстояниях возможна лишь в низкочастотных диапазонах. Однако, понижение частоты, как и многолучёвость, уменьшает пропускную способность информационного канала. Увеличение акустической мощности источника, наряду с методами обработки сигналов, позволяет улучшить пропускную способность. В связи с этим, важной составляющей в комплексе задач низкочастотной гидроакустики является разработка мощных низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) при использовании частот порядка 1 кГц [1] и ниже в качестве перспективного диапазона для сверхдальней связи и освещения подводной обстановки в целях мониторинга и решения оперативных задач [2, 3].

Мощные электромагнитные низкочастотные гидроакустические преобразователи. В диапазоне частот ниже 100 Гц электромагнитные преобразователи имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами НЧИ. Резонансная механическая часть в сочетании с настройкой электромеханического преобразователя повышает его КПД, что наряду с ресурсом является определяющим параметром автономных излучающих систем. Кроме этого электромагнитные НЧИ обладают высокой удельной мощностью (при использовании магнитов из сплавов на основе редкоземельных металлов и магнитомягких материалов) в сочетании с достаточно низкой себестоимостью. Разработанный ИПФ РАН НЧИ с электромагнитным преобразователем (рис. 1) для экспериментов по трансарктическому акустическому распространению (ТАР) и акустической термометрии климатического состояния Северного Ледовитого океана (АТОК) [3] имеет КПД до 95%, ресурс $10^8 – 10^9$ циклов, и, работая автономно более года в океане, обеспечивал излучение акустической мощности 250 Вт в диапазоне частот 19–22 Гц, когда в ходе исследований была впервые осуществлена передача акустических сигналов через Арктический бассейн – из дрейфующего российского ледового лагеря "Турпан" в районе Шпицбергена к американским ледовым лагерям SIMI и Narwhal у Аляски и вблизи Канады.

Однако слабой стороной электромагнитных НЧИ является высокая зависимость параметров от точности установки рабочего зазора, в котором перемещается катушка преобразователя, что в свою очередь зависит от точности компенсации гидростатического давления. Последнее обстоятельство в сочетании с достаточно большими габаритами электромагнитных НЧИ накладывает существенные ограничения на их использование в составе мобильных или глубоководных систем [1].

Рис. 1. Автономный излучающий комплекс, разработанный ИПФ РАН для системы АТОК.

Низкочастотные гидроакустические преобразователи с пьезоэлектрическими активными элементами. Решение противоречивой проблемы зависимости размеров преобразователя от его КПД, полосы излучаемых частот и акустической мощности на текущий момент наиболее эффективно с использованием пьезоэлектрических активных элементов для НЧИ в сочетании с механическими трансформаторами. Другие технические решения по излучению звука в НЧ диапазоне, либо слишком громоздки и дороги [4], либо предназначены для передачи ограниченного набора сигналов специального вида.

Примером разработанного в ИПФ РАН мощного пьезоэлектрического НЧИ является бикон – излучатель поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом (рис. 2, справа). НЧИ подобного типа размером ~ 1 м имеет КПД до 80%, развивая акустическое давление до 10 кПа/м при ресурсе до 10^{12} циклов. НЧИ может использоваться без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 500 м. Резонансная частота для данного типа преобразователя определяется размерами НЧИ и находится в пределах 300–1500 Гц.

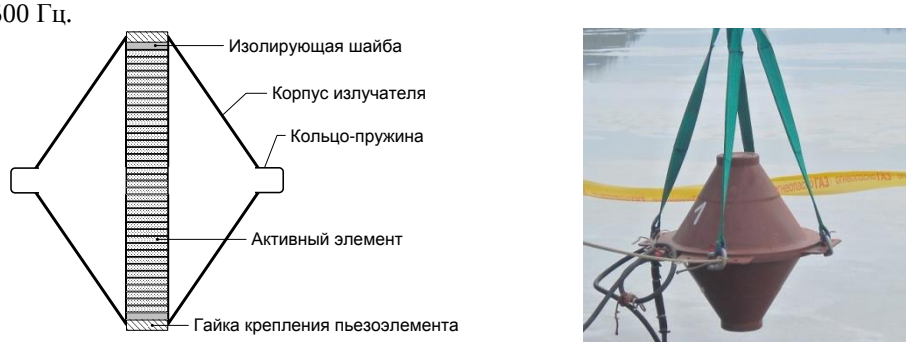


Рис. 2. Бикон – пьезоэлектрический НЧИ с конусообразным излучающим корпусом.

Эффективность этого типа НЧИ существенно зависит от жёсткости корпуса, которая не всегда достижима в коническом исполнении (рис. 2, слева) при больших размерах излучателя. С другой стороны, выбор жёсткости оболочки позволяет делать НЧИ такого типа излучающим в широкой полосе частот. Одним из направлений конструирования излучателя типа бикон является оптимизация его формы, выбор геометрии тела вращения (излучающей поверхности) с отличной от конуса образующей в сочетании с усилением жёсткости излучающей оболочки.

Компактные НЧИ продольно-изгибного типа. В случае уменьшения габаритов преобразователя для сохранения эффективности НЧИ требуется увеличение амплитуды колебаний излучающей поверхности. Увеличение размаха колебаний излучающего элемента (корпуса) выполняет механический трансформатор. Малые колебания вдоль продольной оси излучателя с амплитудой a ($a<<h$) приводят к бóльшим отклонениям упругого тела (мембраны, излучающей оболочки) с амплитудой A в поперечном направлении

$$k = \frac{A}{a} \approx \frac{L}{h}, \tag{1}$$

где h – его начальный прогиб, k – коэффициент механической трансформации.

Корпус НЧИ (рис. 3, слева) имеет параболическую форму с переменной толщиной стенки [5], что трансформирует продольные колебания активного элемента в изгибные колебания оболочки. Обратный изгиб позволяет выдерживать гидростатическое давление более 1 МПа. Для понижения резонансной частоты корпус НЧИ имеет симметрично расположенные вертикальные прорези. Герметизация корпуса выполнена слоем полиуретана. Активным элементом преобразователя является наборный пьезокерамический столб из колец ЦТБС-3 [1].

Подобный НЧИ при максимальном габаритном размере около 0,3 м имеет КПД около 35%, излучая акустическую мощность на уровне 100 Вт. Преобразователь этого типа может использоваться без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 300–500 м.

Рис. 3. Компактные пьезоэлектрические НЧИ продольно-изгибного типа.

Малогабаритный низкочастотный гидроакустический 3D-излучатель продольно-изгибного типа с излучающей оболочкой сложной формы. Поиск с помощью структурно- функционального подхода технических решений по разработке и изготовлению НЧИ приводит 3D-печати корпуса преобразователя, что упрощает герметизацию, устойчивость к внешнему давлению и уменьшает разброс параметров НЧИ [6]. С целью масштабного моделирования и проверки возможностей технологии изготовления корпуса НЧИ методом 3D-печати из металлических порошков, в ИПФ РАН был изготовлен экспериментальный преобразователь со сложной формой излучающей поверхности корпуса (рис. 4, слева, см. вклейку).

Согласно расчётам, излучатель размером 90x86 мм и массой 0,87 кг (рис. 4, справа), с подобным корпусом сложной формы (рис. 4, слева), устойчив к гидростатическому давлению до глубины 800 м, обладая чувствительностью до 2 Па*м/В в диапазоне 2–2,5 кГц. Механические напряжения в материале корпуса (титана марки Ti-6Al-4V) не превышают 2,5–3,2x10^4 Н/м^2 на резонансе в основной полосе частот (рис. 4, в центре) и 3,5–4,5x10^4 Н/м^2 при воздействии гидростатического давления 100 кГс/см², соответствующего глубине 1 км (рис. 4, справа), что на несколько порядков ниже предельного значения.

Исследование на вибростенде корпуса экспериментального 3D-излучателя показало, что амплитудно-частотные характеристики различаются в составе спектральных составляющих при отклике на воздействия в продольном и поперечном направлениях (рис. 5, см. вклейку). Максимальное значение коэффициента трансформации k (1) в середине оболочки собранного преобразователя превосходит k корпуса НЧИ более чем в 10 раз (на основной моде для НЧИ $k_{ср}\geq 30$).

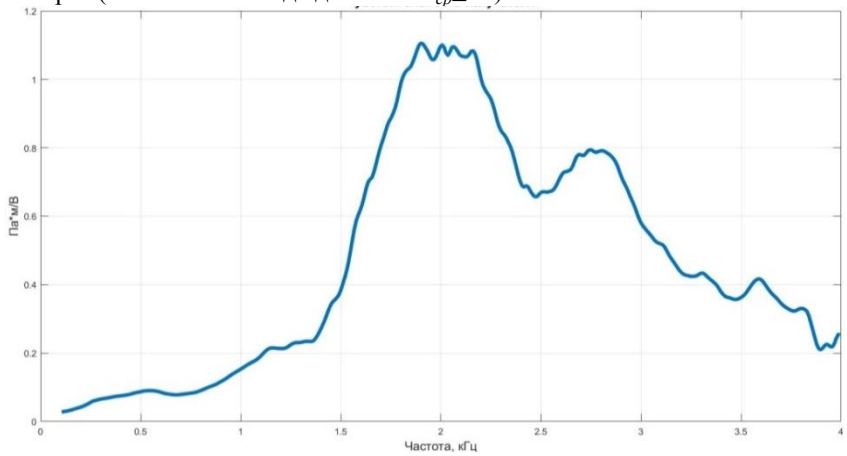


Рис. 6. Измерения чувствительности экспериментального 3D-излучателя в воде.

Максимальная чувствительность экспериментального пьезокерамического 3D-излучателя достигается на частоте около 22 кГц при КПД более 70 %. Однако даже для полосы 2 кГц (рис. 6) излучатель с таким размером имеет достаточно высокий КПД (65% и выше), в несколько раз большую удельную мощность, чем аналогичные компактные НЧИ [5]. Таким образом, использование большего количества пьезокерамических колец активного элемента и увеличение размера излучателя в 1,5–2 раза позволяет проектировать НЧИ высокой удельной мощности в диапазоне до 1 кГц. Оптимизация и других конструктивных компонентов НЧИ, включая систему возбуждения и согласования, расширяет перспективы создания новых систем связи, освещения подводной обстановки и других приложений низкочастотной гидроакустики.

Литература

1. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Санкт-Петербург: Наука, 2004. 410 с.
2. Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Смольников А.В. Бесшумная революция // Новый оборонный заказ. Стратегии, 2016. № 2 (39).
3. Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer A.B. The Transarctic Acoustic Propagation Experiment and Climate Monitoring in the Arctic // IEEE J. Ocean. Eng., 1999. Vol. 24(2). P. 183–201.
4. Moscaa F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication // J. Acoust. Soc. Am., 2013. Vol. 133(1). P. EL61–EL67.
5. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Клюшин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы, 2010. № 12. С. 51.
6. Британков А.К., Боголюбов Б.Н., Смирнов С.А., Перфилов В.А. Перспективы использования 3D-печати для изготовления компактных гидроакустических преобразователей продольно-изгибного типа со сложной геометрией излучающей оболочки // Учёные записки физического факультета Московского университета, 2017. № 5. С 1750104-1–1750104-5.

РАСЧЁТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОЩНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А.К.Британков, канд.физ-мат.наук, Б.Н.Боголюбов, канд.техн.наук, В.А.Фарфель, С.Ю.Смирнов, Н.Ю.Круглов[1], Д.Н.Кушнерев[1], Л.Е.Фрид[1]
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
[1]ООО «Научно-Технический Центр «Северо-Западная Лаборатория», Санкт-Петербург, Россия

CALCULATION, DESIGN AND MANUFACTURE OF ELECTRIC EQUIVALENTS FOR TESING POWERFUL LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC TRANSDUCERS EXCITATION SYSTEM

A.K.Britenkov, Ph.D., B.N.Bogolyubov, Ph.D., V.A.Farfel, S.Yu.Smirnov, N.Yu.Kruglov[1], D.N.Kushnerev[1], L.E.Freed[1]
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
[1]«Science Technical Centre «North-Western Laboratory», Ltd., St. Petersburg, Russia

Изготовление и настройка мощных низкочастотных гидроакустических излучателей требуют оптимального согласования системы возбуждения преобразователя, для чего необходимы электрические эквиваленты преобразователей с идентичными электрическими параметрами. Применение пьезокерамических активных элементов, в сочетании с требованием высокой интенсивности излучаемого звука, накладывает специфические требования на расчёт и изготовление эквивалентов мощных излучателей. В работе рассматриваются вопросы моделирования и изготовления эквивалента преобразователя, требующие выполнения ряда противоречивых технических условий.

Production and tuning of high-power low-frequency hydroacoustic transducers requires optimal matching of the drive system, which requires electrical equivalents of the transducers with identical electrical parameters. The use of piezoceramic active elements, in combination with the requirement of high intensity of emitted sound, imposes specific requirements on the calculation and production of equivalents of powerful radiators. The paper deals with modeling and manufacturing of the transducer equivalent, which requires implementation of a number of contradictory technical conditions.

Приложения низкочастотной гидроакустики для сверхдальней связи. Одним из перспективных направлений освоения мирового океана является создание автономных подводных необитаемых аппаратов (АПА) с большой дальностью действия. Системы телеуправления (СТУ) АПА-роботов требуют обеспечения передачи команд и связи с центром управления, акустическими и радиобуями на удалениях в десятки и сотни километров. Для создания устойчивых каналов связи в СТУ на таких расстояниях требуется понижение частоты звуковых волн, что увеличивает дальность передачи гидроакустических сигналов, но сужает полосу частот [3] и уменьшает пропускную способность информационного канала. Использование низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) позволяет рассматривать в качестве перспективного диапазона для сверхдальней связи с АПА частоты порядка сотен герц [1]. Так, во время экспедиций ИПФ РАН на Чёрное море в 2015 и 2017 году проведены успешные эксперименты по излучению и приёму гидроакустических сигналов в подобном диапазоне частот на расстояниях до 500 км. Известны также и другие успешные эксперименты по передаче информации на таких частотах со скоростью выше 100 битрейт на расстояние более 1000 км [4]. Подобные технологии требуются как для передачи команд телеуправления, так и для связи с автономными акустическими радиобуями-маяками.

Мощные гидроакустические преобразователи. Использование в качестве активных элементов НЧИ пьезоэлектрических преобразователей в сочетании с механическими трансформаторами, позволяет успешно решать противоречивую проблему зависимости размеров преобразователя от его КПД, полосы излучаемых частот, акустической мощности для глубин 500 м и более. Другие технические решения по излучению звука в этом диапазоне либо слишком громоздки [4], либо способны передавать ограниченный набор сигналов специального вида [4]. Использование пьезоэлектрических преобразователей [4] для формирования высокой интенсивности акустического поля предполагает достаточно высокие действующие значения напряжения, подаваемого от системы возбуждения на НЧИ. Это обстоятельство накладывает специфические требования на расчёт и изготовление электрических эквивалентов мощных излучателей.

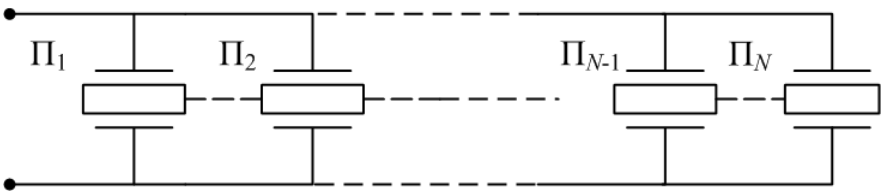


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема гидроакустического НЧИ с активным элементом, собранным из *N* пьезоэлектрических колец.

Расчётная модель «прямого» эквивалента гидроакустического преобразователя. Рассмотрим схему замещения (прямого эквивалента) в полосе 400-800 Гц НЧИ с активным элементом, склеенным из *N* колец $П_1$–$П_N$ (рис. 1), выполненных из состава ЦТБС-3 [4]. Такой преобразователь способен излучать

звук на уровне 100 Вт акустической мощности при эффективности порядка 35%, развивая акустическое давление до 3500 Па на 1 м или 192 дБ относительно 1 мкПа*м/В [5]. Предполагая, что система "активный элемент–механический трансформатор–механический осциллятор" имеет одну полосу в рабочем диапазоне частот, можно определить электрический эквивалент подобного излучателя в виде одиночного последовательного колебательного контура (рис. 2, слева). В соответствии с соотношением

$$U_{\text{нчи}} = \frac{P_a}{dS_{\text{нчи}}}, \tag{1}$$

где $S_{\text{нчи}}$ – чувствительность излучателя (Па*м/В), d – расстояние от излучателя до точки измерения звукового давления (м), P_a – уровень звукового давления (Па). Согласно формуле (1), для создания звукового давления величиной 3500 Па на расстоянии 1 м от НЧИ при чувствительности 2 Па*м/В, система возбуждения должна обеспечить напряжение на преобразователе не менее $U_{\text{нчи}}$=1750 В. Колебательный контур, соответствующий схеме замещения НЧИ (рис. 2) с параметрами, полученными на основе методики расчета эквивалентной схемы [7], имеет добротность $Q \approx 7$, определяемую отношением волнового и активного сопротивлений

$$Q = \frac{\rho}{R+r} \approx \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C_1}}, \; C_1 = \frac{C_0 C}{C_0 + C}, \tag{2}$$

где R – потери электромеханического преобразователя, r – внутреннее сопротивление катушки индуктивности эквивалента НЧИ, C_0 – ёмкость активного элемента НЧИ (пьезокерамического столба) ρ – волновое сопротивление.

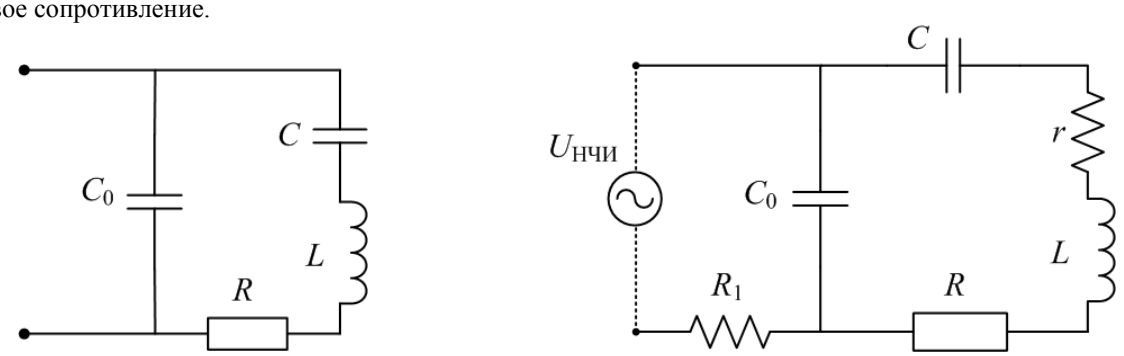


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема (слева) и схема замещения (справа) эквивалента НЧИ с пьезоэлектрическим активным элементом.

При резонансе напряжений в эквивалентном контуре (рис. 2, слева) напряжения на реактивных элементах многократно превышает напряжение источника $U_{\text{нчи}}$

$$U_L = U_C = \omega_0 L \frac{U_{\text{нчи}}}{R+r} \approx \frac{\omega_0 L U_{\text{нчи}}}{R}. \tag{3}$$

В соответствии с (1) и (3) при учёте (2), эффективное значение напряжения на катушке индуктивности $U_L = QU_{\text{нчи}}$. Для приведённой на рис. 2 схемы замещения, где C_0=122 нФ, R=7920 Ом, L =16.7 Гн и C=5.64 нФ, на резонансной частоте

$$f_{\text{р}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC_1} - \left(\frac{R}{4L}\right)^2}, \tag{4}$$

$f_{\text{р}}$=529 Гц, величина U_L достигает 13000 В.

Схема замещения «прямого» эквивалента гидроакустического преобразователя. В связи с приведёнными расчётами параметров электрического эквивалента [9] для обеспечения полной имитации режимов излучения НЧИ, техническая реализация «прямого» эквивалента по приведённой на рис. 2 схеме требует изготовления дросселя L большой индуктивности с высокой электрической прочностью $U_{\text{пр}}$. Обеспечение электрической прочности $U_{\text{пр}} \geq 2U_{\text{раб}}$ более чем на 35 КВ в сочетании с высокой индуктивностью дросселя является сложной технологической задачей, поскольку для достижения такой электрической прочности дроссель необходимо разбить на 7-10 отдельных последовательно включённых секций, установленных на дополнительные изолирующие основания. Для снижения действующих напряжений на элементах эквивалента НЧИ и упрощения конструктивного исполнения электрического эквивалента НЧИ в схеме замещения целесообразно применить понижающий трансформатор (рис. 3, слева).

На рис. 3 (справа) представлена схема замещения эквивалента гидроакустического преобразователя с понижающим трансформатором *Тр*, где межобмоточная ёмкость $C_{I\text{-}II}$ = 4 нФ, сопротивление утечки $R_{I\text{-}II}$ =20 ГОм, сопротивление первичной и вторичной обмоток R_1=6 Ом и R_2=0.02 Ом, соответственно, при индуктивности первичной обмотки трансформатора L_1 =100 Гн. Индуктивность эквивалентного контура L^*, связанная с влиянием присоединённой массы [8], значительно превосходит индуктивность вторичной обмотки *Тр*.

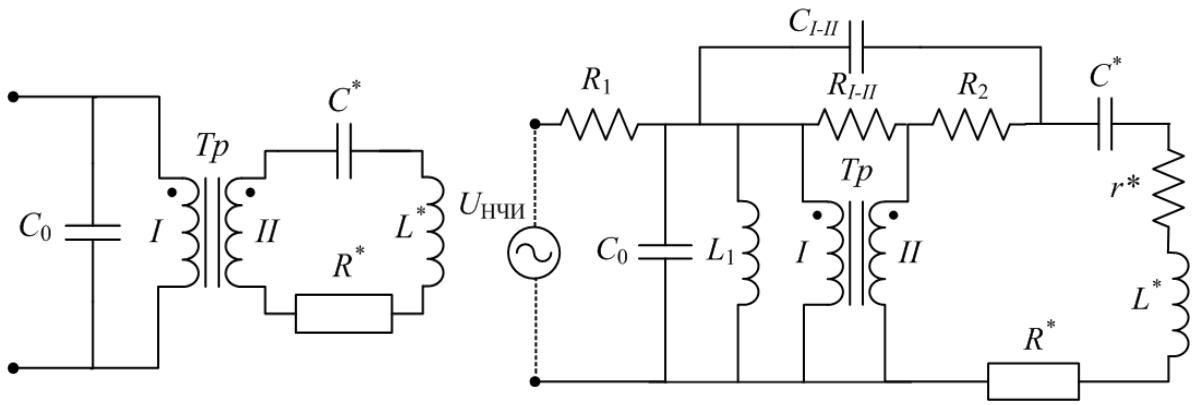


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема (слева) и схема замещения (справа) электрического эквивалента НЧИ с понижающим трансформатором.

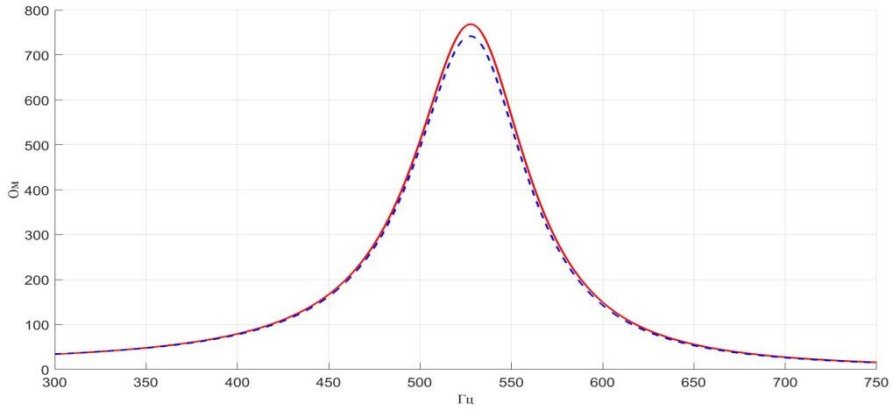


Рис. 4. Реальная часть импеданса прямого электрического эквивалента НЧИ (сплошная) и схемы замещения НЧИ с понижающим трансформатором (пунктир).

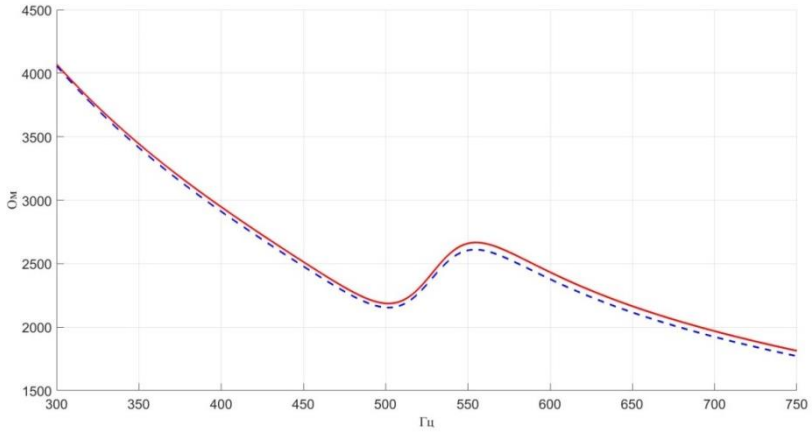


Рис. 5. Мнимая часть импеданса прямого электрического эквивалента НЧИ (сплошная) и схемы замещения НЧИ с понижающим трансформатором (пунктир).

Понижение напряжения на эквиваленте контура в m раз (где m – коэффициент трансформации) в схеме замещения (рис. 3), позволяет получить при эффективном значении напряжения $U_{нчи}$=1750 В и тока в первичной обмотке трансформатора до 2 А эффективное значение тока во вторичной обмотке до 3.5 А при напряжении U_{L*}=2000 В на дросселе эквивалента L^*, что практически идентично напряжению устройства возбуждения $U_{нчи} \approx U_{L1}$.

Согласно расчётам импеданса прямой схемы (рис. 2) и схемы замещения НЧИ с понижающим трансформатором (рис. 3), максимальное отличие импеданса составляет не более 26.6 Ом (3.5 %) для действительной и 56 Ом (2.1 %) для мнимой частей (рис. 4, 5) при резонансной частоте 528 Гц. Таким образом, модернизация схемы при сохранении зависимости импеданса от частоты, понижает напряжение на дросселе L^* в m= 10 раз

$$U_{L^*} = U_{C^*} = \frac{U_L}{m}. \quad (5)$$

Применение системного подхода для выбора оптимального технического решения [9] в сочетании с алгоритмами поиска схемы замещения [10] позволяет получить высокую стабильность параметров эквивалентов НЧИ, обеспечивая выполнение ряда противоречивых технических условий наряду с оптимизацией процесса изготовления эквивалентов.

Литература

1. Справочник по технической акустике / Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. Л.: Судостроение, 1980. 440 с.
2. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Санкт-Петербург: Наука, 2004. 410 с.
3. Moscaa F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication // J. Acoust. Soc. Am., 2013. Vol. 133(1). P. EL61–EL67.
4. Quer R., Dasseux Ch. Increasing depth capability of “Diabolo” flextensional transducer for active linear arrays // Proc. of the Institute of Acoustics, 1999. Vol. 21. P. 117–125.
5. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
6. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Клюшин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы, 2010. № 12. С. 51.
7. Боголюбов Б.Н., Кирсанов А.В., Леонов И.И., Смирнов С.А., Фарфель В.А. Расчёт и экспериментальные исследования компактного продольно-изгибного гидроакустического преобразователя с центральной частотой излучения 520 Гц // Гидроакустика, 2015. Вып. 23(3). С. 20.
8. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980. 232 с.
9. Воинов Б. С. Информационные технологии и системы. М.: Наука, 2003. 655 с.
10. Рассадин А.Э. Об одном конструктивном алгоритме построения антенных эквивалентов // Тез. докл. ВНКСФ-12. Новосибирск, 2006. С. 648.

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭКРАНА ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

К.А.Батанов, Д.М.Чайка, А.В.Гаринков
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

METHOD OF MANUFACTURING OF A SOUND-ABSORBING BAFFLE FOR SONAR ANTENNAS

K.A.Batanov, D.M.Chayka, A.V.Garinkov
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

В докладе рассмотрены различные виды композитных полимерных материалов и описан способ изготовления звукопоглощающего акустического экрана для гидроакустических антенн.

In the report various kinds of composite polymer materials and ways of their manufacturing are considered.

Ввиду наметившейся тенденции увеличения площадей гидроакустических антенн подводных лодок (ПЛ), их влияние на скрытность ПЛ по вторичному гидроакустическому полю всё более возрастает. Исследования показали, что наибольший вклад в коэффициент звукоотражения гидроакустических антенн вносит входящий в их состав акустический экран. Ввиду этого одним из важных требований к гидроакустическим антеннам является применение звукопоглощающих акустических экранов с низким коэффициентом звукоотражения [1, 2].

В гидроакустических антеннах широко используются полиуретановые композиции для изготовления акустических экранов и преобразователей [3]. Акустические экраны представляют собой изолирующие пассивные конструкции. В приёмных антеннах акустические экраны предназначены для защиты акустических приёмников от помех с тыльной стороны. Проведённые ранее исследования свидетельствуют о перспективности применения полиуретанов для средств акустической защиты. Требования к свойствам материала подобного типа меняются, что приводит к необходимости доработки рецептур полиуретановых композиций для обеспечения повышения их акустических свойств.

Введение небольшого количества полимерных вспененных или стеклянных микросфер в рецептуру полиуретана холодного отверждения торговой марки СУРЭЛ-7 способно значительно повысить коэффициент потерь энергии акустической волны. Варьируя процентным содержанием наполнителя можно получить широкий спектр жесткостных характеристик, а также изменить коэффициент отражения звука. Удобство работы с полиуретанами холодного отверждения в сочетании с технологиями ввода наполнителей может позволить решить задачи по созданию конструкций, удовлетворяющих современным требованиям.

Полиуретановые композиции, применяемые в звукоизолирующих конструкциях антенн влияют на отражение и прохождение звуковых волн [4]. Важным аспектом при выполнении подобных расчетов является зависимость параметров экрана от гидростатического давления.

Микросферы, вводимые в состав полиуретановых композиций, являются активным наполнителем, основной задачей которого является повышение акустических характеристик, а также снижение массы конструкции в целом.

Полимерные вспененные микросферы представляют собой нерасширенные или предварительно расширенные термопластичные газонаполненные микросферы с низкой абсолютной плотностью порядка 36±4 кг/м³. Одним из основных достоинств микросфер является сохранение рабочих характеристик при многократном, около 5000 раз, изменении давления окружающей среды (сжатия - растяжения). При этом максимально допустимое давление, которое выдерживают вспененные микросферы, составляет 100 кг/см^2. Способность полимерной оболочки микросфер не разрушаться, благодаря быстрому восстановлению, и сверхнизкая плотность в сочетании с эластичностью, выгодно отличают этот продукт от других лёгких наполнителей, особенно там, где необходимо не только снизить плотность, но и улучшить акустические характеристики материала. Основным недостатком полимерных микросфер является изменение акустических свойств при давлениях от 4 кг/см^2.

Полые стеклянные микросферы представляют собой белый сыпучий порошок, состоящий из крошечных тонкостенных шариков диаметром 20-160 мкм и толщиной стенки менее 2 мкм. Состав стекла и почти правильная сферическая форма микросфер обеспечивают их очень высокую прочность при сжатии, низкое водопоглощение, малую теплопроводность, высокую химическую стойкость. Хорошая адгезия микросфер к полимерным связующим позволяет создавать композиты на их основе с уникальным комплексом свойств. Из имеющихся в продаже были выбраны стеклянные микросферы со следующими характеристиками: истинная плотность 0,27-0,31 г/см^3, минимальная прочность 8МПа, диаметр 60-110 мкм.

Лабораторные исследования влияния микросфер на физические характеристики полиуретановой композиции холодного отверждения «СУРЭЛ-7» с твёрдостью по шкале Шор А 75-80 ед., прочностью при растяжении не менее 10,7 МПа и плотностью 1,3 г/см³, были проведены на двух типах микросфер – микросферах «Expencel DET 100 d25» и стеклянных микросферах «МС-ВП-А9». Размер частиц варьировался от 20 до 120 мкм. Абсолютная плотность полимерных микросфер 25±3 кг/м³, а стеклянных 270-310 кг/м³. Полимерные микросферы были добавлены в полиуретановую композицию. Поскольку плотность микросфер гораздо ниже чем у полиуретана, то это требовало введения достаточно большого объёма микросфер. При перемешивании вязкость материала значительно увеличилась. Введение порошка в состав полимера с технологической точки зрения не вызывало проблем. Также, добавляя микросферы можно менять упругие характеристики материала в широком диапазоне.

Наиболее подходящим методом добавления полимерных микросфер в связующее может являться компрессионное формование, иными словами, прессование в пресс-форме и экструзия. Литьё под давлением не подходит. Микросферы предполагается вводить на самом последнем этапе смешивания, поэтому для них необходимо предусмотреть место.

К недостаткам гидроакустических экранов с полимерными микросферами следует отнести изменение свойств под воздействием гидростатического давления в связи с сильным уменьшением объема материала при «схлопывании» микросфер. Полимерные микросферы обладают высокой горючестью и летучестью. Поэтому было принято решение использовать стеклянные микросферы того же размера.

Стеклянные микросферы смешиваются при вращении с полимерным материалом, например, двухкомпонентным полиуретановым эластомером СУРЭЛ-7, в течение времени, достаточного для смешения композиции, удаления газа и отверждения композиции. Приготовление композиции производится в заливочной форме (например, в виде полого цилиндра), вращающейся вокруг своей оси. Отвержденная композиция из полиуретана и микросфер, полученная при использовании такой заливочной формы, представляет собой упругое кольцо без газовых включений, обладающее упругостью и звукоизоляцией.

В предлагаемом способе используются жидкие полиуретаны холодного отверждения, смешение которых с расширенными микросферами может позволить при вращении заливочной формы вокруг горизонтальной оси сформировать композиционный материал, обладающий равномерной по длине изделия жесткостью [5].

Ниже рассмотрена предполагаемая последовательность действий при осуществлении заявленного способа:

в каждую из двух емкостей технологической тары (при использовании двухкомпонентного полиуретана) залить навеску компонента полиуретана, а в одну емкость засыпать навеску порошкообразного наполнителя; оптимальное количество порошкового наполнителя применительно к стеклянным микросферам составляет 10-12% от веса композиции, которое должно обеспечивать звукопоглощение и упругие свойства;

смешать навески полиуретана;

стеклянные микросферы засыпать в емкость с полиуретаном и смешать композицию, например, с помощью лабораторной установки типа «Шнек»;

установить заливочную форму в центрифугу с горизонтальной осью вращения;

через отверстие в одной из крышек (отверстие должно быть расположено вблизи от оси вращения формы) поместить смесь полиуретана и наполнителя в заливочную форму;

вращать на центрифуге заливочную форму со смесью в течение времени, достаточного для смешения композиции, удаления газа и отверждения композиции;

остановить центрифугу, разобрать заливочную форму, извлечь деталь из композиционного материала в виде кольца;

произвести механическую обработку детали до нужного размера.

Способ разделения сред с помощью центрифуги может позволить:

удалить газ из композиции;

получить композиционный материал со стабильными упругими характеристиками.

Таким образом, «центробежный способ» удаления газовых включений из смеси полимерного материала с микросферами по сравнению с технологиями, использующими вакуумирование, позволяет осуществить более глубокую очистку композиционного материала от газа.

Вышеизложенное может позволить осуществить достижение заявленного технического результата - существенно сократить время на очистку композиции от газовых включений, а также осуществить более широкий выбор рецептуры полимерного материала, уменьшить эффект расслоения композиции, отверждая ее в процессе вращения.

Результаты проведенных испытаний образца гидроакустического экрана с наполнителем приведены в табл. 1.

Таблица 1. Частотная зависимость коэффициент отражения звука

Частота, Гц	Коэффициент отражения
800	0,40
1000	0,42
1250	0,45
1600	0,55
2000	0,57
2500	0,51
3150	0,26
4000	0,32
5000	0,36
6300	0,30
8000	0,40

Из рассмотрения табл.1 следует, что коэффициент звукоотражения гидроакустического экрана с наполнителем (стеклянные микросферы) в полиуретановом эластомере в среднем составляет 0,4. Поскольку звукоотражающие экраны имеют коэффициент отражения порядка 0,9, полученный результат свидетельствует об эффективности разработанной технологии для изготовления звукопоглощающих экранов для гидроакустических антенн.

Литература

1. Глазанов В.Е. Справочник "Акустические экраны (теория и расчет параметров)". СПб.: ОАО "Концерн "Океанприбор", 2009.
2. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник. /Под ред. В.В. Богородского. Л.: Судостроение, 1983.
3. Негматов С.С. Технология получения полимерных покрытий. Ташкент, 1975.
4. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990.
5. Машошин А.И., Батанов А.К., Бродский Б.М., Батанов К.А., Куц Д.А. Патент №2534240. Способ получения упругого и звукопоглощающего полимерного материала с термопластичными микросферами. 2013.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ ВОЕННО-МОРСКИХ СИЛ США

В.П.Говорухин, канд.техн.наук, В.А.Родионов, д-р техн.наук, В.В.Рыков[1]
Санкт-Петербургское отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, Россия
[1]«Мирантенн», Москва, Россия

CURRENT STATE AND DIRECTION OF DEVELOPMENT OF UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEMS OF THE U.S. NAVAL FORCES

V.P.Govoruhin, Ph.D., V.A.Rodionov, Dr.Sc., V.V.Rykov[1]
St. Petersburg branch of the Section of Applied Problems at the Presidium of RAS, Russia
[1]«World of Antennas», Moscow, Russia

В XXI веке значительно возрастает роль вооруженных сил в борьбе государств за лидерство на океанских и морских направлениях. Флоты мировых держав своими действиями с моря способны изменить ход вооруженной борьбы и исход войны в целом. Значительный рост боевой мощи подводных сил стран АТР диктует настоятельную необходимость развития противолодочных сил и средств ВМС США, при этом значительное внимание уделяется формированию интегрированной системы освещения подводной обстановки IUSS (Integrated Undersea Surveillance System), объединяющей стационарные и мобильные комплексы дальнего гидроакустического наблюдения, боевого управления и связи в зонах действий передовых группировок ВМС.

In the twenty-first century, the role of armed forces increases greatly in the struggle of states for leadership in the oceans and seas. The world powers fleets by their actions from the sea can change the course of the armed struggle and the outcome of the war in general. The significant increase in the fighting strength of the Asia-Pacific submarine forces dictates the imperative need for the development of anti-submarine forces and means of the U.S. Navy, at the same time considerable attention being paid to the formation of integrated underwater environment surveillance system IUSS (Integrated Undersea Surveillance System) uniting stationary and mobile suites of long-range hydroacoustic surveillance, combat control and communication in the zones of action of the Navy advanced groups.

«В XXI веке значительно возрастает роль вооруженных сил в борьбе государств за лидерство на океанских и морских направлениях. Флоты мировых держав своими действиями с моря способны изменить ход вооруженной борьбы и исход войны в целом. Подтверждением этого является разработанная США концепция «глобального удара», которая представляет собой новый вызов международной безопасности и напрямую угрожает военной безопасности Российской Федерации. Важное значение в реализации этой концепции отводится военно-морским силам (ВМС)» [1].

С 2014 по 2034 годы третья часть международного рынка кораблестроения (276,9 млрд $ из 882,8 млрд $) приходится на подводные лодки (ПЛ): атомные (ПЛА) и неатомные (НАПЛ) [2, 3].

В табл. 1 приведены сведении о наличии ПЛ составе ВМС 40 зарубежных стран (без РФ).

Таблица 1 – Количество ПЛ в составе ВМС зарубежных стран по регионам

	Количество ПЛ в составе ВМС стран мира по регионам					
	Азия и Австралия	Северная Америка	Европа	Ближний Восток и Африка	Латинская Америка	Всего
Количество ПЛА (количество стран)	14 (2)	68 (1)	21 (2)	0 (0)	0 (0)	103 (5)
Количество НАПЛ (количество стран)	159 (13)	4 (1)	55 (10)	28 (6)	25 (7)	271 (37)
Количество ПЛ (количество стран)	173 (13)	72 (2)	76 (12)	28 (6)	25 (7)	374 (40)

Примечания: 1. В табл. 1 не учтены малые и сверхмалые ПЛ и ПЛ специального назначения.
2. Наиболее быстрыми темпами растет объем рынка неатомных ПЛ (НАПЛ), который ежегодно увеличивается более чем на 10 млрд $ и к 2024 г. составит 98 млрд $ [2, 3].

Значительный рост боевой мощи подводных сил стран АТР диктует настоятельную необходимость развития противолодочных сил и средств ВМС США, при этомзначительное внимание уделяется формированию интегрированной системы освещения подводной обстановки (ОПО) IUSS (Integrated Undersea Surveillance System), объединяющей стационарные и мобильные комплексы дальнего гидроакустического наблюдения, боевого управления и связи в зонах действий передовых группировок ВМС. Система IUSS предполагает совместное использование обобщенной информации о подводной обстановке различными, в том числе удаленными или находящимися в подводном положении, абонентами, входящими в состав единой сети обмена данными.

Интегрированная система ОПОIUSS включает в состав [2, 3]:

SOSUS (S Ound Surveillance System) - стационарную систему дальнего гидроакустического наблюдения;

SURTASS (SU Rveillance Towed Array Sonar System) - позиционно-маневренную систему дальнего гидроакустического наблюдения;

FDS (Fixed Distribution System) - позиционную системы прибрежного гидроакустического наблюдения;

ADS (Advanced Deployable System) - оперативно развертываемую систему освещения подводной обстановки.

Система ОПО IUSS способна обеспечить первичное обнаружение целей, обработку информации и передачу данных для последующего наведения самолетов базовой патрульной авиации (БПА), ПЛ, противолодочных кораблей или вертолетов.

Основные направления развития системы ОПО IUSS:

расширение зоны подводного наблюдения за счет включения в состав добывающих источников буксируемых гидроакустических систем – корабельной TACTAS (TA Ctical Towed Array Sonar) и подводных лодок STASS (Submarine Towed Array Sensor System);

совершенствование систем сбора и обработки гидроакустической информации;

модернизация существующих и создание новых систем подводного наблюдения.

Работы по совершенствованию системы ОПО IUSS направлены на: объединение существующих позиционных и маневренных систем в единый комплекс; стандартизацию акустических антенных решеток; интеграцию систем обработки акустических данных.

Стационарная система дальнего гидроакустического наблюдения SOSUS развернута на Атлантическом и Тихом океанах в начале 70-х годов XX века. Основа системы СОСУС – станции дальнего гидроакустического наблюдения, способные осуществлять первичное обнаружение и классификацию ПЛ, определять районы их местонахождения и элементы движения. Основными источниками информации для системы СОСУС являются стационарные гидроакустические системы (ГАС). Гидрофоны стационарных пассивных ГАС установлены на якорях с различным заглублением или в протяженных антеннах длиной в несколько сотен метрови подключены подводным кабелем к береговым центрам обработки принятых сигналов. Цели обнаруживаются на расстоянии сотен километров от места установки гидрофона. При обнаружении и пеленговании ПЛ одновременно двумя и более гидрофонами может быть определено ее место с точностью до нескольких десятков километров и элементы движения цели с точностью, достаточной для наведения самолетов БПА.

В настоящее время береговые посты системы SOSUS работают в автоматическом режиме. Информация о подводной обстановке автоматически транслируется в соответствующие региональные центры ВМС наблюдения для анализа, оценки и последующего доклада командованию флота. Выделяются средства на проведение работ по модернизации системы SOSUS.

Основные направления совершенствования системы SOSUS:повышение возможностей береговых центров по обработке и анализу гидроакустических сигналов;замена устаревших технических элементов.

Позиционно-маневренная система дальнего гидроакустического наблюдения SURTASS предназначена для освещения подводной и надводной обстановки на океанских и морских театрах военных действий. Основа системы SURTASS – суда гидроакустической разведки (СГАР), оборудованные активно-пассивными гидроакустическими комплексами с гибкими протяженными буксируемыми антеннами. Всего было построено 23 СГАР. Экспериментальные дальности обнаружения ПЛА ВМФ РФ гидроакустическими станциями AN/UQQ-2, установленными на СГАР, достигали 150 миль (278 км).

С середины 90-х годов XX века по причине снижения активности действий подводных сил ВМФ РФ в Мировом океане, СГАР начали выводить в резерв. В настоящее время в составе маневренных сил гидроакустической разведки ВМС США остались 4 СГАР в составе Тихоокеанского флота ВМС США.

Позиционная система прибрежного гидроакустического наблюдения FDS (Fixed Distribution System)предназначена для обнаружения подводных целей в мелководных районах моря.

Система FDS состоит из:

подводного элемента UWS (Underwater Segment), в основе которого – закрепленные на дне протяженные линии гидрофонов;

берегового центра обработки и анализа информации SSIPS (Shore Signal Information Processing Segment).

В настоящее время в рамках программы «Акустическое наблюдение» развернуты антенные поля системы FDS в Западной части Атлантического океана в районе п-ова Флорида.

Оперативно развертываемая система освещения подводной обстановки ADS активно создается в настоящее время. Система ADS предназначена для обнаружения ПЛ, автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) противника и минных постановок в прибрежной зоне. Модульная архитектура системы ADS позволяет изменять конфигурацию в зависимости от поставленных задач и условий применения.

Система ADS выставляется с применением фрегатаприбрежной зоны (ПЗ) проекта LCS (Littoral Combat Ship) типа Freedom или Independence.

В состав системы ADS входят три основных элемента:

комплект средств подводного наблюдения;

аппаратура обработки поступающих данных;

сменные специализированные автономные модули полезной нагрузки.

Комплект средств подводного наблюдения системы ADS представляет собой антенную решетку общей длиной до 20 км, состоящую из отдельных секций. В каждую секцию входят соединенные между собой оптоволоконными линиями связи и имеющие автономное электропитание от аккумуляторных батарей: гидрофоны (диапазон частот 20-1000 Гц); приемники регистрации волнения моря и градиента давления воды; оптические датчики регистрации уровня освещенности на заданной глубине.

Аппаратура обработки поступающих данных обеспечивает сбор, обработку, предварительный анализ и хранение полученных результатов.

Модули полезной нагрузки предусмотрены в трех вариантах: противолодочный модуль; противоминный модуль; модуль для борьбы с быстроходными малоразмерными надводными целями.

В статье рассмотрены только противолодочный и противоминный модули.

Фрегаты LCS могут переоснащаться в местах их базирования для выполнения различных задач менее чем за 24 ч. Масса входящих в состав каждого модуля систем и необходимого для их работы оборудования не должна превышать 180 т, в том числе непосредственно самой системы 105 т, численность обслуживающего модуль личного состава не должна превышать 35 чел.

В состав противолодочного модуля полезной нагрузки ASW (Anti Submarine Warfare) входят:

два многоцелевых вертолета MH-60R/S с опускаемыми ГАС обнаружения, авиационными радиогидроакустическими буями (РГБ) и противолодочными торпедами Мк 54;

разведывательные беспилотные летательные аппараты (БЛА) RQ-8 «Файрскаут» (радиус действия 200 км, продолжительность полета до 4 ч), оборудованы телевизионной и тепловизионной камерами, лазерным дальномером-целеуказателем, аппаратурой связи и навигации;

система противоторпедной обороны (Torpedo Defense) с буксируемой системой противодействия торпедам (Lightweight Tow Torpedo Countermeasure).

Противолодочный модуль ASWвключает бортовые активную и пассивную ГАС:

активная ГАС 2087 функционирует в диапазоне частот 0,7-1,5 кГц, способна обнаружить ПЛ противника на дальности от 100 до 120 км,оптимизирована для работы на мелководье в условиях высоких реверберационных помех, предусматривает возможность буксировки антенн с применением радиоуправляемого полупогруженного аппарата с дизельной энергетической установкой RMMV (Remote Multi-Mission Vehicle);

в качестве антенны пассивной ГАС используется многофункциональная линейная антенная решетка MFTA (Multi Functional Towed Array).

Группа из 3-х кораблей типа Freedom или Independence в течение 5 суток способна развернуть стационарную систему обнаружения общей протяженностью несколько сотен километров.

Особенность применения фрегатаLCS *с противоминным модулем* полезной нагрузки – фрегат не должен заходить в район минной опасности. Большая часть задач поиска и уничтожения мин решается с применением автономных и радиоуправляемых аппаратов, что позволяет сократить время проведения противоминной операции и обеспечить скрытность ее проведения.В состав противоминного модуля входят авиационные (размещенные на БЛА и вертолете) системы, АНПА и безэкипажные катера, которые обеспечивают поиск, обнаружение, классификацию, опознавание и уничтожение морских мин различного типа на различных глубинах.

В состав противоминного модуля входят:

система поиска мин AN/WLD-1(V)2, состоящая радиоуправляемого полупогруженного аппарата с дизельной энергетической установкой RMMV и буксируемого им АНПА AN/AQS-20A с гидроакустическими станциями бокового и переднего обзора.Для опознавания мин вместо одной из ГАС может быть установлен оптико-электронный прибор. В состав противоминного модуля входят два аппарата RMMV и три AN/AQS-20A;

автономная система неконтактного траления UISS (Unmanned Influence Sweep System), предназначенная для буксировки электромагнитного и акустического тралов с применением безэкипажного катера общего назначения CUSV (Common Unmanned Surface Vehicle);

авиационная лазерная система поиска, классификации, определения координат плавающих и якорных мин, установленных на малой глубине до 15-20 мALMDS (Airbone Laser Mine Detection System) AN/AES-1, размещенная на вертолете MH-60S;

система COBRA (Coastal Battlefield Reconnaissanceand Analysis), размещенная на БЛА MQ-8B с вертикальным взлетом, предназначенная для сбора информации о характере тактических рубежей, минных полей и препятствий в зоне образования прибойных волн (глубины от 3 м до уреза воды), на берегу (в районе высадки и на выходе из района высадки десанта);

авиационная система уничтожения обнаруженных мин AMNS (Airborne Mine Neutralization System) AN/ASQ-235, размещенная на вертолете MH-60S, предназначена для уничтожения донных (незаиленных) и якорных мин на мелководье и в районах, где затруднено использование тралов;

авиационная система быстрого уничтожения мин RAMICS (Rapid Airborne Mine Clearance System) – 30-мм пушка для уничтожения плавающих мин, размещенная на вертолете MH-60S.

Выводы

1. «РФ, являясь великой морской и сухопутной державой, должна учитывать все аспекты геополитических процессов, происходящих в Мировом океане и в прилегающих акваториях» [1].

2. Интегрированная система ОПО IUSS включает в состав системы: SOSUS, SURTASS, FDS, ADS. Основные направления развития системы ОПО IUSS связаны с дальнейшим развитием системы ADS и применением автономных и радиоуправляемых аппаратов.

Литература

1. Указ Президента РФ от 20.07.2017 г. № 327 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030 года». [Электронный ресурс]. URL: www.garant.ru (Дата обращения: 10.01.2018).
2. ВМС и кораблестроение // Дайджест зарубежной прессы, выпуск 76. – СПб: ФГУП «Крыловский ГНЦ», 2015. – 131 с.
3. ВМС и кораблестроение // Дайджест зарубежной прессы, выпуск 82. – СПб: ФГУП «Крыловский ГНЦ», 2017. – 140 с.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ГИДРОФИЗИКИ

К.Н.Волков, д-р физ-мат.наук, В.Н.Емельянов, д-р техн.наук, И.В.Тетерина, канд.техн.наук
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия

VISUALIZATION OF VORTEX FLOWS IN APPLIED PROBLEMS OF HYDROPHYSICS

K.N.Volkov, Dr.Sc.,V.N.Emelyanov, Dr.Sc., I.V.Teterina, Ph.D.
Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg, Russia

Обсуждаются методы визуализации вихревых течений в прикладных задачах гидрофизики. Выявление вихревых структур ведется различными методами с использованием градиентов основных и производных скалярных полей. Определяется ротация поля скорости и проводится расчет нормированной спиральности. Идентификация вихрей проводится по признаку распределения этой величины в области формирования вихревой линии. Для выявления таких структур производится поиск областей течения с пониженным давлением. На основе вторичных полей создаются геометрические объекты, дающие представление о вихревой структуре течений.

Methods of visualization of vortex flows in applied problems of hydrophysics are discussed. Identification of vortex structures by different methods are implemented using gradients of basic and derived scalar fields. The rotation of the velocity field is determined and computation of standardized helicity is performed. Identification of vortices is carried out on the basis of the distribution of this magnitude in the formation of the vortex line. To identify these structures,flow regions with low pressure level are found. Geometric objects, giving an idea of the vortex structure of fluid flow, are created based on secondary flow fields.

При математическом моделировании задач гидрофизики одним из заключительных этапов является научная визуализация результатов полученного численного решения. Современные методы визуального представления численных данных делятся на методы, основанные на повышении выразительности визуального образа, и методы, основанные на анализе данных [1].

Визуализация нестационарных газодинамических полей выполняется при помощи выбора и построения видов, сечений и выделенных подобластей с использованием карт распределенных векторных и скалярных полей, генерацией изоповерхностей, отображением линий тока или линий отмеченных частиц. Находят применение объемный рендеринг и сложное наложение слоев изоповерхностей разной прозрачности и освещенности с выделением границ структур и применением различных оптических эффектов изменения интенсивности освещения.

Выявление вихревых структур ведется различными методами с использованием градиентов основных и производных скалярных полей. Определяется ротация поля скорости и проводится расчет нормированной спиральности, представляющей собой скалярное произведение векторов скорости и завихренности (идентификация вихрей проводится по признаку распределения этой величины в области формирования вихревой линии). Для выявления вихревых структур производится поиск областей течения с пониженным давлением (используется критерий Q, являющийся инвариантом тензора скоростей деформаций и применяемый в тех случаях, когда вихрь доминирует над вязким сдвигом). На основе вторичных полей создаются геометрические объекты (изоповерхности, связанные с другими векторными и скалярными величинами), дающие представление о вихревой структуре потока.

Методы визуализации. Геометрические методы основаны на численном интегрировании системы обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяя построить линии тока или траектории частиц жидкости (streamlines, streaklines, timelines). Основная проблема состоит в выборе достаточного количества точек, необходимых для визуализации картины течения. Для выяснения ориентации структурных особенностей потока во времени и в пространстве геометрические подходы применяются вместе с текстурными методами визуализации.

В топологических подходах векторное поле течения представляется в виде набора линий тока, что позволяет определить локальное направление потока и найти критические точки, а также другие сингулярности. При этом тип критической точки определяет локальную картину течения в ее окрестности.

В текстурных же подходах визуализируется общая картина течения, что делает их близкими методам экспериментальной визуализации. Визуализация производится при помощи вычисления свертки векторного поля скорости и белого шума (интегрирование выполняется вдоль линии тока, выходящей из каждого пиксела). Результаты расчетов интегралов (line integral convolution, LIC) нормализуются, что позволяет определить яркость и контраст каждого пиксела.

Визуализация вихревых течений. В нестационарных задачах прослеживается не только наличие циркуляционных (вихревых) зон, но и их развитие во времени (процесс зарождения, развития и распада вихря). В работе [2] предложен подход к обнаружению и прослеживанию положения центра вихря в расчетной области, основанный на анализе собственных значений якобиана матрицы компонент скорости. Трассировка центров вихрей в процессе моделирования течения позволяет следить за эволюционной картиной потока.

Существуют различные подходы к визуализации вихревых течений, использующие то или иное определение вихря и критерии его идентификации [3], в частности, метод спиральности (helicity method) [4], метод параметра закрутки (swirl parameter method), методы, основанные на использовании критериев Q [5], Δ [6] и их модификаций, λ_2-метод (λ_2 method) [7], метод предиктора-корректора (predictor-corrector method), метод собственных векторов (eigenvector method), метод параллельных векторов (parallel vector method), метод максимальной завихренности (maximum vorticity method), метод линий тока (streamline method), комбинаторный метод (combinatorial method). Классификация методов визуализации вихревых течений, данная в табл. 1, проводится в зависимости от того, каким способом определяется вихрь (в области, что оказывается легче реализуемым на практике, или на линии), является ли метод инвариантным по отношению к преобразованию системы координат, носит подход локальный (подходы, основанные на преобразовании тензора градиента скорости) или глобальный характер (подходы, основанные на использовании линий тока или вихревых линий).

Таблица 1. Методы идентификации вихревых течений.

Метод	Область/Линия	Инвариантность	Локальный/Глобальный
Helicity	Линия	Нет	Локальный
Swirl parameter	Область	Нет	Локальный
Lambda-2	Область	Да	Локальный
Predictor-corrector	Линия	Да	Глобальный
Eigenvector	Линия	Нет	Локальный
Parallel vector	Линия	Нет	Локальный
Maximum vorticity	Линия	Да	Локальный
Streamline	Область	Нет	Глобальный
Combinatorial	Область	Нет	Локальный

В трехмерных течениях с гладким полем скорости $v(x,t)$ критерием, инвариантным к преобразованиям,является тензор градиента скорости(velocity gradient decomposition)[7]

$$\nabla \boldsymbol{v} = \boldsymbol{S} + \boldsymbol{\Omega}, \qquad \boldsymbol{S} = \frac{1}{2}[\nabla \boldsymbol{v} + (\nabla \boldsymbol{v})^*], \;\; \boldsymbol{\Omega} = \frac{1}{2}[\nabla \boldsymbol{v} - (\nabla \boldsymbol{v})^*]$$

где $\boldsymbol{S}$ - тензор скоростей деформаций (strain rate tensor), $\boldsymbol{\Omega}$ - тензор завихренности (vorticity tensor). Звездочка относится к сопряженному тензору.

Критерии идентификации вихрей. Одним из критериев, используемых для идентификации вихревых течений, является Q-критерий (Q-criterion), предложенный в работе [5]

$$Q = \frac{1}{2}(|\boldsymbol{\Omega}|^2 - |\boldsymbol{S}|^2).$$

Вихрь определяется как область течения, в которой выполняется неравенство $Q>0$ (область течения, в которой норма тензора завихренности превышает норму тензора скоростей деформаций).

Дельта-критерий (Δ-criterion), предложенный в работе [6], дается соотношением

$$\Delta = \left(\frac{Q}{3}\right)^3 + \left(\frac{\det \nabla \boldsymbol{v}}{2}\right)^2.$$

Вихрь определяется как область течения, в которой выполняется неравенство $\Delta>0$ (в этой области тензор $\nabla \boldsymbol{v}$ имеет комплексные собственные числа). В этой области вращение (антисимметричная часть тензора градиента скорости) доминирует над растяжением или сжатием (симметричная часть тензора градиента скорости).

Для визуализации вихревых линий используется нормализованная спиральность (normalized helicity) [4], представляющая собой косинус угла между векторами скорости и завихренности (в критических точках спиральность не определяется)

$$H_n = \frac{\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}}{|\boldsymbol{v}||\boldsymbol{w}|}.$$

В окрестности центра вихря угол между векторами скорости и завихренности является малым. В предельном случае, когда вектора скорости и завихренности являются коллинеарными, нормализованная спиральность равняется ±1, а линия тока, проходящая через такую точку, имеет нулевую кривизну (прямая линия). Знак спиральности показывает направление вращения вихря по отношению к направлению потока (по часовой или против часовой стрелки).

В работе [7] для идентификации вихрей применяется критерий λ_2 (λ_2 criterion), основанный на разложении тензора градиента скорости на симметричную (strain rate tensor) и антисимметричную (rotation tensor) компоненты.

Тензор $\boldsymbol{S}^2 + \boldsymbol{\Omega}^2$ является симметричным и имеет вещественные собственные числа ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$), два из которых являются отрицательными. Область вихревого течения определяется как область, в которой

$$\lambda_2(\boldsymbol{S}^2 + \boldsymbol{\Omega}^2) < 0,$$

где $\lambda_2(\boldsymbol{A})$ представляет собой собственное число симметричного тензора $\boldsymbol{A}$. При адибатических условиях данный критерий гарантирует мгновенный минимум давления в двумерном течении. Применение критерия затрудняется в том случае, когда в области, занятой жидкостью, присутствует несколько индивидуальных вихрей.

Примеры визуализации вихревых течений. Приводятся примеры визуализации вихревых течений, основанные на различных критериях идентификации вихрей.

Моделируется обтекание твердой сферы. Полная постановка задачи, а также сравнение численных и экспериментальных данных дается в работе [8]. Вихревая картина течения, обработанная в виде траекторий движения безынерционных частиц (частиц с нулевой массой), показана на рис.1 при Re=400.

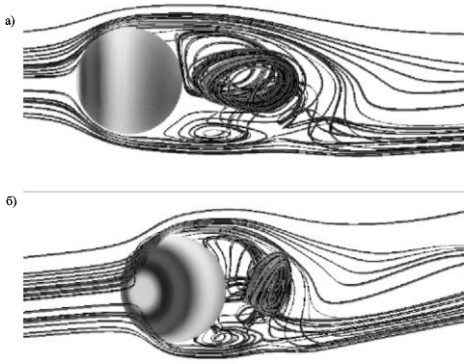


Рис. 1. Визуализация течения около сферы.
Фрагменты *а* и *б* соответствуют различным углам зрения.

Проводится моделирование крупных вихрей течения в струе. Полная постановка задачи, а также сравнение численных и экспериментальных данных дается в работе [9]. Вихревую структуру струи показывают рис.2.

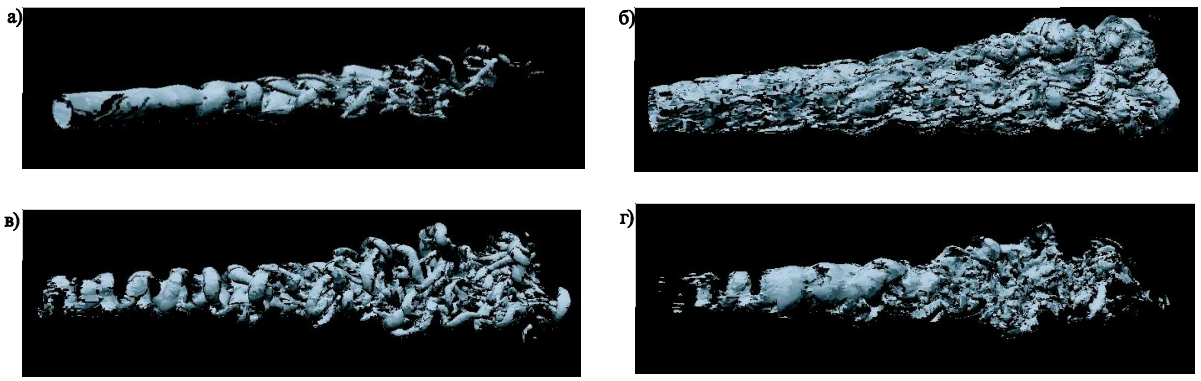


Рис. 2. Визуализация вихревого течения в струе на основе изоповерхностей максимальной завихренности (*а*), спиральности (*б*), критерия *Q* (*в*) и критерия λ_2 (*г*).

Заключение. Комбинированный подход к созданию иллюстраций при математическом моделировании задач гидрофизики с привлечением методов, разработанных в традиционной иллюстративной графике, обладает большим потенциалом для придания графической выразительности сценам визуализации.

Литература

1. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Чечеткин В.М. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах вычислительной физики // Журнал вычислительной математики и математической физики.2011.Т.51.№4.С.669-683.
2. Kenwright D.N., Haimes R. Automatic vortex core detection // IEEE Computer Graphics and Applications. 1998. Vol. 18. №4. P. 70-74.
3. Jiang M., Machiraju R., Thompson D.S. Detection and visualization of vortices // Visualization Handbook/Edited by C.R. Johnson, C.D. Hansen. Orlando: Academic Press, 2004. P. 287-301.
4. Levy Y., Degani D., Seginer A. Graphical visualization of vertical flows by means of helicity // AIAA Journal. 1990. Vol. 28. №8. P. 1347-1352.
5. Berdahl C.H., Thompson D.S. Eduction of swirling structure using the velocity gradient tensor // AIAA Journal. 1993. Vol. 31. №1. P. 97-103.
6. Hunt J.C.R., Wray A., Moin P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows // Report. Stanford University, Center for Turbulence Research. 1988. №. CTR-S88.
7. Jeong J., Hussain F. On the identification of a vortex // Journal of Fluid Mechanics. 1995. Vol. 285. P. 69-94.
8. Volkov K.N. Combustion of single aluminium droplet in two-phase flow // Heterogeneous Combustion / Edited by G.I. Stoev. USA, Nova Science, 2010. P. 191-260.
9. Volkov K.N. Large-eddy simulation of turbulence-induced aero-optical effects in free shear and wall bounded flows // Turbulent Flows: Prediction, Modeling and Analysis / Edited by Z. Driss. USA, Nova Science, 2013. P. 27-69.

ЛАГРАНЖЕВЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ИХ РОЛЬ В ПЕРЕНОСЕ ЧАСТИЦ ПАССИВНОЙ И ИНЕРТНОЙ ПРИМЕСИ

К.Н.Волков, д-р физ-мат.наук, В.Н.Емельянов, д-р техн.наук, И.В.Тетерина, канд.техн.наук, И.Е.Капранов, канд.техн.наук
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия

LAGRANGIAN COHERENT VORTEX STRUCTURES AND THEIR ROLE IN TRANSPORT OF PASSIVE AND INERT PARTICLES

K.N.Volkov, Dr.Sc.,V.N.Emelyanov, Dr.Sc., I.V.Teterina, Ph.D., I.E.Kapranov, Ph.D.
Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы, связанные с реализацией и физико-математическим сопровождением вычислительных экспериментов по исследованию течений, содержащих когерентные вихревые структуры, твердые частицы или жидкие капли. Обсуждаются методы и инструменты, предназначенные для визуализации вихревых и двухфазных течений, возникающих в различных практических приложениях. Приводятся примеры визуального представления решений ряда задач вихревой и двухфазной газовой динамики, связанных с расчетами течений в каналах, струях и следах и полученных при помощи лагранжевых подходов.

Issues related to the implementation and physical and mathematical support of computational experiments on the investigation of flows containing coherent vortex structures, solid particles or liquid droplets are considered. Methods and tools intended for visualization of vortex and two-phase flows arising in various practical applications are discussed. Visual representation of solutions of some problems of vortex and two-phase gas dynamics associated with calculations of flows in channels, jets and wakes computed with Lagrangian approaches are given.

Развитие прикладной математики и компьютерных технологий открывает новые возможности по моделированию сложных физических явлений и процессов, возникающих в вычислительной газовой динамике (Computational Fluid Dynamics, CFD). Добавление в поток твердых частиц или жидких капель осложняет картину течения, что связывается с разнообразием свойств (прежде всего, инерционности и концентрации) дисперсных включений, которые приводят к реализации многочисленных режимов течения. Прогресс в понимании природы и свойств турбулентности и динамики частиц в турбулентном потоке достигнут благодаря успехам теории динамических систем, позволившей понять как хаотическое поведение возникает в детерминированных системах, а также развитию вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентных течений и статистических методов моделирования течений газа с частицами.

Перемешивание пассивных жидкостей (жидкостей с одинаковыми физическими свойствами) в гидродинамических течениях является сложным явлением, которое включает два важных процесса: деформация выделенной жидкости в заданном поле скорости, и размыв ее границ за счет молекулярной диффузии. Анализ геометрических и временных масштабов течения позволяет в некоторых случаях пренебречь диффузионными эффектами, и проблема перемешивания сводится к анализу деформации выделенной области жидкости в рассматриваемом поле скорости (задача об адвекции). Такая задача тесно связана с проблемами лагранжевого описания движения в гидромеханике и заключается в изучении траекторий системы лагранжевых жидких частиц в эйлеровом поле скорости. При изучении явления адвекции применяются разные методы и критерии динамического хаоса, многие из которых связаны с анализом хаотических траекторий отдельных жидких частиц. Взаимодействие частиц с крупномасштабными вихревыми структурами в струях и слоях смешения является причиной турбулентной миграции частиц и формирования областей с повышенным содержанием дисперсной фазы.

Эйлеровые и лагранжевые подходы. В соответствии с различными подходами к описанию движения сплошной среды, выделяют различные подходы к визуализации вихревых течений: эйлеровые (Eulerian) и лагранжевые (Lagrangian). В методе Эйлера внимание фиксируется на некоторой точке пространства, занятого жидкостью, и наблюдается, что происходит в этой точке. Переменными выступают координаты точки пространства и время. В методе Лагранжа фиксируется внимание на жидкой частице, и прослеживается история ее движения. Переменными в данном случае являются начальные координаты частицы и время.

В эйлеровых подходах для визуализации вихревых течений обычно применяется тензор градиента скорости, его инварианты или их комбинации [1]. Основные недостатки эйлеровых методов связываются с необходимостью задания порогового значения того или иного критерия,

используемого для идентификации вихря, а также с зависимостью этих критериев от выбора системы отсчета. Необходимость расчета производных скорости и связанные с этим погрешности вычислений также снижают привлекательность эйлеровых подходов.

Лагражевые подходы к визуализации вихревых течений основаны на анализе траекторий жидких частиц. Границы вихревых структур определяются как линии максимальных значений поля локальных показателей Ляпунова. В отличие от эйлеровых подходов, некоторые погрешности в распределении скорости (особенно при ее экспериментальном определении) незначительно сказываются на лагранжевой визуализации вихревых течений. Лагранжевые подходы оказываются инвариантными по отношению к выбору системы отсчета. Использование большого промежутка времени для интегрирования основных уравнений обычно приводит к выявлению более мелких деталей течений. При этом размеры и форма вихревых образований практически не зависят от промежутка времени, выбранного для интегрирования. Для визуализации изменения векторных величин вдоль линии тока применяются различных подходы, например, изменение скорости графического построения траектории; вдоль траектории движется маркер или множество маркеров с соответствующей скоростью; прорисовка траектории штрихами, которые периодически смещаются по направлению линии тока; статическая визуализация с помощью цветной визуализации траектории, используя цветовую палитру, которая соответствует диапазону изменения модуля векторной величины вдоль траектории [2, 3].

Методы идентификации. В хаотической динамике существуют различные методы и критерии для определения хаотических режимов движения динамических систем, включая построение и анализ фазовых траекторий, вычисление спектральных и корреляционных характеристик отдельных проекций фазовых траекторий вихрей или маркеров в рассматриваемом течении, построение сечений Пуанкаре, анализ показателей Ляпунова. Их совместное использование позволяет достаточно надежно определить режимы движения отдельных частиц [4]. Одним из самых простых критериев является анализ фазовой траектории жидкой частицы (маркера). В том случае, когда траектория имеет определенную упорядоченность и предсказуемость, движение частицы считается регулярным. Если траектория частицы не содержит признака упорядоченности, то движение частицы считается хаотическим. Непосредственный анализ непрерывных интегральных кривых часто оказывается невозможным, в то время как отображения Пуанкаре помогают различать движения качественно отличающихся друг от друга типов (периодические, квазипериодические, хаотические).

Сечение Пуанкаре представляет собой систему точек, полученную в результате пересечения фазовой траекторией некоторой плоскости в выбранном направлении. Фазовая траектория считается регулярной, если система точек сечения Пуанкаре формирует упорядоченную структуру или ложится на регулярную кривую. Если траектория маркера формирует нерегулярную последовательность точек, то движение является хаотическим. При хаотическом движении две близлежащие траектории в среднем расходятся. Мерой расхождения близлежащих траекторий служат показатели Ляпунова. Положительное значение наибольшего показателя Ляпунова свидетельствует о хаотичности движения маркера.

Построение сечений Пуанкаре и расчет показателей Ляпунова требуют достаточно мощных вычислительных ресурсов, поскольку оператор отображения строится путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений. Метод точечных отображений является достаточно наглядным, помогая извлечь важную информацию о свойствах движения частиц. Важность изучения подобных отображений заключается в том, что им присущи некоторые универсальные свойства, которые прослеживаются в исходных динамических системах.

Хаотическая адвекция. Исследование процессов переноса и перемешивания в поле скорости с сильной неоднородностью (при наличии вихревых образований) имеет важное прикладное значение. В таких системах развивается так называемая лагранжевая турбулентность (иногда это явление называют адвективным хаосом). Лагранжевая турбулентность интересна тем, что регулярные крупномасштабные структуры потока порождают сложные и хаотические структуры частиц-маркеров, которые приводят к эффективному перемешиванию (такое неоднородное хаотическое перемешивание возможно и в регулярном эйлеровом поле скорости). Нерегулярность траекторий частиц послужила

стимулом для предложения хаотической адвекции в качестве механизма крупномасштабного перемешивания и транспорта в струйных течениях [5]. При некоторых предположениях роль примеси могут играть особенности или локализованные структуры самого поля скорости (например, вихри), и в этом случае его хаотизация в пространстве и времени происходит за счет тех же механизмов, что и стохастизация переноса частиц.

Хаотической адвекцией называется процесс перемешивания пассивной примеси в детерминированных потоках с экспоненциальной чувствительностью траекторий частиц к малым изменениям их начальных положений и управляющих параметров потока. Получили развитие методы поиска лагранжевых когерентных структур, устойчивых и неустойчивых многообразий, которые применяются для исследования процессов перемешивания и переноса. Математическим инструментом для описания перемешивания и переноса является лагранжев подход, в котором рассчитываются траектории жидких частиц. Эйлеровое поле скорости реальных течений не является строго регулярным, но в тех случаях, когда эйлеровое время корреляции достаточно велико по сравнению с лагранжевым, проблема перемешивания и переноса рассматривается в рамках концепции хаотической адвекции.

Возможные подходы к моделированию двумерных когерентных гидродинамических структур на основе статистической механики локальных вихрей рассматриваются в работе [6], в которой даются точные определения когерентности структур, и показываются механизмы их формирования.

Термин транспорт (или перенос) означает движение частиц жидкости вместе с потоком из одной области пространства в другую. В теории динамических систем под транспортом понимают движение в фазовом пространстве точек, представляющих динамическую систему с разными начальными условиями. Количественными мерами транспорта являются расход жидкости через некоторую выделенную поверхность и пространственная протяженность, определяемая размерами распределения частиц-маркеров. При определенных условиях в жидкости возникают материальные поверхности (поверхности, образованные, траекториями жидких частиц). Траектории частиц жидкости не могут пересекать эти поверхности, и они представляют собой барьеры для транспорта частиц. Перемешивание определяется не мгновенным полем пассивной примеси, а его эволюцией.

Течение около кругового цилиндра. Наиболее распространенной тестовой задачей периодического отрывного течения является течение в окрестности цилиндра с образованием вихревой дорожки Кармана. В имеющейся литературе приводится большое число результатов теоретических и экспериментальных исследований задачи обтекания одиночного цилиндра кругового сечения равномерным потоком.

Сравнение численной и экспериментальной картины течения в следе за круглым цилиндром при Re=140 показывает рис. 1. В эксперименте (фрагмент *а*) вода обтекает цилиндр диаметром 1 см со скоростью 1.4 см/с. Для визуализации движения частицы метятся белым коллоидным дымом, создаваемым электролитическим способом, и освещаются световым ножом [7]. По мере продвижения вниз по потоку на несколько диаметров ширина вихревой пелены возрастает. Визуализацию течения около круглого цилиндра при помощи метода трассирующих частиц показывает фрагмент *б* (частицы окрашиваются в соответствии с величиной скорости), а визуализацию вихревой дорожки Кармана при помощи метода показателей Ляпунова – фрагмент *в*.

Структура вихревого кольца. Результаты трехмерного численного моделирования формирования и распространения вихревого кольца используются для визуализации его структуры в различные моменты времени. Для визуализации структуры вихревого кольца применяются инварианты тензора градиента скорости и их различные комбинации, а также метод локальных показателей Ляпунова. Радиус вихревого кольца составляет 22.5 мм, а радиус ядра 8.4 мм. Начальная циркуляция скорости составляет 0.0057 м^2/с.

Визуализацию вихревых структур показывает рис. 2. Для визуализации используется метод показателей Ляпунова, накопленных за конечный интервал времени. Интегрирование проводится на промежутке времени T=1.5 с, за который вихревое кольцо проходит примерно 10% длины вычислительной области. Для визуализации течения используется около 40000 меченых частиц. Шаг интегрирования по времени полагается равным T/2400. Разрешение по времени составляет h=T/12. Фрагменты *а*, *в*, *д* и *ж* соответствуют интегрированию назад, а фрагменты *б*, *г*, *е* и *з* – интегрированию вперед.

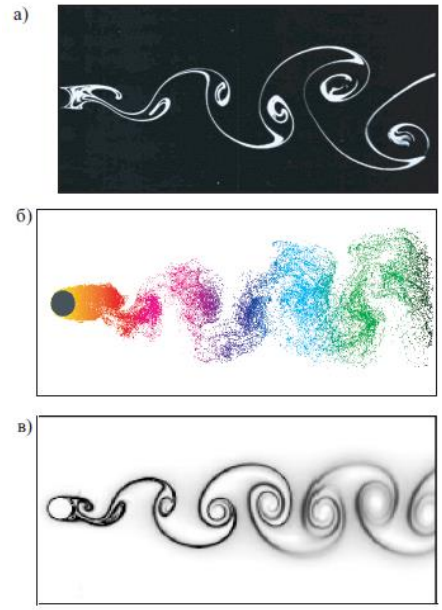


Рис. 1. Визуализация вихревой дорожки Кармана в следе за круглым цилиндром при Re=140 на основе данных физического эксперимента [7] (*а*), метода меченых частиц (*б*) и метода показателей Ляпунова (*в*).

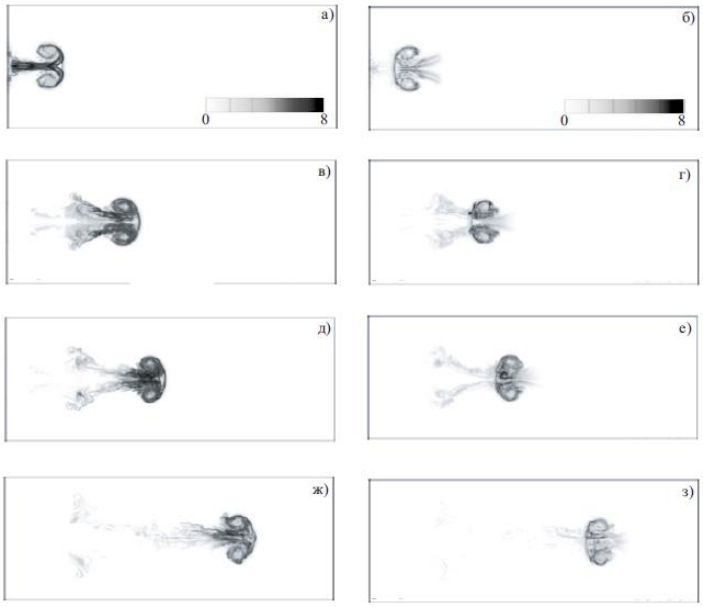


Рис. 2. Визуализация структуры вихревого кольца при помощи метода локальных показателей Ляпунова в моменты времени t=0.3 с (*а*, *б*), 0.6 с (*в*, *г*), 0.9 с (*д*, *е*) и 1.2 с (*ж*, *з*).

Вычисление наибольшего показателя Ляпунова позволяет оценить степень расходимости или сходимости двух близлежащих траекторий жидких частиц. Интегрирование в различных направлениях предоставляет различную информацию о поле течения [2]. Интегрирование назад позволяет обнаружить сближение траекторий частиц, что соответствует центрам вихревых образований, а интегрирование вперед – их расхождение, что позволяет найти периферийные области вихрей.

Заключение. Сравнительный анализ различных критериев, используемых в вычислительной практике для визуализации течений с твердыми частицами и жидкими каплями, показывает, что среди широкого набора критериев распознавания режима движения дисперсных включений не существует универсального критерия. Каждый из рассмотренных критериев направлен на анализ определенной особенности движения, а выбор соответствующего критерия диктуется постановкой задачи и особенностями реализации.

Литература

1. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Тетерина И.В., Яковчук М.С. Визуализация вихревых течений в вычислительной газовой динамике // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57. № 8. С. 1374-1391.
2. Green M.A., Rowley C.W., Haller G. Detection of Lagrangian coherent structures in 3D turbulence // Journal of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 572. P. 111-120.
3. Janicke H., Scheuermann G. Measuring complexity in Lagrangian and Eulerian flow descriptions // Computer Graphics Forum. 2010. Vol. 29. No. 6. P. 1783-1794.
4. Haller G. Lagrangian coherent structures // Annual Review of Fluid Mechanics. 2015. Vol. 47. P. 137-162.
5. Кошель К.В., Пранц С.В. Хаотическая адвекция в океане. Москва-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2008. 358 с.
6. Фимин Н.Н., Чечеткин В. М. Когерентные гидродинамические структуры и вихревая динамика // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 1. 35 с.
7. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 138 с.

ДАЛЬНИЕ ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ГЕНЕРАЦИИ

В.В.Булатов , д-р физ-мат.наук, Ю.В.Владимиров
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

FAR SURFACE AND INTERNAL GRAVITY WAVE FIELDS FROM NON-STATIONARY SOURCES

V.V.Bulatov, Dr.Sc., Yu.V.Vladimirov
A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

Рассмотрена задача о математическом моделировании полей внутренних и поверхностных гравитационных волн вдали от движущегося нестационарного источника возмущений. В линейном приближении получены интегральные формы решения для отдельной волновой моды и численно показано, что волновая картина возбуждаемых волновых полей при определенных параметрах генерации представляет собой систему гибридных волновых возмущений, одновременно обладающих свойствами волн двух типов: кольцевидных (поперечных) и клиновидных (продольных). Представлены и обсуждены результаты численных расчетов, описывающие основные особенности фазовых структуры и волновых картин возбуждаемых волновых полей в зависимости от параметров генерации. Проведено сравнение получаемых аналитических результатов с данными натурных измерений гидрофизических полей.

The problem of mathematical modeling of the far internal and surface gravity wave fields from a moving non-stationary source of disturbances is considered. In the linear approximation, integral forms of the solution for an individual wave mode are obtained and it is shown numerically that the wave pattern of excited wave fields for certain generation parameters is a system of hybrid wave perturbations that simultaneously possess the properties of waves of two types: annular (transverse) and wedge-shaped (longitudinal) waves. The results of numerical calculations describing the main features of the phase structure and wave patterns of excited wave fields as functions of the generation parameters are presented and discussed. The analytical results are compared with the data of field measurements of the hydrophysical fields.

В настоящее время наблюдается рост интереса к математическому моделированию волновых движений неоднородных природных стратифицированных сред, обусловленный проблемами геофизики, океанологии, физики атмосферы, охраны и изучения окружающей среды, эксплуатации сложных гидротехнических сооружений, в том числе морских нефтедобывающих комплексов и рядом других актуальных задач науки и техники. Этот интерес обусловлен не только практическими потребностями, но и большим теоретическим содержанием возникающих здесь проблем математического моделирования. Изучение волновых процессов в неоднородных стратифицированных природных средах превратилось в быстро развивающуюся область, причем результаты этих исследований важны как с фундаментальной точки зрения, так и для технических приложений. Новые экспериментальные и технические возможности стимулируют работу по математическому моделированию и асимптотическому исследованию волновой динамики внутренних и поверхностных гравитационных волн. При этом в основе анализа, как правило, лежат асимптотические методы, что позволяет на базе изучения невозмущенных уравнений формировать соответствующие асимптотические разложения, учитывающие неоднородность и нестационарность природных стратифицированных сред. Важным механизмом возбуждения полей внутренних и поверхностных гравитационных волн в природных (океан, атмосфера Земли) и искусственных стратифицированных средах является их генерация источниками возмущений различной физической природы: природного (движущийся тайфун, ветровое волнение, обтекание неровностей рельефа океана, изменения полей плотности и течений, подветренные горы) и антропогенного (морские технологические конструкции, схлопывание области турбулентного перемешивания, подводные взрывы) характеров. Система уравнений гидродинамики, описывающая волновые возмущения стратифицированных сред в общем виде представляет достаточно сложную математическую задачу как в плане доказательств теорем существования и единственности решений в соответствующих функциональных классах, так и с вычислительной точки зрения. Основные результаты решений задач о генерации волновых возмущений представляются в самой общей интегральной форме, и в этом случае полученные интегральные решения требуют разработки численных и асимптотических методов их исследования, допускающих качественный анализ и проведение экспресс оценок получаемых решений. В рамках линейной теории для аналитического исследования волновых возмущений в природных стратифицированных средах используются асимптотические методы интегральных представлений и приближенные методы. Для детального описания широкого круга физических явлений, связанных с динамикой волновых возмущений неоднородных и нестационарных природных стратифицированных сред, необходимо исходить из достаточно развитых математических моделей. Трехмерность структуры природных стратифицированных сред также

играет существенную роль, и в настоящее время не имеется возможность проведения масштабных вычислительных экспериментов по моделированию трехмерных океанических течений на больших временах с достаточной точностью. Однако в ряде случаев первоначальное качественное представление об изучаемом круге волновых явлений можно получить на основе более простых аналитических моделей. В этой связи необходимо отметить классические задачи гидродинамики о построении асимптотических решений, описывающих эволюцию волновых возмущений, возбуждаемых источниками различной природы в тяжелой жидкости. Модельные решения позволяют в дальнейшем получить представления волновых полей с учетом изменчивости и нестационарности реальных природных стратифицированных сред. Ряд результатов анализа модельных линейных задач, описывающих различные режимы возбуждения и распространения волновых возмущений, лежат в основе активно развивающейся в настоящее время нелинейной теории генерации волн экстремально большой амплитуды – волн-убийц. Моделирование волновой динамики в настоящее время особенно актуально вследствие возросшего количества морских платформ, установленных на шельфовых месторождениях нефти и газа. Можно отметить некоторые случаи повреждения морских платформ внутренними волнами большой амплитуды, например, в Андаманском море, когда одна из опор платформы в октябре 1997 года была изогнута сдвиговым течением во внутренней волне. Измерения показывают, что нагрузки от внутренних гравитационных волн, действующие на подводные части морских платформ в вертикальном направлении могут в 30 раз превосходить нагрузки от ветровых волн. Действие волн приводит к мощному транспорту наносов и размывам дна, особенно в глубоководных районах, где влияние ветровых, в том числе штормовых волн, пренебрежимо мало. Волны, существующие в океане вследствие стратификации его вод, являются принципиально двумерными, а во многих случаях и трехмерными, поэтому в вычислительном плане анализ двумерных и трехмерных нестационарных волновых движений является весьма сложной задачей. Разработан и получил широкое применение численный код MIT, решающий полные уравнения гидродинамики с учетом реального рельефа дна, вращения Земли и турбулентных процессов, разработанная в Массачусетской технологическом институте (США) вместе со специалистами по численному моделированию океана остального мирового сообщества. Данная модель требует больших компьютерных ресурсов, оправданных только для решения ряда отдельных практических задач океанологии. Тем не менее, даже такие полные модели пока еще не учитывают, например, существующей в реальных океанических условиях стабильной фоновой горизонтально – неоднородной стратификации. Для учета этого гидрофизического эффекта необходимо вводить внешние силы, эту неоднородность стратификации удерживающие, параметризация которых численно затруднительна. Существующие в настоящее время другие методы численного моделирования, в том числе с использованием суперкомпьютеров (алгоритм IGW Research, алгоритмы Riemann Solver для решения гиперболических уравнений мелкой воды, псевдо-спектральный алгоритм высокого порядка для решений уравнений гидродинамики HOSM) не всегда позволяют эффективно рассчитывать конкретные физические задачи волновой динамики океана и атмосферы с учетом их реальной изменчивости, так как ориентированы на решение достаточно общих задач, требуют большой вычислительной мощности, не всегда учитывают физическую специфику решаемых задач, что существенно ограничивает их практическую применимость, особенно при расчетах волновых полей в реальных природных средах. Кроме того, использование мощных численных алгоритмов требует верификации и сравнения с решениями модельных задач. Поэтому в современных научных исследованиях и анализе волновых явлений природных стратифицированных сред широко применяются упрощенные асимптотические и аналитические модели. В линейном приближении существующие подходы к описанию волновой картины возбуждаемых полей внутренних и поверхностных волн основаны на представлении волновых полей интегралами Фурье [1-7].

Целью настоящей работы является математическое моделирование нестационарных режимов генерации полей внутренних и поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых нестационарным движущимся источником возмущений. Результаты математического моделирования нестационарных режимов генерации показывают, что дальние волновые поля от нестационарных источников возмущений при определенных режимах генерации представляют собой гибридную систему волн двух типов: кольцевых (поперечных) и клиновидных (продольных). Нестационарность источника возмущений приводит к появлению не только кольцевых волн, расходящихся по непосредственно от источника, но также к

генерации гибридных волновых возмущений, распространяющихся от источника вверх по потоку. Качественная картина волновых полей от нестационарного источника существенно усложняется по сравнению со случаем генерации волн движущимся стационарным источником, когда в фиксированную точку наблюдения последовательно приходят волновые фронты отдельных клиновидных (продольных) мод. Расчеты показывают, что при определенных параметрах генерации в фиксированную точку наблюдения могут приходить вначале кольцевые (поперечные) волны. Полученные результаты математического моделирования полей внутренних и поверхностных гравитационных волн дают возможность эффективно анализировать основные амплитудно-фазовые характеристики возбуждаемых волновых полей, и, кроме того, качественно исследовать полученные решения, что важно для правильной постановки более сложных математических моделей волновой динамики реальных стратифицированных сред.

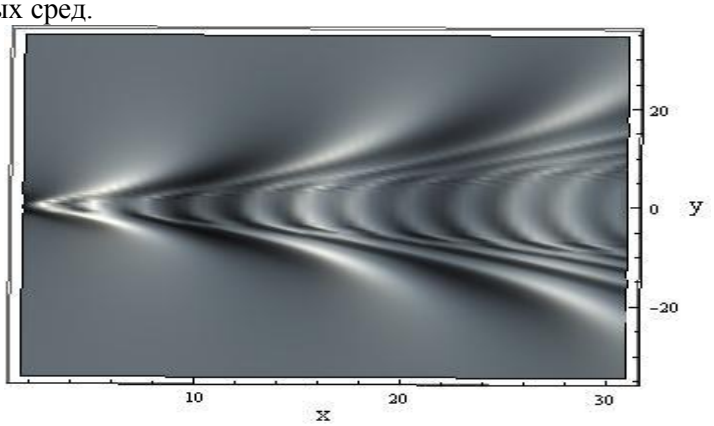


Рис. 1. Поверхностные гравитационные волны вдали
от нестационарного движущегося источника возмущений.

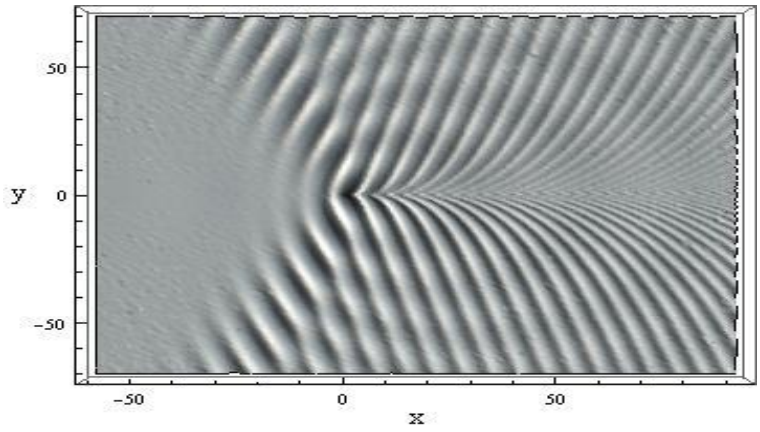


Рис. 2. Внутренние гравитационные волны вдали
от нестационарного движущегося источника возмущений.

Подобного рода волновые картины могут наблюдаться при дистанционном зондировании, наблюдении и измерениях внутренних и поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых различными источниками возмущений, в природных (океан, атмосфера Земли) и искусственных стратифицированных средах. На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов дальних волновых полей от нестационарных источников возмущений [1-7].

Литература

1. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Внутренние гравитационные волны в неоднородных средах. М.: Наука, 2005.
2. Bulatov V.V., Vladimirov Yu.V. Internal gravity waves: theory and applications. M.: Наука, 2007.
3. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Динамика негармонических волновых пакетов в стратифи-цированных средах. М.: Наука, 2010.
4. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Волновая динамика стратифицированных сред: теория и приложения. Saarbrucken: Palmarium Academic Publishing, 2012.
5. Bulatov V.V., Vladimirov Yu.V. Waves in stratified medium. M.: Наука, 2012.
6. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Волны в стратифицированных средах. М.: Наука, 2015.
7. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Теория волновых движений неоднородных сред. Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов. 2017.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ВОЛНЫ В БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

Т.Г.Талипова[1,2], д-р физ-мат.наук, А.А.Куркин[2], д-р физ-мат.наук
[1]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
[2]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия

INTERNAL WAVE PROPAGATION IN NONREFLECTED CHANNEL

T.G.Talipova[1,2], Dr.Sc., A.A.Kurkin[2], Dr.Sc.
[1]Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
[2]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia

Аналитически получены условия связи между падающим, прошедшим и отраженным импульсами смещения поверхности раздела в двухслойной жидкости в точке сшивки двух безотражательных профилей дна в задаче распространения внутренних волн.

The conditions of the connection between the incident, transmitted and reflected impulses of the interface displacement in a two-layer fluid at the cross-linking point of two reflectionless bottom profiles in the problem of propagation of internal waves are obtained analytically.

Аналитическая теория длинных волн на поверхности воды допускает существование таких профилей дна, по которым либо волна возвышения, либо волна скорости проходят без отражения в отсутствие условий плавной неоднородности дна [1, 2]. Аналогичные выкладки могут быть проделаны и для длинных волн на поверхности раздела жидкостей с разной плотностью [3, 4]. Горизонтально – неоднородное дно может состоять из отрезков, каждый из которых можно аппроксимировать безотражательным профилем, в таком случае отражение волны будет сосредоточено в точке сшивки профилей. Для лучей распространения внутренних волн на заданной частоте нами были найдены безотражательные вертикальные профили частоты Брента – Вяйсяля [5], В настоящей работе приведены аналитические выражения, используя которые, можно получить амплитуды и формы прошедшего и отраженного импульсов на поверхности раздела в зависимости от амплитуды и формы падающего импульса внутренней волны.

Часто безотражательный откос соединяется с другим классическим «безотражательным» профилем – прямым участком дна. Рассмотрим здесь такое соединение в двухслойном потоке постоянной ширины. В качестве нетривиального безотражательного профиля выберем профиль (1), который удобно записать через переменную толщину нижнего слоя

$$h_2(x) = h_1 \frac{(x/L)^{4/3}}{1-(x/L)^{4/3}}. \qquad (1)$$

Схематично, сшивка двух безотражательных профилей (в точке $x = x_0$) представлена на рис. 1.

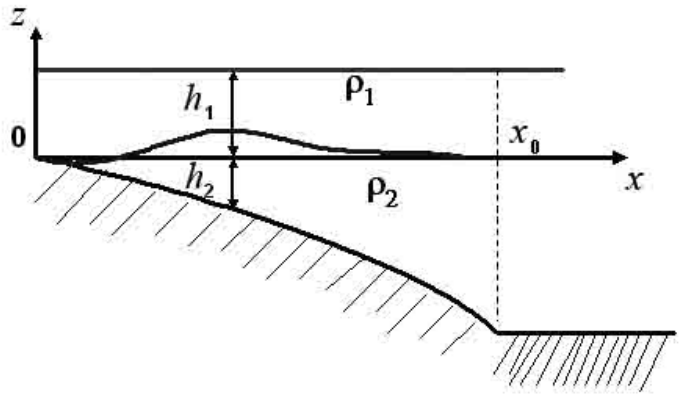


Рис. 1. Геометрия задачи.

Здесь точка $x = 0$ соответствует точке перехода двухслойного потока в однослойный, где внутренние волны не распространяются. Будем считать, что внутренняя волна полностью отражается в этой точке, таким образом, точку $x = 0$ можно по аналогии с поверхностными волнами называть точкой «уреза». Точка $x = x_0$ является точкой сшивки двух безотражательных откосов. Волна подходит к точке x_0 справа из области $x \to \infty$, в этой точке часть энергии

падающей волны будет уходить дальше к «урезу», а часть будет отражаться назад. На урезе (x = 0) мы ставим условия полного отражения падающей волны.

Рассмотрим сначала подход монохроматической внутренней волны $\eta_i = A_i \exp i(\omega t + kx)$ из зоны постоянной глубины. Ограниченное волновое поле над безотражательным откосом ($0 < x < x_0$), удовлетворяющее условию полного отражения, имеет вид стоячей волны

$$\eta(x,t) = A_t \sqrt{\frac{c_0}{c(x)}} \left[e^{i\omega(t+\tau_0)} - e^{i\omega(t-\tau_0)} \right] = 2iA_t \sqrt{\frac{c_0}{c(x)}} \sin[\omega\tau(x)] \exp(i\omega t), \qquad (2)$$

где τ – это фаза (эйконал)

$$\tau(x) = \int_0^x \frac{dy}{c(y)} = \frac{3x_0}{c_0} \sqrt{\frac{c(x)}{c_0}} = \tau_0 \sqrt{\frac{c(x)}{c_0}} \quad , \qquad (3)$$

и τ_0 есть значение эйконала в точке x_0 (время движения внутренней волны от кромки шельфа до уреза): $\tau_0 = 3x_0/c_0$, c_0 – это скорость внутренней волны на кромке шельфа в точке x_0, равная $c_0 = c_{\lim} (x_0/L)^{2/3}$, где $c_{\lim} = (g'h_1)^{1/2}$ и $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ – редуцированное значение ускорения силы тяжести. В области постоянной глубины мы имеем стандартную суперпозицию полей

$$\eta(x,t) = A_i \exp\left[i\omega\left(t + \frac{x - x_0}{c_0} \right) \right] + A_r \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x - x_0}{c_0} \right) \right]. \qquad (4)$$

В точке сшивки x_0 сохраняется возвышение в волне и непрерывен расход воды:

$$A_t \left[\exp(i\omega\tau_0) - \exp(-i\omega\tau_0) \right] = A_i + A_r \,, \qquad (5)$$

$$A_t \frac{d}{dx}\left(\sqrt{\frac{c_0}{c}} \right) \left[\exp(i\omega\tau_0) - \exp(-i\omega\tau_0) \right] + \frac{i\omega}{c_0} \left[\exp(i\omega\tau_0) + \exp(-i\omega\tau_0) \right] = \frac{i\omega}{c_0} \left[A_i - A_r \right]. \qquad (6)$$

Здесь A_i есть амплитуда падающей волны, A_t есть амплитуда прошедшей волны и A_r есть амплитуда отраженной волны в точке сшивки. Полученная алгебраическая система легко решается, и амплитуда трансформированной волны есть

$$A_t = A_i \left[\frac{1}{\exp(i\omega\tau_0) - \dfrac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}} \right]. \qquad (7)$$

Амплитуда определяется только одним параметром, $\omega\tau_0$. Соответственно амплитуда волны, отраженной от кромки шельфа ($x = x_0$), определяется как

$$A_r = -A_i \frac{\exp(-i\omega\tau_0) - \dfrac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0}}{\exp(i\omega\tau_0) - \dfrac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0}}. \qquad (8)$$

Как и следовало ожидать, короткие волны ($\omega\tau_0 >> 1$) практически полностью проходят на откос, а длинные волны ($\omega\tau_0 << 1$) – полностью отражаются от откоса. Поскольку волна полностью отражается от уреза, то на урезе она ограничена, и смещение границы раздела двух жидкостей в этой точке может быть определено аналитически через форму трансформированной волны на урезе (2):

$$\eta_R(x \to 0) = 2iA_t \sqrt{\frac{c_0}{c(x)}} \omega\tau(x) e^{i\omega t} = 2iA_t \tau_0 e^{i\omega t}. \qquad (9)$$

В сущности, эта формула следует из известной формулы для высоты «наката» волны произвольной формы [4]

$$\eta_R(x = 0, t) = 2\tau_0 \frac{d\eta_t(t)}{dt}, \qquad (10)$$

если учесть, что мы рассматриваем монохроматическую волну.

Полученные выше формулы относятся к монохроматическим волнам произвольной частоты. Общее решение задачи можно получить, делая Фурье – преобразование падающего сигнала. Находим, используя спектральные коэффициенты отражения A_r/A_i и трансформации A_t/A_i,, получаемые из (7) и (8), спектральные коэффициенты отраженной и прошедшей волн, а

затем, делая обратное преобразование Фурье, рассчитываем само волновое поле в окрестности уреза. Для трансформированной волны, которая затем будет распространяться к урезу как бегущая волна, сделаем следующую замену

$$B_t = A_i \frac{e^{i\omega\tau_0}}{e^{i\omega\tau_0} - \dfrac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0}}. \tag{11}$$

Тогда из (11) получаем уравнение для спектральных амплитуд

$$B_t e^{i\omega\tau_0} - B_t \frac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0} = A_i e^{i\omega\tau_0}. \tag{12}$$

Умножаем на $e^{i\omega\tau_0}$ и делая обратное преобразование Фурье, получаем, что на кромке шельфа

$$\eta_t(t) - \int_{-\infty}^{\infty} B_t(\omega)\frac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0} e^{i\omega(t-\tau_0)} d\omega = \eta_i(t). \tag{13}$$

Используя прямое Фурье – преобразование, т.е.

$$B_t(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \eta_t(\zeta) e^{-i\omega\zeta} d\zeta\ , \tag{14}$$

получаем для интеграла в левой части уравнения (13)

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} d\zeta \bullet \eta_t(\zeta)\frac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0} e^{i\omega(t-\tau_0-\zeta)} = \int_{-\infty}^{\infty} \eta_t(\zeta)\mathrm{N}(t-\tau_0-\zeta)d\zeta\,, \tag{15}$$

где N есть

$$\mathrm{N}(z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0} e^{i\omega z} dz\,. \tag{16}$$

Интеграл в (16) легко вычисляется и описывает прямоугольник с амплитудой Q в интервале от $-\tau_0$ до τ_0.

$$\mathrm{N}(z) = QH(z), \qquad H(z) = \begin{cases} 0, z < -\tau_0 \\ 1, -\tau_0 < z < \tau_0 \\ 0, \tau_0 < z \end{cases}, \qquad Q = \frac{1}{2\tau_0}. \tag{17}$$

Используя свертку в (15) с учетом (13) и (17) можно получить следующее уравнение Фредгольма второго рода для прошедшей волны:

$$\eta_t(t) - \frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0} \eta_t(\xi + t - \tau_0)d\xi = \eta_i(t). \tag{18}$$

Аналогично, используя (8), для отраженного импульса обратное преобразование Фурье можно записать в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} A_r e^{i\omega(t+\tau_0)} d\omega - \aleph(A_r) - \aleph(A_r) = -\int_{-\infty}^{\infty} A_i e^{i\omega(t-\tau_0)} d\omega + \aleph(A_i)\,, \tag{19}$$

где $\aleph(A) = \int_{-\infty}^{\infty} A\frac{\sin\omega\tau_0}{\omega\tau_0} e^{i\omega t} d\omega$ представляет собой преобразование Фурье от произведения спектральных амплитуд падающей и отраженной волн на спектр прямоугольного фильтра (20), что эквивалентно свертке падающего и отраженного сигналов с этим фильтром в реальном пространстве:

$$\eta_r(t+\tau_0) - \frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0} \eta_r(\xi)\mathrm{N}(\xi - t)d\xi = -\eta_i(t-\tau_0) + \frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0} \eta_i(\xi)\mathrm{N}(\xi - t)d\varsigma\,, \tag{20}$$

где N(z) описывается выражением (17). Уравнение (20) представляет собой уравнение Фредгольма второго рода для отраженной от уреза волны

$$\eta_r(t+\tau_0)-\frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0}\eta_r(t-\zeta)d\zeta=-\eta_i(t-\tau_0)+\frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0}\eta_i(t-\zeta)d\zeta\,, \qquad (21)$$

или, вводя новую переменную по времени $t_n = t + \tau_0$, получаем

$$\eta_r(t_n)-\frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0}\eta_r(\zeta+t_n-\tau_0)d\zeta=-\eta_i(t_n-2\tau_0)+\frac{1}{2\tau_0}\int_{-\tau_0}^{\tau_0}\eta_i(\zeta+t_n-\tau_0)d\zeta\,. \qquad (22)$$

Численно решая (18) и (22) можно найти как форму волны на урезе, так и форму отраженной волны в точке сшивки (кромка шельфа).

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РНФ 16-17-00041.

Литература

1. Диденкулова И.И., Заибо Н., Пелиновский Е.Н. Отражение длинных волн от “безотражательного” донного профиля // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 4. С. 101-107.
2. Didenkulova I., Pelinovsky E. Non-dispersive traveling waves in strongly inhomogeneous water channels // Physics Letters A. 2009. V. 373. No. 42. P. 3883-3887.
3. Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. Безотражательное распространение волн в сильно неоднородных средах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. № 3. С. 4-13.
4. Талипова Т.Г., Пелиновский Е.Н. Трансформация внутренних волн над неровным дном: аналитические результаты // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 621-626.
5. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. Non-reflecting internal wave beam propagation in the deep ocean. // Journal of Physical Oceanography. 2010. V. 40. No. 4. P. 802-813.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРАЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ

О.Д.Шишкина, канд.техн.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

A STUDY OF LIMITS OF APPLICABILITY OF NON-LINEAR THEORY OF INTERNAL WAVES FOR SPATIAL EDGE PHENOMENA IN THE SHELF ZONE

O.D.Shishkina, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Проведена апробация метода классификации краевых эффектов нелинейных внутренних волн [1] - горизонтального сдвигового потока ("мелкий" шельф) и вторичного солитона на шельфе ("глубокий" шельф) [2] - для определения пределов применимости нелинейной теории внутренних волн в двуслойной жидкости. Исследованные в работе лабораторные и натурные условия пространственной трансформации внутренних волн при их движении вдоль кромки шельфа соответствовали слабонелинейной теории внутренних волн в двуслойной жидкости конечной глубины и с бесконечно глубоким нижним слоем, а также теории полностью нелинейных внутренних волн.

Approbation of classification method for the edge effects of nonlinear internal waves [1] - a secondary soliton ("deep" shelf) or a horizontal shear flow ("shallow" shelf) [2] - was offered to determine the limits of applicability of the nonlinear theory of internal waves in the two-layer fluid. Studied laboratory and field conditions of spatial transformation of internal waves during their propagation along the shelf's edge correspond to the weakly nonlinear theory of internal waves in the two-layer fluid of finite and an infinitely deep lower layer, as well as to the fully non-linear theory.

Слабонелинейные волны при бесконечном нижнем слое. Границу применимости теории нелинейных внутренних волн при описании краевых эффектов можно определить из условия отсутствия вторичного солитона на шельфе ($\eta_S = 0 \Longrightarrow V_S = C_S$) и условия равенства расхода жидкости вдоль шельфа [1].

Уравнение для "критического" значения амплитуды слабонелинейной диспергирующей внутренней волны η^*, при котором возможно формирование вторичного краевого солитона над шельфом, с учетом уравнения Кортевега - де Вриза (КдВ), имеет вид [1]:

$$1+\frac{3}{8}\frac{\eta}{h_1}=\frac{h_{2S}}{\eta}\sqrt{\frac{h_{2S}}{H_S}} \quad , \tag{1}$$

где η - амплитуда солитона, H_S - глубина двуслойной жидкости над шельфом, h_1 - толщина верхнего слоя, h_{1S} - толщина верхнего слоя над шельфом h_{2S} - толщина нижнего слоя над шельфом.

"Критические" значения амплитуды первичного солитона η^*, при которых гидродинамический режим на шельфе изменяется с «мелкого» на «глубокий» [1], определяют корни квадратного уравнения (1):

$$\eta^{*}{}_{1,2}=\frac{-b\pm\sqrt{D}}{2a}=-\frac{b}{2a}\pm\frac{\sqrt{D}}{2a}=-\frac{4}{3}h_1\left(1\mp\sqrt{1+\frac{3}{2}\frac{h_{2S}}{h_1}\sqrt{\frac{h_{2S}}{H_S}}}\right). \tag{2}$$

Из условия (2) определяются координаты минимума функции (1):

$$x=-\frac{b}{2a}=-\frac{4}{3}h_1, \qquad y=-\frac{D}{4a}=-\frac{2}{3}h_1-h_{2S}\sqrt{\frac{h_{2S}}{H_S}} \tag{3}$$

При условии равенства знаков левой и правой частей уравнения (1) для "критических" параметров первичного солитона понижения ($\eta^* < 0$) следует :

$$1+\frac{3}{8}\frac{\eta^*}{h_1^*}<0 \quad \text{или} \quad h_1^* < -\frac{3}{8}\eta^* \tag{4}$$

Уравнения (1)-(4) определяют критерии применимости теории слабонелинейных внутренних волн с дисперсией в двуслойной жидкости с бесконечно глубоким нижним слоем.

Эти условия, согласно уравнению (1), формируются тремя соотношениями параметров : амплитуды исходного солитона к толщине верхнего квазиоднородного слоя η/h_{1S}, толщины нижнего слоя над шельфом к амплитуде исходного солитона h_{1S}/η и соотношением толщин

слоев над шельфом h_1/h_{2S}. Эти же соотношения, определяющие характер взаимодействия солитона с поперечной моделью шельфа, были выделены по результатам серии экспериментов [2].

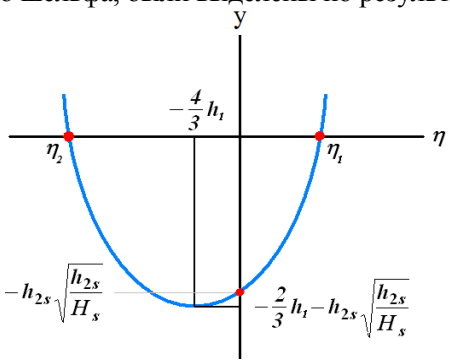


Рис. 1. График функции (1) в зависимости от гидрологических параметров и амплитуды солитона η.

При оценке применимости уравнения КдВ для гидрологических условий в акватории Мексиканского залива восточнее Флориды по формуле (4) для известной амплитуды внутренних волн $\eta = 20$ м (Рис. 2,а) получаем «критическое» значение толщины верхнего слоя $h_1^* < 7{,}5$ м. По данными натурных замеров, эта величина составляет $h_1^* = 6$ м (рис. 2,б) [3], по спутниковым данным $h_1^* = 5 \div 6.5$ м (Рис. 3) [4].

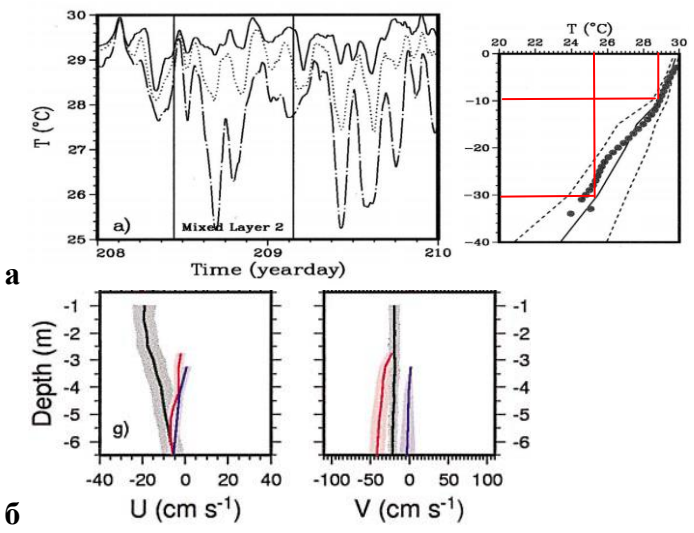


Рис. 2. Гидрологические данные побережья Флориды 27 и 28 июля 1999 г. [3]: а - внутренние волны на глубинах 5м (---), 10м (••••) и 15м (--•---•); б - поперечная и продольная скорости на шельфе [3].

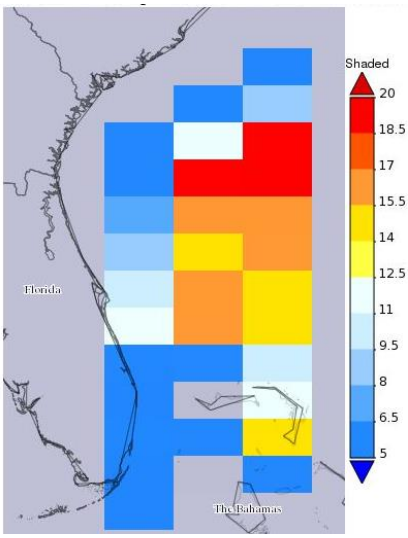


Рис. 3. Глубина перемешанного приповерхностного слоя восточнее Флориды по спутниковым данным на 28 июля 1999 г. [4].

Для натурных условий в море Альборан вблизи пролива Гибралтар при глубине моря H = 400 м и амплитуде исходного солитона η = -60 м [5] "критическая" толщина верхнего перемешанного слоя согласно условию (4) должна составлять $h_1^* < 22{,}5$ м.

На рис. 5 представлена гидрология моря Альборан, при которой из возможных краевых эффектов на шельфе наблюдались горизонтальные сдвиговые потоки при движении солитонов Сеутской бухте. Согласно уравнению (4) толщина верхнего квазиоднородного слоя при глубине шельфа $H_S = h_1 + h_{2S} = 50$ м и амплитуде солитона η = 60 м [5] составляет $h_1^* = 15$ м. По данным спутниковых наблюдений (рис. 5,б) толщина верхнего слоя h_1^* в этом районе на 20 июня 2001 года составляла от 14 до 16 м.

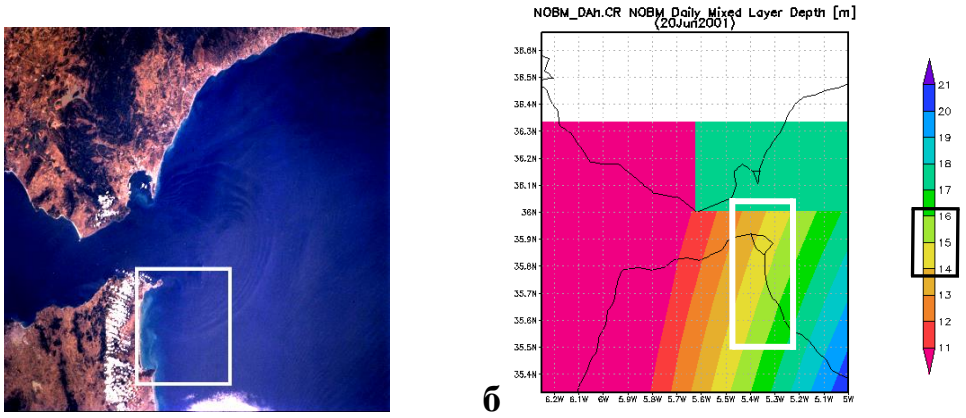


Рис. 4. Данные спутниковых наблюдений Средиземного моря в районе пролива Гибралтар 20 июня 2001 г.: а – изображение водной поверхности (фото NASA ISS002-724-12), б – глубина приповерхностного перемешанного слоя по данным радарного зондирования [4].

Слабонелинейные волны при конечной толщине слоев. В случае движения солитона понижения ($\eta < 0$) в приповерхностном пикноклинев двуслойной жидкости с конечными толщинами слоев ($h_1 < h_2$) второе слагаемое в левой части уравнения (5) [1] будет положительным, а сумма в левой части уравнения больше 1:

$$1+\eta\frac{h_1/h_2-h_2/h_1}{2H}=\frac{h_{2S}}{\eta}\sqrt{\frac{h_{2S}H}{h_2H_S}}>1. \qquad (5)$$

Из чего следует, что значение «критической» амплитуды исходного солитона понижения η^* для слабонелинейных волн с дисперсией на границе раздела двух жидкостей конечной толщины

$$\eta^*<h_{2S}\sqrt{\frac{h_{2S}H}{h_2H_S}}\,. \qquad (6)$$

Оценка применимости уравнения КдВ для натурных условий в Карских воротах [6] при H = 160 м, η = -60 м, H_S = 50 м, h_1 = 20 м, h_2 = 140 м дает значение расстояния от дна шельфа до пикноклина h_{2S}^* = 0,023 м. Столь близкое расположение пикноклина над дном шельфа действительно наблюдается в условиях северных морей (Рис. 5).

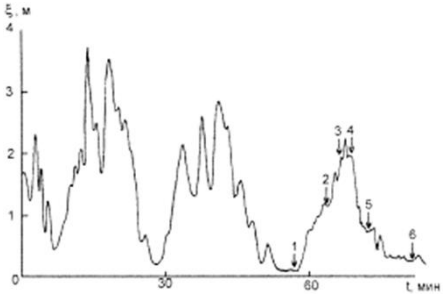


Рис. 5. Положение центра пикноклина над дном шельфа в Печорском море [7].

Сильнонелинейные волны при конечной толщине слоев. Скорость движения полностью нелинейного солитона определяется формулой [8]:

$$V_+=C\left(1+\alpha_0\eta+\alpha_1\eta^2+\alpha_2\eta^3+\alpha_3\eta^4+O\left(\eta^5\right)\right) \qquad (7)$$

где C - предел скорости линейной волны; α_i - коэффициент нелинейности (i-1)-го порядка:

$$\alpha_0=-\frac{3}{2}\frac{h_1-h_2}{h_1h_2};\qquad \alpha_1=-\frac{3}{8}\cdot\frac{H^2+4h_1h_2}{\left(h_1h_2\right)^2};\qquad \alpha_2=-\frac{3H^2}{16}\frac{h_1-h_2}{\left(h_1h_2\right)^3};\qquad \alpha_3=-\frac{15H^2}{128}\frac{\left(h_1-h_2\right)^2}{\left(h_1h_2\right)^4}$$

В этом случае соотношение скоростей первичного V и вторичного V_S солитонов в глубокой и мелкой частях шельфа можно записать в виде :

$$\frac{V}{V_S} = \frac{C}{C_S}\left(1 + \alpha\eta + \alpha_1\eta^2 + \alpha_2\eta^3 + \alpha_3\eta^4 + O\left(\eta^5\right)\right) \tag{8}$$

$$\frac{h_{2S}}{\eta} = \sqrt{\frac{h_2 H_S}{h_{2S} H}}\left(1 + \alpha\eta + \alpha_1\eta^2 + \alpha_2\eta^3 + \alpha_3\eta^4 + O\left(\eta^5\right)\right) \tag{9}$$

$$\eta + \alpha\eta^2 + \alpha_1\eta^3 + \alpha_2\eta^4 + \alpha_3\eta^5 + O\left(\eta^6\right) = h_{2S}\sqrt{\frac{h_{2S} H}{h_2 H_S}} \tag{10}$$

Для условий «глубокого» шельфа в лабораторном эксперименте [2] h_{2S} = 0,05 м, h_1 = 0,10 м, H_S = 0,15 м, h_2 = 0,65 м, H = 0,75 м значение «критической» амплитуды солитона понижения по формуле (10) составит η^* = -0.072 м. Для условий «мелкого шельфа» h_{2S} = 0,015 м, h_1 = 0,10 м, H_S = 0,115 м, h_2 = 0,615 м, H = 0,715 м «критическая» амплитуда сильнонелинейного солитона понижения по формуле (10) составит η^* = -0.052 м. Что согласуется с данными серии экспериментов (табл. 1) для «глубокого» $\eta^*_{\text{эксп}}$ = -0.075м и «мелкого» шельфа $\eta^*_{\text{эксп}}$ = -0.055 м.

Таблица 1. Экспериментальные данные параметров полностью нелинейного солитона в зависимости от глубины нижней жидкости h_2 и высоты модели шельфа h_S [2].

a/h_1	C (m/s)	C/c_0	λ (m)	"deep-shelf" effect h_2 / h_S =1.083	"shallow-shelf" effect h_2 / h_S =1.025
0.35	0.154	1.12	0.633	-	-
0.45	0.159	1.15	0.596	-	-
0.55	0.162	1.18	0.575	-	-
0.65	0.166	1.21	0.564	-	+
0.75	0.169	1.23	0.559	+	+
0.85	0.172	1.26	0.559	+	+
0.95	0.175	1.28	0.563	+	+
1.05	0.178	1.30	0.570	+	-
1.15	0.181	1.3148	0.58	-	-

Литература

4. Шишкина О.Д. Определение условий трехмерной трансформации нелинейных внутренних волн по типу «мелкого» и «глубокого» шельфа: теория, натурные наблюдения, эксперимент // Тр. конф. 2016. С.177-180.
5. Shishkina O.D., Sveen J.K., Grue J. Transformation of internal solitary waves at the “deep” and shallow” shelf: satellite observations and laboratory experiment // Nonlinear Proc. Geoph. 2013. V.20, N 5. P.743-757. DOI: 10.5194/npg-20-743-2013.
6. Shay L.K., Cook T.M., An P.E. Submesoscale coastal ocean flows detected by very high frequency radar and autonomous underwater vehicles // J. Atmos. Oceanogr. Tech. 2003. V.20. P.1583-1600.
7. https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
8. Tsimplis M. N. Vertical structure of tidal currents over Camarinal Sill at the Strait of Gibraltar // J. Geophys. Res. 2000. V.105. P.19,709-19,728.
9. Морозов Е.Г., Нейман В.Г., Щербинин А.Д. Внутренний прилив в проливе Карские ворота // ДАН. 2003. Т.393, N 5. С.688-690.
10. Лисицын А.П. Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001.
11. Slunyaev A., Pelinovsky E., Poloukhina O., Gavrilyuk S. The Gardner equation as the model for long internal waves // Proc. Int. Symp. “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”. 2003. P.368–369.

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ВЫСОТ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РОССИЙСКИХ МОРЯХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.В.Зимин[1], д-р геогр.наук, А.А.Родионов[1], д-р техн.наук, Е.И.Свергун[1,2]
[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[2]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

ESTIMATION OF INTERNAL WAVES EXPECTED HEIGHT IN RUSSIAN SEAS ACCORDING TO EXPEDITION RESEARCH DATA

A.V.Zimin[1], Dr.Sc., A.A.Rodionov[1], Dr.Sc., E.I.Svergun[1,2]
[1]P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia
[2]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

В работе производится обобщение сведений о зарегистрированных в ходе экспедиционных исследований высотах внутренних волн и оценок ожидаемых высот внутренних волн. Показано, что в районе Западной Соловецкой Салмы в Белом море и близ мыса Свободный в Охотском море регистрируются интенсивные внутренние волны (высотой 18 и 11 метров соответственно). Оценки ожидаемых высот внутренних волн показывают, что в этих районах ожидаются волны большой высоты (32 и 17 метров соответственно).Учитывая малую глубину места в этих районах (около 60 метров), следует ожидать генерации интенсивных придонных течений, что делает опасным хозяйственное использование шельфа в данных районах моря. Также в Баренцевом море, севернее острова Харлов, ожидается интенсивная внутренняя волна высотой 13 метров. Во всех остальных исследуемых районах Черного, Охотского и Баренцева моря интенсивные внутренние волны не ожидаются и не наблюдаются.

The work is a compilation of information about registered in the expedition research heights of the internal waves and estimates of the expected internal wave heights. It is shown that in the Zapadnaya Solovetskaya Salma in the White Sea and near Svobodny cape in the sea of Okhotsk intensive internal waves (with a height of 18 and 11 meters, respectively) are recorded. Estimate of the expected heights of the internal waves show that in these areas great waves (32 and 17 meters height, respectively) are expected. Taking into consideration the shallow depth in this area (about 60 meters), one should expect generation of intense near-bottom currents, making hazardous the use of the shelf in these areas. Also in the Barents Sea, North of the Kharlov island, intense internal wave of 13 meters height is expected. In all other investigated regions of the Black, Okhotsk, Barents Sea intensive internal waves are not expected and not observed.

На протяжении нескольких лет Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводит экспедиционные исследования в Белом, Баренцевом, Черном и Охотском морях. Несмотря на существенные различия гидрологического режима указанных морей, общей чертой для них является наличие короткопериодного внутреннего волнения. Короткопериодные внутренние волны зачастую могут иметь высоту более 10 метров и сильную нелинейность [1]. Подобные внутренние волны называются интенсивными. Такие внутренние волны оказывают влияние на локальные гидрофизические условия, управляемость подводных аппаратов [2] и на безопасность морских гидротехнических сооружений [3]. Это делает проблему изучения закономерностей появления интенсивных внутренних волн весьма актуальной.

Цель данной работы – обобщить сведения о наблюдаемых и ожидаемых высотах внутренних волн по данным экспедиционных исследований 2010 – 2017 годов.

В качестве *исходных данных* в работе используются записи колебаний температуры в области термоклина высокого разрешения по данным экспедиционных исследований на полигонах в Белом море (июль 2010 года, Западная Соловецкая Салма, июль 2012 года, пролив Горло, июль 2014 года, Двинской залив, сканирование CTD-зондом CTD-90M), в Баренцевом море в августе 2016 года (Севернее мыса Харлова, сканирование CTD-зондом SBE 25) и в августе 2017 года (Севернее мыса Териберский, измерения гирляндой термисторов РМЕ), в Черном море (июнь 2016 года, южнее Феодосии, измерения гирляндой термисторов РМЕ), в Охотском море (сентябрь 2017 года, Восточнее мыса Свободный в шельфовой зоне Сахалина и над Курильской котловиной, измерения гирляндой термисторов РМЕ). Совпадение термоклина и пикноклина в исследуемых морях в летний период позволяет по записям колебаний температуры оценивать высоты и периоды внутренних волн по *методике*, указанной в [4]. Оценка ожидаемых высот внутренних волн выполнена в соответствии с методикой, предложенной в [5]. Оценки выполнены для периодов времени 1 месяц (30 дней) и 1 сезон (90 дней). По результатам обработки данных экспедиционных исследований составлена сводная табл. 1, в которой показаны основные характеристики зарегистрированных внутренних волн.

Анализ результатов экспедиционных исследований позволяет сделать вывод о том, что на полигонах в Черном, Баренцевом и Охотском морях (над Курильской котловиной)

интенсивные внутренние волны *не зарегистрированы*. В Белом и Охотском морях (в шельфовой зоне Сахалина) в 5-10% случаев наблюдаются интенсивные внутренние волны.

Таблица 1. Сводные характеристики внутренних волн, зарегистрированных в ходе экспедиционных исследований 2010 – 2017 годов

Район (год)	Высота внутренних волн, м			Количество волн наибольшей повторяемости, %
	Средняя	Максимальная	Наибольшей повторяемости	
Белое море, Западная Соловецкая Салма (2010)	6	**18**	2÷2,5	20
Белое море, пролив Горло (2012)	2,5	8	2÷2,5	35
Белое море, Двинской залив (2014)	2	7	2÷2,5	30
Черное море (2016)	2	4	1÷1,5	40
Баренцево море, севернее м. Харлова (2016)	3	8	2÷2,5	35
Баренцево море, севернее Териберки (2017)	2	5	1÷2	60
Охотское море, над Курильской котловиной (2017)	2	7	1÷2	50
Охотское море, около мыса Свободный (2017)	3	**11**	1÷2	40

В табл. 2 показаны результаты оценок ожидаемых высот внутренних волн в исследуемых морях. По-видимому, самыми опасными для хозяйственной деятельности акваториями является Западная Соловецкая Салма в Белом море и район шельфа Сахалина близ мыса Свободный в Охотском море. Ввиду того, что глубина места в указанных районах составляет около 60 метров, появление интенсивной внутренней волны приведет к генерации интенсивных придонных течений [3]. Однако стоит отметить, что методика оценки ожидаемой высоты внутренних волн не учитывает изменчивости волнообразующих факторов, что может приводить к несоответствию ожидаемых и реально наблюдаемых высот внутренних волн. Необходимы более длительные натурные наблюдения для проверки полученных оценок, а также, при необходимости, совершенствование используемой методики.

Таблица 2. Ожидаемые за месяц и за теплый период высоты внутренних волн

Район (год)	Ожидаемая за месяц высота внутренних волн, м	Ожидаемая за теплый период высота внутренних волн, м
Черное море (2016)	5	6
Белое море, Западная Соловецкая Салма (2010)	**28**	**32**
Белое море, пролив Горло (2012)	8	9
Белое море, Двинской залив (2014)	**11**	**12**
Баренцево море, севернее Харлова (2016)	10	**13**
Баренцево море, севернее Териберки (2017)	8	9
Охотское море, над Курильской котловиной (2017)	**15**	**17**
Охотское море, около мыса Свободный (2017)	9	**10**

Оценки характеристик внутренних волн в Баренцевом море выполнены в рамках гранта РФФИ (проект № 18-05-00965-А). Описание характеристик волн в Белом, Охотском и Черном морях выполнены в рамках государственного задания по теме № 0149-2018-0014.

Литература

1. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. Интенсивные внутренние волны в Мировом Океане. // Океанология. 2004. Т.44, №6. С.805-810.
2. Разуменко. Ю., Родионов А., Шевяков М. К вопросу об эксплуатации подводных лодок в различных гидрологических условиях // Морской сборник. 2016. Т. 2. № 4. С. 40-46.
3. Тюгин Д.Ю., Наумов А.А., Куркина О.Е., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Динамические эффекты в придонном слое, индуцированные аномальными внутренними волнами // Экологические системы и приборы. 2014. № 1. С. 20-28.
4. Свергун Е.И., Зимин А.В. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т.10, № 2. С. 13 – 19.
5. Талипова, Т.Г. Статистика и прогноз интенсивных внутренних волн // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. 1999. Т.1. С. 204-219.

НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ РОССИИ

А.А.Куркин[1], д-р физ-мат.наук, О.Е.Куркина[1], канд.физ-мат.наук, Е.А.Рувинская[1], канд.физ-мат.наук, А.И.Зайцев[1,2], канд.физ-мат.наук, П.В.Лобовиков[1], А.А.Король[1], А.Р.Гиниятуллин[1], канд.физ-мат.наук
[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия
[2]СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

OBSERVATIONS, MODELING AND ANALYSIS OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE FAR EASTERN SEAS OF RUSSIA

A.A.Kurkin[1], Dr.Sc., O.E.Kurkina[1], Ph.D., E.A.Rouvinskaya[1], Ph.D., A.I.Zaytsev[1,2], Ph.D., P.V.Lobovikov[1], A.A.Korol[1], A.R.Giniyatullin[1], Ph.D.
[1]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia
[1]Special Research Bureau for Automation of Marine Researches FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Дан краткий обзор современного состояния изученности внутренних волн в дальневосточных морях России. Приведены данные их разнообразных наблюдений в Беринговом, Охотском, Японском морях и на тихоокеанском шельфе. Представлены гидродинамические модели описания внутренних волн, построены карты кинематических и нелинейных параметров внутренних волн первой и второй моды в рамках рассмотренных моделей и приведены результаты расчетов генерации и трансформации интенсивных локализованных неизлучающих внутренних волновых образований в указанном регионе с учетом реальной (переменной) гидрологии, а также оценки их воздействия на подводные гидротехнические конструкции.

A brief overview of the studies of the internal waves' investigations in the Far Eastern seas of Russia is given. The data of their various observations in the Bering Sea, the Sea of Okhotsk, the Sea of Japan and the Pacific shelf are presented. Hydrodynamic models for modeling of internal waves are described, maps of kinematic and nonlinear parameters of internal waves of the first and second modes are constructed within the framework of the considered models, and the results of calculations of generation and transformation of intensive localized non-radiating internal wave formations in the indicated region, taking into account real (variable) hydrology are shown. The impact of such waves on underwater hydraulic structures is estimated.

Внутренние волны играют особую роль в функционировании экосистемы морей и океанов. Они способствуют перемешиванию водных масс, индуцируют процессы ресуспендирования и транспорта донных отложений [1], а также влияют на распределение питательных веществ, и, следовательно, на биологическую продуктивность морей [2]. Распространение и обрушение внутренних волн часто способствует образованию сильных течений, которые представляют собой серьезную опасность для подводных частей гидротехнических конструкций (см., например, [3]). Присутствие внутренних волн изменяет локальное поле плотности и, следовательно, режимы распространения акустических волн через водные массы [4, 5].

Основной механизм генерации внутренних волн – взаимодействие приливной волны с неровным дном – наиболее ярко проявляется в шельфовой зоне окраинных морей, способствуя формированию интенсивных солитоноподобных образований. Об этом свидетельствуют данные многочисленных спутниковых наблюдений таких волновых структур, в том числе в исследуемом дальневосточном регионе [6]. Процессы активной генерации внутренних волн в Охотском, Японском и Беринговом морях также подтверждаются данными натурных наблюдений. Так для шельфовой области Охотского моря на основе экспериментальных данных в работах [7, 8] показано, что генерирующиеся солитоны внутренних волн могут иметь амплитуды от 5 до 15 м и длину порядка 200-400 м. Интенсивные короткопериодные волны, образующиеся при трансформации бароклинной приливной волны на границе шельфа, зафиксированы также на записях гидрофизических полей, сделанных в Японском море (см., например, [9, 10]). Отмечается, что внутренний прилив на типичном для шельфа Японского моря резком термоклине имеет амплитуду колебаний порядка 10 м и длину около 15-20 км (в изучаемом районе). Эта волна трансформируется над неровным дном в последовательность короткопериодных внутренних волн, которые при подходе к мелководью (однородной по плотности среде – зоне внутреннего прибоя) разрушаются, диссипируя свою энергию через мелкомасштабную турбулентность. В придонном слое резко возрастают вертикальные пульсации скорости, энергия горизонтальных компонент скорости и горизонтальные потоки импульса. Все это способствует эффективному перемешиванию вод и повышает продуктивность биоты, влияет на морфологические изменения дна. Интересным проявлением, предположительно, активной динамики внутренних волн являются песчаные дюны, наблюдаемые на дне в районе Наваринского каньона в Беринговом море [11].

Таким образом, сложно переоценить роль внутренних волн в гидрофизических, биологических, экологических, морфологических и геофизические процессах в шельфовой зоне дальневосточных морей России. Но несмотря на активную хозяйственную деятельность человека в этом регионе, которая связана и с разработкой месторождений углеводородов (Охотское море), и с промыслом рыбы и морепродуктов, внутренние волны по-прежнему остаются недостаточно изученным явлением.

Гидродинамические модели описания внутренних волн. В настоящее время решение большинства задач механики жидкости сводится к прямому численному интегрированию систем уравнений Навье – Стокса или Эйлера с использованием специального программного обеспечения. Существует достаточно большое количество программных комплексов, реализующих эту процедуру, однако, их использование для решения конкретных задач не является тривиальным: необходима адаптация этих программных продуктов под задачи исследования. Для моделирования динамики внутренних волн мы используем программный комплекс IGW Research для численного интегрирования полнонелинейной двумерной (вертикальная плоскость) системы уравнений гидродинамики невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска с учетом генерирующего воздействия баротропного прилива и вращения Земли [12]. Еще один класс моделей основан на применении слабонелинейных эволюционных уравнений КдВ (Кортевега-де Вриза) семейства. Для горизонтально неоднородной среды чаще всего используется уравнение Гарднера с переменными коэффициентами (см., например, [13]). Уравнения этого класса содержат определяемые через параметры среды коэффициенты при нелинейных и дисперсионных членах, анализ которых позволяет выявлять влияние отдельных факторов на формирование специфических свойств и форм нелинейных волновых движений. Этот подход также нашел отражение в программном комплексе IGW Research, разработанном в нашей лаборатории.

Карты кинематических и нелинейных параметров внутренних волн первой и второй моды для дальневосточных морей России. Для разработки карт кинематических и нелинейных характеристик (в рамках слабонелинейных моделей) поля внутренних волн, играющих ту же роль, что и батиметрические карты поверхностных волн, были использованы данные из международного климатического атласа GDEM (Generalized Digital Environment Model) v. 3.0, которые представляют из себя усредненные по месяцам данные о температуре и солености для 77 уровней по глубине и с горизонтальным разрешением в 1/2º для океана и 1/6º для большинства окраинных морей. Вертикальная структура поля внутренних волн и зависящие от нее коэффициенты уравнения Гарднера определяются решением краевых задач и легко рассчитывается численно по вертикальным профилям плотности. В работе [14] представлены карты кинематических и нелинейных параметров внутренних волн низшей моды для Охотского моря. На рис. 1 представлены коэффициенты уравнения Гарднера для внутренних волн второй моды для летнего сезона (карты для зимнего сезона доступны по запросу). Чередование областей положительных и отрицательных значений коэффициентов квадратичной и кубической нелинейности свидетельствует о большом разнообразии волновых режимов для внутренних волн второй моды. Стоит также отметить, что ближе к береговой зоне коэффициент кубической нелинейности в Японском и Охотском море имеет преимущественно отрицательные значения, что теоретически исключает возможность генерации бризеров второй моды в этих областях шельфовой зоны изучаемых морей.

Трансформация бароклинной приливной волны вдоль вертикального разреза в Охотском море. Для расчетов трансформации бароклинной приливной волны вдоль вертикального разреза длиной 150 км в Охотском море (зона проекта Сахалин 5) нами используется модель, основанная на уравнении Гарднера с переменными коэффициентами (для низшей моды). Подробное описание модели можно найти, например, в работе [15]. Гидрологические данные для расчетов взяты из атласа GDEM V 3.0 для июля и января. На рис. 2 представлена карта шельфовой зоны о. Сахалин с расположением разреза и пространственно-временная диаграмма процесса трансформации полусуточной приливной волны для июля.

Как видно из рис. 2, трансформация бароклинной приливной волны на шельфе – это сложный волновой процесс, сопровождающийся появлением солибора, на котором генерируются солитоны с амплитудами, в несколько раз превышающими амплитуду исходной волны. Стоит отметить, что на всем протяжении трассы коэффициент кубической нелинейности в июле положителен, а коэффициент квадратичной нелинейности отрицателен,

поэтому возможно существование солитонов как положительной, так и отрицательной полярности. В процессе трансформации солибора формируется сложное поле течений, индуцированных внутренними волнами, которое может быть использовано, например, для расчета нагрузок на подводные части гидротехнических сооружений. Для расчета динамических нагрузок, действующих на вертикальные цилиндрические опоры на левой границе разреза (у берега), использовалась формула Морисона. В рассматриваемом случае изгибающий момент в середине приливного цикла достигает значений порядка $2 \cdot 10^6$ Н·м.

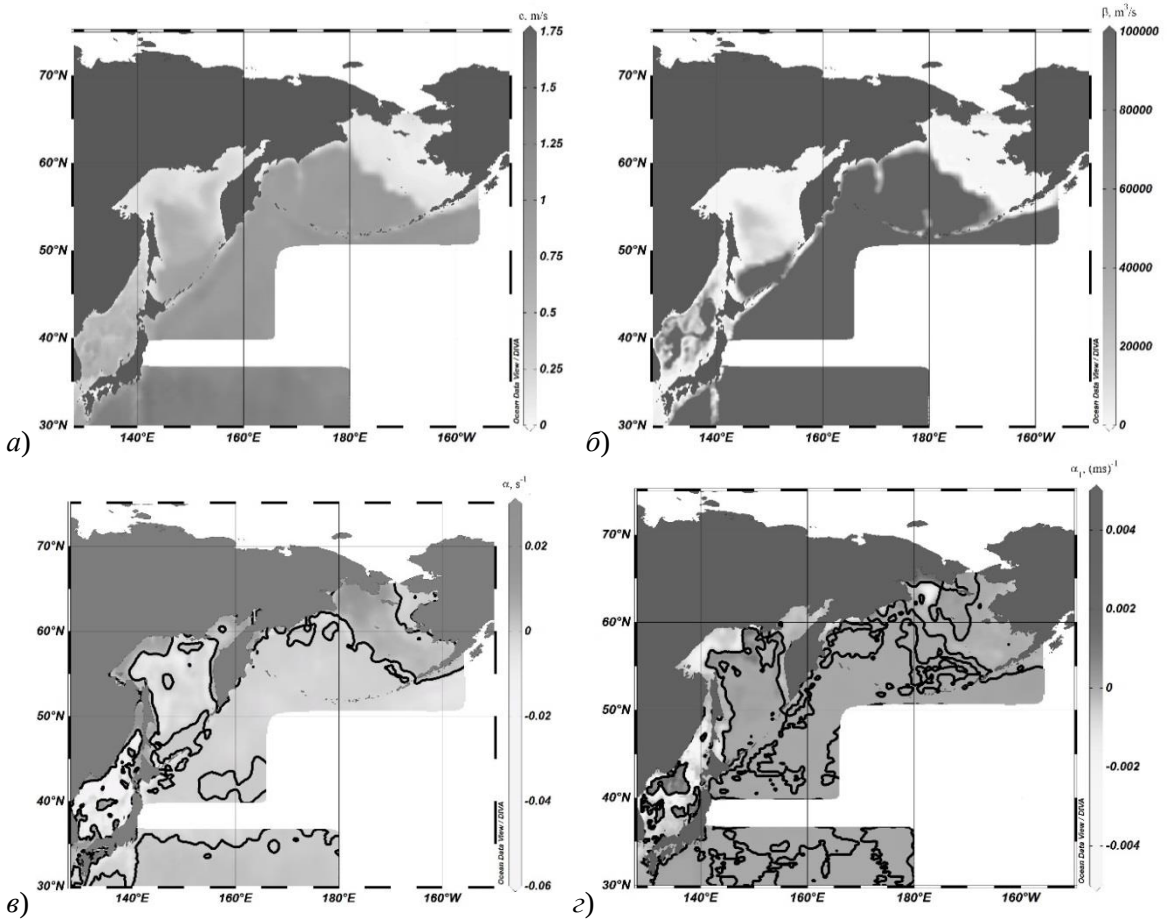


Рис. 1. *а* – карта фазовой скорости длинных линейных волн второй моды (*c*); *б* – карта коэффициента дисперсии (β); *в* – карта коэффициента квадратичной нелинейности (α); *г* – карта коэффициента кубической нелинейности (α_1) в уравнении Гарднера для внутренних волн второй моды для летнего сезона (июль) на основе данных GDEM.

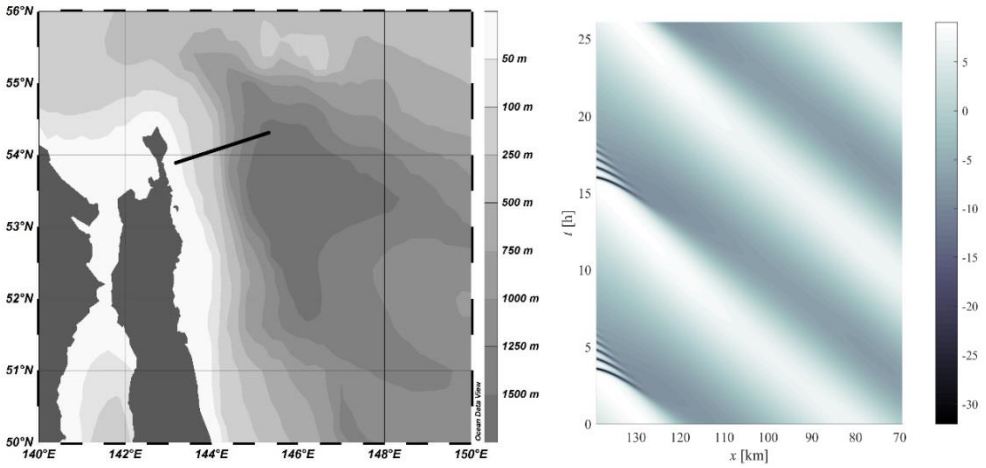


Рис. 2. Карта с расположением разреза (слева) и пространственно-временная диаграмма процесса трансформации бароклинной приливной волны с амплитудой 6 м и периодом 12.4 ч для июля (справа).

Представленные результаты получены в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности (Задание № 5.4568.2017/6.7 и № 5.1246.2017/4.6), а также при финансовой поддержке грантов Президента РФ по государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и молодых российских ученых – кандидатов наук МК- 1124.2018.5.

Литература

1. Bourgault D., Morsilli M., Richards C., Neumeier U., Kelle D.E. Sediment resuspension and nepheloid layers induced by long internal solitary waves shoaling orthogonally on uniform slopes // Continental Shelf Research. 2014. V. 72. P. 21-33.
2. Pan X., Wong G.T. F., Shiah F.-K., Ho T.-Y. Enhancement of biological productivity by internal waves: observations in the summertime in the northern South China Sea // Journal of Oceanography. 2012. V. 68. P. 427-437.
3. Osborne A.R. Nonlinear Ocean Waves and the Inverse Scattering Transform. Elsevier, San Diego, 2010. 944 p.
4. Warn-Varnas A., Chin-Bing S.A., King D.B., Hawkins J., Lamb K. Effects on acoustics caused by ocean solitons, Part A. Oceanography // Nonlinear Analysis. 2009. V. 71. P. e1807-e1817.
5. Rutenko A.N. The influence of internal waves on losses during sound propagation on a shelf // Acoustical Physics. 2010. V. 56. P. 703-713.
6. Jackson C.R. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and Their Properties. Prepared for Office of Naval Research, Code 322 PO. Global Ocean Associates, 2004. 560 p.
7. Наговицын А.П., Пелиповский Е.Н. Наблюдения уединенных внутренних волн в прибрежной зоне Охотского моря // Метеорология и гидрология. 1988. № 4. С. 124-126.
8. Наговицын А.П., Пелиновский Е.Н., Степанянц Ю.А. Наблюдение и анализ одиночных внутренних волн в прибрежной зоне Охотского моря // Морской гидрофизический журнал. 1990. № 1. С. 54-58.
9. Navrotsky V.V., Lozovatsky J.D., Pavlova E.P., Fernando H.J.S. Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the sea of Japan (East Sea) // Continental Shelf Research. 2004. V. 24. No. 12. P. 1375-1395.
10. Novotryasov V.V., Stepanov D.V., Yaroshchuk I.O. Observations of internal undular bores on the Japan/East Sea shelf-coastal region // Ocean Dynamics. 2016. V. 66. P. 19-25.
11. Karl H.A., Carlson P.R. *Large sand waves in Navarinsky Canyon head, Bering Sea //* Geo-Marine Letters. 1982. V. 2. P. 157-162.
12. Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е. Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 3. С. 89-95.
13. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West shelf // Journal of Physical Oceanography. 1997. V. 27. P. 871-896.
14. Kurkina O.E, Talipova T.G., Soomere T., Kurkin A.A., Rybin A.V. The impact of seasonal changes in stratification on the dynamics of internal waves in the Sea of Okhotsk // *Estonian Journal of Earth Sciences.* 2017. V. **66**. Iss. 4. P. 238-255.
15. Kurkina O., Rouvinskaya E., Talipova T., Soomere T. Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2017. V. 185. P.44-54.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РЕАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ

А.А.Родионов, д-р техн.наук, А.В.Зимин, д-р геогр.наук, Д.А.Никитин, канд.техн.наук, К.Б.Филин
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия

MODEL STUDIES OF THE INFLUENCE OF RADIATOR DIRECTIVITY ON THE FORMATION OF THE TRANSDUCER SONAR FIELD IN REAL WAVE-GUIDE WITH INTERNAL WAVES

A.A.Rodionov, Dr.Sc., A.V.Zimin, Dr.Sc., D.A.Nikitin, Ph.D., K.B.Filin
P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Задается волновод с двумерным распределением гидрофизических полей, полученным по результатам натурных измерений. Моделируется цуг внутренних волн, распространяющийся в этом волноводе. На основе лучевой методики осуществляется расчет уровней гидроакустических полей, формируемых в волноводе направленным излучателем. Исследуется влияние направленности излучателя на результат формирования гидроакустических полей в волноводе с внутренними волнами.

The waveguide is set with two-dimensional distribution of hydrophysical fields obtained from in situ measurements. A train of internal waves propagating in the waveguide is simulated. Radiation-based methods are used for calculation of levels of hydroacoustic fields generated in waveguide by directional radiator. Influence of transducer directivity on the formation of acoustic fields in the wave-guide with internal waves is investigated.

Исследования характеристик короткопериодных внутренних волн (КВВ) имеет важное значение для науки и практики. Дистанционно зондирование КВВ можно проводить с привлечением гидроакустических средств, в том числе с использованием просветного метода, при котором формируется акустическая трасса между излучателем и приемной системой. В случае прохождения внутренней волны между излучателем и приемной антенной происходят локальные нарушения условий распространения сигналов, что в свою очередь приводит к изменению пространственно-энергетических характеристик гидроакустического поля в соответствии с амплитудой, длиной и скоростью распространения внутренней волны. При распространении гидроакустических волн, особенно в мелководных районах они испытывают рефракцию, отражения от дна и поверхности. В результате формируется сложная интерференционная структура акустического поля. В этих условиях затрудняется анализ характеристик гидродинамических процессов, влияющих на изменения принимаемых гидроакустических сигналов. Работа посвящена исследованию влияния направленных свойств излучателя просветной системы на формирование акустического поля в волноводе с распространяющейся внутренней волной.

Модель внутренней волны. При произвольной стратификации океана, если не учитывать инерционную частоту и незначительные волны на морской поверхности, распределение амплитуды внутренней волны по глубине может быть найдено путем решения уравнения [1]:

$$\frac{d^2W}{dz^2}V + [N^2(z) - \omega^2]W = 0; \qquad (1)$$

с граничными условиями: $W = \{0 \text{ при } z = 0; H,$ где W – амплитуда вертикального смещения во внутренней волне, м; z – текущая глубина, м; V – скорость распространения внутренней волны в горизонтальной плоскости, м/с; N – частота Вяйсяля, рад/с; ω – круговая частота внутренней волны, рад/с; H – глубина моря, м.

Решение уравнения (1) может быть получено численно методом конечных разностей. Скорость V и частота ω могут быть оценены в простых случаях аналитически [2]. В стратифицированной среде при неглубоком залегании скачка плотности скорость распространения внутренних волн рассчитывается по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{k(\rho_0 \operatorname{cth} kh_0 + \rho_1 \operatorname{cth} kh_1)}}, \qquad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\Delta\rho$ – разность плотностей нижнего и верхнего слоев, кг/м^3; k – волновое число, рад/м; ρ_0, ρ_1 – плотности нижнего и верхнего слоев соответственно, кг/м^3; h_0, h_1 – толщины нижнего и верхнего слоев соответственно, м;

В работе рассматривается плоская задача. В качестве модели КВВ принят цуг внутренних волн с нормированной огибающей. В системе координат, связанных с цугом, огибающая имеет вид:

$$A(x) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-x_1}{X}\right)^2}, & x = x_0 \dots x_1 \\ 1, & x = x_1 \dots x_2, \\ e^{-\left(\frac{x-x_2}{X}\right)^2}, & x = x_2 \dots x_3 \end{cases} \quad (3)$$

где x_0 – начало переднего фронта цуга внутренних волн, м; x_1 – окончание переднего фронта цуга, м; x_2 – начало заднего фронта цуга, м; x_3 – окончание заднего фронта цуга, м; X – нормирующий делитель, м.

Смещения частиц жидкости в фиксированный момент времени подчиняются выражению:

$$\zeta(x,z) = Z \cdot A(x) \cdot W(z) \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где Z – максимальная амплитуда вертикального смещения во внутренней волне, м.

На рис. 1 показаны нормированная огибающая цуга внутренних волн $A(x)$ и смещения частиц жидкости $\zeta(x)$ относительно горизонта скачка плотности. Смоделированный цуг внутренних волн перемещается в горизонтальной плоскости со скоростью V.

Модель канала распространения гидроакустических сигналов. В августе 2017 г. при проведении натурных экспериментов получены вертикальные распределения гидрофизических полей (температуры, солености) в нескольких точках Баренцева моря, по которым рассчитаны вертикальные распределения скорости звука (рис. 2) (на рисунке приведены распределения в трех различных точках в районе гидроакустической трассы) плотности и частоты Вяйсяля (рис. 3). В соответствии с выражением (3) оценена скорость распространения внутренних волн с длиной волны 150 м, которая составила 0,36 м/с; ее период – 7 мин, а круговая частота – 54 рад/ч. На основе экспериментальных и расчетных данных путем численного решения уравнения (1) получено вертикальное распределение нормированной амплитуды внутренней волны (рис. 4).

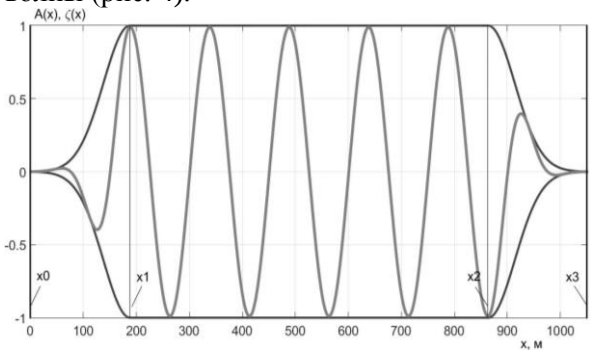


Рис. 1. Модель цуга внутренних волн.

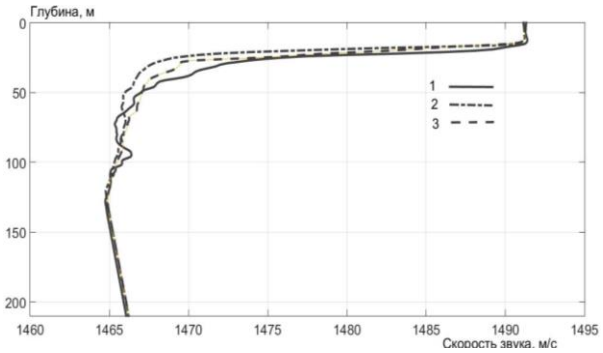


Рис. 2. Вертикальные распределения скорости звука в трех станциях в Баренцевом море; август 2017 г.

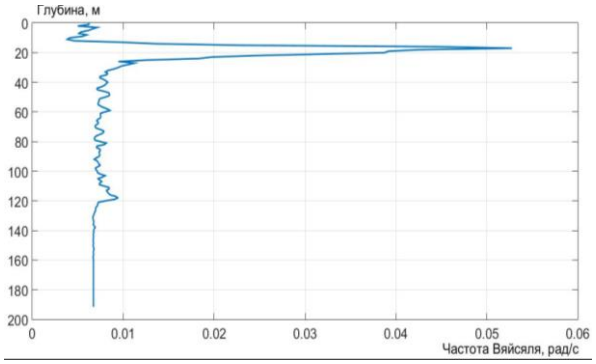


Рис. 3. Вертикальное распределение частоты Вяйсяля по экспериментальным данным.

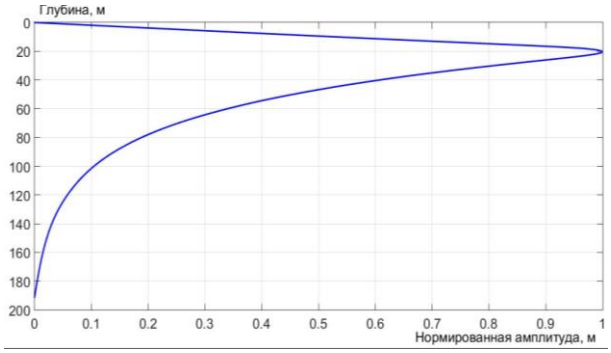


Рис. 4. Вертикальное распределение нормированной амплитуды вертикального смещения во внутренней волне, рассчитанное по экспериментальным данным.

Для тех же условий построены двумерные модели цуга внутренних волн в полях температуры и солености, по которым произведен расчет двумерного распределения скорости звука (рис. 5, см. вклейку).

Модельные эксперименты по формированию гидроакустического поля от излучателей различной направленности в волноводе с внутренней волной. На основе лучевой модели распространения гидроакустических сигналов [3] проведены расчеты акустических полей, сформировавшихся в волноводе от излучателей: ненаправленного; многоэлементного дискретного с равномерным распределением амплитуды и идеального, у которого характеристика направленности в пределах основного лепестка равна единице, а в остальных направлениях – нулю. При использовании ненаправленного излучателя изменения акустических полей (рис. 6, см. вклейку) слабо заметны; использование направленных излучателей приводит к лучшим результатам. На рис. 7 (см. вклейку) представлено двумерное распределение уровней акустических полей, создаваемых многоэлементным дискретным излучателем. Боковые лепестки характеристики направленности излучателя существенно влияют на формирование сложной интерференционной структуры акустического поля. На рис. 8 (см. вклейку) приведено двухмерное распределение уровней акустических полей от идеального излучателя.

Анализ рис. 8 показывает, что использование идеального излучателя существенно снижает размеры областей пространства, в которых проявляется интерференция, а это повышает эффективность оценки характеристик внутренних волн просветным методом. На рис. 9 (см. вклейку) показаны изменения во времени уровней акустических полей на глубине 120 м. На расстояниях 3500…4500 м и 5000…6000 м от излучателя видны периодические максимумы и минимумы уровней сигналов, связанные с воздействием внутренней волны. На рис.10 (см. вклейку) отображены временные изменения уровней акустических полей на расстоянии 3500 м от излучателя. По полученным периодическим структурам может быть восстановлена основная характеристика внутренней волны – ее период. Зная вертикальное распределение плотности воды может быть рассчитана скорость внутренней волны и ее длина. Наиболее близким к идеальному излучателю является параметрический излучатель [4], имеющий узкую характеристику направленности без боковых лепестков.

Выводы. Проведено моделирование формирования гидроакустических полей в реальном мелководном волноводе для трех типов излучателей. Использование ненаправленного излучателя не позволяет уверенно регистрировать изменения акустических полей, вызванные влиянием внутренних волн. Боковые лепестки характеристики направленности многоэлементного направленного излучателя приводят к интерференции, что затрудняет, хотя и в меньшей степени, чем для ненаправленного излучателя регистрацию изменений акустических полей. Наиболее эффективен для дистанционного исследования короткопериодных внутренних волн идеальный излучатель, близким аналогом которого может выступать узконаправленный параметрический излучатель. Периодические изменения уровней акустических полей во времени от идеального излучателя позволяют оценивать основные характеристики исследуемых внутренних волн.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0014) и исследований по заказу Фонда перспективных исследований.

Литература

1. Внутренние волны. Сб. – М.: Мир, 1964.
2. Родионов А. А. Основы гидрофизики океана. – СПб.: ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1994.
3. Зимин А. В., Никитин Д. А., Родионов А. А., Филин К. Б. Моделирование прохождения узкополосных гидроакустических импульсов через внутренние волны, генерируемые приливными процессами в шельфовом районе Белого моря // Тр. XII Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История. 2014. С. 202-205.
4. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. С. 103.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОЛНЫ КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ

С.И.Перегудин, д-р физ-мат.наук, Э.С.Перегудина[1], С.Е.Холодова[2], канд.физ-мат.наук
Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
[1]Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия

THE INFLUENCE OF CHANGES IN MAGNETIC FIELD ON FINITE-AMPLITUDE WAVE

S.I.Peregudin, Dr.Sc., E.S.Peregudina[1], S.E.Kholodova[2], Ph.D.
Saint Petersburg State University, Russia
[1]National Mineral Resources University (Mining university), St. Petersburg, Russia
[2]National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Рассматриваются крупномасштабные нелинейные колебания электропроводной идеальной жидкости переменной глубины с учетом магнитной, архимедовой, кориолисовой сил и диффузии магнитного поля. Исследуемая задача представляется в трехмерном варианте. При этом гидромагнитное давление аппроксимируется в виде линейной функции, зависящей от глубины слоя. В результате моделирования именно таким образом, исследуемый динамический процесс представляет собой нелинейную краевую задачу для горизонтальных компонент скорости и магнитного поля, и функции, описывающей нижнюю подвижную поверхность слоя. Вывод основных уравнений производится с использованием анализа масштабов квазигеострофических движений. В результате предположения для чисел Россби, являющихся мерой отношения локального и адвективного ускорений к ускорению Кориолиса, об одном порядке, задача трансформируется к решению системы трех нелинейных уравнений для гидромагнитного давления и для двух функций, описывающих магнитное поле. В случае бесконечно протяженной по горизонтали электропроводной вращающейся жидкости в предположении примерного постоянства наклона поверхности, ограничивающей слой сверху, на расстоянии порядка длины волны получено точное решение системы соответствующих нелинейных уравнений и дисперсионное соотношение. В вещественной форме представлены основные характеристики исследуемого динамического процесса.

Large-scale nonlinear oscillations of an electrically conductive ideal fluid of variable depth are considered taking into account magnetic, Archimedes, Coriolis forces and diffusion of the magnetic field. The problem under investigation is presented in three-dimensional form. In this case, the hydromagnetic pressure is approximated as a linear function, depending on the depth of the layer. As a result of modeling in this way, the dynamic process under study is a nonlinear boundary value problem for horizontal velocity and magnetic field components, and a function describing the lower moving surface of the layer. The derivation of the basic equations is carried out using the analysis of the scales of quasi-geostrophic motions. As a result, assumptions for Rossby numbers, which are a measure of the ratio of local and advective accelerations to Coriolis acceleration, about one order, the problem is transformed to the solution of a system of three nonlinear equations for the hydromagnetic pressure and for two functions describing the magnetic field. In the case of an infinitely extended electrically conductive rotating liquid, assuming an approximate constancy of the slope of the surface bounding the layer from above, a precise solution of the system of the corresponding nonlinear equations and the dispersion relation are obtained at a distance of the order of the wavelength. In the real form, the main characteristics of the dynamic process under study are presented.

В представленном исследовании производится реализация построения аналитических решений задачи о крупномасштабных движениях с учетом геострофичности электропроводящей вращающейся жидкости. Данная задача с достаточностью степенью достоверности может моделировать волновые движения в жидком слое, ограниченном поверхностями, изменяющимися в пространстве и во времени.

В постановке задачи используется прямоугольная декартова система координат $Oxyz$. Под объемной силой понимается вектор $\mathbf{g}$, перпендикулярный поверхности $z=0$ и направленный в сторону, противоположную вертикальной оси. Ось вращения жидкости совпадает с осью z, т.е. $\boldsymbol{\omega}=\mathbf{k}\omega$, где $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость вращения Земли.

Рассматривается вращающийся слой электропроводной идеальной несжимаемой жидкости, ограниченной сверху твердой непроницаемой поверхностью $z=-Z(x,y)$, снизу — неизвестной поверхностью $z=-h_B(x,y,t)$. Система уравнений для описания движения невязкой электропроводящей несжимаемой вращающейся с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$ жидкости в магнитной гидродинамике в переменных Эйлера имеет вид [1]

$$\operatorname{div}\mathbf{v}=0,\qquad \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t}+(\mathbf{v},\nabla)\mathbf{v}=-\frac{\nabla p}{\rho}-2[\boldsymbol{\varpi},\mathbf{v}]-g\mathbf{z}+\frac{1}{\mu\rho}[\operatorname{rot}\mathbf{b},\mathbf{b}],$$

$$\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}=\operatorname{rot}[\mathbf{v},\mathbf{b}]+\frac{1}{\sigma\mu}\Delta\mathbf{b},\ \operatorname{div}\mathbf{b}=0,$$

где v_x, v_y, v_z - компоненты скорости жидкости, p - давление, $\mathbf{g}$ - ускорение силы тяжести, ρ - плотность, b_x, b_y, b_z - компоненты магнитной индукции поля, μ - магнитная проницаемость, σ - электропроводность среды, ϖ - угловая скорость вращения слоя, $\mathbf{b}$ - вектор магнитной индукции, $\frac{1}{\sigma\mu} = \lambda$ — коэффициент магнитной диффузии. Предполагается, что магнитная проницаемость μ и электропроводность σ постоянны.

Системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающие исследуемые физические явления, являются нелинейными, неавтономными и имеют большую размерность. Построение аналитических, в частности, точных решений возможно только для отдельных частных случаев. В общем случае исходную систему следует аппроксимировать более простой системой, с достаточность степенью достоверности описывающей свойства решений исходной системы.

При дальнейшей реализации исследуемой задачи используется метод редукции, в результате чего удается получить одно скалярное уравнению в частных производных, качественный анализ которого позволяет сделать заключение о влиянии вращения и нелинейных эффектов диффузии магнитного поля на исследуемый волновой процесс.

Представленные исследования могут быть использованы в астрофизике и геофизике, в частности, при изучении процессов, происходящих в жидком ядре Земли и недрах звезд. Построенные решения реализуют наиболее простую модель жидкого ядра Земли в виде бесконечного в горизонтальном направлении слоя жидкости с учетом топографии мантии и твердого ядра Земли. Проведенные исследования могут быть также полезны при рассмотрении процесса самовозбуждения магнитогидродинамического динамо в относительно больших массах жидкого металла и технических устройствах, например, в технологических процессах, использующих напорные камеры реактора на быстрых нейтронах, домны, реакторы для производства титана и другие. Особую важность представляет использование сильных магнитных полей в решении проблем термоядерного синтеза и физики плазмы, физики твердого тела и ядерной физики, где сильные поля являются важными, а порой, и единственными инструментами исследований. Магнитные измерения позволяют однозначно диагностировать различные ситуации в работе реактора, в том числе, нарушения в работе насосов.

Литература

1. Холодова С.Е., Перегудин С.И. Моделирование и анализ течений и волн в жидких и сыпучих средах. СПб.: Издательство СПбГУ. 2009.

КОМПОНЕНТЫ МОРСКИХ ЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

Ю.А.Копытенко, д-р физ-мат.наук, А.А.Петрова, канд.физ-мат.наук
СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

COMPONENTS OF MARINE LINEAR MAGNETIC ANOMALIES

Yu.A.Kopytenko, Dr.Sc, A.A.Petrova, Ph.D.
SPbF IZMIRAN, St. Petersburg, Russia

На базе измеренных и расчетных данных о компонентах вектора магнитного поля Земли построена цифровая модель компонент земного шара. В статье приведены модели горизонтальной и вертикальной компоненты магнитных аномалий на примере акваторий Атлантического и Тихого океанов. Компоненты морских линейных магнитных аномалий представляют интерес для изучения строения земной коры океанов и уточнения пространственно-временного перемещения тектонических плит. Магнитные карты аномалий компонент востребованы для целей морской и воздушной магнитной навигации.

Based on the measured and calculated data on the components of the Earth's magnetic field vector, a digital model of the components of the globe is constructed. The article presents models of the horizontal and vertical components of magnetic anomalies at the example of the Atlantic and Pacific oceans. Components of marine linear magnetic anomalies are of interest for studying the structure of the Earth crust of the oceans and for clarifying the space-time displacement of tectonic plates. Magnetic component anomaly maps are in demand for the purposes of sea and air magnetic navigation.

Институт Земного магнетизма (СПбФ ИЗМИРАН) занимается исследованием пространственного распределения элементов земного магнетизма и его вековых вариаций [1–5]. По материалам аэромагнитных и гидромагнитных съемок создана пространственная модель компонент вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ) в диапазоне высот от 0 до 400 км. Компонентная модель МПЗ построена по материалам векторных съемок и расчетных значений компонент, вычисленных по измерениям модуля полного вектора индукции магнитного поля вблизи поверхности Земли. По результатам сравнения с измерениями в Мировой сети геомагнитных обсерваторий и с магнитными аномалиями, полученными по измерениям на спутнике CHAMP, получена оценка погрешностей компонентной модели [2]. Модели морских линейных аномалий горизонтальной H и вертикальной Z компоненты представляют большой интерес для изучения строения земной коры океанов и уточнения пространственно-временного перемещения тектонических плит в акваториях Атлантического и Тихого океанов.

Аномалии компонент МПЗ Северной Атлантики. Срединно-Атлантический хребет разделяет Северо-Американскую и Евразийскую плиты. Он приурочен к дивергентной границе, на которой происходит горизонтальное растяжение литосферы и раздвижение плит со скоростью 4 см в год. Рифтовая долина хребта имеет ширину ~ 50км. Картина аномалий модуля вектора МПЗ в Атлантике позволила выделить ряд типичных признаков, присущих магнитным аномалиям мировой системы океанических хребтов [6–7]. Она симметрична относительно оси хребта и представлена знакопеременными линейно-ориентированными магнитными аномалиями структурных элементов магнитоактивного слоя океанической коры (рис.1 а, б).

Характер знакопеременных магнитных аномалий срединно-океанических хребтов соответствует палеомагнитным данным. Последовательность полос прямой и обратной намагниченности пород хорошо коррелирует с геомагнитной шкалой инверсий, установленной для последних 4 млн. лет по базальтовым лавам на суше и по океаническим осадкам. Сопоставление на профилях, секущих срединный хребет, хронов идентифицированных аномалий со шкалой инверсий подтвердило гипотезу Вайна и Мэтьюза [6], что позволило им вычислить скорость расширения дна и возраст ложа океана. Предполагая, что скорость была постоянной, по полосовым аномалиям дна океана экстраполирована шкала для более ранних эпох - на десятки и сотни миллионов лет. Наиболее устойчивые положительные аномалии идентифицированы, начиная с осевой аномалии хребта. В результате по магнитным аномалиям модуля МПЗ была построена схематизированная карта возраста пород океанического дна в Северной Атлантике (рис.1 а) [6], подтвержденная позднее данными бурения.

Компоненты H и Z магнитных аномалий имеют знакопеременный и полосчатый облик и отвечают значениям вектора индукции МПЗ в моменты инверсий поля и в периодах между ними, что используется магнитной навигацией [1-3]. В процессе глобальных изменений перестройка знака и значений компонент H и Z вектора МПЗ может происходить под влиянием независимых факторов. Поэтому модели H и Z компонент магнитных аномалий [1-2] привносят дополнительную информацию о намагниченности пород дна океана и характере изменений

МПЗ в периоды инверсий, прошедших за все время разрастания срединного хребта (160 млн. лет) (рис.1, 2).

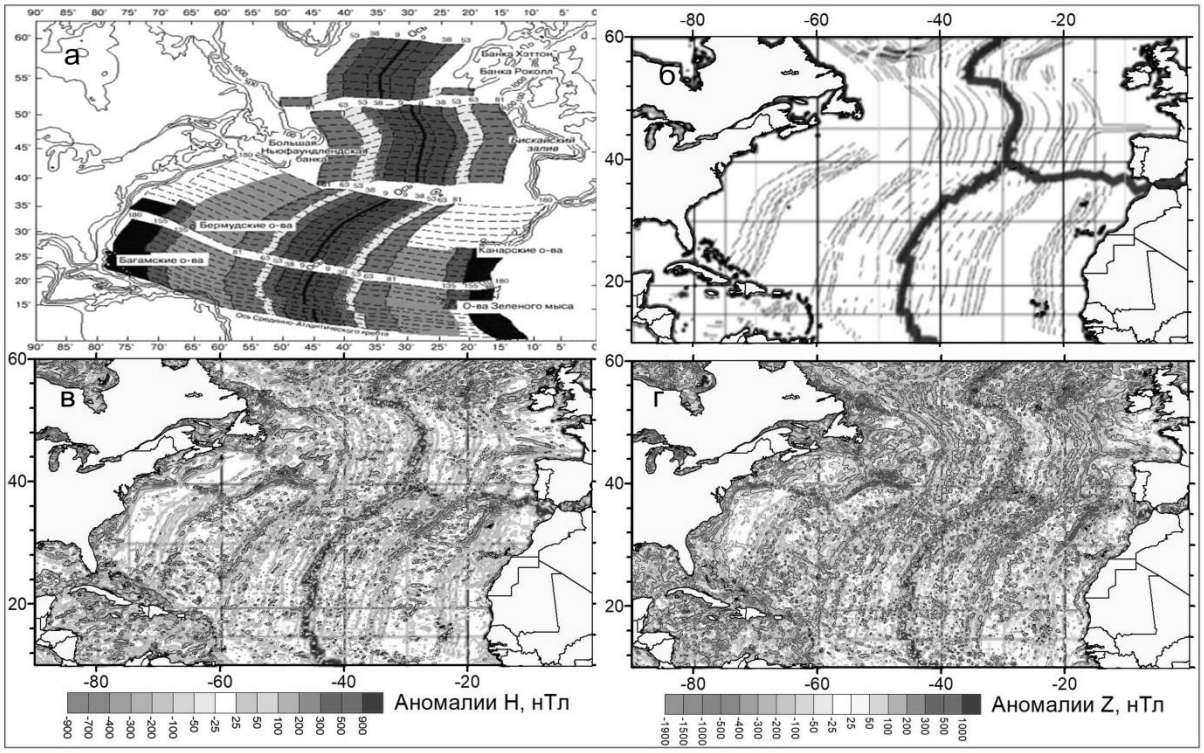


Рис. 1. Карты возраста пород дна Атлантического океана [6] (а), хронов магнитных аномалий модуля T [7] (б), аномалий горизонтальной H (в) и вертикальной Z (г) компонент [1-2] МПЗ.

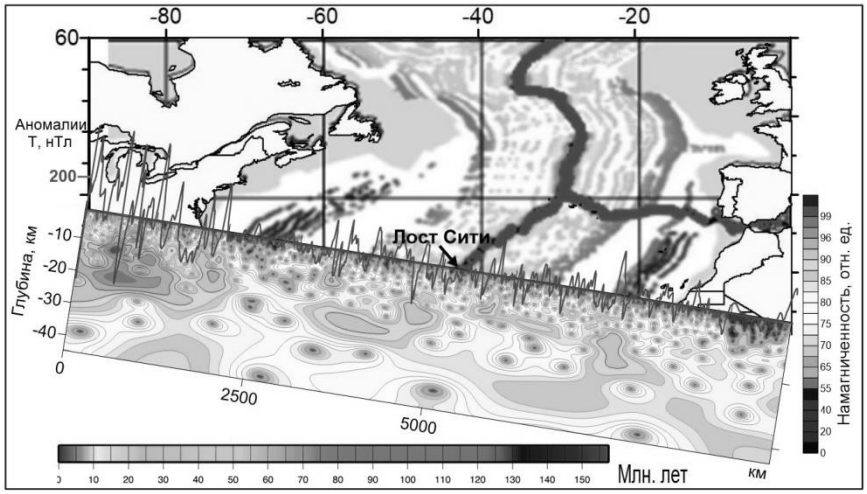


Рис. 2. Геомагнитный разрез через магнитные аномалии модуля T Атлантического хребта, имеющие возраст от 0 до 160 млн. лет. [8, Gee and Ken,. 2007].

Представление о строении земной коры океана, расположении гидротермальных зон и характере распределения намагниченности в разных слоях пород дна дает геомагнитный разрез [1-2], пересекающий срединный хребет в районе термального поля Лост Сити [Ю.Богданов и др., 2004]. На разрезе в районе хребта видны линзы магматических камер на глубинах 15-30км и дивергентная граница, приуроченная к вертикальному разлому. Траектория вертикального гидротермального флюидного потока прослеживается с глубины около 40км.

Аномалии компонент МПЗ Северо-западной части Тихого океана. В Северо-Восточной котловине Тихого океана по аномалиям модуля МПЗ установлено, что распределение знакопеременных линейных аномалий асимметрично, поскольку присутствует лишь западный склон хребта. Заметное смещение оси «спрединга» - раздвижения океанического дна -произошло около 10 млн. лет назад [6-7], что проявилось в изменении

направления аномалий. В западной части океана обнаружено несколько систем древних полосовых аномалий, не связанных с современным срединным поднятием. Системы аномалий к востоку от Японских о-вов - Гавайская и Японская - разделены возвышенностью Шатского. Японская система на западе срезается глубоководным Японским желобом, а на северо-востоке ограничена Императорским хребтом. Взаимодействия этих трех систем в настоящее время пока не ясны, так как не все аномалии модуля МПЗ идентифицированы. Время образования древних аномалий оценивается в 150-180 млн. лет (рис.3). На северо-западной периферии ложа океана, примыкающей к Курило-Камчатской дуге, расположена зона спокойного магнитного поля, образованная 150 млн. лет назад, ранее аномалии М 22. В этот период не было установлено инверсий [6-7]. Аномалии компонент H и Z имеют отрицательные значения до 100нТл (рис.3).

Однако по знакопеременным аномалиям горизонтальной H-компоненты линейные аномалии с возрастом 110-160 млн. лет отслеживаются и трассируются более уверенно. В частности, это относится как к субширотным хронам, идущим от Императорских гор к Японскому желобу (рис.3а, в), так и к хронам, прослеживающимся с юга (от широты разлома Мендосино) на северо-запад. Например, знакопеременные аномалии H-компоненты от № 12 до №25 четко отслеживают хроны, направленные с юга от широты разлома Мендосино с поворотом на северо-запад. По ним видно, что они пересекают возвышенность Шатского и разворачиваются на запад к Японскому желобу. По аномалиям Z-компоненты эти хроны идентифицируются менее четко, а по аномалиям модуля они не идентифицированы.

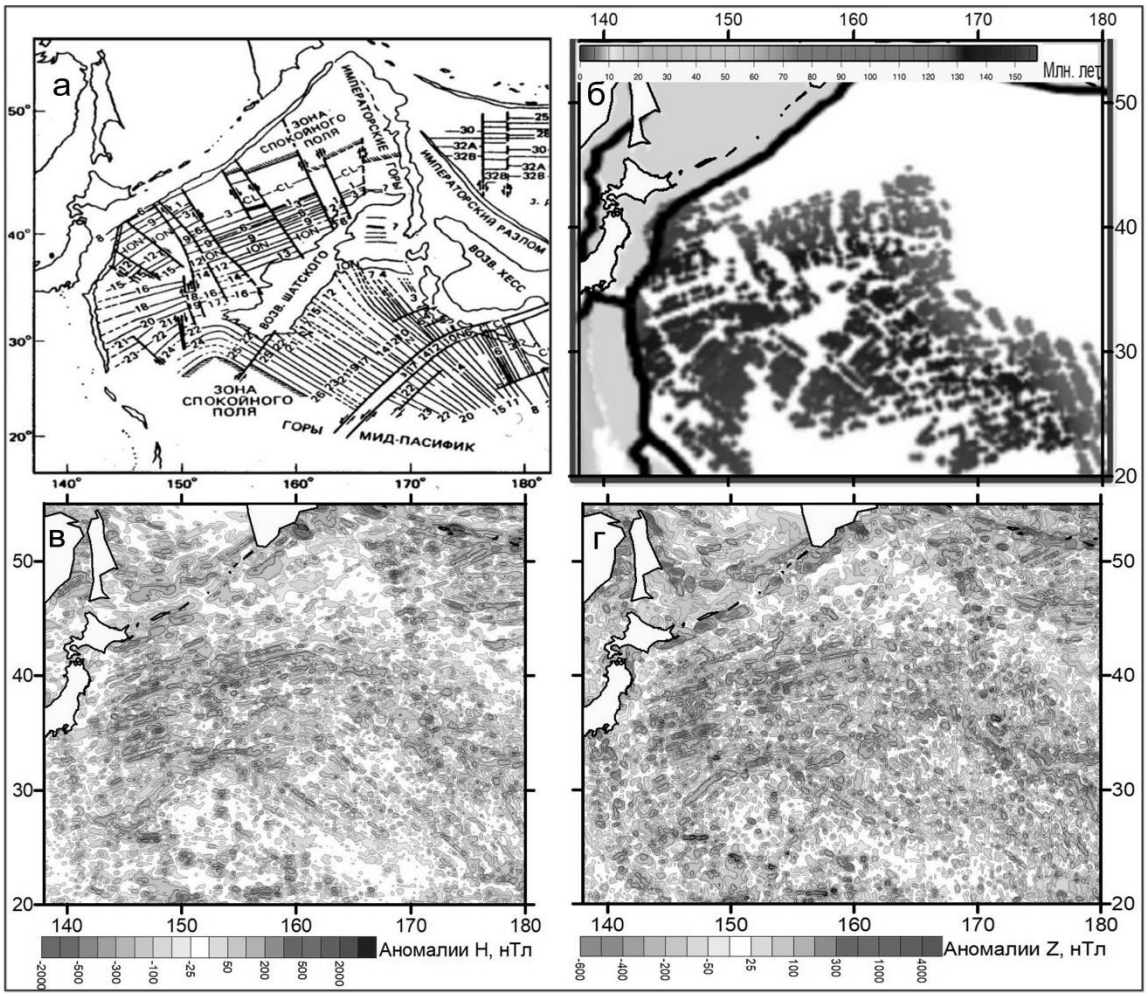


Рис. 3. Идентифицированные аномалии модуля МПЗ (а), карта возраста пород дна [8] (б), аномалии горизонтальной H (в) и вертикальной Z (г) компонент [1-2] МПЗ в Северо-западной части Тихого океана.

Разломные зоны четко трассируются цепочками отрицательных аномалий H-компоненты, секущими линейные хроны вкрест простирания. Аномалии Z-компоненты на разломах имеют неустойчивый облик в виде цепочек положительных и отрицательных значений.

Обсуждение и выводы. Идентификация магнитных аномалий является основой для тектонических пространственно-временных реконструкций движений океанических плит. Она формирует набор первичных данных, из которых рассчитывается возраст литосферы и режим формирования дна в океанических бассейнах Мирового океана. Идентификация магнитных аномалий модуля сыграла важную роль в развитии теории тектоники плит [6–8].

Однако идентификация компонент морских линейных магнитных аномалий, являющихся основными непосредственными свидетелями образования магнитоактивного слоя океанической земной коры, дает исключительно важную дополнительную информацию о характере намагниченности пород дна в разные периоды инверсий МПЗ. Это придает новый импульс исследованиям пространственно-временного представления о реконструкциях тектонических плит Мирового океана и расширяет возможности магнитной навигации.

Компоненты морских магнитных аномалий, по сравнению с аномалиями модуля, создают более четкое представление о характере изменений компонент вектора МПЗ в периоды инверсий, произошедших за время формирования морского дна Мирового океана – 180–200 млн. лет. Информация о компонентах линейных магнитных аномалий срединно-океанических хребтов в настоящее время становится особенно актуальной в связи с началом глобального проекта по созданию цифровой модели морского дна Мирового океана. Она осуществляется на основе идентифицированных линейных магнитных аномалий с учетом данных измерений градиента альтиметрии, позволяющих обеспечить отслеживание зон разломов [9-11].

Литература

1. Петрова А.А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН, М.: 2015. – С. 412–423.
2. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики. Журнал «Фундаментальная и прикладная геофизика», 2016 г., т.9 №2, – С. 88-106.
3. Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Августов Л.И. Анализ информативности магнитного поля Земли для автономной корреляционно-экстремальной навигации». Журнал «Фундаментальная и прикладная геофизика». 2017, т.10, №1, С. 1-7.
4. Щербаков И.А., Петрова А.А. Магнитная навигационная карта // Журнал "Записки по гидрографии", №304, 2017, С. 35-40.
5. Матисов В.Я., Петрова А.А. О выборе способа получения информации об элементах земного магнетизма в задаче компенсации магнитного поля индуктивного намагничения корабля // Тр. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности» СПб, 2017. С. 30–35.
6. Vine F.J., Matthews D.H. Magnetic anomalies over ocean ridges. Nature, v 199. No. 4897, 1963.
7. Pitman W.C., Talwani M. Sea-floor spreading in the North Atlantic // Geol. Soc. Amer. Bull. 1972. Vol. 83. P. 619-649.
8. *Seton, M., et al.* Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications // Geochem. Geophys. Geosyst. 2014. V.15. P.1629–1641. doi: 10.1002/2013GC005176.
9. Wessel, P., K. J. Matthews, R. D. Müller, A. Mazzoni, J. M. Whittaker, R. Myhill, and M. T. Chandler. Semiautomatic fracture zone tracking // Geochem. Geophys. Geosyst. 2015. V.16 (7), P. 2462-2472, doi:10.1002/2015GC005853.
10. P. Wessel, R. D. Müller. The Global Seafloor Fabric and Magnetic Lineation Data Base. Project 2016, [Updated August 1, 2016]
11. R. D. Müller, et al. The GPlates Portal: Cloud-Based Interactive 3D Visualization of Global Geophysical and Geological Data in a Web Browser // J/ PLoS One. V.11(3), 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0150883

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОРСКИХ ВОЛН С ПРЕГРАДОЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ С КАМЕННОЙ БЕРМОЙ

В.В.Максимов, д-р техн.наук, И.С.Нуднер[1], д-р техн.наук, К.К.Семенов[2], канд.техн.наук, Е.А.Крылатых[3]
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия
[1]Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
[3]Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва, Санкт-Петербург, Россия

SEA WAVES INTERACTION WITH THE OBSTACLE OF VERTICAL PROFILE WITH RIPRAP: AN ANALYTICAL APPROACH

V.V.Maximov, Dr.Sc., I.S.Nudner[1], Dr.Sc., K.K.Semenov[2], Ph.D., E.A.Krylatykh[3]
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia
[1]Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg, Russia
[2]Saint-Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia
[3]Military Academy of Material and Technical Support n.a. General of the Army A.V. Khrulev, St. Petersburg, Russia

В работе представлена аналитическая модель, описывающая процесс взаимодействия периодических волн с гидротехническим сооружением, имеющим вертикальный профиль и защищенным каменной бермой. Основные соотношения выведены в предположении идеальной несжимаемой жидкости и в линейной постановке. Представленная модель позволяет оценить характеристики воздействия морских волн на гидротехнические сооружения с учетом проницаемости и шероховатости защитной бермы и тем самым способствует выбору более эффективны решений при проектировании морских сооружений.

This paper presents an analytical model describing periodic waves interaction with hydrotechnical structure with the vertical face side and riprap. The main relations are derived under the assumption of an ideal incompressible liquid and in a framework of a linear statement of the problem. The presented model allows to estimate the characteristics of the sea waves impact on hydrotechnical structures taking into account the permeability and roughness of the protective riprap and thus contributes to the selection of the more effective decisions for the design of offshore facilities.

В гидротехническом строительстве широкое применение находят сооружения с вертикальным профилем лицевой грани – такие конструкции используются в составе морских оградительных сооружений, молов, волнорезов, причалов. Процесс воздействия на них морских волн всесторонне изучен; литература, посвященная этому вопросу, чрезвычайно обширна, в частности могут быть отмечены работы [1-8].

Воздействие морских волн на сооружения вертикального профиля сопровождается размывом донного грунта перед лицевой гранью, что может приводить к потере сооружением устойчивости и его разрушению. Для предотвращения эрозии участок дна перед сооружением защищают с помощью каменной бермы. Использование такого способа защиты закреплено нормативными документами [9-11] и рекомендациями [12].

В работе представлена аналитическая модель, описывающая процесс взаимодействия периодических волн с гидротехническими сооружениями с вертикальной лицевой гранью, защищенными при помощи каменной отсыпки. Ее использование позволяет более точно учесть наличие бермы при процессе наката волн на сооружение, определить зависимость от ее характеристик, определить наилучшую величину отметки верха отсыпки, степень снижения волновой нагрузки на лицевую грань и другие характеристики, важные при проектировании и эксплуатации морских гидротехнических сооружений.

В работе рассмотрена плоская линейная задача о воздействии волн на вертикальную преграду, перед которой расположен непроницаемый подводный уступ с бермой из пористого материала с отметкой верха ниже отметки горизонта спокойной воды. Верх сооружения исключает перелив. Расчетная схема задачи приведена на рис. 1.

Для отыскания решения область, занятая жидкостью, разбивается на прямоугольные части по естественным границам: $(x, z)\in[-\infty, -a]\times[-d, 0]$ – область Ω_1, $(x, z)\in[-a, 0]\times[-d_1, -d_2]$ – область Ω_2, $(x, z)\in[-a, 0]\times[-d_2, 0]$ – область Ω_3. В каждой из областей функция $\varphi(x, z)$ определяется методом разделения переменных в виде обобщенных рядов Фурье. На общей границе между областями Ω_1 и Ω_2 ставятся условия равенства скоростей и давлений, что позволяет отыскать неизвестные коэффициенты разложения в ряды.

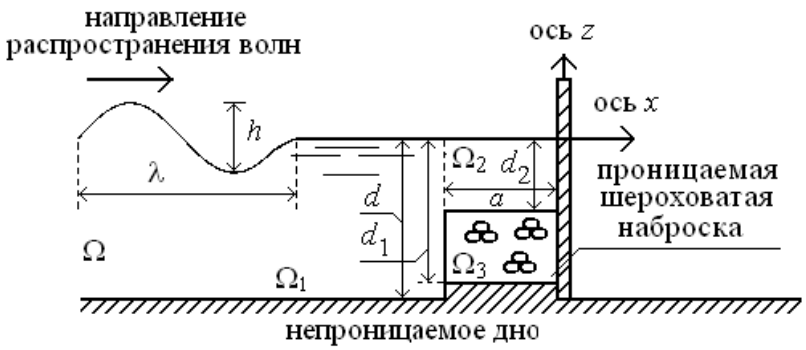


Рис. 1. Схема взаимодействия волн с непроницаемой вертикальной преградой, защищенной каменной наброской.

При выводе модели предполагалось, что жидкость - идеальная и несжимаемая, а ее движение – потенциальное. Область Ω, занятая жидкостью, ограничена сверху свободной поверхностью, а снизу – непроницаемым горизонтальным дном. Часть области Ω занята каменной наброской, схематизируемой как проницаемая для жидкости изотропная подобласть Ω_3 с постоянными значениями коэффициентов пористости ε, присоединенной массы S и трения f. Рассматриваются малые установившиеся колебания жидкости. Введена система координат (x, z), где ось x направлена по лучу распространения набегающих волн, а ось z – в верх от дна. Начало координат расположено на вертикальной стенке. Волны, набегающие на сооружение, имеют потенциал скорости $\Phi_0(x, z, t) = \varphi_0(x, z) \cdot \exp(i \cdot \sigma \cdot t)$, где $\varphi_0(x, z) = i \cdot \frac{g \cdot h \cdot \mathrm{ch}(k_0 \cdot (z + d))}{2 \cdot \sigma \cdot \mathrm{ch}(k_0 \cdot d)} \cdot \exp(-i \cdot k_0 \cdot x)$ – его амплитудная часть; $i = \sqrt{-1}$, t – время; h – высота периодических волн, σ – их частота, d – глубина жидкости, g – ускорение силы тяжести; k_0 – волновое число, определяемое из дисперсионного уравнения $\sigma^2 = g \cdot k_0 \cdot \mathrm{th}(k_0 \cdot d)$. Геометрия области Ω_3 задана параметрами: шириной области a, местной глубиной d_1. Область Ω_3 расположена вплотную к лицевой грани вертикальной преграды.

Волновое движение в каждой точке (x, z) расчетной области описывается потенциалом скорости $\Phi(x, z, t) = \varphi(x, z) \cdot \exp(i \cdot \sigma \cdot t)$, удовлетворяющим уравнению Лапласа $\frac{\partial^2 \varphi(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, z)}{\partial z^2} = 0$ и граничным условиям:

1. на свободной поверхности жидкости $\frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \cdot \varphi(x, z)$, $z=0$;
2. на дне $\frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial z} = 0$ при $z = -d$; $x<-a$ и $z = -d_1$, $-a \le x<0$;
3. на лицевых гранях стенки и уступа $\frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial x} = 0$, $x=0$, $-d_1 \le z<0$ и $x=-a$, $-d \le z<-d_1$;
4. на жидких границах области Ω_1: $\frac{\partial \varphi(x-0, z)}{\partial x} = \varepsilon \cdot \frac{\partial \varphi(x+0, z)}{\partial x}$ при $x=-a$, $-d_1 \le z<-d_2$;
   $\varphi(x, z+0) = (S - i \cdot f) \cdot \varphi(x, z-0)$ при $-a \le x<0$, $z=-d_2$.
5. на бесконечном удалении от тела потенциал скорости представляет собой при $x \to -\infty$ сумму потенциалов набегающей и отраженной волн;

Картина волнового режима представляет собой суперпозицию набегающих и отраженных волн. В виду линейности задачи амплитудная часть искомой функции $\Phi(x, z, t)$ всего возмущенного движения жидкости может быть представлена в виде

$$\varphi(x, z) = \varphi_0(x, z) + \varphi_1(x, z),$$

где $\varphi_0(x, z)$ соответствует набегающей волне, а $\varphi_1(x, z)$ характеризует движение, обусловленное взаимодействием набегающих волн со стенкой и бермой.

Отдельную сложность представляет собой отыскание собственных чисел k в области Ω_3. Для этого необходимо решить дисперсионное уравнение, соответствующее указанной области, которое имеет следующий вид:

$$\sigma^2 - g \cdot k \cdot \mathrm{th}(k \cdot d_2) = \frac{\varepsilon}{S - i \cdot f} \cdot \mathrm{th}(k \cdot (d_1 - d_2)) \cdot \left[g \cdot k - \sigma^2 \cdot \mathrm{th}(k \cdot d_2) \right]. \quad (1)$$

Корни трансцендентного уравнения (1) являются комплексными, и их определение представляет определенную сложность. Для отыскания корней использовалась численная процедура, основанная на методе Ньютона со специальным выбором начального приближения, позволяющая гарантировать отыскание всех необходимых для дальнейших вычислений корней. При численном анализе решений поставленной задачи в обобщенных рядах Фурье была оставлена только часть слагаемых, соответствующих собственным числам с наименьшими модулями.

Были выполнены расчеты для различных начальных данных. Для иллюстрации полученных результатов отдельного типового расчета на рис. 2 и 3 представлены значения корней уравнения (1) в области Ω_3 и профиль давления вдоль вертикальной стенки при d=10м, d_1=8м, d_2=5м, a=5м, ε=0,33, S=1,00, f=0,5. В обобщенных рядах Фурье были оставлены первые N=5 слагаемых.

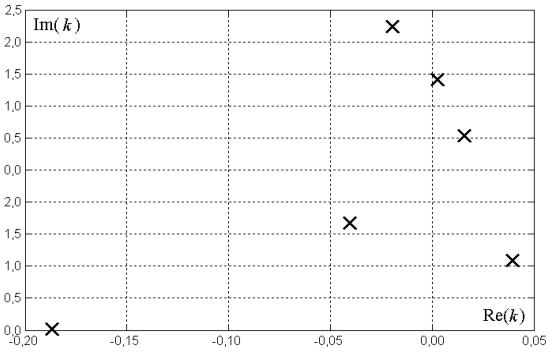


Рис. 2. Примеры распределения первых собственных чисел области Ω_3.

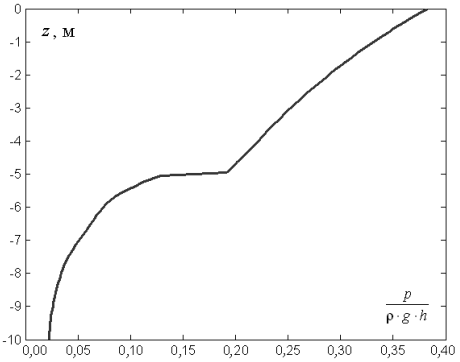


Рис. 3. Распределение давления вдоль лицевой грани вертикальной стенки.

Представленная математическая модель позволяет оценить характеристики воздействия морских волн на гидротехнические сооружения с учетом проницаемости и шероховатости защитной бермы и тем самым способствует выбору более эффективных решений при проектировании морских сооружений.

Литература

1. Загрядская, Н. Н. Морские волны на акваториях и у сооружений вертикального типа. – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2006. – 224 с.
2. Мирчина Н. Р., Пелиновский Е. Н. Возрастание амплитуды длинной волны вблизи вертикальной стенки //Физика атмосферы и океана. 1984. Т.20. № 3. С. 330-331.
3. Кантаржи И. Г., Шарова В. В., Чан Лонг Занг. Воздействия ветровых волн на короткие вертикальные стенки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7. № 1. С. 32-46.
4. Букреев В. И. Силовое воздействие прерывных волн на вертикальную стенку // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. №. 2. С. 129-135.
5. Барахнин В. Б., Краснощекова Т. В., Потапов И. Н. Отражение волны прорыва от вертикальной стенки. Численное моделирование и эксперимент // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 2. С. 96-102.
6. Железняк М.И. Воздействие длинных волн на твердые вертикальные преграды // В сб.: Накат волн цунами на берег. Ин-т прикл. физики АН СССР. Горький, 1985. С.122-139.
7. Давлетшин В.Х. Исследования силового воздействия длинных волн на гидротехнические сооружения вертикального профиля // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1986. Т.196. С.72-77.
8. Загрядская Н.Н., Иванова С.В., Нуднер Л.С., Шошин А.И. Воздействие длинных волн на вертикальную преграду // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1980. Т.138. С.94-101.
9. РД 31.31.36-85. Рекомендации по проектированию и технологии строительства оградительных сооружений из наброски с жестким экраном. Введен 01.05.1986.
10. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М., 2012.
11. Р 31.3.07-01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. М.: Минтрансстрой РФ, 2001. 37 с.
12. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1990. 432 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛН В ГИДРОВОЛНОВОМ ЛОТКЕ С ПРЕПЯТСТВИЕМ

А.И.Зимин
Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

NUMERICAL SIMULATION OF IRREGULAR WAVES FORMATION IN A HYDROWAVE TRAY WITH OBSTACLE

A.I.Zimin
Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

В докладе представлены результаты решения задачи о распространении нерегулярных волн в гидроволновом лотке и взаимодействии поверхностных волн с донным связным грунтом. Исследование выполняется в рамках модели многокомпонентной вязкой несжимаемой жидкости с переменными вязкостью и плотностью. При этом воздух, вода и грунт рассматриваются как компоненты неоднородной среды. Представлены результаты расчетов для различных конфигураций модельного волнопродуктора, полученные с помощью конечно-разностного алгоритма, основанного на схеме расщепления по физическим факторам и методе предиктор–корректор.

The report presents the results of solving the problem of irregular wave propagation in a hydrowave tray and the interaction of surface waves with bottom cohesive soil. The investigation was carried out using a multi-component viscous incompressible fluid model with variable viscosity and density. Here, air, water and soil are considered as components of inhomogeneous medium. The calculation results for various configurations of the model wave-producer are presented. They are obtained by means of a finite difference algorithm based on the splitting scheme for physical factors and the predictor-corrector method.

Длинные морские и океанические поверхностные волны при подходе к берегу могут значительно увеличить свою высоту, что представляет опасность для береговых сооружений. К основным причинам возникновения таких волн относят подводные землетрясения, обвалы и оползни, извержения подводных вулканов и другие (см. [1, 2]).

Для предотвращения возможных разрушительных последствий обычно проводятся лабораторные эксперименты, позволяющие понять характер распространения таких волн и их взаимодействие с различными препятствиями. В лабораторных условиях «23 ГМПИ» филиала ОАО «31 ГПИСС» (Санкт-Петербург) гидроволновой лоток позволяет исследовать процесс распространения одиночной волны [3]. Для ее образования используется вакуумный волнопродуктор, который представляет собой герметичный закрытый резервуар, сообщающийся с лотком. В лотке установлены волномеры, позволяющие получить характеристики волны в различные моменты времени.

Следует заметить, что проведение подобного эксперимента является дорогостоящим и требует времени для подготовки. При этом он предназначен только для анализа процесса распространения одиночной волны. Так как в [3] была предложена математическая модель гидроволнового лотка «23 ГМПИ» и проведена ее валидация на экспериментальных данных, то целью настоящей работы является расширение возможностей использования модели в задачах распространения нерегулярных волн и их взаимодействия с донным связным грунтом.

Математическая модель и численная схема решения. Рассматривается движение многокомпонентной вязкой несжимаемой среды, у которой вязкость и плотность зависят от концентрации компонент, соответствующих воздуху, воде и намокшему связному грунту. Каждая из таких компонент представляется вязкой несжимаемой жидкостью с собственными значениями вязкости и плотности, предполагается возможность диффузии массы между этими компонентами. Движение такой многокомпонентной среды описывается нестационарной системой уравнений Навье-Стокса, учитывающей перечисленные выше эффекты, а перенос компонент среды – уравнениями конвективной диффузии и соотношениями для определения плотности и вязкости [4].

Двухкомпонентная (вода-грунт) версия модели была применена к задачам размыва связного грунта внутренним течением [5, 6] и распространения волн на поверхности раздела воздух-вода [7]. Трехкомпонентная (воздух-вода-грунт) версия использовалась для моделирования возникновения длинной волны в результате движения массы подводного грунта (оползня) по наклонному дну [4].

Для численной реализации модели используется метод конечных разностей на прямоугольной сетке с шахматным расположением узлов [8]. При этом система уравнений

Навье-Стокса аппроксимируется схемой расщепления по физическим факторам [9] с учетом переменной плотности, а для решения уравнений конвективной диффузии применяется схема предиктор-корректор. Подробное описание этого численного алгоритма представлено в статье [4].

Распространение нерегулярных волн в гидроволновом лотке. Рассматривается задача о распространении в модельной акватории нерегулярной последовательности волн. Для этого используется двухкомпонентная версия модели (воздух-вода). Схема расчетной области и начальное расположение компонент среды представлены на рис. 1.

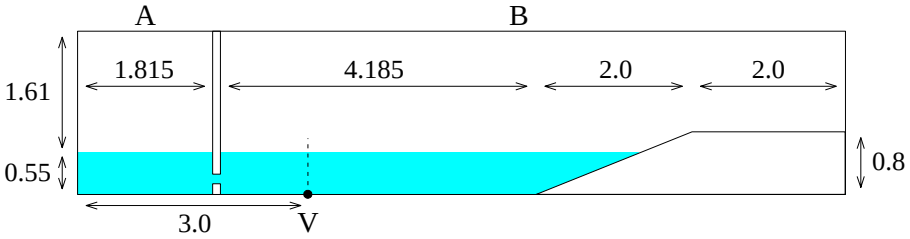


Рис. 1. Схема области решения и начальное расположение компонент среды.

На всех границах (кроме A и B) для скоростей ставятся условия прилипания и непротекания – «твердая стенка», а для давления и концентрации – условие Неймана.

Часть области с верхней границей A моделирует волнопродуктор, который сообщается с лотком, верхняя граница которого обозначена литерой B. На границе B давление полагается равным атмосферному, $P_B = 101325\,Па$. Движение в среде возникает за счет изменения давления $P_A = P_A(t)$ на границе A, которое со временем становится то меньше, то больше атмосферного P_B, что приводит к образованию поверхностных волн с определенной высотой и длиной в области лотка (подробнее см. [3]).

Задавая функцию $P_A(t)$, можно создавать волны различных размеров, тем самым моделируя движение нерегулярных поверхностных волн.

В точке V располагался виртуальный мареограф, в котором замерялась высота волны с течением времени. В расчетах использовались следующие значения плотности и вязкости: $\rho_1 = 1.0\frac{кг}{м^3}$, $\rho_2 = 1000.0\frac{кг}{м^3}$, $\mu_1 = 10^{-5}\frac{кг}{м\cdot с}$, $\mu_2 = 10^{-3}\frac{кг}{м\cdot с}$, где индекс 1 соответствует воздуху, а 2 – воде.

На рис. 2 представлен график изменения высоты волны с течением времени в точке V, демонстрирующий цуг нерегулярных волн с различными амплитудами и длинами.

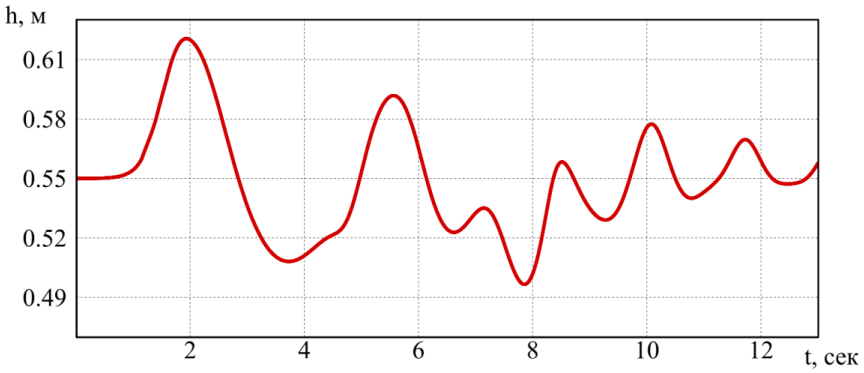


Рис. 2. График изменения высоты волны в точке V.

Влияние одиночной поверхностной волны на донный связный грунт при набегании на препятствие. В силу конструктивных особенностей гидроволнового лотка «23 ГМПИ» технически не представляется возможным провести в нем эксперимент по взаимодействия поверхностных волн и донного грунта. Здесь для моделирования такой задачи используется модель трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости (воздух-вода-грунт).

Область решения идентична области из предыдущего раздела за исключением добавления слоя донного связного намокшего грунта, поведение которого моделируется отдельной компонентой. Схема расположения компонент представлена на рисунке 3, грунт отмечен темным цветом.

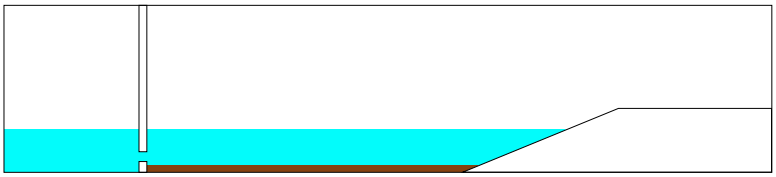


Рис. 3. Схема расположения компонент.

Плотность и вязкость первой (воздух) и второй (вода) компонент совпадают со значениями из предыдущего пункта, у третьей компоненты (грунт) они соответственно равны $\rho_3 = 2000.0 \frac{кг}{м^3}$ и $\mu_3 = 1 \frac{кг}{м \cdot с}$.

Движение в области также возникает за счет перепада давления между волнопродуктором и лотком. На рисунке 4 представлены картины течения на различные моменты времени (для наглядности область вытянута по вертикали).

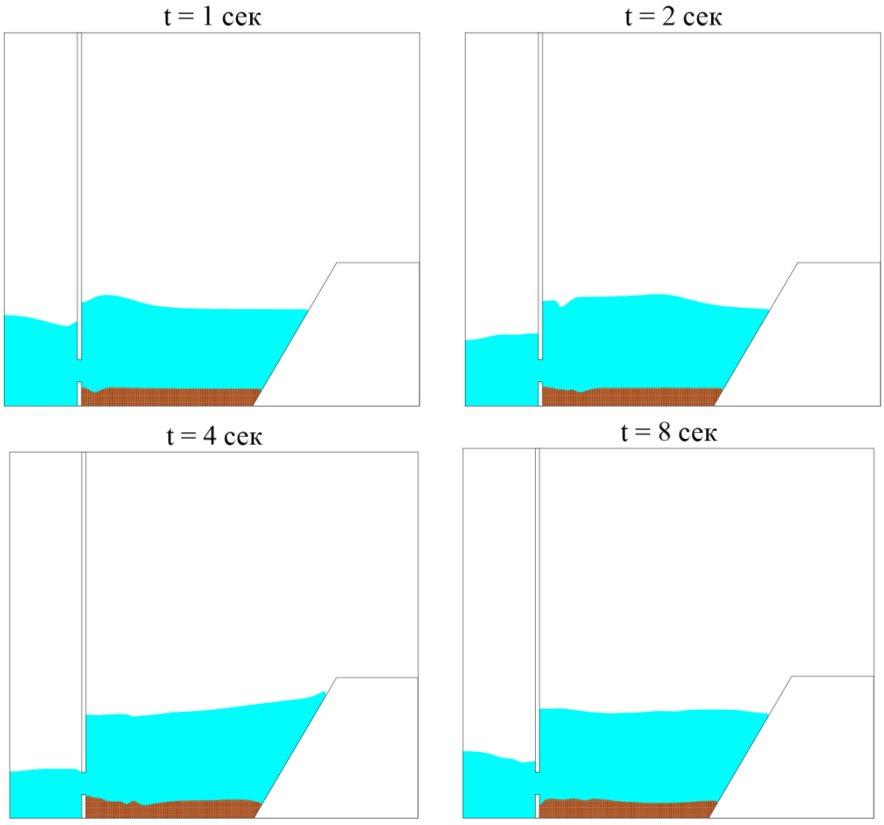


Рис. 4. Картина движения на моменты времени 1, 2, 4 и 8 секунд.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что волна, запущенная волнопродуктором, порождает движение грунта, унося его вслед за собой к препятствию. Затем, после отражения от препятствия, она перемещает часть грунта обратно, оказывая влияние на формирование рельефа поверхности дна.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование математической модели гидроволнового лотка «23 ГМПИ» и ему подобных существенно повышают эффективность лабораторных экспериментов, а сочетание лабораторного и численного подходов к моделированию сложных гидрофизических явлений позволяет детально исследовать такие

процессы как распространение нерегулярных волн, взаимодействие поверхностных волн, донного связного грунта и т.п.

Автор выражают глубокую благодарность Л. Б. Чубарову и Ю. Н. Захарову за помощь в работе и рекомендации по оформлению статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ на реализацию научного проекта № 17-31-50065 «Численное моделирование взаимодействия поверхностных волн и препятствия, стоящего на связном грунте».

Литература

1. Пелиновский, Е. Н. Гидродинамика волн цунами / Е. Н. Пелиновский – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
2. Khakimzyanov, G. S. Simulation of tsunami waves generated by submarine landslides in the Black Sea / G. S. Khakimzyanov, O. I. Gusev, S. A. Beisel, L. B. Chubarov, N. Y. Shokina // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2015. – Vol. 30 – No. 4 – P. 227–237.
3. Захаров, Ю. Н. Численное моделирование работы лабораторного волнопродуктора одиночных волн на воде [Электронный ресурс] / Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, С. В. Стуколов, В. В. Лебедев, И. С. Нуднер, К. К. Семенов // Материалы третьей международной конференции «Полярная механика». – Владивосток, 2016. – С. 954–964. – Режим доступа: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/ PolarMechanics.pdf.
4. Zakharov, Y. N. Numerical simulation of surface waves arising from underwater landslide movement / Y. N. Zakharov, A. I. Zimin // Conference Proceedings «Mathematical and Information Technologies MIT-2016». – 2017. – P. 535–546.
5. Belyaev, N. D. Modeling cohesionless and cohesive soils erosion near oil platforms of gravity type / N. D. Belyaev, N. A. Geydarov, K. S. Ivanov, V. V. Lebedev, I. S. Nudner, V. V. Ragulin, Y. N. Zakharov, A. I. Zimin // International Conference «Stability and Control Processes» in Memory of V.I. Zubov (SCP). – St Petersburg, Russia: IEEE, 2015. – P. 5–8.
6. Zakharov, Y. Two-component incompressible fluid model for simulating the cohesive soil erosion / Y. Zakharov, A. Zimin, I. Nudner, V. Ragulin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725 – P. 361–368.
7. Zakharov, Y. Two-Component Incompressible Fluid Model for Simulating Surface Wave Propagation / Y. Zakharov, A. Zimin, V. Ragulin // Mathematical Modeling of Technological Processes. – Almaty, Kazakhstan: Springer International Publishing, 2015. – P. 201–210.
8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 148 с.
9. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский – Москва: Наука, 1984. – 520 с.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИ ВЛОЖЕННЫХ СЕТОК В РАСЧЁТАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

О.И.Гусев, канд.физ-мат.наук, Л.Б.Чубаров, д-р физ-мат.наук
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

ON THE USE OF TELESCOPIC NESTED GRIDS IN COMPUTATIONS OF TSUNAMI PROPAGATION

O.I.Gusev, Ph.D., L.B.Chubarov, Dr.Sc.
Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

В докладе рассматривается возможность снижения ресурсоемкости серийных сценарных расчётов распространения волн цунами при помощи телескопически вложенных сеток. Моделирование распространения волн осуществляется с использованием конечно-разностных алгоритмов для уравнений мелкой воды первого и второго приближения. Показано, что адекватный выбор иерархии вложенных подобластей и алгоритмов расчета вблизи их границ обеспечивает достаточную точность воспроизведения результатов, полученных на самой детальной сетке. При этом затрачиваемые вычислительные ресурсы уменьшаются значительно.

The report examines a possibility of reducing the resource intensity of serial scenarios of tsunami propagation, using telescopic nested grids. The wave propagation is simulated by means of finite-difference algorithms for shallow water equations of the first and second approximation order. The simulations show that an adequate choice of the nested subdomains and the algorithms of computations close to the subdomain boundaries provides the sufficient reproduction of the results obtained with the most detailed grid. At that the required computational resources can be reduced considerably.

Для получения вероятностных оценок цунамиопасности конкретного побережья с использованием технологии PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis) требуется выполнение большого количества (порядка десятка тысяч) сценарных расчётов распространения волн цунами. Поэтому возрастают требования к вычислительным алгоритмам: необходимо получать характеристики волн с приемлемой точностью, затрачивая как можно меньше вычислительных ресурсов. Заметим, что использование технологий параллельных вычислений в таких задачах становится менее актуальным, поскольку на многопроцессорных системах можно запускать одновременно ряд независимых задач.

В настоящей работе рассматривается возможность снижения ресурсоемкости серийных сценарных расчётов распространения волн цунами при помощи телескопически вложенных сеток. Алгоритмы на прямоугольных сетках в подобластях с уменьшаемым шагом по пространству используются достаточно давно. Так, например, в программном комплексе GeoCLAW реализован AMR (Adaptive Mesh Refinement) алгоритм [1], который перестраивает сетку на каждом шаге по времени в зависимости от решения. В комплексе для расчётов распространения цунами TUNAMI [2] и некоторых других реализован подход, заключающийся в возможности измельчения шага сетки в заранее выделенных подобластях.

Такой подход основан на том, что при моделировании исторических событий для приемлемой точности расчётов величину шага сетки можно выбирать в зависимости от характерной глубины акватории: приблизительно равным глубине в мелководных частях и около четверти-половины глубины в глубоководных частях (см., например, [3, 4]). В Тихом океане при средней глубине около 4 км вдали от берега можно использовать сетки с разрешением 1-2 км, чего явно недостаточно для адекватного описания процесса распространения волны в шельфовой зоне и вблизи берега. Следовательно, эффективным может быть использование грубой сетки в глубоководной части акватории и более подробной сетки (или иерархии сеток) вблизи целевого участка побережья. В докладе возможности предлагаемого подхода рассмотрены на одномерных модельных задачах, однако реализующие этот подход алгоритмы естественным образом переносятся на двухмерный случай.

Для моделирования распространения волн цунами здесь используются две приближенные модели волновой гидродинамики: классическая бездисперсионная нелинейная модель мелкой воды (SW) и полностью нелинейная дисперсионная модель мелкой воды второго приближения (NLD-модель). Для решения уравнений SW-модели используется явная конечно-разностная схема Мак-Кормака, а для NLD-модели – алгоритм типа предиктор-корректор [5]. Двумерные аналоги этих алгоритмов реализованы в комплексе MGC, который используется в сценарных расчётах распространения цунами [6]. Будет рассмотрено три варианта организации вычислений вблизи границы подобласти с измельчённым шагом: интерполяция по времени, интерполяция по пространству и «безынтерполяционный» метод. Работоспособность этих вариантов проверяется на тестовых задачах о прохождении волн различных конфигураций через границы подобластей с модельными рельефами дна, в частности, на задаче о распространении волны в модельной акватории [7], рельеф дна которой аппроксимирует

распределение глубин Курило-Камчатского глубоководного желоба.

Организация вычислений. Пусть расчётная область покрыта равномерной сеткой с некоторым шагом Δx. Назовём эту сетку «грубой». Будем считать, что некоторая выбранная подобласть, границы которой попадают точно в узлы грубой сетки, также покрыта равномерной сеткой, шаги которой в $RF > 1$ раз меньше Δx, причём RF – целое число и означает степень измельчения. Далее рассматривается одновременное измельчение как по пространству, так и по времени, то есть шаг по времени в расчёте на подробной сетке в RF раз меньше, чем в расчёте на грубой (τ). Алгоритм вычислений на комбинированной сетке следующий. Пусть искомые величины на *n*-ом временном слое известны во всех узлах грубой и подробной сеток. Вначале рассчитываются величины на (*n*+1)-ом слое грубой сетки. Затем, в цикле от $step = 1$ до $step = RF$ выполняются расчёты на подробной сетке с шагом τ_n / RF на временных слоях $n + step / RF$. Окончательно, значения в узлах грубой сетки заменяются значениями, определенными в соответствующих узлах подробной сетки.

Одной из проблем, возникающих при использовании вложенных сеток, является организация расчетов на границах раздела двух сеток. Некоторые замечания о согласованности значений на границе можно найти, например, в статье [1], где предлагаются методы согласования, обеспечивающие выполнение глобального закона сохранения массы для конечно-разностных аппроксимаций уравнений в консервативной и неконсервативной формах. В работе [8], в частности, предложен алгоритм для одномерных и двумерных систем уравнений, и приведена формула для теоретической оценки степени отражения.

При организации вычислений вблизи границ подобластей с использованием интерполяции по пространству вводится RF фиктивных узлов подробной сетки около каждой её границы, значения в этих узлах на каждом шаге расчета на грубой сетке вычисляются при помощи линейной интерполяции между соседними узлами грубой сетки. Второй способ предусматривает для каждого из граничных узлов подробной сетки интерполяцию по времени между *n*-ым и (*n*+1)-ым временным слоем с шагом τ_n / RF решения, полученного на грубой сетке. Наконец, в последнем из рассмотренных способов вместо интерполяции по времени, граничные значения на подробной сетке вычисляются с шагом по времени $\tau_n \cdot step / RF$. по величинам, рассчитанным на грубой сетке с *n*-го слоя по времени. Все три способа просты в реализации и на рассмотренных задачах обеспечивали хорошее качество результатов, не приводя к дополнительным ограничениям на устойчивость алгоритмов.

Результаты тестовых расчётов на ровном дне. Согласованность расчётов на разных сетках вблизи границы подобласти измельчения оценивалась по амплитуде отражённой волны на двух тестовых задачах с дном постоянной глубины. Первая из них состоит в моделировании распространения уединённой волны (с формой в виде аналитического решения для NLD-модели), а вторая – в моделировании разрушения плотины (расчёты были проведены только по SW-модели). В первой задаче варьировалась амплитуда начальной волны (следовательно, изменялась и её эффективная длина) от $h_0 / 1000$ до $h_0 / 10$ (h_0 - глубина акватории, здесь было выбрано $h_0 = 2$ км и длина акватории $L = 2400$ км), шаг грубой сетки от $6h_0$ до $0.6h_0$ и степень измельчения от $RF = 2$ до $RF = 16$. При такой вариации параметров максимальная амплитуда отражённой от границы подобласти волны не превышала 0.1% от амплитуды проходящей волны при всех трёх способах организации вычислений. Во второй задаче были выбраны следующие параметры: $h_0 = 1$ м, $L = 300$ м, начальная свободная поверхность жидкости $\eta_0 = 0.8$ м при $x > 150$ м и 0 иначе, подобласть измельчения от $x = 0$ м до $x = 100$ м, шаг грубой сетки от $\Delta x = 1.5$ м до $\Delta x = 0.15$ м, степень измельчения от $RF = 2$ до $RF = 16$. Максимальная амплитуда отражённой волны от границы подобласти измельчения среди всех способов организации вычислений составила около 0.4% от проходящей. Заметим, что во всех рассмотренных задачах все способы организации вычислений давали сопоставимые результаты. В дальнейших расчётах на границе подобласти использовалась интерполяция по времени.

Результаты расчётов в акватории с модельным рельефом. Для оценки перспективы использования телескопически вложенных сеток в моделировании реальных физических явлений была рассмотрена задача в акватории, распределение глубин которой в одном из направлений задается кусочно-линейной функцией, аппроксимирующей батиметрию Курило-Камчатского глубоководного желоба (рис. 1, см. вклейку). На этом же рисунке представлено начальное возмущение свободной поверхности определенное сечением подвижки дна, рассчитанной по

модели Подъяпольского-Гусякова-Окады [9] для землетрясения с магнитудой $M_w = 7.8$. Параметры механизма очага были выбраны таким образом, чтобы начальное возмущение содержало высокочастотные компоненты, повышающие требования к вычислительным алгоритмам. На левой границе расчетной области ставилось условие непротекания, моделирующее взаимодействие волны с вертикальной стенкой, а на правой – условие Зоммерфельда свободного прохода волн.

Сначала приведём результаты численных экспериментов для SW-модели. Для сравнений было проведено четыре расчёта: на равномерных сетках с шагом $\Delta x = 1$ км, $\Delta x = 250$ м и $\Delta x = 31.25$ м, а также на комбинированной сетке с шагом

$$\Delta x = \begin{cases} 31.25 \text{ м при } x \le 75 \text{ км;} \\ 250 \text{ м при } 75 \text{ км} < x \le 150 \text{ км;} \\ 1 \text{ км при } x > 150 \text{ км.} \end{cases}$$

Мареограммы, рассчитанные на левой границе (Рис. 1) показывают, что результаты, определенные на комбинированной сетке, практически совпадают с результатами расчёта на самой подробной сетке, при этом количество вычислений сокращается более чем в 4 раза, что подтверждает перспективу использования телескопически вложенных сеток в задачах с реальным распределением глубин. Отметим, что важную роль в таком подходе играет адекватный выбор подобластей для измельчения шага сетки.

Сходимость на последовательности сеток в расчётах с использованием NLD-моделей достигается быстрее, поскольку физическая дисперсия может доминировать над численной. Поэтому расчёты с NLD-моделью были проведены на следующих сетках: равномерные с шагом $\Delta x = 1$ км и $\Delta x = 125$ м, а также комбинированная с шагом

$$\Delta x = \begin{cases} 125 \text{ м при } x \le 150 \text{ км;} \\ 1 \text{ км при } x > 150 \text{ км.} \end{cases}$$

Мареограммы, полученные в этих расчётах (рис. 2, см. вклейку) демонстрируют согласие результатов, полученных на комбинированной сетке и на самой подробной равномерной сетке, при этом количество вычислений сокращается более чем в 2 раза. Таким образом, и для этого класса более сложных моделей подтверждается хорошая перспектива использования телескопически вложенных сеток.

В докладе представлен и двумерный аналог обсуждаемых алгоритмов, а также результаты расчётов задач о распространении волн цунами в акваториях с реальным распределением глубин. Отмечены особенности перехода к двумерному случаю в задачах с телескопически вложенными сетками (связанные, например, с необходимостью дополнительной интерполяции по пространству на границе подобластей с сетками различной детальности).

Исследование выполнено при поддержке программы президиума РАН № 27 «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров».

Литература

1. Berger M.J., Leveque L.J. Adaptive mesh refinement using wave-propagation algorithms for hyperbolic systems // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1998. V.35, N 6. P.2298-2316.
2. Imamura F. Simulation of wave-packet propagation along sloping beach by TUNAMI-code // Long-wave Runup Models, eds. H. Yeh, P. Liu and C. Synolakis. Singapore: World Scientific, 1996. P.231-241.
3. Glimsdal S., Pedersen G. K., Atakan K., Harbitz C. B., Langtangen H. P., Lovholt F. Propagation of the Dec. 26, 2004, Indian Ocean Tsunami: Effects of Dispersion and Source Characteristics // Int. J. Fluid Mech. Res. 2006. V.33, N 1. P.15-43.
4. Grue J., Pelinovsky E.N., Fructus D., Talipova T., Kharif C. Formation of undular bores and solitary waves in the Strait of Malacca caused by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami // J. Geophys. Res. 2008. V.113. C05008.
5. Гусев О.И., Хакимзянов Г.С. Численное моделирование распространения длинных поверхностных волн по вращающейся сфере в рамках полной нелинейно-дисперсионной модели // Вычисл. технологии. 2015. Т.20, N 3. С.3-31.
6. Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., and Gusyakov V.K. Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations // E.Krause et al. (Eds.): Comp. Science & High Perf. Computing III, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2008. V.101. P. 52-68.
7. Chubarov L.B., Gusiakov V.K. Tsunamis and earthquake mechanisms in the island arc regions // Science of Tsunami Hazards. Tsunami Society, Honolulu, USA. 1985. V.3, N 1. P.3-21.
8. Лисица В.В. Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2018.
9. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism.Soc. Am. 1985. V.75, N 4. P.1135-1154.

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЛОКАЛЬНЫХ ЦУНАМИ НА КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ

Ю.П.Королёв, канд.физ-мат.наук
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

ON THE POSSIBILITY OF LOCAL TSUNAMI SHORT-TERM FORECAST ON THE KURIL ISLANDS

Yu.P.Korolev, Ph.D.
Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Представлены результаты численного моделирования процесса оперативного прогноза локальных цунами 2006 и 2007 гг. на Курильских островах по данным ближайших к островам глубоководных станций измерения уровня океана. Показана принципиальная возможность оперативного прогнозирования цунами, происходящих в районе центральных Курильских островов. Заблаговременность прогноза для пунктов северных и южных островов составляет 0.5 – 1.5 час., что обеспечивает своевременную подачу тревоги и эвакуацию населения в безопасные места.

The results of numerical modeling of the process of short-term forecast of 2006 and 2007 local tsunamis on the Kuril Islands according to the data of the deep-sea level measurement stations closest to the islands are presented. The principal possibility of short-term forecasting of tsunamis occurring near the central Kuril Islands is shown. The forecast lead time for settlements of the northern and southern islands is 0.5 - 1.5 hours, which ensures timely warning and evacuation of the population to safe places.

Как известно, проблема оперативного прогноза цунами на Дальнем Востоке является актуальной, не вполне решенной задачей. При оценке степени опасности удаленных цунами, возникающих, например, у берегов Чили, время пробега которых до российского побережья около 22 – 23 часов, российские службы цунами ориентируются на данные о проявлении цунами на Гавайских островах и, как правило, адекватно определяют их опасность, своевременно объявляя тревогу, не подавая ложных тревог. Однако во время Чилийского цунами 2010 г. тревога цунами на Курильских островах была объявлена, отменена через 3 часа после прихода ввиду малых амплитуд головных волн. Максимальная волна амплитудой 1 м пришла в Северо-Курильск через 4 часа после первого вступления, к счастью, на фоне отлива и не нанесла ущерба. В случаях локальных цунами, возникающих в районе глубоководной Курило-Камчатской впадины, с пробегом до побережья 1 – 3 часа службы цунами располагают только сейсмологической информацией, используют магнитудно-географический критерий, предложенный в середине прошлого века, поэтому подают большое количество ложных тревог (свыше 75% от общего числа).

Обзор работ, посвященных различным способам оперативного прогноза цунами, дан в [1]. Современное состояние в области оперативного прогноза представлено в [2].

Землетрясения с магнитудами M= 8.3 и M=8.1 произошли 15.11.2006 и 13.01.2007 восточнее о. Симушир с эпицентрами на западном и восточном склонах глубоководного желоба. Согласно регламенту (при магнитудах более 7.5), немедленно были объявлены тревоги цунами на всем побережье Курильских островов, проведена эвакуация населения из опасных мест. На ближайших к очагу центральных Курильских островах заплески цунами составили до 20 м. Цунами 2006 г. нанесло ущерб в Кресент Сити на Западном побережье США. В то же время оба цунами на северных и южных Курильских островах были незначительными, не причинившими никакого ущерба.

В настоящей работе исследуется возможность оперативного прогноза цунами, возникающих в районе центральных Курильских островов: определение времен их прихода к населенным пунктам южных и северных островов, амплитуд волн, длительности тревожного режима,- при условии получения уровенной информации о цунами в открытом океане. Такой информацией могли бы быть данные глубоководных станций измерения уровня океана, расположенных на широтах центральных Курильских островов к востоку от глубоководного желоба в местах нынешних станций DART 21419 и 21402 (DART – Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunami - оценка и сообщение о цунами в океане [3]). С точки зрения заблаговременности прогноза оптимальным является положение станции DART 21419, к сожалению, установленной лишь в 2009 г. Интерес представляет выяснение, возможен ли заблаговременный достоверный прогноз цунами по данным этой станции в случае повторения ситуаций 2006 и 2007 гг.

Для решения этой задачи выполнен численный эксперимент по расчету (в дальнейшем – прогнозу) волновой формы цунами в населенных пунктах Курильских островов и острова

Хоккайдо по восстановленным (реконструированным) данным о цунами в точке 21419 (местонахождение станции DART 21419 в настоящее время). Реконструкция формы цунами в точке 21419 производилась по данным о цунами, полученным станцией DART 21414, пробег цунами до которой составлял около 2 час. Расположение станций, пунктов прогноза, а также положение эпицентров землетрясений представлены на рис. 1.

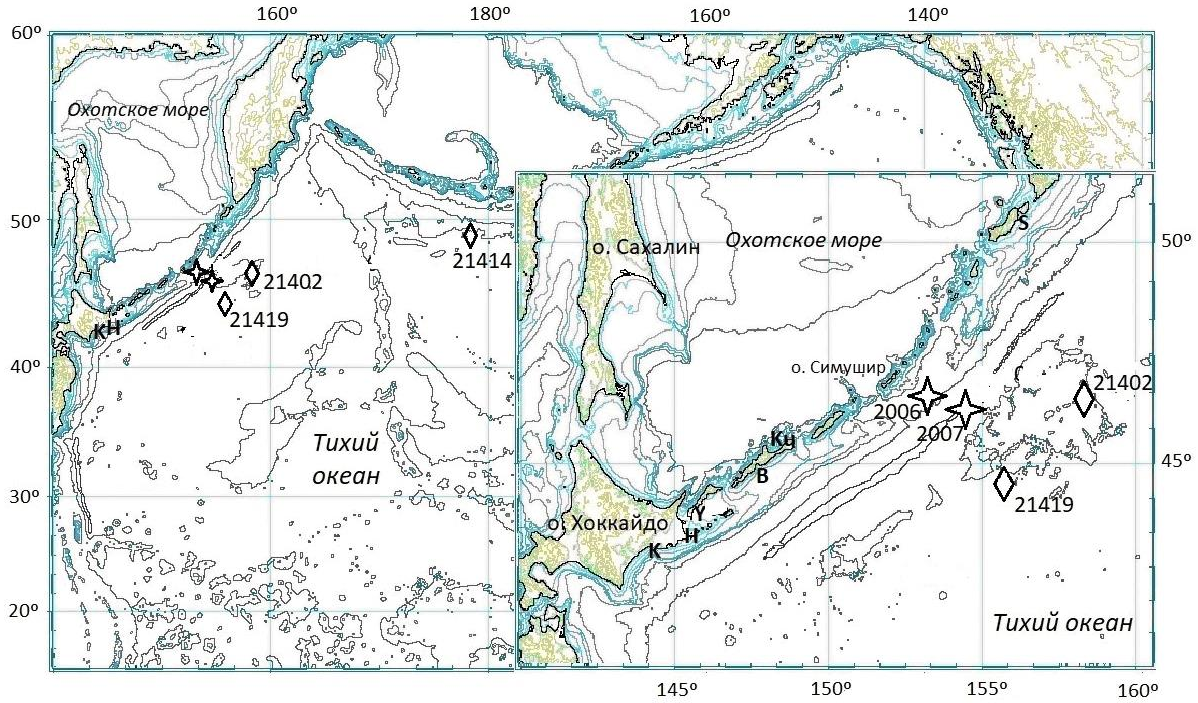


Рис. 1. Расчетная схема численного эксперимента. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений, ромбами – положения станций системы DART. На схеме обозначено: H – Ханасаки, K – Кусиро, Y – Южно-Курильск, B – Буревестник, Ku – Курильск, S – Северо-Курильск.

Реконструкция и в дальнейшем прогноз выполнялись способом оперативного прогноза цунами, описанным в [4]. Способ заключается в построении передаточной функции, позволяющей по данным о цунами в открытом океане рассчитывать форму ожидаемого цунами на побережье. Расчет по данным станции DART 21414 волновых форм цунами 2006 и 2007 гг. в точках в океане вдоль Алеутских островов и вблизи Западного побережья США выполнен ранее [5]. Расчетные формы хорошо совпали с зарегистрированными в этих точках станциями системы DART. Правильно рассчитаны начальные фазы (положительная или отрицательная амплитуды головной волны) цунами.

На рис. 2 (а, б) представлены исходные сигналы, зарегистрированные станцией DART 21414 в 2006 и 2007 гг., включающие шум, обусловленный сейсмическими причинами. Из записей удалены низкочастотные приливные составляющие. Дискретность записей станций DART в режиме регистрации цунами равна 1 мин. Та же дискретность и у других временных рядов, реконструированных и прогнозных. Ввиду удаленности станции DART 21414 от очага шум и собственно цунами хорошо разделяются. На записях близких к очагу станций (при временах пробега цунами 10 - 30 мин.) должно происходить наложение шума на полезный сигнал. Это обстоятельство может стать препятствием для получения адекватного прогноза.

На рис. 2 (в, г) изображены восстановленные формы (чистое цунами) в точке 21419 по данным станции DART 21414 длительностью 60 мин. от момента прихода волны в эту точку (рис. 2 (а, б)). На рис. 2 (д, е) представлены волновые формы, составленные из реконструированных форм (рис. 2 (в, г)) и возможных шумов сейсмического происхождения (цунами с шумом).

Прогноз для пунктов Курильских островов и о. Хоккайдо выполнен с использованием реконструированных данных станции DART 21419, как чистого цунами, так и цунами с шумом.

На рис. 3 представлены результаты прогноза цунами 2006 г. (левая колонка) по реконструированным данным с шумом станции DART 21419 (рис. 2 (д)) длительностью 30 мин.

от момента начала землетрясения для Ханасаки и Кусиро и сравнение с реальными записями. Результаты расчета по данным этой же станции без шума практически не отличаются. Качество прогноза достаточно высокое: правильно прогнозируются амплитуды, структура волн.

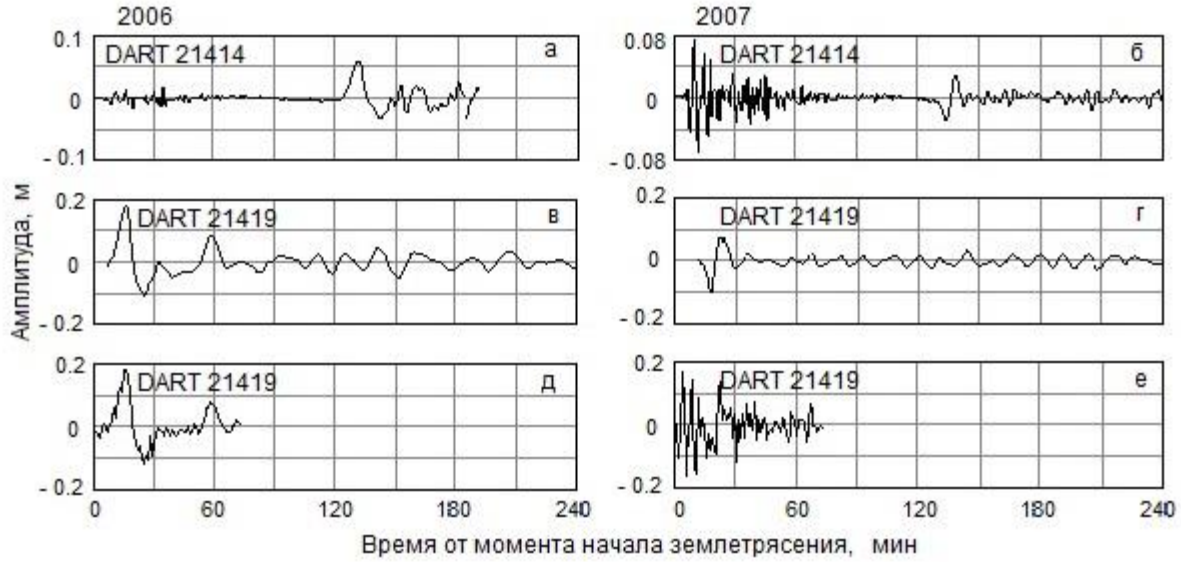


Рис. 2. Исходные и реконструированные данные.

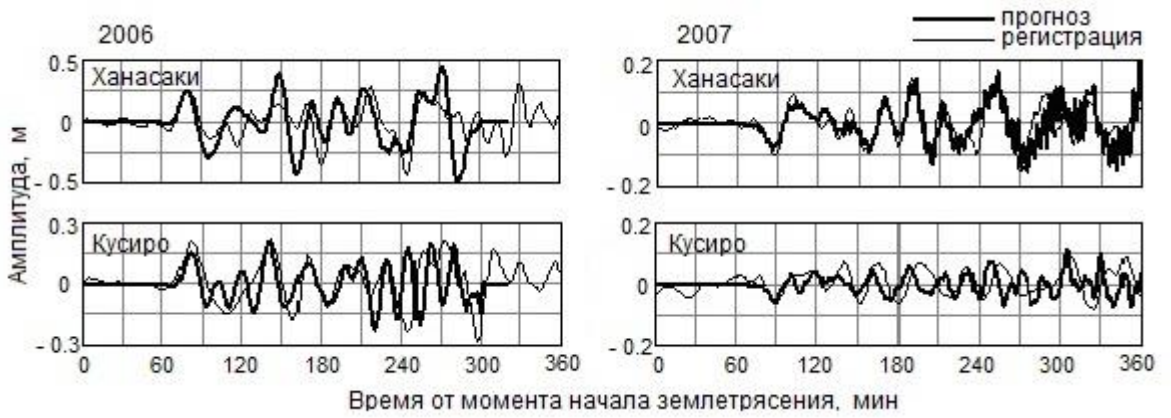


Рис. 3. Результаты прогноза цунами 2006 и 2007 г.

Результаты прогноза цунами 2007 г. и сравнение с реальными записями представлены на рис. 3 (правая колонка). Прогноз для Ханасаки и Кусиро выполнен по данным станции DART 21419 длительностью 35 мин. от начала землетрясения (рис. 2 (е)). Прогноз для Ханасаки по данным с шумом отличается от прогноза по данным о цунами без шума (рис. 2 (г)) наличием высокочастотных колебаний после 180 мин. Впрочем, наличие таких колебаний не может повлиять на принятие решения об объявлении тревоги цунами. Вопреки опасениям, прогноз по данным, осложненным шумом сейсмического происхождения, вполне адекватен. Прогнозы для Кусиро, выполненные по данным с шумом и без шума, практически не различаются.

Результаты прогноза для пунктов Курильских островов не приведены ввиду отсутствия регистрации цунами в этих точках и невозможности сравнения расчетных и фактических форм цунами. Тем не менее, возможно оценить заблаговременность прогноза для этих пунктов.

Заблаговременность, т.е. интервал времени между временем прихода цунами в заданный пункт и временем выработки прогноза определяется следующими факторами. Получение данных о координатах эпицентра землетрясения – через 11 – 15 мин после начала землетрясения, время от момента получения информации о координатах эпицентра, необходимое для построения передаточной функции, – около 15 мин. Суммарно, момент времени готовности прогноза – через 30 мин. после начала землетрясения. К этому моменту времени станцией DART 21419 может быть получена информация, позволяющая

идентифицировать цунами (в условиях эксперимента для расчетов выбирался первый период волны). Итого заблаговременность выполнения прогноза с учетом времен добегания цунами до населенных пунктов составляет для Южно-Курильска – 1.5 час., Буревестника (зал. Касатка о. Итуруп) – 34 мин., Курильска – около 20 мин., Северо-Курильска – около 1 часа.

Времена пробега цунами 2006 и 2007 гг. до берегов ближайших к очагу центральных Курильских островов (Матуа, Симушир и др.), не населенных в настоящее время, составляли около 20 мин., меньше, чем время, необходимое для регистрации и идентификации цунами станциями системы DART. В таких случаях прогноз по данным об уровне океана не применим.

Таким образом, показана возможность оперативного прогноза цунами, возникающих в районе центральных Курильских островов: оценки времен их прихода к населенным пунктам южных и северных островов, амплитуд волн, длительности тревожного режима.

Заблаговременный достоверный прогноз цунами в случае повторения ситуаций 2006 и 2007 гг. на северных и южных Курильских островах возможен при условии оперативного получения уровенной информации о цунами в открытом океане, например, по данным станции DART 21419. Заблаговременность прогноза составляет 0.5 – 1.5 час. Для центральных Курильских островов в подобных ситуациях прогноз на основе уровенной информации не возможен. Тревога цунами на этих островах должна объявляться в соответствии с действующим в настоящее время регламентом.

Численный эксперимент выполнен по реконструированным данным глубоководной станции измерения уровня океана DART 21419. При этом, ввиду близости уровенной станции к очагу цунами, реконструированные данные содержали шумы, обусловленные сейсмическими причинами. Вопреки опасениям, прогноз по данным, осложненным шумом сейсмического происхождения, вполне адекватен. Этот факт не является бесспорным утверждением, необходимы дальнейшие исследования.

Литература

1. Королев Ю.П., Шевченко Г.В. Оперативный прогноз цунами // История науки и техники. 2016. №6. С. 28 – 41.
2. Королев Ю.П. Оперативный прогноз цунами в Тихом океане // Геосистемы переходных зон. 2017. №2. С. 3 – 17. URL: http://journal.imgg.ru/c1_0001.htm (дата обращения 25.01.2018).
3. National Data Buoy Center. URL: http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml (дата обращения 23.01.2018).
4. Korolev Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 11. P. 3081–3091. doi:10.5194/nhess-11-3081-2011.
5. Королев Ю. П. О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 2. С. 32 – 47.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА ЦУНАМИ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА R-РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИЛЬЯПЕЛЬ ЦУНАМИ 16 СЕНТЯБРЯ 2015

Т.А.Воронина, канд.физ-мат.наук
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

RECOVERY OF 2015 ILLAPEL TSUNAMI SOURCE AND ESTIMATION OF OBSEVATION SYSTEM EFFICIENCY BY THE R-SOLUTION METHOD

T.A.Voronina, Ph.D.
The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia

Задача определения источника по измерениям формы пришедшей волны в серии удаленных приемников ставится как обратная задача математической физики. Численное моделирование основано на линейной теории мелкой воды. Аппроксимация задачи осуществляется на основе конечно-разностного подхода. Рассматриваемая задача относится к классу некорректных (условно-корректных) задач, для решения которой применяются метод наименьших квадратов и метод r-решений. Предложенная методика позволяет избежать неустойчивости численного решения рассматриваемой некорректной задачи и понять, как изменится результат инверсии при изменении используемой системы наблюдения.

The problem of the determining a tsunami source base on measurements of the tsunami waveforms recorded by remote receivers is set as inverse problem of mathematical physics. In this case, the numerical modeling is based on the linear shallow water theory. The problem in question is related to the class of ill-posed (conditionally correct) problems, for whose solution we use the method of least squares and the r-solution method. The approach proposed make possible to avoid the inevitable instability of the numerical solution to this ill-posed problem and, moreover, to understand how the inversion result will change with changing the observational system used.

16 сентября 2015 г. побережье Чили недалеко от столицы Сантьяго сотрясло мощное землетрясение в 8,3 балла, которое спровоцировало цунами. Эпицентр толчков (31.573°S, 72.674°W) располагался в 54 км к северо-западу от города Ильяпель, в 228 км к северу от столицы страны Сантьяго на глубине 22.4 км. За землетрясением последовал афтершок магнитудой 6,4. Национальная служба по чрезвычайным ситуациям Чили проинформировала о 4,5-метровых волнах цунами, обрушившихся на город Кокимбо. Около миллиона жителей эвакуированы. Жертвами землетрясения стали 11 человек. Источник землетрясения изучался многими исследователями с использованием различных геофизических данных, таких как сейсмограммы ближнего поля, телесейсмические сигналы и данные обратного прогноза, данных GPS и InSAR и мареограмм от береговых и глубоководных датчиков. Обзор и систематизация результатов приведены в работе [1]. Авторы резюмируют, что при некотором разнообразии пространственного распределения смещения поверхности океана в зоне предполагаемого источника цунами у разных авторов, высота поднятия меняется от 5 до 16 м, но, практически у всех максимальное смещение поверхности океана локализуется в (31°S, 72°W), что составляет 70 км северо-западнее эпицентра землетрясения, и по-видимому, распространяется на ось Атакамского желоба.

Главной целью настоящей работы является восстановление источника Чилийского цунами 16 сентября 2015 г. по мареограммам со станций DART: 32401, 32402, 32411, 32412, 43413.При этом речь идет о том, чтобы выбрать из этого набора наиболее эффективную систему наблюдения. Под эффективностью системы наблюдения понимается восстановление такой формы первоначального поднятия поверхности океана в районе, соответствующем пересечению обращенных лучей, которая дает наилучшее совпадение наблюденных и рассчитанных от восстановленного источника мареограмм в точках наблюдения. Другими словами, речь идет о выявлении наиболее “информативных” направлений, где должны располагаться приемники, относительно предполагаемого очага цунами.

Математическая постановка. Задача определения источника по измерениям формы пришедшей волны в серии удаленных приемников ставится как обратная задача математической физики. Рассматриваемая задача относится к классу некорректных (условно-корректных) задач, для решения которой применяются метод наименьших квадратов и метод *r*-решений [2], [3]. Подобно большинству обратных задач сейсмики, на практике численное решение, полученное математическими методами, становится неустойчивым в силу объективной зашумленности реальных мареографных записей. Предложенная методика позволяет избежать неустойчивости численного решения рассматриваемой некорректной задачи. Более того, метод позволяет понять, как изменится результат инверсии при изменении используемой системы наблюдения. Предполагается, что источником цунами является вертикальное смещение океанского дна, вызванное главным толчком землетрясения [2]

(поршневая модель цунами), так как продолжительность этого толчка была оценена в [1] примерно в 1,5 мин, что почти на порядок меньше длительности головного гребня цунами, зафиксированного на ближайшей к источнику придонной станции DART 32402. Численное моделирование основано на линейной теории «мелкой» воды. В работе не исследовались вопросы набегания волны на берег, полагая, что на «береговой» линии (50м глубины) выполняется условие абсолютно отражающей твердой стенки. На так называемых открытых границах в данной работе реализованы абсолютно поглощающие краевые условия второго порядка точности. Аппроксимация задачи осуществляется на основе конечно-разностного подхода. Кривизной Земли пренебрегается, что характерно при изучении региональных цунами. Математическая постановка задачи в этих предположениях состоит в определении первоначального поднятия свободной поверхности $\eta\ (x, y, t)$, описываемого некоторой финитной функцией $\varphi(x, y)$ *(это и есть первоначальная форма волны цунами – в нашем случае, источник цунами)* в области источника по колебанию уровня свободной поверхности, известному на некотором множестве точек – приемников *(система наблюдения*). При этом не используется априорная информация о форме источника цунами, лишь сама область источника считается известной из сейсмических данных. Неизвестная функция $\varphi\ (x, y)$ ищется в виде конечного отрезка ряда Фурье по пространственным гармоникам с неизвестными коэффициентами. Матрица оператора прямой задачи представляет собой отклики на каждую пространственную гармонику в каждой точке системы наблюдения. Понятно, что свойства полученной матрицы, а, следовательно, и решения зависят от батиметрии, конфигурации системы наблюдения и временного интервала наблюдений. Анализ сингулярного спектра полученной матрицы **A** позволяет судить о возможности восстановления функции источника при заданной системе наблюдения. Рассматриваемая задача относится к классу некорректных задач, решение которых требует применения методов регуляризации. Регуляризация оператора в этом случае осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой его r первых правых сингулярных векторов. Тем самым подпространство, в котором ищется решение, выбирается на основе анализа свойств сингулярного спектра оператора, которые определяются системой наблюдения и батиметрией. Задаваясь определенным числом обусловленности получившейся матрицы конечномерной системы, можно определить возможное число r. Меняя величину r, можно контролировать погрешность решения. Естественно, что с увеличением числа r повышается информативность получаемого r − решения. В конечном итоге величина r определяется поведением сингулярного спектра и уровнем помех в данных. Предлагаемый подход, при котором решение строится на основе анализа свойств оператора, определяемых выбранной системой наблюдения и реальной батиметрией, позволяет получить максимально надежный результат восстановления для заданных условий. Этот подход к решению задачи восстановления источника цунами был впервые предложен в 1998 г. Т.А. Ворониной и В.А. Чевердой в [4]. Результаты численного моделирования показали перспективность такого подхода [5].

Результаты численного моделирования. На рис. 1 изображена область моделирования - водная часть прямоугольника $\{(x; y): 102°W \le x \le 70°W;\ 12°N \le y \le 38°S\}$, покрытая 1-минутной сеткой с 1921×3001 точек согласно GEBCO bathymetry (http://www.gebco.net/). Область источника $\{71.6^{\circ}W \le x \le 73^{\circ}W;\ 30^{\circ}S \le y \le 32.5^{\circ}S\}$, покрытая сеткой из 77×151 точек.

В ходе численных экспериментов было выявлено, что данные с ДАРТ 32412 существенно влияют на результат инверсии: отсутствие этой мареограммы заметно ухудшало результат, даже, если все остальные четыре использовались. Наличие данных с самых удаленных ДАРТов 32411 и 43413 не оказывает заметного влияния на результат восстановления. Другими словами, использование наблюденных мареограмм с ДАРТов 32402, 32401 и 32412 дает результат, такой же, что и с использованием всех пяти наблюденных мареограмм (см. Рис.2). Так как от количества гармоник, достаточного для наиболее полного представления функции источника, зависит не только время работы алгоритма (сколько раз надо решить прямую задачу), но и вычислительная погрешность, то вопрос количества гармоник также исследовался. Количество необходимых гармоник определяется батиметрией, в рассматриваемом случае получилось, что по горизонтали следует брать не более 3-4 гармоник, а по вертикали 6-8. На Рисунке 2 представлены результаты инверсии для различных наборов мареограмм и гармоник в представлении неизвестной функции.

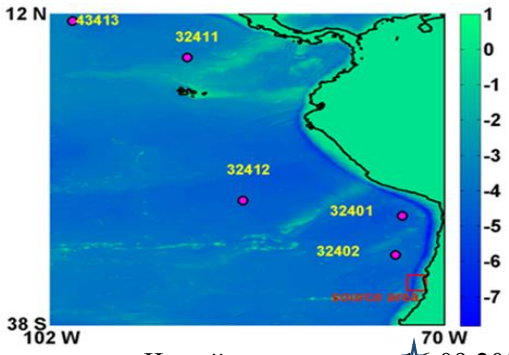


Рис. 1: Область моделирования для Чилийского цунами 16.09.2015. Система регистрации волны цунами, состоящая из глубоководных буёв ДАРТ, с указанием их номеров, отмечена пурпурными кружками, область источника - красный квадрат, эпицентр землетрясения - белая звёздочка, черная линия - нулевая высота над уровнем океана, шкала высот в километрах, по горизонтали – долгота, по вертикали – широта в градусах.

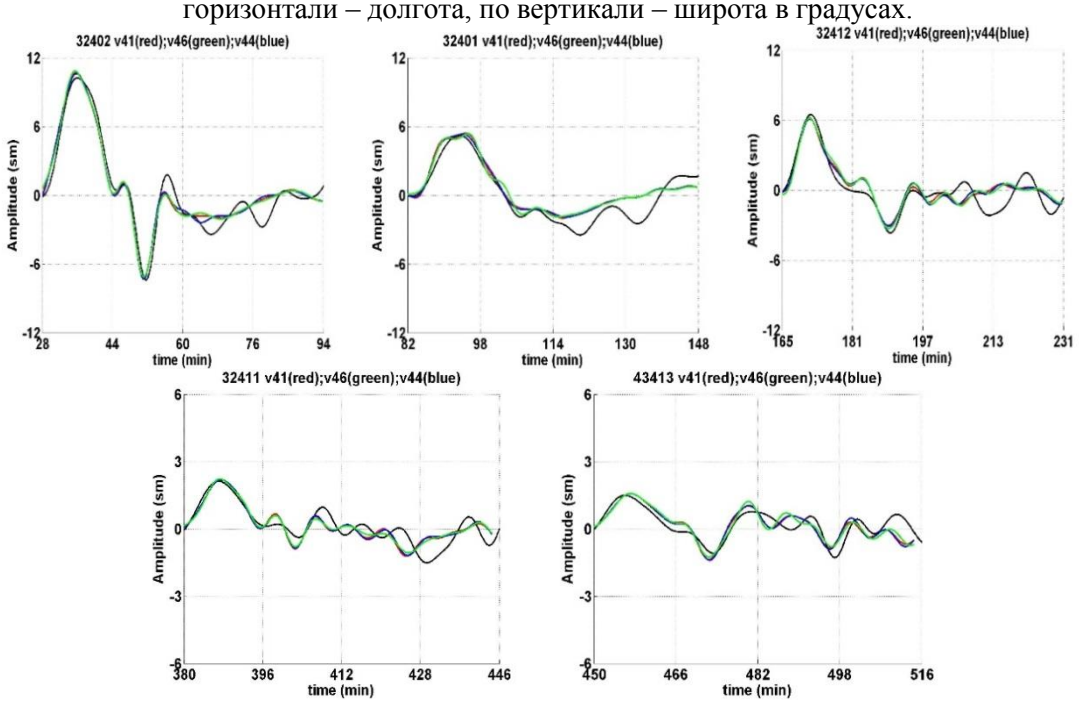


Рис.3. Графики наблюдённых мареограмм (черная линия) в приемниках {1, 2, 3, 4, 5} и вычисленных от восстановленных источников, представленных на рис. 2. Ось амплитуд в сантиметрах; по горизонтали показано время в минутах от начала события. Сверху указан номер ДАРТа; v- номер варианта. Все эксперименты проводились для числа *к=38*; варианты v41 и v44 -использовались все 5 мареограмм, а в варианте v46 – только первые три.

Сравнение этих графиков позволяет говорить об адекватности предложенного подхода к решению обратной задачи восстановления первоначальной формы волны цунами. Следует особо подчеркнуть хорошее совпадение не только мареограмм, участвовавших в инверсии, но и мареограмм в точках ДАРТов которые не использовались для решения обратной задачи.

Установлено, что результат восстановления существенно зависит от пространственного распределения регистрирующей системы относительно предполагаемого очага цунами, количества регистраторов, особенностей рельефа дна и уровня шумов.

Литература

1. Satake, K. and Heidarzaden, M.A review of source models of the 2015 Illapel, Chile Earthquake and insights from tsunami data//Pure Appl. Geophys. 2017. V.174. Issue 19,doiI 10.1007/s00024-016-1450-51.
2. Voronin, V.V., Voronina, T.A., and Tcheverda, V.A. Inversion method for initial tsunami waveform reconstruction // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. V. 15, P. 1251-1263.
3. Voronina, T.A., and Romanenko, A.A. The new method of tsunami source reconstruction with r-solution inversion method // Pure Appl. Geophys. 2016. V173, Issue 12, P.4089-4099.
4. Voronina, T.A., and Tcheverda, V.A. Reconstruction of tsunami initial form via level oscillation // Bull. Nov. Comp. Center. Math. Model. inGeoph. 1998. V.4, P.127–136.
5. Воронина Т.А. Восстановление источника цунами и выбор оптимальной системы наблюдения на основе метода r-решений // СибЖВМ РАН. Сиб. отд., Новосибирск, 2016, Т19, №4, С.343-356.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А.Кихтенко
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

PROBABILISTIC TSUNAMI HAZARD ASSESSMENT BASED ON NUMERICAL SIMULATION

V.A.Kikhtenko
Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

В докладе обсуждается задача вычисления оценок цунамиопасности в терминах вероятности превышения некоторых пороговых характеристик события, например высоты волны, в заданный промежуток времени. Исходными данными для такого рода оценок являются каталоги исторических сведений о цунамигенных землетрясениях в исследуемой области и результаты массового сценарного моделирования волн цунами. Рассматриваются вопросы вычислительно-эффективного построения таких оценок. Приводятся результаты применения предлагаемой методики для некоторых участков Дальневосточного побережья России.

The report discusses the problem of assessing tsunami hazard as a probability for a wave metric (e.g. maximum height) to exceed certain threshold value during specified period of time. The input data for such assessments are the historical tsunamigenic earthquake catalogs in studied region and the results of bulk simulations of tsunami wave generation and propagation. Computationally efficient methods of obtaining such estimates are considered. Results of applying proposed methods to some sections of the Far East coast of Russia are presented.

Основной задачей долговременной оценки цунамиопасности является представление имеющихся знаний об этом явлении и возможном ущербе от него в терминах понятных специалистам по строительству и эксплуатации зданий и сооружений, а также сотрудникам служб предупреждения о чрезвычайных ситуациях и смягчения их последствий. С этой целью рассматриваются различные характеристики как самой волны цунами, например, ее высота на линии уреза, так и параметры заплеска, такие как высота наката, глубина и длительность затопления, а также скорость возникающих потоков. Кроме того, рассматривается задача оценки цунамириска, т.е. ущерба наносимого волной, который может быть представлен такими характеристиками как число жертв или величина материальных потерь. Результаты оценки цунамиопасности для отдельных береговых пунктов и объектов могут быть представлены в виде кривых зависимости одной или нескольких вышеназванных характеристик от частоты наступления события такой величины. Оценки же для участков побережья представляются в виде карт цунамиопасности для фиксированных значений частоты события. Обсуждаемая задача может решаться для различных пространственных масштабов. В работе [1] выделяются три основных уровня: локальный (масштаб карт 1:2 000 — 1:10 000), нацеленный на предоставление данных для проектирования и строительства в цунамиопасной береговой зоне; региональный (1:500 000 — 1:2 000 000), предназначенный для идентификации районов, требующих детального цунамирайонирования; и глобальный (1:10 000 000 и мельче), обеспечивающий компактное представление информации об относительной цунамиопасности различных регионов мирового океана.

Среди многообразия методов оценки цунамиопасности можно выделить три основных подхода, которые будем называть эмпирическим, детерминистским и вероятностным.

Эмпирический подход заключается в непосредственном использовании данных наблюдений цунами, которые аппроксимируются некоторыми вероятностными распределениями. В силу того, что цунами является весьма редким явлением, этот метод сталкивается с очевидной недостаточностью данных наблюдений, что особенно ярко проявляется при рассмотрении катастрофических событий с источниками большой магнитуды. В то же время этот подход не требует вычислительно трудоемкого моделирования.

Детерминистский подход состоит в определении характеристик воздействия цунами на защищаемый пункт с помощью численного моделирования. При этом либо рассматривается выбранный на основе экспертных соображений наиболее характерный источник цунами, либо ставится оптимизационная задача на поиск наиболее опасного источника. Этот подход позволяет оценивать опасность цунами для регионов, в которых отсутствуют какие-либо данные наблюдений цунами, и моделировать воздействие источников произвольной мощности. Однако, он не позволяет оценить зависимости между количественными характеристиками проявления цунами и вероятностью возникновения катастрофического события.

Вероятностный подход (PTHA – Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) предполагает определение характеристик воздействия волны цунами на защищаемый пункт с помощью

сценарного моделирования *всего многообразия* геофизически обоснованных источников цунами. Этот подход позволяет оценить зависимости между количественной характеристикой опасности цунами и вероятностью его возникновения и при этом не опирается на данные непосредственных наблюдений волн. Основными трудностями вероятностного подхода являются, во-первых, более высокие (по сравнению с детерминированным подходом) требования к моделям источников цунами, в частности к сейсмотектонической модели исследуемого региона. А во-вторых, существенная вычислительная трудоемкость, так как этот подход требует проведения массовых сценарных расчетов. Подробный обзор различных аспектов вероятностного подхода можно найти в [2], здесь же будут рассмотрены способы организации расчетов, направленные на уменьшение объема массового сценарного моделирования.

Постановка задачи. Пусть воздействие цунами на побережье представляется в виде Пуассоновского потока событий. Тогда вероятность возникновения события в заданный период времени определяется соотношением: $P(I(s) > I_{thre}, T) = 1 - exp(-w(I(s) > I_{thre}) * T)$, где $I(s)$ – количественная характеристика проявления волны цунами в защищаемом пункте s, I_{thre} – пороговое значение этой величины, $w(I(s) > I_{thre})$ – средняя частота превышения порога. Таким образом, исследуемый поток событий полностью определяется своей средней частотой и основной целью является вычисление зависимости этой величины от I_{thre}.

В силу свойств пуассоновских потоков искомая средняя частота может быть представлена как сумма частот всех возможных событий, обеспечивающих превышение порогового значения характеристики:

$$w(I(s) > I_{thre}) = \int_{\Omega} z(I(s) > I_{thre}|Q)w(Q)dQ, \quad (1)$$

где $Q \in \Omega$ – цунамигенный источник, который полностью определяется точкой в пространстве наборов параметров Ω, $z(I(s) > I_{thre} \mid Q)$ – вероятность превышения порогового уровня опасности в пункте s под действием волны, порожденной источником Q, $w(Q)$ – средняя частота возникновения источника Q, которая определяется для сейсмотектонической модели рассматриваемой территории. Интегрирование в (1) обусловлено непрерывностью пространства Ω, соответственно $w(Q)$ имеет смысл плотности потоков с соответствующими параметрами.

В простейшем случае функция z определяется как индикаторная функция, которая принимает значение 1, если по результатам сценарного моделирования источник Q приводит к превышению порогового уровня в береговом пункте s, и 0 – иначе. Возможны и другие определения, например, эта функция может иметь смысл ожидаемого ущерба от события Q, дальнейшие рассуждения остаются справедливыми и для таких постановок. Вычисление интеграла (1) сопряжено с двумя трудностями.

Во-первых, пространство Ω является существенно многомерным. Так, в использованной авторами модели сейсмического источника Подьяпольского-Гусякова-Окады – 10 измерений [3]. Это делает невозможным применение традиционных квадратурных формул. Выполненное в [4] исследование степени значимости всех этих параметров хотя и подтверждает хорошо известный факт преобладающего значения магнитуды, положения и глубины очага подводного землетрясения, но, в то же время, показывает, что в определенных условиях все рассматриваемые параметры оказываются значимыми и их нельзя полностью игнорировать при проведении оценки цунамиопасности.

Во-вторых, вычисление функции z является весьма трудоемким, т.к. включает в себя численное моделирование волны цунами. Один такой расчет требует десятков cpu-часов на современном процессоре. Таким образом, возникает задача разработки алгоритмов интегрирования, с приемлемой скоростью сходимости на минимально возможном числе вычислений подынтегральной функции.

Упрощенный метод. Вычисление интеграла в (1) возможно путем выбора конечного набора событий на основе экспертных соображений. При этом для упрощения оценки частоты возникновения таких модельных событий вся исследуемая область разбивается на некоторые условно однородные зоны (УОЗ), внутри которых характеристики сейсмичности можно считать постоянными. Для каждой УОЗ задается интервал возможных магнитуд землетрясений, который в свою очередь разбивается на подынтервалы. Таким образом, пространство возможных цунамигенных землетрясений Ω разбивается на подмножества Ω_i, которые будем называть классами. Средняя частота событий каждого класса $w(\Omega_i)$ может быть оценена как

напрямую по количеству событий исторического каталога землетрясений, соответствующих данному классу, так и путем экстраполяции закона Гутенберга-Рихтера в область больших магнитуд, там, где непосредственное использование каталога невозможно из-за отсутствия в нем событий таких магнитуд.

Далее, для каждого класса на основе экспертных соображений выбирается набор представительных событий Q_{ij}. Общая частота повторяемости событий класса равномерно делится на всех представителей. Тогда искомая частота превышения значения пороговой характеристики вычисляется как:

$$w(I(s) > I_{thre}) = \sum_i \frac{N_i(I(s)>I_{thre})w(\Omega_i)}{N_i}, \quad (2)$$

где N_i – общее число модельных событий i-ого класса, $N_i(I(s) > I_{thre})$ – число модельных событий обеспечивающих превышение значения пороговой характеристики.

Очевидно, что в данном случае качество получаемых результатов напрямую зависит от того насколько полно выбранный набор покрывает все пространство параметров цунамигенных событий. В то же время такой подход позволяет при выборе параметров учитывать экспертные представления о сейсмотектонике исследуемой зоны и исключать из рассмотрения заведомо неопасные сценарии. Таким образом, становится возможным получение осмысленных оценок по относительно небольшому набору сценариев.

Метод Монте-Карло. Выделим общую частоту всех рассматриваемых событий $w(Q) = W * p(Q)$, так что $\int_\Omega p(Q)dQ = 1$. Здесь W имеет смысл средней повторяемости всех возможных цунамигенных событий, а $p(Q)$ — плотность распределения значений их параметров. Тогда интеграл цунамиопасности принимает вид

$$w(I(s) > I_{thre}) = W \int_\Omega z(I(s) > I_{thre}|Q)p(Q)dQ. \quad (3)$$

Плотность $p(Q)$ и значение W можно оценить по историческому каталогу землетрясений и экспертным знаниям о сейсмичности рассматриваемой области. Теперь искомый интеграл можно вычислить методом Монте-Карло, используя $p(Q)$ в качестве плотности распределения для генерируемой случайной выборки. Соответствующая случайная величина будет отражать реальную сейсмичность рассматриваемой области, что позволяет упростить задачу валидации полученных результатов, т.к. становится возможной экспертная оценка степени такого соответствия по сгенерированной выборке и, при необходимости, ее коррекция. Однако, такая случайная величина плохо подходит для интегрирования, порождая большое количество модельных источников небольшой магнитуды, которые вносят малый вклад в окончательную оценку цунамиопасности. В то же время, при небольшом размере выборки источники большой магнитуды оказываются недопредставленными, что может привести к существенному искажению реальной цунамиопасности. Интегрирование методом Монте-Карло можно производить, используя любое распределение, носитель плотности которого включает носитель подынтегральной функции, поскольку в этом случае:

$$\int_\Omega \frac{z(I(s)>I_{thre}|Q)p(Q)}{p^*(Q)} p^*(Q)dQ = \int_\Omega z^*(I(s) > I_{thre}|Q)p^*(Q)dQ. \quad (4)$$

При этом искомый интеграл принимает тот же вид, но с другой функцией плотности распределения. Этой свободой можно воспользоваться с целью сокращения объема необходимых расчетов. Так, если выбрать плотность $p^*(Q)$ независящей от реальной сейсмичности региона, например, используя равномерные распределения по всем параметрам, то при изменении сейсмотектонической модели, выраженной в $p(Q)$, можно избежать пересчета дорогостоящих значений функции z. Кроме того, как известно, наилучшая сходимость достигается, когда новая плотность $p^*(Q)$ оказывается пропорциональной исходному подынтегральному выражению $z(I(s) > I_{thre}|Q)p(Q)$, что минимизирует дисперсию интегрируемой величины. Такой выбор практически нереализуем, но можно приблизиться к нему, используя априорные знания о функции z. Скорость сходимости можно улучшить также методом «многостадийного Монте-Карло» с адаптивным выбором случайных величин на основе эмпирической дисперсии.

Оценка цунамиопасности Дальневосточного побережья России. Упомянутые выше подходы были использованы при построении обзорных карт цунамиопасности для Дальневосточного побережья России. Оценка параметров сейсмичности проводилась по историческому каталогу HTDB/WLD [5]. Распространение волн моделировалось с использованием нелинейных уравнений теории мелкой воды, учитывающих сферичность

Земли и силы Кориолиса. Эти расчеты проводились с использованием программного комплекса MassGlobalCalc, ядро которого реализует конечно-разностный алгоритм, основанный на схеме Мак-Кормака [6]. В качестве характеристики опасности рассматривалась максимальная высота волны на линии уреза. Каждый сценарный модельный расчет позволял определить эти значения сразу для всех береговых пунктов рассматриваемой акватории.

Основная часть данных, используемых при расчетах, хранится в единой базе данных PostgreSQL. В их число входят: исторический каталог землетрясений, параметры модельных источников, координаты системы защищаемых береговых пунктов, а также параметры сейсмотектонических моделей. Такой подход позволяет гибко обращаться к этим данным sql-запросами и использовать разнообразные методы их индексирования без разработки специализированных программ. Исключение составляют результаты модельных расчетов, которые хранятся в файлах формата GeoTIFF и HDF со сжатием, т.к. хранение этих относительно больших числовых массивов в базе данных существенно снижает её производительность. Вся предварительная и пост-обработка осуществляется в интерактивной оболочке Jupyter на языке Python.

Для визуализации результатов разработана интерактивная веб-карта WTMap. Она отображает вдольбереговое распределение высот цунами, которые могут быть превышены с заданной вероятностью в течение заданного временного промежутка. Параметры расчета могут быть изменены в интерактивном режиме. Помимо этого на картах могут быть отображены кривые повторяемости для выбранного защищаемого пункта. Система WTMap разработана в рамках методологии функционального реактивного программирования на языке javascript и использует библиотеку веб-картографии Leaflet. Одна из полученных картосхем цунамиопасности приведена на рис. 1 (см. вклейку).

Заключение. Методика PTHA представляет собой прочный базис для решения задачи оценки цунамиопасности в практических целях. В то же время, некоторые аспекты этой методики все ещё остаются нерешёнными научными проблемами. В их число входит уменьшение вычислительной трудоемкости, что возможно как разработкой математической технологии, снижающей число необходимых сценарных расчетов, так и ускорением самих сценарных расчетов за счет использования новых математических моделей, современных аппаратных и программных средств. Кроме того, существенную трудность представляет собой разработка сейсмотектонических моделей для областей цунамигенных землетрясений при наличии только довольно кратких и неполных исторических каталогов, а также оценка входящих в них алеаторных и эпистемических неопределенностей. Эти вопросы остались за пределами доклада. Еще одной актуальной задачей является повышение точности оценок за счет интеграции новых исходных данных, таких как результаты палеосейсмических исследований. Исследования в этих направлениях, а также непрекращающийся рост производительности вычислительных систем дают надежду на возможность существенного уточнения имеющихся в настоящее время оценок цунамиопасности.

Литература

1. Гусяков В.К. Методы и проблемы оценки цунамиопасности морских побережий // Фундаментальная и прикладная геофизика, 2017, Т. 10, № 3, С. 26-38.
2. Grezio A. et al. Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple Sources and Global Applications // Reviews of Geophysics. – 2017.
3. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism.Soc. Am. 1985. V.75, N 4. P.1135-1154.
4. Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б. К вопросу о сравнительной значимости параметров очагов цунамигенных землетрясений [Электронный ресурс] // Шестая научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России»: Петропавловск-Камчатский, 1-7 октября 2017 г. - 2017. - С.1-5. - http://emsd.ru/conf2017lib/pdf/tsunami/kihtenko.pdf
5. HTDB/WLD (Historical Tsunami Database for the World Ocean), 2000 BC to Present, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk, 2016, http://tsun.sscc.ru/nh/tsunami.php
6. Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., and Gusyakov V.K. Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations // E.Krause et al. (Eds.): Comp. Science & High Perf. Computing III, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2008. V.101. P. 52-68.

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Д.С.Гладских[1,2], Д.А.Сергеев[1], канд.физ-мат.наук, Г.А.Байдаков[1], канд.физ-мат.наук,
И.А.Соустова[1], д-р физ-мат.наук, Ю.И.Троицкая[1], д-р физ-мат.наук
[1]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
[2]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия

THERMAL REGIME OF INLAND WATER OBJECTS: FIELD MEASUREMENTS AND NUMERICAL SIMULATION

D.S.Gladskikh[1,2], D.A.Sergeev[1], Ph.D., G.A.Baydakov[1], Ph.D., I.A.Soustova[1], Dr.Sc., Yu.I.Troitskaya[1], Dr.Sc.
[1]Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
[2]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia

Представлены результаты натурных исследований и численного моделирования термического режима внутренних водоемов. Для моделирования использовалась одномерная модель, реализованная в программном комплексе LAKE, разработанном В.М.Степаненко. Предложена модификация программного комплекса, затронувшая процедуру задания входных данных и учета ветрового воздействия на процессы перемешивания. Представлены результаты его валидации с использованием натурных данных на примере озерной части Горьковского водохранилища, продемонстрировавшие хорошее согласие с реальными сезонными изменениями термического режима.

The results of the field measurements and the numerical simulation of thermal regime of inland water objects are presented in the research. One-dimensional model, realized in the LAKE program complex, developed by V.M.Stepanenko, is used for the simulation. Its modification, that caused changing the procedure of input data assignment and led to the greater consideration of wind influence on mixing, is proposed, and the results of its validation with an example of Gorky water reservoir with field measurement data, which are in good agreement with real seasonal changes in thermal regime, are presented.

Исследование термического режима внутренних водоемов представляет интерес для широкого спектра задач: распределение температуры является важнейшим фактором, влияющим на экологические и биологические процессы во внутренних водных объектах и необходимым для прогнозирования ряда таких процессов. В работах [1-2] установлено существенное влияние температурной стратификации на эвтрофикацию внутренних водоемов, в том числе на рост биомассы диатомовых и вредоносных сине-зеленых водорослей. Термический режим характеризуется существенной сезонной и кратковременной изменчивостью, в связи с процессами перемешивания, индуцированного ветром.

Стандартным способом получения натурных данных о термическом режиме является использование свободно падающего CTD-зонда. Эти данные используются для валидации моделей, позволяющих рассчитывать распределение температуры и реализованных в виде программных кодов. Одномерная модель, не требующая высокой вычислительной мощности и позволяющая получать результаты, отвечающие экспериментальным данным, используется в программном комплексе LAKE [3], разработанном В.М.Степаненко (МГУ). Нами была предложена модификация данного программного комплекса и его валидация для условий равнинного водохранилища среднего размера на примере озерной части Горьковского водохранилища (56,7 с.ш., 43,3 в.д.). Модель основана на одномерном уравнении теплопроводности, для параметризации турбулентного теплообмена используется E-ε-параметризация [4], основанная на уравнениях кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации.

Натурные исследования. Натурные данные об изменениях термического режима Горьковского водохранилища были получены нами в ходе экспедиций в период 2014-2017 гг. Измерения распределения температуры по глубине проводились с помощью свободно падающего CTD-зонда, который фиксировал значения температуры 6 раз в секунду. При скорости опускания, равной 24 см/сек, это обеспечивало разрешение по глубине около 4 см. В ходе каждой экспедиции производилось несколько измерений. Из огромного массива данных наибольший интерес представляют данные 2014 и 2017 гг., имеющие существенные различия в температурном режиме. Это связано с различиями в метеорологической обстановке: 2014 характеризуется интенсивной солнечной радиацией, высокой температурой воздуха и более слабым ветром, а 2017 - слабым прогревом и сильным перемешиванием, индуцированным ветром. Таким образом, температурные профили, полученные в 2014, отличаются существенным перепадом температур и сильной стратификацией, тогда как в 2017 наблюдались практически однородные по глубине профили.

Численное моделирование. Модификация программного комплекса. Программный комплекс LAKE, который использовался нами для численного моделирования термического режима, написан на языке Fortran. В качестве входных данных используется начальный температурный профиль (полученный в начале сезона), метеорологические параметры каждого дня, для которого решается задача моделирования, и физические параметры, которые задаются один раз для всего исследуемого периода. Модификация затронула процедуру задания входного профиля, обеспечила возможность использования данных натурных измерений в начале сезона в качестве стартовых профилей и учет ветрового воздействия на процессы перемешивания, что позволило более точно воспроизводить основные формы температурной стратификации.

В исходной версии программного комплекса LAKE начальный температурный профиль задавался по разности температур между дном и поверхностью и между поверхностью и глубиной перемешанного слоя. Рассматривались 3 точки: значение на поверхности, на нижней границе перемешанного слоя и на границе вода-грунт. В модифицированной нами версии модели начальный профиль задается произвольно – он считывается из файла, содержащего значения температуры на различной глубине. Это позволяет более полно воспроизводить температурную стратификацию термоклинного типа, что весьма характерно для равнинных гидрологических объектов среднего размера.

Помимо начального профиля, на входе в программу поступает файл с метеоданными, такими как: температура воздуха, атмосферное давление, удельная влажность воздуха, скорость выпадения осадков, зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, солнечная радиация и длинноволновое излучение атмосферы. Эти данные были получены комбинированным способом: часть данных была взята из архивов метеостанции г.Городец (такие данные, как температура воздуха, атмосферное давление, удельная влажность воздуха, интенсивность выпадения осадков) другая часть – из данных метеорологического реанализа NCEP/NCAR (данные о ветре, солнечной радиации и встречном излучении атмосферы). Шаг по времени для метеоданных составлял 6 часов. Данные о скорости ветра используются для расчета напряжения трения на границе вода-атмосфера входящего в граничное условие для кинетической энергии. Ранее использовалась эмпирическая параметризация, не учитывающая особенности подстилающей поверхности внутренних водоемов:

$$\tau = 1.273 * 10^{-3} * w_r,$$

где $w_r = \sqrt{u^2 + v^2}$, а $uиv$– зональная и меридиональная составляющие скорости ветра. Мы же воспользовались уточненной формулой (см. [5]):

$$\tau = 1.2 * (1.274 * 10^{-3} * wr + 3.4 * 10^{-4} * wr^2 + 4.9 * 10^{-5} * wr^3).$$

Значения основных физических параметров, используемых в модели, а именно коэффициента экстинкции и коэффициента генерации турбулентности за счет обрушения волн, задавались либо на основе данных измерений, либо подбирались исходя из условия наилучшего соответствия результатов расчетов реальным данным. Так коэффициент экстинкции, характеризующий прозрачность среды, задавался на основе измерений с помощью диска Секки, с использованием теории, развитой в [6], и был установлен равным 2,5 $м^{-1}$. В отличие от него коэффициент генерации турбулентности за счет обрушения волн был выбран равным 10, для наилучшего соответствия прогнозов измерениям.

Анализ результатов моделирования. На рис.1 представлено сравнение рассчитанных и измеренных значений температуры на разных горизонтах: z = 0 м (поверхность воды), 1м, 3м и 8 м (вблизи дна). Хорошо видно, что чем больше глубина, тем различия меньше, что лишний раз подтверждает большую изменчивость и сложность физических процессов в приповерхностном слое, обусловленных в первую очередь ветроволновым взаимодействием.

Также сравнивались формы профилей для характерных случаев (см. рис.2). Продемонстрировано, что расчеты хорошо воспроизводят общую форму распределения во всех случаях. Однако наилучшего количественного совпадения удалось достичь для режимов сильного перемешивания с практически нулевой стратификацией.

Если же характеризовать результаты сопоставления натурных данных и прогнозов интегрально, то можно заметить, что рассчитанное среднеквадратичное отклонение по температуре по всему ансамблю реализаций 2017, оказалось равным 0,4 градуса, а для 2014 года - 1 градус, что является очень неплохим результатом по сравнению с использованием

первоначальной версии [3], которая демонстрировала среднеквадратичное отклонение порядка 2-3 градусов.

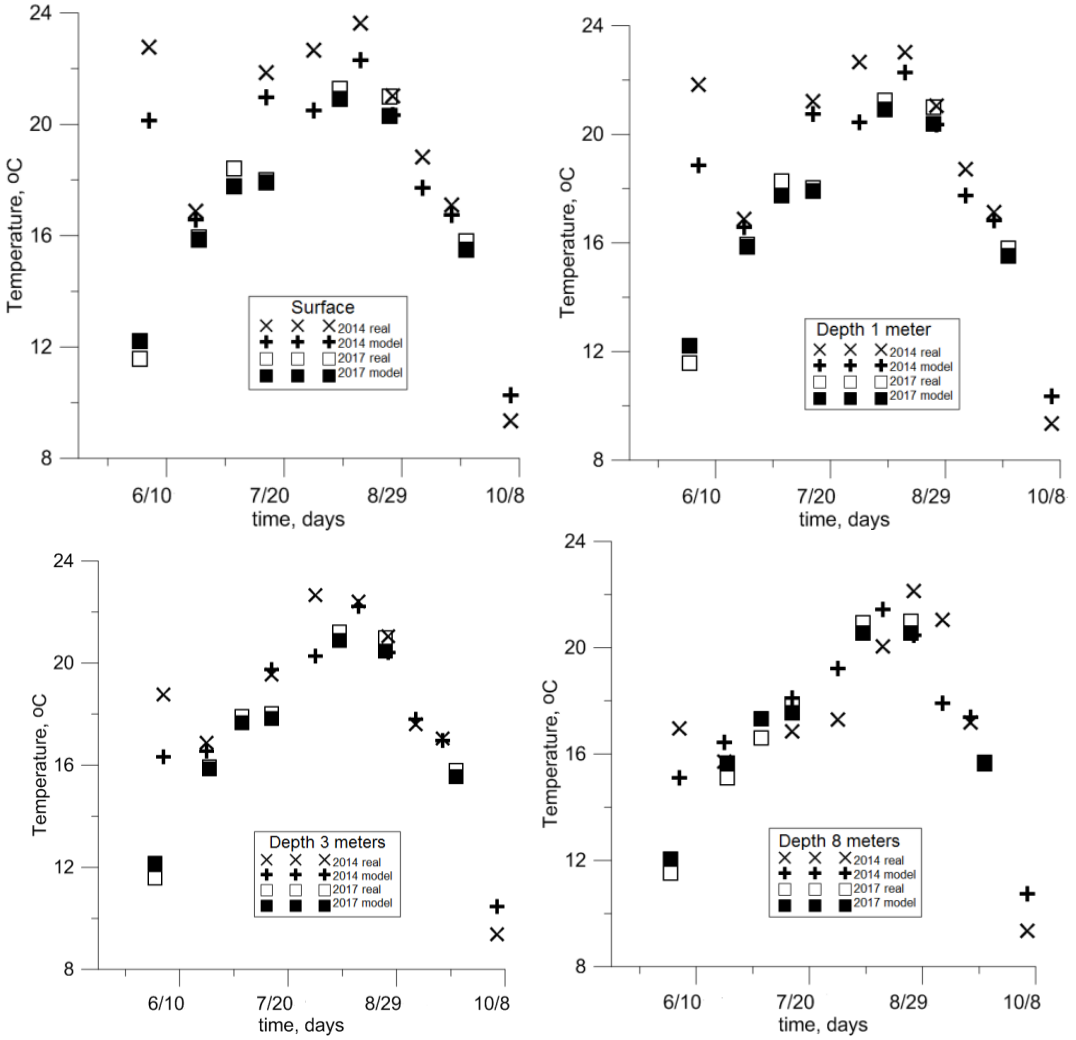


Рис. 1. Значения температур на разных горизонтах: поверхность, глубина 1 м, 3 м, 8 м.

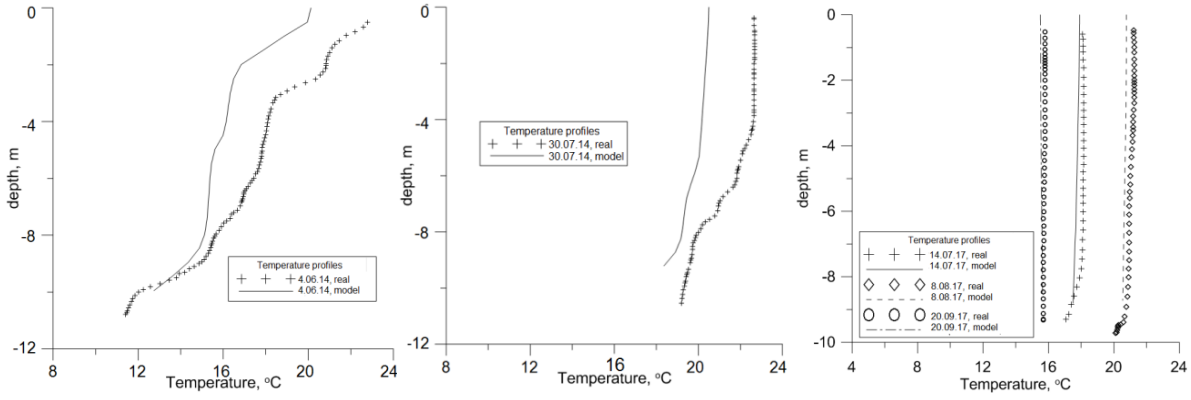


Рис. 2. Реальные и модельные температурные профили с сильной стратификацией 2014 год и сильным перемешиванием 2017 год.

Выводы. В работе представлены результаты натурных исследований и численного моделирования термического режима внутренних водоемов. Выполнена модификация программного комплекса LAKE, затронувшая процедуру задания входных данных и учета ветрового воздействия на процессы перемешивания. Для валидации модели использовались данные натурных измерений, полученные в ходе экспедиционных работ на полигонах Горьковского водохранилища. Результаты численных расчетов описывают основные

наблюдаемые сезонные изменения температурного режима в озерной части Горьковского водохранилища.

Наибольшего согласия удалось добиться для режимов с сильным перемешиванием и практически нулевой стратификацией: форма распределения и значения температур были воспроизведены предельно точно. В случае режимов с существенной стратификацией результаты продемонстрировали меньшую точность в значениях температур, однако основные особенности форм распределения были воспроизведены. Таким образом, модельные результаты для 2017 года продемонстрировали лучшее соответствие данным натурных измерений, чем результаты для 2014 года при одних и тех же физических параметрах.

Недостаточная точность в моделировании режимов с сильной стратификацией может быть обусловлена недостаточно адекватным воспроизведением процессов при слабом ветре и интенсивной солнечной радиации, а также не совсем корректными метеоданными. Последние берутся из данных глобального реанализа на очень грубой сетке 2.5°×2.5°.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 17-05-41117, 18-05-00265, 18-05-00292, 18-35-00602.

Литература

1. Горбунов М.Ю. Вертикальное распределение бактериохлорофиллов в гумозных озерах Волжско-Камского заповедника (респ.Татарстан) // Поволжский экологический журнал. 2011. № 3. С.280-293.
2. Bernard O., Rémond B. Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth // Bioresource Technology. 2012. V.123. P.520–527.
3. Степаненко В.М. Численное моделирование термического режима мелких водоемов // Вычислительные технологии. 2005. Т.10, ч.1. С.100-106.
4. Лыкосов В.Н. О проблеме замыкания моделей турбулентного пограничного слоя с помощью уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. С. 696–704.
5. Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I. Adjusting of wind input source term in WAVEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment // Hindawi Publishing Corporation, Advances in Meteorology. 2016. V.2016. P.13.
6. Иванов А.В., Троицкая Ю.И., Папко В.В., Сергеев Д.А., Байдаков Г.А., Вдовин М.И., Казаков В.И., Кандауров А.А., Афанасьева И.М., Донскова О.В., Шувалова Н.М. Стратификация как фактор влияния на качество вод равнинного водохранилища // Приволжский научный журнал. 2015. №2(34). С.149-156.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОДВОДНЫХ ЛИДАРОВ С МОДУЛИРОВАННЫМИ ПУЧКАМИ ПОДСВЕТКИ

А.Г.Лучинин, д-р физ-мат.наук, Л.С.Долин, канд.физ-мат.наук, М.Ю.Кириллин, канд.физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

INFORMATION PROPERTIES OF UNDERWATER LIDARS WITH MODULATED ILLUMINATION BEAMS

A.G.Luchinin, Dr.Sc., L.S.Dolin, Ph.D., M.Yu.Kirillin, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Предложен метод зондирования макронеоднородностей коэффициента рассеяния воды с помощью лидара, зондирующий пучок которого модулируется по мощности высокочастотным узкополосным сигналом, а в приемной системе детектируется переменная составляющая сигнала обратно рассеяния на частоте модуляции. Исследована возможность диагностики слоистых рассеивающих структур в воде с помощью такого лидара. Предложена аналитическая модель сигнала обратного рассеяния лидара и сформулированы ограничения ее применимости. Показано, что разрешающая способность лидара по отношению к пространственным неоднородностям коэффициента рассеяния воды может быть оценена по частотной характеристике сигнала обратного рассеяния. Приведены примеры расчета разрешающей способности и оценен диапазон пространственных масштабов неоднородностей, которые могут быть разрешены лидаром с модулированным зондирующим пучком. Расчет проведен на основе данных о частотных характеристиках сигнала обратного рассеяния, полученных ранее с помощью численного моделирования методом Монте-Карло. Как показывают полученные оценки, предложенный метод открывает возможности диагностики структур неоднородностей с масштабами, ранее недоступными для измерений.

A technique for sensing macro inhomogeneities of water scattering coefficient is proposed based on probing with a lidar beam modulated in power by a high-frequency narrow-band signal and detecting the variable component of the backscatter signal at the modulation frequency. The possibility of diagnostics of layered scattering structures in water with such a lidar is investigated. An analytical model of the lidar backscattering signal is proposed and limitations of its applicability are formulated. It is shown that the spatial resolution of a lidar with respect to the spatial inhomogeneities of the water scattering coefficient can be estimated from the frequency response of the backscattering signal. Spatial resolution is calculated and the range of inhomogeneities sizes resolved by the lidar with a modulated probing beam is estimated. The calculation is based on the frequency characteristics of the backscattering signal obtained earlier employing numerical Monte Carlo simulations. The estimates show that the proposed technique provides the possibility of diagnosing structure of inhomogeneities with scales previously inaccessible for measurements.

Ранее было показано, что при распространении синусоидально модулированных световых полей в рассеивающих средах могут наблюдаться волновые эффекты, аналогичные хорошо известным в классической теории электромагнитного поля [1-6]. Так, поведение высокочастотной огибающей светового поля в ряде случаев может описываться известными соотношениями теории дифракции и интерференции волн. Вероятно, в связи с этим по отношении к этой огибающей получили распространение термины волна модуляции или волна фотонной плотности. Построение приборов для диагностики различных объектов, основанных на использовании пучков подсветки с высокочастотной модуляцией, может оказаться привлекательным с точки зрения получения новой информации о свойствах этих объектов.

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей диагностики подводных слоистых структур с помощью лидара с высокочастотной модуляцией зондирующего пучка. При исследовании характеристик сигнала обратного рассеяния (СОР) от среды с макроненоднородностями коэффициента рассеяния сделаем следующие допущения.

1. Основываясь на результатах работы [4], в которой рассматривались временные и частотные особенности СОР для однородной среды, будем считать, что продольная (вдоль трассы зондирования) диффузия фотонов практически не влияет на формирование сигнала обратного рассеяния. Это означает, что при зондировании среды с неоднородным вдоль трассы коэффициентом рассеяния модулированным по мощности пучком на входе фотоприемника формируется переменная составляющая СОР, комплексная амплитуда которой может быть представлена в виде:

$$P(\omega_0) = P_0 M \int_0^\infty b_b(z)\eta(z)\exp\left(-\frac{2i\omega_0 z}{c}\right)dz\,, \qquad (1)$$

где $f_0=\omega_0/2\pi$ – частота модуляции, P_0 – средняя мощность источника, M – коэффициент модуляции излучаемого светового потока, b_b – коэффициент рассеяния назад, $\eta(z)$ - «коэффициент передачи» стационарного сигнала от диффузно отражающей плоскости, расположенной на расстоянии z от лидара, c – скорость света в воде. Предполагается, что

источник и приемник расположены на границе полубесконечной среды в плоскости z=0. Явное выражение для функции $\eta(z)$ через распределения облученности в поперечном сечении пучка можно найти, например, в [6].

2. Будем считать, что коэффициент рассеяния и коэффициент рассеяния в направлении назад могут быть представлены в виде суммы:

$$\begin{aligned} &b = \bar{b} + b_1(z),\ b_b = \overline{b_b} + b_{b1}(z)\ при\ z \geq 0, \\ &b = 0,\ b_b = 0\ при\ z < 0 \end{aligned} \tag{2}$$

где $\bar{b}$ и $\overline{b_b}$ - средние по трассе зондирования величины этих коэффициентов. Кроме того, как указывалось выше, допустим, что справедливы неравенства:

$$b_1 \ll \bar{b},\ b_{b1} \ll \overline{b_b} \tag{3}$$

При выполнении этих условий можно не учитывать изменения коэффициента передачи $\eta(z)$ за счет влияния неоднородностей. В этом случае соотношение (1) с учетом (2) можно преобразовать следующим образом:

$$P(\omega_0) = 2\pi P_0 M \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{b}_b(k)\tilde{\eta}\left(\frac{2\omega_0}{c} - k\right)dk\,. \tag{4}$$

где $\tilde{\eta}(k)$ и $\tilde{b}_{b,b1}(k)$ спектры функций η и b_b в области пространственных частот

3. Поскольку распределение $b_{b1}(z)$ более корректно считать случайным, представляется целесообразным получить статистическую оценку чувствительности лидара с модулированной подсветкой по отношению к различным масштабам изменения этой функции. Для статистически однородного распределения макронеоднородностей из (4) следует соотношение для дисперсии оценки уровня СОР на частоте модуляции ω_0:

$$\overline{\Delta P(\omega_0)^2} = (2\pi P_0 M)^2 \int_{-\infty}^{\infty} G(k)\eta^2\left(\frac{2\omega_0}{c} - k\right)dk\ , \tag{5}$$

где черта означает статистическое усреднение по ансамблю неоднородностей коэффициента рассеяния и $G(k)$ - спектральная плотность этих неоднородностей. Если допустить, что спектр неоднородностей равномерен в узком интервале пространственных частот $\Delta k = k_2 - k_1$, таким образом, что его можно записать в виде $G(k) = G_0 \Delta k \delta(k - k_0)$, где $k_0 = (k_2 + k_1)/2$, то соотношение (5) преобразуется к виду

$$\overline{\Delta P(\omega_0)^2} = (2\pi P_0 M)^2 G_0 \Delta k \eta^2\left(\frac{2\omega_0}{c} - k_0\right)\,. \tag{6}$$

В свою очередь из (2), (4) и (6) следует, что коэффициент вариации СОР по переменной составляющей на частоте модуляции ω_0 определяется формулой:

$$\sqrt{\overline{\delta P^2(\omega_0)}} = \frac{\sqrt{G_0 \Delta k}}{b_b} \frac{|\eta(0)|}{|\eta(\omega_0)|} = \frac{\sqrt{G_0 \Delta k}}{b_b} |\Phi(\omega_0)| \tag{7}$$

Соотношение (7) показывает, что чувствительность лидара по отношению к пространственным гармоникам распределения коэффициента обратного рассеяния воды обратно пропорциональна нормированному частотному спектру СОР.

Для того чтобы получить количественные оценки искомых величин, конкретизируем некоторые существенные параметры задачи. Будем считать, что источник и приемник находятся на фиксированном расстоянии r друг от друга в плоскости, перпендикулярной направлению зондирования, зондирование осуществляется узким пучком, радиус приемной апертуры равен 0.1 м и ширина приемной диаграммы 120°. Коэффициенты рассеяния и поглощения воды равны 0.16 1/м и 0.04 1/м соответственно. Импульсные и частотные характеристики СОР, полученные путем статистического моделирования при этом наборе параметров приведены в работе [4]. Воспользовавшись приведенными в этой работе данными, нетрудно получить необходимые частотные зависимости функции $|\Phi(\omega_0)|$.

Как следует из результатов расчета [4], высокочастотный диапазон модуляции пучка подсветки ($f_0 = \omega_0/2\pi > 10^9$ Гц) мало пригоден для целей диагностики макронеоднородносей

коэффициента рассеяния, поскольку в этом участке спектра формирование СОР в значительной степени определяется интерференционными эффектами, связанными с взаимным расположением пучка подсветки и приемника. Поэтому, ограничиваясь диапазоном частот $f<10^9$ Гц, приведем, полученные на основе [4] частотные зависимости функции $\left|\Phi\left(f_0\right)\right|$ при различных расстояниях между приемником и излучателем r.

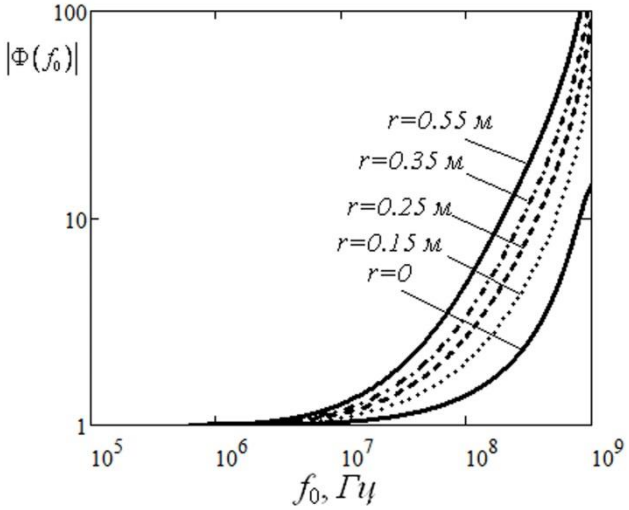


Рис. 1. Передаточная функция лидара с модулированным пучком подсветки в зависимости от частоты модуляции f_0 при различных величинах r.

Другой мерой избирательной способности лидара с модулированным пучком может служить зависимость функции передачи контраста от частоты модуляции зондирующего пучка для фиксированной спектральной гармоники коэффициента обратного рассеяния.

$$\Phi\left(\omega\right)=\frac{\left|\eta\left(\omega-\omega_0\right)\right|}{\left|\eta\left(\omega\right)\right|}, \tag{8}$$

где $\omega_0=\frac{k_0 c}{2}$. Как следует из рисунков 1 и 2 избирательная способность лидара по отношению к пространственным гармоникам коэффициента обратного рассеяния растет по мере увеличения пространственной частоты (уменьшения пространственного периода λ) периодической структуры коэффициента обратного рассеяния. Это увеличение проявляется наиболее заметно при конечных значениях расстояний между источником и приемником r и практически исчезает при r=0. В этом случае СОР формируется исключительно слоем воды, непосредственно прилегающим к лидару, и характер пространственного распределения неоднородностей фактически не играет никакой роли. При удачном (правильном) сочетании геометрических характеристик лидара можно измерить пространственный спектр неоднородностей в распределении коэффициента обратного рассеяния путем свипирования частоты модулирующего сигнала в нужном диапазоне, ограниченном указанными выше условиями.

Хотя приведенный выше анализ диагностических возможностей лидара с модулированной подсветкой проведен на частном примере лидара с конкретной геометрией пространственно-угловых характеристик и наборе оптических характеристик среды, он позволяет высказать соображения достаточно общего характера. Укажем основные из них: частотная характеристика сигнала обратного рассеяния (коэффициент передачи СОР) позволяет оценивать разрешающую способность лидара по отношению к пространственным неоднородностям коэффициента рассеяния; диапазон разрешаемых пространственных частот неоднородностей коэффициента рассеяния ограничен. Низкие пространственные частоты не могут быть разрешены вследствие значительного затухания зондирующего пучка на нескольких периодах соответствующей пространственной гармоники коэффициента рассеяния. Ограничение сверху связано с интерференционными эффектами на частоте модуляции, обусловленными геометрией лидара. Как показывают оценки, при выбранной геометрии

лидара масштабы неоднородностей, которые могут быть разрешены лидаром с модулированным пучком подсветки, находятся в диапазоне 0.1–1 м.

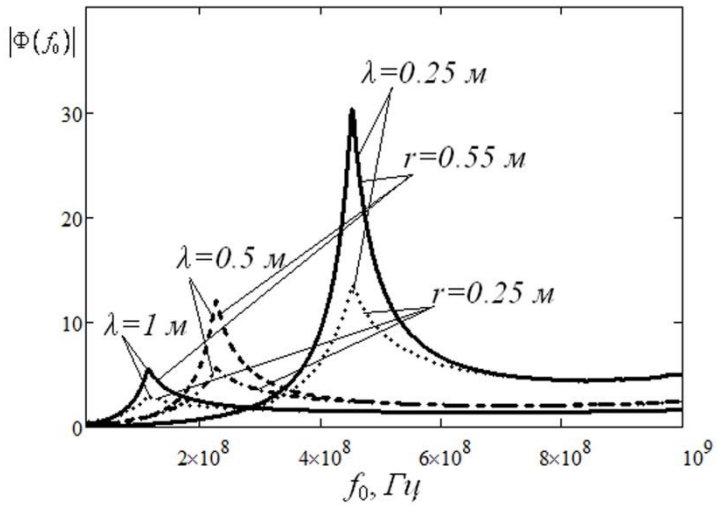


Рис. 2. Функция $\Phi(f_0)$ при различных значениях $k_0 = 2\pi/\lambda$ и базы r.

Выполненный анализ и приведенные примеры относятся к плоскослоистым структурам в распределении коэффициента рассеяния. Однако его применение правомерно и для трехмерных неоднородностей, если масштабы их изменений в направлениях, ортогональных направлению зондирования больше характерной ширины пучка.

В силу ряда причин физического и конструктивного характера исследование структуры неоднородностей с масштабами изменения менее метра недоступны для современных средств измерения. В частности, наиболее распространенные погружаемые приборы для измерения коэффициентов ослабления воды должны иметь длину оптического плеча несколько дециметров. Кроме того, исследование вертикальных распределений гидрооптических характеристик требует зондирования толщи воды погружаемым прибором. Такое зондирование сопровождается неизбежным захватом околоприборной массы воды при погружении и подъеме измерительного прибора и плохо контролируемым изменением глубины за счет низкой точности измерения глубины и погрешности, вносимой качкой надводного носителя. Поэтому изложенный выше метод зондирования может быть полезен для исследования тонкой структуры оптических характеристик воды.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-05-00987а).

Литература

1. Лучинин А.Г., Савельев В.А.. О распространении синусоидально модулированного светового пучка в рассеивающей среде// Изв. Вузов. Радиофизика. 1969. № 2. С. 256-262.
2. Лучинин А.Г. Пространственный спектр узкого синусоидально модулированного пучка света в анизотропно рассеивающей среде//Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. № 12. С. 1312-1317.
3. Долин Л.С. О рассеянии синусоидально-модулированного излучения на статистических объектах// Изв АН СССР 1978. №10. С. 1025-1033.
4. Luchinin A.G., Kirillin M. Yu. and Dolin L. S. Backscatter signals in underwater lidars: temporal and frequency features// Appl. Opt. 2017. V. 56 (в печати).
5. Luchinin A.G. and Kirillin M. Yu. Temporal and frequency characteristics of a narrow light beam in sea water// Applied Optics. 2016. V. 55, P. 7756-7762.
6. Долин Л.С., Савельев В.А. О характеристиках сигнала обратного рассеяния при импульсном облучении мутной среды узким направленным световым пучком//Изв АН СССР 1971. №5. С. 505-510.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИДАРНОГО ЭХО-СИГНАЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СИЛЬНО ЭВТРОФИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ

Л.С.Долин, канд.физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

STATISTICAL MODEL OF LIDAR ECHOES FOR THE OPTICAL MONITORING OF HIGHLY EUTROPHIC WATERS

L.S.Dolin, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Получены формулы для расчета статистических моментов лидарного сигнала, рассеянного водной средой со случайно-неоднородными показателями поглощения и обратного рассеяния. Проанализирована зависимость средней интенсивности эхо-сигнала и его флуктуаций от оптических характеристик воды.

Formulas for calculating statistical moments of a lidar signal scattered by water with randomly inhomogeneous absorption and backscattering are obtained. The dependence of average intensity of the echo signal and its fluctuations on the optical characteristics of water is analyzed.

Существующие методы интерпретации результатов лазерного зондирования морей и внутренних водоемов базируются на теории распространения света в мутных средах с однородными или регулярно-неоднородными оптическими свойствами [1-5]. Между тем, в реальных условиях оптические характеристики воды – показатели поглощения и рассеяния, могут заметно флуктуировать, т.е. случайным образом изменяться во времени и пространстве. Особенно большие флуктуации первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) наблюдаются во внутренних водоемах в период цветения воды, и эти флуктуации должны учитываться при построении алгоритмов определения концентрации растворенного и взвешенного в воде вещества по лидарным эхо-сигналам. Известно, что слой мутной среды с заданным количеством поглощающего вещества имеет минимальную прозрачность при однородном распределении поглотителя в слое, а флуктуации его концентрации увеличивают среднюю прозрачность слоя (эффект «решета»)[5]. Аналогичные эффекты могут проявляться и при лазерном зондировании водной среды со случайно-неоднородными ПГХ. Цель данной работы заключается в теоретическом исследовании влияния флуктуаций показателей поглощения и рассеяния воды на характеристики сигнала упругого обратного рассеяния – статистически средний сигнал и дисперсию его относительных флуктуаций. Изложенная в работе теория в определенной степени подобна теории пространственных шумов, возникающих в оптических томограммах биотканей из-за флуктуаций их оптических характеристик [5-7]. Различие между двумя теориями обусловлено в основном тем, что в работах по томографии анализировался двумерный сигнал, а здесь будет исследоваться одномерный сигнал – энергия принимаемого светового импульса как функция горизонтальной координаты лидара или времени посылки зондирующего импульса. С такими сигналами приходится иметь дело в случаях, когда лидар не позволяет разделять отклик среды на парциальные эхо-сигналы, приходящие с различных глубин, как это имеет место при зондировании вод с очень низкой прозрачностью или при регистрации сигналов флуоресценции.

Модель лидарного эхо-сигнала строилась в предположении, что ПГХ флуктуируют по нормальному закону, а характерный пространственный масштаб их неоднородности превышает горизонтальный размер объема (V_w) воды из которого приходит рассеянный сигнал, но может быть малым по сравнению с вертикальным размером этого объема. Случайная реализация эхо-сигнала находилась в приближении однократного обратного рассеяния с учетом уширения эффективных диаграмм направленности излучателя и приемника из-за многократного рассеяния света «вперед». Для расчета уширения этих диаграмм использовалось решение уравнения переноса излучения в малоугловом диффузионном приближении для произвольно стратифицированной мутной среды [8]. Оптические свойства воды характеризуем показателями поглощения (a), рассеяния (b), ослабления ($c = a + b$), вероятностью (p_b) и показателем ($b_b = bp_b$) обратного рассеяния, индикатрисой рассеяния $x(\gamma)$ и параметром $\Lambda = b/c$ (альбедо однократного рассеяния).

Пространственное распределение показателя ослабления в рассеивающем объеме V_w в момент его зондирования (t) через точку поверхности ($\mathbf{r}$) представляем в виде суммы 2-х профилей $c(\mathbf{r},z,t)=\bar{c}(z)+\Delta c(\mathbf{r},z,t)-$ регулярного ($\bar{c}$) и случайного Δc, который характеризуем корреляционной функцией вида

$$B_c(\varsigma)=\overline{\Delta c(\mathbf{r},z+\varsigma/2,t)\Delta c(\mathbf{r},z-\varsigma/2,t)}=d_c\cdot ch^{-2}\left(\varsigma/\varsigma_0\right), \qquad (1)$$

где $d_c=B_c(0)=\overline{(\Delta c)^2}$ и ς_0 – дисперсия и радиус корреляции флуктуаций показателя ослабления. Аналогичным образом будем описывать распределения показателей поглощения и обратного рассеяния воды. Флуктуации характеристик рассеяния «вперед» учитывать не будем, поскольку их влияние на эхо-сигнал не является существенным.

Случайные значения энергии эхо-сигнала находились из уравнений

$$W=A\int_0^\infty b_b(z)\exp\left[-\varphi(z)\right]\frac{dz}{\Sigma(z)},\quad A=\frac{(1-R_F)^2\pi r_r^2\vartheta_r^2}{2m_w^2}W_s,\quad \varphi(z)=2\int_0^z a_1(z')dz', \qquad (2\ \text{a,b,c})$$

$$\Sigma(z)=\pi(r_s^2+r_r^2)+\pi(\vartheta_s^2+\vartheta_r^2)(H+z/m_w)^2+2\pi d_x\int_0^z b_1(z-\varsigma)\varsigma^2 d\varsigma, \qquad (3)$$

$$a_1(z)=a(z)+2b_b(z),\quad b_1(z)=b(z)-2b_b(z),\quad d_x=(1/2)\int_0^{\pi/4}\gamma^2 x(\gamma)\sin\gamma\, d\gamma, \qquad (4\ \text{a,b,c})$$

где R_F – коэффициент отражения Френеля водной поверхности, r_s, r_r и $2\vartheta_s, 2\vartheta_r$ – радиусы апертур и апертурные углы излучателя и приемника, $H-$ высота подъема лидара над водной поверхностью, $m_w=1.33$ – показатель преломления воды, d_x – дисперсия малоугловой части индикатрисы рассеяния, a_1 и b_1 – показатели поглощения и рассеяния вспомогательной мутной среды, которая имеет такой же как у реальной среды показатель ослабления, но не рассеивает свет на большие углы. Для упрощения записи формул (2) – (4) в аргументах всех функций опущены переменные $\mathbf{r}$ и t, за счет изменения которых формируется ансамбль случайных реализаций эхо-сигнала.

Статистические моменты эхо-сигнала. Если предположить, что флуктуации показателей поглощения и рассеяния взаимно коррелированны, т.е. флуктуирует показатель ослабления с сохранением параметра Λ, то расчет статистических моментов W можно выполнить, полагая в (2) – (4)

$$a_1=kc,\ k=(1-\Lambda+2\Lambda p_b),\ b_b=\Lambda p_b c,\ b_1=(1-2p_b)\Lambda c, \qquad (5\ \text{a,b,c,d})$$

и задав корреляционную функцию поля флуктуаций показателя ослабления в виде (1). В этом случае при условии $\bar{c}=const$ статистически среднее значение энергии эхо-сигнала находится из уравнений

$$\overline{W}=A_c\int_0^\infty\left[1-\exp\left(-\bar{\varphi}(z)+d_\varphi(z)/2\right)\right]f(z)\,dz,\quad A_c=\frac{\Lambda p_b A}{2\left(1-\Lambda+2\Lambda p_b\right)}, \qquad (6\ \text{a,b})$$

$$\bar{\varphi}(z)=2k\bar{c}z,\ f(z)=\Sigma^{-2}\left(d\Sigma/dz\right),\ d_\varphi(z)=4k^2d_c\varsigma_0^2\ln\left(ch(z/\varsigma_0)\right). \qquad (7\ \text{a,b,c})$$

Дисперсию флуктуаций энергии сигнала $d_W=\overline{\left(W-\overline{W}\right)^2}$ можно рассчитать с помощью формул

$$d_W=A_1^2\int_0^\infty\int_0^\infty\exp\left(-\bar{\varphi}(z_1)-\bar{\varphi}(z_2)+\frac{d_\varphi(z_1)}{2}+\frac{d_\varphi(z_2)}{2}\right)\left[\exp\left(d_\varphi(z_{\min})\right)-1\right]f(z_1)f(z_2)\,dz_1\,dz_2, \qquad (8)$$

$$z_{\min}=\begin{cases}z_1, & z_1<z_2\\ z_2, & z_1>z_2\end{cases}. \qquad (9)$$

Аналогичные модели статистических моментов эхо-сигнала были построены для случаев, когда флуктуирует только показатель поглощения или показатель обратного рассеяния. При этом корреляционные функции $B_a(\varsigma)$ и $B_b(\varsigma)$ полей Δa и Δb_b задавались в виде

$$B_a(\varsigma) = d_a \cdot ch^{-2}\left(\varsigma/\varsigma_0\right),\ d_a = \overline{(\Delta a)^2},\quad B_b(\varsigma) = d_b \cdot ch^{-2}\left(\varsigma/\varsigma_0\right),\ d_b = \overline{(\Delta b_b)^2}.$$

В левой части рис. 1 приведены примеры расчета параметра K, характеризующего влияние мелкомасштабных флуктуаций ПГХ на статистически средний эхо-сигнал. Этот параметр определяется выражением $K = (\overline{W} - W_0)/W_0$, где $\overline{W}$ и W_0 это средняя энергия эхо-сигнала при наличии и в отсутствие флуктуаций ПГХ. Расчеты выполнены для 3-х случаев: флуктуирует только показатель поглощения – кривая a); флуктуирует только показатель обратного рассеяния – кривая b); флуктуирует показатель ослабления при неизменном значении альбедо однократного рассеяния – кривая c). По оси абсцисс отложены значения коэффициентов вариации $\delta_a = \sqrt{d_a}/\overline{a}$, $\delta_b = \sqrt{d_b}/\overline{b}_b$ и $\delta_c = \sqrt{d_c}/\overline{c}$ указанных ПГХ. Правая половина рисунка показывают, каким образом в указанных 3-х случаях коэффициент вариации энергии эхо-сигнала $\delta_W = \sqrt{d_W}/\overline{W}$ зависит от коэффициента вариации оптических характеристик воды.

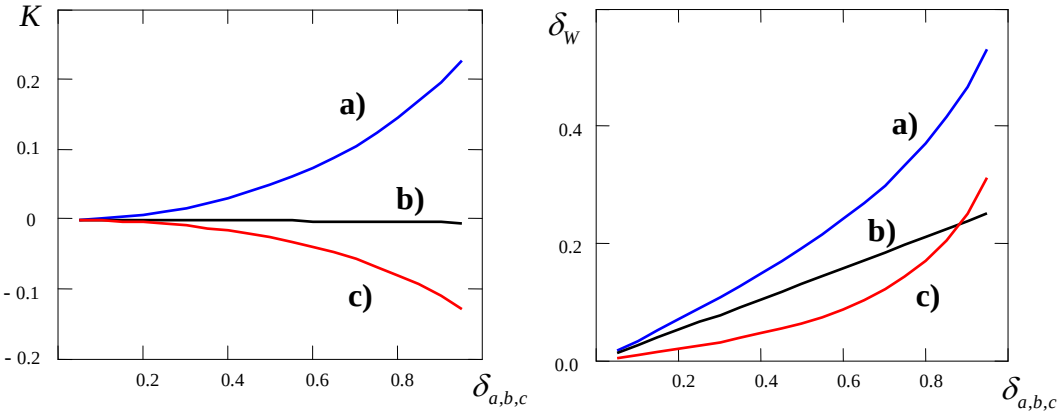


Рис.1. Зависимость параметров K (слева) и δ_W (справа) от коэффициентов вариации $\delta_{a,b,c}$ показателей поглощения, обратного рассеяния и ослабления при значениях $\overline{c} = 3.6$ м$^{-1}$, $\Lambda = 0.4$, $p_b = 0\ 02$, $d_x = 0.04$, $\varsigma_0 = 1/\overline{c}$, $H = 2$ м, $r_r = 7$ см, $2\vartheta_r = 1^0$.

Заключение. Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1) Влияние флуктуаций концентрации растворенного и взвешенного в воде вещества на лидарный эхо-сигнал в основном вызывается изменением локальных значений показателей поглощения и обратного рассеяния. Вариации показателя рассеяния «вперед» слабо проявляются в отраженном сигнале.

2) Флуктуации показателя поглощения приводят к увеличению статистически среднего значения энергии отраженного водой сигнала, что объясняется «просветлением» среды из-за флуктуаций показателя поглощения (эффект «решета») и увеличением толщины водного слоя, из которого приходит эхо-сигнал.

3) Флуктуации показателя обратного рассеяния приводят к уменьшению средней энергии эхо-сигнала, что объясняется наличием корреляции между флуктуациями показателя обратного рассеяния и флуктуациями потерь энергии сигнала на трассе его распространения, возникающими из-за флуктуаций показателя обратного рассеяния. Наиболее сильно эффект ослабления среднего эхо-сигнала проявляется при пространственно коррелированных флуктуациях показателей рассеяния и поглощения (когда флуктуирует показатель ослабления воды при неизменном значении альбедо однократного рассеяния).

4) Флуктуации показателя поглощения и флуктуации показателя обратного рассеяния при соответствующих значениях альбедо однократного рассеяния могут вносить примерно одинаковый вклад во флуктуации эхо-сигнала. Пространственная корреляция между флуктуациями этих ПГХ проявляется в заметном уменьшении флуктуаций эхо-сигнала.

5) Связь между коэффициентами вариации эхо-сигнала и ПГХ в общем случае не является линейной. В отсутствие флуктуаций показателя поглощения коэффициент вариации сигнала изменяется пропорционально коэффициенту вариации показателя обратного рассеяния. Вместе с тем, наклон кривой, изображающей зависимость коэффициента вариации сигнала от

коэффициента вариации показателя поглощения, растет по мере его увеличения. Особенно резкий рост коэффициента вариации сигнала начинается, когда коэффициент вариации показателя поглощения становится больше единицы. К росту коэффициента вариации сигнала приводит также и увеличение радиуса корреляции флуктуаций ПГХ.

6) Согласно сделанным оценкам флуктуации ПГХ с коэффициентом вариации порядка единицы и радиусом корреляции порядка длины свободного пробега фотона могут приводить к изменению средней энергии эхо-сигнала на 10 – 30 % и флуктуациям его энергии с коэффициентом вариации порядка 0.3 – 0.6.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00897), а также в рамках плана НИР ИПФ РАН «0035-2014-0022 Разработка радиофизических методов исследования океана. (12.13)».

Литература

1. Оптика океана /Под ред. А.С. Монина. - М.: Наука, 1983.-т.1. Физическая оптика океана. -371 с.
2. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения.- Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991.- 230 с.
3. Dolin L.S., Levin I.M. Optics, Underwater. In: Encyclopedia of Applied Physics, vol.12, pp. 571-601, 1995, VCH Publishers.
4. Долин Л.С., Савельев В.А. О характеристиках сигнала обратного рассеяния при импульсном облучении мутной среды узким направленным световым пучком // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 5. С. 505-510.
5. Долин Л.С. Развитие теории переноса излучения в приложении к задачам инструментального видения в мутных средах // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 5. С. 553-560.
6. Долин Л. С., Сергеева Е. А., Турчин И. В. Теневые шумы в оптических томограммах биотканей // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 6. С. 543-550.
7. L.S.Dolin, E.A.Sergeeva, I.V.Turchin. Correlation characteristics of optical coherence tomography images of turbid media with statistically inhomogeneous optical parameters // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2012. V.113. No. 9. P. 691-703.
8. Долин Л.С., Савельев В.А. К теории распространения узкого пучка света в стратифицированной рассеивающей среде // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 11. С. 1310-1317.

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ МОРЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЗВУКА

В.А.Буланов, д-р физ-мат.наук, А.В.Стороженко
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

ESTIMATION OF PLANKTON DISTRIBUTION IN THE UPPER LAYER OF THE SEA BASED ON SOUND BACKSCATTERING

V.A.Bulanov, Dr.Sc., A.V.Storozhenko
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Цель работы – решение практического вопроса об оценке распределения биомассы в деятельном слое моря по данным обратного рассеяния звука. Представлены результаты исследований в дальневосточных морях и восточной Арктике. Полученные результаты являются основой для проведения оценок распределения планктона в верхнем слое моря с высоким пространственным разрешением, а также для получения информации о мелкомасштабной структуре фронтальных разделов водных масс, включая подробную структуру внутренних волн.

The aim of the work is the solution of the applied problem of estimation of biomass distribution in the sea based on sound backscattering. Results of research in far eastern seas and east Arctic are presented. Obtained data are the foundation for estimation of plankton distribution in the upper layer of the sea with high spatial resolution and for obtaining small scale structure of frontal borders of water mass, including structure of internal waves.

Рассеяние звука в морской среде характеризуется значительной пространственной и временной изменчивостью в силу физических и биологических факторов. Современные акустические методы зондирования на основе обратного рассеяния звука позволяют зарегистрировать резкие временные изменения параметров морской среды, а также пространственные вариации параметров среды. На высоких частотах звука основное рассеяние звука имеет биологическое происхождение и значительная часть его связана с распределением планктона в морской воде. Основу работы составляет решение практического вопроса об оценке распределения биомассы в деятельном слое океана по данным о рассеянии звука.

Эти данные необходимы при изучении особенностей пространственного распределения, поведения рыб и других гидробионтов, при оценке промысловой значимости скоплений, состояния запасов популяции и т.п. Зондирование на основе рассеяния звука является дистанционным методом и в целом ряде случае является наиболее предпочтительным в практике океанологических исследований.

Основные характеристики рассеяния звука. На практике рассеяние звука определяется коэффициентом рассеяния, экспериментальное значение которого можно написать в виде [1-3]

$$m_V = (2/\pi\theta^2 c\tau)\left(P_{bs}/P_i\right)^2, \qquad (1)$$

где $I_{bs} \sim P_{bs}{}^2$, $I_i \sim P_i^2$ - интенсивности падающего на неоднородность и рассеянного звука соответственно, при этом P_i и P_{bs} - соответственно, амплитуды падающей на объем V волны и рассеянной в обратном направлении, V - импульсный рассеивающий объем среды, $V = \pi r^2\theta^2 c\tau/2$, θ - ширина диаграммы направленности излучателя, c - скорость звука, м/с, τ - длина импульса звука, с.

Теоретическое выражение коэффициента рассеяния звука m_V определяется обычным выражением, учитывающим функцию распределения включений по размерам в виде:

$$m_V = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \sigma(l)dN(l), \qquad (2)$$

где размерность сечения рассеяния σ одиночным организмом обычно задают в м^2, и тогда размерность коэффициента m_V определяется как м$^{-1}$. Часто коэффициент рассеяния звука m_V записывают в логарифмической форме – в децибелах согласно следующей формуле $S_V = 10\lg m_V$ при этом размерность m_V берут в м$^{-1}$.

Можно экспериментально определить частотную зависимость $m_V(\omega)$ или $S_V(\omega)$ от частоты ω падающего звука, которая позволяет установить тип рассеивателей, а также некоторые их характеристики, например, функцию распределения по размерам $g(R)$, см$^{-4}$ или массовую концентрацию m_g, определяемую в виде

$$m_g = (4\pi/3)\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \rho' R^3 g(R) dR\,, \qquad (3)$$

где ρ' - плотность включения, R размер включений, см. Удобно также ввести в качестве характеристики звукорассеивающих слоев (ЗРС) величину коэффициента рассеяния $\overline{m_V(r)}$, усредненную по толщине слоя $h_{\max}$, а также дополнительно усредненную по глубине согласно следующих выражений:

$$\overline{m_V(r)} = \frac{1}{h_{\max}}\left[\int_0^{h_{\max}} m_V(r,z)dz\right], \qquad \overline{\overline{m_V}} = \frac{1}{Lh_{\max}}\int_0^L\int_0^{h_{\max}} m_V(r,z)dzdr\,, \qquad (4)$$

где L – длина трассы.

Рассеяние звука и распределение планктона на шельфе. На рис. 1 представлено типичные результаты, полученные в заливе Петра Великого Японского моря на трассе протяженностью до 100 км в летний период - 23.08.2011. Видно, что звукорассеивающие слои распределены крайне неравномерно вдоль трассы, $\overline{m_V(r)}$ изменяется на 2 порядка от $5\cdot10^{-10}$ м$^{-1}$ до $2\cdot10^{-8}$ м$^{-1}$.

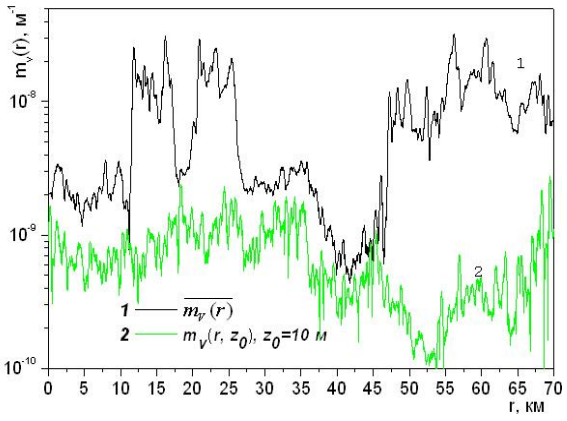


Рис. 1. Распределение рассеяния звука вдоль трассы на шельфе Японского моря: горизонтальный профиль $\overline{m_V(r)}$ и профиль $m_V(r, z_0)$ на глубине z_0=10 м

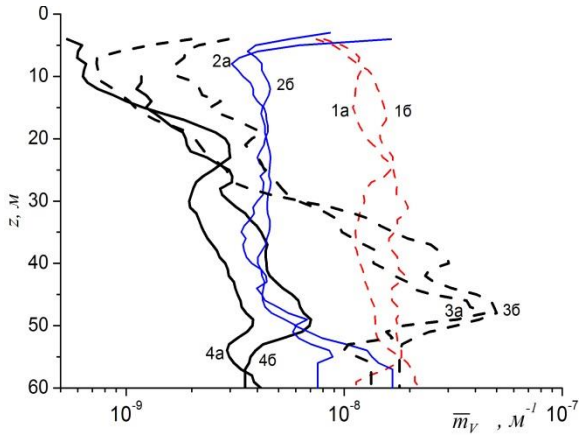


Рис. 2. Распределение $\overline{m_V(z)}$ для различных сезонов 2011 г.: 1а, 1б - май - начало июня, 2а, 2б - июнь-июль, 3а, 3б - август, 4а, 4 - октябрь в заливе Петра Великого Японского моря.

Представляло интерес проанализировать вертикальное распределение рассеяния звука в различные сезоны. На рис. 2 представлены вертикальные профили $\overline{m_V(z)}$, полученные на шельфе Японского моря в различные сезоны. Можно выделить характерные сезонные особенности рассеяния: возрастание амплитуды рассеяния по всей водной толще в мае, связанное с весенним пиком зоопланктона, наличие мощного рассеяния в придонных слоях залива Петра Великого во все сезоны. С целью уточнения оценок рассеяния звука на зоопланктоне, который дает основной вклад в рассеяние звука в верхнем слое моря, были проанализированы формулы для сечений рассеяния на отдельных особях зоопланктона в области, когда длина волны становится сравнима с характерным размером рассеивателей. В частности, было получено общее выражение, позволяющее по данным m_V получать данные по концентрации биомассы m_g в рамках двух распределений рассеивателей по размерам– степенного P и гауссовского G:

$$m_g^{(P,G)}(r,f) = D^{(P,G)}(f)m_v(r,f)\,, \qquad (5)$$

Коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ имеет сложный вид, для частоты f~100 кГц можно получить $D^{(P)}$ ~$2\cdot10^2$ г·м/л [3]. Приведенная величина $D^{(P)}$ в дальнейшем использована для оценки распределения биомассы в океане.

Многочисленные данные по рассеянию звука в акватории залива Петра Великого, полученные нами в 2008 -2016 гг. позволили выявить сезонную динамику зоопланктона и его

распределение в заливе, а также сравнить полученные концентрации биомассы с результатами облова in situ. На рис. 3 представлены акустические результаты, полученные в тех же районах залива Петра Великого Японского моря, что и результаты, полученные биологами методами облова [4]. Из рис. 3 видно хорошее соответствие между акустическими данными и данными облова.

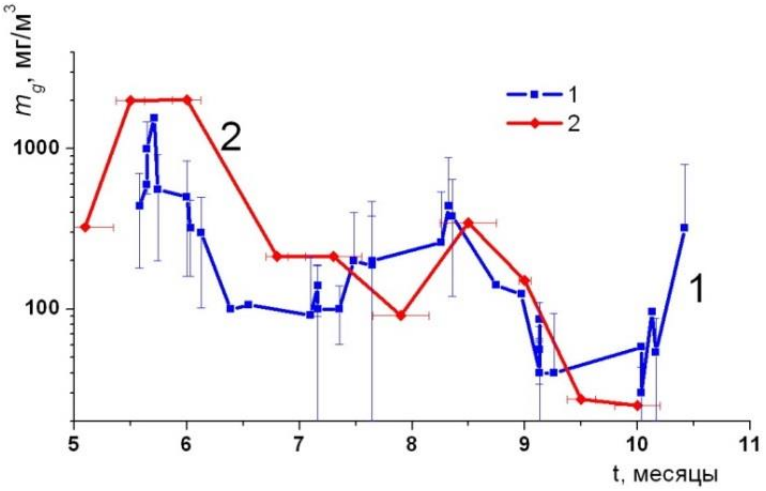


Рис. 3. Сравнение концентрации биомассы, полученных на основе рассеяния звука и в результате облова in situ: 1 - $m_g(r)$ по данным рассеяния звука, 2008-2010 гг., 2 - $m_g(r)$ по данным облова in situ 1991 г.

Суточные вариации коэффициента рассеяния звука. Важной характеристикой рассеяния звука в море являются суточные вариации коэффициента рассеяния звука. В глубоководных морях на средних и экваториальных широтах обычно четко видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука [3], обусловленные суточными перемещениями планктона по глубине. На рис. 4 (см. вклейку) представлено распределение коэффициента рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль трассы в тропических водах Аравийского моря, из которого видны ярко выраженные суточные вариации m_V, наложенные на тренд m_V вдоль длинной трассы на расстоянии 1500 км от юга к северу при среднем спаде 5.6 дБ [3].

На рис.5 (см. вклейку) представлено изменение во времени коэффициента рассеяния звука на частоте 138 кГц, полученное с помощью инвертированного излучателя, установленного на дне в шельфовой зоне Японского моря (бухта Витязь, 100 км к югу от Владивостока). Хорошо видны суточные вариации рассеяния звука и приливные вариации глубины моря. Следует отметить большую величину изменений m_V, доходящих в максимуме до 40 дБ, что существенно превышает значения вариаций m_V, полученных в глубоких морях.

Особый случай миграции планктона представляют результаты, полученные в Чукотском море (врезка рис. 6) для коэффициента обратного рассеяния $S_V = 10\lg(m_v)$ и кривая 4 на рис. 6. Из врезки рис. 6 следует, что поведение планктона по глубине происходит иначе, неклассическим образом: в темное время суток они не приближаются к поверхности.

Проведены сравнительные исследования рассеяния звука в Японском море и восточной Арктике (Чукотское море), показанные на рис. 6. На врезке представлена картина полусуточных вариаций звукорассеивающих слоев на станции 4 в Чукотском море. Серым цветом на шкале времени выделено темное время суток на каждой станции. Исследования выявили существенно большее рассеяние звука в восточной Арктике, что связано с большей концентрацией планктона (см. данные на рисунке 4).

Сопоставление рассеяния звука в Японском море и восточной Арктике выявило существенно большее рассеяние звука в восточной Арктике, что предположительно связано с большей концентрацией планктона в верхних слоях арктических морей. Обнаружено, что суточная миграция планктона в Чукотском море отличается от миграции планктона в Японском море.

Работа выполнена при поддержке проекта № 18-I-004 программы «Дальний Восток» ДВО РАН, гранта РФФИ № 17-02-00561 и № 16-02-00841 А.

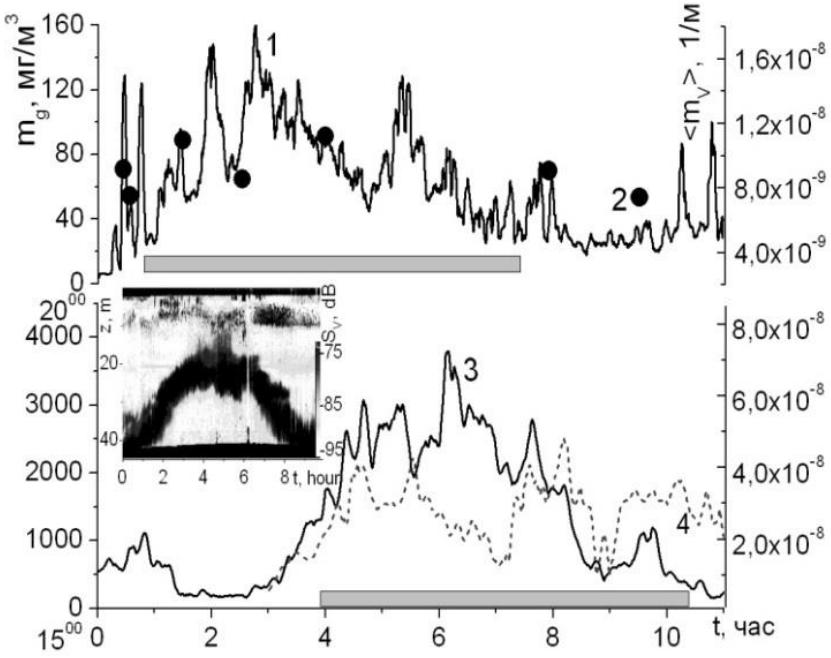


Рис. 6. Концентрация планктона в Японском море по данным рассеяния звука 1 и по результатам облова 2, и в Арктике (3 - 66^0 29N, 170^0 24W, 4 – 68^0 54N, 178^0 11W).

Литература

1. Андреева И.Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях.// В кн.: Акустика океана, под ред. Л.М.Бреховских, М.:Наука, 1974, с.491-558.
2. Цейтлин В.Б. Размерное распределение пелагических организмов в тропических районах океана // Океанология. 1981. Т.21. №1. с.125-131.
3. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. – 414 с. ISBN 978-5-9909943-8-6.
4. Акуличев В.А., Буланов В.А., Стороженко А.В. Акустические исследования зоопланктона в Японском море и восточной Арктике // ДАН, 2016. 470, № 2, С.219.

ОБ ЭФФЕКТИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МЕЛКОГО МОРЯ, НАСЫЩЕННОГО ПУЗЫРЬКАМИ

В.А.Буланов, д-р физ-мат.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

ON THE EFFECTIVE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF THE UPPER LAYER OF A SHALLOW SEA, RICH IN BUBBLES

V.A.Bulanov, Dr.Sc.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Теоретически и экспериментально исследованы распределения пузырьков в морской воде при одновременных измерениях рассеяния и поглощения звука и акустической нелинейности морской воды. Исследования проводились в шельфовой зоне Японского моря при различных гидрологических и метеорологических характеристиках. Показано, что акустические характеристики морской воды с воздушными пузырьками в приповерхностном слое проявляют аномальные характеристики, резко отличающие их от таковых, наблюдающихся в морской воде без пузырьков.

Theoretically and experimentally the distribution of bubbles in sea water is studied, with simultaneous measurement of sound scattering and absorption and acoustic nonlinearity of sea water. The studies were conducted in the offshore area of the Sea of Japan with different hydrological and meteorological characteristics. It is shown that the acoustic characteristics of sea water with air bubbles in the surface layer exhibit abnormal characteristics that sharply distinguish them from those observed in sea water without bubbles.

В морской воде всегда присутствуют газовые пузырьки и особенно велика их роль при больших скоростях ветра и при сильном ветровом волнении [1-6]. Для определения акустических характеристик верхнего слоя морской воды важен вид функции распределения пузырьков по размерам *g(R)* в возможно более широкой области изменения радиусов *R*. Функция $g(R)$ обычно определяется как количество включений в единице объема *dN*, приходящихся на интервал их радиусов *dR*, т.е. $g(R) = dN / dR$, так что концентрация пузырьков в единице объема равна $N = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} g(R) dR$ [1, 2]. Практически все предложенные в литературе виды функции *g(R)* имеют существенные недостатки, выражаемые в появлении расходимостей в интегралах для вычисления эффективных параметров воды с газовыми пузырьками (сжимаемость, скорость звука, нелинейный параметр и др.) [6, 7]. Рассмотрена гомогенная модель эффективных параметров микронеоднородной жидкости [7-10], которая учитывает резонансные и релаксационные отклики пузырьков на воздействие внешнего акустического давления и позволяет описать акустические характеристики морской воды с пузырьками различной концентрации. Данные по рассеянию звука на различных частотах в приповерхностном слое моря при наличии развитого волнения и вовлечения пузырьков в толщу морской воды позволили выявить структуру распределения по размерам пузырьков и их динамику [8, 9]. Полученные данные по распределению пузырьков в море позволили определить другие акустические характеристики приповерхностных слоев морской воды.

Для исследования рассеяния звука была произведена постановка и калибровка акустической системы излучения-приема, включающей донную станцию и аппаратуру регистрации и анализа сигналов, располагающейся на береговом посту. Донная станция включает в себя следующие излучатели: трехэлементный пьезокерамический излучатель с резонансными частотами 138, 216 и 519 кГц, параметрический двухэлементный излучатель с частотами 300 и 50 кГц, излучатель с резонансной частотой 170 кГц. Береговой комплекс аппаратуры располагается в лабораторном помещении на берегу и связан с излучателями подводным кабелем.

Особенности распределения коэффициента рассеяния звука $m_V(z,t)$ в зависимости от глубины *z* и времени *t* представлены на рис.1. Из рис.1 а) отчетливо видны вариации рассеяния звука с значительными повышениями уровня в моменты резкого усиления ветра, когда наблюдается вовлечение воздушных пузырьков в толщу морской воды до глубины 5-6 метров. Удобно ввести усредненный по толщине слоя изменяющийся во времени *t* коэффициент рассеяния звука $< m_V(t) >$, согласно формуле [10] $< m_V(t) >= \left[1 / h_{\max}(t)\right] \int_0^{h_{\max}(t)} m_V(t,z) dz$, где $h_{\max}(t)$ - максимальная глубина, изменяющаяся во времени *t* вследствие приливных и нагонных

явлений. На рис.1 б) (см. вклейку) представлена функция $< m_V(t) >$ отвечающая данным, изображенным на рис.1 а).

Функция распределения пузырьков по размерам *g(R)* может быть найдена по частотной зависимости коэффициента рассеяния звука $m_V(\omega)$ в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта [1, 2, 6]:

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta_\omega}{\pi R^3(\omega)} m_V(\omega), \qquad R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho}\big/\omega \tag{1}$$

где δ_ω – коэффициент резонансного затухания на частоте ω, P_0 - гидростатическое давление, ρ и γ - плотность жидкости и постоянная адиабаты газа. Полученные данные позволили получить функции распределения пузырьков по размерам, представленные на рис. 2 (см. вклейку).

Из рис. 2 видно, что с усилением ветра происходит существенное вовлечение пузырьков в толщу моря. Полученные экспериментальные результаты позволили аппроксимировать распределение пузырьков сравнительно простой функцией *g(R)* вида [8]:

$$g(R) = A_g R^{-n} \exp\left[-n\left(\frac{R_p}{R} - 1 \right) - \frac{R}{R_m} \right]. \tag{2}$$

В формуле (2) показатель степени *n* и критические размеры R_p (максимум *g(R)*), R_m (спад *g(R)* при больших *R*) являются естественными параметрами, которые следуют из теории Фармера-Гаррета в инерционном интервале между размерами R_p, R_m [3].

Коэффициента поглощения звука в воде с пузырьками. Формулу (2) удобно использовать, чтобы в рамках гомогенной модели микроненоднородной среды [7, 9, 10] оценить акустические параметры приповерхностных слоев морской воды с пузырьками.

На рис. 3 а (см. вклейку) представлено изменение во времени коэффициента поглощения звука на частоте 145 кГц при наличии пузырьков. На рис. 3 б представлена частотная зависимость коэффициента поглощения звука α в воде с пузырьками при $T=20^0$C, вычисленная для полидисперсной смеси пузырьков различных концентраций x по формуле (2). Здесь также представлена частотная зависимость коэффициента поглощения звука в морской $\alpha_{\text{sea}}(f)$ и пресной воде $\alpha_0(f)$ при $T=20^0$C и солености 35 промилле [7, 10]. Слабая частотная зависимость $\alpha(f)$ связана с преобладающим механизмом резонансного затухания в пелене пузырьков с широкой функцией распределения $g(R)$ пузырьков по размерам [1, 2, 7, 10].

Акустическая нелинейность приповерхностных слоев морской воды. Важным параметром в нелинейной гидроакустике является безразмерный нелинейный акустический параметр, величина эффективного значения которого для жидкости с пузырьками ε_e определяется в виде [9, 10]

$$\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} \approx \left(1 + \frac{2\pi}{3} \frac{\beta'^2(\gamma+1)}{\beta^2 \varepsilon} \int_0^\infty dR R^3 g(R) \right) \left[1 + \frac{\beta'}{\beta} \int_0^\infty \frac{R^3 g(R) dR}{Q(R)} \right]^{-2}, \quad Q = 1 - \left(\frac{R}{R_\omega} \right)^2 (1 + i\delta_\omega), \tag{3}$$

где ε – нелинейного акустического параметра жидкости без пузырьков, β и β' – коэффициенты изотермической сжимаемости жидкости и газа внутри пузырька, соответственно. Полученные результаты по концентрации пузырьков в морской воде позволяют определить дополнительную акустическую нелинейность, привносимую пузырьками. На практике часто используется относительный метод измерения ε, заключающийся в предварительной калибровке зонда – измерителя нелинейности [10] в известной среде (например, в исследовательском танке в контролируемых условиях), зондирования в море и затем вычисления ε по формуле $\varepsilon = \varepsilon_0 U_\Omega / U_{\Omega 0}$, где ε_0, $U_{\Omega 0}$ и $U_{\Omega 0}$ – параметры, соответствующие эталонному образцу. Используя описанные методы, были проведены исследования нелинейного параметра в верхнем слое моря.

На рис. 4 а (см. вклейку) представлены дистанционные измерения $\varepsilon(t,z)$ нелинейного параметра пузырькового слоя, полученные на основе данных по рассеянию звука. На рис. 4 б показана типичная зависимость параметра нелинейности от глубины в б. Витязь Японского

моря, полученная с высоким разрешением в сравнительно спокойных условиях моря. Видно, что с усилением ветра параметр $\varepsilon(t,z)$ резко увеличивается, видна сильная изменчивость нелинейности морской воды, которая связана с вовлечением воздушных пузырьков в толщу моря при усилении ветра. На больших глубинах $\varepsilon(t,z)$ стремится к значению нелинейного параметра в чистой воде ~ 3.5.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-02-00561а и программы «Дальний Восток» ДВО РАН.

Литература

1. Medwin H. Acoustical Determination of Bubble Size Spectra // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V.62. P.1041-1044.
2. Акуличев В.А., Буланов В.А., Кленин С.А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде // Акуст.ж. 1986,Т.32, Вып.3. С.289-295.
3. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // J. Phys. Ocean. 2000 Vol.30 No9 p.2163-2171
4. D. Farmer, S. Vagle. Wave induced bubble clouds in the upper ocean // J. Geophys. Res., 2010, Vol. 115, C12054, 16 pp.
5. Lei Han, YeLi Yuan. Bubble size distribution in surface wave breaking entraining process. // Science in China Series D: Earth Sciences. 2007. Vol. 50, No 11, pp.1754-1760
6. V.A. Akulichev, V.A. Bulanov. "Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering" // J. Acoust. Soc. Am. 2011. Vol.130, No5, pp.3438-3449
7. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука. 2001. 280 с.
8. В.А. Акуличев, В.А. Буланов О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // Доклады Академии наук, 2012, том 446, № 2, с.212-215
9. В.А. Акуличев, В.А. Буланов Об аномалиях акустических характеристик полидисперсных жидкостей с газовыми и паровыми пузырьками // Доклады Академии наук, 2013, том 448, № 2, с.213-217
10. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. – 414 с. ISBN 978-5-9909943-8-6

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРЫ ПУЗЫРЬКОВ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А.О.Максимов, д-р физ-мат.наук, Ю.А.Половинка, канд.физ-мат.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

INTERACTION OF A COUPLE OF BUBBLES IN THE ACOUSTIC FIELD

A.O.Maksimov, Dr.Sc., Y.A.Polovinka, Ph.D.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Присутствие газовых включений играет важную роль в процессах рассеяния и поглощения звука в жидкости. Приложения разнообразны: акустическая океанография, дистанционное обнаружение утечек в прибрежных хранилищах и подводных трубопроводах. Если рассеяние звука одиночным пузырьком является базовой задачей диагностики, то рассеяние парой пузырьков является следующей по сложности проблемой. Получены аналитические выражения для параметров связанных колебаний – собственных частот и коэффициентов затухания пузырьков. Исследованы особенности поведения амплитуды рассеяния, связанные с проявлениями двух первых резонансов, и ее зависимость от размеров пузырьков и расстояния между их центрами.

Acoustic scattering by a single bubble is the most basic problem for bubble detection. For a two-phase flow, the subject of forced oscillations of a pair of bubbles is important because it controls how bubbles interact with each other. Traditionally, the problem is formulated in terms of infinite series, which represent any mode of oscillation of the bubble. Multiple scattering is handled by use of the additional theorem of spherical wave functions. The present study is based on the use of bispherical coordinates which simplifies the problem and provides a partial summation on only the most important contributions to the series. A closed form solution was derived for the scattered acoustic field that determines its parametric dependence on bubbles sizes and the separation distance

При возникновении подводной утечки рождаются газовые пузырьки, излучающие звук на частотах, соответствующих их геометрическим размерам. Два фактора – локальный характер генерации акустических сигналов, обусловленных утечкой, и резонансная природа излучения пузырьков при их рождении – позволяют использовать для локации обращенные во времени эмиссионные сигналы с целью получения мощного сигнала рассеяния [1]. Использование сигнала обратного рассеяния акустического импульса от скопления пузырьков позволяет решить задачу определения распределения пузырьков по размерам. Для двухфазного потока с большой плотностью включений необходимо учитывать взаимодействие между отдельными пузырьками. Чтобы последовательно описывать рассеяние в такой среде, важно изучить взаимодействие между отдельными включениями, доминирующими при этом являются парные взаимодействия. При описании взаимодействия двух близко расположенных пузырьков (a) и (b), находящихся в поле звуковой волны, полагаем, что равновесная форма пузырька – сфера радиуса R_a и R_b соответственно. Для определенности будем считать, что $R_a \geq R_b$. Расстояние между центрами пузырьков – h. Предполагается, что размеры пузырьков меньше характерной акустической длины волны. Таким образом, в ближнем поле вокруг пузырьков жидкость можно рассматривать как несжимаемую и скорость выразить как градиент потенциала. При решении уравнения Лапласа, которому удовлетворяет потенциал φ, использовались специфические бисферические координаты. Методика решения близка к изложенной в [2, 3]. Подставляя найденное решение для φ в динамические граничные условия на стенке пузырьков и выражая граничные значения потенциала через вариации объемов пузырьков ΔV^a, ΔV^b, получаем аналог уравнения Рэлея для связанных колебаний двух пузырьков:

$$m_{aa}\Delta\ddot{V}^a + m_{ab}\Delta\ddot{V}^b + \Omega_{0a}^2\Delta V^a - \frac{R_a}{c_0}\left(\Delta\dddot{V}^a + \Delta\dddot{V}^b\right) = -\frac{4\pi R_a}{\rho_0}P_m(t),\ \ \Omega_{0a}^2 = \frac{3\gamma P_0}{\rho_0 R_a^2},$$

$$m_{ba}\Delta\ddot{V}^a + m_{bb}\Delta\ddot{V}^b + \Omega_{0b}^2\Delta V^b - \frac{R_b}{c_0}\left(\Delta\dddot{V}^a + \Delta\dddot{V}^b\right) = -\frac{4\pi R_b}{\rho_0}P_m(t),\ \ \Omega_{0b}^2 = \frac{3\gamma P_0}{\rho_0 R_b^2}, \qquad (1)$$

здесь Ω_{0a} и Ω_{0b} – собственные частоты невзаимодействующих пузырьков (a) и (b), ρ_0 – плотность жидкости, γ – показатель политропы в уравнении состояния газа в пузырьке, P_0 – равновесное значение давления, $P_m(t)$ – величина внешнего акустического давления. Явные выражения для "инерционных масс" m_{aa}, m_{ab}, m_{ba}, m_{bb}, учитывающих взаимодействие между пузырьками, получены в [4] и представимы в виде рядов.

Собственные частоты связанных колебаний пузырьков определяются дисперсионным уравнением вида:

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{1}{2D_m}\left[\left(m_{aa}\Omega_{0b}^2 + m_{bb}\Omega_{0a}^2\right) \pm \sqrt{\left(m_{aa}\Omega_{0b}^2 - m_{bb}\Omega_{0a}^2\right)^2 + 4\Omega_{0b}^2\Omega_{0a}^2 m_{ab}m_{ba}}\right],\ D_m = \left(m_{aa}m_{bb} - m_{ab}m_{ba}\right). \quad (2)$$

Для того чтобы проиллюстрировать зависимость собственных частот от произвольных значений определяющих параметров, мы введем безразмерные величины: $\Omega_- = \omega_- / \Omega_{0a}$, $\Omega_+ = \omega_+ / \Omega_{0b}$ при $R_a \geq R_b$ и $\Omega_- = \omega_- / \Omega_{0b}$, $\Omega_+ = \omega_+ / \Omega_{0a}$ при $R_b \geq R_a$. Рисунки 1, 2 иллюстрируют зависимость нормированных частот Ω_-, Ω_+ от безразмерных переменных R_a / h и R_b / h.

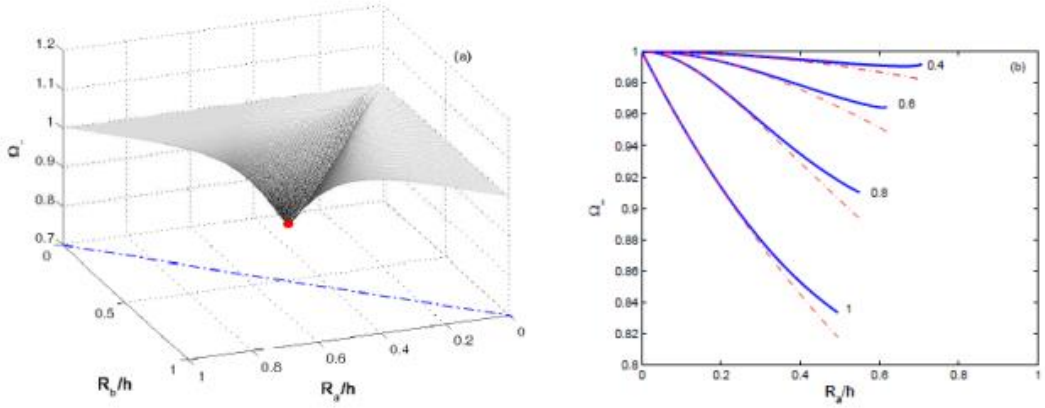


Рис. 1. На левой панели (а) изображена низкочастотная ветвь Ω_-, соответствующая колебаниям, близким к синфазным. Штрих-пунктирной линией отмечена граница физических значений параметров: $R_a / h + R_b / h = 1$. На этой линии пузырьки касаются друг друга. Точка, отмеченная маркером, соответствует минимальной частоте в системе $\Omega_- = (\ln 2)^{1/2}$. Сопоставление с традиционным подходом представлено на правой панели (*b*). Сплошные линии описывают поведение частоты при $R_b = R_a$, $R_b = 0.8R_a$, $R_b = 0.6R_a$, $R_b = 0.4R_a$. Штрихпунктирные линии представляют результаты вычислений, в которых учитываются только монопольные члены во взаимодействии между пузырьками. Линии оканчиваются в точках, где пузырьки касаются друг друга.

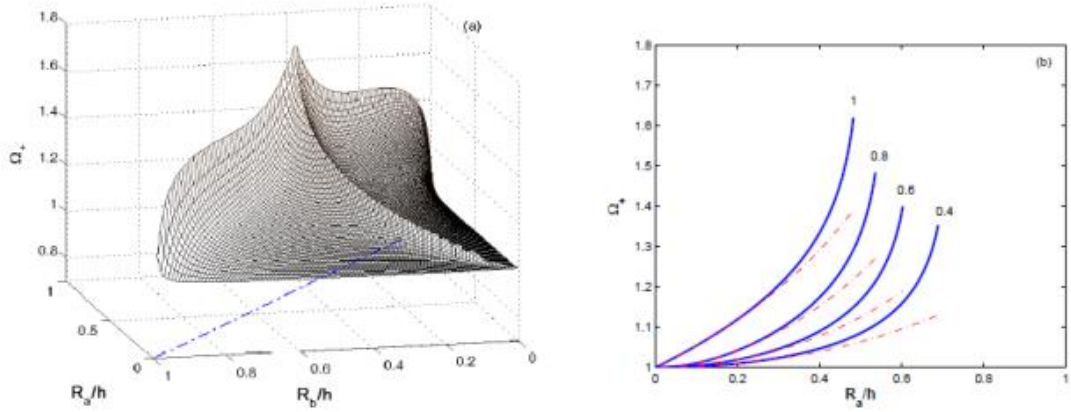


Рис. 2. На левой панели (а) изображена высокочастотная ветвь Ω_+, соответствующая колебаниям, близким к противофазным. Штрихпунктирной линией отмечена граница физических значений параметров: $R_a / h + R_b / h = 1$. На этой линии пузырьки касаются друг друга. Для того чтобы избежать логарифмической сингулярности, вычисления проводились до значений $R_a / h + R_b / h = 0.95$. Сопоставление с традиционным подходом представлено на правой панели (*b*). Сплошные линии описывают поведение частоты при $R_b = R_a$, $R_b = 0.8R_a$, $R_b = 0.6R_a$, $R_b = 0.4R_a$. Штрихпунктирные линии представляют результаты вычислений, в которых учитываются только монопольные члены во взаимодействии между пузырьками. Линии оканчиваются в точках, где радиусы пузырьков удовлетворяют условию $R_a / h + R_b / h = 0.95$.

Динамика взаимодействующих пузырьков может быть описана в рамках гамильтонова формализма, позволяющего свести исходную задачу к уравнениям для амплитуд взаимодействующих мод. Переходя от системы связанных колебаний (1) к нормальным координатам, мы получим следующую систему уравнений

$$\ddot{z}_1 + \omega_+^2 z_1 + \nu_+ \omega_+^2 \dot{z}_1 = -P_m f_+, \quad \ddot{z}_2 + \omega_-^2 z_2 + \nu_- \omega_-^2 \dot{z}_2 = -P_m f_- . \tag{3}$$

Явный вид входящих в это уравнение параметров, связанных с радиационным затуханием ν_+, ν_- и модовыми компонентами внешнего давления f_+, f_-, а также коэффициенты связи между ΔV^a, ΔV^b и z_1, z_2 приведены в [4].

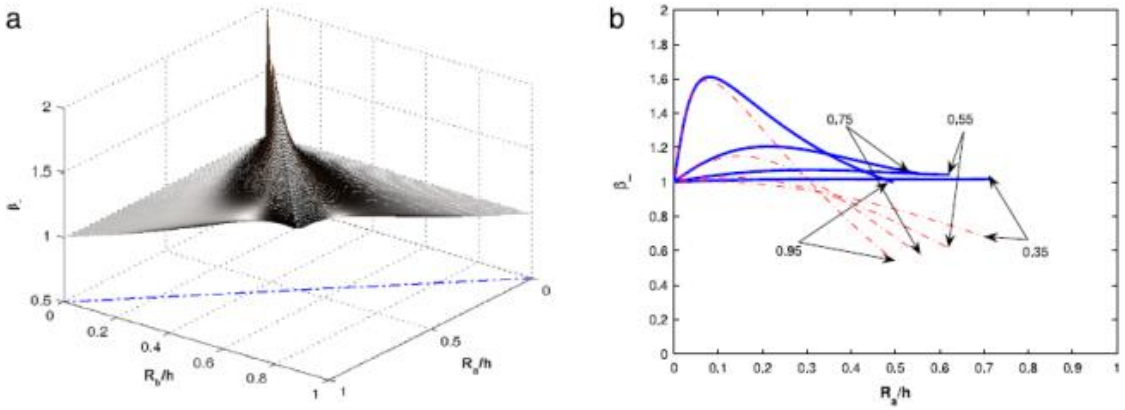


Рис. 3. На левой панели (a) изображена зависимость безразмерного коэффициента радиационного затухания β_- как функция безразмерных размеров пузырьков R_a/h, R_b/h. Штрихпунктирной линией отмечена граница физических значений параметров: $R_a/h + R_b/h = 1$. Сопоставление с традиционным подходом представлено на правой панели (*b*). Сплошные линии описывают поведение частоты при $R_b = 0.95R_a$, $R_b = 0.75R_a$, $R_b = 0.55R_a$, $R_b = 0.35R_a$. Штрихпунктирные линии представляют результаты вычислений, в которых учитываются только монопольные члены во взаимодействии между пузырьками. Линии оканчиваются в точках, где радиусы пузырьков удовлетворяют условию $R_a/h + R_b/h = 0.95$.

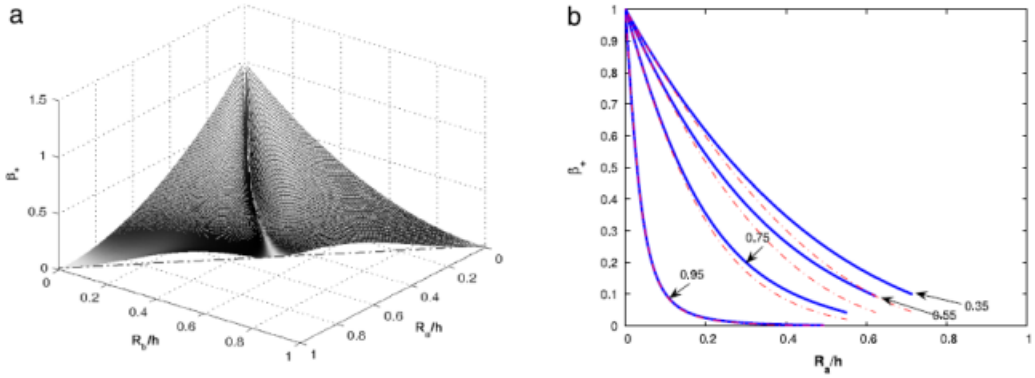


Рис. 4. На левой панели (a) изображена зависимость безразмерного коэффициента радиационного затухания β_+ как функция безразмерных размеров пузырьков R_a/h, R_b/h. Штрихпунктирной линией отмечена граница физических значений параметров: $R_a/h + R_b/h = 1$. Сопоставление с традиционным подходом представлено на правой панели (b). Сплошные линии описывают поведение частоты при $R_b = 0.95R_a$, $R_b = 0.75R_a$, $R_b = 0.55R_a$, $R_b = 0.35R_a$. Штрих-пунктирные линии представляют результаты вычислений, в которых учитываются только монопольные члены во взаимодействии между пузырьками. Линии оканчиваются в точках, где радиусы пузырьков удовлетворяют условию $R_a/h + R_b/h = 0.95$.

Для того чтобы проиллюстрировать зависимость коэффициентов затухания $B_- = \nu_- \omega_-^2/2$, $B_+ = \nu_+ \omega_+^2/2$ от определяющих параметров, мы введем безразмерные коэффициенты

$\beta_- = B_-/\left(\Omega_{0b}^2 R_b/2c_0\right)$, $\beta_+ = B_+/\left(\Omega_{0a}^2 R_a/2c_0\right)$ при $R_a \ge R_b$ и $\beta_- = B_-/\left(\Omega_{0a}^2 R_a/2c_0\right)$, $\beta_+ = B_+/\left(\Omega_{0b}^2 R_b/2c_0\right)$ при $R_a \le R_b$. Рисунки 3 и 4 описывают поведение безразмерных коэффициентов β_- – соответствующего затуханию моды колебаний, близких к синфазным, и β_+ – отвечающего за затухание моды колебаний, близких к противофазным.

Динамические уравнения, описывающие пульсации пузырьков, записанные в нормальных координатах (3), просты, поэтому легко получить аналитическое решение. Рассмотрим колебания пузырьков под действием внешнего акустического импульса $P_m(t) = P_a \,\mathrm{Re}\left[\exp(-i\omega t - i\pi/2)\right]\left[\theta(t) - \theta(t-T)\right]$. Форма импульса определяется центральной частотой ω, амплитудой давления P_a и длительностью импульса T. Предполагается, что в начальный момент пузырьки находятся в равновесии и скорости изменения их объемов равны нулю. Тогда преобразование Лапласа системы уравнений (3) приводит к системе алгебраических уравнений. Решая эту систему и выполняя обратное преобразование Лапласа, получаем искомое решение:

$$z_1(t) = P_a f_+ \,\mathrm{Im}\left\{\frac{e^{-i\omega t}\left[\theta(t) - \theta(t-T)\right]}{\omega^2 - \omega_+^2 + 2i\beta_+\omega} + \left[\Phi_+(t) - \Phi_+(t-T)e^{-i\omega T}\right]\right\},$$

$$z_2(t) = P_a f_- \,\mathrm{Im}\left\{\frac{e^{-i\omega t}\left[\theta(t) - \theta(t-T)\right]}{\omega^2 - \omega_-^2 + 2i\beta_-\omega} + \left[\Phi_-(t) - \Phi_-(t-T)e^{-i\omega T}\right]\right\},$$

$$\Phi_+(t) = \theta(t)\frac{e^{-\beta_+ t}}{2\omega_+}\left[\frac{e^{-i\omega_+ t}}{\omega_+ - \omega - i\beta_+} + \frac{e^{i\omega_+ t}}{\omega_+ + \omega + i\beta_+}\right],\ \Phi_-(t) = \theta(t)\frac{e^{-\beta_- t}}{2\omega_-}\left[\frac{e^{-i\omega_- t}}{\omega_- - \omega - i\beta_-} + \frac{e^{i\omega_- t}}{\omega_- + \omega + i\beta_-}\right]. \quad (4)$$

Осцилляции пузырьков, вызванные непрерывной волной $\omega T >> 1$ и коротким импульсом $\omega T << 1$, соответствуют двум предельным случаям этого решения. В первом случае мы можем пренебречь функциями $\Phi_\pm$, которые описывают переходные процессы. Во втором случае, на временах, превышающих длительность импульса $t > T$, поведение пузырьков описывается только вкладом функций $\Phi_\pm$.

Представление падающей и рассеянной волны в виде суммы парциальных компонент позволяет описать процесс рассеяния для волн с определенным угловым моментом l. Для длинноволнового рассеяния $(R_a, R_b, h) << \lambda$ существенными оказываются только несколько первых парциальных амплитуд. В окрестности резонансов $(\omega - \omega_+)^2 << \omega_+^2, (\omega - \omega_-)^2 << \omega_-^2$ доминирующим является s-рассеяние $l = 0$. Акустическое s-излучение пульсирующих пузырьков описывается на больших расстояниях $r >> h$ следующей формулой: $p_{em} = \rho_0\left(\ddot{V}_a + \ddot{V}_b\right)/(4\pi r)$ [5]. Объем пузырьков выражается через нормальные координаты (3), а приведенное решение (4) дает полное описание рассеянного поля.

В настоящем исследовании представлены теоретические результаты, характеризующие детали поведения двух близко расположенных пузырьков в акустическом поле. Аналитическое описание динамики взаимодействующих пузырьков достигнуто в результате использования специфической – бисферической системы координат. Основной результат состоит в понимании того, как изменение расстояния между пузырьками влияет на характер их осцилляций. Показано, что традиционный подход, учитывающий только вклад монопольных составляющих во взаимодействии пузырьков, имеет ограниченную область применимости в условиях, когда расстояние между пузырьками сравнимо с их размерами.

Исследование поддержано программой Дальний Восток ДВО РАН, грант 18-5-050.

Литература

1. Maksimov A.O., Polovinka Y.A. Time reversal technique for gas leakage detection // J. Acoust. Soc. Am. 2015. V. 137, P. 2168–2179.
2. Maksimov A.O., Burov B.A., Salomatin A.S., Chernykh D.V. Sounds of marine seeps: A study of bubble activity near a rigid boundary // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 136, P. 1065–1076.
3. Максимов А.О., Половинка Ю.А. Пульсации газового включения вблизи межфазной поверхности // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 1. С. 30–37.
4. Maksimov A.O., Yusupov V.I. Coupled oscillations of a pair of closely spaced bubbles // Eur. J. Mech. B-Fluids 2016. V. 60, P. 164–174.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ, ГРАВИТАЦИОННЫЕ И ГРАВИТОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ, НАБЛЮДЕННЫЕ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ И В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ПОДВОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Л.Е.Собисевич[1], д-р техн.наук, А.Л.Собисевич[1], д-р физ-мат.наук, К.Х.Каноиди[1,2],
Д.В.Лиходеев[1], канд.физ-мат.наук
[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[2]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

HYDROACOUSTIC, GRAVITATIONAL AND GRAVITOMAGNETIC PROCESSES OBSERVED AT THE STAGE OF PREPARATION AND IN THE PERIOD OF DEVELOPMENT OF UNDERWATER EARTHQUAKES

L.E.Sobisevich[1], Dr.Sc., A.L.Sobisevich[1], Dr.Sc., K.K.Kanonidi[1,2], D.V.Likhodeev[1], Ph.D.
[1]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia
[2]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Russia

Обсуждаются результаты обсерваторских наблюдений, отражающие процесс подготовки морских землетрясений (на примере катастрофического события у побережья Чили - землетрясение Мауле, и морского землетрясения в районе Японии). Проведен сопоставительный анализ данных, позволивший уточнить характерные особенности возмущений, наводимых в окрестности формирующихся очаговых структур. Использование обсерваторских данных одновременно с результатами космического мониторинга поверхности Земли обеспечивает анализ косейсмических процессов и расширяет наши представления о крупных подводных землетрясениях.

The results of observation monitoring describing the process of preparation of marine earthquakes are discussed (on the example of a catastrophic event off the Chile coast - Maule earthquake, and marine earthquake in the area of Japan). A comparative analysis of the data made it possible to clarify the characteristic features of perturbations induced in the vicinity of the emerging focal structures. The use of observation data simultaneously with the results of space monitoring of the Earth surface provides an analysis of the cosmic processes and broadens our understanding of major underwater earthquakes.

Подводные землетрясения на этапе подготовки и в процессе своего развития становятся источником геогидроакустических полей, порождаемых волнами Шолте и другими структурами, источником которых являются динамические подвижки гравитирующих образований в объеме формирующейся очаговой области [1, 2]. Кроме того, исследования последних лет показывают, что наряду с гидроакустическими процессами при подготовке крупного землетрясения удается выделить сейсмогравитационные и гравитомагнитные возмущения УНЧ диапазона, которые могут стать своего рода предвестниками грядущей катастрофы [3]. Сформулированная в настоящее время проблема гравитомагнетизма имеет прямое отношение к низкочастотным акустическим, гидроакустическим и геоакустическим процессам в донных структурах [4].

Характеризуя низкочастотные акустические и геоакустические колебания в период подготовки и в процессе развития очага сильного землетрясения, отметим, что ученые СССР еще в семидесятые годы прошлого столетия обратили внимание на появление, сейсмогравитационных возмущений, которые предваряют главный удар. Профессор Ленинградского университета Е.М. Линьков, вместе со своими коллегами, впервые зафиксировал и проанализировал открытое явление. Результаты пионерских работ ученых Ленинграда стали предметом открытия СССР № 217 «Явление сейсмогравитационных колебаний Земли» (приоритет – июнь 1974 г.) [5, 6].

Спустя сорок лет получены новые научные результаты, которые подтверждают открытие наших ученых. Установлено, что «упруго-гравитационные» возмущения удается зафиксировать еще на этапе развития катастрофического землетрясения. Группе ученых удалось выделить сейсмогравитационные колебания на расстояниях между 1000 и 2000 километрами от катастрофического цунамигенного землетрясения Тохоку 2011 года [7]. Эти данные заставляют на новом уровне подходить к изучению и подводных землетрясений. Рассмотрим в качестве примера два подводных сейсмических события.

Очередное катастрофическое цунамигенное землетрясение (получившее наименование Мауле) произошло 27 февраля 2010 г. у берегов Чили (магнитуда 8,8). Эпицентр располагался в океане. Наши наблюдения зафиксировали перестройки, как в самой очаговой зоне, так и в прилегающих объемах геологической среды, отражающиеся в структуре акустических и геоакустических полей, гравитомагнитных и геодинамических возмущений уже за несколько часов перед главным ударом [1, 8].

Обращаясь к записям землетрясения Мауле (рис. 1, п.1), отметим наличие четкого «возмущения», появившегося в аномальных вариациях сейсмического и гравитомагнитного поля Земли.

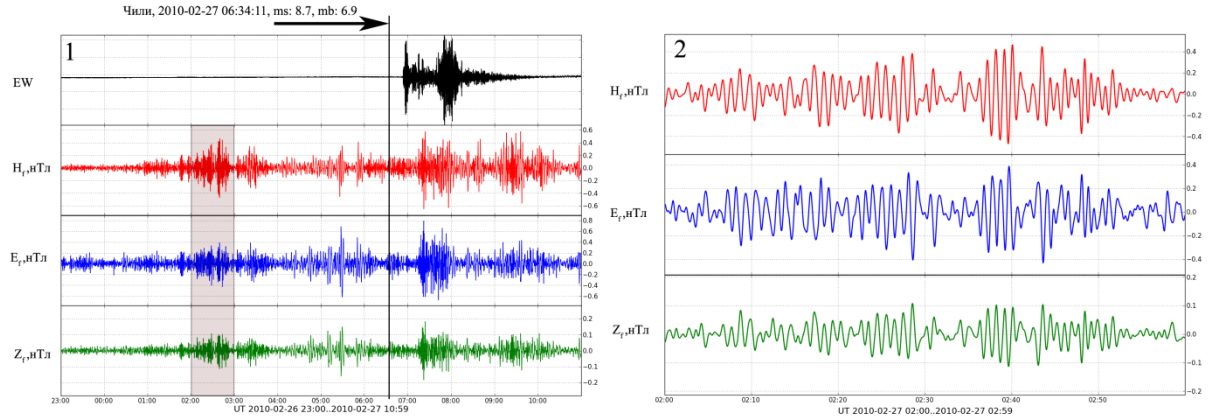


Рис. 1. Землетрясение Мауле. Побережье Центрального Чили, 2010-02-27 06:34:110, 36.122° Ю.Ш., 7 2.898° З.Д., H=22.9 км, ms: 8.7mb: 6.9. Данные наклономера EW и вариации магнитного поля H,E,Z, профильтрованные в диапазоне 10-300 секунд. Стрелка и вертикальная линия - время в очаге. EW – Показания наклономера, установленного в азимуте восток-запад. п.1. H_f, E_f, Z_f – Зафиксированные гравитомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне 10-300 секунд. Северокавказская геофизическая обсерватория, лаборатория в Карпогорах, Архангельская область п.2. Развернутая структура наведенного гравитомагнитного возмущения, проявившегося за четыре часа перед главным сейсмическим ударом.

Выраженная в нТл развернутая структура гравитомагнитных возмущений, проявившихся в вариациях магнитного поля Земли за четыре часа перед главным сейсмическим ударом, представлена на рис. 1, п.2.

Анализируя зафиксированные гравитомагнитные и сейсмогравитационные возмущения, отметим, что структура гравитомагнитных возмущений свидетельствует о наличии в развивающейся очаговой зоне и в прилегающих объемах геологической среды низкочастотных (с периодами порядка 100 секунд и более) колебательных процессов, в которые вовлечены большие объемы геологических отдельностей. Эти структуры являются своего рода низкочастотными сейсмогравитационными резонаторами с распределенной массой и упругостью.

Вывод о подвижках больших масс геологической среды в процессе развития анализируемого землетрясения подтверждается данными спутниковых наблюдений. В статье [9] показано, что применение современных космических технологий для мониторинга гравитационных аномалий, проявляющихся в районах очаговых зон землетрясения Мауле, позволяет оценить масштабы наведенных движений (рис. 2).

Результаты расшифровки показали, что к востоку от эпицентра образовалась гравитационная аномалия (-5мГал), основные характерные размеры которой превысили 500 км. По косейсмическим моделям установлен и тот факт, что зафиксированное отрицательное длинноволновое гравитационное возмущение является, в первую очередь, результатом дилатансии - компакции в больших отдельных объемах геологической среды, когда в результате имплозий и других геолого-геофизических процессов происходит быстрая трансформация локального объема [9, 4]. Одновременно по косейсмическим эффектам получены данные и о положительной гравитационной аномалии в прибрежной зоне Чили. Она оказалась значительно меньше. [9].

Теперь рассмотрим характерные сейсмогравитационные и гравитомагнитные возмущения, которые были зарегистрированы магнитными вариометрами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН перед сейсмическим событием в районе острова Рюкю, Япония (рис. 3). Спокойная магнитная обстановка на Земле в этот период способствовала получению качественных экспериментальных результатов.

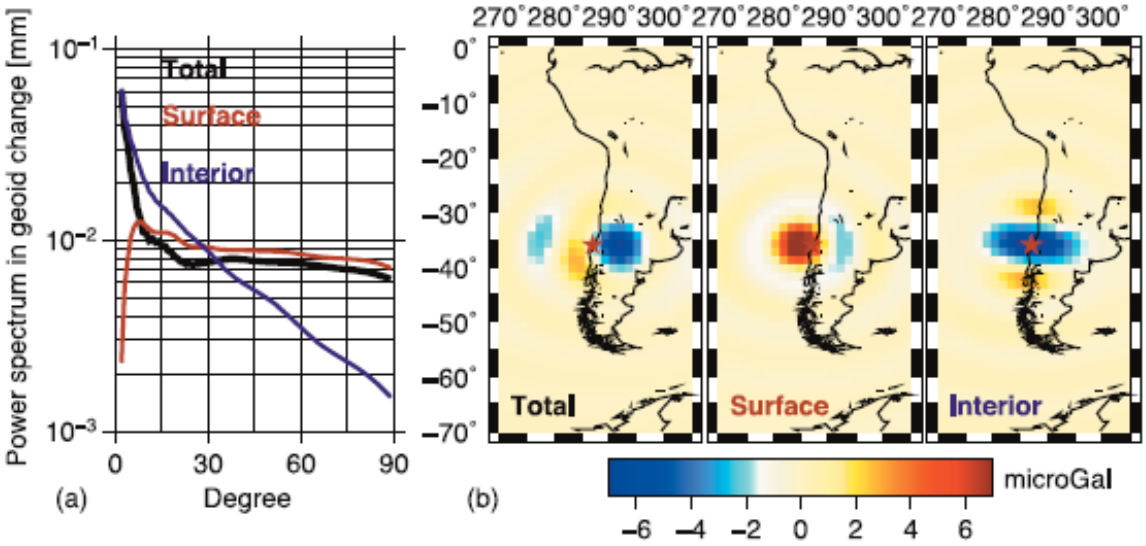


Рис. 2. Прогнозируемое изменение силы тяжести по сейсмически построенной конечной модели разлома [Han et., al., 2010].
(a) Спектр мощности изменений косейсмического геоида из-за деформации поверхности (красный), внутренней части (синий) и общей (черный).
(b) Соответствующее пространственное распределение гравитационных изменений. Видно, что положительная гравитационная аномалия, включает локальные площади, где отмечено поднятие поверхности, а отрицательная аномалия, обусловленная внутренними изменениями, охватывает и сушу, и акваторию.

Анализируя данные обсерваторских наблюдений, отметим что:

отчетливые гравитомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли проявляются обычно за восемь-десять часов до главного удара и продолжаются в течение нескольких часов, а перед главным ударом (за три-четыре часа) отмечается изменение их структуры и сигналы начинают соответствовать фону при спокойной магнитной обстановке на Земле;

в тонкой структуре регистрируемых гравитомагнитных возмущений можно заметить трансформацию УНЧ колебаний, свидетельствующую о том, что по мере развития сейсмического процесса в формировании очаговой области участвуют локальные гравитирующие геологические отдельности с присущими им резонансными особенностями;

сопоставляя данные наклономеров, отражающих развивающейся сейсмогравитационный процесс, и записи гравитомагнитных возмущений можно отметить, что перед главным ударом и далее в период разрушения сформировавшегося очага удается фиксировать только гидроакустические сигналы, а гравитомагнитные возмущения не превышают при этом фоновых показателей.

Завершая анализ сложных геофизических процессов в геосферах Земли и, прежде всего, в геологических структурах литосферы, отметим, что медленные движения масштабных гравитирующих геологических отдельностей, формирующих локальные акусто- или сейсмогравитационные поля, могут быть представлены некоторой динамической физической величиной резонансного типа, определенной во всех точках пространства. Отличительная черта такого нелинейного резонатора – генерация акустических, сейсмогравитационных и гравитомагнитных возмущений, проявляющихся в виде аномалий в тонкой структуре, фиксируемых аппаратурными методами, геофизических полей в геосферах Земли.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

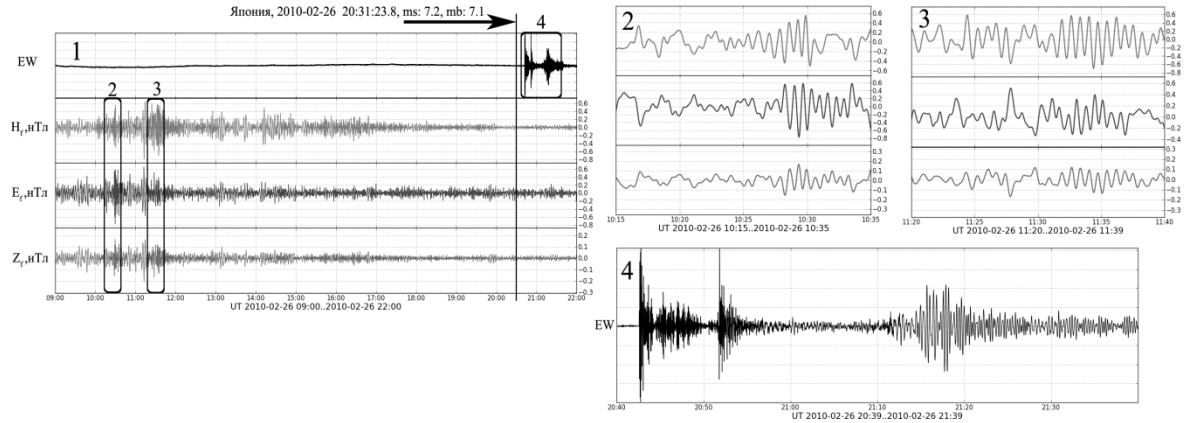


Рис. 3. Данные Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН. Запись землетрясения в районе Японии, острова Рюкю, 2010-02-26 20:31:23.8, 26.04° С.Ш., 128.58° В.Д., H = 15 км, ms: 7.2, mb: 7.1. Стрелкой и вертикальной линией отмечено время в очаге. 1 - Показания наклонометра, ориентированного по азимуту восток-запад (EW), отражающие наличие гравитомагнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли. 2,3 - Вариации магнитного поля H,E,Z, отражающие тонкую структуру гравитомагнитного возмущения, зафиксированные за 10-8 часов перед главным ударом, и профильтрованные в диапазоне 10-300 секунд, 4 - Развернутая структура сейсмического процесса.

Литература

1. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М.: ИФЗ РАН. 2012. Том 2., 510 с.
2. Собисевич А.Л., Собиевич Л.Е., Канониди К.Х., Лиходеев Д.В. О гравимагнитных возмущениях, предваряющих сейсмические события // Доклады академии наук. 2017. Т. 475, №4. С 444-447.
3. Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 5. С. 668–672.
4. Николаевский В.Н., Собисевич Л.Е. Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара // Геофизический журнал. 2015. Т. 37. № 4. С. 51–74.
5. Линьков Е.М. Сейсмические явления. Л.: ЛГУ. 1987. 248с.
6. Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.Ц. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // ДАН СССР. 1990. № 5. С. 1095 – 1098.
7. Vallée M., Ampuero J.P., Juhel K., Bernard P., Montagner J.-P., Barsuglia M. Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves // Science. 2017. V. 358. № 6367. P. 1164 – 1168.
8. Собисевич Л.Е., Старостенко В.И., Рогожин ЕА., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Канониди К.Х., Кендзера А.В., Орлюк М.И. Аномальные геофизические и сейсмотектонические процессы, наблюдавшиеся в период подготовки и развития землетрясения с магнитудой 8.8 в Мауле 2010 г. (Чили) // Геофизический журнал. 2016. Т. 38. № 6. С. 25–39.
9. Shin Chan Han, Jeanne Sauber and Scott Luthcke. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large scale mass redistribution. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 37, L23307, doi:10.1029/2010GL045449, 2010.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ВДОЛЬ МОРСКОГО ДНА, ОБЛАДАЮЩЕГО РЕЛЬЕФОМ

Р.А.Жостков, канд.физ-мат.наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

NUMERICAL MODELING OF THE SURFACE WAVE PROPAGATION ALONG THE MARINE BOTTOM WITH RELIEF

R.A.Zhostkov, Ph.D.
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia

Представлены результаты численного моделирования распространения поверхностных волн вдоль морского дна. Получены зависимости: амплитуды волны от расстояния до центра рельефа и отношения характерного размера рельефа к длине волны; скорости распространения волны для разных частот между фиксированными пунктами наблюдения по разные стороны от рельефа. Эти зависимости могут быть использованы для повышения точности амплитудных и дисперсионных методов зондирования морского дна. Показано, что вблизи центра рельефа происходит усиление амплитуды поверхностной волны в 2-12 раз.

The results of numerical modeling of the surface wave propagation along the marine bottom are presented. Dependences are obtained: wave amplitude from the distance to the center of the relief and the ratio of the characteristic relief dimension to the wavelength; wave velocity for different frequencies between fixed observation points on different sides of the relief. These dependencies can be used to improve the accuracy of amplitude and dispersion methods for probing the marine bottom. It is shown that near the center of the relief, the amplitude of the surface wave is amplified 2-12 times.

В настоящее время распространение поверхностных волн вдоль криволинейных границ хорошо изучено лишь для сферической и цилиндрической форм, что не так удобно в геофизических задачах, как рельеф в виде гауссоиды. В настоящей работе представлены результаты численного двумерного моделирования волны Стоунли, распространяющейся вдоль границы водного и гранитного полупространств и рассеивающейся на особенности рельефа, описываемой уравнением гауссоиды: $y = 2\sigma e^{-x^2/2\sigma^2}$, где σ – характерный линейный размер, соответствующий длине волны Стоунли с частотой 1 Гц.

Исследование проведено с использованием Comsol multiphysics 5.3 – среды для численного моделирования физических задач с помощью метода конечных элементов, успешно используемая учеными всего мира в течение последних лет [1].

Создана универсальная модель, позволяющая, например, выбирать любой тип рельефа, параметры сред или излучателя. Для повышения точности и скорости расчетов вместо равномерной сетки была разработана особая сетка, состоящая из 16-ти зон (рис. 1а). В некоторых зонах используются структурные четырехугольные сетки, поскольку они экономичнее неструктурных треугольных, используемых для связи зон с разными размерами конечных элементов. Существенное влияние на построение сетки оказывает отношение K характерного размера рельефа к длине волны. Дело в том, что шаг сетки должен быть много меньше обоих этих параметров. В случае длинных волн особо мелкий шаг необходим в области с неоднородностью рельефа, а для коротких волн – во всем приповерхностном слое. Использование такого же шага во всей модели не приводит к существенному повышению точности, однако требования к вычислительной мощности значительно возрастают. Используемый подход позволяет автоматически подбирать оптимальный размер конечных элементов (рис. 1б, в) и величину шага по времени, которые обеспечивают сходимость модели и ошибку менее 1 %. Время всех расчетов составляло около 28 суток. Такой большой срок частично объясняется необходимостью использования больших линейных размеров модели для ослабления влияния вытекающей поверхностной волны, амплитуда которой по мере приближения к особенности рельефа становится в 20 раз меньше амплитуды волны Стоунли, поэтому ее влиянием можно пренебречь.

Граничные условия в построенной модели соответствуют стандартным для задач такого типа: верхняя граница - свободная, правая и нижняя – слабоотражающие, левая – источник плоской волны Стоунли, соответствующий аналитическому решению [2]. Предварительные исследования показали, что отраженные продольные волны от правой границы не вносят заметных искажений в данные, регистрируемые на свободной поверхности, что обосновывает отсутствие буфера в правой части модели, в котором могли бы распространяться объемные акустические волны без отражения. Однако, отражение от нижней и верхней границ может приводить к искажениям около 3%, поэтому использование буфера в нижней и верхней части модели (рис. 1) имеет смысл.

В качестве зондирующего сигнала выбран импульс продолжительностью 8 периодов, представляющий собой гармонический сигнал, модулированный окном Ханнинга [3]. Таким

образом моделируется реальные цуги микросейсмического шума, на анализе которых строятся многие технологии зондирования земных недр.

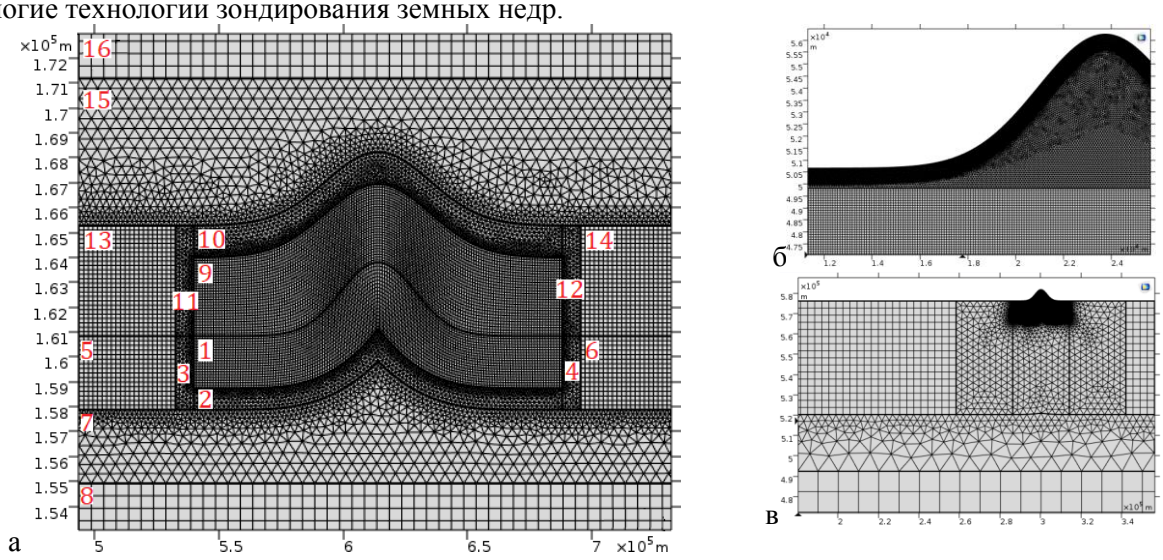


Рис. 1. Центральные фрагменты сеток для численного моделирования при К=1 (а); К=10 (б); К=0,1 (в). Числами отмечены следующие зоны: 1, 2, 9, 10 – зоны для расчета с повышенной точностью (зоны 1 и 9 выделены для более точного описания рельефа при зондировании длинными волнами); 5, 6, 13, 14 – зоны с размером элементов позволяющим корректно описывать падающую волну; (5 и 6 зоны расположены симметрично 3 и 4); 8, 16 – буферные зоны для рассеяния объемных волн; 3, 4, 7, 13, 14, 15 – зоны с треугольными сетками для перехода между зон со структурными сетка. На рисунках б и в для наглядности показана только нижняя часть сетки, соответствующая морскому дну.

Представленные на рис. 3 (см. вклейку) результаты моделирования показывают, что волна Стоунли сильно рассеивается (амплитудный коэффициент прохождения 0,05-0,5), если ее длина меньше десяти характерных размеров рельефа. В то же время вблизи центра особенности рельефа происходит фокусировка волн с длинами, лежащих в диапазоне от 1 до 10 характерных размеров рельефа с увеличением амплитуды до 3 раз для вертикальной компоненты и до 12 раз для горизонтальной.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности технологий зондирования земных недр, использующих амплитудные характеристики поверхностных волн, например, для метода микросейсмического зондирования [4], в котором глубинная структура ассоциируется с распределением относительной интенсивности микросейсмического шума. Эта технология успешно апробирована как при исследовании объектов на суше, например, [5, 6], так и на море [7].

Из сравнения этих результатов (рис. 3) с аналогичным исследованием для волны Рэлея, распространяющейся вдоль границы упругого полупространства с вакуумом (рис. 4, см. вклейку), следует, что рассеяние волны Стоунли на выпуклости обладает большим сходством с рассеянием волны Рэлея на углублении. Дело в том, что в волне Стоунли большая часть энергии сосредоточена именно в жидком полупространстве. Однако из-за того, что скорость волны Стоунли почти не отличается от скорости звука в жидкости, а скорость рэлеевской волны почти в два раза меньше скорости продольных волн в твердом теле, то преобразование поверхностной волны в объемную эффективнее для волн Стоунли, поэтому амплитуда волн после прохождения особенности рельефа гораздо меньше (и в большем частотном диапазоне) для волн Стоунли, чем Рэлея.

Так же из-за того, что энергия волны Стоунли с расстоянием от границы раздела двух сред в жидкости убывает медленнее, чем в твердом теле, фокусировка ее энергии вблизи центра особенности рельефа происходит более интенсивно, чем для волны Рэлея, поэтому усиление амплитуды в некотором диапазоне частот может быть не на 20-30%, а на 200-300%.

Помимо исследования распределения амплитуды поверхностных волн, проведенное моделирование позволило проанализировать их дисперсионные свойства. Для ряда геофизических задач (в первую очередь, для поверхностно-волновой томографии) полезно определить, как меняется скорость поверхностной волны в зависимости от рельефа. В рамках настоящего проекта мы провели такое исследование с помощью корреляционного анализа синтетических сейсмограмм.

Как видно из рис. 4а, вблизи особенности рельефа определение скорости поверхностной волны приводит к абсолютно неверным результатам (стоит отметить, что анализ пиков тоже дает ошибки). Это связано с тем, что в этой области одновременно существует несколько типов волн, выделить из которых чисто поверхностную волну не представляется возможным. Это значит, что поверхностно-волновая томография при изучении обладающих сильно выраженным рельефом объектов может содержать существенные ошибки, поэтому в этом случае лучше применять методы, использующие данные не о скорости поверхностных волн, а об их амплитуде.

Тем не менее, если обратиться к анализу времен распространения поверхностных волн между точками, в которых они преобладают, можно рассчитать зависимость эффективной скорости поверхностной волны от ее частоты (в нашем случае, от отношения К характерного размера особенности рельефа и длины падающей волны). Мы рассчитали эту зависимость для рельефа в виде гауссоиды (рис. 4б).

Ожидалось, что на низких частотах, когда волна практически не взаимодействует с особенностью рельефа, скорость будет близка к значению скорости волны Стоунли, затем с повышением частоты она будет монотонно уменьшаясь стремиться к значению, обусловленному увеличению пути, который проходит поверхностная волна, распространяясь вдоль границы. Однако на частотах, длины которых соизмеримы с характерным размером особенности рельефа, наблюдается рост амплитуды до значений, превышающих асимптотику на низких частотах! Это связано с тем, что поверхностные волны при приближении к особенности рельефа излучают объемные волны, которые распространяются квазигоризонтально, а при приближении к противоположной границе вновь преобразуются в поверхностную волну, таким образом, часть пути энергия поверхностной волны переносится в виде объемной волны с большей скоростью. Также такой механизм распространения приводит к тому, что на поверхностную волну могут оказывать влияние локальные неоднородности, расположенные на пути распространения переизлучаемых объемных волн, т.е. эти волны могут нести информацию о глубинах гораздо больших, чем половина ее длины (как предполагается в поверхностно-волновой томографии и методе микросейсмического зондирования).

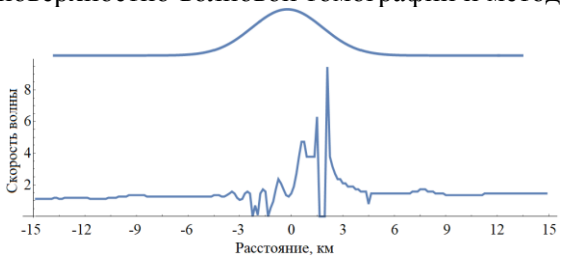


Рис. 5. Зависимость средней скорости падающей слева поверхностной волны между соседними виртуальными сейсмометрами в зависимости от расстояния до центра особенности рельефа для отношения K=1.

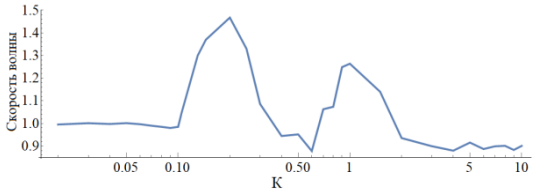


Рис. 6. Зависимость средней скорости падающей слева поверхностной волны между виртуальными сейсмометрами, симметрично расположенными на расстоянии 5σ от центра особенности рельефа от отношения K характерного размера особенности рельефа к длине падающей волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-35-60109), а также гранта Президента Российской федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

Литература

1. Comsol multiphysics 5.3 Лицензия №9600341.
2. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.
3. Цуканов А.А, Калабухов Д.И., Романов А.И., Горбатиков А.В., Сердобольская М.Л., Грачев Е.А. Моделирование волн Рэлея в неоднородной среде с использованием вычислительных систем с параллельной архитектурой // Учебное пособие МГУ им.М.В.Ломоносова физический факультет, 2010.
4. Горбатиков А.В. Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. 2006. № 7.
5. Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б. Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология, 2017, №6, С. 28-32.
6. Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // Сейсмические приборы, 2016, Т. 52, №3, С. 5-19.
7. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л. Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2017, Т. 81, №1, С. 72-75.

ЭКЗАРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ АРКТИЧЕСКОГО РОССИЙСКОГО ШЕЛЬФА

Н.В.Либина, канд.техн.наук, С.Л.Никифоров, д-р геогр.наук
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

EXCERSION EVIDENCES IN THE EASTERN SECTOR OF THE ARCTIC RUSSIAN SHELF

N.V.Libina, Ph.D., S.L.Nikiforov, Dr.Sc.
P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Результаты комплексных сейсмоакустических исследований в пределах восточного арктического шельфа России зафиксировали многочисленные экзарационные борозды ледового выпахивания как в мелководной, так и в глубоководных его частях. Современное высокоразрешающее сейсмоакустическое оборудование позволило получить детальные морфометрические характеристики борозд выпахивания и разделить эти формы рельефа на современные прибрежные и древние (или реликтовые), которые расположены на глубоководных участках. Встречаемость борозд ледового выпахивания оказалась выше рассчитываемой по данным ледовой обстановки.

Results of our seismoacoustic studies within Russia eastern Arctic shelf recorded numerous ice gouging evidences both in shallow and deep parts. Modern high-resolution equipment allowed to obtain and fulfilled detailed morphological analyses of such kind of seabed relief and subdivide them on modern and relictic ones. The occurrence of bottom plowing by ice formations turned out to be higher than calculated from the ice situation.

На арктическом шельфе и в прибрежной зоне ряд природных процессов, таких как ледовая экзарация, оползни, таяние многолетнемерзлых пород, термоабразия берегов и сейсмическая активность представляют опасность для большинства видов деятельности. При проведении комплексных сейсмоакустических исследований в пределах восточного арктического шельфа России были зафиксированы многочисленные борозды ледового выпахивания как в мелководной, так и в глубоководных его частях. Первичные натурные данные были получены во время экспедиционных исследований 57-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» на восточном арктическом шельфе России. Используемый аппаратурный комплекс состоял из параметрического эхолот-профилографа SES-2000 и двухчастотного гидролокатора бокового обзора (ГБО) "Гидра" 250/500 (с возможным изменением частоты излучения - 250 либо 500 кГц) [1].

Высокоразрешающее сейсмоакустическое оборудование позволило получить детальные морфометрические характеристики зафиксированных борозд выпахивания, и разделить данные формы рельефа на современные прибрежные (рис. 1) и древние (реликтовые) глубоководные (рис. 2). По происхождению они все являются бороздами выпахивания.

Экзарационные явления могут стать причиной аварийной ситуации при строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений и коммуникаций на морском дне. Опасность представляют динамические и статически нагрузки ледовых образований на инженерные объекты.

На мелководье были зафиксированы как одиночные борозды, так и серии (или группы) борозд различной ширины и протяженности. Наблюдались многочисленные следы последовательного наложения группы борозд друг на друга, в различных направлениях. Причинами изменений движения могут являться волнение, ветровой дрейф, приливные, сгонно-нагонные явления, а также их сочетание.

Например, угол подхода волн к береговой линии может определять простирание этих форм рельефа. На рис. 1 приведены фрагменты акустических изображений дна с разнонаправленными следами (бороздами) ледового выпахивания, где видно пересечение борозд более свежими следами перемещения других ледовых образований. На рис. 1в зафиксирован вероятный отрыв стамухи от дна.

Результаты гидролокационной съемки свидетельствуют о современном активном динамическом воздействии морских льдов на поверхность дна (борозды, царапины, углубления, валы). Во многих случаях эти образования имеют сложную форму, что связано с воздействием на дно «многокилевых» ледовых образований. Имеющиеся разнообразие борозд говорит о многократном воздействии на одни и те же участки дна разных по размерам ледовых образований, которые перемещались под разными углами к береговой линии.

Результаты наших инструментальных наблюдений даже на отдельных небольших участках шельфа показали высокую интенсивность следов ледового выпахивания дна на глубинах, на которых по вероятностным оценкам встречаемости стамух в зависимости от глубины, их количество должно быть единичным. Так, в работах [2, 3], на основе анализа многолетних материалов ледовой авиационной разведки и спутниковой информации были выполнены

оценки геометрических параметров стамух и торосистых образований, пространственные и временные изменения их количества, частота встречаемости. По результатам статистической обработки приводятся следующие данные по распространенности стамух в море Лаптевых (в зависимости от глубины моря): средняя осадка - 11.59 м, минимальная осадка - 0.5 м, максимальная осадка - 37.2 м. Основная часть стамух (60 % от общего их числа) наблюдалась на участках с глубиной моря (H) от 8 до 16 м. Далее с увеличением H количество стамух быстро уменьшается и при $H \geq 24$ м не превышает 1%. При этом отмечается, что оценка вероятности встречаемости стамух в зависимости от глубины моря и расчеты возможных осадок стамух выполнены по нерегулярным данным ледовых разведок, как по времени, так и в пространстве. Из интенсивности выпахивания дна ледовыми образованиями на глубинах около 25 м, следует, что количество ледовых образований с осадкой достигающей дна, превышает рассчитанную вероятность встречаемости по данным ледовой обстановки.

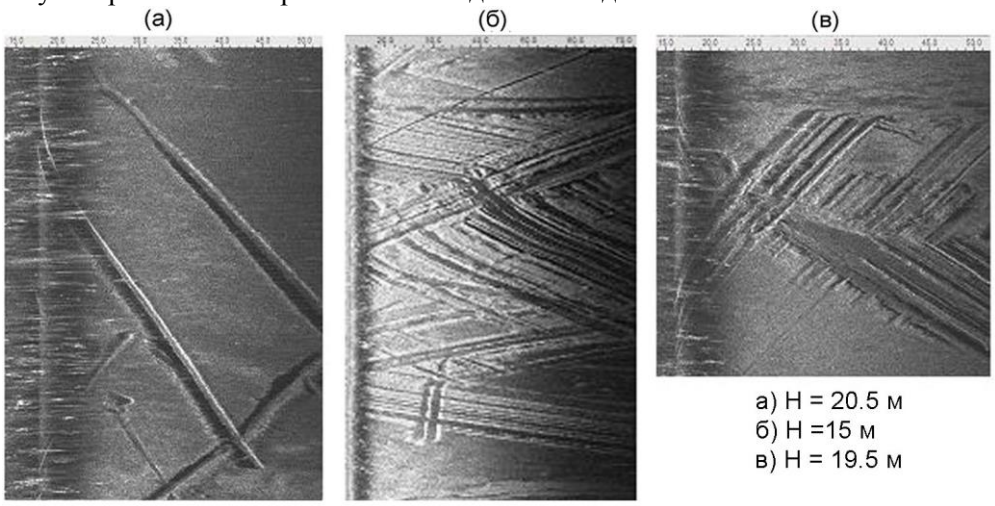
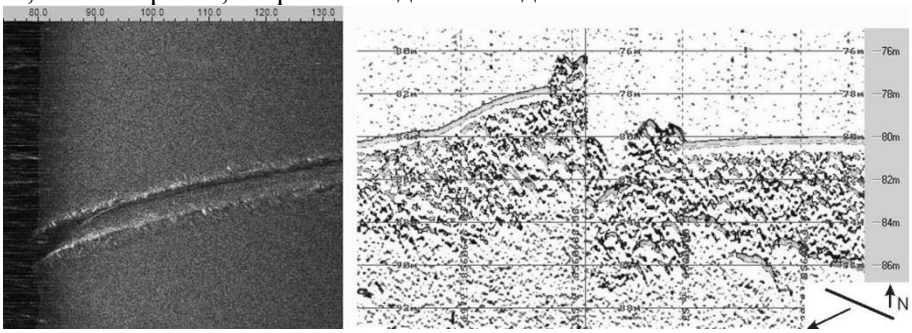


Рис. 1. Акустическое изображение экзарационных борозд на участках дна моря Лаптевых. H – глубина моря.

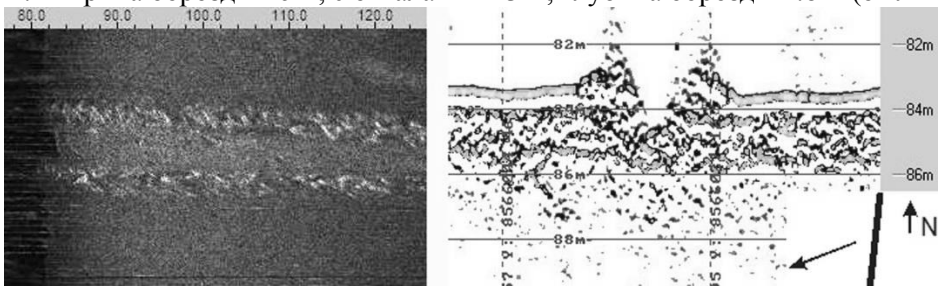
На глубинах более 15-20 м влияние гидродинамических процессов, приводящих к размыванию следов ледового воздействия, слабее, чем на меньших глубинах. Следовательно, наблюдаемые борозды выпахивания могут сохраняться в течение большего времени и, предположительно, могут являться многолетними. Как правило, отношение глубины киля к высоте паруса тороса составляет по различным данным от 2.75 до 4.4 м, что связано со свойствами льда, вида торосообразования, линейных размеров отдельных торосов и гряд, формы киля и протяженности. Встречаемость и плотность распределения, а также глубина возможной осадки торосистых образований, может рассчитываться по различным алгоритмам, однако натурные данные и применение высокоразрешающих акустических методов (профилирование и ГБО) показывает более точный результат. В море Лаптевых борозды выпахивания наблюдались не только в пределах мелководья, но и на больших глубинах - от 50 до 90 м (рис. 2). Их образование никак не может быть связано с современным ледовым выпахиванием. При отношении размеров киля к парусу тороса 3 – 4, принципиально возможно появление следов на глубинах до 50-60 м. При этом размер паруса тороса должен быть не менее 15 м, а такие торосы практически не встречаются, еще реже встречают торосы с величиной паруса 20 м.

Образование глубоководных борозд выпахивания вероятно, связано с палеогеографическими причинами - регрессией моря в позднем плейстоцене, которая была почти до бровки шельфа. В результате периодического осушения и затопления шельфа сформировалась слоистая структура верхней осадочной толщи, причем в регрессивные циклы (эпохи похолоданий) происходило интенсивное вымораживание исходной поверхности и формирование плотных обезвоженных горизонтов (как, например, в период последней позднечетвертичной регрессии моря). В трансгрессивные циклы (эпохи потепления) накапливались относительно рыхлые морские отложения, при этом устойчивая отрицательная температура придонной воды способствовала консервации этой слоистой структуры. Отсутствие покровного оледенения не исключало наличия мощных дрейфующих льдов, которые производили экзарацию дна в современной глубоководной части моря, а в дальнейшем следовали за трансгрессивным поднятием уровня моря. При этом, вероятно, происходило разрушение плотного обезвоженного глинистого слоя

осадков, образованного в период регрессии. Далее, во время неоднократных трансгрессивно-регрессивных колебаний уровня моря, сформированные траншеи с отвалами грунта, были заморожены и, таким образом, сохранились до наших дней.



а) H=80 м. Ширина борозды 46 м, с отвалами 213 м, глубина борозды 1.8 м (от линии дна).



б) H=83.6 м. Ширина борозды 22 м, с отвалами 78 м, глубина - 1.5 м.

Рис. 2. Фрагменты записи глубоководных борозд на дне моря Лаптевых (слева - акустическое изображение, справа – сейсмоакустический разрез).

В западном секторе Арктики различными экспедициями также наблюдались многочисленные глубоководные борозды и их пересечения. Так в Баренцевом море борозды фиксировались на глубинах 300 м и глубже [4, 5].

Выводы. Экзарационные борозды представляют природные риски.

Согласно результатам натурных исследований встречаемость борозд оказалась выше прогнозируемой по данным ледовой разведки и ледовой обстановки.

Зафиксированные борозды можно разделить, на две категории: современные мелководные прибрежные и древние (реликтовые) глубоководные.

Во время регрессии моря в позднечетвертичный период отсутствие покровного оледенения не исключало наличия мощных дрейфующих льдов, которые производили выпахивание дна в современной глубоководной части моря, а в дальнейшем следовали за трансгрессивным поднятием уровня моря. Позднее, во время повторяющихся трансгрессивно-регрессивных циклов изменения уровня моря, сформированные борозды выпахивания были заморожены и сохранились до настоящего времени.

Прибрежные мелководные борозды являются результатом современного взаимодействия ледовых образований с морским дном.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0005).

Литература

1. Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Либина Н.В., Росляков А.Г. Сейсмоакустические исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в морях восточной арктики в 57-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» // Океанология, 2012, том 52, № 4, С. 617-620.
2. Горбунов Ю.А. Стамухи в юго-восточной части моря Лаптевых // ПОЛЭКС–Север-76. Ч. 2. Л.: Гидрометеоиздат. 1979. С.107–110.
3. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008, № 2 (79). С.111-116.
4. Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю., Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Кохан А.В., Мороз Е.А., А.А. Пейве А.А., Н.П. Чамов Н.П., Ямпольский К.П. Строение зоны перехода континент-океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24-26 рейсов НИС «Академик Николай Страхов», 2006-2009 гг.) // Строение и история развития литосферы. М: Paulsen.- 2010. С.111-157.
5. Rebesco M., Liu Y., Camerlenghi A., Winsborrow M., Laberg J. S., Caburlotto A., Diviacco P., Accettella D., Sauli C., Wardell N., Tomini I. Deglaciation of the western margin of the Barents Sea Ice Sheet — A swath bathymetric and sub-bottom seismic study from the Kveithola Trough. Marine Geology 279 (2011) 141–147.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ УПРУГОЙ БИМОДУЛЬНОЙ СРЕДЫ

В.А.Гусев, канд.физ-мат.наук
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

SURFACE ACOUSTIC WAVES ON THE BOUNDARY OF BIMODULE MEDIUM

V.A. Gusev, Ph.D
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Рассмотрено формирование поверхностных акустических волн на границе упругой бимодульной среды. Развитая модель среды позволяет описывать акустические явления с неклассической нелинейностью в мелком море при наличии в донном грунте амплитудно-зависимых эффектов порогового характера, вызванных наличием внутренней структуры, например, трещин или полимерных цепей. Построен временной профиль поверхностной волны. Показано, что в бимодульной среде он принципиально несимметричен. Это приводит к формированию однополярного предельного профиля.

Generation of surface acoustic waves on the boundary of elastic bimodule medium is described. The developed model of medium allows to describe acoustic phenomena with non-classical nonlinearity in shallow sea in the presence of bottom soil with amplitude-dependent threshold effects, caused by the presence of internal structure such as cracks or polymeric chains. The temporal profile of the surface wave is plotted. It is shown that in the bimodule medium this profile is fundamentally asymmetric. This leads to the formation of the unipolar limit profile.

Известно, что вдоль границ раздела слоистых сред распространяются локализованные акустические возмущения – волны рэлеевского и других типов. Сильная зависимость глубины локализации волны от ее длины позволяет использовать эти волны для диагностики среды в задачах геофизики и неразрушающего контроля. Наибольший интерес связан с исследованием неоднородных сред со сложной внутренней структурой. В настоящее время актуальной становится задача изучения структурных и неклассических неоднородностей и нелинейностей среды. Например, в среде могут присутствовать поры или трещины, обладающие сложной динамикой. Их наличие приводит к различному отклику среды в фазах растяжения и сжатия. Для растяжения трещины достаточно небольшого усилия, а для ее сжатия, наоборот, требуется большая сила. Простейшей моделью является бимодульная среда с различными модулями упругости на сжатие и на растяжение. Распространение волн в подобных средах характеризуется "неклассическими" типами нелинейности, в частности, реактивного, гистерезисного и диссипативного вида. Конструирование адекватных моделей сред с подобным поведением должно основываться на экспериментальных данных. Однако исследование нелинейных акустических явлений в этих средах может базироваться и на некоторых модельных соотношениях, учитывающих основные качественные факторы.

Одной из достаточно общих моделей в одномерной постановке, учитывающих гистерезисные и нелинейно-диссипативные эффекты, является реологическое соотношение [1]

$$\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon}) = E(\varepsilon - f(\varepsilon)) + \alpha(1+g(\varepsilon))\dot{\varepsilon}\,. \qquad (1)$$

Здесь ε - относительная деформация среды, $\dot{\varepsilon}$ - скорость ее изменения, σ - напряжение, Па, E - модуль Юнга, Па, α - коэффициент затухания, Па с, функции $f(\varepsilon)$ и $g(\varepsilon)$ описывают нелинейные и нелинейно-диссипативные свойства среды соответственно. Для $f(\varepsilon)$ можно использовать выражение $f(\varepsilon) = \begin{cases} \gamma_1\varepsilon^2, \varepsilon > 0, \\ -\gamma_2\varepsilon^2, \varepsilon < 0, \end{cases}$ где параметры $\gamma_{1,2}$ имеют смысл нелинейных параметров, в общем случае различных для фаз сжатия и разрежения.

При анализе акустических явлений на основе модели (1) возникают сложности, связанные с решением нелинейных дифференциальных уравнений. Это приводит к необходимости использования методов упрощения и построения приближенных решений. Наибольшие сложности при этом связаны с исследованием именно поверхностных волн, характеристики которых определяются из дисперсионных уравнений. Другой подход состоит в конструировании новых математических моделей, с одной стороны сохраняющих качественные особенности поведения, а с другой стороны позволяющих упростить расчеты. Одним из таких подходов является исследование моделей с квадратично кубичной нелинейностью и в более общем случае модульной нелинейностью [2,3]. В случае квадратично кубичной нелинейности слагаемое вида x^3 заменяется слагаемым $x|x|$, в случае модульной

нелинейности можно заменить слагаемое вида x^2 на $|x|$. Моделируя в соответствии с этим подходом соотношение (1), можно предложить следующее реологическое уравнение:

$$\sigma = E\left(\varepsilon + \gamma|\varepsilon|\right) + \alpha\left(1 + \beta\,\mathrm{sgn}\left(\varepsilon\right)\right)\dot{\varepsilon}\,. \tag{2}$$

Хотя здесь нелинейные параметры γ и β приняты равными для фаз сжатия и разрежения, однако модульная зависимость приводит к различным эффективным упругим модулям для этих фаз. В отсутствие затухания модель (2) приводит к волновому уравнению, в котором скорость распространения различна для положительных и отрицательных деформаций.

Реологические модели (1) и (2) относятся к случаю одномерного распространения волн. Перейдем к построению математической модели для поверхностных волн, полное акустическое поле которых состоит из продольной и поперечной компонент. В данной работе рассматривается аналог рэлеевских волн на границе упругого полупространства при $z > 0$ и вакуума при $z < 0$. Такая модель очень приближенно может быть принята для тонкого водного слоя в мелком море, когда отличия скорости волн Рэлея и Стоунли малы. Тем не менее, основные нелинейные эффекты эта модель качественно позволяет выявить. На границе $z = 0$ задаются условия нулевых нормальных и тангенциальных напряжений. Тогда вдоль такой границы могут распространяться поверхностные релеевские волны. Для однородных упругих сред реологическое уравнение в отсутствие затухания имеет стандартный вид

$$\sigma_{ik} = \lambda u_{ll}\delta_{ik} + 2\mu u_{ik},\ u_{ik} = \left(\partial u_i/\partial x_k + \partial u_k/\partial x_i\right)/2\,, \tag{3}$$

где σ_{ik} - тензор напряжений, Па, u_i - компоненты вектора смещений, м, λ, μ - параметры Ламэ, Па, δ_{ik} - символ Кронекера. Подставляя (3) в уравнение движения $\rho\ddot{u}_i = \partial\sigma_{ik}/\partial x_k$ (ρ - плотность, кг/м^3) и вводя скалярный φ, м^2, и векторный $\boldsymbol{\psi}$, м^2, потенциалы согласно выражению $\mathbf{u} = \mathrm{grad}\,\varphi + \mathrm{rot}\,\boldsymbol{\psi}$, получим для них волновые уравнения

$$\frac{1}{c_l^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - \Delta\varphi = 0\,,\ \frac{1}{c_t^2}\frac{\partial^2\boldsymbol{\psi}}{\partial t^2} - \Delta\boldsymbol{\psi} = 0\,. \tag{4}$$

Здесь c_l, c_t - скорости продольных и поперечных волн соответственно, м/с. Введем в модель (3) модульную нелинейность по аналогии с моделью (2), считая, что «управляющим» фактором является объемная деформация. Это означает, что упругие модули среды различны для сжатия и для растяжения и зависят от величины изменения объема. Сдвиговая же деформация в данной модели не приводит к изменению упругих модулей. В итоге получаем модель

$$\sigma_{ik} = \left(\lambda u_{ll} + \gamma|u_{ll}|\right)\delta_{ik} + 2\left(\mu + \delta|u_{ll}|\right)u_{ik}\,. \tag{5}$$

Модель (5) с модульной нелинейностью приводит к различию скоростей для положительной и отрицательной фаз деформаций. Тогда для каждого интервала постоянной полярности можно получить уравнения вида (4), но со своей скоростью звука. Таким образом, учитывая и основной линейный диссипативный член из (2), получаем следующую модель:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - c_{l\pm}^2\Delta\varphi = \alpha_{l\pm}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t\partial x^2}\,,\ \frac{\partial^2\boldsymbol{\psi}}{\partial t^2} - c_{t\pm}^2\Delta\boldsymbol{\psi} = \alpha_{t\pm}\frac{\partial^2\boldsymbol{\psi}}{\partial t\partial x^2}\,. \tag{6}$$

Здесь индексы "+" и "-" соответствуют положительным и отрицательным фазам деформации $u_{ll} = \partial u_x/\partial x + \partial u_z/\partial z$ соответственно. Формально уравнения (6) являются линейными. Однако, скорости звука $c_{l\pm}$, $c_{t\pm}$ учитывают вклад модульной нелинейности, а полное решение дается сшивкой парциальных решений для различных фаз, что приведет к нелинейным эффектам.

Для нахождения локализованной вблизи границы волны отыскиваем решения уравнений (6) в виде гармонической волны $\exp\left(i\left(kx - \omega t\right)\right)$ с частотой ω, с$^{-1}$, и волновым числом k, м$^{-1}$. В этом случае для разных фаз частота ω будет одинаковой, но волновое число k окажется различным. Оно определяется дисперсионным уравнением. Для упрощения пренебрежем диссипацией. Подставляя указанную гармоническую волну в (6) и выбирая ограниченные решения для поперечной структуры волны, получим выражения для потенциалов:

$$\varphi_+ = A\exp\left(-q_+ z + i\left(\omega t - k_+ x\right)\right),\ \psi_+ = A\exp\left(-s_+ z + i\left(\omega t - k_+ x\right)\right), \tag{7а}$$

$$\varphi_- = A\exp\left(-q_- z + i\left(\omega t - k_- x\right)\right),\ \psi_- = A\exp\left(-s_- z + i\left(\omega t - k_- x\right)\right), \tag{7б}$$

где A - характерная амплитуда, м^2, $q_\pm = \sqrt{k_\pm^2 - k_{l\pm}^2}$, $s_\pm = \sqrt{k_\pm^2 - k_{t\pm}^2}$, $k_{l\pm} = \omega / c_{l\pm}$, $k_{t\pm} = \omega / c_{t\pm}$. Решения (7) подставляем в граничные условия при $z = 0$:

$$T_{zz} = \lambda\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right) + 2\mu\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial x \partial z}\right) = 0,\ T_{xz} = \lambda\left(2\frac{\partial^2\varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right) = 0. \quad (8)$$

Приравнивая к нулю определитель этой системы отдельно для положительной и отрицательной фаз и решая получившееся уравнения $4k_\pm^2 q_\pm s_\pm - \left(k_\pm^2 + s_\pm^2\right)^2 = 0$, найдем скорость поверхностной волны. Поскольку упругие модули для положительной и отрицательной фаз различны, то и скорости оказываются различными. Подставляя найденные скорости в (7) и используя формулы $u_x = \partial\varphi/\partial x - \partial\psi/\partial z$, $u_z = \partial\varphi/\partial z + \partial\psi/\partial x$, получим выражения для смещений:

$$u_x = Ak\left[\exp(-qz) - \frac{2qs}{k^2 + s^2}\exp(-sz)\right]\exp\left(i\left(kx - \omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right), \quad (9а)$$

$$u_z = Aq\left[\exp(-qz) - \frac{2k^2}{k^2 + s^2}\exp(-sz)\right]\exp(i(kx - \omega t)). \quad (9б)$$

Здесь вместо величин k, q, s нужно подставлять соответствующие данному интервалу полярности значения $k_\pm$, $q_\pm$, $s_\pm$. Для деформации u_{ll} получаем выражение

$$E = u_{ll} = A\left(k^2 - q^2\right)\exp(-qz + i(kx - \omega t)).$$

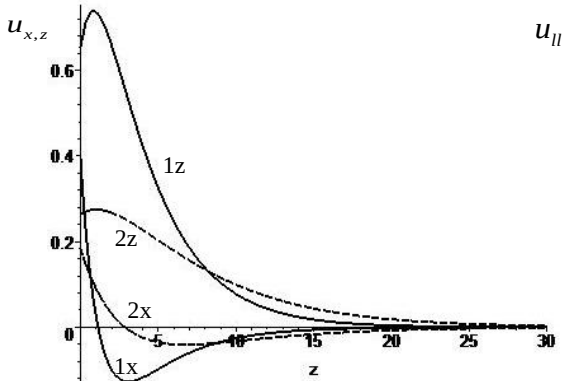


Рис. 1. Характерные зависимости вертикальных (1z, 2z) и горизонтальных смещений (1x, 2x) от глубины.

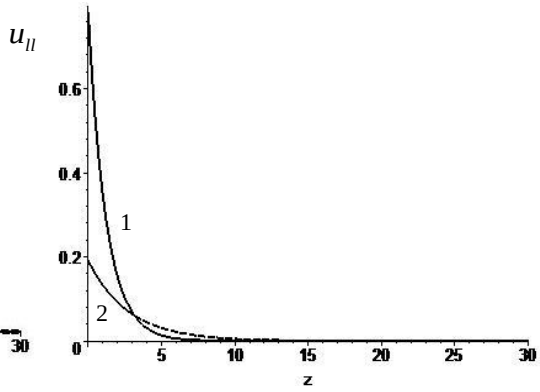


Рис. 2. Зависимость амплитуды деформации от глубины.

На рис. 1 приведены характерные зависимости амплитуд вертикальных и горизонтальных смещений от глубины для двух наборов параметров, соответствующих различным парциальным решениям (кривые с номером 1 и 2). Наиболее важно то, что профили оказываются несимметричными и отличаются по амплитуде за исключением одной выделенной глубины. Это скажется на характере эволюции профиля. Кроме того, амплитуда деформации на рис. 2 всегда положительна (кривые 1 и 2 – различные парциальные решения). Таким образом, при сшивании парциальных решений для деформации достаточно рассмотреть отдельно положительную и отрицательную фазы. Введем величину $\tau = k_+ x - \omega t$ - фаза деформации. Тогда для исходного синусоидального сигнала можно записать: $E_+ = A_1 \sin\tau$, $E_- = A_2 \sin(\tau + \Delta k x)$, где $\Delta k = k_- - k_+$ - расстройка волновых чисел. Соответственно, будет использоваться положительное парциальное решение, если $A_1 \sin\tau > 0$, и отрицательное парциальное решение, если $A_2 \sin(\tau + \Delta k x) < 0$. Таким образом, из-за фактора $\Delta k x$ происходит смещение отрицательной фазы профиля относительно положительной.

Примеры получающегося в итоге временного профиля для деформации показаны на рис. 3 на поверхности среды и на глубине $z = 4$. При распространении волны в бимодульной среде возникают особенности двух видов. Первый вид – «наезд» различных ветвей друг на друга. Второй – образование пропуска в профиле. В первом случае неоднозначность профиля устраняется проведением разрыва. Положение разрыва определяется «правилом равенства площадей». Его физический смысл состоит в том, что площадь под графиком численно равна импульсу волны. Поскольку на волну после образования разрыва дополнительные силы не действуют, то импульс сохраняется. Следовательно, отсекаемые и добавляемые к графику

участки должны обладать одинаковой площадью. Эти разрывы изображены на рис. 3 жирными линиями. Во втором случае в профиле образуется пропуск – отсутствие сигнала.

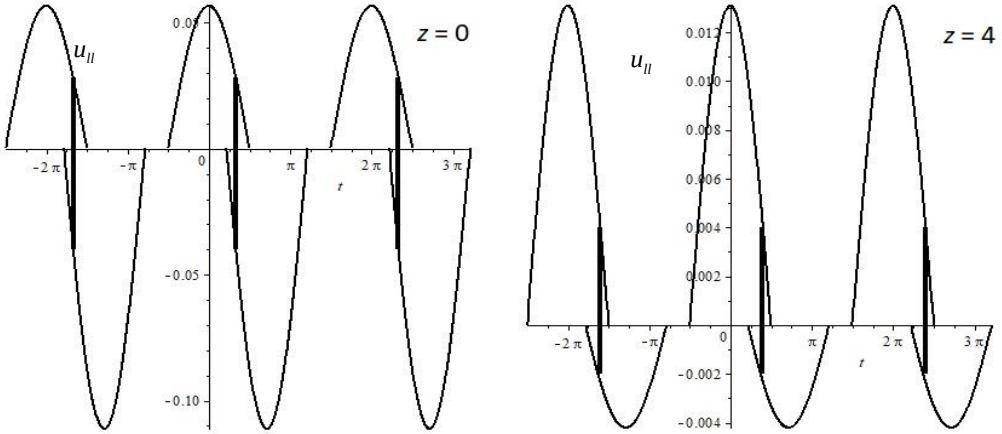


Рис. 3. Поверхностная волна на границе бимодульной среды, временной профиль деформации.

Во всех случаях получается разрыв функции или ее производной. Это обусловлено тем, что в рассмотренной модели не учитывается ряд факторов, играющих определяющую роль именно в областях резкого изменения профиля, в первую очередь диссипация. Учет вязкости в области перекрывания решений приведет к сглаживанию ударного фронта. В области расхождения решений вместо резких обрывов будут образовываться гладкие «хвосты», обеспечивая малое, но ненулевое решение в области пропуска.

Нелинейное искажение профиля состоит в постепенном «срезании» его части. Поскольку в бимодульной среде профиль принципиально несимметричен, такое «срезание» профиля происходит до тех пор, пока фаза с наименьшей амплитудой полностью не поглотится фазой противоположной полярности. В итоге волна превращается в последовательность однополярных импульсов. Полное исчезновение волны на конечном расстоянии может произойти только на глубине, где амплитуды сравниваются. При переходе через эту глубину меняется полярность предельного профиля. Интересно также отметить, что нелинейные эффекты получены на основе формально линейных уравнений.

В работе исследована структура поверхностных волн, формирующихся в бимодульной среде, моделирующей трещиноватую породу. Предложены определяющие уравнения для такой среды. Выведены уравнения, описывающие распространение поверхностных акустических волн. Фактически среда оказывается нелинейной, что означает искажение профиля волны, хотя для каждого интервала амплитуд уравнения являются линейными. Рассчитаны временные профили нелинейно искаженных волн и их пространственная структура. Показано, что в бимодульной среде формируется механизм нелинейного затухания, приводящий к формированию однополярной волны с ударными фронтами.

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-02-00764, 16-29-02046.

Литература

1. Назаров В.Е. Взаимодействие акустических волн в микронеоднородных средах с гистерезисной нелинейностью и релаксацией // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 2. С. 204-210.
2. Руденко О.В. Модульные солитоны // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 471. № 6. С. 451-454.
3. Руденко О.В., Гусев В.А. Автомодельные решения уравнения типа Бюргерса с квадратично кубичной нелинейностью // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 466. № 1. С. 25–29.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМОЙ ОРИЕНТАЦИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

Г.А.Федотов, д-р техн.наук
АО «Морские неакустические комплексы и системы», Санкт-Петербург, Россия

ESTIMATION OF THE ACCURACY IN DETERMINING SEA WATER DENSITY AT THE UNCONTROLLED ORIENTATION OF THE HYDROSTATIC METER

G.A.Fedotov, Dr.Sc.
JSC «Marine Non-Acoustic Complexes and Systems», St. Petersburg, Russia

Выполнены теоретические оценки погрешности измерения плотности морской воды с помощью предложенного ранее гидростатического метода, основанного на совместной обработке сигналов датчиков давления, специальным образом конфигурированных в пространстве. Проведены расчеты погрешности, обусловленной неконтролируемым изменением наклона гидростатического измерителя в морской среде, для различных конфигураций датчиков давления и различных функций распределения угла наклона измерителя.

Theoretical estimates of the error in measuring sea water density with the help of the previously proposed hydrostatic method based on the co-processing the signals of pressure sensors specially configured in space are made. Calculations of the error caused by uncontrolled change of the hydrostatic meter inclination in the marine medium, for various configurations of pressure sensors and various distribution functions of the meter inclination angle are performed.

Разработка и совершенствование методов и средств измерения плотности морской воды традиционно является одной из актуальных проблем океанологии [1]. В настоящей работе продолжены исследования новой модификации гидростатического метода определения плотности жидкости, начатые в [2 - 4]. Цель работы – получить выражения, позволяющие оценить точность определения плотности морской воды ρ предложенным ранее методом в условиях неопределенной пространственной ориентации гидростатического измерителя.

В качестве источника ошибки определения ρ рассмотрена величина ΔG - погрешность определения величины $G \equiv |gradP|$ (модуля вектора градиента гидростатического давления в воде), входящей в рабочую формулу метода $\rho = G/g$ (где $\vec{g}$ - вектор ускорения свободного падения) при условии неконтролируемого изменения ориентации измерителя в поле силы тяжести.

Постановка задачи. Рассмотрим для определенности гидростатический измеритель, образованный четырьмя датчиками давления, расположенными в вершинах правильной треугольной пирамиды (рис.1). Величина G определяется путем совместной обработки сигналов P_i $(i = 0,1,2,3)$ датчиков давления согласно предложенному в [3] алгоритму:

$$G = \sqrt{\frac{(1+c)\left(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2\right) - 2c\left(b_1 b_2 + b_1 b_3 + b_2 b_3\right)}{(1-c)(1+2c)}}\,. \qquad (1)$$

Здесь $b_i = (P_i - P_0)/l$, l - расстояние между нулевым и тремя остальными датчиками (длина бокового ребра пирамиды), α - угол при вершине пирамиды, $c \equiv \cos\alpha$. Пусть также, ради наглядности, погрешности величин b_i одинаковы для всех трех пар датчиков давления и равны Δb. Тогда, согласно [3], $\Delta G = F(\varphi)\Delta b$, где

$$F(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1+2c}}\sqrt{1 + \frac{3c}{1-c}\sin^2\varphi}\,. \qquad (2)$$

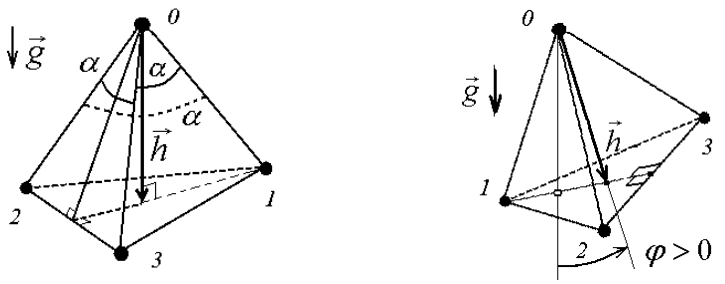


Рис. 1. Идеальная (слева) и неидеальная (справа) ориентация системы датчиков давления в поле силы тяжести.

Зависимость погрешности определения градиента давления от пространственной ориентации гидростатического измерителя. Одна из особенностей рассматриваемого гидростатического измерителя состоит в том, что выходной сигнал образующей его системы датчиков давления (величина G) не зависит от ориентации этой системы в поле $\vec{g}$, но погрешность определения градиента гидростатического давления (величина ΔG) – зависит. Пусть угол наклона системы (угол φ на рис.1) изменяется неизвестным неконтролируемым образом, но плотность вероятности распределения угла наклона $w(\varphi)$ известна. Примем для оценок

$$w(\varphi) = \begin{cases} \dfrac{\cos\varphi}{2\sin\varphi_0}; & -\varphi_0 < \varphi < \varphi_0; \\ 0; & |\varphi| > \varphi_0. \end{cases} \tag{3}$$

Графики функции $w(\varphi)$ приведены на рис. 2.

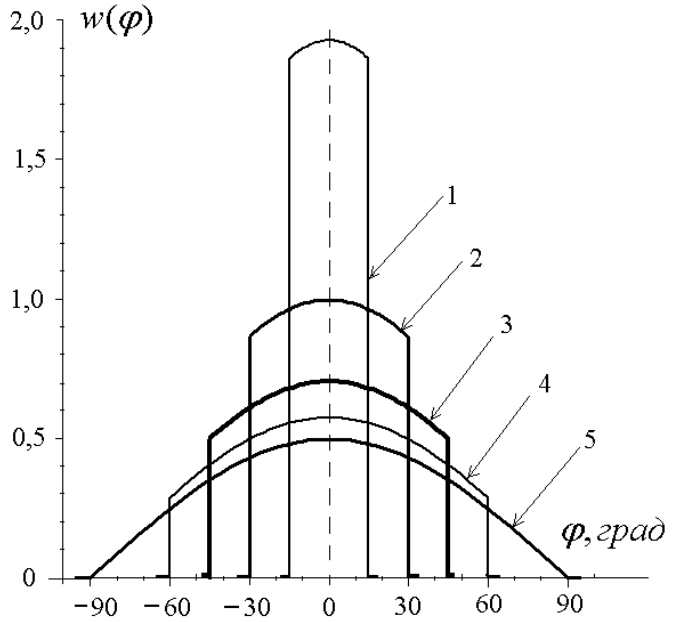


Рис. 2. Вид функции плотности вероятности, характеризуюшей распределение угла наклона гидростатического измерителя, для различных значений угла φ_0:

1 - 15°, 2 - 30°, 3 - 45°, 4 - 60°, 5 - 90°.

Тогда погрешность определения величины G можно оценить путем осреднения по углу: $\langle \Delta G \rangle = \langle F(\varphi) \rangle \Delta b$, а зависимость погрешности определения градиента давления от конфигурации датчиков – охарактеризовать функцией $\Phi(\alpha)$:

$$\Phi(\alpha) = \frac{\langle \Delta G \rangle}{\Delta b} = \langle F(\varphi) \rangle = \int_{-\pi}^{\pi} F(\varphi) w(\varphi) d\varphi. \tag{4}$$

Можно показать, что для рассматриваемых здесь модельных функций $F(\varphi)$ и $w(\varphi)$, представленных выражениями (2) и (3), интегрирование согласно формуле (4) приводит к следующим соотношениям для функции $\Phi(\alpha)$:

$$\Phi(\alpha) = \begin{cases} \Phi_1(\alpha); & 0^\circ < \alpha \le 90^\circ; \\ \Phi_2(\alpha); & 90^\circ \le \alpha < 120^\circ; \end{cases} \tag{5}$$

где $\Phi_1(\alpha) = \dfrac{1}{2\sqrt{1+2c}} \left[\sqrt{1 + \dfrac{3c}{1-c} \sin^2\varphi_0} + \dfrac{1}{2\sin\varphi_0} \sqrt{\dfrac{1-c}{3c}} \ln \dfrac{\sqrt{\dfrac{1-c}{3c} + \sin^2\varphi_0} + \sin\varphi_0}{\sqrt{\dfrac{1-c}{3c} + \sin^2\varphi_0} - \sin\varphi_0} \right];$ (6)

$$\Phi_2(\alpha)=\frac{1}{2\sqrt{1+2c}}\left[\sqrt{1+\frac{3c}{1-c}\sin^2\varphi_0}+\frac{1}{\sin\varphi_0}\sqrt{-\frac{1-c}{3c}}\arcsin\frac{\sin\varphi_0}{\sqrt{-\frac{1-c}{3c}}}\right]. \qquad (7)$$

Графики функции $\Phi(\alpha)$, характеризующей погрешности определения градиента давления в зависимости от конфигурации датчиков, образующих систему, и от функции плотности вероятности, описывающей распределение угла наклона гидростатического измерителя, приведены на рис.3 и рис.4. На этих рисунках цифры-номера 1, 2, 3, 4, 5 по-прежнему обозначают графики, относящиеся к значениям угла φ_0, равным 15°, 30°, 45°, 60°, 90° соответственно.

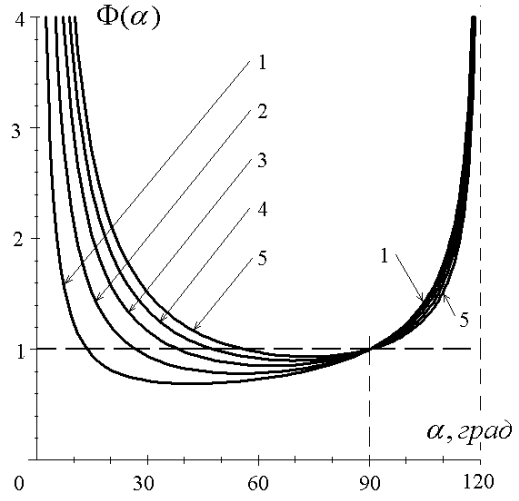


Рис. 3. Графики функции $\Phi(\alpha)$. Пояснения в тексте.

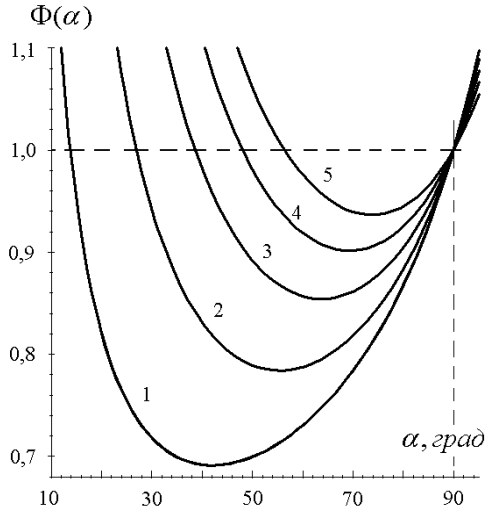


Рис. 4. Фрагменты графиков функции $\Phi(\alpha)$, представленных на рис. 3.

Заключение. Представленные выше соотношения позволяют оценить точность определения плотности морской воды предложенным в [2-4] методом в условиях неопределенной пространственной ориентации гидростатического измерителя.

Из полученных соотношений следует, что при неконтролируемой ориентации гидростатического измерителя точность определения модуля градиента давления, а, следовательно, и плотности морской среды, сильно зависит не только от конфигурации датчиков, образующих систему, но и от функции плотности вероятности, описывающей распределение угла наклона измерителя.

Полученные данные могут служить основой для рационального выбора конфигурации датчиков давления, формирующих гидростатический измеритель, с учетом конструктивных особенностей гидрофизической системы в целом и условий её использования. Решение указанных задач выходит за рамки данной работы и может являться предметом самостоятельного исследования.

Литература

1. Океанология: средства и методы океанологических исследований. // Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Д. Агеев и др.; Междунар. ассоц. акад. наук; РАН; НАНУ. М.: Наука, 2005. – 795 стр.
2. Федотов Г.А. Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2013, том 6, №1. Стр.58-65. Изд-во Санкт-Петербургского научного центра РАН.
3. Федотов Г.А. О точности определения плотности морской воды с помощью новой модификации гидростатического метода. // Труды 13-й Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики” (ГА-2016). Санкт-Петербург, 24-26 мая 2016 г. Стр.205-208. Изд-во Санкт-Петербургского научного центра РАН.
4. Федотов Г.А. Некоторые оценки точности определения плотности морской воды гидростатическим методом. // Сборник материалов 15-й Международной научно-технической конференции “Современные методы и средства океанологических исследований” (МСОИ-2017). Москва, 16-18 мая 2017. Т.1, стр.135-138. Изд-во Института океанологии РАН.

ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ

Ю.А.Ломовацкий
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

MEASUREMENT OF SOUND VELOCITY IN WATER

Y.A.Lomovatskiy
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Проведен анализ состояния и перспективы развития в области обеспечения единства измерений скорости звука в водной среде. Обозначена необходимость проверки технических и метрологических характеристик, заявляемых производителями, импортных средств измерений. Рассмотрены конструкторские решения и принципы построения созданного во ВНИИФТРИ Государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012 и рабочего эталона единицы скорости звука в водной среде. Приведены эксплуатационные и метрологические характеристики эталонов.

Analysis of the status and prospects of development in the field of ensuring the uniformity of measurements of sound velocity in the aquatic environment is performed. The necessity of verifying of metrological characteristics of foreign measuring instruments claimed by manufacturers is noted. The design solutions and construction principles of State primary standard of sound velocity in water unit GET 201-2012 made by VNIIFTRI and working standard of acoustic speed in water are described in this work. The operational and metrological characteristics of standards are given.

Анализ результатов применения современных гидроакустических комплексов обнаружения и систем измерения подводного шумоизлучения кораблей показывает, что для повышения точности измерений шумоизлучения и эффективности обнаружения целей необходим максимально полный и достоверный учет информации о гидрофизических характеристиках морской среды. Одной из основных таких характеристик является скорость распространения звука в воде.

Скорость звука в море, как наиболее комплексный показатель состояния морской среды на судах и кораблях, требуется для функционирования различных гидроакустических средств: эхолотов, гидролокаторов, систем гидроакустической связи, телеметрии и пр..

Основными гидрофизическими величинами, влияющими на значение плотности и вязкости воды, а значит и скорости звука, являются температура, соленость и гидростатическое давление.

Широкое использование данных о скорости распространения звука убедительно говорит о важности и необходимости системного изучения и измерения этой физической величины. Исходя из этого в 80-х годах прошлого столетия начались работы на базе ВНИИФТРИ по созданию эталонной базы в области измерения скорости звука в жидких средах. Итогом этих работ стали разработанные и утвержденные во ВНИИФТРИ нормативные документы ГСССД 190-2000 «Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Скорость звука при температурах от 0 до 100 °С и давлениях от 0,101325 до 100 МПа» и ГСССД 202-02 «Таблицы стандартных справочных данных. Морская вода. Скорость звука при соленостях 0…40 $^{o}/_{oo}$, температурах 0…40 ^{o}C и избыточных давлениях 0…60 МПа", а так же был создан Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012.

В ГЭТ 201-2012 реализован времяпролетный импульсный метод измерения скорости звука в жидкостях. Конструктивные особенности эталонного измерительного преобразователя скорости звука обеспечивают его инвариантность к свойствам жидкости. Основной отличительной особенностью ГЭТ 201-2012 является наличие гидробака высокого давления в его составе, что позволяет размещать морские зонды и измерители целиком и проводить их испытания и поверку в условиях, приближенных к натурным.

ГПЭ состоит из трех установок.

Установка Э-1 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах при атмосферном давлении в диапазоне температур от минус 4 до + 50 ^{o}C;

Установка Э-2 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах при избыточном давлении от 0 до 60 МПа в диапазоне температур от + 1 до + 35 ^{o}C. Она предназначена для малогабаритных изделий (габариты не более ∅ = 90 мм, h = 150 мм);

Установка Э-3 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах избыточном давлении от 0 до 15 МПа в диапазоне температур от + 15 до + 25 ^{o}C. Она предназначена для крупногабаритных изделий (габариты не более ∅ = 400 мм, h = 1000 мм). Установка Э-3

позволяет размещать морские зонды и измерители в камере избыточного давления целиком и проводить их испытания и поверку в условиях, приближенных к натурным.

Общий вид установки Э-1 представлен на рисунке 1.

Основным элементом при воспроизведении единицы скорости звука и передачи ее размера подчиненным средствам измерений скорости звука является эталонный измерительный преобразователь скорости звука – ЭИПСЗ (рис.2). Он инвариантен к свойствам жидкости.

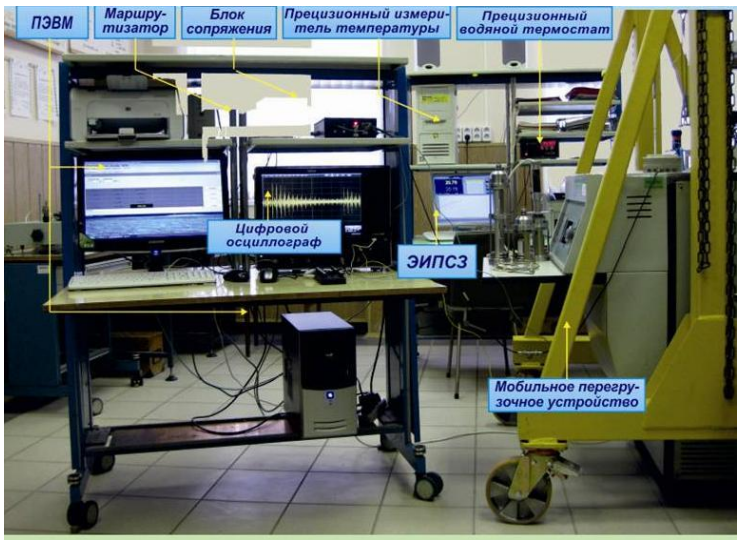


Рис. 1. Общий вид установки Э-1.

Рис. 2. Эталонный измерительный преобразователь скорости звука – ЭИПСЗ.

На данный момент в России эксплуатируются десятки измерителей скорости звука зарубежного производства. Из них единицы прошли испытания в целях утверждения типа средств измерений.

Известно, что за рубежом в качестве точностных характеристик СИ используют неопределенности, а в РФ для рабочих СИ – погрешности, для эталонов – погрешности и неопределенности. Зарубежный производитель не уточняет, неопределенность какого типа он указывает в эксплуатационной документации СИ. Часто это бывает похоже на неопределенность типа А, что соответствует нашему понятию СКО. Таблица 1 иллюстрирует ситуацию с некоторыми импортными СИ, эксплуатируемыми в РФ.

Таблица 1.Ситуация с импортными СИ.

№ пп	Наименование СИ Производитель	Точностная характеристика, указанная в ЭД	Пределы допускаемой погрешности, определенные после испытаний в целях утверждения типа
1	SVP-20. SVP-25 RESON, Дания	0.25 м/с	0,6 м/с
2	SVP-70, SVP-75 RESON, Дания	(0.05…0,25) м/с	0,25 м/с
3	Midas SVP Valeport, Великобритания	0.02 м/с	Испытания не проводились
4	Midas SVX-2 Valeport, Великобритания	0.02 м/с	Испытания не проводились
5	miniSVP Valeport, Великобритания	0.02 м/с	0,25 м/с
6	miniSVS Valeport, Великобритания	0.017 м/с	Испытания не проводились
7	Digibar Pro ODOM, США	0.1 м/с	Испытания не проводились

Как мы видим из таблицы, точностные характеристики исследованных измерителей далеки от заявленных. Решить вопрос о реальных метрологических характеристиках СИ можно только проведением его калибровки, либо проведением испытаний в целях утверждения типа СИ и его последующих поверок. Это касается и импортных, и отечественных СИ.

Основная часть рабочих СИ скорости звука применяется в настоящее время в ВМФ России. Надводные корабли, подводные лодки, глубоководные аппараты ВМФ, гидрографические суда, авиационные гидрографические буи и средства подводно-технического обследования акваторий оснащены СИ скорости звука в воде для получения информации о пространственно-временной структуре поля скоростей звука в океане. По экспертной оценке на носителях ВМФ РФ находится несколько сотен комплектов аппаратуры, измеряющей скорость звука. Вопрос о поверки этих СИ до сих пор актуален.

Для обеспечения единства измерений в данной области разработан национальный стандарт ГОСТ Р 8.870-2014 "Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений скорости звука в жидких средах в диапазоне от 800 до 2000 м/с", возглавляемый Государственным первичным эталоном единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012, передающим размер единицы скорости звука вторичному эталону, рабочим эталонам 1-го и 2-го разряда и рабочим СИ.

Литература

6. Микушин И.И., Серавин Г.Н. Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб. Судостроение, 2012.
7. Серавин Г.Н. Измерение скорости звука в океане. Л. Гидрометеоиздат, 1979.
8. Белогольский В.А., Саморукова Л.М., Сильвестров С.В. Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах. ГЭТ 201-2012 // Тр. Конф. 2013.

ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН ИО РАН НА ЧЕРНОМ МОРЕ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОКЕАНОЛОГИИ

А.Г.Зацепин, д-р физ-мат.наук, Е.Г.Арашкевич, канд.биол.наук, В.И.Баранов, О.Ю.Кочетов, С.Б.Куклев, канд.геогр.наук, А.Г.Островский, канд.геогр.наук, О.И.Подымов, канд.физ-мат.наук
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва, Россия

HYDROPHYSICAL RESEARCH SITE OF IO RAS AT THE BLACK SEA AND ITS SIGNIFICANCE FOR THE FUNDAMENTAL AND APPLIED OCEANOLOGY

A.G.Zatsepin, Dr.Sc., E.G.Arashkevich, Ph.D., V.I.Baranov, O.Yu.Kochetov, S.B.Kuklev, Ph.D., A.G.Ostrovskii, Ph.D., O.I.Podymov, Ph.D.
P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Представлены фундаментальные и прикладные результаты, полученные на постоянно действующем научно-исследовательском и мониторинговом полигоне ИО РАН, созданном в 2011-2013 гг. в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе г. Геленджик.

The report summarizes the basic scientific and applied results obtained at the research and monitoring site of IO RAS established in the shelf-slope zone of the Black Sea near Gelendzhik in 2011-2013.

С целью развития прибрежной черноморской наблюдательной системы в 2011-13 гг. в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджика на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН развернут постоянно действующий полигон, предназначенный для исследования и мониторинга состояния водной среды и биоты (рис.1).

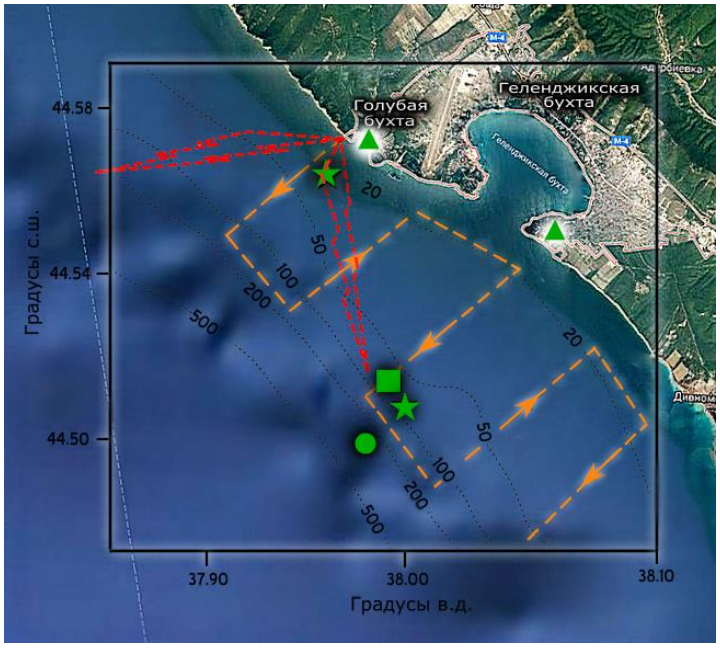


Рис.1. Схема гидрофизического полигона ИО РАН в геленджикском районе Черного моря. Зеленые треугольники – береговые метеостанции; звездочки – станции в составе донного ADCP и заякоренной термокосы; круг – зонд-профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции; квадрат–заякоренный буй с автоматической метеостанцией и системой оперативной передачи данных; желтая пунктирная линия со стрелками - галсы судна при проведении измерений скорости течения буксируемым за судном ADCP; красные «молнии» – дистанционные измерения скорости поверхностных течений доплеровским КВ радаром.

Основу полигона составляют автоматические заякоренные и донные станции, измеряющие профили гидрофизических параметров в водной толще с высоким пространственно-временным разрешением. Ближайшие к Голубой бухте автоматические станции - термокоса на заякоренной буйковой станции и донная станция с акустическим доплеровским профилографом скорости течения (ADCP) подключены к береговому питанию и центру сбора данных с помощью проложенного по дну оптоволоконного кабеля, позволяющего передавать большой объем

данных измерений (до 1 ГБ/с) в режиме реального времени. Выполняются также регулярные судовые разрезы с комплексными исследованиями состояния морской экосистемы [1].

В 2017 г. на акватории полигона на расстоянии 7 км от берега установлен заякоренный навигационный буй с автоматической метеостанцией и оперативной передачей данных по радиоканалу (рис.1). Получаемые данные измерений и, в особенности, скорости ветра являются уникальными, поскольку долговременные и частые (раз в 10 минут) измерения метеорологических параметров в открытом море практически отсутствуют.

Развертывание на шельфе и континентальном склоне Черного моря в районе г. Геленджика сети стационарных платформ для автоматизированного измерения ключевых параметров морской среды в сочетании с проведением регулярных комплексных судовых наблюдений и анализом текущей спутниковой информации и метеоданных, является вкладом российской науки в развитие наблюдательного сегмента системы комплексного мониторинга Черного моря. Получаемые данные используются для изучения масштабов и механизмов изменчивости морской экосистемы под влиянием антропогенных и естественных (в т. ч., климатических) воздействий, водообменных процессов в системе «шельф - глубоководный бассейн», а также многих других процессов физической, химической и биологической природы. Данные регулярных контактных измерений востребованы для калибрации спутниковых измерений и верификации результатов численного моделирования циркуляции вод. Предлагается распространение методов и средств полигонного мониторинга прибрежной водной среды и биоты на другие секторы Черного моря с целью создания единой системы мониторинга черноморской прибрежной зоны.

Среди многих результатов, полученных на полигоне в последние годы, отметим следующие.

1. Уточнены оценки встречаемости субмезомасштабных вихрей на акватории полигона. Установлено, что эти вихри диаметром от 2 до 10 км формируются на шельфе, как в холодное, так и в теплое время года, при этом число циклонов и антициклонов приблизительно равно друг другу, а вероятность их обнаружения при судовых съемках составляет 70 процентов. Они вносят важный вклад в кроссшельфовый водообмен [2].

2. На основе данных синхронных измерений профилей температуры морской воды, ее плотности и скорости горизонтального течения, полученных в 2013-2016 гг. в северо-восточной части Черного моря при помощи заякоренного зонда-профилографа «Аквалог», выполнены оценки коэффициента вертикального турбулентного обмена массой в черноморском пикно-халоклине. Выявлена сильная короткопериодная (несколько суток) изменчивость турбулентного обмена, обусловленная вариациями вертикального сдвига скорости течения [3].

3. Проведены успешные морские испытания изготовленных в ИО РАН макетов океанологического дрейфующего зонда с изменяемой плавучестью – российского прототипа поплавка Арго, и подводной заякоренной лебедки с системой онлайн передачи данных CTD-зондирования.

Исследование проводилось в рамках государственного задания ФАНО России (темы № 0149-2018-0003, № 0149-2018-0013, № 0149-2018-0010) при частичной поддержке РФФИ (гранты №№ 16-05-00654, 16-45-230781, 17-05-00381, 17-05-00799, 17-35-50030).

Литература

1. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря. // ФАО. 2014. №1. С.16-29.
2. Зацепин А.Г., Елкин Д.Н., Корж А.О. и др. О влиянии изменчивости течения в глубоководной части Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа // МГЖ. 2016. Т. 189. №.3. С.16-25.
3. Подымов О.И., Зацепин А.Г., Островский А.Г. Вертикальный турбулентный обмен в черноморском пикноклине и его связь с динамикой вод // Океанология. 2017. т. 57. №4. С. 546-559.

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОРСКОГО ПОЛИГОНА ИНСТИТУТА ЭКОЛОГИИ

Р.С.Дбар[1], канд.биол.наук, В.П.Елистратов[1,3], Г.В.Кенигсбергер[1,3], А.И.Марколия[2], д-р техн.наук, В.В.Медведовский[1], И.И.Сизов[1,3], канд.физ-мат.наук, Т.П.Строчан[1]
[1]Институт Экологии АН Абхазии, Сухуми, Абхазия
[2]Сухумский физико-технический институт АН Абхазии, Сухуми, Абхазия
[3]Гидрофизический институт АН Абхазии, Сухуми, Абхазия

GHYDROPHYSICAL AND ACOUSTIC FEATURES OF SEA RANGE OF INSTITUTE OF ECOLOGY

R.S.Dbar[1], Ph.D., V.P.Elistratov[1,3], G.V.Kenigsberger[1,3], A.I.Markoliya[2], Dr.Sc., V.V.Medvedovskiy[1], I.I.Sizov[1,3], Ph.D., T.P.Strochan[1]
[1]Institute of Ecology Academy of Science of Abkhazia, Shukhumi, Abkhazia
[2]Sukhumi Physics and Technology Institute of Academy of Science of Abkhazia, Shukhumi, Abkhazia
[3]Hydrophysical institute of Academy of Science of Abkhazia, Shukhumi, Abkhazia

Обсуждаются гидрофизические и акустические характеристики морского полигона института Экологии. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о возможности моделирования условий распространения звука для различных районов Мирового океана. Выполнена оценка пространственных координат расположенных на полигоне гидроакустических преобразователей с помощью корреляционной обработки широкополосных сигналов. Приведены результаты измерений регенеративной схемы мониторинга среды. Рассматриваются проблемы экологических исследований в шельфовой зоне и автоматизированный метод измерений концентрации хлорофилла в прибрежной зоне полигона.

Hydrophysical and acoustic characteristics of sea range of Institute of Ecology are discussed. The analysis of the obtained data allows to draw a conclusion on a possibility of modeling of conditions of sound propagation for various regions of the World Ocean. Assessment of spatial coordinates of the sonar transducers located on the ground by means of correlation processing of broadband signals is executed. Results of measurements of the regenerative scheme of the environment monitoring are given. Problems of ecological research in a shelf zone and the automated method of measurements of chlorophyll concentration in a coastal zone of the ground are considered.

Предприятие, последовательно носившее название: Экспедиция ФИАН, Сухумская научная морская станция Акустического института, Сухумский филиал Акустического института, Сухумский филиал НИИ «Атолл», Гидрофизический институт АН Абхазии было организовано в 1948 году на территории Сухумского мыса. Выбор этого места не был случайным, поскольку этот район отличается уникально крутым углом наклона дна (до 26 ^{o}) и высокой активностью гидрофизических процессов. В акваториях побережья Гудауты и Очамчире расположены протяженные участки плоского дна со средней глубиной 80 м. Все это позволило организовать полигон для круглогодичных гидролого-акустических исследований, в которых принимали участие практически все предприятия и научно-исследовательские институты Советского Союза, занимающиеся гидроакустической тематикой.

После развала Советского Союза нарушились научные связи института. Для восстановления их и продолжения совместных работ в апреле 2012 года в Сухуми прошла выездная научная сессия Научных советов РАН по гидрофизике и акустике с целью воссоздания на базе гидрофизического института черноморского полигона для разработки и исследований новых принципов томографии морской среды. В 2012 г на базе Гидрофизического института создан институт Экологии АНА, а в 2017 году Гидрофизический институт вошел в институт Экологии в качестве научного отделения.

Рассмотрим коротко гидрологоакустические характеристики полигона. В зимнее время, когда температура воды на поверхности моря минимальна, создаются условия для образования приповерхностного звукового канала. В летне-осенний сезон повышение температуры на поверхности моря приводит к образованию подводного звукового канала. Для верхнего слоя (0-5 м) вариации скорости звука обусловлены суточными изменениями гидрологии, а для слоя 5-75 м – сезонными изменениями. В интервале глубин 75-100 м с весны до осени наблюдается минимум скорости звука (ось канала), обусловленный холодным промежуточным слоем. Глубже оси каналов до 200 м располагается слой с маломеняющимся положительным градиентом скорости звука. Наибольшие градиенты скорости звука наблюдаются в слое 0-50м, причем максимальной величины они достигают в июне. Для исследования эффективности методов акустического зондирования в условиях стационарной трассы в зоне шельфа были изготовлены и установлены в акватории полигона три приемно-излучающих модуля, местоположение которых показано на карте полигона (рис.1). По результатам постановки предполагалось, что преобразователи лежат в вершинах треугольника со сторонами 105, 80 и

149м. Для оценки реальных расстояний между преобразователями и глубины постановки был проведен эксперимент с использованием широкополосных сигналов с девиацией частоты от 2 до 10 кГц, что позволило обеспечить разрешение прихода сигналов до 0,000125 сек.

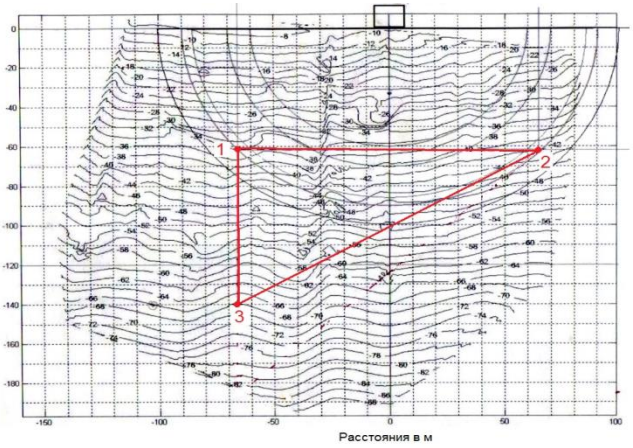


Рис. 1. Рельеф дна в районе постановки приёмно-излучающих модулей. Точки 1, 2 и 3 показывают места их установки на дне.

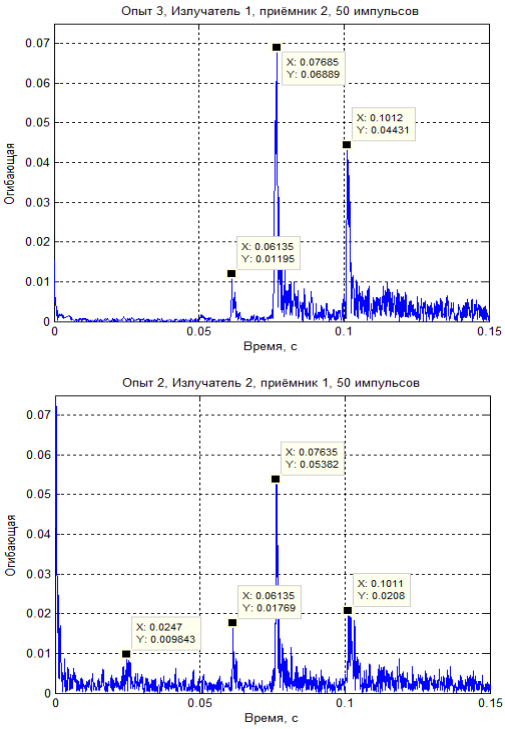


Рис. 2. Результаты обработки массивов из 50 ЛЧМ сигналов.

Затем по расчетам пробега сигналов по лучам, рассчитанных с учетом вертикального профиля скорости звука была определена глубина первого преобразователя-24м, глубина второго - 49м и горизонтальное расстояние между ними - 86м. Таким образом, данная методика позволяет проводить градуировку местоположения преобразователей и выбора модели условий распространения звука.

В рамках совместного проекта РФФИ-АНА «Акустическая диагностика и мониторинг параметров морской среды в шельфовой зоне» проводились исследования гидроакустического автогенератора (ГАГ), у которого акустическая трасса включена в цепь обратной связи [1].

Обработка сигналов для пары преобразователей 1-2 показала (рис.2), что выделяются 3 луча - рефрагированный (придонный) луч и два луча, отраженные от поверхности. Интересно отметить, что на нижнем рисунке в районе 0,025 сек наблюдается луч, пришедший по грунту. Возможно, это объясняется тем, что приемник 1 находился на грунте.

Информацию о состоянии и динамике гидрофизических процессов в среде несет частота генерации. Исследования ГАГ в условиях акустического бассейна показали высокую чувствительность и стабильность данного метода к изменению параметров среды [2,4]. Аналогичные исследования ГАГ были проведены в условиях стационарной морской трассы с помощью преобразователей, описанных выше. На рис.3 показаны результаты обработки одного из экспериментов. Видно, что возбуждение генератора происходит на частотах звукоряда кратного 35 Гц (рис 3а).

Срыв генерации и переход на другую частоту обусловлен резким изменением амплитуды и фазы сигнала из-за поверхностного волнения моря, тогда как плавное изменение скорости звука или скорости течения должно сказываться на фазе сигнала. Если вычесть из полной фазы сигнала (рис.3 б) аппроксимирующую ее прямую, тогда график разности фаз (рис.3 в) будет иметь вид ломанной кривой, состоящий из 4-х отрезков, соответствующих количеству частот генерируемого сигнала. Выбирая затем участки, где частота генерации постоянна, можно исследовать флуктуации разности фаз. На рис. 3 г представлен первый 16-минутный участок в увеличенном масштабе по оси радиан, на котором наблюдается тонкая структура изменчивости динамической фазы, содержащая информацию о флуктуациях интегральной скорости звука. На

трассе между преобразователями во время эксперимента была установлена вертикальная цепочка из 11 термисторов. Анализ полученных данных показывает совпадение временных вариаций фазы сигналов и температуры.

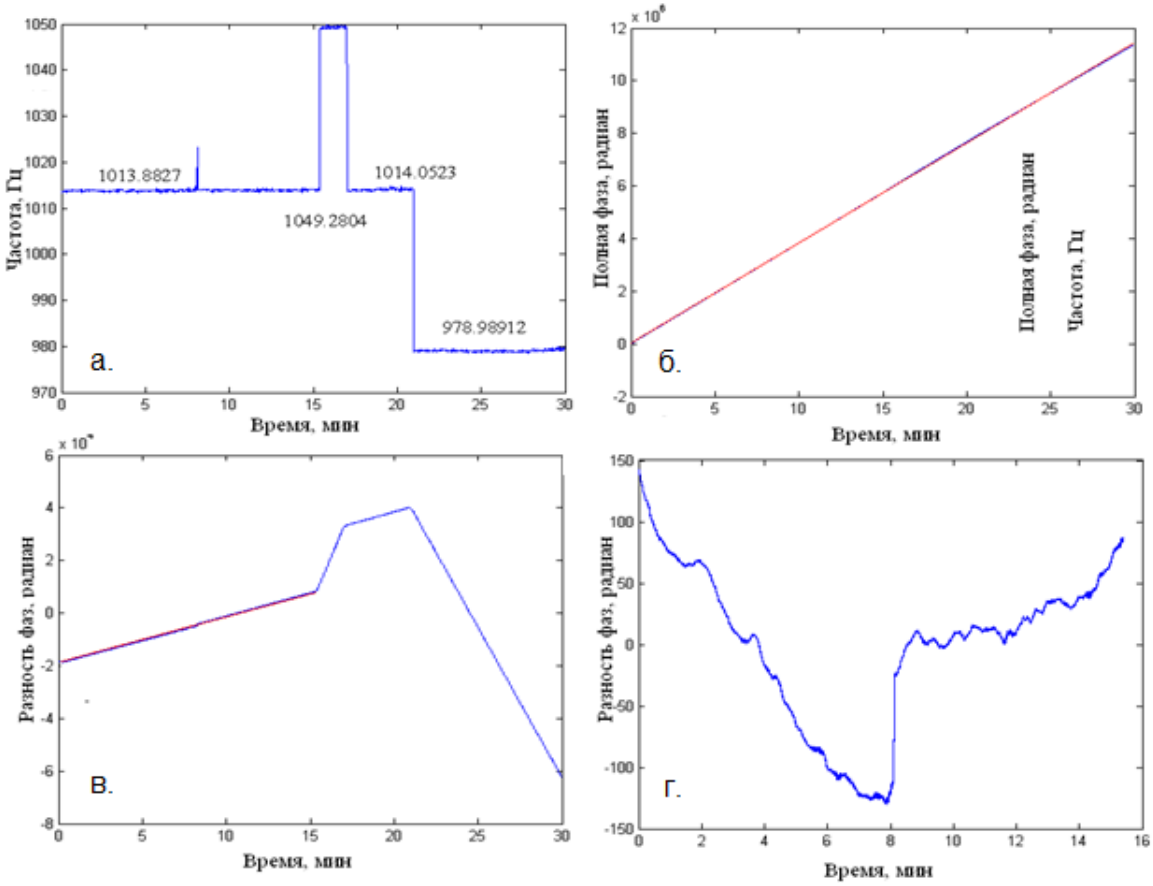


Рис.3. Зависимости от времени: а – частот генерации, б – полной фазы сигнала, в – разности фаз и г – динамической разности фаз.

В настоящее время проводится испытание акустической параметрической антенны, разработанной в Акустическом институте [3], с широкой частотной полосой сигнала (300-3000 Гц) и острой характеристикой направленности (2×8 градусов) во всем частотном диапазоне. Применение его открывает широкие возможности для гидрофизического мониторинга на протяженных трассах. Одной из задач, решаемых с помощью параметрической антенны, является акустический мониторинг холодного промежуточного слоя (ХПС) Черного моря. Характеристики ХПС представляют большой интерес для океанологов и экологов, поскольку ХПС определяет положение глубинных сероводородных вод, т.е. толщину деятельного слоя, в котором создаются благоприятные условия для растительного и животного мира.

Для постоянного мониторинга температуры на полигоне в районе морского павильона выполнена постановка 13-элементной термокосы на основе цифровых датчиков DS18B20 в модульном варианте с электронной частью изделия. Установлен сервер сбора данных, настроенный на удаленный доступ с лабораториями института, что позволяет отправлять данные непосредственно на головной сервер. Планируется установка аналогичной 25-элементной термокосы на глубину 50 м с выводом кабеля в морской павильон.

Известно, что Черное море является одним из наиболее загрязненных морей мира. Для Абхазии экологические проблемы являются приоритетными, что вызывает необходимость разработки средств и методов оперативного контроля за экологической обстановкой моря, особенно в шельфовой зоне. Она наиболее подвержена химическому загрязнению из-за переизбытка органических и минеральных веществ, что приводит к бурному развитию микроорганизмов и водорослей. В настоящее время проводится испытание флуоресцентной камеры для измерения концентрации хлорофилла в интервале от 0,2 до 3000 мкг/л. В состав прибора входит внешнее устройство для передачи данных, блок хранения данных и сотовый или спутниковый модем для автоматизированной передачи полученных данных с частотой

измерения параметров 1-0,05 мин$^{-1}$. Проект реализуется ИЭ АНА совместно с Южным научным центром РАН (г. Ростов-на-Дону).

В перспективе планируется проведение исследований на полигоне путем создания стационарных акустических трасс: Сухумский мыс-Кодор и Сухумский мыс – Турецкий берег – Сухумский мыс, а также расширение наблюдений путем установки станций, регистрирующих погодные и океанографические параметры среды и сейсмики региона. Проблема мониторинга морских вод комплексная и решение ее возможно только при объединении усилий акустиков, метеорологов, океанологов и экологов. Дальнейшее развитие полигона требует привлечения финансовых и технических средств всех заинтересованных организаций различных стран. Восстанавливающиеся научные связи являются основой для оптимистичных прогнозов в этой области. В последнее время на основании соглашения между Академией наук России и Абхазии было выполнено 13 совместных проектов при поддержке РФФИ, результаты которых опубликованы в статьях и доложены на международных и российских конференциях.

Литература

1. Фурдуев А.В. О новых способах подводного акустического мониторинга // Докл.VIII школы-семинара акад.Л.М.Бреховских «Акустика океана» ГЕОС,2000.С.25-28.
2. Елистратов В.П., Кенигсбергер Г.В., Самсонов Л.И. Исследование автогенераторного метода мониторинга среды в условиях опытового бассейна //Труды XI конф. ГА-2012 СПб: Наука , 2012,С410-413.
3. Есипов И.Б., Тарасов С.П., Сизов И.И. Параметрическая антенна для гидрофизических исследований на протяженных трассах.// XXV сессия РАО т.2.Таганрог, 2012.С.163-168.
4. Елистратов В.П., Кенигсбергер Г.В., Моисеенков В.И., Серебряный А.Н. Опыт использования гидроакустического автогенератора для исследования характеристик морской среды на стационарной трассе на крутом шельфе. Учёные записки физического факультета московского университета № 6, 146341 (2014)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

А.Л.Собисевич[1], д-р физ-мат.наук, Д.А.Преснов[1], канд.физ-мат.наук, Р.А.Жостков[1], канд.физ-мат.наук, А.С.Шуруп[1,2], канд.физ-мат.наук, П.Д.Груздев, А.Ю.Мореев, Ф.В.Передерин[1]
АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия
[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LOW-FREQUENCY GEO-HYDROACOUSTIC FIELDS IN ICE

A.L.Sobisevich[1], Dr.Sc., D.A.Presnov[1], Ph.D., R.A.Zhostkov[1], Ph.D., A.S.Shurup[1,2], Ph.D., P.D.Gruzdev, A.Ju.Moreev, F.V.Perederin[1]
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia
[1]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia
[2]M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia

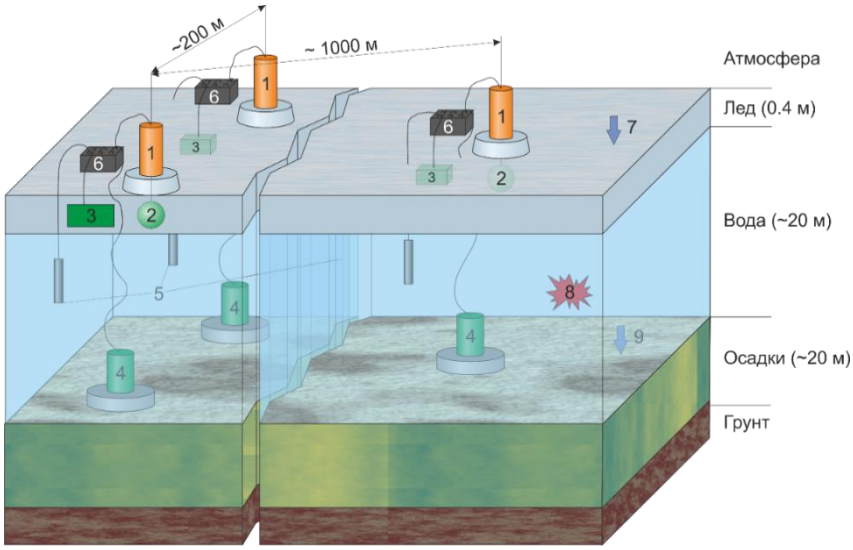
В работе проанализированы результаты натурных экспериментов, проведенных в последние годы при использовании авторских низкочастотных геогидроакустических информационно-измерительных систем. Основная цель масштабных экспериментов заключалась в получении данных о модовой структуре наведенных сейсмогидроакустических полей в системе «морское дно - водный слой - ледовый покров» при наличии сплошного ледового покрова. Показано, что в случае одновременного расположения информационно-измерительных систем на дне, в водном слое и на поверхности льда, возможно разделение отдельных акустических мод, формирующихся в слоистой системе «упругое дно – водный слой – ледовый покров». Такое разделение было осуществлено как в активном эксперименте, так и в пассивном режиме. Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования позволило перейти к решению обратной задачи по восстановлению характеристик среды.

The results of full-scale experiments conducted in recent years using author low-frequency geo-hydroacoustic information-measuring systems are analyzed. The main objective of large-scale experiments consisted in data acquisition about mode structure of the induced seismohydroacoustic fields in a system "sea bottom- water layer - ice cover" in the presence of a continuous ice cover. It is shown that in the case of the simultaneous arrangement of information and measuring systems on the bottom, in the water layer and on the surface of ice, it is possible to separate individual acoustic modes that form in the layered system "elastic bottom - water layer - ice cover". This separation was carried out both in the active experiment and in the passive mode. Comparison of the experimental data with results of simulation made it possible to turn to the solution of the inverse problem of restoring the characteristics of the medium.

Как было показано, в математической модели арктического волновода, включающего твёрдое дно, жидкий слой и покрывающий ледовый покров [1] возможно возникновение нескольких типов волн, каждая из которых несёт в себе информацию о соответствующей среде распространения. При измерениях в ледовых условиях возникает задача разделения в полном измеряемом волновом поле различных компонент с целью последующей оценки характеристик упругих и жидких сред. Оказывается [2], что в нормальных природных условиях такое разделение практически всегда осуществимо. Этот факт открывает новые возможности для осуществления мониторинга среды в ледовых условиях при помощи вмораживаемых измерительных систем. Кроме того, последние достижения современной гидроакустики [3, 4] указывают на возможность определения различных характеристик информативных сейсмоакустических сигналов без использования активного источника излучения – то есть осуществлять мониторинг среды в пассивном режиме. В настоящей работе демонстрируется возможность выделения различных модовых составляющих сигнала в активном режиме. Результаты натурных наблюдений сопоставляются с данными математического моделирования.

Описание экспериментальных работ. Экспедиционные работы в феврале 2017 года выполнялись в заливе Нейсмери Ладожского озера на закрытом испытательном полигоне АО «Концерн «Океанприбор». Погодные условия способствовали успешному выполнению задач исследования, так температура воздуха изменялась в пределах от -5^0C до -10^0C. Во время работы на льду погода была безветренная, осадки отсутствовали. Толщина льда повсеместно составляла 40 см. В некоторых областях лед был покрыт слоем снега толщиной 5-10 см. Глубина озера в месте проведения эксперимента изменялась в пределах от 11 м до 21 м.

Для достижения поставленной цели была разработана схема наблюдения сейсмоакустических сигналов в условиях акватории покрытой льдом в виде равнобедренного треугольника со стороной 1 км и основанием 200 м (рисунок 1), которая включала: 3 основных измерительных пункта, включающих датчики на дне, в водной толще и на льду; пункты возбуждения сигнала различными источниками.



1 – верхняя часть макета геогидроакустического измерительного буя ледового класса;
2 – векторный пьезокерамический приемник;
3 – сейсмический приемник СМ3-ОС;
4 – донный молекулярно-электронный сейсмический приемник;
5 – гидрофон;
6 – цифровой регистратор;
7, 9 – силовые источники;
8 – точечный источник взрывного типа.

Рис. 1. Схема выполнения измерений.

На каждом из трех измерительных пунктов приемная система включала три эталонных устройства для измерений соответственно на дне, в водной толще и на поверхности льда. Макеты испытываемых геогидроакустических буев вмораживались в точках, разнесенных на расстояние в один километр.

Краткая характеристика используемых технических средств. В качестве измерительных средств в настоящем эксперименте использовалось прецизионное сейсмическое и гидроакустическое оборудование. Задача приема волнового возмущения в различных средах – на дне, в толще воды и на льду решалась при помощи эталонных приборов, краткие технические характеристики которых указаны в таблице 1.

Таблица 1. Применяемые датчики, условия установки.

	Измерение сигналов на дне озера	Измерение сигналов в ледовом покрове	Измерение сигналов в толще воды
Тип приемника	Молекулярно-электронный R-sensors	Маятниковый СМ3-ОС	Пьезокерамический гидрофон
Измеряемая величина	Вертикальная компонента колебательной скорости	Вертикальная компонента колебательной скорости	Акустическое давление
Частотный диапазон	0,03 – 50 Гц	0,03 – 10 Гц	20 – 15 000 Гц
Питание	12 В	24 В	12 В

Маятниковый сейсмический приемник СМ3-ОС и пьезокерамический гидрофон являются стандартным измерительным оборудованием, в то время как молекулярно-электронный приемник относится к новейшим разработкам и имеет ряд преимуществ [5, 6]. Для записи сигналов, получаемых при помощи указанного оборудования, использовались трехканальные регистраторы RefTek 130B, которые обеспечивают временную синхронизацию различных пунктов наблюдения с достаточно высокой точностью.

Для решения задачи долговременного измерения сейсмоакустических сигналов в условиях покрытой льдом акватории совместными усилиями ИФЗ РАН, МФТИ и АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» был разработан макет вмораживаемого буя (рисунке 2), который объединил в себе как различные типы чувствительных элементов, так и дополнительные цифровые аппаратные части комплексной информационно-измерительной системы.

Таким образом, вмораживаемый геогидроакустический буй представляет собой единый продукт, предназначенный для измерения гидроакустического давления и трех компонент колебательной скорости.

Рис. 2. Фотография макета вмораживаемого буя на полигоне Ладожского озера в 2017 году.

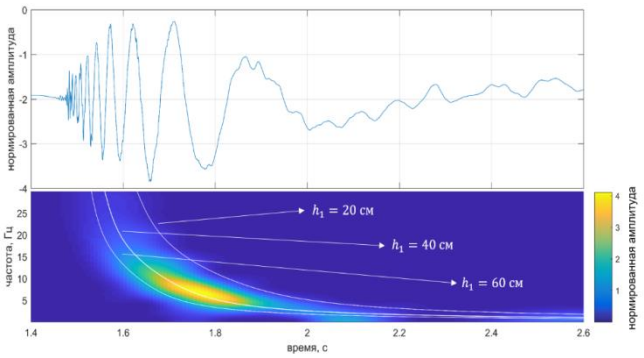


Рис. 3. Форма сигнала, возбуждаемого падением гири на лед, и его спектрограмма.

Результаты обработки экспериментальных данных. При ударе о ледовую поверхность в соответствии с [1] необходимо ожидать возбуждения изгибно-гравитационной моды, обладающей сильной дисперсией и распространяющейся в ледовом покрове. На скоростные параметры этой волны влияния оказывают в основном физические свойства ледовой пластины. В качестве источника волнового возмущения используется сброс груза в точке, удаленной от приемника на 50 метров. На рис. 3 сверху представлен записанный сигнал.

На рис. 3 снизу представлена спектрограмма сигнала (ось абсцисс на обоих графиках совпадает); белыми кривыми нанесены теоретические дисперсионные кривые, сдвинутые по времени на величину, равную времени пробега сигналом расстояния в 50 метров. Теоретические дисперсионные кривые рассчитывались для модели среды включающей слой льда различной толщины, скорости продольных и поперечных волн в котором были равны соответственно: 2,2 км/с; 1,3 км/с, жидкий слой толщиной 20 м со скоростью звука в воде 1,5 км/с. Дно моделировалось упругим полупространством со скоростями 3 км/с; 1,7 км/с. Как можно заметить, экспериментально наблюдаемое изменение времени пробега различных частотных компонент сигнала находится в хорошем согласии с теоретическим расчётом, что дает возможность определить толщину ледового покрова, которая в нашем случае была равна 0,4 м.

В соответствии с теоретическим расчетом ожидалось, что наибольший вклад в вертикальную компоненту сигнала, измеряемого приемниками, установленными на дне озера, в низкочастотной области будет вносить фундаментальная мода поверхностной волны рэлеевского типа (называемая также волной Шолте или Стоунли). Как известно, поверхностная волна испытывает дисперсию, вызванную слоистостью неоднородной среды. В расчетах за исходную модель принималась среда, включающая ледовой слой толщиной 0,4 м, гидроакустический волновод, глубина которого составляла 20 м, а скорость звука была принята равной 1,5 км/с, и упругое полупространство, параметры которого варьировались в заданном интервале. Источник сигнала в данном случае располагался на глубине 10 м. Точное время воздействия было известно по причине установки одной из измерительных точек в непосредственной близости с источником, благодаря этому при известном расстоянии до источника на полученной записи удается перевести временную ось в ось групповых скоростей. На рис. 4 представлена спектрограмма суммированного (по двум одинаковым возбуждениям) сигнала, принятого в точке, удаленной от источника на 1 км, а белыми линиями нанесены модельные дисперсионные кривые групповой скорости фундаментальной моды поверхностной волны, вычисленные при различных параметрах дна акватории в районе полигона.

Анализируя данные на рис. 4 заметим, что основная энергия диспергирующего сигнала сосредоточена в полосе частот 7-15 Гц, что ограничивает наши возможности по восстановлению упругих параметров слоистой структуры дна. Однако, сопоставляя экспериментальные и теоретические кривые, удалось оценить скорость продольных волн в дне равную 3 км/с при условии его однородности.

Формат сборника трудов не позволяет полностью изложить все полученные результаты, в частности интересующиеся выделением сигнала в ледовых условиях в пассивном режиме могут обратиться к работе [7]. Авторы выражают благодарность к.т.н. В.П. Дмитриченко за помощь в организации и проведении натурных наблюдений на акватории Ладожского озера в сложных ледовых условиях. Особую благодарность авторы выражают руководству и

сотрудникам АО «Концерн «Океанприбор» за предоставление возможности проведения испытаний и помощь в организации работ.

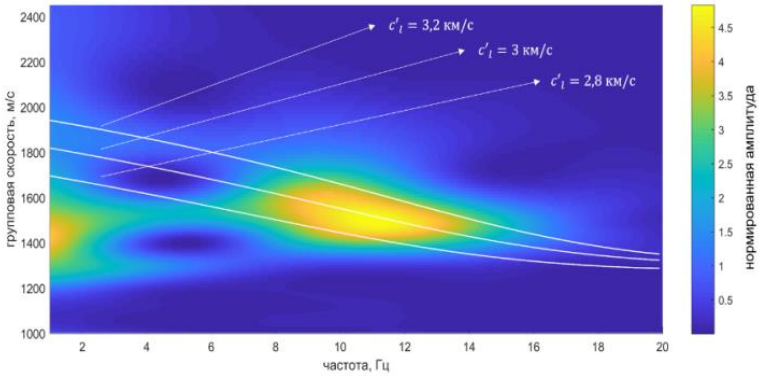


Рис. 4. Дисперсия волны рэлеевского типа по экспериментальным и модельным данным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках научного проекта № 16-29-02046 код офи_м и Гранта Президента Российской федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

Литература

1. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акустический журнал. Т. 60, № 4. С. 426-436.
2. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С., Лиходеев Д.В., Агафонов В.М. Геогидроакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96, № 3. С. 31-46.
3. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акустический журнал. Т. 54, № 1. С. 51-61.
4. ордиенко В.А., Гончаренко Б.И., Илюшин Я.А. Особенности формирования векторно-фазовой структуры шумовых полей океана // Акустический журнал. Т. 39, № 3. С. 455-466.
5. Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 3. С. 5-19.
6. Антонов А.Н., Авдюхина С.Ю., Егоров И.В., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Шабалина А.С. Широкополосная сейсмическая станция для сейсморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии- 2017». 2017. С. 64-67.
7. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 81, № 1. С. 76-80.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МИКРОМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОДА-ВОЗДУХ

С.С.Зенченко, канд.техн.наук
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

DEVELOPMENT CHARACTERISTICS OF TIME - SPACE VARIABILITY OF TEMPERATURE FIELD OF WATER SURFACE BASED ON RESULTS OF MICROSCALE RESEARCH ON THE WATER – AIR INTERFACE

S.S.Zenchenko, Ph.D.
Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

Представлены результаты исследования динамики поверхностной пленки воды (ППВ) в различных условиях соотношения температуры воды и воздуха. На основании применения тепловизионных методов контроля получены и исследованы термограммы пространственно-временной изменчивости ППВ. Одновременно представлены данные временной изменчивости влажности воздуха в приводном слое при различных условиях естественного формирования ППВ и при искусственном изменении составляющих тепломассообмена. На основании анализа рассмотрены различные механизмы формирования микромасштабной изменчивости поля температуры в результате тепломассообмена на границе раздела вода-воздух

Results of research of water surface layer dynamics in different conditions of correlation between water & air are presented. The termograms of time-space variability of water surface layer were received & investigated with the help of thermal imaging methods of control. At the same time facts of temporal variability of air humidity in water surface layer & artificial changes included in heat-mass exchange are presented. This analysis shows different ways of development of microscale changes of temperature field as a result of heat-mass exchange on the water – air interface.

Поле температуры водной поверхности является достаточно информативным параметром для контроля климатической изменчивости, оценки экологического состояния водных акваторий рек, водоемов, гидротехнических сооружений, в морских условиях поле температуры обеспечивает контроль изменения экологической обстановки в результате эксплуатации морского транспорта.

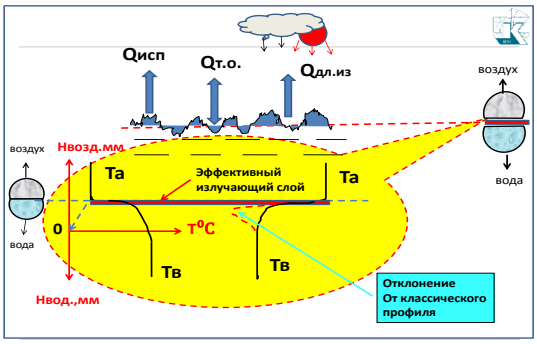


Рис. 1. Формирование ППВ.

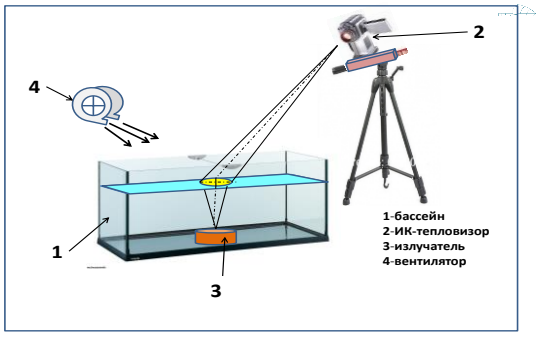


Рис. 2. экспериментальная установка.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования [1-4] в области тепломассобмена на границе раздела вода-воздух установили (Рис.1), что вследствие потерь взволнованной морской поверхностью тепла на (испарение, турбулентный обмен с атмосферой, эффективное излучение), на границе раздела формируется аномальная область, названная поверхностной пленкой воды (ППВ), имеющая отрицательные градиенты температуры при толщине несколько миллиметров. Этот слой является холодным и неустойчивым, но удерживается на поверхности под действием сил поверхностного натяжения. При определенных условиях, когда ППВ достигает своих критических параметров, происходит её разрушение. Результаты предшествующих данной работе измерений получены на основе многоточечных контактных измерений.

В настоящей работе представлены результаты тепловизионных исследований в лабораторных условиях, при моделировании не только, используемых у аналогов, условий образования отрицательных градиентов температуры, отвечающих соотношению температуры воды (Тв) и воздуха (Та) Та<Тв, но и при условии Та>Тв. Одновременно и, в дополнение к известным методам исследований, применены методы генерации малых возмущений, создающих вертикальные и горизонтальные течения для изменения сил поверхностного

натяжения и сил тяжести жидкости и получения отклика ППВ и дальнейшего изучения свойств границы раздела двух сред. В качестве таких возмущений использовано акустическое поле, параметры которого обеспечивали локальное изменение температуры поверхности за счет подъема воды с температурой нижележащих слоев, удаленных на 1мм от границы раздела. Кроме того применено искусственное изменение испарения с поверхности и создание горизонтальных течений в диапазоне гравитационно-капиллярного волнения путем локального обдува поверхности при скорости ветрового потока в диапазоне 0,3-0,5 м/с. Так же дополнительно, проведены исследования свойств приводного слоя воздуха, как неотъемлемой и составной части системы вода-воздух. В этом случае контролировалось изменение влажности приводного слоя воздуха (на удалении 2-3 мм от поверхности), регистрируемое с помощью термогигрометра. Исследования проводились в бассейне размером 150 х 370 х 400 мм (рис. 2), с тепловой изоляцией со всех боковых сторон и дна для исключения потерь тепла через конструкции стен и основания.

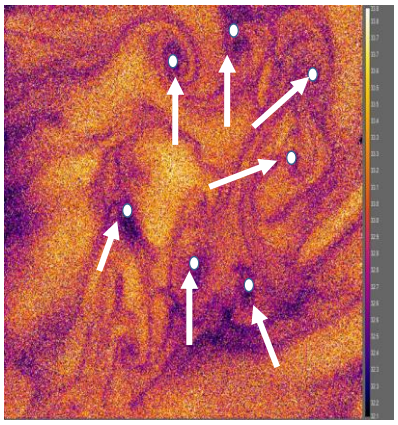


Рис.3. Фрагмент теплограммы для условий Та<Т

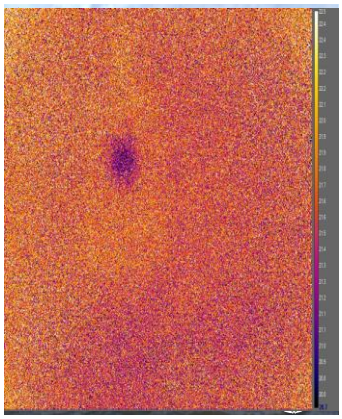


Рис. 4.Фрагмент теплограммы для условий Та>Тв

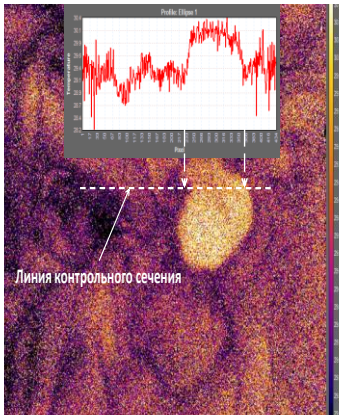


Рис. 5. Фрагмент теплограммы при акустическом возмущении

Исследования при Та < Тв (Та=28°; Тв=31,3-34,6°С) выявили сильную неоднородность свободной поверхности, характеризующуюся наличием вихрей (Рис.3), первоначально образованных от одного центрального вихря, областей холодной и теплой воды, окруженных по периметру полосами шириной 1-3мм более холодной воды по сравнению с температурой центральной части каждой области. Вся картина имеет круговое вращение по часовой стрелке с первоначальной скоростью 10мм/с. Вихревые структуры имеют такое же направление вращения относительно своих центров. Со временем вихревые структуры распадаются на мелкие. Области видоизменяются. Наблюдаются моменты всхлопывания и исчезновения областей с образованием новых, с инверсией знака температуры внутри. При этом от этих мест распространяются волновые возмущения в виде тумана (радиационного тумана) со скоростью движения 50мм/с. Общее вращение поля уменьшается до скорости 3мм/с, температура во всех проявлениях падает. Некоторым этапом завершения картины поля является образование нескольких больших областей теплой и холодной воды, после этого начинается новый повторяющийся цикл, но с меньшими скоростями и значением температур. В работе удалось зафиксировать 3 цикла изменений картины поля температуры за 20 мин регистрации.

Полученный обьем информации позволил выявить некоторые физические особенности, происходящие в ППВ. Продолжительное удержание на поверхности аномальных областей и их эволюция, подтверждает важность роли поверхностного натяжения и существование первоначально термокапиллярной конвекции. Она мобилизует и концентрирует течения жидкости в пределах каждой области, вихрей до накопления критической массы и подготавливает поверхность к последующему изменению своего состояния. После этого наблюдаемая инверсия и исчезновение областей, вследствие наступления термогравитационной конвекции.

Наблюдаемая цикличность повторения всей картины изменений на водной поверхности можно связать с образованием в конце каждого цикла некоторого оптимально устойчивого состояния температуры в пределах большой площади поверхности. Оно заканчивалось

наличием всего 2-3х больших областей с равномерным распределением температуры в каждой области. Повторение всей динамики и картины на поверхности идет с меньшими значениями температуры и меньшей энергией перемещений и увеличением времени на осуществление этих процессов. Проведенные оценки числа Марангони для термокапиллярной конвекции для горизонтального размера ячейки, за который принята линия стока в 1мм, и при значении разности температур 0,6°С, дали расчетное значение Ма = 155. Это согласуется с оценками других авторов, указывающих диапазон изменения 120-150. Одновременно оценки значений числа Рэлея при наступлении неустойчивости ППВ и её разрушении для слоя толщиной 20 мкм с перепадом температуры в 1^0С и молекулярном значении коэффициента температуро-проводности соответствовали значению, равному 60, что согласуется с данными [1-2] контактных измерений температуры на участках с линейным профилем температуры по глубине и его разрушением вследствие вынужденной конвекции. Критические значения числа Рэлея, при которых по данным измерений наблюдалось исчезновение областей составляли Rакр=64;69; 88.

Результаты исследований для Та > Тв (Та = 24-25°С; Тв = 19-20°С) показали существенно равномерное поле температуры поверхности (рис.4), отмечались лишь две области с плавным изменением температуры, не превышающим $0,1^0$С. Это свидетельствовало об образовании устойчивой области, длительно сохраняющей свои свойства, фактически, без изменения, при отсутствии каких либо дополнительных внешних факторов.

Представленное различие состояния поверхности при указанных соотношениях температуры воды и воздуха не являются единственным тому доказательством. Дополнительные материалы получены на основании использования акустического поля, применения искусственного обдува поверхности и измерений влажности в приводном слое воздуха.

Эффект от акустического барботирования поверхности в условиях образования холодной ППВ (Та < Тв) показан на рис.5. При таких условиях четко фиксируется аномальная локальная область с температурой, соответствующей распределению на глубине 1мм. Аналогичные многочисленные измерения для условий Та > Тв либо не выявили изменения температуры на глубинах 1 мм по сравнению с температурой поверхности, либо, в некоторых случаях, температура воды на глубине 1мм оказывалась всегда ниже температуры основной массы воды. Кроме того время релаксации ППВ после возмущений от акустического поля для Та > Тв не превышало 50-60сек. При состоянии Та < Тв, время релаксации, как минимум, в 2-2,5 раза оказалось больше. Были случаи, когда не удалось зафиксировать процесс восстановления. Эти данные позволили предположить о существовании двух состояний для условий Та > Тв. В одном наличие изотермии и отсутствии аномальной области в приповерхностных слоях. Во втором случае наличие у поверхности охлажденных слоев (холодной ППВ) по сравнению с однородной температурой всей массы воды (рис.1).

Ветровой обдув в условиях Та < Тв приводил к резкому образованию большой аномальной области с понижающейся во времени температурой. При этом все области, ранее присутствующие на поверхности и охваченные ветровым потоком, почти мгновенно исчезли. Время релаксации окончательно не удалось зафиксировать, поскольку не удается вернуться к состоянию, которое было до обдува поверхности. Для условий Та > Тв образуются резкие области, четко ограниченные линиями стока охлажденной воды в пределах области обдува. Прекращение обдува четко приводит к восстановлению свойств поверхности.

Средний диапазон времени релаксации в этом случае составил от 50 до 80 с.

Измерение влажности при Та < Тв (рис.6) показал наличие резких и кратковременных выбросов влажности, превышающих на 20-30 %, средний уровень влажности в приповерхностном слое.

Эти выбросы можно отнести к моментам всхлопывания и инверсии неустойчивых областей с образованием выбросов пара. Для условий Та > Тв (Рис.7) наблюдаются продолжительные, характерные для крупных аномалий, изменения влажности в тех же пределах отклонения от среднего уровня, как и ранее рассмотренных случаях. Следует отметить, что измерения в условиях одного состояния влажности приводного воздуха, для обоих сравниваемых случаев, насыщение приводного слоя влагой различно. Для Та < Тв, при условии большего в 2раза дефицита влажности, уровень насыщения (среднее значение) не превышает 30%. Для противоположного случая, при меньшем дефиците влажности, он достигает 40%. Это обстоятельство позволяет делать заключение, затраты тепла на испарение

для холодной пленки больше, но происходит их перераспределение на процессы термокапиллярной горизонтальной изменчивости температуры всей водной поверхности. В моменты инверсии состояния ППВ происходят резкие прорывы и выбросы влаги до уровня, соответствующего значению дефицита системы вода-воздух. В другом случае происходит, в основном, свободный процесс испарения и обмен теплом по всей площади водной акватории без вмешательства.

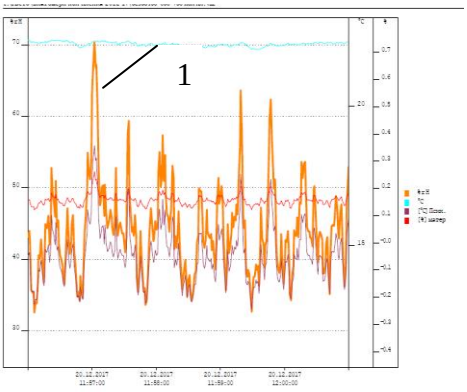


Рис. 6. Измерение влажности при Та<Тв (запись 1).

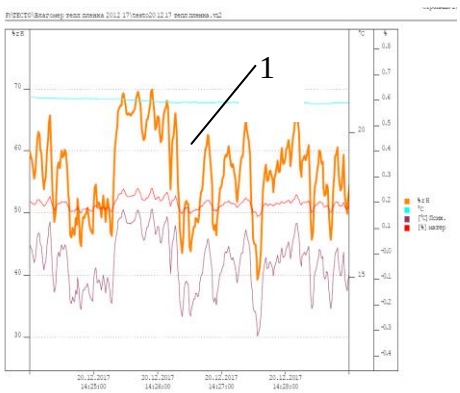


Рис. 7. Измерение влажности при Та>Тв (запись 1).

Таким образом, проведенные исследования определили различные состояния поля температуры на водной поверхности вследствие влияния микромасшабной изменчивости ППВ. Эти состояния определяются наличием холодной ППВ и постоянством температуры водной поверхности. При условиях холодной ППВ происходит двойная конвекция, связанная с процессами горизонтального изменения температуры и перераспределения сил поверхностного натяжения, обеспечивающего подготовку масс воды для осуществления и включения в действие силы тяжести. В этих условиях затраты тепла на испарение перераспределяются дополнительно на работу горизонтальных течений. Эти факты необходимо учитывать при решении практических задач. Возможное отсутствие аномальных изменений температуры водной среды при Та>Тв и, одновременно, наличие процесса испарения, позволяет сделать предположение, что весь аномальный процесс температурного поля должен ложиться на приводные слои воздуха, для доказательства которого требуются дальнейшие исследования.

Литература

1. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Федоров К.Н**.** Токая структура термического пограничного слоя в воде у поверхности раздела вода-воздух, Изв. АН СССР. ФАО ,1977,т.13, №12.
2. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции, Изв.АН СССР.ФАО,1978,т.14, №1.
3. Анисимова Е.П. и др. К вопросу о теплообмене в тонком пограничном слое вода-воздух. Изв. АН СССР. ФАО, 1983, т.19, №9.
4. Бунэ А.В., Гинзбург А.И., Полежаев В.И., Федоров К.Н**.** Численное и лабораторное моделирование развития конвекции в охлаждающем с поверхности слое воды. Изв. АН СССР, ФАО 1985, т.21, №9.

ЛОКАТОР – ИЗМЕРИТЕЛЬ ГРАДИЕНТОВ ПОЛЯ

С.Н.Гузевич, канд.техн.наук
АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт»,
Санкт-Петербург, Россия

LOCATOR MEASURING GRADIENTS OF FIELD

S.N.Guzevich, Ph.D.
JSC «The State Research Navigation-Hydrographic Institute», St. Petersburg, Russia

Рассматриваются причины наличия «неопределенности» при выполнении локационных измерений. Показано, что использование принципов парности и относительности при построении образов объекта и их подобия обеспечивает условия достоверности измерений пространственного положения и размеров объекта.

The reasons for the presence of "uncertainty" when performing location measurements are considered. It is shown that the use of the principles of pairing and relativity in the construction of object images and their similarity provides conditions for the reliability of measurements of the spatial position and dimensions of the object.

Локаторы предназначены для определения положения и расстояния до объектов в секторе излучения локатором волновых полей. В них для оценки расстояний используют скорость распространения волновых процессов в окружающей среде, стационарность параметров которых существенно зависит от температуры и давления в ней, поэтому при выполнении локационных измерений используют референтную методику измерений, так как при измерении волновых процессов отсутствуют эталоны измерения скорости. Большому числу измеряемых параметров при локационных измерениях дают оценку – «неопределенность», к которым относятся гидролокационные, радиолокационные, геофизические и оптические измерения. Качество измерений, выполненных локатором, метрологи оценивают характеристикой – «неопределенность». В чем основные причины столь низкой оценки качества локационных измерений, хотя среднеквадратическая погрешность измерений может достигать 1 мм. Рассмотрим их на примере использования дипольных измерителей, как основы построения измерительных устройств.

Основные причины неопределенности локационных измерений

1. Условием выделения поля локального источника является изменение градиента измеряемого поля, который наблюдается на уровне градиента поля окружающей среды. При этом большинство измерительных преобразователей фиксируют приращение параметров в размерах первичного преобразователя. Например, в радио и эхолокации измеряется разность потенциалов принимаемого сигнала, то есть фиксируется их приращение, но на каком размере? Измеритель при модельном построении принято обозначать точкой. Но, чем больше размер дипольной антенны локатора (кратных длине волны), тем больше сигнал, который оценивают разностью потенциалов. Уровень принимаемого сигнала или его приращения зависит от множества факторов, но основой выделения является изменение градиента. Если используют второй преобразователь, размещенный на базе, влияние всех указанных факторов будет проявляться и на его уровне и форме сигнала. Сигналы двух преобразователях будут отличаться только формой перспективного отображения объекта. Если преобразователи одинаковы по размерам, то, разделив сигнал каждого из них на линейный размер преобразователя, получим оценку градиента поля в размерах преобразователя, например на 1 см. Разность приращений градиентов двух преобразователей на расстоянии базы, например в 10м, даст оценку приращений градиента на линейной базе, отнесенное к расстоянию в 10м. При этом в 10^3раз повысится дискретность оценки приращений градиента. Учитывая, что база измерительного устройства линейна восстановление градиента поля между точками базы также будет линейным, но с дискретностью или разрешающей способностью в 1000 раз более высокой. А если восстанавливать поле по оценкам его градиента, то разрешающая способность оценки поля возрастет еще в 1000 раз.

То есть градиенты полей являются фактором, обеспечивающим выделение размеров объектов, одновременно градиенты измеряемых параметров являются основным элементом, фиксируемым измерительными устройствами. Но их фиксируют не в мерах градиента *в/м, нТл/м, а в мерах параметра – в вольтах, нТл. При этом уже в настоящее время результаты преобразований индукции магнитного поля в частоту фиксируют в мерах временных градиентов. Так квантовые магнитометры измеряют магнитное поле в нТл/с или нТл/$с^{1/2}$.*

2. Все отображения в природе и технике получают методом центрального проектирования при использовании проективной системы координат, которую в настоящее время считают не аналитической. Полученные отображения получают в перспективном отображении, но описывают в системе координат Декарта, описание которых можно выполнить только методами итераций. Различия в отображении и описании образов выразилось характеристикой качества локационных измерений объектов - «неопределенность».

3. При выполнении любых измерений мы постоянно сталкиваемся с двумя аргументами, которые действуют всегда одновременно – это время и пространство. Их влияние в настоящее время разделить невозможно, так как они описываются одним уравнением. Поэтому физические процессы описываются модельными зависимостями, но от какого аргумента? Установление равенства эмпирических дисперсий их истинным значениям на основе ряда экспериментальных данных свидетельствует только о том, что для них, полученные весовые характеристики близко соответствуют действительности, но не более.

Таким образом, первичные преобразователи являются естественными измерителями градиентов полей измеряемых параметров, которые обеспечивают выделения границ объектов и оценивают приращение градиента физического параметра в границе размера первичного преобразователя. При использовании пары измерителей размещенных на базе, разность измеренных ими градиентов характеризуют скорость изменения градиента на базе. При этом они являются функцией сразу двух не разделяемых аргументов времени и пространства, которые отображают в перспективе в проективной системе координат, а описывают в пространственной системе координат Декарта.

Рассмотрим возможности устранения указанных недостатков на основе модели выполнения локационных измерений, используя геометрические зависимости, отказавшись от референтной методики измерений, так как эталоны измерения скорости отсутствуют.

Парность измерений - логическая основа достоверности. Локация является техническим аналогом зрительных измерений, которые выполняются в различных средах и различными техническими средствами, но построены по одному принципу – измерения волновых полей. В дипольных локаторах в основном используют приемные устройства с одним антенным преобразователем, то есть используют модельное описание полученных результатов в моно системах координат. При проективном отображении объекта его образ получают в перспективе, которая очень значительно может исказить как форму, так и пространственное положение объекта, так как зависит не только от отстояния от измерителя, но и от параллактического угла и взаимной ориентации объекта и измерителя.

При использовании парной проективной системы координат, показанной на рис.1, совмещенной с парными измерителями, обеспечивается возможность контроля достоверности полученных образов D_A, D_B, путем сравнения их проекций на оси Г параллельной базе d, нормирования размером базы расстояний L_A, L_B до точек на объекте и полученных образов объекта, управления разрешающей способностью, путем деления базы на требуемое число частей [3]. При использовании парных измерителей создается фиктивная измерительная система координат $YГ'0$ с осью Г’ и фиктивными отображениями объектов $D'_{1Г}$ и $D'_{2Г}$, подобными наблюдаемым в измерительной системе $YГ0_10_2$,. Перемещение центра схождения лучей в пространстве при изменении положения объекта создает условие равновесия при измерении точек объектов и их образов на разных отстояниях L_A, L_B. Процесс проецирования, описываемый двумя парами треугольников, выделенных цветом, которые имеют общую сторону – базу d, а вершины опираются в противоположные стороны и на базу. При этом отстояние f ‘ плоскости проецирования от базовой оси *характеризует точку схождения лучей* 0‘*или положение фиктивного суммарного измерителя. Точка схождения лучей* является центром равновесия системы по оси Y.

Проведя луч, параллельный лучу $A10'$ и проходящий через точку 2. Получаем ряд пар подобных треугольников, из которых следует:

$$L_A = \frac{d}{2} ctg \frac{\alpha_A}{2} = \frac{fd}{D_A - d} = \frac{s}{D_A - d} = \frac{f}{\frac{D_A}{d} - 1}; L_B = \frac{d}{2} ctg \frac{\alpha_B}{2} = \frac{fd}{D_B - d} = \frac{s}{D_B - d} = \frac{f}{\frac{D_B}{d} - 1}$$

где L_A=L_B– отстояние точек **А** и **В** на прямой от измерительной базы d; α_A, α_B - параллактические углы в точках **А** и **В**; $D_A - d = \Gamma_{1A} + \Gamma_{2A} = \Gamma_A$; $D_B - d = \Gamma_{1B} - \Gamma_{2B} = \Gamma_B$ -

приращение проекции базы d при ее проецировании на ось Γ из точки **A** и **B**, соответственно; $s = f \cdot d$ - площадь поверхности измерителя.

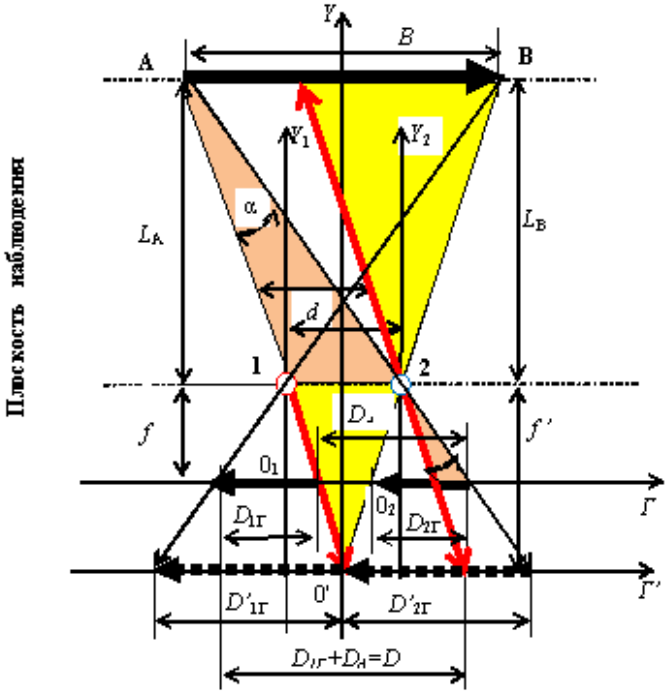


Рис. 1. Трансформирование пространства в парном измерителе.

Парность измерений закладывает *условия относительности*, которая опирается на *разность и частное* сравниваемых частей: d и D_A, D_B. Условие относительности определяет коэффициент преобразования положения точки из перспективного отображения в пространственное.

Модельное построение образов отраженных полей в проективной системе координат. Модельное построение образов объектов, получаемых с помощью волновых полей, не зависимо от их частоты, выполняют проведением лучей, исходящих из центра объекта и проходящих через его угловые формы. Рассмотрим модельное построение поля объекта, выполненного в виде параллелепипеда, состоящего из равномерно распределенных элементов направленных вдоль главного размера объекта, например линейного магнита, показанное на рис. 2. Реальные измерения полей линейного магнита показаны на рис.3.

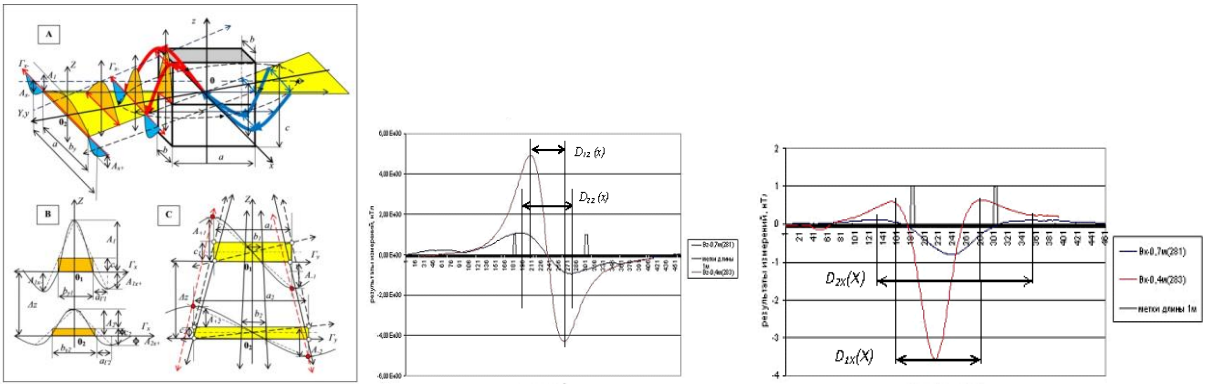


Рис. 2 и 3. Модельные и реальные образы поля линейного магнита.

Использование парных измерений, выполненных с одного ракурса, путем проведения параллельных секущих плоскостей, позволяет использовать основной принцип парных измерений – сравнение образов объекта [3-4]. При этом выполняются основные законы распространения полей, при котором амплитуды образов уменьшаются, протяженность их распространения увеличиваются, а площади поверхностей, описываемые их проекциями на

плоскостях, ортогональных оси удаления, остаются постоянными. Полное совпадение модельных и реальных образов волнового распространения поля свидетельствуют об их достоверности и реальности корректного решения обратной задачи физики при использовании парной проективной системы координат.

Обратный процесс восстановления поля и размеров магнита показан на рис.4

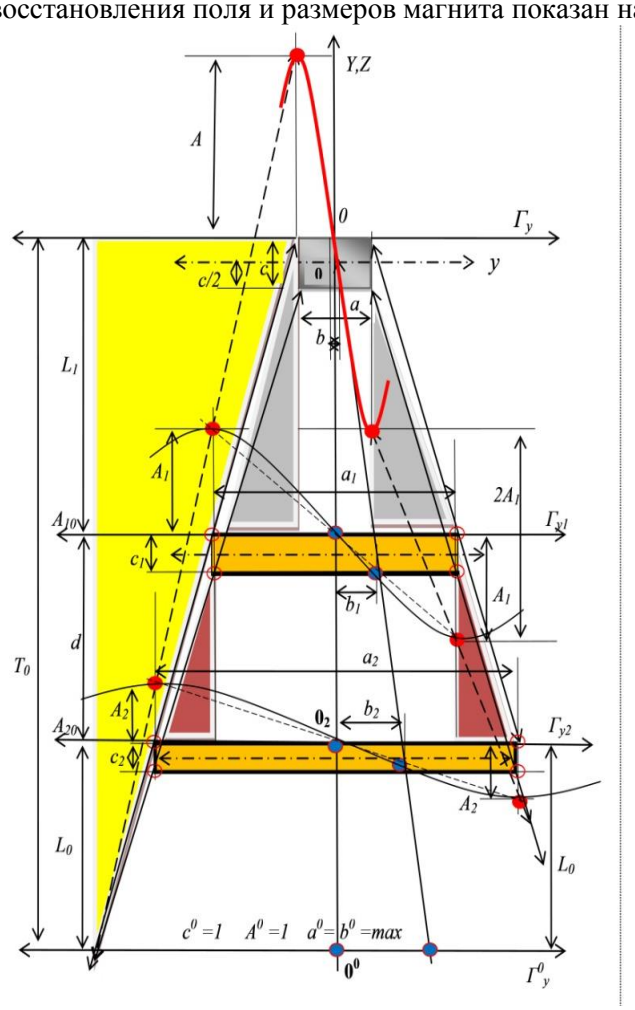


Рис. 4. Построение размеров объекта по его образам.

В парной проективной системе координат можно построить две отсчетных оси в плоскости наблюдений: одна из которых связана с положением объекта - ось Γ_y, другая с положением уровня, где амплитуда сигнала равна чувствительности измерителя индукции $A^0=1$ - ось Γ^0_y,. На этом уровне из-за постоянства скалярного потенциала высота образа объекта ($c^0=1$) равна 1. При этом подобие и свойства постоянства поверхностей распространяется в две стороны, как к оси Γ^0_y, так и к оси Γ_y.

Из подобия треугольников выделенных цветом и опирающихся на стороны проекций размеров образов объекта: вычислим отстояния объекта от первого измерителя L_1 и положение L^0 уровня поля где его амплитуда равна чувствительности измерителя, то есть где A^0=1, которые связаны следующими зависимостями:

$$\frac{a_1-a}{L_1}=\frac{a_2-a_1}{d}=\frac{a_2-a}{L_1+d} \quad ; \quad \frac{L_1+d}{A_2}=\frac{L_1}{A_1}=\frac{c/2}{A^0} \quad ; \quad \frac{L^0}{A_2}=\frac{L^0+d}{A_1}=\frac{L^0+d+L_1}{A^0} \quad ;$$

$$L_1=\frac{d}{A_2/A_1-1}=\frac{d}{a_1/a_2-1} \quad ; \quad L^0=\frac{d}{A_1/A_2-1}=\frac{d}{a_2/a_1-1} \quad ;$$

Условие постоянства площади образов объектов, не зависимо от их отстояния в плоскости наблюдений парной проективной системы координат, связывает размеры проекций следующими зависимостями [3-4]:

$$aA = a_1 A_1 = a_2 A_2 \quad ; \quad \frac{c}{2} A = \left(L_1 - \frac{c}{2} \right) A_1 = \left(L_1 + d - \frac{c}{2} \right) A_2 \quad ;$$

$$L^0 b_2 = \left(L^0 + d \right) b_1 = \left(L^0 + d + L_1 \right) b$$

Принципиальная схема эхолота, реализующая этот алгоритм, представлена в работе [4].

Выводы

1. Опираясь на правила лучевого распространения при выполнении локационных измерений, используя принципы парности и относительности и свойство подобия геометрических построений образов волнового поля объекта, определены все геометрические и физические параметры положения и размеров объекта, без использования скорости распространения информации, то есть без влияния условий окружающей среды.

2. Измерение градиента локатором позволяет разделить влияние аргументов времени и пространства, что исключает возникновение условий неопределенности, то есть обеспечивает достоверность измерений.

Литература

1. Гузевич С.Н. «Об одной систематической погрешности локационных измерений»// «Авиакосмическое приборостроение» 2014, №10, С.42-50.
2. Скобелин А.А. Пути снижения влияния погрешностей измерительных средств наземного сегмента при синхронизации шкал времени системы ГЛОНАСС // Радионавигация и время, №2 (10), 2016, С. 28-43.
3. Гузевич С.Н. Описание модельных построений объектов в проективной системе координат. // Прикладная физика и математика 2016, №3. С.43-52.
4. Гузевич С.Н. «Основа достоверности и точности измерений локаторов» //Материалы XII Всероссийской конференции (ГА-2014) Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики, С.405-407.

ПОСТРОЕНИЕ И АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА

О.П.Ткаченко, д-р физ-мат.наук
Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

CREATION AND ASYMPTOTIC ANALYSIS OF PIPELINE MATHEMATICAL MODEL

O.P.Tkachenko, Dr.Sc.
Computer Center FEB RAS, Khabarovsk, Russia

На основе теории моментных оболочек построена математическая модель напряженно-деформированного состояния трубопровода с криволинейным профилем. Предложен метод асимптотического анализа, который позволил привести систему уравнений в частных производных математической модели к одномерному виду. Найдены ограничения на класс задач, при которых возможна такая редукция постановки задачи.

On the basis of the bending shells theory, a mathematical model of the stress-strain state of a pipeline with a curvilinear profile was constructed. A method of asymptotic analysis has been proposed that has made it possible to reduce the system of partial differential equations of a mathematical model to the one-dimensional form. Limits on the class of problems under which this reduction of the problem statement is possible were derived.

Рассматривается задача о напряженно-деформированном состоянии трубопровода. Пусть металлическая протяженная труба имеет изгиб осевой линии, обусловленный конструктивными особенностями [1], или вызванный природными (техногенными) факторами [2]. Предположим, что осевая линия трубы Γ является плоской кривой: $\Gamma = \{x, y \mid x = x_0(s), y = y_0(s)\}$. Требуется найти напряжения и деформации трубы под действием внутреннего потока жидкости и внешней среды.

Геометрия данного трубопровода подробно рассмотрена в [3]. Введены глобальная декартова система отсчета $(Oxyz)$ и адаптированная к трубе криволинейная система координат $(Os\theta R)$. Здесь s – длина дуги вдоль осевой линии; θ, R – полярные координаты в поперечном сечении, ρ_0, κ – радиус кривизны и кривизна осевой линии, соответственно. Параметры срединной поверхности:

$$A = 1 + R_0\kappa\sin\theta, \quad B = R_0; \quad k_1 = \frac{\kappa\sin\theta}{1+\kappa R_0\sin\theta}, \quad k_2 = \frac{1}{R_0}; \tag{1}$$

A, B – коэффициенты первой квадратичной формы; k_1, k_2 – главные кривизны поверхности; R_0, h – радиус и толщина стенки трубы.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния стенки трубы построена в [3], где приведена система уравнений равновесия трубы как моментной оболочки в специальных координатах (1). Эта система получена на основе метода построения теории оболочек, предложенного в [4], и главными неизвестными в ней являются первый инвариант тензора деформаций и линейное кручение стенки. Разрешающие уравнения для частного случая этой математической модели приведены в [5].

Обозначим: u, v, w – компоненты вектора перемещений вдоль s, θ, R, соответственно. Соответствующие безразмерные переменные и неизвестные:

$$\zeta = s/\ell, \; r = R/R_0, \theta = \theta; \; u' = u/R_0, \; v' = v/R_0, \; w' = w/R_0.$$

Здесь ℓ – характерный продольный масштаб. Предположим, что мал параметр:

$$\lambda = R_0 \max|\kappa| = 1. \tag{2}$$

Общие уравнения математической модели [3]:

$$\frac{1}{A}\left(\frac{\partial I_0}{\partial s} + \frac{h^2}{6}H\frac{\partial I_1}{\partial s} + \frac{h^2}{12}\frac{\partial I_2}{\partial s}\right) - (1-\nu)\frac{1}{B}\left(\frac{\partial \chi_0}{\partial\theta} + \frac{h^2}{6}k_1\frac{\partial\chi_1}{\partial\theta} + \frac{h^2}{12}\frac{\partial\chi_2}{\partial\theta}\right) + (1-\nu)\left(Ku - \frac{k_2}{A}\frac{\partial w}{\partial s}\right) = -\frac{1-\nu^2}{Eh}X,$$

$$\frac{1}{B}\left(\frac{\partial I_0}{\partial\theta} + \frac{h^2}{6}H\frac{\partial I_1}{\partial\theta} + \frac{h^2}{12}\frac{\partial I_2}{\partial\theta}\right) + (1-\nu)\frac{1}{A}\left(\frac{\partial\chi_0}{\partial s} + \frac{h^2}{6}k_2\frac{\partial\chi_1}{\partial s} + \frac{h^2}{12}\frac{\partial\chi_2}{\partial s}\right) + (1-\nu)\left(Kv - \frac{k_1}{B}\frac{\partial w}{\partial\theta}\right) = -\frac{1-\nu^2}{Eh}Y, \tag{3}$$

$$-2H\cdot I_0 - \frac{h^2}{6}\left(HI_2 + KI_1\right) + \frac{h^2}{12}\frac{1}{AB}\left\{\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{B}{A}\left(k_2\frac{\partial I_0}{\partial s} + \frac{\partial I_1}{\partial s} - (1-\nu)K\frac{\partial w}{\partial s}\right) - (1-\nu)k_1\frac{\partial\chi_0}{\partial\theta}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial\theta}\left[\frac{A}{B}\left(k_1\frac{\partial I_0}{\partial\theta} + \frac{\partial I_1}{\partial\theta} - (1-\nu)K\frac{\partial w}{\partial\theta}\right) + (1-\nu)k_2\frac{\partial\chi_0}{\partial s}\right]\right\} +$$

$$+\frac{h^2}{12}\frac{(1-\nu)}{AB}\left[\frac{\partial}{\partial s}(BKk_1u)+\frac{\partial}{\partial\theta}(AKk_2v)\right]+\frac{1-\nu}{AB}\left[2ABKw+\frac{\partial}{\partial s}(Bk_2u)+\frac{\partial}{\partial\theta}(Ak_1v)\right]=-\frac{1-\nu^2}{Eh}Z.$$

Здесь I_0, I_1, I_2 – компоненты разложения первого инварианта тензора деформаций в ряд по $\gamma=R-R_0$, χ_0, χ_1, χ_2 – то же для линейного кручения элемента оболочки (см. [4]), X, Y, Z – компоненты внешних сил, действующих на оболочку вдоль координат s, θ, R, соответственно; E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона материала трубы. Обозначим:

$$h^*=h/R_0,\ E^*=E/\left(1-\nu^2\right),\ \alpha=R_0/\ell,\ f=\kappa/\max|\kappa|.$$

Далее, подставляя в (3) выражения из [3] для I_i, χ_i через перемещения стенки u, v, w, переходя к безразмерным переменным и неизвестным, пренебрегая величиной h^{*2} по сравнению с единицей, и отбрасывая слагаемые второго порядка малости по λ, получим упрощенные разрешающие уравнения для трубопровода как моментной оболочки. Здесь они не приводятся ввиду громоздкости.

В [6] использован предложенный нами метод редукции уравнений полубезмоментной оболочки к задаче, одномерной по пространственной переменной. Здесь этот метод применен для полностью моментной оболочки. Для выполнения редукции решения разрешающих уравнений оболочки представлены в виде:

$$\begin{aligned}
u'(\zeta,\theta)&=u_0^0(\zeta)+\lambda u_1^1(\zeta)\sin\theta+\lambda u_2^1(\zeta)\cos\theta+O\left(\lambda^2\right),\\
v'(\zeta,\theta)&=v_0^0(\zeta)+\lambda v_1^1(\zeta)\sin\theta+\lambda v_2^1(\zeta)\cos\theta+O\left(\lambda^2\right),\\
w'(\zeta,\theta)&=w_0^0(\zeta)+\lambda w_1^1(\zeta)\sin\theta+\lambda w_2^1(\zeta)\cos\theta+O\left(\lambda^2\right).
\end{aligned}\qquad(4)$$

В таком же виде представлены правые части (3) X, Y, Z.

В результате получим систему из девяти дифференциальных уравнений для девяти неизвестных. Нижним индексом ζ обозначим дифференцирование. Также обозначим: $\varepsilon^2=h^{*2}/12$, $f=\kappa/\max|\kappa|$.

Нулевое по λ приближение: $\alpha^2u_{0\zeta\zeta}^0+\alpha\nu w_{0\zeta}^0-\varepsilon^2\alpha^3w_{0\zeta\zeta\zeta}^0+X_0^0/E^*h^*=0$;

$$\begin{aligned}
\frac{1-\nu}{2}\alpha^2v_{0\zeta\zeta}^0+Y_0^0/E^*h^*&=0;\\
w_0^0+\nu\alpha u_{0\zeta}^0+\varepsilon^2\left[\alpha^4w_{0\zeta\zeta\zeta\zeta}^0-\alpha^3u_{0\zeta\zeta\zeta}^0\right]-Z_0^0/E^*h^*&=0.
\end{aligned}\qquad(5)$$

Первое по λ приближение для функций u_1^1, v_2^1, w_1^1:

$$\alpha^2u_{1\zeta\zeta}^1+\alpha\nu w_{1\zeta}^1-\varepsilon^2\alpha^3w_{1\zeta\zeta\zeta}^1-\frac{1+\nu}{2}\alpha v_{2\zeta}^1-\frac{1-\nu}{2}u_1^1-2\alpha^2fu_{0\zeta\zeta}^0-\alpha^2f_\zeta u_{0\zeta}^0+\alpha f_\zeta w_0^0+$$
$$+\alpha\left[(1-\nu)f+\varepsilon^2\alpha^2f_{\zeta\zeta}\right]w_{0\zeta}^0+\left(\frac{1-\nu}{2}f+\varepsilon^2\alpha^2f_{\zeta\zeta}\right)u_0^0+\varepsilon^2\alpha^3\left(4f_\zeta w_{0\zeta\zeta}^0+3fw_{0\zeta\zeta\zeta}^0\right)+X_1^1/E^*h^*=0;$$
$$\frac{1-\nu}{2}\alpha^2v_{2\zeta\zeta}^1-v_2^1+\frac{1+\nu}{2}\alpha u_{1\zeta}^1+w_1^1-\varepsilon^2\alpha^2\frac{3-\nu}{2}w_{1\zeta\zeta}^1+\frac{\nu-3}{2}\alpha fu_{0\zeta}^0+\frac{\nu-1}{2}\alpha f_\zeta u_0^0+fw_0^0+$$
$$+\varepsilon^2\frac{\alpha^2}{2}\left[(3-\nu)f_\zeta w_{0\zeta}^0+(7-\nu)fw_{0\zeta\zeta}^0\right]+Y_2^1/E^*h^*=0;\qquad(6)$$
$$-w_1^1+v_2^1-\nu\alpha u_{1\zeta}^1-\left(2\nu f-\varepsilon^2\alpha^2f_{\zeta\zeta}\right)w_0^0-\left[(1-\nu)f-\varepsilon^2\alpha^2f_{\zeta\zeta}\right]\alpha u_{0\zeta}^0+\varepsilon^2\left[-\alpha^4w_{1\zeta\zeta\zeta\zeta}^1+2\alpha^2w_{1\zeta\zeta}^1+\right.$$
$$+\frac{\nu-3}{2}\alpha^2v_{2\zeta\zeta}^1+\alpha^3u_{1\zeta\zeta\zeta}^1+4\alpha^4fw_{0\zeta\zeta\zeta\zeta}^0+6\alpha^4f_\zeta w_{0\zeta\zeta\zeta}^0-\left[(1-\nu)f-4\alpha^2f_{\zeta\zeta}\right]\alpha^2w_{0\zeta\zeta}^0+$$
$$\left.+\left(\nu f_\zeta+\alpha^2f_{\zeta\zeta\zeta}\right)\alpha^2w_{0\zeta}^0-3\alpha^3fu_{0\zeta\zeta\zeta}^0-2\alpha^3f_\zeta u_{0\zeta\zeta}^0-\frac{\alpha}{2}\left[(1+\nu)f_\zeta-2\alpha^2f_{\zeta\zeta\zeta}\right]u_0^0\right]+Z_1^1/E^*h^*=0.$$

Первое по λ приближение для функций u_2^1, v_1^1, w_2^1:

$$\alpha^2u_{2\zeta\zeta}^1+\alpha\nu w_{2\zeta}^1-\varepsilon^2\alpha^3w_{2\zeta\zeta\zeta}^1+\frac{1+\nu}{2}\alpha v_{1\zeta}^1-\frac{1-\nu}{2}u_2^1+\alpha f_\zeta v_0^0+\frac{3-\nu}{2}\alpha fv_{0\zeta}^0+X_2^1/E^*h^*=0;$$

$$\frac{1-\nu}{2}\alpha^2 v^1_{1\zeta\zeta} - v^1_1 - \frac{1+\nu}{2}\alpha u^1_{2\zeta} - w^1_2 + \varepsilon^2\alpha^2\frac{3-\nu}{2}w^1_{2\zeta\zeta} - (1-\nu)\alpha^2 f v^0_{0\zeta\zeta} + \frac{\nu-1}{2}\alpha^2 f_\zeta v^0_{0\zeta} - \nu f v^0_0 + Y^1_1 \Big/ E^* h^* = 0 ;(7)$$

$$-w^1_2 - v^1_1 - \nu\alpha u^1_{2\zeta} - \left(\nu f - 2\varepsilon^2\alpha^2 f_{\zeta\zeta}\right)v^0_0 + \varepsilon^2\left[-\alpha^4 w^1_{2\zeta\zeta\zeta\zeta} + 2\alpha^2 w^1_{2\zeta\zeta} - \frac{\nu-3}{2}\alpha^2 v^1_{1\zeta\zeta} + \alpha^3 u^1_{2\zeta\zeta\zeta} + \right.$$

$$\left. + \alpha^2\frac{\nu+3}{2} f v^0_{0\zeta\zeta} + \alpha^2\frac{\nu+7}{2} f_\zeta v^0_{0\zeta}\right] + Z^1_2 \Big/ E^* h^* = 0 .$$

Систему (5) называем системой уравнений нулевого приближения, системы (6), (7) – системами уравнений первого приближения. Видно, что системы уравнений (6), (7) могут быть решены независимо друг от друга. В случае отсутствия сил инерции и зависимости от времени задача нахождения напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода сведена к решению трех систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

В отличие от [6], новая система уравнений получена для моментной оболочки.

Доказательство корректности представления (4) состоит из следующих этапов.

1) Представление функций u', v', w' в виде рядов по малому параметру (2):

$$u' = u^0 + \lambda u^1 + O\left(\lambda^2\right),\ v' = v^0 + \lambda v^1 + O\left(\lambda^2\right),\ w' = w^0 + \lambda w^1 + O\left(\lambda^2\right).$$

Эти представления надо подставить в разрешающие уравнения для оболочки, и пренебречь слагаемыми второго порядка по λ.

2) Разложение каждого из приближений в ряды Фурье по угловой координате θ, пользуясь тем, что решения разрешающих уравнений для трубы должны быть периодическими. Результирующие представления неизвестных функций имеют вид:

$$u' = u^0_0 + u^0_1\sin\theta + u^0_2\cos\theta + \lambda u^1_0 + \lambda u^1_1\sin\theta + \lambda u^1_2\cos\theta + O\left(\lambda^2\right),$$

$$v' = v^0_0 + v^0_1\sin\theta + v^0_2\cos\theta + \lambda v^1_0 + \lambda v^1_1\sin\theta + \lambda v^1_2\cos\theta + O\left(\lambda^2\right), \qquad (8)$$

$$w' = w^0_0 + w^0_1\sin\theta + w^0_2\cos\theta + \lambda w^1_0 + \lambda w^1_1\sin\theta + \lambda w^1_2\cos\theta + O\left(\lambda^2\right).$$

Аналогичные разложения имеют место для правых частей X, Y, Z. Рассматриваемый класс задач, это те состояния трубопровода, при которых:

$$u^0_1 = u^0_2 = 0,\ u^1_0 = 0;\ v^0_1 = v^0_2 = 0,\ v^1_0 = 0;\ w^0_1 = w^0_2 = 0,\ w^1_0 = 0. \qquad (9)$$

Нами доказано, что необходимым условием выполнения (9) являются равенства:

$$X^0_1 = X^0_2 = 0,\ X^1_0 = 0;\ Y^0_1 = Y^0_2 = 0,\ Y^1_0 = 0;\ Z^0_1 = Z^0_2 = 0,\ Z^1_0 = 0.$$

Достаточным условием выполнения равенств (9) является наложение однородных краевых условий на дифференциальные уравнения, которым подчиняются функции, фигурирующие в (9). Доказательство необходимых и достаточных условий слишком велико для размещения здесь. Физически установленные ограничения означают, что осевая линия трубы не выходит из своей первоначальной плоскости, а в нулевом приближении труба ведет себя как прямолинейная и цилиндрическая.

Заключение. На основе теории моментных оболочек построена математическая модель напряженно-деформированного состояния трубопровода с криволинейным профилем (3). Предложен метод редукции (8), который позволил привести систему уравнений в частных производных математической модели к одномерному виду. Найдены ограничения на класс задач (9), при которых редуцированные уравнения имеют удобный для дальнейшего решения вид (5)-(7), а решения полной задачи выражаются через приближенные формулами (4). Установлены необходимые и достаточные условия принадлежности задачи к заданному классу.

Литература

1. Critical Urban Infrastructure Handbook / Editor-in-Chief M. Hamada. London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
2. Towhata I. Geotechnical Earthquake Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
3. Tkachenko O.P. Construction of the mathematical model of complex pipeline with variable geometry // Procedia Engineering 165 (2016). P. 1261-1274. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.84.
4. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике // Власов В.З. Избранные труды. Т.1. М.: Издательство АН СССР, 1962. С.15-439.
5. Ткаченко О.П. Математическое моделирование трубопровода как моментной изогнутой оболочки // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы IV всероссийской научно-практической конференции. Хабаровск, 11-14 сентября 2017 г. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2017. С. 198-202.
6. Rukavishnikov V. A. and Tkachenko O. P. Numerical modeling of the fluid-filled pipelines in viscous medium // AIP Conference Proceedings, 1738, 030036 (2016). DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4951792.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ МОРСКОЙ АКВАТОРИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВОЛНОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНВЕРТОРОВ

В.Н.Аносов, В.В.Горбацкий, Д.И.Дудко, В.Э.Егурнов[1], Н.Н.Шпилёв
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия
[1]ООО «НПО Гидроэнергоспецстрой», Санкт-Петербург, Россия

REMOTE MONITORING OF WIND WAVES IN THE COASTAL SEA WATER AREA IN RELATION TO DESIGN OF WAVE POWER CONVERTERS

V.N.Anosov, V.V.Gorbatskiy, D.I.Dudko, V.E.Egurnov[1], N.N.Shpilyov
Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia
[1]Gydroenergospetsstroy, Ltd., St. Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы определения характеристик ветровых волн в прибрежной морской акватории, в которой планируется размещать объекты волновой энергетики или другие гидротехнические сооружения, для выбора оптимальных конструктивных решений проектируемых объектов. Представлен метод мониторинга ветровых волн доплеровским радиолокатором, позволяющий определять в долговременном непрерывном режиме волновые характеристики: высота, длина, период, спектральный состав волновых движений на различных расстояниях от берега и оценивать трансформацию волн над неровностями дна в прибрежной акватории. В докладе представлены примеры сопоставления данных радиолокационных измерений волн с результатами численного и лабораторного моделирования в прибрежной акватории Чёрного моря.

Problems of determination of characteristics of wind waves in the coastal sea water area in which it is planned to place objects of wave power engineering or other hydraulic structures are considered with the view of choosing optimal constructive solutions of designed projects. Method of wind waves monitoring with Doppler radar is provided which enables determination of such wave characteristics in a long-term continuous operation as: height, length, period, spectral structure of wave movements at different distances from the coast. It also makes possible to estimate wave transformation over roughness of sea bottom in the coastal water area. In the report examples of comparison of these radar measurements of waves with results of numerical and laboratory modeling in the coastal water area of the Black Sea are provided.

При разработке волновых энергетических конверторов – конструкций, преобразующих энергию морского волнения в электроэнергию, вопросы определения характеристик морского волнения являются чрезвычайно актуальными. Информация о характеристиках волнения необходима для расчета энергетического потенциала морской акватории, для оценки волновых нагрузок, действующих на опорные конструкции, для управления различными системами комплекса, оптимизирующими его работу.

В настоящее время существуют методы расчёта параметров морского волнения с учётом ветрового воздействия и геоморфологических особенностей прибрежной морской акватории. В то же время численные гидродинамические модели прибрежных морских акваторий требуют выполнения верификации для практического использования в силу существенной сезонной и кратковременной изменчивости гидрометеорологических параметров.

Параметры морского волнения в натурных условиях могут быть определены с помощью различных технических средств – волномерных буев, акустических измерителей волновых возвышений, аэрофотосъемки и т.п.

В данной работе рассмотрены некоторые особенности дистанционного определения параметров морского волнения с помощью коротковолнового радиолокатора. При проектировании волновых энергетических конверторов (ВЭК), особенно конструкций двойного назначения, т.е. с дополнительными функциями защиты побережья от разрушения [1], этот способ имеет определенные преимущества перед другими способами определения характеристик волнения.

Особенности измерения параметров волнения при разработке волноэнергетических комплексов двойного назначения. Волноэнергетические комплексы двойного назначения выполняют функции защиты морского побережья от воздействия волн и преобразования энергии волнения в электроэнергию. Такие сооружения в настоящее время разрабатывает компания «НПО Гидроэнергоспецстрой». Комплексы должны устанавливаться в прибрежной зоне морских акваторий, где параметры волнения в значительной степени определяются ограниченными глубинами воды и сложной конфигурацией береговой линии. При этом для комплексной оценки эффективности работы всего сооружения, как в части преобразования энергии волнения в электроэнергию, так и в части защиты берега, необходимо вести постоянный контроль за состоянием моря перед комплексом и за ним (между комплексом и берегом). Кроме того, для своевременного перевода систем комплекса в штормовой режим работы, необходимо постоянно контролировать параметры волнения в открытом море.

Указанные обстоятельства приводят к необходимости вести постоянное измерение параметров волнения в достаточно большом количестве точек, удалённых от берега на различное расстояние. Использовать для этих целей традиционное волноизмерительное оборудование – волномерные буи и акустические измерители волновых возвышений весьма затруднительно.

Радиолокационные методы определения характеристик волнения позволяют эффективно осуществлять постоянный мониторинг морской поверхности на акватории большой площади [2]-[3]. При этом могут быть определены все параметры волнения, необходимые для обеспечения нормальной работы ВЭК, т. е. высоты волн и средние периоды волнения. Эта информация позволяет определить поток волновой энергии, поступающий к волновому конвертору со стороны моря, а также оценить энергию волнения после прохождения защитного комплекса.

В частности, для оценки энергетического потенциала волнового воздействия на элементы ВЭК используется величина удельной мощности нерегулярного волнения, выражающаяся через частотный спектр *S(f)* и групповую скорость волн $C_g(f)$ [4]

$$P = \rho g \int_0^\infty C_g(f) \cdot S(f) \cdot df \approx \frac{\rho g^2}{64 \cdot \pi} \cdot h_s^2 \cdot T_e \quad \text{Вт/м}$$

где h_s – значительная высота волн, м; $T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$ – период энергии волнения, с, который выражается через моменты спектра; $m_{-1} = \int_0^\infty \frac{S(f)}{f} \cdot df$ и $m_0 = \int_0^\infty S(f) \cdot df$; ρ – плотность воды, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Если глубина воды ограничена (меньше половины длины волны), то эта формула будет содержать поправки, учитывающие влияние глубины на групповую скорость и дисперсионное соотношение. Для спектра JONSWAP с параметром пиковатости γ =3,3, можно принять, что $T_e \approx 0{,}9\ T_p$, где T_p период пика спектра [4].

Постоянный мониторинг состояния моря перед ВЭК позволяет использовать эти данные для управления системами комплекса с целью обеспечения оптимального режима работы и наибольшей эффективности процесса преобразования энергии волнения в электроэнергию.

Доплеровский коротковолновый радиолокатор. Эффективным средством дистанционного мониторинга параметров волн и течений в прибрежной морской акватории в настоящее время являются доплеровские коротковолновые радиолокаторы [3]. Одним из наиболее распространённых измерителей такого типа является доплеровский радиолокатор Sea Sonde производства компании CODAR Ocean Sensor (США).

Основные элементы системы Sea Sonde показаны на рисунке 1. Система состоит из блоков приема и передачи, антенны, компьютера необходимого для управления измерениями, для сбора и обработки полученной информации.

Данная система является мобильной и может быть оперативно установлена в любой точке морского берега.

Спектр рассеиваемого ветровыми волнами радиолокационного сигнала содержит информацию о параметрах волн: высоте и периоде волн [2].

Эти данные могут быть получены на различных удалениях, в ячейках вдоль дистанции от антенны радиолокатора с пространственным шагом в 0.5–1.0 км, либо осредненные по выделенному диапазону расстояний [3]. На рис. 2 представлен пример измеренных в период штормовых условий радиолокатором Sea Sonde с рабочей частотой 25 МГц временных рядов данных о высоте и периоде волн в прибрежной акватории Чёрного моря.

С увеличением скорости ветра увеличивается высота и период волн, достигающие максимальных значений соответственно 5 м и 7 с, и спадающие с задержкой по времени относительно момента умьшения скорости ветра. На рисунке 3 показаны данные радиолокационных измерений параметров волн на различных расстояниях от берега. В этом случае возникает возможность оценить влияние рельефа дна на трансформацию волн, набегающих на берег, что может быть важным при оценке энергопотенциала акватории и для верификации численных расчётов при проектировании волновых электростанций.

а) *б)*

Рис. 1. Радиолокатор Sea Sonde, а) блоки приема передачи; б) комбинированная антенна.

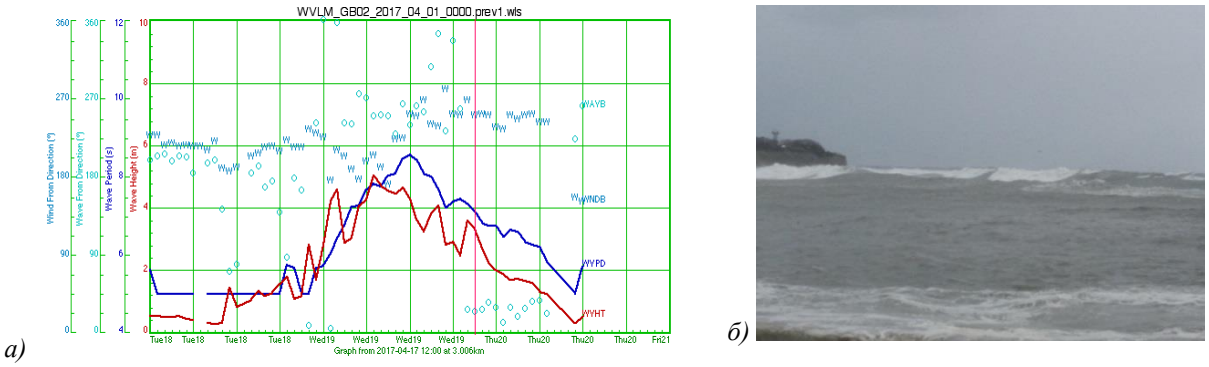


Рис. 2. Изменение параметров волн в период развития штормовых условий; а) данные измерений; б) вид морской поверхности в период проведения измерений.

Таким образом, радиолокационные измерения параметров ветровых волн позволяют оперативно получать необходимые исходные параметры: высоту и период волн для оценки энергоэффективности волнового поля в данной акватории в конкретных ветровых условиях

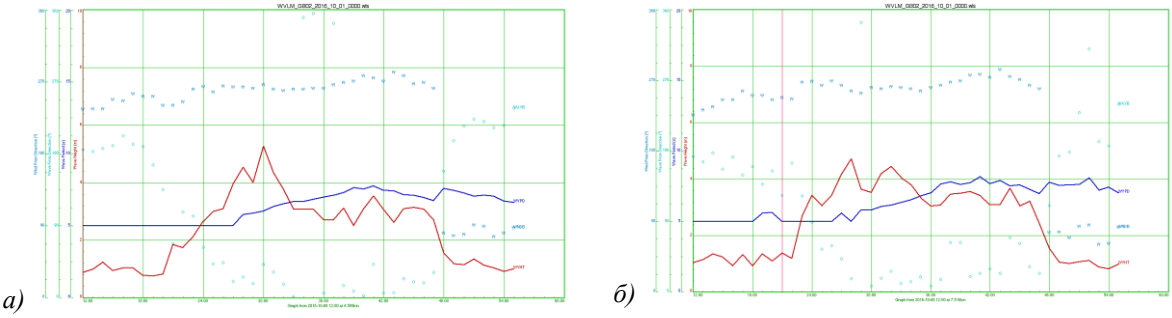


Рис. 3. Изменчивость параметров волн на различных расстояниях от берега: а) на расстоянии 4.5 км от берега; б) на расстоянии 7.5 км от берега

Заключение. Результаты определения параметров ветрового волнения в протяжённой прибрежной морской акватории с помощью коротковолновых доплеровских радиолокаторов могут использоваться при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений любого назначения. Их преимущества перед волноизмерительными средствами других типов состоят в том, что радиолокационный способ позволяет вести постоянный мониторинг волновой поверхности на акваториях большой площади и определять параметры волнения одновременно в участках акватории с различными глубинами на различном расстоянии от берега практически в режиме реального времени.

Литература

1. Аносов В.Н., Егурнов В.Э. Развитие технологии защиты морского побережья и преобразования энергии волнения в электроэнергию. NAOE-2016, Международная конференция по судостроению и океанотехнике. 6-8 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия
2. Lipa B.J., Barrick D.E. Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling Radio Science, Volume 21, Number 1,Page 81-100,January-February 1986
3. Горбацкий В.В., Дудко Д.И., Зацепин А.Г., Куклев С.Б., Сабинин К.Д., Шпилёв Н.Н. Методические вопросы дистанционного определения динамических характеристик морской поверхности с помощью одноточечного коротковолнового доплеровского радиолокатора XV Всероссийская научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований», Материалы конференции том II, 2017 г. (МСОИ-2017), стр. 41-44.
4. Andrew M. Cornett. A Global Wave Energy Resource Assessment. International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, BC, Canada, July 6-11, 2008, p.p. 318-326.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ О КОЛЕБАНИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В МОДЕЛЬНОЙ АКВАТОРИИ

Н.А.Мацкевич[1], Л.Б.Чубаров[1,2], д-р физ.-мат.наук
[1]Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия
[2]Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

EXACT SOLUTIONS OF SHALLOW WATER WAVE EQUATIONS FOR THE PROBLEM OF OSCILLATIONS OF THE FREE SURFACE IN MODEL BASIN

N.A.Matckevich[1], L.B.Chubarov[1,2], Dr.Sc.
[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
[2]Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

В докладе обсуждаются подходы к построению точных решений специального вида, моделирующих в рамках уравнений мелкой воды первого приближения колебания свободной поверхности в акватории, ограниченной параболоидом вращения (вплоть до вырожденного случая). Для поиска точных решений делается ряд предположений относительно формы их представления (анзац), учета вращения Земли и донного трения. Окончательные результаты получаются путем решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом свободные поверхности являются поверхностями I или II порядка.

This report presents the ways to find some exact solutions of shallow water wave equations of the first order approach, which model the oscillations of the free surface in parabolic basin (including the case in which the basin reduces to plane). To get the solutions, several assumptions (ansatz) are made about the form of its representation, Coriolis force consideration and roughness of the underlying surface. Then final results are obtained by solving systems of ordinary differential equations. In considered cases, the free surfaces have 1st or 2nd order.

Одним из известных примеров методологии поиска точных решений уравнений мелкой воды является подход Ф.К.Болла [1]. В его статье профиль дна изначально полагался неизвестным, а для его нахождения использовалось предположение о характере движения особого вида (т.е. по заданной форме решения определялись неизвестные параметры процесса). Оказалось, что, если поле скоростей не зависит от пространственных координат, то профиль дна необходимо является параболическим. Позднее этот результат был обобщен В.К.Тэккером [2], рассмотревшим поле скоростей в виде линейной функции от пространственных координат с коэффициентами, зависящими от времени. Также в этой работе было замечено, что представление поля скоростей в виде подобного многочлена степени выше первой приведет к переопределению итоговой системы уравнений.

Оригинальность настоящей работы состоит в одновременном учете влияния на динамику свободной поверхности сил Кориолиса и сил донного трения. При этом впервые рассмотрены все возможные соотношения $u_x \equiv \pm v_y$, $u_y \equiv \pm v_x$, а для задачи в постановке В.К.Тэккера ($u_x \equiv v_y$, $u_y \equiv -v_x$, $\tau = 0$) предложена новая методика получения решений.

Результаты исследования могут быть применены для верификации численных алгоритмов моделирования наката длинных волн на побережье.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о движении жидкости в модельной акватории. Предположим, что соотношения характерных размеров процесса позволяют использовать для его описания уравнения теории мелкой воды.

Введем декартову систему координат $Oxyz$ таким образом, чтобы плоскость $z = 0$ совпадала с уровнем невозмущенной свободной поверхности жидкости, а ось Oz была направлена в сторону, противоположную направлению силы тяжести. Пусть x, y, z – пространственные координаты; t – время; g – ускорение свободного падения; f – параметр, характеризующий действие силы Кориолиса; τ – параметр, характеризующий донное трение [3]; $z = -h(x,y)$ – уравнение, определяющее профиль дна; $z = \eta(x,y,t)$ – уравнение свободной поверхности; $H(x,y,t) = h(x,y) + \eta(x,y,t)$ – полная глубина; u, v – осредненные по вертикали горизонтальные компоненты вектора скорости $u(x,y,t) = \frac{1}{H}\int_{-h(x,y)}^{\eta(x,y,t)} V^x(x,y,z,t)\,dz$, аналогично для $v(x,y,t)$. На следующем шаге перейдем к безразмерным переменным: $\bar{x} = x/a$, $\bar{y} = y/a$, $\bar{t} = t\sqrt{gh_0}/a$, $\bar{u} = u/\sqrt{gh_0}$, $\bar{v} = v/\sqrt{gh_0}$, $\bar{\eta} = \eta/h_0$, $\bar{h} = h/h_0$, $\bar{H} = H/h_0$, $\bar{f} = fa/\sqrt{gh_0}$, $\bar{\tau} = \tau a/\sqrt{gh_0}$, где $a \neq 0$, $h_0 \neq 0$ – характерные для рассматриваемой задачи горизонтальный и вертикальный размеры соответственно. Запишем уравнения мелкой воды в

недивергентном виде в безразмерных переменных и в дальнейших выкладках, когда это не оговорено специально, будем опускать над ними верхнюю черту:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\Big[(\eta+h)u\Big]+\frac{\partial}{\partial y}\Big[(\eta+h)v\Big]=0,\\
&\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial \eta}{\partial x}=fv-\tau u,\\
&\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial \eta}{\partial y}=-fu-\tau v.
\end{aligned} \tag{1}$$

Аналитические решения. Следуя работе Тэккера [2], будем искать решение, в котором поле скоростей линейно по пространственным координатам (здесь и далее нижний буквенный индекс будет обозначать частную производную по соответствующему направлению, а буквами C, K будут обозначаться произвольные вещественные константы):

$$\begin{aligned}
&u=u_0(t)+u_x(t)x+u_y(t)y,\\
&v=v_0(t)+v_x(t)x+v_y(t)y.
\end{aligned} \tag{2}$$

Непосредственной подстановкой выражений (2) в уравнения мелкой воды (1) можно убедиться, что эти выражения однозначно определяют формы дна бассейна и свободной поверхности, которые необходимо должны быть поверхностями второго порядка [2]. Далее будем рассматривать случай, когда дно является параболоидом вращения, задаваемым в размерных переменных уравнением $h(x,y)=D_0\left[1-\dfrac{x^2+y^2}{r^2}\right]$, где $r\neq 0$ – радиус параболоида на уровне невозмущенной свободной поверхности $z=0$. Если максимальная глубина относительно нулевого уровня $D_0\neq 0$, то удобно положить $a=r,\ h_0=D_0$. Тогда функция, задающая распределение глубин, примет вид $h(x,y)=\sigma\left[1-x^2-y^2\right]$, где $\sigma=\begin{cases}1, & D_0\neq 0,\\ 0, & D_0=0.\end{cases}$. При $\sigma=1$ рассматривается движение в параболоиде вращения, а при $\sigma=0$ – на плоскости $z=0$. При этом динамически изменяющаяся во времени свободная поверхность будет задаваться следующим соотношением [2]:

$$\eta=\eta_0(t)+\eta_x(t)x+\eta_y(t)y+\eta_{xx}(t)\frac{x^2}{2}+\eta_{xy}(t)xy+\eta_{yy}(t)\frac{y^2}{2}.$$

Таким образом, задача сводится к нахождению 12 неизвестных функций, зависящих только от времени ($u_0,u_x,u_y,v_0,v_x,v_y,\eta_0,\eta_x,\eta_y,\eta_{xx},\eta_{xy},\eta_{yy}$).

Свободная поверхность I порядка. Возможно получить решение, в котором свободная поверхность сохраняет плоскую форму во все моменты времени. Для этого, следуя подходу, предложенному Ф.К.Боллом [1], было принято предположение о независимости поля скоростей от пространственных координат, т.е. $u_x\equiv u_y\equiv v_x\equiv v_y\equiv 0$.

Обозначим $X(t),\ Y(t)$ – координаты проекции центра свободной поверхности на плоскость $z=0$. По предположению $u_0=\dot{X},\ \ v_0=\dot{Y}$. Нетрудно убедиться, что тогда $\eta=\sigma\left(2Xx+2Yy-X^2-Y^2\right)$ и течение на плоскости ($\sigma=0$) вырождается. Решение рассматриваемой задачи представляет закон изменения во времени функций $X,\ Y$:

$$X(t)=e^{-\left(\frac{\tau}{2}-\alpha\right)t}\left[K_1\cos\left(\frac{f}{2}-\beta\right)t+K_2\sin\left(\frac{f}{2}-\beta\right)t\right]+e^{-\left(\frac{\tau}{2}+\alpha\right)t}\left[K_3\cos\left(\frac{f}{2}+\beta\right)t+K_4\sin\left(\frac{f}{2}+\beta\right)t\right],$$

$$Y(t)=e^{-\left(\frac{\tau}{2}-\alpha\right)t}\left[-K_1\cos\left(\frac{f}{2}-\beta\right)t+K_2\cos\left(\frac{f}{2}-\beta\right)t\right]+e^{-\left(\frac{\tau}{2}+\alpha\right)t}\left[-K_3\sin\left(\frac{f}{2}+\beta\right)t+K_4\cos\left(\frac{f}{2}+\beta\right)t\right].$$

$$\lambda_1=2\sigma-\frac{\tau^2}{4}+\frac{f^2}{4},\ \ \lambda_2=\frac{f\tau}{2},\ \ \alpha=\lambda_2\left[2\left(\lambda_1+\sqrt{(\lambda_1)^2+(\lambda_2)^2}\right)\right]^{-1/2},\ \ \beta=\frac{1}{2}\left[2\left(\lambda_1+\sqrt{(\lambda_1)^2+(\lambda_2)^2}\right)\right]^{1/2}.$$

Свободная поверхность II порядка. Решение, соответствующее колебаниям жидкости с параболической формой свободной поверхности будем искать, как и в [2], предполагая тождественное равенство нулю величин $u_0,\ v_0$. При этом $\eta_x\equiv\eta_y\equiv\dot{\eta}_x\equiv\dot{\eta}_y\equiv 0$. Решение будем искать для частных

случаев $u_x \equiv \pm v_y$, $u_y \equiv \pm v_x$, имея в виду возможность определенных физических интерпретаций этих соотношений. Для упрощения записи введем обозначения $s = u_x$, $p = u_y$, $q = s^2 + p^2$.

В случае $u_y \equiv v_x$. неминуемо $u_x \equiv -v_y$, а нетривиальное решение возможно получить лишь при $\tau = 0$, так как при $\tau \neq 0$ условия $q = Ce^{-\tau t}$ и $\tau Ce^{-\tau t} = \pm\lambda_2\sqrt{2\left(Ce^{-\tau t} + \sigma\right) + \lambda_1}$ влекут за собой $q \equiv 0$, а следовательно, $s \equiv p \equiv 0$. Если же $\tau = 0$, то

$$s = K_i \cos\alpha_i t \pm \sqrt{C - K_i^2}\sin\alpha_i t,$$
$$p = -K_i \sin\alpha_i t \pm \sqrt{C - K_i^2}\cos\alpha_i t,$$

где $\alpha_i = \frac{f}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f}{2}\right)^2 + C + 2\sigma}$, $i = 1,2$. Остальные неизвестные выражаются явно через s, p. Свободная поверхность может являться гиперболическим или эллиптическим параболоидом, а также параболическим цилиндром.

В случае $u_y \equiv -v_x$, $u_x \equiv -v_y$ при $f \neq 0$, $\tau \neq 0$ следует s, $p = 0$, т.е. движение по шероховатому дну с учетом сил Кориолиса в таких условиях нереализуемо. При $f = 0$, $\tau \neq 0$ получаем $\sigma = 0$, $p = C_p e^{-\tau t}$, $s = \pm C_p e^{-\tau t}$, т.е. при тех же остальных условиях движение может возникнуть, но только на горизонтальной плоскости, и только если эффект действия силы Кориолиса пренебрежимо мал. Если же $\tau = 0$, что эквивалентно отказу от учета донного трения, то $p = C_p$, $s = \begin{cases} 0 \text{ или } \pm\sqrt{C_p^2 - 2\sigma}, & |C_p| \geq \sqrt{2\sigma}, \\ 0, & |C_p| < \sqrt{2\sigma}. \end{cases}$, и в этом случае возможно только стационарное течение. Свободная поверхность, как и в предыдущем случае, может быть одного из трех типов.

В случае $u_y \equiv -v_x$, $u_x \equiv v_y$ свободная поверхность необходимо является эллиптическим параболоидом. При $\tau = 0$ этот случай был уже описан без выкладок в работе [2]. Приведем один из возможных вариантов решения. Система уравнений движения выглядит так:

$$\begin{cases} \ddot{s} + 6\dot{s}s + 4s^3 + \omega^2 s = 0, \\ \dot{p} + 2s\left(p - \frac{f}{2}\right) = 0, \\ \dot{\eta}_0 + 2s\left(\eta_0 + \sigma\right) = 0, \end{cases} \tag{3}$$

$\omega^2 = f^2 + 8\sigma$. Решение первого уравнения системы (3) является основной задачей, поскольку остальные уравнения системы, при условии, что s известно, решаются методом разделения переменных, а все не вошедшие в систему неизвестные выражаются явно через s, p. Определим дифференциальный оператор $L\left(w_1, w_2\right)$, линейный по каждой переменной $w_1(t) \in C^1$, $w_2(t) \in C^2$: $L\left(w_1, w_2\right) = \dot{w}_2 + 2w_1 w_2$. В терминах этого оператора уравнение (3) примет вид $L\left(s, L\left(s, s\right)\right) = -\omega^2 s$. Допустим, что существуют такие комплекснозначные функции s_1, s_2, что $L\left(s_1, s_1\right) = i\omega s_1$, $L\left(s_2, s_2\right) = -i\omega s_2$. Тогда легко убедиться, что $L\left(s_1 + s_2, L\left(s_1 + s_2, s_1 + s_2\right)\right) = -\omega^2\left(s_1 + s_2\right)$ и сумма $s = s_1 + s_2$ является решением первого уравнения из системы (3). Общие решения уравнений на s_i выглядят следующим образом: $s_1 = \frac{i\omega}{2 - C_1 e^{-i(\omega t + C)}}$, $s_2 = \frac{-i\omega}{2 - C_2 e^{i(\omega t + C)}}$. Вещественнозначными решения $s = s_1 + s_2$ будут при условиях $C_1 = C_2$, и либо $C_1 \in \mathbb{R}$ (тогда $|K| \leq 1$), либо $\left[\mathrm{Re}C_1\right]^2 + \left[\mathrm{Im}C_1\right]^2 = 4$ (тогда $|K| \geq 1$): $s = s_1 + s_2 = \frac{\omega}{2}\frac{K\sin\left(\omega t + C\right)}{1 - K\cos\left(\omega t + C\right)}$, где $K = \frac{4C_1}{4 + C_1^2}$.

При произвольном значении τ, к сожалению, аналитически решить систему уравнений или доказать ее неразрешимость в элементарных функциях пока не удалось. Для численного решения этой системы здесь был использован метод Рунге-Кутта 4 порядка (Рис. 1)

$t = 0$ $t = 0.042$ $t = 0.085$

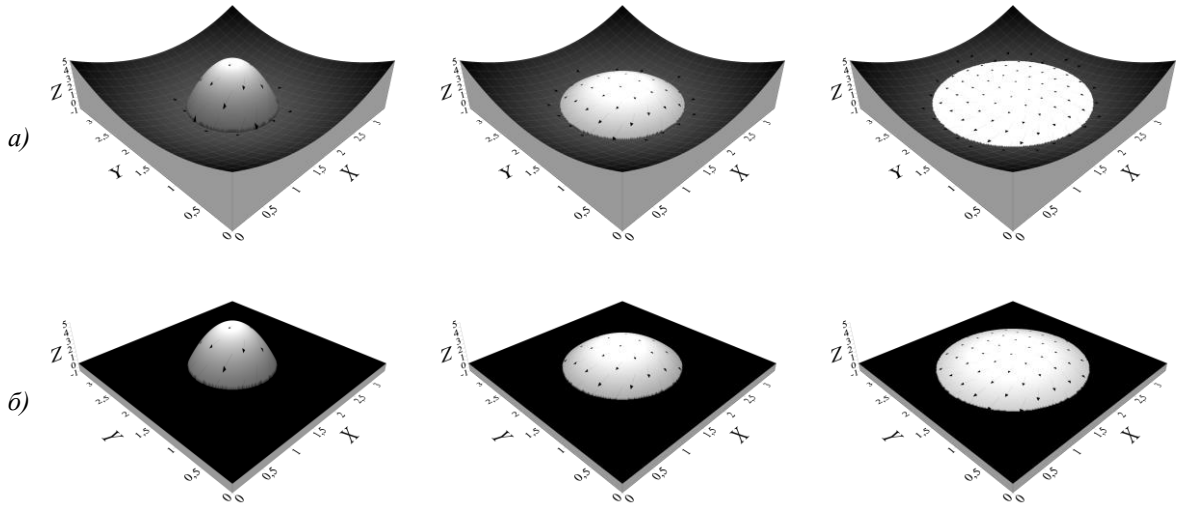


Рис. 1. Формы свободной поверхности в задачах о колебании жидкости а) в параболическом бассейне; б) на плоскости. Стрелками обозначено поле скоростей. Переменные обезразмерены:
$a = 14000$ m, $h_0 = 10$ m; $f = 2.12$; $\tau = 0.707$; $u_x(0) = 7.067$; $\dot{u}_x(0) = 0$; $u_y(0) = 7.067$; $\eta_0(0) = 5$.

Отметим также, что всюду в этом разделе при $\sigma = 1$ требуется учитывать дополнительное условие равенства объема жидкости величине $\pi/2$.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 27 «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач на основе высокопроизводительных вычислений» и Российского научного фонда (проект № 14-17-00219, в части постановки задачи).

Литература

1. Ball F.K. An Exact Theory of Simple Finite Shallow Water Oscillations of a Rotating Earth // Hydraulics and Fluid Mech. Nedlands: Pergamon, 1964. P. 293-305.
2. Thacker W.C. Some exact solutions to the nonlinear shallow-water wave equations // Journal of Fluid Mechanics. 1981. №107. P. 499-508.
3. Sampson J. A numerical solution for moving boundary shallow water flow above parabolic bottom topography // Australian and New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal. 2009. №50. P. C898-C911.

Научные сообщения

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ

А.С.Голосной, В.Л.Мартынов[1], д-р техн.наук, А.А.Фатеев[2], канд.техн.наук
Горный университет, Санкт-Петербург, Россия
[1]АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия
[2]Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург, Россия

METHOD OF CALCULATION OF UNDERWATER VISION LASER SYSTEMS

A.S.Golosnoi, V.L. Martynov[1], Dr.Sc., A.A.Fateev[2], Ph.D.
Mining University, St. Petersburg, Russia
[1]JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia
[2]Naval Polytechnic Institute of Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russia

В статье предлагается методика, обеспечивающая вероятностный расчёт дальностей лазерных систем автономных необитаемых подводных аппаратов с учётом прозрачности водной среды.

The article proposes a technique that provides probabilistic calculation of the laser system range of autonomous unmanned underwater vehicles, taking into account the transparency of the aquatic environment.

Определяющим фактором успешного решения прикладных и исследовательских задач в различных отраслях экономики, а также повышения защиты и безопасности государства является развитие робототехники. Уже сейчас морским робототехническим комплексам (МРТК), которые иногда называют автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА), по плечу получение информации на морских глубинах в тех районах, которые традиционно оставались для человека труднодоступными. Особое место в данном перечне принадлежит решению задач группового и сетецентрического управления, где роль коммуникаций, обмена информацией между бортами АНПА на базе унифицированных платформ в составе группы являются приоритетными. Понятно, что задачи управления аппаратами должны осуществляться с опорой на их средства навигации, связи и систем управления, а также с использованием физических принципов, обеспечивающих работу АНПА в условиях сложной помеховой обстановки. Это способно расширить круг оптимальных вариантов функционирования группы подводной робототехники, а также принятия решений.

Выбор коммуникаций, реализованных в АНПА, крайне ограничен из-за специфики связи в водной среде. Традиционная гидроакустика имеет определённые ограничения, связанные со скоростью информационного обмена, поэтому в качестве альтернативы может выступать связь по лазерному каналу. Известно о первых попытках применения лазерной системы на подводных аппаратах в 1993 году американской фирмой «Westinghouse Electric Corporation» - одной из ведущих электротехнических компаний США, когда лазерный излучатель применялся в режиме «бегущий луч» [1]. В РФ инновации отечественных учёных по лазерной тематике для подводных исследований были внедрены одними из первых специалистами АО «СПМБМ «Малахит». Рассмотрим перспективы использования лазерной связи. Она осуществляется при помощи модулируемого лазерного излучения. По лазерному лучу можно передавать команды, которые реализуются через систему управления АНПА-корреспондента в определённые действия, связанные с изменением аппаратом курса, скорости, глубины и пр. Перспектива применения лазерных коммуникаций для передачи сигналов управления в водной среде различной прозрачности определяется таким тактическим параметром, как дальность. Для получения дальности воспользуемся методикой расчёта этого параметра для лазерной системы подводного видения (ЛСПВ) [2].

Увеличение полученного результата в два раза означает прохождение лазерного излучения до объекта наблюдения и возвращение назад к источнику излучения, что представляет собой прохождение светового потока до корреспондента в соответствии с рисунком 1.

Методика расчёта дальности включает в себя шесть этапов [2]. Рассмотрим их.

Этап № 1. Определяется модуляционная передаточная функция (МПФ) ЛСПВ $T_{ЛСПВ}(\nu_x, \nu_y)$, где $T_{ЛСПВ}(\nu_x, \nu_y)$ – модуляционная передаточная функция (или функция передачи модуляции) лазерного информативного канала; ν_x, ν_y – линейные пространственные частоты.

В соответствии с проведенными научными исследованиями, результирующая МПФ ЛСПВ записывается в виде [2]:

$$T_{ЛСПВ}(\nu_x,\nu_y) = T_{ЭОП}(\nu_x,\nu_y)\cdot T_{ро}(\nu_x,\nu_y)\cdot T_{опт.}(\nu_x,\nu_y)\cdot T_{фо.}(\nu_x,\nu_y)\cdot T_{эл.}(\nu_x,\nu_y)\cdot T_{мон.}(\nu_x,\nu_y)\cdot T_{гл.}(\nu_x,\nu_y) \quad (1)$$

где $T_{ЭОП}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ электронно-оптического преобразователя (ЭОП); $T_{ро}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ репродукционного объектива; $T_{опт}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ оптического канала; $T_{фд}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ фотодетектора; $T_{эл}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ электронного тракта; $T_{мон.}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ монитора; $T_{гл.}(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ глаза оператора, то есть зрительного анализатора.

Этап № 2. Определяются гидрооптические характеристики водной среды для расчёта её модуляционных передаточных функций (МПФ):

- $T_{м.р.}(\nu')$ – МПФ слоя рассеивающей морской среды;
- $T_{м.т.}(\nu')$ – МПФ слоя турбулентной морской среды.

Совокупное воздействие турбулентности и рассеяния морской среды на ослабление светового потока определяется результирующим графиком зависимости МПФ слоя морской воды от угловой пространственной частоты (рис. 1).

Здесь *n1(D)* – зависимость числа фотоэлектронов от дальности, накопленных на одном пикселе ПЗС - матрицы от импульса лазера, отраженного объектом; *n2(D)* - зависимость числа фотоэлектронов от дальности, накопленных на одном пикселе ПЗС - матрицы от ПОР, сформированной импульсом лазера; *n3(D)* - зависимость числа фотоэлектронов от дальности, накопленных на одном пикселе ПЗС - матрицы от импульса лазера, отраженного фоном.

Этап № 3. На данном этапе выполняется расчёт энергетических характеристик сигнальных и фоновых составляющих регистрируемого излучения.

Все три зависимости представлены на рис. 2.

Этап № 4. Выполняется расчёт наблюдаемого контраста объекта $\kappa_{об.н.}$ [2]:

$$\kappa_{об.н} = \frac{\kappa_{об.} \cdot T_м(\nu')}{1+\frac{W_{ПОР}}{W_0}} = \frac{\kappa_{об.} \cdot T_м(\nu')}{1+\frac{W_{ПОР}}{\frac{W_{об.}+W_{ф.}}{2}}} = \frac{\kappa_{об.} \cdot T_м(\nu')}{1+\frac{2 \cdot W_{ПОР}}{W_{об.}+W_{ф}}} \quad (2)$$

где $\kappa_{об.н}$ – наблюдаемый контраст объекта; $\kappa_{об.}$ – истинный контраст объекта; $T_м(\nu')$ – результирующая МПФ слоя морской воды; $W_{ПОР}$ – энергия помехи обратного рассеяния; W_0 – среднее значение энергии сигнала.

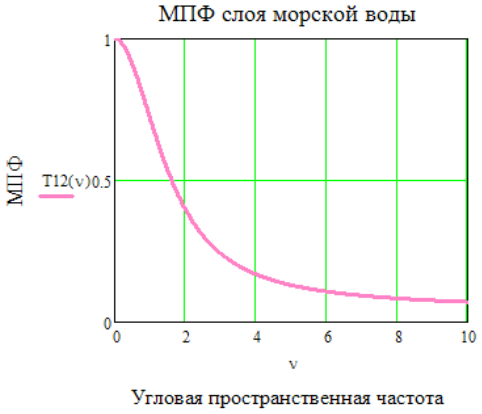


Рис. 1. Результирующая МПФ слоя морской среды.

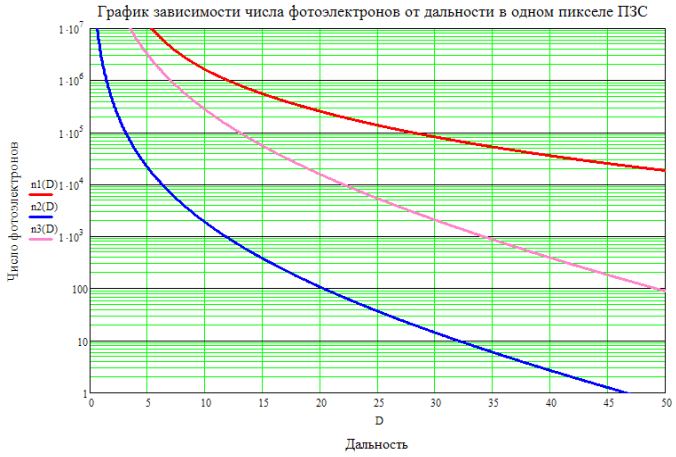


Рис. 2. Графики зависимости числа фотоэлектронов от дальности в одном пикселе ПЗС.

Этап № 5. Выполняется расчёт минимально разрешаемого контраста $\kappa_{min}(\nu')$ [2]:

$$\kappa_{\min}(\nu') = \frac{\pi^2}{16} \cdot \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{восп.пор.}}{T_{ЛСПВ}(\nu') \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot \left(n_{об.}+n_{ф.}+n_{ПОР}\right)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_{гл.} \cdot f_k}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_x \cdot \alpha_y \cdot \nu'}{q_м}} \quad (3)$$

где α_x, α_y – угловой шаг пикселов по горизонтали (вдоль строк) и вертикали; $f'_{об.}$ – фокусное расстояние оптической приемной системы; $q_м$ – отношение размеров полосы трехшпальной эквивалентной миры. Обычно для оценки качества приборов это отношение принимают равным 5:1 для изображающих систем видимого и ближнего ИК-диапазонов; $\left(\frac{S}{N}\right)_{восп.пор.}$ - пороговое значение воспринимаемого отношения «сигнал/шум» зависит от пространственных частот наблюдаемого объекта. Тем не менее, по рекомендации методологии FLIR-92 это значение принимают одинаковым для всех условий обнаружения и равным 2,5; $t_{гл.}$ – время инерции глаза; $f_к$ – частота кадров; $q_м$ – коэффициент неоднородности чувствительной матрицы. Обычно для оценки качества изображающих приборов это отношение принимают равным 5:1 для изображающих систем видимого и ближнего ИК – диапазонов.

Графическая зависимость минимально наблюдаемого контраста объекта κ_{min}, обозначенного на графике как *K6(D)*, лазерной системой от дальности для $z_б$ = 40 метров представлена ниже (рис. 3).

Этап № 6. С учётом получения зависимостей от дальности наблюдаемого контраста объекта $\kappa_{об.н.}$ и минимально разрешаемого контраста $\kappa_{min}\,(v')$ выполняется определение предельной дальности видения ЛСПВ в морской среде определённой прозрачности $z_б$. Графики изменения дальности действия ЛСПВ целесообразно построить для трёх значений $z_б$:

- $z_б$ = 15 м – прозрачность Баренцева моря зимой;
- $z_б$ = 25 м – прозрачность Баренцева моря летом;
- $z_б$ = 40 м – прозрачность воды в Атлантике [3].

Для - $z_б$ = 40 м результат построения представлен на рис. 4.

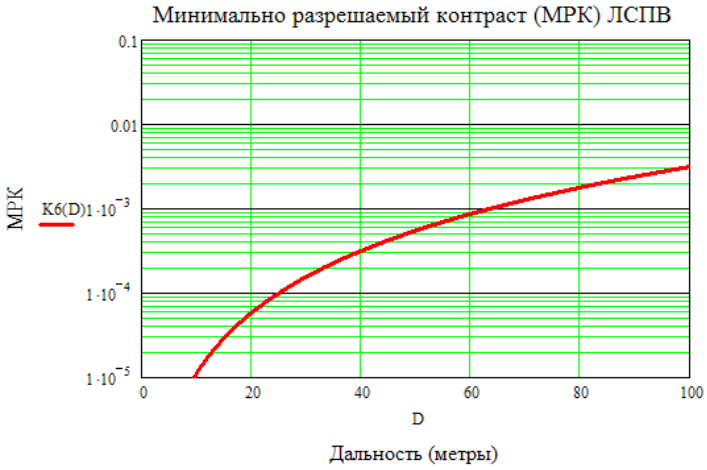


Рис. 3. График зависимости минимально разрешаемого контраста объекта от дальности. Прозрачность воды $z_б$ = 40 метров

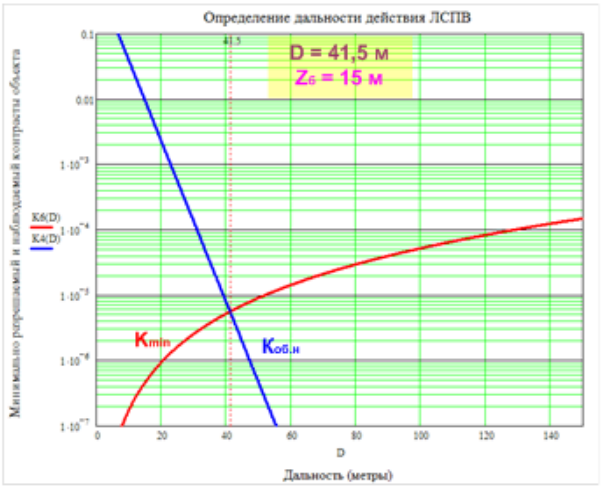


Рис. 4. Дальность видимости ЛСПВ в морской воде с прозрачностью $z_б$ = 40 м.

Вывод. С учётом того, что дальность видимости ЛСПВ представляет собой распространение светового потока от лазерного излучателя до объекта наблюдения и обратно, можно утверждать, что дальность передачи информации по лазерному лучу между АНПА - корреспондентами примерно в два раза превышает полученные результаты.

Литература

1. Грудзинский М.А., Колобков В.С. Морское телевидение. Изд. «Наука», РАН, Санкт-Петербургский научный центр, Санкт-Петербург, 2003.
2. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2001.
3. Мартынов В.Л. О необходимости перехода к новым технологиям при создании силовых модулей для подводных робототехнических комплексов военного назначения. Труды Научно-практической конференции «Морское подводное оружие. Перспективы развития». Санкт-Петербург, 2017.

СПОСОБ МОНИТОРИНГА АНОМАЛИЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ В УДАЛЕННОМ РАЙОНЕ МОРЯ

В.Л.Мартынов, д-р техн.наук, А.А.Фатеев[1], канд.техн.наук
АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия
[1]Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург, Россия

METHOD OF MONITORING OF MARINE ENVIRONMENT ANOMALIES IN REMOTE AREA OF SEA

V.L.Martynov, Dr.Sc., A.A.Fateev[1], Ph.D.
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia
[1]Naval Polytechnic Institute of Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russia

Предложен способ мониторинга аномалий гидрофизических характеристик морской среды, предназначенный для обеспечения безопасности эксплуатации удаленных стационарных морских систем добычи углеводородов, оперативного обнаружения утечки углеводородов в морскую среду, предотвращения загрязнения морей продуктами нефтегазодобычи. Способ использует новые возможности оптоэлектронных технологий, позволяющие производить оперативный контроль изменений температуры морской среды в глубоководных районах, удаленных от береговой черты на десятки километров.

The method of monitoring of anomalies of marine environment hydrophysical characteristics, intended for providing safety of exploitation of remote stationary marine systems of hydrocarbon production, operative detection of hydrocarbon leakage into marine environment, prevention of sea contamination with products of oil and gas production is proposed. The method uses new possibilities of optronic technologies, allowing to carry out operative control of changes of marine environment temperature in deep-water areas tens of kilometers far from a coastal line.

Увеличение добычи углеводородов на шельфе морей Северного ледовитого океана является одной из важных задач экономического развития России. Добыча углеводородов с использованием морских добывающих установок связана с повышенными экологическими рисками. Задача усложняется и тем, что буровые установки размещены на удалении десятков километров от береговой черты.

Утечка углеводородов в морскую среду приводит к появлению в месте аварии турбулентных явлений, для обнаружения которых используется изменение температуры и давления.

Целью настоящей статьи является изложение нового способа оперативного обнаружения аномалий морской среды в удаленных глубоководных районах моря.

Известен способ мониторинга электропроводимости приповерхностного слоя морской среды на глубинах до 100 метров с помощью буксируемой кабельной зондирующей системы [1]. Физической основой подобных решений является анализ амплитуды сигнала обратного рассеивания при прохождении зондирующего импульса по коаксиальному кабелю с встроенными в него датчиками электропроводимости [2, 3].

Ряд практических задач мониторинга морской среды требует получения информации на больших глубинах и значительных удалениях от береговой черты.

В [4] предлагается установить коаксиальную кабельную систему стационарно на донной поверхности. При этом делается предположение, что возможно использовать в качестве генератора и приемника зондирующих сигналов типового промышленного рефлектометра, предназначенного для обнаружения дефектов в кабелях электросвязи. В этом случае планируется увеличить длину кабельной коаксиальной линии до 40 километров. Однако увеличение длины кабельной коаксиальной линии требует установки соединительных герметичных муфт через каждые 250 метров, поскольку кабель производится бухтами указанной длины. На соединительных муфтах неизбежны потери мощности, которые, существенно сократят возможности рефлектометра по дальности обнаружения аномалий. Кроме того, встает вопрос о предельно возможном количестве датчиков в линии, так как каждый датчик является, по сути, «поглотителем» полезного зондирующего сигнала. Таким образом, подобный подход не позволяет решить задачу мониторинга электропроводимости морской среды на дистанциях 40 и более километров от береговой черты.

Решение задачи мониторинга морской среды в районах, удаленных от береговой черты на 100 и более километров авторы предлагают решить на основе использования достижений оптоволоконных технологий.

Способ основан на использовании следующих устройств:

– генераторной части – вырабатывает и посылает в кабель зондирующий импульс;

– приемной части, содержащей элементы выделения и хранения характеристик отраженных от датчиков сигналов;

– кабельной части, содержащей непосредственно оптоволоконный кабель с встроенными в него датчиками температуры в виде волоконных решеток Брегга.

Генераторная и приемная части могут быть выполнены в виде единого устройства промышленного изготовления, например, интеррогатора FBG-scan X16 производства Санкт-Петербургской компании «Нева-Тек» [5].

Кабельная часть может быть выполнена на основе стандартных оптоволоконных кабелей с использованием неразрушающих оболочку методов создания датчиков. Учитывая опыт обнаружения одиночных дефектов оптоволоконного кабеля связи, предельная дальность обнаружения дефектов промышленным рефлектометром [6] составляет около 200 километров. Это позволяет предположить, что датчик температуры может быть вынесен на дистанцию около 100-150 километров от береговой черты.

Основное требование к датчикам – способность регистрировать изменения температуры в тысячные доли градуса. Такие датчики возможно создать на основе оптоволоконных решеток Брегга. Для этого предварительно в оптическом кабеле технологически формируют области с различными значениями показателя преломления $n_{эфф}$. Эти области создаются путем облучения световода лазерным источником ультрафиолетового диапазона.

В результате интерференции когерентных лазерных излучений в световоде формируются новообразования, представляющие собой области с изменяющимся показателем преломления. Введенный в оптоволокно световой поток, встречая на своем пути неоднородности с отличными от текущих показателей преломления значениями, подвергается интерференционным изменениям, в результате чего образуется отраженная световая посылка с длиной волны, соответствующей периоду решетки Брегга.

Для реализации предложенного авторами способа в волокно предлагается вводить световой поток в диапазоне длин волн $\Delta\lambda$ от 380 до 770 нанометров. Датчик пропустит все световые волны через себя, за исключением одной – длиной волны Брегга $\lambda_в$, которая входит в резонанс со структурой конкретной решетки и полностью отражается от датчика.

Структурные аномалии внешней среды оказывают прямое влияние на взаимоположение элементов решетки Брегга, изменяя период решетки и соответственно, длину волны отраженного светового потока.

Зависимость длины волны Брэгга от деформации описывается уравнением:

$$\lambda_в = 2\, n_{эфф}\, d \qquad (1)$$

где $\lambda_в$ - длина волны Брэгга; $n_{эфф}$ - эффективный показатель преломления света в волокне после формирования дифракционной решетки; d - расстояние между интерференционными максимумами в оптоволокне решётки Брэгга, соответствующее её периоду.

Даже слабая модуляция показателя преломления является достаточной для достижения почти полного отражения длины волны Брэгга ($\lambda_в$), входящей составной частью в падающий световой поток [7,8]. С учетом того, что выброс углеводородов в водную среду при возникновении аварийной ситуации будет сопровождаться незначительными флуктуациями температуры, составляющими сотые или даже тысячные доли градуса, предлагается способ, позволяющий повысить точность определения отраженной длины волны Брэгга ($\lambda_в$). Способ заключается в сканировании оптического кабеля с решеткой Брегга лазерным излучением, длина волны которого будет дискретно изменяться на величину ($\lambda_в$) Брегга, равное 1 фм. Данный способ позволит обнаружить градиент температуры внешней среды, составляющий тысячные доли градуса относительно начальных условий.

Техническая реализация способа предполагает стационарное использование устройства (рис.1).

Генераторная часть размещена на берегу, кабель фиксируется на дне с помощью утяжелителей, волоконно-оптические датчики температуры встроены в кабель и установлены на необходимую глубину с помощью поплавков. Увеличение площади и объема контролируемого участка морской среды производится путем увеличения количества устройств или путем мультиплексирования измерительных линий, подобно используемому в интеррогаторе FBG-scan X16.

Таким образом, задача мониторинга морской среды в глубоководном удаленном районе может быть решена на основе применения оптоволоконных датчиков температуры морской среды на основе решеток Брегга. При этом способ может быть реализован в сжатые сроки и без существенных материальных затрат.

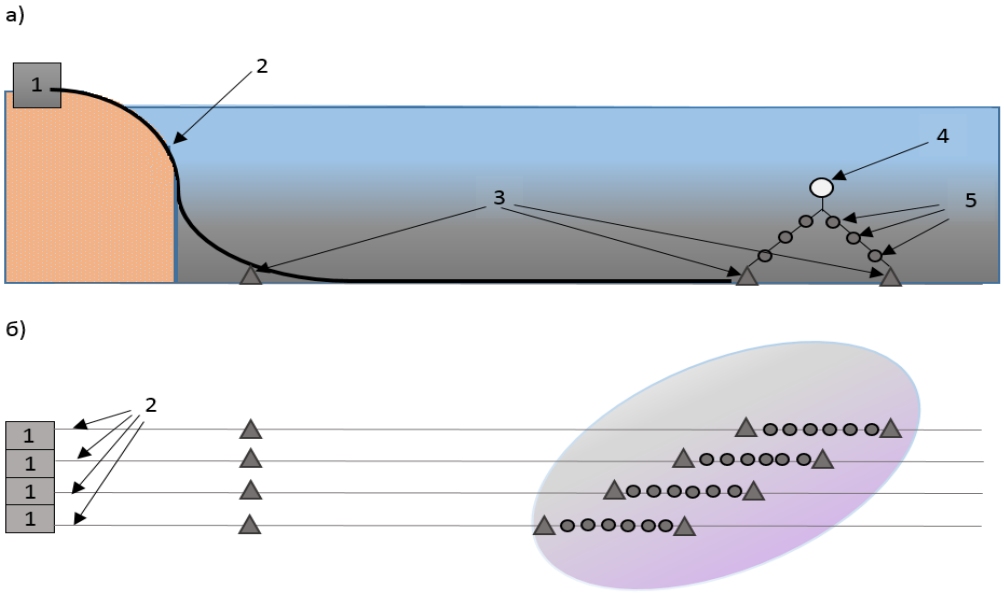


Рис. 1. Реализация способа мониторинга аномалий морской среды в удаленном районе. а) вид сбоку; б) вид сверху; 1 – генераторная часть; 2 – оптоволоконный кабель; 3 – якоря-фиксаторы кабельной трассы; 4 – поплавок; 5 – датчики температуры среды.

Литература

1. Ляпин К.К. Проблема освещения надводной и подводной обстановки. Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы подготовки специалистов. 24-я Межвузовская Научно-техническая конференция, часть 1, Петродворец, 2013, с.62-69.
2. Иванов В.В., Ляпин К.К. Развитие гидрофизических методов и средств исследования многомасштабных пространственно-временных параметров морской среды. Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы подготовки специалистов. Научно- техническая конференция, часть 1, ВМИРЭ, 2008, с.14-21.
3. Патент №2175449 от 27.10.2001 г. «Устройство для обнаружения турбулентных пятен в морской среде».
4. Фатеев А.А., Воробьев А.Н. Способ удаленного мониторинга гидрофизических характеристик водной среды в целях контроля протяженных подводных трубопроводов. Актуальные проблемы военной науки и политехнического образования ВМФ, Межведомственная научно-техническая конференция, 2016, Часть 3, ВМПИ, с.264-267.
5. ООО «Нева Технолоджи», Оптоволоконные системы высокоточных измерений; www.nevatec.ru
6. Рефлектометр оптический «Гамма-Люкс», Государственный реестр №40717. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RUC.37/003/А№35446; производитель ООО «Связьприбор», Тверь; www.svpribor.ru.
7. Голосной А. С., Мартынов В. Л. Кросс-системное моделирование при разработке лазерных систем подводного видения.//Сборник трудов IX Международной научной конференции «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий» (ПМТУКТ-2016), с. 96-98. Воронеж, 2016.
8. Мартынов В. Л. Лазерный канал связи в водной среде как альтернатива связи по кабелю.//Точно в цель. Вып. № 2 (006) 2016. С. 28-31. М., 2016.

ОБЗОР ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И АППАРАТУРНЫХ СРЕДСТВ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АРКТИКИ

Д.В.Лиходеев[1], канд.физ-мат.наук, Л.Е.Собисевич[1], д-р техн.наук, А.С.Шуруп[1,2], канд.физ-мат.наук
[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

REVIEW OF DUAL-USE GEOHYDROACOUSTIC METHODS AND EQUIPMENT FOR STUDYING THE ARCTIC

D.V.Lihodeev[1], Ph.D., L.E.Sobisevich[1], Dr.Sc., A.S.Shurup[1,2], Ph.D.
[1]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia
[2]M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

За последние десятилетия западные ученые значительно увеличили свою активность в Арктическом регионе. Были проведены, и проводятся в настоящее время, крупномасштабные работы по изучению различных физико-географических процессов в Арктике. Для этого используются самые современные системы наблюдения, позволяющие в режиме, близком к режиму реального времени, измерять и передавать информацию о значениях параметров водного слоя, льда и приземного слоя атмосферы. Получаемая информация может использоваться как для анализа экологических процессов, связанных с глобальным потеплением и таянием льдов, так и для обнаружения локальных неоднородностей в исследуемой области, включая и АПЛ.

Over the past decades, western scientists have significantly increased their activity in the Arctic region. Large-scale research focused on the study of various physic-geographical processes in the Arctic was carried out and is being carried out nowadays. For this purpose modern observation systems are used that allow to measure information about properties of the water layer, ice, and the near-surface layer of the atmosphere and transmit this information in a close to the real-time mode. The information obtained can be used both for the analysis of ecological processes related to global warming and ice melting, and for the detection of local inhomogeneities in the investigated area, including nuclear submarines.

В среднесрочной перспективе, в связи с критическим сокращением льдов, Арктические регионы, ранее труднодоступные для ядерного подводного флота вероятного противника, в ближайшее время могут стать основным местом базирования для атомных подводных лодок, которые смогут вплотную подходить к нашим северным границам. В связи с этим на первый план выходит необходимость разработки методов и средств мониторинга северных морей, покрытых льдом, обеспечивающих поступление актуальной информации о пространственно-временной изменчивости этого региона для раннего обнаружения малошумных подводных объектов и предотвращения их доступа в заданные акватории. На решение указанной проблемы брошены огромные финансовые и интеллектуальные силы США, Канады, Дании, Норвегии и ряда других зарубежных государств-соперников России в Арктическом регионе [1]. Прикладываются значительные усилия для расширения присутствия НАТО в Арктике. Проводятся масштабные теоретические и экспериментальные исследования этого региона с активным привлечением атомных подводных лодок (АПЛ). Используются самые современные системы наблюдения [2], позволяющие в режиме, близком к режиму реального времени, измерять и передавать через каналы спутниковой связи информацию о значениях параметров водного слоя, льда и приземного слоя атмосферы. Подобного инструментального изучения Арктического региона никогда ранее не проводилось.

Основные направления проводимых научно-технических работ в Арктике. Заказчиком и, фактически, конечным потребителем большинства научно-технических исследований, проводимых зарубежными учеными в Арктике является Центр военно-морских исследований США (Office of Naval Research, ONR), бюджет научно-технических работ которого составляет в среднем 2 миллиарда долларов в год [3]. Одной из основных целей деятельности этого Центра является использование научных и технологических разработок в области океанографии и метеорологии для организации наблюдений, моделирования и прогнозирования состояния океана, как театра военных действий, а также непосредственно для обнаружения подводных лодок, их классификации, а также для обнаружения и нейтрализации мин как в океане, так и в прибрежной зоне. Информация, необходимая для решения этих прикладных задач поступает непосредственно в ходе проведения научно-исследовательских работ, среди которых можно выделить реализующийся в настоящее время проект «Динамика стратифицированного океана в Арктике» ("Stratified Ocean Dynamics in the Arctic", 2016-2020 гг.), который сфокусирован на исследованиях в верхней части моря Бофора и Чукотского моря, где в течение нескольких последних лет реализуется, по-видимому, наиболее масштабный научно-исследовательский проект зарубежных ученых в Арктике [4]. В этом проекте задействованы основные современные устройства сбора гидрофизической и метеорологической информации (см. следующий раздел), позволяющие осуществлять круглогодичный мониторинг состояния параметров исследуемого региона. Размеры развернутой интегрированной системы наблюдений составляют более 400 км. Используются как вмораживаемые в лед системы наблюдений, так и автономные подводные аппараты, а также дрейфующие буи. Для навигации подводных аппаратов используется акустическая система связи.

Отдельно стоит отметить новый обширный проект «Арктические мобильные системы наблюдений/научные наблюдения» (Arctic Mobile Observing System/Science, AMOS), который продлится в 2017-2021 гг., и будет направлен во многом не только на научно-исследовательские работы, а уже на опытно-конструкторские разработки. Работы, которые будут финансироваться в рамках этой программы, направлены на разработку новых сенсоров, измерительных платформ и технологий для автономных мобильных наблюдений в Арктическом регионе. Особый акцент сделан на разработке мобильных систем, которые могут, как дрейфовать с ледовым покровом, так и перемещаться независимо, при этом автономно вести сбор и передачу информации. Общей целью является разработка и создание нового поколения методов мобильных автономных исследований Арктики, позволяющих

осуществлять мониторинг основных параметров этого региона для улучшения понимания происходящих процессов с целью дальнейшего прогнозирования их динамики.

Примеры оборудования для Арктических наблюдений. Научно-технические работы, проводимые в Арктике зарубежными учеными, обеспечены современными автономными измерительными комплексами, позволяющими регистрировать значения параметров водного слоя, ледового покрова, приземного слоя атмосферы и дна Арктических регионов. Судя по информации из открытых источников, в Арктике на настоящее время работают сотни подобного рода датчиков [5]. В важно, что в настоящее время все эти разнообразные системы объединяются в единую информационную сеть для оперативного анализа и прогнозирования меняющейся обстановки в Арктике.

Ice Mass Balance Buoys (IMB) – буи для измерения параметров ледового покрова: толщины льда (и снежного покрова), температуры вблизи льда и подо льдом, температуры воздуха, давления – разработаны специально для наблюдения за динамикой изменения ледового покрова в Арктике; самый дешевый и самый распространенный вид буев. Получаемая информация может быть использована, для определения областей ледового покрова, наиболее подходящих в текущий момент времени для всплытия подводных лодок. Кроме этого возможен прогноз динамики ледовой массы в областях расположения буев.

Automated Weather Station (AWS) – автономные метеорологические станции – используются на практике чаще всего для GPS позиционирования, измерения скорости и направления ветра, влажности, температуры воздуха, атмосферного давления, солнечной радиации. Получаемая информация используется в первую очередь для формирования и уточнения прогноза погоды в местах расположения станций.

Ice-Tethered Profilers (ITP) – вмораживаемый в лед профилограф – разработан для измерения гидрофизических характеристик водного слоя от приповерхностного слоя и до глубин ~ 1 км. Для развертывания на многолетнем морском льду в полярных морях, в любое время года. В ходе измерений получают данные о сезонных вариациях профиля скорости звука, о величине и направлении течений, о масштабах турбулентности среды, характеристиках внутренних волн, что позволяет детально описать существенные особенности распространения гидроакустических волн в той части Арктического региона, где установлены системы наблюдения данного класса. Эта информация позволяет, например, применять алгоритмы статистической обработки гидроакустических сигналов, согласованных со средой их распространения, улучшающие такие параметры гидролокационного оборудования, как дальность обнаружения подводных объектов, точность и достоверность получаемых оценок параметров целей.

Polar Profiling Floats – ныряющий буй для профилирования в полярных широтах – разработан по результатам программы глобальных наблюдений ARGO [6], для которой район Арктики оставался недоступным, т.к. наличие ледового покрова делало невозможным передачу данных через каналы спутниковой связи. Буй для полярного профилирования позволяет решить эту задачу. Разработчики также заявляют о возможности самостоятельного обнаружения буем участков, свободных от ледового покрова. В случае отсутствия сплошного ледового покрова буй для полярного профилирования пытается самостоятельно установить связь со спутником при всплытии. Существующий опыт использования этих буев в Арктике говорит о возможности работы устройства в течение 3-4 лет.

Gliders – глайдеры – автономные подводные системы для непрерывных и долговременных наблюдений, способные перемещаться за счет небольших изменений плавучести и рулевых крыльев, обеспечивающих поступательное движение вперед. Оснащаются датчиками различного типа. При всплытии принимают команды и передают измеренную информацию через каналы спутниковой связи.

Automatic Underwater Vehicle (AUV) – автономные подводные аппараты – более мощные по сравнению с глайдерами, способные нести значительный набор измерительных систем, оснащены винтовой тягой для перемещения по заданной траектории. Являются в настоящее время наиболее перспективным с точки зрения технических возможностей инструментом для непрерывных и долгосрочных подводных исследований, в том числе и в сложных условиях Арктики. Современные аппараты AUV могут функционировать без непосредственного участия оператора, а после завершения программы исследований возвращаться в заданное место для передачи полученной информации. Могут оснащаться практически любым океанографическим оборудованием, могут использоваться и гидролокаторы бокового обзора, а также иное

специализированное оборудование. Для позиционирования подо льдом разработаны акустические системы связи. В военных целях особая роль отводится аппаратам AUV в задачах поиска и уничтожения минного оружия.

Wave Buoy – буи для измерения поверхностного волнения (свободной поверхности и льда) – используются для количественной оценки характеристик поверхностного волнения открытого океана, а также для измерения волн ледового покрова. Опыт использования буев подобного типа в Арктических условиях показал стабильность получаемых данных в течение года без дополнительного обеспечения питанием. Поверхностное волнение является одним из основных факторов, влияющих на эффективность работы гидроакустического оборудования, например, определяя дальность его работы; априорная информация об этих и других характеристиках среды может быть использована для оптимизации работы систем обнаружения подводных объектов, наведения подводного оружия, а также другого используемого оборудования.

Surface Wave Instrument Float with Tracking (SWIFT buoy) – дрейфующие датчики для измерения характеристик приповерхностного слоя океана: параметров волнения, скорости ветра, турбулентности и приповерхностного шума – используют на открытой воде, однако в последнее время активно используются и в ледовой обстановке. Время использования буя может достигать 3000 часов непрерывного сбора данных. Обрушение волн вызывает сильную турбулентность в приповерхностном слое океана, является одним из факторов взаимодействия атмосферы и океана, ограничивает увеличение волнового волнения. В мелком море обрушение волн оказывает влияние на структуру течений, влияет на акустические характеристики волновода в целом. Использование буев SWIFT позволяет получить данные для оценки этого влияния, как в текущий момент времени, так и для построения среднесрочных прогнозов.

Acoustic Wave and Current (AWAC) meters – акустический измеритель поверхностного волнения и течений – предназначен для измерения профиля скорости течений жидкости (величины и направления на разных глубинах), а также для измерения высоты волн на свободной поверхности и направления их движения. Датчик разработан специально для использования в системах мониторинга шельфовых зон, обладает небольшим размером, устойчив к внешним физическим воздействиям, приспособлен к многолетним работам в суровых условиях Арктики.

Autonomous Ocean Flux Buoys (AOFB) – ледовые системы наблюдений для измерения характеристик вертикальных тепловых потоков в приповерхностном слое океана. Информация подобного рода требуется для построения глобальных прогностических моделей состояния Арктики, основанных на взаимосвязанности и взаимовлиянии процессов, происходящих в океане, ледовом покрове и в атмосфере.

Unmanned Aero Vehicle (UAV) – беспилотные летательные аппараты – являются традиционным методом наблюдений за Арктическим регионом, позволяют получать дистанционные аэро-космические снимки, в том числе, для мониторинга состояния ледового покрова. Для Арктических регионов используются спутники SAR TanDEM-X и TerraSAR-X, дающие всепогодные снимки со сравнительно хорошим разрешением (3–18 метров на размер пикселя) с достаточно низкой себестоимостью.

Использование АПЛ для изучения Арктики. Следует особо отметить регулярные научно-исследовательские работы (Scientific Ice Expeditions, SCICEX, а также ледовые учения или Ice Exercise, в 2009, 2011, 2014, 2016 гг), проводимые в Арктике при непосредственном участии иностранных АПЛ. В виду того, что именно подводный флот является конечным потребителем результатов большей части проводимых научно-технических исследования, то привлечение АПЛ на начальном этапе проводимых работ представляется весьма перспективным. Использование АПЛ показало высокую эффективность такого сотрудничества, позволило совместно с гражданскими учеными получить разнообразную информацию по геологии, физике, химии и биологии Арктического региона, динамике ледового покрова, циркуляции вод и батиметрическим характеристикам океана, которая могла быть использована при изучении влияния этих факторов на использование подводных лодок и их вооружения в арктических широтах. Подобные совместные работы проводятся на регулярной основе в течение последнего десятилетия; постоянно увеличивается количество участников, как среди научно-исследовательского коллектива, так и среди специализированных организаций и федеральных агентств США.

Выводы. В настоящее время в сфере разработки технологий зондирования Арктической среды акцент ставится на развитие автономных станций, в том числе роботизированных, способных обеспечить непрерывные наблюдения при организации долговременного мониторинга исследуемых регионов. Некоторые элементы глобальной системы наблюдений в Арктике (Arctic Observing Network) уже развернуты и функционируют. Наиболее перспективными из них для мониторинга океана являются, по-видимому, автономные подводные аппараты (AUV, глайдеры), вмораживаемые в лед вертикальные системы наблюдений (Ice-Tethered Profilers), а также дрейфующие автономные датчики «нырки» (Polar Profiling Floats). Особую роль занимают исследования, проводящиеся при участии подводных лодок и авиации.

Арктика является ареной будущих международных споров и возможных конфликтов, в первую очередь, из-за юридически неопределенного статуса национальных границ в этом регионе, содержащем огромные запасы углеводородного сырья. В процессе любых арктических переговоров одним из главных аргументов будет наличие военной силы в регионе, способной эффективно действовать для обеспечения стратегических интересов РФ. Основой этой эффективности должны стать современные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы **отечественных ученых**, направленные на теоретическое и экспериментальное исследования Арктики, которые, к сожалению, в настоящее время заметно уступают аналогичным работам зарубежных партнеров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-02046.

Литература

1. Национальные стратегии освоения Арктики и будущее Арктического региона (по материалам круглого стола) // Информационно-аналитический бюллетень «У карты Тихого океана». 2016. № 45. 243 с.
2. С. В. Писарев Опыт применения автоматических дрейфующих устройств для исследования водной толщи и ледового покрова Арктики в начале XXI в // Арктика: экология и экономика. 2012. Т. 8. № 4. С. 66 – 75.
3. http://www.onr.navy.mil
4. http://www.apl.washington.edu
5. http://iabp.apl.washington.edu
6. http://www.argo.ucsd.edu

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ИНТЕРЕСАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

М.И.Калинов, д-р техн.наук, В.А.Родионов, д-р техн.наук
Санкт-Петербургское отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, Россия

THE EXPERIENCE OF FORECASTING THE RESULTS OF THE USE OF SPACE RADAR SYSTEMS IN INFORMATION SUPPORT OF MARITIME ACTIVITIES

M.I.Kalinov, Dr.Sc., V.A.Rodionov, Dr.Sc.
St. Petersburg branch of the Section of Applied Problems at the Presidium of RAS, Russia

Рассмотрен сценарно-временной метод прогнозирования результатов применения космических радиолокационных систем в интересах информационного обеспечения морской деятельности. Приведены оценки показателей прогноза для различных сценариев действий морских объектов в районах Баренцева, Белого, Черного и Японского морей, а также для трансокеанских переходов.

The considered scenario is a temporary method of predicting results of the use of space radar systems in information support of maritime activities. The estimates of indicators of the forecast for different scenarios of offshore facilities activity in the Barents, White, Black and Japanese seas, and also for transoceanic crossings are presented.

В современных условиях существенно возрастает роль космических систем (КС), решающих задачи радиолокационного мониторинга (РЛМ) морской поверхности (МП) (далее – КС), которые применяются для контроля параметров и состояния морских объектов наблюдения (далее – объектов) независимо от их действий, погоды и времени суток в глобальном масштабе с высокой оперативностью и требуемой периодичностью. За последние полвека в нашей стране и за рубежом на околоземную орбиту было выведено около 100 космических аппаратов (КА) таких систем, и накоплен большой опыт их эксплуатации в интересах информационного обеспечения морской деятельности [1-3].

Прогнозирование результатов применения КС неразрывно связано с процессом их создания, необходимостью обоснования характеристик бортовых специальных комплексов (БСК), количественного состава и баллистической структуры орбитальных группировок КА. Для выполнения такого прогноза применяется различные технические и программные средства, в том числе в течение последних двадцати лет – имитационно-моделирующий комплекс (ИМК) информационных космических систем, программное обеспечение которого в настоящее время поддерживается в актуальном состоянии в Санкт-Петербургском отделении секции прикладных проблем при Президиуме РАН.

Обычно прогнозные задачи связаны с априорной оценкой (расчетом показателей) эффективности применения КС, ее свойств и возможностей. Далее для удобства (в соответствии с сущностью исследуемых процессов) процедура получения этих оценок будет называться прогнозированием результатов применения КС. Его содержанием является трансформация массива исходных данных в оценки искомых показателей с помощью сценарно-временного метода прогнозирования результатов применения космической системы РЛМ МП (далее – метода), в котором, с одной стороны, осуществляется моделирование процесса функционирования КС (от орбитального движения КА до распознавания объекта на пункте приема информации (ППИ) в условиях фоно-целевой обстановки различной степени сложности), а с другой – моделирование действий объекта путем розыгрыша некоторого количества сценариев, имитирующих неопределенность его возможного положения и состояния («обнаружен» или «не обнаружен»).

При каждом пролете КА над неподвижной (динамичной) областью возможного положения объекта (ОВПО) (с учетом принятых ограничений по границам этой области и скорости перемещения объекта) по всем сценариям возможных действий объекта воспроизводятся явления (опыты), благоприятный исход которых (объект попал в полосу обзора КА, зафиксирован его бортовым специальным комплексом, информация об объекте получена на ППИ, объект распознан) означает появление события «обнаружение объекта». В противном случае объект считается не обнаруженным. С целью обеспечения приемлемых для прогнозных расчетов точности и надежности получаемых оценок (доверительного интервала 0,05 и доверительной вероятности 0,7-0,9) выбрано 100 сценариев возможных действий объекта.

Для удобства прогнозирования аналитические зависимости и логические условия применяемых математических моделей трансформированы в компьютерную модель на языке программирования высокого уровня. Пример получения и отображения результатов одной реализации при моделировании процесса функционирования КС (интервал оценки – 3 суток) и 10 сценариях (m) действий объекта представлен на рисунке.

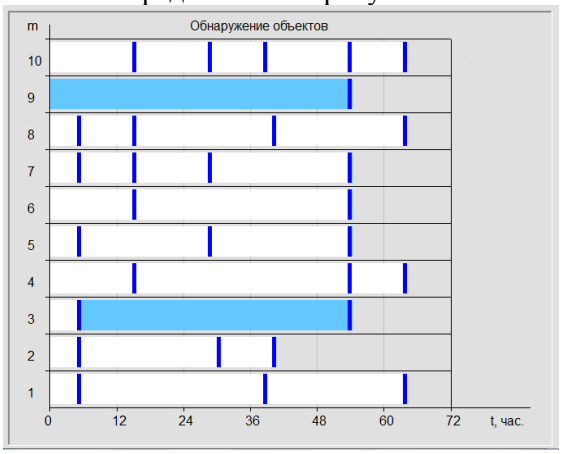


Рис. 1. Отображение результатов одной реализации при моделировании процесса функционирования КС и 10 сценариях действий объекта.

Представленные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Всего на интервале оценки произошло 8 информативных пролетов КА через ОВПО. Количество благоприятных исходов опытов (обозначены на рисунке утолщенными вертикальными отрезками) в каждом пролете различно (в первом пролете – 6, во втором – 5, в третьем – 3 и т.д.). Отношение количества благоприятных исходов опытов к количеству сценариев (m =10) позволяет получить оценку мгновенной вероятности обнаружения объекта в текущем пролете КА (в первом пролете – 0,6, во втором – 0,5, в третьем – 0,3 и т.д.). Пролонгация полученных оценок мгновенной вероятности обнаружения объекта на допустимое время устаревания

данных и их нормирование интервалом оценки позволяют, в конечном итоге, получить искомую оценку вероятности слежения $W_{сл.}$ за ним.

Количество благоприятных исходов опытов по каждому из сценариев на интервале оценки соответствует количеству обнаружений объекта (по первому сценарию – 3, по второму – 3, по третьему – 2 и т.д.), а его последующее нормирование по этому интервалу (в сутках) – количеству обнаружений в сутки. Для практических целей часто используют усредненное по всем сценариям, а при более детальном исследовании – минимальное и максимальное значения данного показателя ($k_{ср.}$ $k_{мин.}$ $k_{макс.}$ соответственно).

Измерение интервалов времени между обнаружениями объекта (при его действиях по всем сценариям) и их последующая статистическая обработка позволяют построить дифференциальный и интегральный законы распределения вероятностей попадания в такие временные интервалы. Для понимания и удобства восприятия может быть задан определенный уровень вероятности (например, 0,8) попадания в интервалы времени между обнаружениями объекта $T_{0,8}$ при равновозможном времени начала решения задачи мониторинга. На рисунке такие интервалы показаны белым цветом. На практике это означает, что время ожидания последующего обнаружения объекта (с вероятностью не ниже 0,8) не превысит максимального значения таких интервалов. Интервалы, превышающие это значение, показаны на рисунке более темным цветом (третий и девятый сценарии действий объекта).

Иными словами, результаты моделирования процесса функционирования КС (при различных сценариях действий объекта) позволяют после их статистической обработки получать искомые оценки прогноза результатов применения систем в интересах информационного обеспечения морской деятельности. Путем добавления блоков ввода исходных данных, накопления результатов моделирования, их статистической обработки и визуализации получаемых оценок показателей в удобном для выполнения исследований виде производится преобразование компьютерных моделей в компьютерную методику в рамках разработанного метода. Подробное описание форм отображения выходных данных компьютерных моделей и методик содержится в [4].

Получаемые с помощью разработанных метода, компьютерных моделей и методики зависимости представленных выше показателей $W_{сл.}$, $k_{ср.}$, $T_{0,8}$ от заданных условий (границ ОВПО, маршрутов и скоростей перемещения объекта, допустимого времени устаревания данных, состава и баллистической структуры орбитальной группировки КА, характеристик БСК и т.д.) позволяют на выбранном интервале оценки составить достаточно полный прогноз результатов применения космических радиолокационных систем в интересах информационного обеспечения морской деятельности. Иллюстрацией такого прогноза являются оценки указанных показателей, выполненные для различных сценариев действий объекта в районах Баренцева, Белого, Черного и Японского морей, а также для трансокеанских переходов. Оценки выполнялись для КС с орбитальной группировкой 1-12 КА типа «Кондор».

Установлено, что при высокой вероятности фиксации объекта ($P_{фикс.}$ = 0,9) и большом допустимом времени устаревания данных ($T_{уст.}$ = 1 сутки и выше) практически достаточно одного-двух КА для решения задачи слежения за объектом в рассматриваемых районах ($W_{сл.}$ = 0,77-1,00), а при малом ($T_{уст.}$ = 1 час) – даже при шести КА в составе ОГ слежение за объектом будет проблематичным ($W_{сл.}$ = 0,25-0,73). Резкое (до восьмикратного) изменение интервала времени между обнаружениями объекта $T_{0,8}$ происходит при наращивании ОГ до двух-трех КА, при дальнейшем увеличении состава орбитальной группировки этот параметр изменяется более плавно. Приемлемые для решения большинства практических задач интервалы времени между обнаружениями объекта ($T_{0,8}$ = 1,5-6 часов) могут быть получены при составе ОГ 4-6 КА в высоких широтах; в низких широтах даже при 6 КА этот показатель не лучше 6,5 часа.

В целом, интервал времени между обнаружениями объекта с вероятностью, не ниже заданной, является сильно вариативным показателем. Он изменяется в широких пределах и зависит не только от широты, но и долготы района наблюдения. В настоящее время он изучен недостаточно, и требуются дополнительные исследования для его оценки и интерпретации применительно к характеру решаемых задач, составу орбитальной группировки и характеристикам бортовых спецкомплексов КА.

Количество обнаружений объекта в сутки $k_{ср.}$ (в отличие от других показателей) практически прямо пропорционально количеству КА в орбитальной группировке. В среднем, количество обнаружений в сутки для районов Баренцева и Белого морей при последовательном наращивании ОГ от одного до шести КА составляет 4,4-27,5 и 2,3-15,4 соответственно; для низкоширотных районов этот показатель примерно в два раза хуже, и при орбитальной группировке 6 КА он не превышает 6,8-8,0. Данный показатель, в определенном смысле, можно считать усредняющим и иллюстрирующим потенциальные возможности КС при гипотетически

равномерном распределении обнаружений объекта. Однако на практике возможно лишь некоторое приближение к реализации этих возможностей при оптимизации баллистической структуры орбитальной группировки и характеристик КА.

При прогнозировании результатов применения космических радиолокационных систем в интересах информационного обеспечения трансокеанских переходов введен дополнительный показатель – максимальное время, необходимое для обнаружения объекта с момента начала перехода $T_{обн.}$. Одновременно исследовалось влияние вероятности фиксации объекта $P_{фикс.}$ на оцениваемые показатели. Было установлено, что при ограниченных составах орбитальной группировки (1-3 КА) и низкой вероятности фиксации объекта ($P_{фикс.} = 0,2$) объект может быть не обнаружен на этапе перехода (ОГ – 1 КА), или время, необходимое для его обнаружения, составит 5-8 суток (ОГ – 2-3 КА). Максимальный интервал времени между обнаружениями объекта с вероятностью не ниже 0,8 (при $P_{фикс.} = 0,2$) для 3-х КА составляет 3-5 суток (треть или половина маршрута перехода). Количество обнаружений объекта в сутки $k_{ср.}$ для указанных условий не превышает 0,5-1,3, что связано с различными широтными диапазонами маршрутов переходов.

Результаты исследований показали, что для практических целей (обнаружения объекта в первой трети маршрута перехода и периодического (3-4 раза в сутки) наблюдения за ним) $P_{фикс.}$ должна быть не менее 0,5, а состав ОГ – не менее 3-6 КА. Кроме того, была выявлена значительная вариативность минимальных и максимальных значений отдельных показателей ($k_{мин.}$, $k_{макс.}$, $T_{обн.}$) при ограниченном составе ОГ (1-3 КА). При этом средние показатели достаточно устойчивы. Для повышения достоверности получаемых результатов необходимо продолжить исследования в направлениях изменения других характеристик БСК КА, поиска рациональных вариантов построения орбитальной группировки КА, варьирования исходных данных по моменту начала перехода объекта.

Рассмотренная иллюстрация является частным случаем полученного опыта (в смысле «совокупности знаний, навыков, умений, вынесенных кем-либо из практической деятельности») прогнозирования результатов применения космических радиолокационных систем в интересах информационного обеспечения морской деятельности [5]. В целом, совокупность полученных результатов прогноза не противоречит характеристикам КС, решающих задачи РЛМ МП, но позволяет уточнять их применительно к особенностям функционирования этих систем в различных условиях обстановки, а также для перспективных КС, в том числе использующих другие методы фиксации объектов на морской поверхности [1, 2, 6].

Постоянное совершенствование ИМК позволяет прогнозировать результаты применения существующих и перспективных КС с учетом требований различных потребителей данных космического мониторинга морской поверхности. При этом особый интерес представляют исследования, связанные с оптимизацией баллистических структур орбитальных группировок КА, формированием глобальных и локальных карт периодичности обнаружения морских объектов, моделированием и оценкой эффективности применения многоярусных космических систем мониторинга морской поверхности, структурного распознавания объектов в условиях сложной фоно-целевой обстановки и др. [4, 7].

Таким образом, получен и накоплен определенный опыт прогнозирования результатов применения космических радиолокационных систем, который может быть использован в интересах совершенствования существующих и при разработке перспективных средств информационного обеспечения морской деятельности.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.З. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010.
2. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и Б, 1997.
3. Землянов А.Б., Коссов Г.Л., Траубе В.А. Система морской космической разведки и целеуказания. СПб.: ЗАО «Геоид», 2002.
4. Анцев Г.В., Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А. Моделирование и оценка эффективности применения многоярусной космической системы мониторинга морской поверхности. Морские информационно-управляющие системы. М.: АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2017. № 2(12) С. 22-29.
5. Толково-энциклопедический словарь. СПб.: «Норинт», 2006.
6. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. Воронеж.: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014.
7. Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А., Торгашов А.А. Опыт разработки и применения имитационно-моделирующего комплекса информационных космических систем в научных исследованиях // Труды 18-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Том 4. СПб.: НПО Спецматериалов. 2015. С. 131-137.

ВЫЧИСЛЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕХМЕРНО НЕОДНОРОДНЫХ МОДЕЛЯХ СРЕДЫ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ВОДУ, ВОЗДУХ И ГРУНТ

К.В.Авилов[1,2], канд.физ-мат.наук, О.Е.Попов[1]
[1]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
[2]Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

CALCULATION OF LOW FREQUENCY SOUND FIELDS IN THREE-DIMENSIONAL MEDIA MODELS INCLUDING ATMOSPHERE, WATER AND BOTTOM

K.V.Avilov[1,2], Ph.D., O.E.Popov[1]
[1]A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS, Moscow, Russia
[2]A.A. Blagonravov Institute of Machines Science of the RAS, Moscow, Russia

В докладе описано расширение метода псевдодифференциальных параболических уравнений допускающее вычисление низкочастотных звуковых полей в трехмернонеоднородных моделях среды, включающих воду, воздух и грунт. Приведены практически интересные примеры расчетов.

The paper describes expansion of the pseudodifferential parabolic equation technique that enables calculation of low frequency sound fields in three-dimensional media models including atmosphere, water and bottom. The paper includes practically interesting examples of such calculations.

Уже более 30 лет [1] для оценки уровней и амплитудно-фазовой структуры звуковых полей в моделях морской среды, медленно неоднородных по трассе распространения, применяется волновой метод псевдодифференциальных параболических уравнений [2,3] в приближении однонаправленного распространения с пренебрежением отличия коэффициентов прохождения по горизонтальной координате от единичных и отличием соответствующих коэффициентов отражения от нулевых. Физический смысл этого метода заключается в том, что неоднородный по горизонтали и вертикали волновод аппроксимируется набором коротких (обычно несколько длин волн) участков слоистых волноводов, разделенных вертикальными поперечными сечениями, на которых соблюдается непрерывность звукового давления. Распространение звуковых волн через короткие слоистые участки описывается методом нормальных волн:

$$p(x+h,z)=\sum_k \varphi_k(x,z)\exp(ih\sqrt{\lambda_k})a_k(x)=\Phi(x)\,\underset{k}{diag}\{\exp(ih\sqrt{\lambda_k})\}\,\Phi^{-1}(x)\,p(x,z) \qquad (1)$$

где p – звуковое давление, x - горизонтальная координата в волноводе, z - глубина, $\varphi_k, \lambda_k, a_k$ - собственные функции (нормальные волны), собственные числа (квадраты волновых чисел нормальных волн) и амплитуды нормальных волн в сечении x, Φ - оператор перехода от базиса нормальных волн к координатному представлению поля (для дискретного приближения дифференциальной поперечной задачи - матрица), т.е. применяется метод поперечных сечений. Прямая численная реализация этого метода предполагает разыскание в каждом сечении соответствующего базиса нормальных волн, что является требовательной к ресурсам вычислительной задачей. Вспоминая определение функции от матрицы через ряд Тейлора, можем записать соотношение (1) в виде:

$$p(x+h,z)=\exp\left(ih\sqrt{T(x)}\right)p(x,z), \qquad (2)$$

где T - поперечный дифференциальный оператор. Применяя, далее, для аппроксимации экспоненты от корня квадратного главную диагональную дробно-рациональную аппроксимацию, мы приходим к соотношению (3).

$$p(x+h,z)=\left(\alpha+\sum_k^K \beta_k\left(T-\mu_k\right)^{-1}\right)p(x,z), \qquad (3)$$

где α, β_k, μ_k - комплексные числа, характеризующие конкретную дробно-рациональную аппроксимацию степени *K*, позволяющую вычислить распространение через короткий слоистый участок путем решения *K* систем линейных уравнений без решения задачи на собственные значения, значительно экономя число потребных для этого операций.

Для заданных *h* и *K* аппроксимация дает достаточную точность в некотором диапазоне показателей преломления в модели среды. До недавнего времени применялись наборы μ_k, дающие достаточную точность в диапазоне примерно 0.8..1.21, подходящим для описания распространения в воде и дне. Если в модель среды включить воздушную часть, то требуемый диапа-

зон расширяется в разы. Численные трудности разыскания наборов были преодолены в [4]. Там же проведена верификация полученных результатов.

Наборы, обеспечивающие точные аппроксимации в широком диапазоне показателя преломления, могут быть применены для вычисления звуковых полей в средах включающих воздух, воду и дно.

Рассмотрим пример таких вычислений. Для точечного источника в воздухе в 15м над поверхностью моря было рассчитано поле звукового давления на частоте 20 Гц рис.1. Глубина моря меняется с 1300м в начале трассы до 44 м в конце.

На рис.2 приведены профили скорости звука в атмосфере, море и осадках. Следует обратить внимание на некоторые особенности профилей скорости звука в средах. В атмосфере есть приводный звуковой канал, образовавшийся из-за соответствующего вертикального профиля ветра и температуры. Данные для построения эффективного профиля скорости звука в атмосфере взяты из реальных измерений профиля температуры, а также скорости и направления ветра. Таким образом, в рассматриваемом примере источник звука находится в приводном звуковом канале. В профиле скорости звука в море (профиль для Чёрного моря) рис.2 есть подводный звуковой канала с минимумом скорости на глубине 50м. Профиль скорости звука в осадках имеет минимум скорости звука у границы с водой и с глубиной скорость растёт.

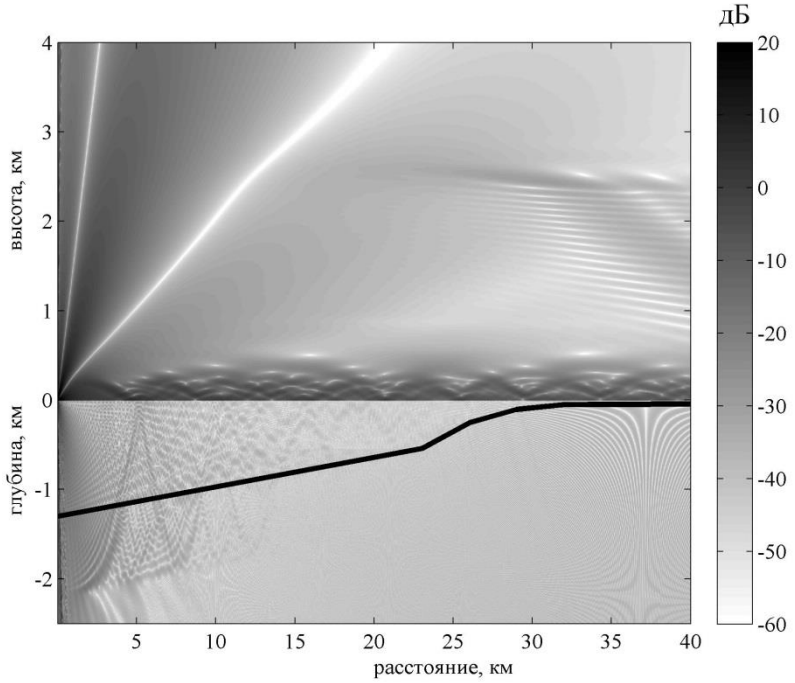


Рис. 1. Распределение звукового давления в трёх средах для точечного источника с частотой 20Гц, находящегося на высоте 15м над водой. Высота 0 м – поверхность моря, жирная линия – рельеф морского дна.

Во всех средах помимо профилей скорости звука задавались профили плотности. Для атмосферы использовался стандартный профиль, в котором плотность на уровне моря 1.225 кг/м^3, а на высоте 10 км - 0.41 кг/м^3. В воде плотность бралась постоянной, не зависящей от глубины 1000 кг/м^3, а в осадках плотность менялась от 1600 кг/м^3 на границе с водой до 2500 кг/м^3 на глубине 2500 м.

Расчёт поля проводился с горизонтальным шагом в одну длину волны (для скорости 400 м/с), а по вертикали, для корректного описания границы воздух-вода с шагом 0.1 м.

Затухание звука в воздухе и воде на рассматриваемых расстояниях для частоты 20Гц мало и не учитывалось. Возможное влияние волнения не учитывалось.

Захваченный приводным каналом звук распространяется в атмосфере с минимальным затуханием, отражаясь от поверхности моря. На рис.1 можно наблюдать рефракцию звука как в приводном звуковом канале в атмосфере, так и рефракцию звука на больших глубинах в море и осадках. На рис.3 приведены горизонтальные разрезы давления на высоте 15 м и на глубине 70 м.

Стоит отметить следующие особенности звукового поля. Начиная примерно с 21 км, поле в воде на разрезе 70 м с расстоянием уже не падает, а немного растёт, поскольку глубина моря

уменьшается и энергия концентрируется в более тонком водном слое. Начиная с расстояния примерно 31 км, разрез на глубине 70 м уходит в осадки, и давление ещё немного возрастает, за счёт увеличения плотности среды распространения, а интерференционная картина становится более простой.

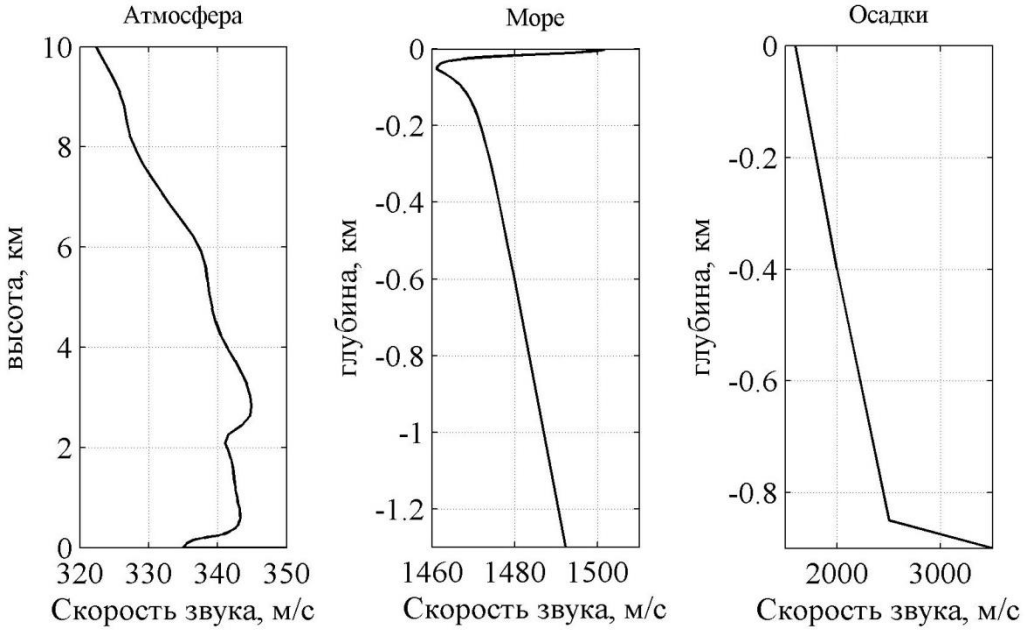


Рис. 2. Профили скорости звука в атмосфере, море и осадках.

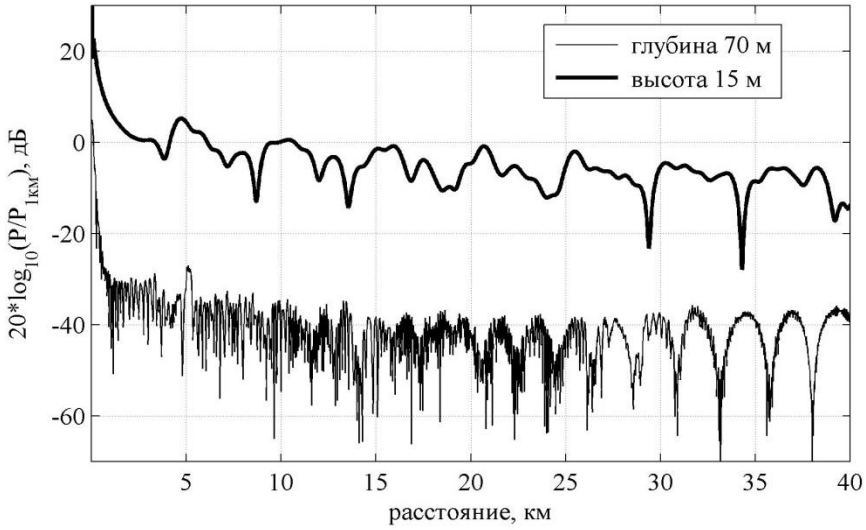


Рис. 3. Горизонтальные разрезы давления в воде и воздухе.

Известно, что при закритических углах скольжения, вдоль границы воздух-вода распространяется неоднородная волна, амплитуда давления которой экспоненциально убывает при удалении от границы воздух-вода [5]. Для падения плоской волны из однородного воздуха на однородную воду, этот спад давления p можно рассчитать по формулам (4).

$$|p| \approx 2*\exp(-\delta z) \qquad \delta = 2*\pi* f / c_1 * \sqrt{\sin^2\theta - (c_1/c_2)^2}\,, \tag{4}$$

где z – глубина, f – частота, θ – угол падения, c_1 и c_2 – скорости звука в воздухе и воде.

Согласно (4) на частоте 20 Гц для θ=45º, c_1=335 м/с, c_2=1501.54 м/с давление в воде экспоненциально уменьшается на 65.6 дБ при заглублении от поверхности воды на 30 м. При расчёте для этой же модели с помощью программы, реализующей волновой метод псевдодифференциальных параболических уравнений, получаем величину экспоненциальный спад на 63.3 дБ (рис.4).

Отметим, что 30-летний опыт применения программных средств, реализующих волновой метод псевдодифференциальных параболических уравнений, показал их высокую вычислительную эффективность. Возможность описания различных физических явлений, возникающих

при распространении звука, а также высокая точность и быстродействие, позволяют моделировать распространение звука в реальных средах: море, осадках и атмосфере, а также в их комбинациях. В трехмернонеоднородных средах описанный метод прямо применим для расчетов с пренебрежением боковой рефракцией, в так называемом приближении N*2D.

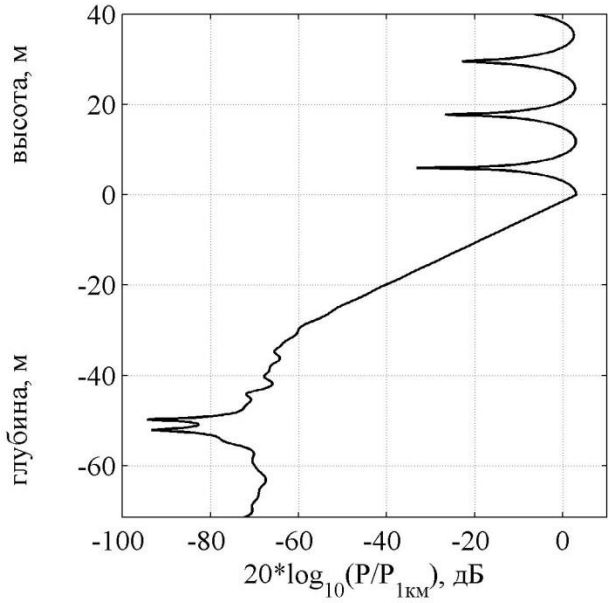


Рис. 4. Вертикальный разрез давления на частоте 20Гц для угла падения 45º узкого звукового пучка из воздуха на воду.

Приведенные примеры расчётов ещё раз подтверждают пригодность разработанных программных средств для их применения в практических гидроакустических расчетах, а также для расчёта звуковых полей и сигналов в атмосфере и грунте.

Литература

1. Авилов К.В. Вычисление гармонических звуковых полей в двумерно-неоднородных волноводах в уточненном широкоугольном параболическом приближении. М.: Отчет АКИН, 1983.
2. Авилов К.В. Приближение однонаправленного распространения в вычислении звуковых полей в океане // в кн. Акустика океанской среды под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой, М., Наука, 1989, С. 10 - 19.
3. Авилов К.В. Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численное решение, Акуст. журн., т. 41, вып.1, 1995, с.5-12.
4. Авилов К.В., Куличков С.Н., Попов О.Е. К вычислению звуковых полей в моделях морской среды, включающих атмосферу, водную толщу и дно УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА №5, 1750101 (2017).
5. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л., Гидрометеоиздат. 1982

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШУМОВ ГЛУБОКОГО ОКЕАНА

П.Н.Кравчун, канд.физ-мат.наук
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

EMPIRICAL MATHEMATICAL MODEL OF DEEP OCEAN NOISE

P.N.Kravchun, Ph.D.
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Предложены компактные эмпирические соотношения для частотно-угловых спектров шумов поверхностного волнения и удаленного судоходства, полученные путем обобщения данных эксперимента о шумах глубокого океана. Формулы представлены в виде явных аналитических функций частоты, угловой переменной, скорости ветра над поверхностью океана и индекса плотности судоходства. Пределы применимости модели: частотный диапазон 250-1200 Гц, состояние поверхности моря 3-7 баллов.

Compact empirical formulas for frequency-angle spectra of surface-generated noise and noise of far shipping are proposed. Formulas were obtained by generalization of experimental data for the deep ocean noise. Formulas are represented as explicit analytical functions of frequency, angle, wind velocity above the ocean surface and shipping density index. Limits of the model applicability are: frequency range 250–1200 Hz, sea surface state 3–7.

Одна из основных задач при создании гидроакустических средств, а частности, для донных станций, состоит в обеспечении устойчивой работы аппаратуры в условиях шумовых полей океана. Важнейшее значение при этом имеет предварительная оценка устойчивости аппаратуры к воздействию шумов на стадии проектирования. Для проведения такой оценки необходимо иметь математическую модель шумов океана. Один из возможных путей создания такой модели состоит в обобщении имеющихся экспериментальных данных об окружающих шумах океана и построении на их основе компактных соотношений, описывающих уровни шума, его направленность и частотную зависимость для заданных океанологических условий и выбранного типа источников шума. Несмотря на ограниченность, эмпирические модели в ряде случаев весьма полезны, поскольку в неявной форме учитывают многочисленные и не всегда поддающиеся строгому теоретическому описанию факторы, связанные с генерацией и распространением звука в реальном океане.

В диапазоне средних частот (100-2000 Гц) наибольший интерес из источников шума в океане представляют поверхностное волнение и судоходство. Эти источники являются доминирующими в указанном диапазоне и присутствуют практически во всех районах Мирового океана (исключение составляет лишь арктическая область).

В данной работе предлагаются эмпирические формулы для частотно-угловых спектров шумов поверхностного волнения и удаленного судоходства, построенные путем обобщения экспериментальных данных о придонных шумах в глубоком океане (4000–6000 м) в диапазоне частот 200–1500 Гц. В отличие от ряда предшествующих работ, в предлагаемой модели дается явная связь между угловым распределением интенсивности шумового поля, частотой, скоростью ветра над поверхностью и индексом плотности судоходства.

Из работ, результаты которых были использованы при построении модели, отметим прежде всего работы [1–9]. Поскольку использованные экспериментальные данные были получены в основном с помощью линейных вертикальных антенн или одиночных ненаправленных гидрофонов, предлагаемая модель справедлива для усредненного по азимуту шума. Шумы волнения и судоходства считались статистически независимыми. Диапазон изменения состояния поверхности океана (от 1 до 7 баллов), для которого проводилось обобщение экспериментальных данных, соответствует наиболее вероятным условиям в Мировом океане [10]. Непосредственное усреднение проводилось для экспериментальных данных, приведенных в [3, 4, 8, 9] (результаты этих работ сопоставимы между собой, поскольку измерения были выполнены в приблизительно одинаковых условиях). Районы измерений характеризовались каноническим профилем скорости звука и коэффициентами отражения от дна, соответствующими рельефу средней расчлененности. Такие условия характерны, в частности, для северо-запада Атлантического океана, где проводилась основная часть измерений. Прочие из работ [1–9] были использованы для выявления общих закономерностей, описывающих зависимость шума от выбранных параметров и значительно облегчающих построение эмпирической модели.

В основу модели положены усредненные законы изменения уровня подводного шума с частотой (спад 4-5 дБ на октаву) и скоростью ветра над поверхностью (линейная связь между уровнем шума и логарифмом скорости ветра, наблюдаемая на самых различных глубинах [5, 6, 11]). Для описания угловой зависимости (вертикальной анизотропии) шума, а также уточнения

указанных основных зависимостей вводились дополнительные функции, зависящие от угловой переменной, частоты, скорости ветра и индекса плотности судоходства, и поправочные коэффициенты.

Уровень шума поверхностного волнения L_S является функцией угла θ (отсчитываемого в градусах от горизонтали), частоты f в Гц и скорости ветра v над поверхностью (в м/с):

$$L_S(\theta, f, v) = 0{,}027 f - 72 + 50 \lg v + 11{,}1 \cdot [e^{-4(\lg v - 0{,}6)} - 1](\lg f - 1{,}4)[\cos(4\theta) + 3] \times \times \lg[\cos(\theta/2) \cdot 2^{1/2}]. \quad (1)$$

Уровень шума судоходства L_F зависит от переменных θ, f и индекса плотности судоходства s:

$$L_F(\theta, f, s) = -33(10^{-3} \cdot f + 1)[1 + \theta^2/(2\theta_0)^2]\{\exp[-(\theta_0 - \theta)\delta] + 1\} + 6{,}7(s - 2), \quad (2)$$

где δ=5, θ_0=15º, индекс s определяется числом судов в квадрате 500 км × 500 км над точкой приема: s=1 для 1–3 судов, 2 – для 4–9 судов, 3 – для 10–25 судов, 4 – для 25–50 судов, 5 – при количестве судов более 50. Выражение (2) при s=1 (и в некоторых случаях при s=2) вполне удовлетворительно аппроксимирует также имеющиеся данные по шумам удаленного судоходства за пределами указанного квадрата [2, 9]. Отметим, впрочем, что в глубоком океане при состоянии поверхности 3 балла и выше шум удаленного судоходства в выбранном диапазоне частот практически полностью маскируется шумом поверхностного волнения. Уровни L_S и L_F в предложенных формулах определены в децибелах относительно 1 мкбар^2/(Гц·стерадиан). Подчеркнем, что угол θ в приведенных выражениях может изменяться лишь от 0 до 90º, поскольку выражения были получены на основе результатов придонных измерений.

Частотно-угловая зависимость энергетического спектра подводного шума может быть вычислена по формуле

$$G(\theta, f, v, s) = 10^{L_S(\theta, f, v)/10} + 10^{L_F(\theta, f, s)/10}. \quad (3)$$

Примеры сравнения расчетных угловых зависимостей интенсивности шума, вычисленных по формулам (1)–(3), с экспериментальными данными [3, 4] приведены на рис. 1,а (для слабого судоходства: s = 2). Хорошее совпадение угловых зависимостей шума с результатами эксперимента наблюдается и для других случаев, соответствующих выбранному диапазону частот и скоростей ветра. Частотные спектры интенсивности шума, полученные интегрированием частотно-угловых спектров (3) по угловой переменной, и полная интенсивность (интеграл по углу и частоте) также оказываются сходными с данными экспериментов [2, 5, 6, 9], причем рост уровня шума пропорционально величине lg v наблюдается при скоростях ветра, превышающих 4-5 м/с.

На рис. 1,б представлены частотные зависимости усредненного по углу модуля разности экспериментальных [3, 4] и расчетных значений уровня шума, характеризующие точность предложенных эмпирических формул для различных состояний поверхности океана. Наиболее отчетливо выраженные тенденции состоят в повышении точности формул по мере роста частоты и снижения скорости ветра. Для диапазона частот 400–1122 Гц и состояний поверхности 1–5 баллов отклонения расчетных и экспериментальных значений не превышают 4 дБ и лишь для состояния поверхности 7 баллов достигают 7–10 дБ, что, тем не менее, практически не превышает допустимой ошибки, обусловленной статистическим разбросом экспериментальных данных (5–6 дБ) и способом их обработки (2–3 дБ) [4, 8, 9].

Кроме частотно-угловых зависимостей уровня шума и его спектральной плотности, практический интерес представляет также пространственно-временная корреляционная функция шума, соответствующая приведенным выше эмпирическим зависимостям. Указанная функция, как нетрудно показать, может быть определена следующим образом:

$$R(\rho, \tau) = 2\pi \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\pi/2} G(\vartheta, f, v, s) \cos(k|\vec{\rho}| \cos\alpha \sin\theta - \omega\tau) J_0(k|\vec{\rho}| \sin\alpha \cos\theta) \cos\theta d\vartheta \right] d\omega,$$

где $\vec{\rho}$ – пространственное разделение точек наблюдения, α – угол между вертикалью и вектором $\vec{\rho}$, ω=2πf – циклическая частота, τ – время задержки, k – волновое число, J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Сравнение корреляционных функций, рассчитанных по формулам (1)–(4), с результатами соответствующих экспериментов в океане [12, 13] позволяет более полно и точно определить границы применимости предложенных эмпирических соотношений, как по частотному диапазону, так и по диапазону изменения скорости ветра (поскольку эксперименты по определению корреляционных функций шумов океана полнее освещены в литературе, чем частотно-угловые

спектры). Кроме того, целесообразно сравнить точность аппроксимации экспериментально измеренных корреляционных функций, полученную с помощью соотношений (1)–(4), с точностью аппроксимации на основе описания направленности поверхностных источников шума волнения функциями вида $\sin^n\theta$. Проведенное сравнение показывает, что расчеты на основе предложенных эмпирических формул хорошо соответствуют результатам эксперимента в области частот 400–800 Гц для состояния поверхности океана 3–7 баллов. При этом достигается более высокая точность аппроксимации экспериментальных данных, чем при использовании функций вида $\sin^n\theta$ для описания направленности шума поверхностными источниками (для любого фиксированного n) – см. рис. 2. В диапазоне частот 250–400 Гц совпадение расчетных и полученных в эксперименте корреляционных функций несколько хуже, однако вполне удовлетворительно для качественных оценок. Для сильного волнения (более 8 баллов) и частот 1200–1500 Гц сравнение корреляционных функций не проводилось из-за отсутствия надежных экспериментальных данных в доступной автору литературе.

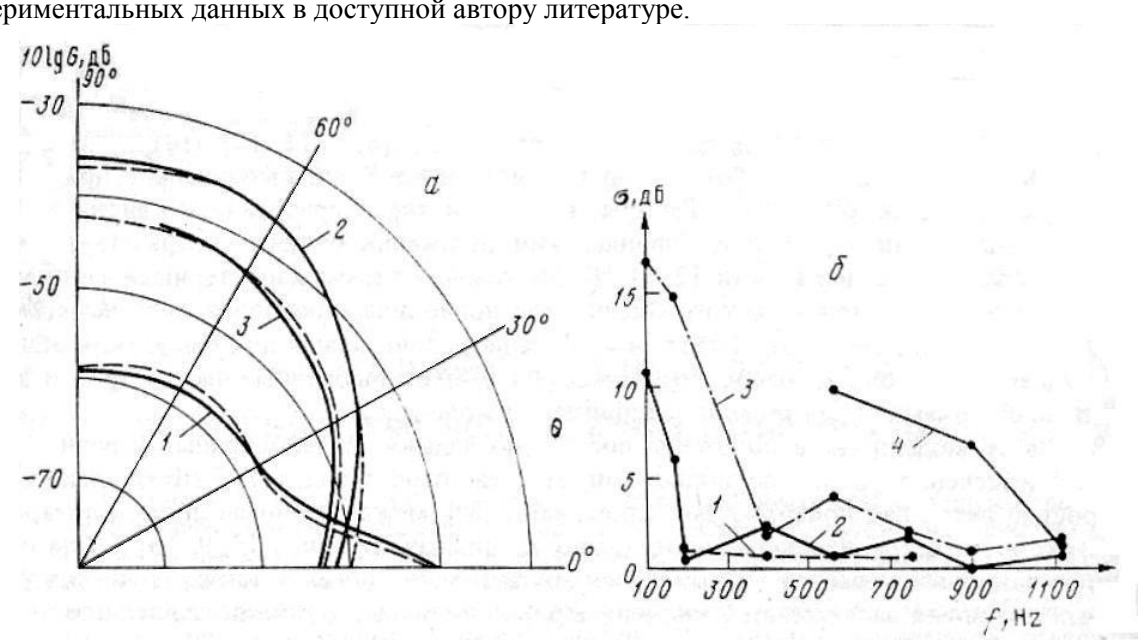


Рис. 1. Угловая зависимость шума (а) (сплошные кривые – эксперимент [3, 4], штриховые – расчет): *1* – частота 200 Гц, скорость ветра 2,5 м/с (состояние поверхности 1 балл), *2* – 750 Гц, 11 м/с (5 баллов), *3* – 1122 Гц, 17,3 м/с (7 баллов); усредненные по углу модули отклонения расчетных и экспериментальных значений уровня шума (б): *1* – для состояния поверхности 1 балл, *2* – 3 балла, *3* – 5 баллов, *4* – 7 баллов

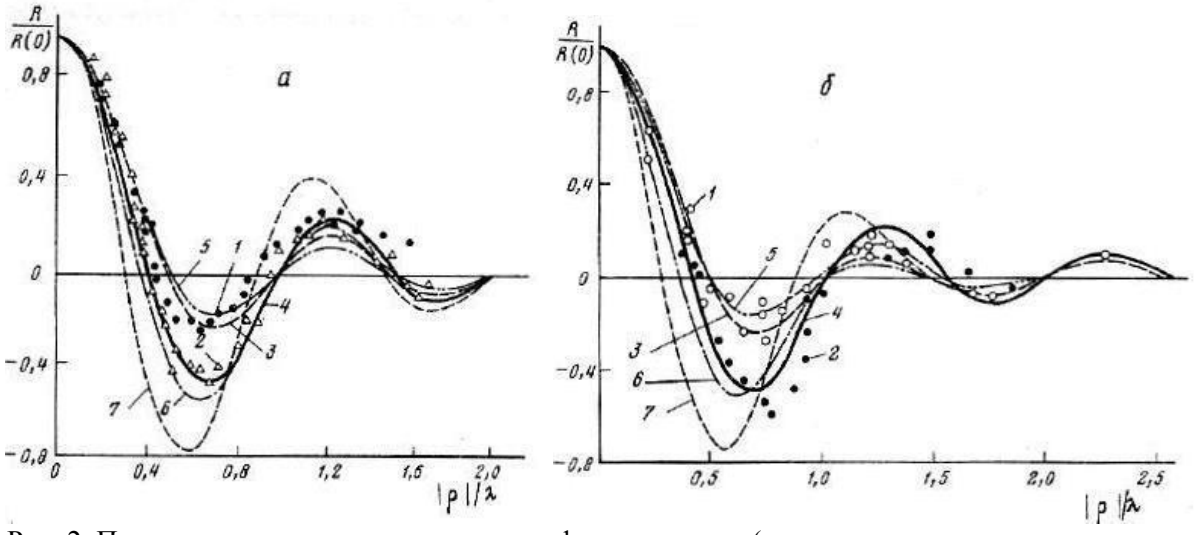


Рис. 2. Пространственные корреляционные функции шума (вертикальная ориентация приемной пары, τ=0): *а* – частота 400 Гц, *б* – 800 Гц. Экспериментальные точки [13]: *1* – для состояния поверхности 3 балла, *2* -5 баллов. Расчет по формулам (1)–(4): *3* – для состояния поверхности 3 балла, *4* – 5 баллов; расчет на основе описания направленности источников шума волнения функцией $\sin^n\theta$: *5* – n=1/2, *6* – n=1, *7* – n=2 (λ - длина волны).

Таким образом, предложенная эмпирическая модель окружающих шумов океана может быть использована для оценки частотно-угловых и корреляционных характеристик придонных шумов глубокого океана в диапазоне частот 250–1200 Гц при состоянии поверхности океана 3–7 баллов. Отметим, что предложенная модель пригодна для различных глубин места, поскольку шум глубокого океана слабо зависит от глубины места [14].

Литература

1. Фурдуев А.В. Шумы океана // Акустика океана / Под ред. Бреховских Л.М. – М.: Наука, 1974. С.615-691.
2. Wenz G.M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources // J. Acoust. Soc. Am. 1962. V.34. N12. P. 1936-1956.
3. Fox G.R. Ambient noise directionality measurements // J. Acoust. Soc. Am. 1964. V.36. N8. P. 1537-1540.
4. Axelrod E.H., Schoomer B.A., Von Winkle W.A. Vertical directionality of ambient noise in the deep ocean at a site near Bermuda // J. Acoust. Soc. Am. 1965. V.37. N1. P. 77-83.
5. Crouch W., Burt P.J. The logarithmic dependence of surface-generated ambient sea-noise spectrum level on wind speed // J. Acoust. Soc. Am. 1972. V.51. N38. Pt.2. P. 1066-1072.
6. Morris G.B. Depth dependence of ambient noise in the northeastern Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1978. V.64. N2. P. 581-590.
7. Dashen R., Munk W. Three models of global ocean noise// J. Acoust. Soc. Am. 1984. V.76. N2. P. 540-554.
8. Perrone A.J. Ambient-noise-spectrum level as a function of water depth // J. Acoust. Soc. Am. 1970. V.48. N1. Pt.2. P. 362-370.
9. Perrone A.J. Deep-ocean ambient noise spectra in the North-West Atlantic // J. Acoust. Soc. Am. 1969. V.46. N3. Pt.2. P. 762-770.
10. Высоцкая Л.С., Строкина Л.А. Средняя скорость ветра у поверхности океанов // Тр. Гос. гидрологич. ин-та. 1988. №340. С.75-82.
11. Pigott C.L. Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of Scotian Shelf // J. Acoust. Soc. Am. 1964. V.36. N11. P. 2152-2163.
12. Cron B.F., Hassel B.C., Keltonic F.J. Comparison of theoretical and experimental values of spatial correlation // J. Acoust. Soc. Am. 1965. V.37. N3. P. 523-529.
13. Arase E.M., Arase T. Correlation of ambient sea noise // J. Acoust. Soc. Am. 1966. V.40. N1. P. 205-210.
14. Cato D.H. Ambient noise in waters near Australia // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V.60. N2. P. 320-328.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ - ШОЛТЕ В ПРОБЛЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ОБЪЕКТОВ В МЕЛКОМ МОРЕ

Б.А.Касаткин, д-р физ-мат.наук, С.Б.Касаткин, канд.физ-мат.наук
ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, Россия

USE OF BOUNDARY RAYLEIGH - SHOLTE WAVES IN THE PROBLEM OF QUIET OBJECT DETECTION IN THE SHALLOW SEA

B.A.Kasatkin, Dr.Sc, S.B.Kasatkin, Ph.D.
Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russia

В работе рассматриваются особенности описания и возбуждения пограничных волн Рэлея – Шолте в модельном волноводе жидкий слой - твёрдое полупространство. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований пограничных волн Рэлея – Шолте в мелком море. Особое внимание уделено интерференционным структурам, которые формируются широкополосным источником в звуковом поле, сформированном пограничными волнами Рэлея – Шолте.

The paper discusses features of description and excitation of Rayleigh-Sholte boundary waves in a model waveguide liquid layer - solid half-space. The results of experimental studies of Rayleigh-Scholte boundary waves in a shallow sea are discussed. Particular attention is paid to interference structures, which are formed by a broadband source in a sound field formed by Rayleigh-Scholte boundary waves.

Пограничные волны различного типа всегда привлекали к себе повышенное внимание как обладающие минимальными потерями на распространение, которые соответствуют цилиндрической пространственной расходимости, и строгой локализацией на горизонте распространения. Наиболее известны и имеют практическое применение в прикладной гидроакустике и сейсмоакустике волны Рэлея, возникающие на свободной поверхности твёрдого полупространства, волны Шолте, возникающие на границе раздела жидкого и твёрдого полупространств, и волны Рэлея – Шолте, возникающие на импедансной границе раздела жидкий слой со свободной поверхностью – твёрдое полупространство. Все типы пограничных волн не имеют критической частоты и могут распространяться на любых сколь угодно низких частотах, что особенно важно в низкочастотной гидроакустике и сейсмоакустике.

Основные соотношения. Для рассмотрения пограничных волн различного типа, как регулярных, так и обобщённых, целесообразно использование несамосопряжённой модельной постановки. Несамосопряжённая модельная постановка граничных задач в акустике слоистых сред является естественным обобщением самосопряжённой модельной постановки. Особенности несамосопряжённой модельной постановки и полный анализ решений ряда граничных задач в этой модельной постановке рассмотрены нами в работах [1]-[2]. В настоящей работе нас будут интересовать особенности описания пограничных волн и звуковых полей, формируемых пограничными волнами различного типа. Для вывода необходимых соотношений воспользуемся импедансным методом, согласно которому условием существования пограничной волны как резонансного явления является условие равенства нулю суммарного входного импеданса сопряжённых сред, приведённого к границе раздела [1]. Для волны Рэлея, возникающей на свободной поверхности твёрдого полупространства, соответствующее характеристическое уравнение имеет вид [1]

$$Z_{вх}=Z_L+Z_t=0, \qquad (1)$$

$$Z_L=\omega\rho(2x-1)^2/k_{3L},\ Z_t=-4\omega\rho x(x-1)/k_{3t},\ k^2_{3L}=k^2_L-\xi^2,\ k^2_{3t}=k^2_t-\xi^2,\ x=(\xi/k_t)^2,\ \xi=\omega/c_R$$

где $Z_{вх}$ входной импеданс твёрдого полупространства, ω, ρ-круговая частота и плотность, c_L, c_t-скорости продольных и поперечных волн в твёрдом полупространстве соответственно, ξ-постоянная распространения. c_R-скорость волны Рэлея. Уравнение (1) имеет решение в классе неоднородных расходящихся волн, амплитуда которых экспоненциально убывает при удалении от свободной поверхности ($x>1$). Для волны Шолте, возникающей на границе раздела жидкого и твёрдого полупространств, соответствующее характеристическое уравнение имеет вид [1]

$$Z_{вх,2}+Z_{вх,1}=0,\ Z_{вх,1}=\omega\rho_1/k_{31},\ k^2_{31}=k^2_1-\xi^2,\ k_1=\omega/c_1,\ c_{t1}=c_t/c_1,\ \rho_{12}=\rho_1/\rho_2, \qquad (2)$$

где $Z_{вх,1}$, $Z_{вх,2}$-входной импеданс жидкого и твёрдого полупространств, ρ_1, ρ_2-плотность жидкого и твёрдого полупространств, c_1-скорость звука в жидком полупространстве.

Среди корней характеристического уравнения (2) при всех параметрах сопряжённых сред существует один корень, соответствующий условию x>1 и определяющий скорость регулярной волны Шолте $c_{Ш1}$. Кроме решения, определяющего скорость регулярной волны Шолте, уравнение (2) имеет обобщённые решения, которым соответствую обобщённые волны Шолте Lt-типа или L-типа. Обобщённая волна Шолте Lt-типа состоит из трёх неоднородных волн: расходящейся волны в жидкой среде, амплитуда которой экспоненциально убывает при удалении от границы раздела; расходящихся волн в твёрдой среде; продольной и поперечной, амплитуда которых экспоненциально растёт при удалении от границы раздела. Обобщённая волна Шолте L-типа состоит из трёх неоднородных волн: расходящейся волны в жидкой среде; расходящейся поперечной волны в твёрдой среде, амплитуда которых экспоненциально убывает при удалении от границы раздела; расходящейся продольной волны в твёрдой среде, амплитуда которой экспоненциально растёт при удалении от границы раздела. Для волны Рэлея - Шолте, возникающей на границе раздела жидкого слоя со свободной поверхностью и твёрдого полупространства, соответствующее характеристическое (дисперсионное) уравнение имеет вид [1]

$$Z_{вх,2}+Z_{вх,1}=0,\ Z_{вх,1}=i\omega\rho_1 tg(k_{31}h)/\ k_{31}, \qquad (3)$$

где h-толщина жидкого слоя, $\xi= \omega/c_{Rш}$, $c_{Rш}$ - скорость волны Рэлея - Шолте.

Среди корней характеристического (дисперсионного) уравнения (3) при всех параметрах сопряжённых сред существуют два корня, которым соответствуют две нормальные волны, не имеющие критической частоты. В предельном случае низких частот $k_1h<<1$ эти волны вырождаются в волну Рэлея, а в предельном случае $k_1h>>1$ эти волны вырождаются в пограничные волны Шолте, регулярную и обобщённую Lt-типа или L-типа [1].

Физическая трактовка обобщённых решений. Понятно, что в предложенной трактовке обобщённых решений сами обобщённые волны Шолте не удовлетворяют условиям погашаемости на бесконечности, как содержащие одну или две составляющие, амплитуды которых экспоненциально растут на бесконечности. Физической основой несамосопряжённой модельной постановки является гипотеза о возможной трансформации расходящихся неоднородных волн в сходящиеся волны отдачи при отражении от импедансной границы раздела с одновременным изменением знака вертикального волнового числа. Такая операция означает переход к комплексно - сопряжённому решению, как в описании вертикальной структуры обобщённой волны, удовлетворяющей условию погашаемости, так и в описании волновой функции. Присутствие в суммарном решении собственных функций двух сопряжённых операторов означает переход к несамосопряжённой модельной постановке, а само обобщённое решение непрерывно только по импедансу. Интерференционное взаимодействие двух встречных волн в окрестности горизонта источника приводит к формированию вихревой составляющей вектора интенсивности. В свою очередь, вихревая составляющая формирует периодическую структуру узловых точек, в окрестности которых давление равно нулю, и седловых точек, в окрестности которых вектор интенсивности равен нулю [3]. Такие локальные особенности названы в этой работе дислокациями фазового фронта, нарушающими фазовую структуру звукового поля. В отличие от стоячей волны с нулевым горизонтальным потоком мощности, обобщённая гибридная волна представляет собой слоистую (по вертикальной координате) структуру чередующихся расходящихся волн и сходящихся волн отдачи, в которой формируется отличный от нуля горизонтальный поток мощности. Лучевая трактовка гибридной волны поясняется рис.1.

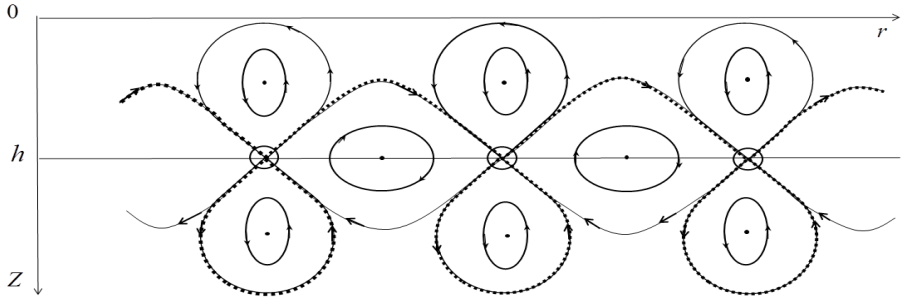


Рис. 1. Лучевая трактовка обобщённой (гибридной) волны и вихревых структур в окрестности горизонта трансформации, X-седловые точки, ●-узловые точки.

Экспериментальные результаты. Теоретическому и экспериментальному исследованию пограничных волн Рэлея Шолте посвящено достаточно большое количество работ, краткий обзор которых приведён в работе [1, 2]. Наиболее интересна, на наш взгляд, работа [4], в которой экспериментально подтверждён факт существования обобщённых волн Шолте Lt-типа и L-типа. В работах [5, 6] описаны эксперименты, в которых для возбуждения волн Шолте также использован импульсный источник силы дипольного типа, расположенный на границе раздела вода – морское дно осадочного типа. При возбуждении звукового поля в волноводе широкополосным источником на низких частотах, меньших первой критической, звуковое поле формируется пограничными волнами Рэлея – Шолте, а на высоких частотах - нормальными волнами высшего порядка. Эти звуковые поля, условно говоря, низкочастотное и высокочастотное, отличаются значением инварианта пространственно - частотной интерференционной структуры [7]. Для низкочастотного звукового поля инвариант принимает отрицательные значения. Для высокочастотного звукового поля инвариант принимает положительные значения, близкие к единице. На рис.2 (см. вклейку) приведена 3D сонограмма в координатах частота – время наблюдения - уровень (дБ) для суммарного звукового поля (сигнал плюс помеха), создаваемого движущимся судном, в акватории со скальным грунтом. Глубина места в районе эксперимента составляла 80 м, горизонт приёмника, в качестве которого использовался комбинированный приёмник, составлял 40 м, скорость поперечной волны в скальном грунте составляла 900-1000 м/с. Звуковое поле такого источника в области звуковых частот формируется сплошным спектром шумов обтекания, а в области инфразвуковых частот - дискретными составляющими вально – лопастного звукоряда (ВЛЗР). На сонограмме хорошо видны две структуры изолиний равной интенсивности (ИРИ), которым соответствуют различные по знаку инварианты. В диапазоне частот, больших 50Гц, в котором звуковое поле сформировано в основном нормальными волнами высшего порядка, инвариант принимает значение, близкое к единице. В этом случае ИРИ имеют вид гипербол, вогнутых «подошвой» вниз в точке траверза. В области инфразвуковых частот звуковое поле сформировано дискретными составляющими ВЛЗР. Для этой части звукового поля инвариант является отрицательным. Структура звукового поля такова, что ИРИ имеют вид гипербол, выгнутых «подошвой» вверх в точке траверза.

Выводы. При возбуждении низкочастотных звуковых полей в мелководных акваториях со скальным грунтом пограничные волны Рэлея – Шолте играют важную роль, т.к. для них потери на распространение являются минимальными. В звуковом поле широкополосного движущегося источника инвариантная структура проявляется двояким образом. Для низкочастотной части звукового поля инфразвукового диапазона, которая формируется пограничными волнами Рэлея – Шолте, инвариант принимает отрицательные значения. Для высокочастотной части звукового поля звукового диапазона, которая формируется в основном нормальными волнами высшего порядка (водными модами), инвариант принимает положительные значения, близкие к единице, которые характерны для звукового поля в однородном волноводе.

Литература

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. Москва. Наука, 2009. 406с.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Вихревой осциллятор в волноводе Пекериса // Подводные исследования и робототехника. –2016. –№ 1 (21). –С. 46-55.
3. Журавлёв В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта //ЖЭТФ, 1993,т.104, вып. 5(11), с. 3769-3783.
4. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid - sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid //J. Acoust. Soc. Amer. 1999. Vol. 106(2). P. 666-673.
5. Ali H.B., Bibee L.D. The influence of sediment layering and geoacoustics on the propagation of Sholte interface waves // Proc. OCEANS-93, P. 1-105-P. 1-113.
6. Broadhead M.R. Ali H.B., Bibee L.D. Sholte waves attenuation estimates from two diverse test sites // Proc. OCEANS-93, P. 1-114-P. 1-118.
7. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. Акустика океана. Современное состояние. М. Наука,1982. С.71-91

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ

И.В.Матвеева, Е.Л.Шейнман, канд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия

USE OF EFFECT OF DOPLER FOR THE ASSESSMENT OF COORDINATES OF OBJECT IN THE MULTISTATIC HYDROLOCATION

I.V.Matveeva, E.L.Sheynman, Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia
Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Russia

Рассматривается использование эффекта Доплера в режиме мультистатической гидролокации. Показана возможность для гибкой протяженной буксируемой линейной антенны (ГПБА) в ряде случаев снятия неопределенности оценки пеленга и уточнения оценки координат цели, а для ненаправленного излучателя и нескольких ненаправленных приемных гидроакустических станций решить задачу идентификации обнаруженных объектов и определить их оценки координат. Показана работоспособность разработанных алгоритмов.

Use of Doppler effect in the multistatic hydrolocation mode is considered. For the towed linear antenna possibility of solving the problem of bearing assessment uncertainty and more accurate assessment of target coordinates in some cases is shown, as well as possibility for nondirectional radiator and several nondirectional receiving sonar systems of solving the problem of detected objects identification and their coordinates estimation. Operability of the developed algorithms is shown.

В настоящее время координаты и параметры движения целей в гидроакустических комплексах в режиме мультистатической гидролокации определяются по информации о пеленге и дистанции, по алгоритмам, разработанным в [5]. Однако такой подход позволяет решить задачу в ограниченном числе случаев. Основная проблема оценки координат для направленной линейной антенны ГПБА заключается в неопределенности пеленга цели (неопределенности борта цели), связанной с симметричностью ДН такой антенны.

Для ненаправленных антенн оценки координат производятся в предположении, что имеется только одна цель. Задача идентификации (отождествления) целей обнаруженных в разнесенных приемных системах до настоящего времени не решалась. Для решения этих задач необходимо привлечение дополнительной информации. В работе рассматривается возможность преодолеть указанные недостатки с помощью использования эффекта Доплера.

На Рис. 1 приведена схема распространения сигнала при разнесенном излучении (источник сигнала «И») и приеме на приемники П1 и П2. Ось Y совпадает с направлением на север. Центр системы координат совмещен с положением излучателя зондирующего сигнала (X_0, Y_0). Пр1 и Пр2 – гидроакустические приемные системы с известными координатами (X_1, Y_1) и (X_2, Y_2), в которых принят эхосигнал. $Z(t_i)$ – объект в момент времени t_i. $D_0(t_i)$ и $D_j(t_i)$– расстояния в момент времени t_i между излучателем и объектом и между объектом и j-м приемником соответственно. Индекс j=0 характеризует излучатель, j=1, 2, … – характеризует номер приемной системы. $П_0(ti)$ и $П_j(ti)$ – пеленг на объект с излучателя и j-го приемника соответственно в момент времени ti. V и K– скорость и курс объекта соответственно.

При разнесенном излучении-приеме можно оценить суммарное расстояние от излучателя до объекта и от объекта до *j*-го приемника в момент времени t_i ($R_j(t_i)$) и суммарную радиальную скорость объекта ($V_{rj\sum}(t_i)$), измеряемую с помощью эффекта Доплера.

Известно, что при ненаправленной приемной системе наблюдения дистанция до обнаруженного объекта в приемной системе рассчитывается по формуле:

$$D_1(t_i) = \frac{R^2_{\sum}(t_i) - L^2}{2R_{\sum}(t_i) - 2L\cos\alpha} \quad .$$

где α - угол между отрезками «излучатель-приемник» и «цель-приемник»; $R_{\sum}(t_i)$ - сумма расстояний «излучатель-цель» и «цель-приемник»; $R_{\sum} = \left(t_{\text{пр}} - t_{ои}\right) * \text{C}$; $t_{\text{пр}} -$ время приема сигнала; $t_{ои} -$ время окончания излучения сигнала.

В [1-4] приведено выражение для частоты эхосигнала с учетом эффекта Доплера:

$$f_{\text{пр}} \approx f_{\text{изл}}\left(1 + \frac{V_{r\sum}}{c}\right).$$

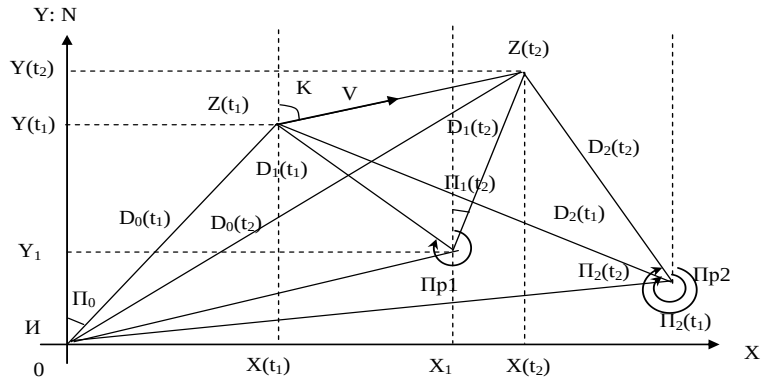


Рис. 1. Полистатическая локация. Объект обнаружен в двух приемных системах.

Для движущихся объекта и приемной системы:

$$V_{r\Sigma}(t_i) = V\cos\left[\text{К} - \Pi_{\text{пр}}(t_i)\right] + V\cos[\text{К} - \Pi_{\text{и}}(t_i)] + V_{\text{из}}\cos[\text{К}_{\text{из}} - \Pi_{\text{и}}(t_i)] + V_{\text{пр}}\cos\left[\text{К}_{\text{пр}} - \Pi_{\text{пр}}(t_i)\right]$$

Можно показать, что оценки скорости и курса определяются как решение системы уравнений для суммарной скорости, полученной в два момента времени t_1 и t_2 [8-10]. Пеленг на цель излучающей системы может быть известен, если цель обнаружена в режиме моностатической гидролокации в излучающей системе или определен по оценкам пеленга и дальности до цели, полученной в приемной системе.

Можно показать, что использование дополнительной информации, основанной на эффекте Доплера позволяет снять неопределенность борта цели при курсе ГПБА не совпадающем с направлением базы между разнесенными излучателем и приемником [9, 10]. Определение борта цели основано на том, что истинные оценки скорости и курса цели, полученные разными методами, основанными на различной физической природе, должны совпадать. Было проведено моделирование, которое показало правильность таких соображений. Показано, что для истинного пеленга на цель оценки скорости и курса, полученные двумя способами совпадают. Для «зеркального» пеленга различаются либо оценки этих двух параметров, либо хотя бы одного из них, с учетом погрешности полученных оценок, в зависимости от курса объекта. Уточнение оценок скорости и курса объекта достигалось при использовании усреднения разовых оценок параметров, полученных по двум методам, с учетом погрешности измерения. В настоящей работе предлагается другой способ уточнения оценок параметров после определения борта цели, основанный на использовании фильтра Калмана по истинному вектору данных наблюдения. Такой подход позволяет уточнить оценки параметров по всей информации, полученной за время наблюдения.

Особую сложность решение задач идентификации обнаруженных объектов и оценки их координат представляет наличие ненаправленного приема в режиме мультистатической гидролокации. Эта задача возникает при обнаружении сигнала системой ненаправленных радиогидроакустических буев (РГБ).

При ненаправленном приеме в ряде случаев не хватает информации для решения задач идентификации объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения и оценки их координат.

Рассмотрим решение задачи совместной идентификации обнаруженных объектов и оценки их координат в предположении равномерного и прямолинейного движения объекта и неподвижности излучателя и приемников сигнала.

Для ненаправленных неподвижных систем наблюдения при разнесенном излучении-приеме в момент времени t_i можно записать систему уравнений, решение которой определяет оценки координат в декартовой системе координат и оценки скорости и курса объекта.

$$R_j(t_i) = D_0(t_i) + D_j(t_i) \quad \text{или} \quad R_j(t_i) = \sqrt{X(t_i)^2 + Y(t_i)^2} + \sqrt{\left[X_j - X(t_i)\right]^2 + \left[Y_j - Y(t_i)\right]^2},$$

$$V_{rj\Sigma}\ (t_i) = V_{rj}(t_i) + V_{r0}(t_i) = V\cos\left(K - \Pi_j(t_i)\right) + V\cos\left(K - \Pi_0(t_i)\right),$$

где $\Pi_j(t_i) = \begin{cases} C_j(t_i), & 0 < C_j(t_i) < \pi, \\ C_j(t_i) + 2\pi, & -\pi < C_j(t_i) < 0, \\ C_j(t_i) - 2\pi, & \pi < C_j(t_i) < 2\pi. \end{cases}$, $C_j(t_i) = \text{arctg}(\dfrac{X(t_i) - X_j}{Y(t_i) - Y_j})$ в пределах [- π; π].

Рассматриваемой системе уравнений удовлетворяют два корня оценок координат объекта. То есть, при наличии разового обнаружения сигнала двумя ненаправленными приемниками не хватает информации ни для решения задачи идентификации, ни для снятия неоднозначности определения координат объекта при гипотезе об обнаружении одного объекта разнесенными приемными системами. Решение этих задач возможно при слежении за объектом во времени и решении задач идентификации объекта совместно с оценкой координат. Предлагается следующая последовательность решений.

Для гипотезы об обнаружении двумя приемниками одного объекта при первичном обнаружении осуществляются оценки координат, с использованием которых делается прогноз текущих координат объекта на заданное время. В следующие моменты времени (при последующих циклах зондирования) снова делаются оценки координат при гипотезе обнаружения только одного объекта, которые сравниваются с прогнозируемыми оценками параметров по алгоритмам идентификации по параметрам. Если прогнозные оценки и оценки, выработанные на текущем шаге, совпадают, то вырабатывается решение об идентификации обнаруженных двумя приемниками объектов и им присваиваются выработанные оценки координат. В противном случае объекты считаются различными. При обнаружении двумя приемниками нескольких объектов гипотеза об обнаружении только одного объекта делается для всех возможных сочетаний сигналов объектов в двух приемниках. Неопределенность выработки решения снимается при наблюдении за объектами в последующие моменты времени. Объекты считаются идентифицированными, если $\min\Delta_{ij}<\varepsilon$. Здесь i, j − номера значений гипотез о координатах объектов, выработанных в соответствующий момент времени и прогнозные соответственно; Δ_{ij} - взаимные расстояния между векторами оценок параметров и прогнозных значений: $\Delta_{ij} = (W_i - W_j^{\text{прогн}})^T (K(W_i) + K(W_j)^{\text{прогн}})^{-1} (W_i - W_j^{\text{прогн}})$, W_i, W_j − вектора оценок текущих координат объекта; $K(W_i)$, $K(W_j)$ − соответствующие ковариационные матрицы векторов параметров ε − заданное пороговое значение [7].

При наличии разового обнаружения объекта одновременно тремя и более разнесенными системами решение об идентификации принимается следующим образом. По данным систем обнаружения «*a*» и «*b*» определяются гипотетические оценки координат и параметры движения объекта. Вырабатываются гипотетические вектора параметров W_{ab}. По данным систем обнаружения «*c*» и «*b*» определяются гипотетические оценки координат и параметры движения объекта. Вырабатываются гипотетические вектора параметров W_{cb}. Ищется расстояние между этими оценками векторов параметров. Принимается решение об идентификации тех объектов, для которых минимум расстояния между параметрами меньше порогового значения.

Анализ работоспособности алгоритма совместной идентификации сигналов и оценки координат объектов, обнаруженных в ненаправленных системах в мультистатическом режиме гидролокации, проводился с помощью модельного эксперимента (рис. 2).

Показано, что в каждый момент времени значению курса объекта удовлетворяет хотя бы одно из найденных значение курса «истинный» или «альтернативный» и хотя бы одно из значений скоростей. Показано, что в предположении прямолинейного движения объекта для различных тактических ситуаций расположения системы «излучатель-цель-приемник», различных курса и скорости движения, пользуясь прогнозными оценками координат, можно произвести идентификацию и снять неоднозначность решения задачи. Пример моделирования движения объекта приведен на рис. 3. Здесь приведена истинная трасса движения объекта с координатами (X, Y), ложная трасса движения объекта (X’, Y’) и прогнозы движения истинной и ложной траектории движения объекта. Видно, что прогнозные оценки координат движения для двух корней системы совпадают только с истинными координатами объекта.

При моделировании обнаружения двух объектов в системе, мы получаем от них различные суммарные радиальные скорости и суммарные дистанции, что привело к определению их местоположения как двух самостоятельных объектов.

При использовании трех приемников также возможно устранение неоднозначности решения. На рис. 3 в качестве примера приведены траектории движения объекта истинные и ложные, полученные по информации различного сочетания пар приемных систем. Видно, что толь-

ко одно из решений – истинное совпадает у всех пар приемников, что продемонстрировано на рисунке.

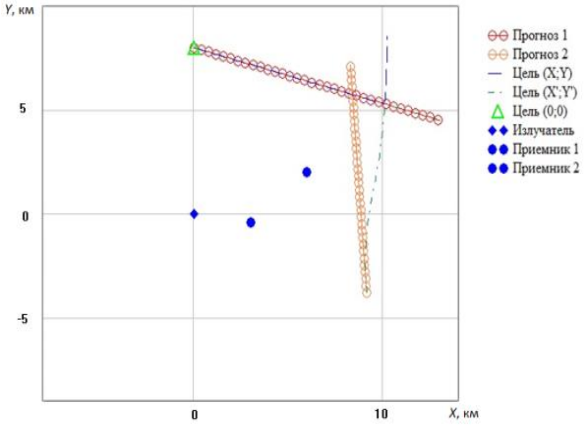


Рис. 2. Модель движения цели и прогноз текущих координат объекта при мультистатической гидролокации. Две приемные системы

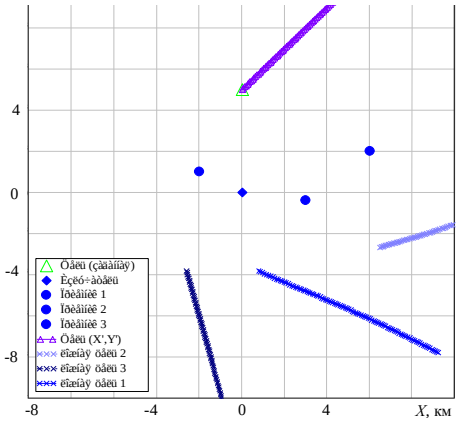


Рис. 3. Модель движения цели при мультистатической гидролокации. Три приемные системы.

Таким образом, показана работоспособность алгоритмов решения задачи совместной идентификации и оценки координат объектов, в режиме мультистатической гидролокации, при ненаправленных приемных системах.

Литература

1. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. - Минск: Наука и техника, 1978.
2. Аббакумов К.Е., Антонюк Е.М., Филатов Ю.В. Элементарные основы информационного обмена в волновых полях. - СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006.
3. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. - М.: Оборонгиз, 1968.
4. Сташкевич А.П. Акустика моря. - Л.: Судостроение, 1966.
5. Колесниченко В.В., Соскунова И.А., Школьников И.С., Шутов А.Л. Вопросы точности определения координат и параметров движения цели //Гидроакустика Вып. 17 (1) 2013 С. 61-72.
6. Басин Ю.А., Школьников И.С. Эффект Доплера в бистатическом гидролокаторе. // Судостроительная промышленность. 1987. Сер.«Акустика». №11. С. 29-31.
7. Жандаров А.М. Идентификация и фильтрация измерений состояния стохастических систем. М.: Наука, 1979.
8. Шейнман Е.Л., Школьников И.С. Идентификация сигналов и оценка координат объектов, обнаруженных в ненаправленных системах при бистатическом и полистатическом режимах гидролокации. //Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010. СПб.: Наука. 2010. С. 416 – 418.
9. Матвеева И.В., Шейнман Е.Л., Школьников И. С. Эффективность определения параметров движения морских объектов при бистатической локации перемещающихся систем наблюдения // Гидроакустика. 2016. Вып. 26. С. 28−33.
10. Матвеева И.В., Шейнман Е.Л. Определение текущих координат цели в бистатическом режиме гидролокации при неопределенности оценки пеленга на цель// Гидроакустика. 2017. Вып. 31(3). С. 9−12.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НЕГАУССОВОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ШУМОПЕЛЕНГАЦИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

О.А.Андреев, А.Т.Трофимов, д-р техн.наук
АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Московская область, Россия

ANALYSIS OF NON-GAUSSIAN CHARACTERISTICS OF LOW FREQUENCY HYDROACOUSTIC NOISE DETECTION SIGNALS OF MARINE OBJECTS

O.A.Andreev, A.T.Trofimov, Dr.Sc.
JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Moscow region, Russia

Для описания вероятностных распределений гидроакустических сигналов широко используется гауссовская вероятностная модель. Основаниями для её использования служат визуальное сходство нормальной плотности распределения вероятности и гистограмм экспериментальных данных, а также относительная простота вычислений. В работе показано, что гауссовская вероятностная модель зачастую не позволяет адекватно описать вероятностные характеристики низкочастотных гидроакустических сигналов, что требует применения иных вероятностных моделей, таких как, например, полигауссовские вероятностные модели.

The Gaussian probability model is commonly used to describe probability distributions of hydroacoustic signals. The grounds for its use are the visual similarity of the normal probability density with histograms of experimental data and the relative simplicity of calculation. In the paper it is shown that the Gaussian probability model often does not allow to adequately describe probabilistic characteristics of low frequency hydroacoustic signals, which requires the use of other probability models, such as polygaussian probability models.

Решение любой задачи с использованием статистических методов требует знания вероятностных моделей наблюдаемых процессов. Если вероятностная модель известна, а её параметры вычислены (подобраны) правильно, статистические методы позволяют получить оптимальное решение задачи. Выбор неподходящей вероятностной модели или неточности при вычислении её параметров приводят к невозможности достижения требуемых результатов.

Наиболее известной и широко используемой является гауссовская вероятностная модель, согласно которой значения измеряемого параметра наблюдаемого процесса подчиняются нормальному закону распределения вероятности. Данная вероятностная модель хорошо изучена и позволяет описать большое количество разнообразных явлений.

Указанная вероятностная модель часто используется для описания гидроакустических сигналов и классификационных признаков морских объектов. В работе [1] было показано, что вследствие ряда причин гидроакустические сигналы могут иметь ярко выраженные негауссовские

распределения, что требует применения иных вероятностных моделей, таких как, например, полигауссовские вероятностные модели (ПВМ) [2].

В настоящей работе проводится анализ характеристик негауссовости низкочастотных гидроакустических сигналов шумопеленгации морских объектов с целью демонстрации негауссовского в общем случае характера их вероятностных распределений и обоснования необходимости применения ПВМ.

Модифицированный критерий хи-квадрат. В качестве критерия негауссовости исследуемых вероятностных распределений нами использовался модифицированный критерий хи-квадрат. Причины предпочтительности его использования, процедуры формирования и проверки нормальности функции распределения подробно описаны в [3] и [4].

Для случая, когда математическое ожидание и дисперсия случайной величины X неизвестны, статистика для проверки гипотезы H_0, согласно которой распределение случайной величины X подчиняется нормальному закону распределения вероятности, имеет следующий вид (1).

$$Y^2 = X^2 + \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{k} \varepsilon_i \nu_i\right)^2 + \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{k} \omega_i \nu_i\right)^2, \quad (1)$$

$$X^2 = \frac{k}{n}\sum_{i=1}^{k} \nu_i^2 - n, \quad (2)$$

где ν – вектор частот попаданий центрированных и нормированных на оценку СКО случайных взаимно независимых величин $X_1, \dots, X_n$ по выбранным k равновероятным полуинтервалам; n – количество измерений случайной величины X; ε_i и ω_i – вычисляемые для каждого полуинтервала весовые коэффициенты для оценки симметричности вероятностного распределения и значимости его хвостов соответственно (рис. 1).

Гипотеза H_0 отклоняется в случае превышения статистикой Y^2 критического значения на уровне значимости α. Критические значения для различных α приводятся в [4].

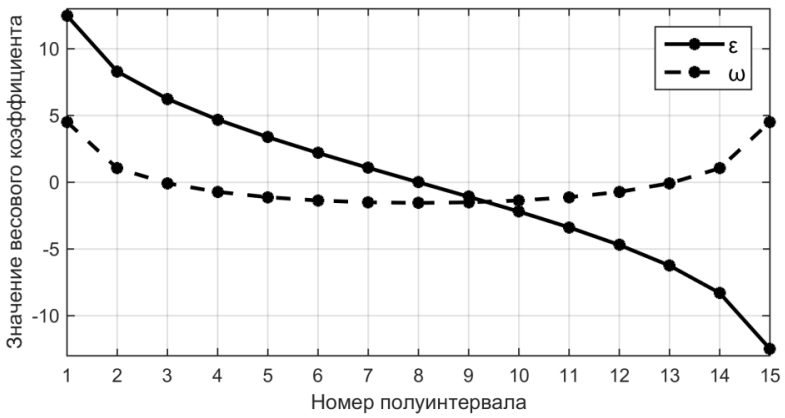


Рис. 1. Значения весовых коэффициентов ε_i и ω_i для 15 полуинтервалов разбиения стандартного нормального распределения; восьмой полуинтервал является центральным.

Преобразования исходных данных. Исходные данные представлены выборками энергетических спектров низкочастотных гидроакустических сигналов шумопеленгации морских объектов. Согласно иерархической вероятностной модели энергетических спектров низкочастотных гидроакустических сигналов, предлагаемой в [1], частотный диапазон делится на интервалы.

Для исходных данных на выбранном интервале вычисляются собственные вектора корреляционной матрицы. Матрица, составленная из вычисленных собственных векторов, позволяет спроецировать исходные данные на выбранном интервале в такое пространство, в котором их ковариационная матрица будет иметь диагональный вид, т.е. отсчеты проекции будут являться некоррелированными. Указанное преобразование линейно и не меняет характера вероятностного распределения данных.

Каждый отсчет проекции центрируется и нормируется на оценку СКО, в результате чего ковариационная матрица проекции принимает единичный вид. В случае справедливости гипотезы H_0 распределение каждого отсчета проекции должно подчиняться стандартному нормальному закону (нормальный закон распределения с $m = 0,\ \sigma = 1$). Указанному закону также должен подчиняться результат конкатенации отсчетов проекции, как по выбранному интервалу, так и по всем интервалам.

Негауссовость исходных данных. В качестве исходных данных была взята выборка энергетических спектров сигналов шумопеленгации надводного корабля; по результатам деления частотного диапазона на интервалы получена выборка анализируемых данных (рис. 2, а). Цветом кодируется энергия отсчетов, пересчитанная в дБ. На выбранном частотном интервале наблюдается ярко выраженная дискретная составляющая сигнала шумопеленгации, её особенностями являются смещение частоты и значительная вариация энергии.

По результатам преобразования анализируемых данных были получены оценки вероятностных распределений некоторых отсчетов проекции в виде гистограмм (рис. 2, б-в). Аналогичная оценка также получена для результата конкатенации отсчетов проекции (рис. 2, г). Сплошной линией обозначена плотность распределения вероятности стандартного нормального распределения. Для полученных оценок приведены вычисленные значения статистик Y^2 и X^2.

Критическое значение статистики для 15 выбранных интервалов при уровне значимости $\alpha = 0{,}01$ составляет 26,464.

Как видно из рис. 2, статистики Y^2 и X^2 превышают критическое значение, следовательно, гипотеза о нормальности распределения отвергается. Заметим, что для других морских объектов часто встречается ситуация, когда по статистике X^2 гипотеза H_0 принимается, а по Y^2 – отвергается из-за значительной асимметрии оценки распределения.

Визуализация негауссовости при помощи ПВМ. Характер вероятностных распределений также можно оценить визуально при помощи иерархической вероятностной модели энергетических спектров низкочастотных гидроакустических сигналов, относящейся к классу ПВМ.

Данные в желаемом интервале проецируются с использованием двух произвольно выбранных собственных векторов их корреляционной матрицы. Тогда по результатам оценивания параметров используемой вероятностной модели для каждого интервала и данных в целом могут

быть визуализированы оценки плотностей распределений вероятности исследуемых данных в виде гистограмм особого типа.

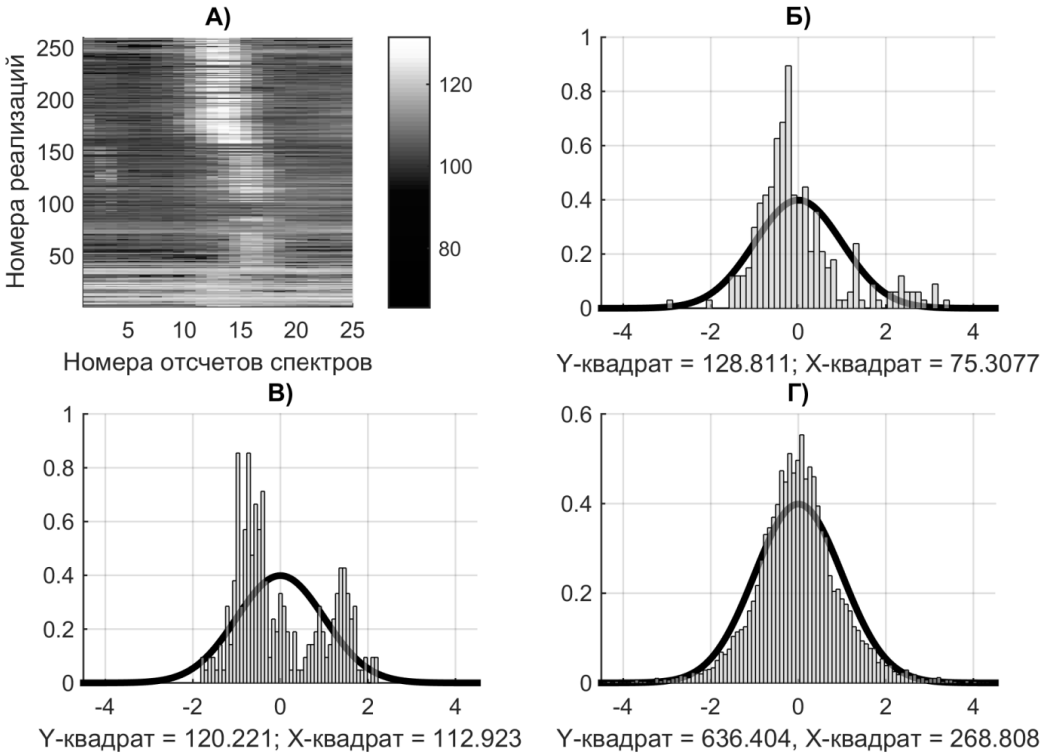


Рис. 2. Характеристики негауссовости энергетических спектров низкочастотных сигналов шумопеленгации надводного корабля на выбранном частотном интервале.

На рис. 3 в осях выбранных собственных функций, именуемых главными компонентами (ГК), построены гауссовские компоненты полигауссовской плотности распределения вероятности, полученной по результатам процесса оценивания плотности распределения вероятности спроецированных данных на желаемом интервале. Каждый эллипс соответствует гауссовской компоненте; его местоположение задается математическим ожиданием компоненты, а ориентация – её ковариационной матрицей. Граничная линия эллипса рисуется на уровне 3σ. Столбец в центре эллипса показывает априорную вероятность принадлежности реализации данных к текущей компоненте.

На рис. 4 представлена полигауссовская плотность распределения вероятности, формируемая компонентами, продемонстрированными на рис. 3. Как видно из рис. 3 и 4, вероятностное распределение энергетических спектров на выбранном интервале имеет явно негауссовский характер.

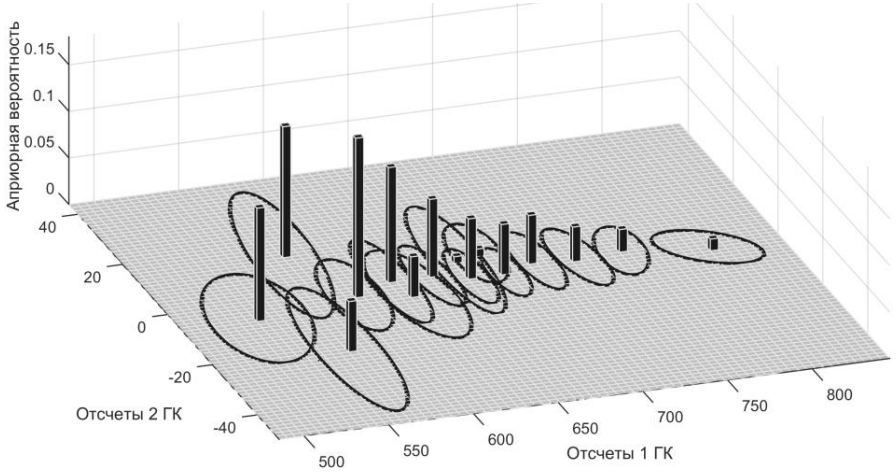


Рис. 3. Гауссовские компоненты полигауссовской плотности распределения вероятности энергетических спектров сигналов шумопеленгации надводного корабля на выбранном частотном интервале.

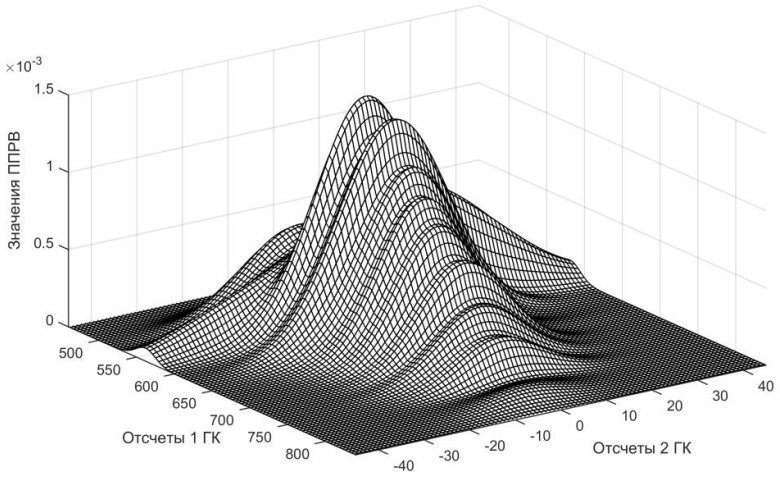


Рис. 4. Вид полигауссовской плотности распределения вероятности (ППРВ) энергетических спектров сигналов шумопеленгации надводного корабля на выбранном частотном интервале. Координатные оси на рисунке повернуты для удобства восприятия.

Заключение. По результатам анализа энергетических спектров экспериментально полученных низкочастотных сигналов шумопеленгации морских объектов был продемонстрирован негауссовский характер их вероятностных распределений, что позволило обосновать необходимость применения полигауссовских вероятностных моделей для представления подобных данных.

Литература

1. Андреев О.А., Трофимов А.Т. Полигауссовская вероятностная модель энергетических спектров низкочастотных гидроакустических сигналов // Тр. XIII всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – С.-Пб, 2016. – 516 с. – С. 399-401.
2. Трофимов А.Т. Полигауссовские вероятностные модели и синтез информационных систем // НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2002. – 183 с.
3. Глухов В.В, Марасанов Л.О. Применение модифицированного критерия согласия хи-квадрат для определения вида функции распределения//Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Навигация и УВД». 2007. №121. С. 94-102.
4. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с. – С. 231.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПЕЛЕНГОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА

И.В.Казначеев, Г.Н.Кузнецов[1], канд.физ-мат.наук, В.М.Кузькин[1], д-р физ-мат.наук,
С.А.Пересёлков, д-р физ-мат.наук
Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

INTERFEROMETRIC METHOD OF ESTIMATION OF SOUND SOURCE DIRECTION

I.V.Kaznacheev, G.N.Kuznetsov[1], Ph.D., V.M.Kuz'kin[1], Dr.Sc., S.A.Pereselkov, Dr.Sc.
Voronezh State University, Voronezh, Russia
[1]A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

Изложен интерферометрический метод пеленгования широкополосного источника звука в океаническом волноводе с применением векторно-скалярных приемников, основанный на двукратном преобразовании Фурье интерференционной картины, формируемой во время движения. По результатам натурного эксперимента проведено сравнение эффективности пеленгования предлагаемым методом с методом, использующим измерение времен задержек сигналов, приходящих на разнесенные скалярные приемники. Рассмотрена помехоустойчивость интерферометрического метода пеленгования.

The interferometric method of estimation of broadband sound source direction in oceanic waveguide by vector-scalars receivers is presented. The method is based on 2D Fourier transform of the interference pattern formed during source motion. The efficiency of the proposed interferometric method and classical method based on measuring of the arriving signals delay times at spaced scalar receivers are compared within framework of the natural experiment. The noise immunity of interferometric method of estimation of sound source direction is considered.

Волновод считается горизонтально-однородным. Векторно-скалярные приемники (ВСП) Q_1 и Q_2 расположены на оси абсцисс системы координат (x, y), оси x ВСП совпадают с положительным направлением абсциссы. Горизонтальное расстояние r между источником и ВСП много больше расстояния d между ними, $r \gg d$. Источник движется со скоростью v. Характерный частотный масштаб изменения модуля квадрата спектра сигнала много больше характерного масштаба квадрата модуля передаточной функции, так что применим интерферометрический метод локализации источника [1, 2], разработанный применительно к постоянному спектру.

Давление P и горизонтальную компоненту колебательной скорости V_x запишем в виде

$$P = \sum_m A_m \exp[ih_m(\omega)r], \tag{1}$$

$$V_x = \frac{\cos\theta}{\rho\omega} \sum_m A_m h_m(\omega) \exp[ih_m(\omega)r], \tag{2}$$

где A_m и h_m – амплитуда и постоянная распространения m-й моды, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, ρ – плотность водной среды, θ – азимутальный угол направления на источник. Выражение для составляющей V_y получается из (2) заменой $\cos\theta$ на $\sin\theta$. Постоянный множитель, характеризующий спектр, опущен. От переменной r перейдем к переменной времени t. Используя (1), (2), запишем интерферограммы составляющих потока мощности $W_{x,y} = PV_{x,y}^*$ и применим к ним двукратное преобразование Фурье

$$F_{W_{x,y}}(\tau, \tilde{\nu}) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} W_{x,y}(\omega, t) \exp[i(\tilde{\nu}t - \omega\tau)] v_r d\omega\, dt, \tag{3}$$

трактуемое как спектрограмма интерферограммы $W_{x,y}(\omega, t)$. Здесь $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$ и τ – циклическая частота и время спектрограммы соответственно; $v_r = v\cos\varphi$ – радиальная скорость источника, φ – угол между направлением на приемник и вектором скорости источника в горизонтальной плоскости; $\Delta\omega$ – ширина спектра; Δt – время траекторного когерентного накопления.

В качестве критерия обнаружения источника принимается наличие ярко выраженного пика сигнала, преобладающего над помеховыми пиками, функции

$$\mathrm{P}_{V_r}[\varepsilon_*(q)] = \int_0^{\tau_1} \left|F_{V_r}\left[\tau(q), \nu\left(\tau(q)\right)\right]\right| \sqrt{1 + \varepsilon_*^2(q)}\, d\tau, \tag{4}$$

определяющей угловой коэффициент прямой $\nu = \varepsilon\tau$, на которой расположены главные максимумы спектрограммы интерферограммы $W_r = PV_r$ при входном отношении сигнал/помеха (с/п) q. Здесь $|V_r|^2 = |V_x|^2 + \left|V_y\right|^2$; τ_1 – временной интервал локализации спектральной плотности; ε_*

– варьируемое значение углового коэффициента ε. За оценку $\varepsilon(q)$ принимается положение главного максимума, $\max P_{V_r}[\varepsilon_*(q)] = P_{V_r}[\varepsilon(q)]$. Функцию (4) назовем функцией обнаружения. После обнаружения источника проводится итерационная процедура оценки азимута.

На первом шаге определяется отношение модулей спектрограмм $F_{W_y}(\tau, \nu)$ и $F_{W_x}(\tau, \nu)$ в точке (τ_1, ν_1) положения первого главного максимума

$$|\mathrm{tg}\theta| = \frac{\left|F_{W_y}(\tau_1, \nu_1)\right|}{\left|F_{W_x}(\tau_1, \nu_1)\right|}. \quad (5)$$

Для отслеживания плавного изменения азимута следует использовать каскадное траекторное накопление. В начальный момент времени $t_0 = 0$ осуществляется траекторное накопление в течение времени Δt. Далее в момент времени $t_1 = t_0 + t'$ проводится следующее траекторное накопление в течение времени Δt и т.д. Алгоритму (5) свойственна неоднозначность: значения углов $\pm\theta$, $\pi \pm \theta$ равнозначны.

На втором шаге область спектрограмм за пределами зоны фокусировки очищается от помехи и выполняется двукратное обратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограмм источника. Рассматривается знак отношения действительных (мнимых) частей интерферограмм горизонтальных проекций потока мощности

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{\mathrm{Re}W_y}{\mathrm{Re}W_x}. \quad (6)$$

Если $\mathrm{tg}\theta > 0$, то азимут расположен в первом или третьем квадрантах ВСП, если $\mathrm{tg}\theta < 0$, то – во втором или четвертом квадрантах.

На третьем шаге определяется квадрант ВСП, в котором расположен пеленг. Для этого можно воспользоваться, например, временным представлением одной из очищенной от помехи интерферограммы. Регистрируется знак временной задержки μ между огибающими потока мощности $s_{W_x}(Q_1, t)$ и $s_{W_x}(Q_2, t + \mu)$ ВСП $Q_{1,2}$. Если $\mu > 0$, источник расположен в первом квадранте $(\mathrm{tg}\theta > 0)$ или в четвертом квадранте $(\mathrm{tg}\theta < 0)$. И, наоборот, если $\mu < 0$, то – во втором квадранте $(\mathrm{tg}\theta < 0)$ или в третьем квадранте $(\mathrm{tg}\theta > 0)$. Таким образом, правило знаков позволяет выбрать однозначное направление на источник, определенное на первом шаге.

Эксперимент проводился в акватории Тихоокеанского шельфа: глубина $H \cong 53$ м, скорость звука $c \cong 1474$ м/с [3]. Источником звука являлся буксируемый на глубине $z_s \cong 15$ м пневматический излучатель. Скорость буксировки $v \cong 1.7$ м/с. При обработке использовались измерения двух ВСП, расположенных на глубине $z_q \cong 52$ м и разнесенных между собой на расстояние $d \cong 100$ м. Ширина полосы $\Delta f = 180$–220 Гц. Значения колебательных скоростей $V_{x,y}$ приводились к эквивалентным единицам звукового давления $U_{x,y}$. Схема движения пневмоисточника и расположение двух применяемых ВСП Q_1 и Q_2 показаны на рис. 1.

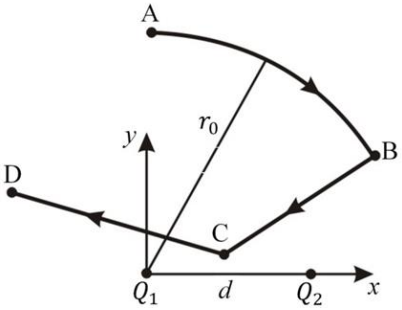


Рис. 1. Схема эксперимента.

Из т.А источник перемещался по дуге окружности радиуса $r_0 \cong 11$ км до т.В. Из т.В источник приближался к ВСП по прямолинейной траектории до т.С, где он разворачивался и по прямолинейной траектории удалялся в т.D. В начальной т.А входное отношение с/п (по мощности) $q \cong 25.5$. При движении по дуге окружности: периодичность излучения $\delta t = 1$ мин, задержка по времени $t' = 5$ мин. При движении в радиальных направлениях: периодичность излучения $\delta t = 30$ с, задержка – $t' = 2.5$ мин. Для условий эксперимента результаты обработки приведены на рис. 2–5. Нормированные величины обозначены сверху знаком «крышка». Ниже представлена интерферограмма и спектрограмма только колебательной скорости U_x.

Интерференционная картина (рис. 2а) показывает, что траектория источника была несколько отлична от движения по дуге окружности, так как интерференционные полосы не локализованы вдоль вертикальных линий. В тоже время расположение главных максимумов спектральной плотности на оси времени (рис. 2б) и положение максимума функции обнаружения (рис. 2в) указывают на то, что радиальная скорость источника равна нулю.

При движении по дуге окружности зависимость пеленга ϑ от времени t приведена на рис. 3.

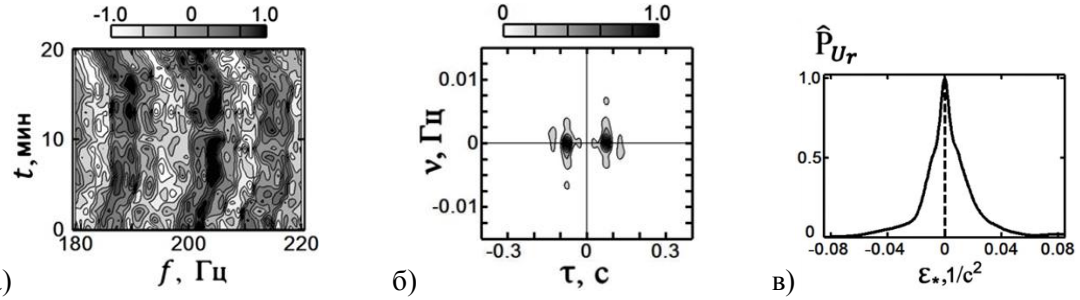


Рис. 2. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б) и функция обнаружения (в).

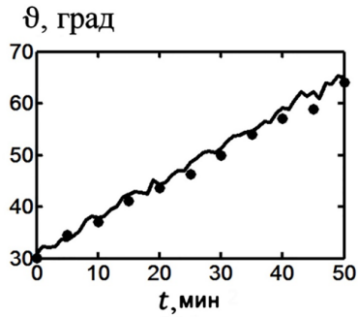


Рис. 3. Пеленгование источника: точки – интерференционный метод, сплошная линия – метод временных задержек.

Здесь и далее под пеленгом понимается угол, дополнительный к азимутальному углу θ, $\vartheta = 90^{\circ} - \theta$. Рассмотренные методы дают практически равные значения угла, что демонстрирует работоспособность интерферометрического метода (5) пеленгования источника.

При развороте источника в т.С интерференционная картина представлена на рис. 4.

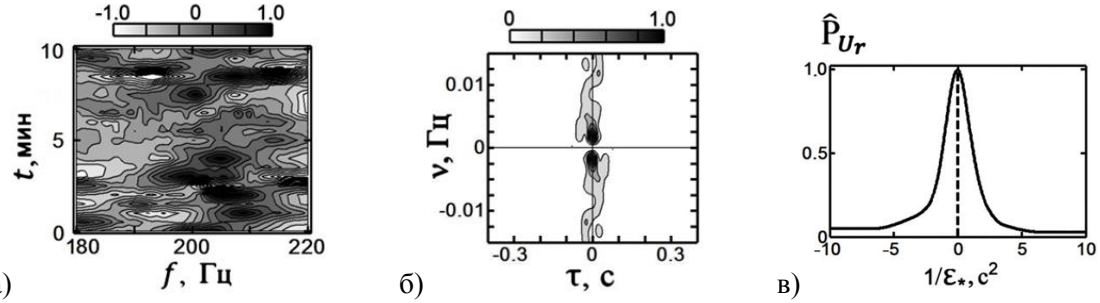


Рис. 4. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б) и функция обнаружения (в).

В момент времени $t \cong 5$ мин (рис. 4а) менялся знак радиальной скорости и источник находился на минимальном расстоянии от приемной системы. Направление максимального накопления спектральных максимумов соответствует горизонтальным прямым. Наиболее ярко этот эффект проявляется на спектрограмме (рис. 4б) и функции обнаружения (рис. 4в). Для данной ситуации зависимость пеленга от времени приведена на рис. 5. Положительные значения пеленга относятся к приближению источника к ВСП, отрицательные – к удалению.

Для проверки помехоустойчивости интерферометрического метода пеленгования при обработке экспериментальных данных добавлялась изотропная помеха. На максимальном удалении источника от ВСП (при движении по окружности) входное отношение с/п $q \cong 10^{-3}$. Это значение отвечает минимальному входному значению с/п, при котором достигается устойчивое обнаружение и оценки движущегося источника близки реальным [1, 2]. Зависимости пеленга от времени при движении по дуге окружности и в области разворота вблизи ВСП показаны на

рис. 6. Там же для сравнения сплошной линией представлены временные зависимости пеленга методом временных задержек, полученные для условий эксперимента. Метод показывает устойчивое пеленгование при малом входном отношении с/п.

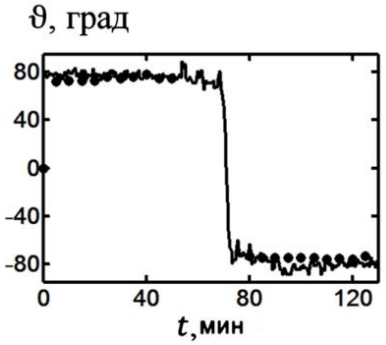
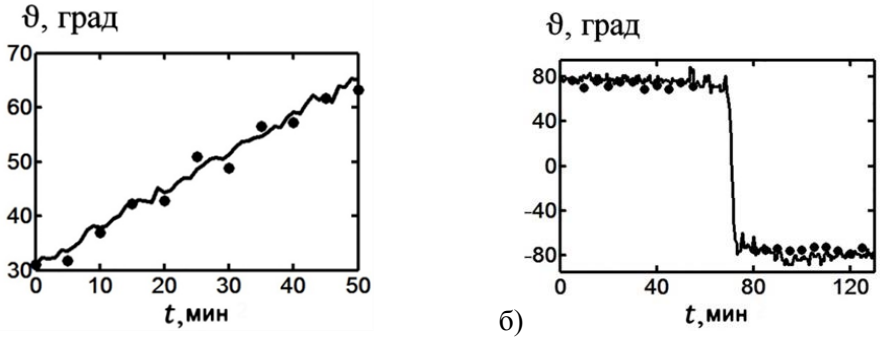


Рис. 5. Пеленгование источника: точки – интерференционный метод, сплошная линия – метод временных задержек.



а) б)

Рис. 6. Пеленгование источника: (а) движение по дуге окружности, (б) движение в окрестности расположения ВСП. Точки – интерференционный метод (добавлена помеха), сплошная линия – метод временных задержек (для условий эксперимента).

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 7 «Актуальные вопросы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

Литература

1. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 4. С. 406-418.
2. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн.. 2018. Т. 64. № 1. С. 33-45.
3. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 194-202.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

И.В.Казначеев, Г.Н.Кузнецов[1], канд.физ-мат.наук, В.М.Кузькин[1], д-р физ-мат.наук,
С.А.Пересёлков, д-р физ-мат.наук
Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

IDENTIFICATION OF SEVERAL NOISE SOURCES

I.V.Kaznacheev, G.N.Kuznetsov[1], Ph.D., V.M.Kuz'kin[1], Dr.Sc., S.A.Pereselkov, Dr.Sc.
Voronezh State University, Voronezh, Russia
[1]A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

Представлены результаты компьютерного моделирования разрешения трех шумовых источников различной интенсивности на фоне изотропной помехи в океаническом волноводе. Выполнен сравнительный анализ точности определения их координат: пеленга, радиальной скорости, расстояния, глубины. Вычислительный эксперимент реализован на основе интерферометрического метода локализации источника с использованием векторно-скалярных приемников.

The results of computer experiment of three noise sources identification at presence of background noise in ocean waveguide are demonstrated. The comparative analysis of the accuracy of their coordinates: direction, radial velocity, distance, depth are presented. The presented computer experiment is based on the interferometric method of source localization by using vector-scalar receivers.

Интерферометрический метод. Интерферометрический метод локализации шумового источника состоит из двух этапов. На первом этапе, используя когерентное траекторное накопление спектральных максимумов волнового поля вдоль интерференционных полос, формируемых широкополосным источником, решается задача обнаружения, пеленгования, определения радиальной скорости и удаления [1, 2]. Когерентное траекторное накопление максимумов поля источника, реализуемое двукратным преобразованием Фурье интерферограммы источника, формирует на спектрограмме локализованную область спектральной плотности в виде отдельных фокальных пятен. На втором этапе по очищенной от помехи интерферограмме источника восстанавливается огибающая сигнала, и определяются амплитуды мод. По отношению амплитуд соседних мод оценивается глубина источника [3].

Алгоритм раздельного наблюдения нескольких источников. Принимаемый сигнал на фоне помехи обусловлен несколькими шумовыми источниками разной интенсивности. Суммарная интерферограмма состоит из интерферограмм каждого из источников и слагаемых, вызванных произведением их компонент поля. Эти слагаемые порождены не когерентным сложением спектральных максимумов, так что спектрограммы нескольких источников можно рассматривать как линейную комбинацию спектрограмм отдельных источников.

В начале на суммарной спектрограмме выделяется область локализации спектральной плотности шумового поля наиболее мощного источника. Она вырезается и по отношению к ней применяется обратное двукратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограммы, т.е. разрешение источника осуществляется в процессе восстановления его интерферограммы. Эта итерация повторяется до тех пор, пока не останется изображение одного единственного источника. Выделяя последовательно на суммарных спектрограммах области локализации отдельных источников и вырезая их, получаем спектрограммы и интерферограммы менее интенсивных источников. С каждым шагом итерации восстанавливаемая спектрограмма будет все больше отличаться от оригинала. Данный механизм связан с тем, что при вырезании локализованной области одного из источников частично могут вырезаться и спектральные плотности других, менее мощных источников, в зонах фокусировок, расположенных вблизи окрестности начала координат спектрограммы. Это может приводить к снижению точности определения координат источников. Очистка не требует предварительных данных о характере сигнала и помехи. Ее возможности ограничены предельным входным отношением сигнал/помеха (с/п) [1].

Компьютерное моделирование. Волновод полагается горизонтально-однородным. Параметры поглощающего жидкого однородного дна: отношение плотности грунта и воды $\rho = 1.8$, комплексный показатель преломления $n = 0.84(1 + i0.03)$. Профиль скорости звука приведен на рис. 1. Геометрия задачи показана на рис. 2.

Векторно-скалярные приемники (ВСП) $Q_{1,2}$ размещены на глубине $z_q = 100$ м, расстояние между ними $d = 150$ м. Положительные направления осей x ВСП и системы координат (x, y) совмещены. Шумовые точечные источники S_i на постоянной глубине z_i движутся по прямоли-

нейной траектории с постоянной скоростью $\mathbf{v}_i$, $i = 1, 2, 3$. Источник S_1 приближается к ВСП, источники $S_{2,3}$ – удаляются. Источник S_1: начальное удаление $r_1 = 7$ км, скорость $v_1 = 3$ м/с, глубина $z_1 = 80$ м, начальный пеленг $\varphi_1 = 45^\circ$, начальный угол траектории $\vartheta_1 = 180^0$, начальная радиальная скорость $v_{r1} = -3$ м/с, входное отношение с/п $q_1 = 6 \times 10^{-3}$. Источник S_2: начальное удаление $r_2 = 10$ км, скорость $v_2 = 13.5$ м/с, глубина $z_2 = 5$ м, начальный пеленг $\varphi_2 = 60^\circ$, начальный угол траектории $\vartheta_2 = 0$, начальная радиальная скорость $v_{r2} = 13.5$ м/с, входное отношение с/п $q_2 = 1$. Источник S_3: начальное удаление $r_3 = 20$ км, скорость $v_3 = 9.9$ м/с, глубина $z_3 = 6$ м, начальный пеленг $\varphi_3 = 15^\circ$, начальный угол траектории $\vartheta_3 = 45^\circ$, начальная радиальная скорость $v_{r3} = 7.0$ м/с, входное отношение с/п $q_3 = 10^{-1}$. Сигналы источников являются белым шумом. Время наблюдения $\Delta t = 1.5$ мин. Шумовое поле регистрируется в течение $\Delta T = 5$ с, временной интервал между регистрациями $\delta T = 0.1$ с. Ширина полосы $\Delta f = 80 - 100$ Гц. Предельное входное отношением с/п $q_{\lim} \cong 5 \times 10^{-3}$ [1]. Ниже представлены результаты моделирования для *x*-й компоненты потока мощности.

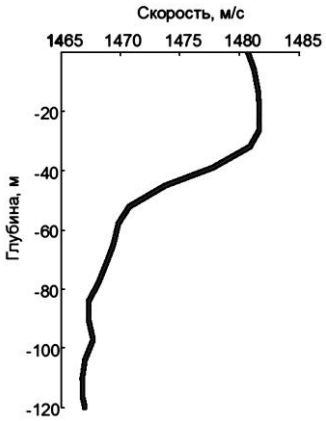


Рис. 1. Профиль скорости звука.

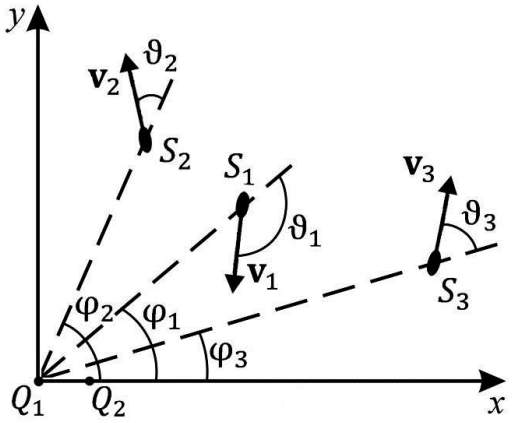
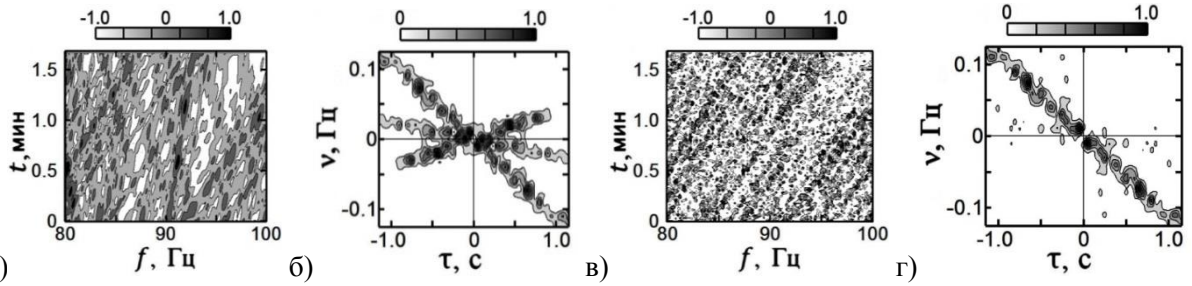


Рис. 2. Геометрия задачи.

На рис. 3 представлены интерферограмма и спектрограмма поля трех шумовых источников для двух случаев. На интерферограмме (рис. 3а) прослеживаются перекрывающиеся интерференционные полосы трех источников, т.е. поля источников не интерферируют между собой. Наложение спектральных плотностей сосредоточено преимущественно в первом фокальном пятне (рис. 3б), которое претерпевает искажения при разрешении источников. Различие в интенсивностей шумовых источников приводит к тому, что на интерферограмме (рис. 3в) и спектрограмме (рис. 3г) прослеживается изображение только самого мощного источника S_2. Изображения двух других источников $S_{1,3}$ маскируются полем источника S_2.



а) б) в) г)

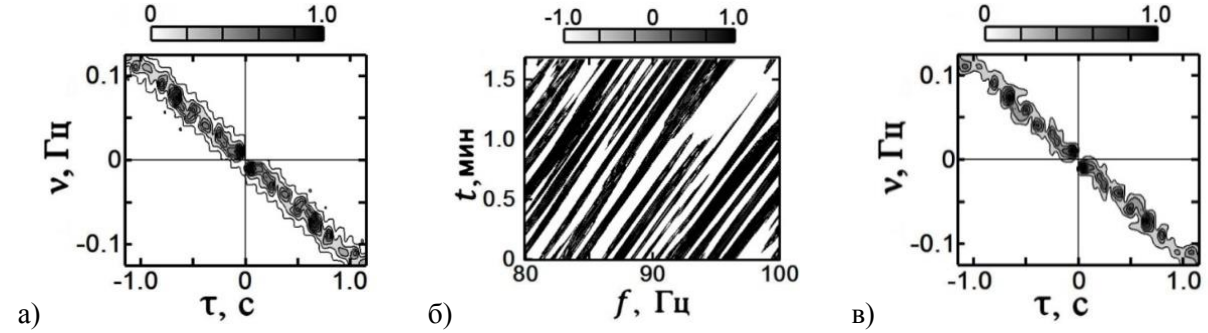
Рис. 3. Интерферограмма (а) и спектрограмма (б) трех шумовых источников одинаковой интенсивности в отсутствие помехи. Интерферограмма (в) и спектрограмма (г) трех шумовых источников для условий моделирования.

Эффект фильтрации области спектрограммы за пределами полосы локализации спектральной плотности источника S_2 и выполнения обратного двукратного преобразования Фурье продемонстрирован на рис. 4 (а, б). Для сравнения показана спектрограмма источника в отсутствие помехи и источников $S_{1,3}$ (рис. 4в). Такие спектрограммы назовем оригиналами.

Далее поле трех источников очищается от поля источника S_2 путем вырезания области локализации спектральной плотности на спектрограмме и обратным двукратным преобразованием Фурье восстанавливается интерферограмма. В результате получаем изображение двух ис-

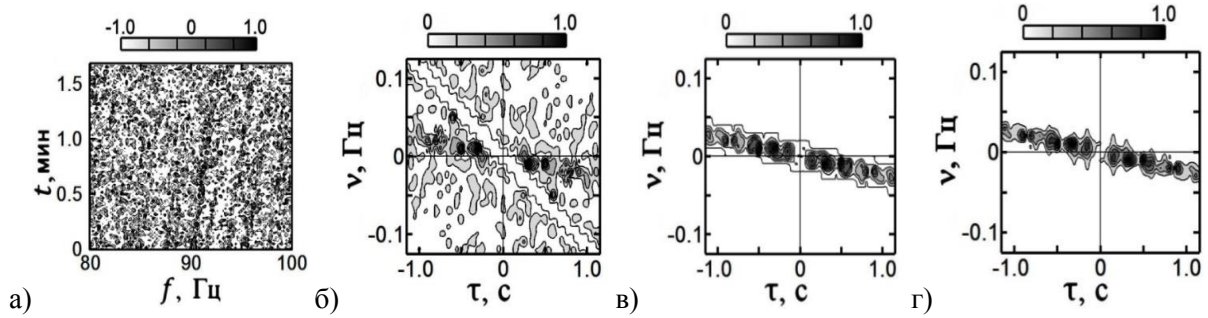
точников $S_{1,3}$ (рис. 5 (а, б)). Спектрограмма источника S_3, очищенная от источника S_1 и помехи, и ее оригинал показаны на рис. 5 (в, г).

Результат очищения поля источников $S_{1,3}$ от поля источника S_3 приведен на рис. 6 (а, б). Спектрограмма источника S_1, очищенная от помехи, и ее оригинал показаны на рис. 6 (в, г).



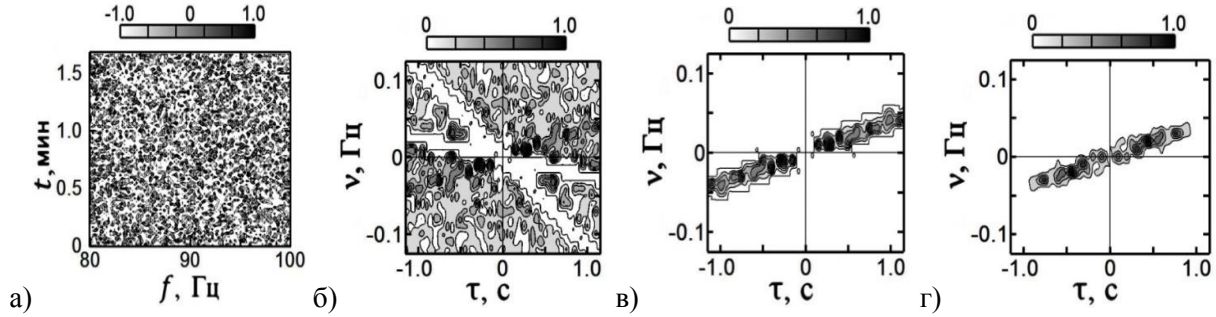
а) б) в)

Рис. 4. Восстановленные спектрограмма (а) и интерферограмма (б) источника S_2. Оригинал спектрограммы источника S_2.



а) б) в) г)

Рис. 5. Интерферограмма (а) и спектрограмма (б) двух шумовых источников $S_{1,3}$. Восстановленная спектрограмма источника S_3 (в) и ее оригинал (г).



а) б) в) г)

Рис. 6. Интерферограмма (а) и спектрограмма (б) двух шумовых источников $S_{1,3}$. Восстановленная спектрограмма источника S_1 (в) и ее оригинал (г).

По координатам максимумов фокальных пятен восстановленных спектрограмм оценивались радиальные скорости и удаленности источников [1], а по отношению максимумов очищенных спектрограмм горизонтальных потоков мощности − пеленг [2] (см. табл. 1).

На рис. 7 приведены зависимости функции $\Phi_{m(m+1)}$ от глубины волновода, обрезанной на уровне 5, для двух комбинаций соседних мод $m(m+1)$ разрешенных источников [3]. Положения нулей определяют глубины источников. Оценкой глубины будет значение, которое является общим (близким) для выбранных комбинаций мод. Для источников $S_{2,3}$ нули функции размыты в окрестности верхней границы волновода, поэтому для них можно лишь указать область оценок глубины. Оценки глубин источников приведены в табл. 1.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 7 «Актуальные вопросы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

Таблица 1. Оценки координат разрешенных шумовых источников на фоне помехи (в круглых скобках указаны заданные координаты источников).

Источники	Координаты источников			
	φ, град	v_r, м/с	r, км	z, м
S_1	46.8 (45)	-3.4 (-3)	7.2 (7)	80.8 (80)
S_2	60.5 (60)	12.4 (13.5)	9.2 (10)	≤ 5.3 (5)
S_3	16.2 (15)	6.7 (7)	18.9 (20)	≤ 9.2 (6)

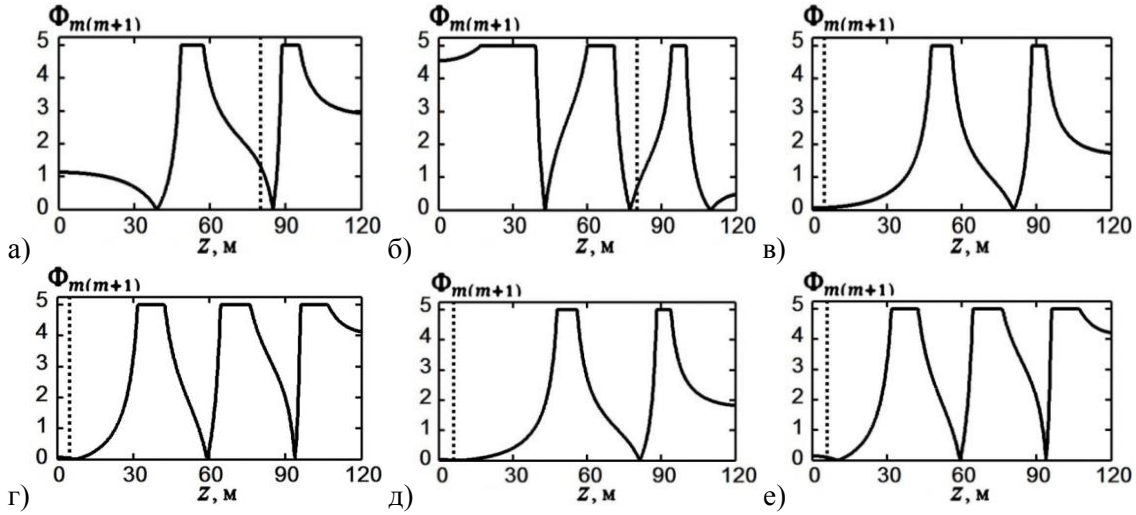


Рис. 7. Функция $\Phi_{m(m+1)}(z)$ при различных комбинациях мод $(m, m+1)$ разрешенных источников $S_{1,2,3}$: (а, б) S_1; (в, г) S_2; (д, е) S_3. Комбинации мод: (2, 3) (а, в, д); (3, 4) (б, г, е). Вертикальным пунктиром показаны значения функции, отвечающие глубине источника.

Литература

1. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн.. 2018. Т. 64. № 1. С. 33-45.
2. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Интерферометрический метод пеленгования источника звука // Тр. конф. ГА-2018. (см. настоящий сб. тр.).
3. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Wave method for estimating the sound source depth in an oceanic waveguide // Phys. Wave Phenom. 2016. V. 24. N. 4. P. 310–316.

АКУСТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА РАЙОНОВ УСТАНОВКИ ИЛИ БУКСИРОВКИ ПРОТЯЖЕННЫХ АНТЕНН ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Г.Н.Кузнецов, канд.физ-мат.наук
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ACOUSTIC CALIBRATION OF AREAS OF INSTALLATION OR TOWING OF EXTENDED ANTENNAS OF SONAR SUITES

G.N.Kuznetsov, Ph.D.
A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

Разработан и исследован метод экспериментально-теоретической оценки акустических характеристик поверхностных слоев грунта непосредственно в районе, примыкающем к зоне движения объекта, буксирующего протяженную многоэлементную антенну и малогабаритный источник. Метод дает устойчивые результаты при вариации вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) и может быть использован в различных акустико-гидрологических условиях без жесткой привязки к ВРСЗ.

A method for the experimental and theoretical evaluation of the acoustic characteristics of surface layers of soil was developed and investigated directly in the region adjacent to the zone of motion of the object towing an extended multi-element antenna and a small-sized source. The method gives stable results with the variation of the vertical distribution of sound velocity (VDSS) and can be used in various acoustic-hydrological conditions.

Для оценки дальности обнаружения, точности пеленгования и классификации целей, кроме гидроакустических характеристик собственных ГАК и обнаруживаемых целей, необходимо учитывать пространственно-частотно-временные свойства передаточной функции волновода (ПФВ). Для прогноза в реальных условиях скрытности морских объектов также необходимо учитывать условия распространения звуковых сигналов вдоль гидроакустической трассы от источника шума или отражателя до вероятного обнаружителя. Для решения этих задач и учета текущих акустико-гидрологических условий и согласованной фильтрации сигналов в рабочей зоне волновода необходимо оценить следующие характеристики среды: для низких частот – глубину волновода и характеристики поверхностных слоев грунта. Для средних и высоких частот потребуется также оценка вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ).

Методы и технические средства для акустической калибровки волновода, в том числе оценки параметров модели грунта, отработаны еще в советский период, но для стационарно установленных антенн. В настоящее время дополнительно обоснованы теоретически и исследованы экспериментально методы акустической калибровки волновода не только в районе установки антенн, но и в зоне буксировки излучателя, а также вдоль трассы распространения сигналов от источников к приемным системам. Но в большинстве случаев для реализации этих методов требуются существенно разнесенные в пространстве приемные и излучающие системы. Кроме того, они «привязаны» к конкретным районам моря, что необходимо и достаточно для работы стационарных систем. Но для подвижных платформ требуется, чтобы производилась оценка характеристик грунта «здесь и сейчас» – в любой точке движения носителя.

Рассмотрим результаты экспериментального исследования метода непрерывной оценки параметров акустической модели грунта в зоне, непосредственно примыкающей к движущемуся носителю. Для этого будем использовать буксируемую протяженную многоэлементную антенну и размещенный в районе кормы носителя или в головной части антенны точечный импульсный широкополосный излучатель (рис. 1). Методика предполагает, что носитель движется прямолинейно в произвольных районах функционирования и в реальном времени непрерывно выполняются оценки характеристик грунта непосредственно в зоне размещения антенн, т.е. вблизи движущегося носителя. Это позволяет в любые – произвольные моменты времени формировать на разных частотах ПФВ и с ее использованием – также непрерывно – в конкретных условиях выполнять прогноз дальности обнаружения целей и скрытности собственного объекта с учетом реальных условий распространения звуковых сигналов в зоне подводного наблюдения. Ниже приводятся результаты практического применения разработанного метода, полученные при использовании надводного носителя (рис. 1А). Но разработанную методику не трудно доработать и для технических средств, буксируемых подводным носителем. Задача решается с использованием модовой модели звукового поля применительно к мелкому морю, в котором морское дно оказывает существенное влияние на характеристики звукового поля в волноводе.

Эксперименты проводились по следующей методике: импульсный широкополосный низкочастотный излучатель и протяженная 48-канальная линейная антенна буксировались на глубине около 12 м, превышающей глубину проникновения кильватерного следа судна-

буксировщика. Координаты излучателя и начала антенны для упрощения взаимного позиционирования совмещены. Исследования проводились в середине июля в Баренцевом море с глубиной в районе работ 77–78 м. Общая длина апертуры буксируемой антенны, на которой формировалась интерференция сигналов и выделялись моды, равна 2350 м. В качестве импульсного широкополосного излучателя использовался малогабаритный и маломощный пневмоисточник. Обработка импульсных сигналов для оценки величин продольных волновых чисел мод выполнялась по методу двумерного спектрального анализа. На первом этапе зарегистрированные отдельными приемными элементами сигналы нормируются на корень квадратный из их энергии для того, чтобы скомпенсировать пространственное ослабление звукового поля вдоль достаточно большой апертуры антенны. Затем осуществляется преобразование Фурье нормированных сигналов и вычисляется усредненный по всем приемным элементам амплитудный спектр. На втором этапе из полученных нормированных спектральных отчетов формируются реализации пространственного распределения комплексной огибающей звукового давления на всех частотах. Преобразование Фурье этих реализаций по пространству и дает спектры пространственных частот или продольные волновые числа мод.

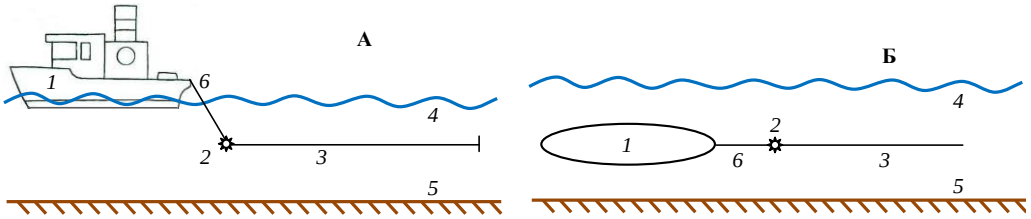


Рис. 1. Схемы размещения излучателя и ГПБА, буксируемых надводным (А) и подводным (Б) носителями: *1* – носитель г/а средств, *2* – широкополосный импульсный излучатель, *3* – протяженная многоканальная антенна, *4* – поверхность, *5* – морское дно, *6* – кабель-трос.

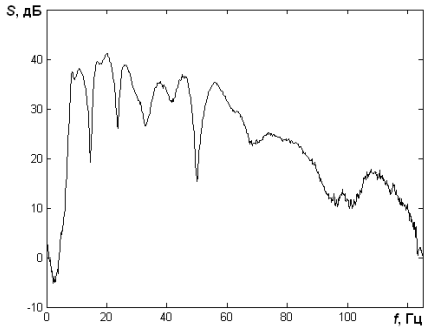


Рис. 2. Усредненный по всем приемникам спектр сигнала.

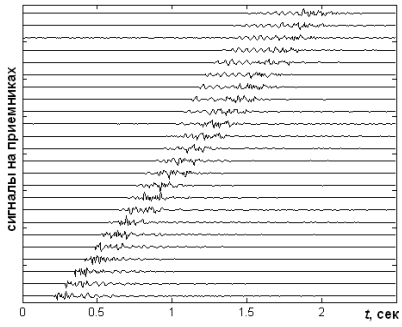


Рис. 3. Сигналы, зарегистрированные каждым вторым приемником линейной антенны.

На рис. 2 представлен усредненный по пяти импульсам и по всем приемным элементам антенны энергетический спектр принятых сигналов. Он имеет изрезанный характер, что обусловлено пульсациями воздушного пузыря, образованного пневмоисточником на резонансных частотах. На рис. 3 показаны 24 реализации импульсных сигналов от пневмоисточника, принятые каждым вторым элементом буксируемой антенны. На рис. 4 показан двумерный спектр зарегистрированных сигналов. Цифры на рисунке соответствуют номерам пяти первых мод. Стрелками отмечены точки отсечки распространяющихся мод с номерами от второй до пятой. Полученный двумерный спектр позволяет выполнить оценку продольных волновых чисел мод, которые являются исходными данными для расчета акустических характеристик верхних слоев донных отложений. Процедура определения характеристик дна основана на совместной обработке измеренных и рассчитанных в рамках принятой модели данных, заключающейся в поиске экстремума целевой функции (функционала невязки) методом многомерной оптимизации. В данной работе в соответствии с методом наименьших квадратов целевая функция задавалась в виде

$$L = \sum_f \sum_l (\xi^c_{f,l} - \xi^e_{f,l})^2 / \sigma^2_{\xi_{f,l}}, \qquad (1)$$

где ξ – продольные волновые числа мод, σ^2 – дисперсия экспериментальных оценок продольных волновых чисел мод. Верхние индексы *c* и *e* обозначают, соответственно, рассчитанные и экспериментально оцененные величины. Нижние индексы обозначают номер моды *l* для часто-

ты излучения *f*. Для оптимизации процедуры, применявшейся для минимизации целевой функции (1), использовался симплекс-метод (метод Нелдера–Мида). Этот метод обладает достаточно быстрой сходимостью при поиске локального экстремума, однако для его эффективной работы необходимо задать адекватное нулевое приближение – начальные параметры модели, близкие к истинным. Эти исходные начальные параметры модели дна получим непосредственно из экспериментальных данных – из двумерного спектра. Для этого используем параметры точек отсечки мод, отмеченные на рис. 4 стрелками. Наличие точки отсечки говорит о том, что соответствующая этой точке частота является критической для данной моды. Поэтому величина фазовой скорости в каждой точке отсечки может служить оценкой скорости звука в некотором эквивалентном для данной моды и частоты нижнем полупространстве.

Учитывая реальные коэффициенты поглощения звука в осадках, достаточно реалистичным выглядит предположение, что на характеристики распространяющихся мод основное влияние оказывают только верхние слои донных отложений, суммарная толщина которых порядка длины волны. В табл. 1 представлены критические частоты и фазовые скорости мод, соответствующие точкам отсечки, и длины волн на данных частотах, вычисленные по данным рис. 4. Отметим, что кроме параметров, входящих в модель морского грунта, при вычислениях уточнялась величина глубины волновода (моря) *H* в районе буксировки антенны. Это необходимо, так как глубина водного слоя оказывает существенное влияние на характеристики мод, а точность показаний эхолота не превышала 3%. Измеренные на рис. 4 критические частоты позволили рассчитать по рекурентным соотношениям приближенные характеристики грунта (табл. 2), которые далее использованы в качестве нулевого приближения при многомерной оптимизационной процедуре. В табл. 3 и 4 с использованием данных табл. 2 представлены результаты минимизации функционала (1) в рамках двухслойной модели грунта и упрощенной модели – с одним осадочным слоем.

Таблица 1. Частоты, фазовые скорости и длины волн, соответствующие точкам отсечки мод.

№ моды	Частота, Гц	Фазовая скорость, м/с	Длина волны, м
2	18.9	2357.22	124.61
3	41.3	1828.63	44.31
4	56.3	1825.84	32.42
5	78.7	1762.50	22.40

Таблица 2. Начальные предварительные параметры модели дна.

	Толщина, м	Скорость звука, м/с	Плотность, кг/м^3
Слой 1	22	1762	1900
Слой 2	20	1828	2000
Полупространство		2357	2200

Таблица 3. Уточненные параметры модели волновода с двумя осадочными слоями грунта.

H, м	h_1, м	ρ_1, кг/м^3	c_1, м/с	h_2, м	ρ_2, кг/м^3	c_2, м/с	ρ_{M+1}, кг/м^3	c_{M+1}, м/с
76.9	24.9	1805.2	1847.1	14.7	1853.6	1866.1	1883.4	2326.4

На рис. 5 представлены результаты двумерного спектрального анализа и сравнения зависимостей от частоты значений продольных волновых чисел, измеренных экспериментально, и данных, рассчитанных в рамках теоретической модели. Расчеты выполнялись с использованием уточненных параметров модели волновода (табл. 3). На рисунке в двумерном спектре оставлена только информативная (диагональная) часть. Видно, что экспериментальные и рассчитанные величины хорошо согласуются, в том числе – в зоне «отсечки» мод.

Сравнивая значения параметров двух моделей волновода можно отметить, что глубина слоя воды, суммарная толщина осадочного слоя в двух моделях и акустические характеристики полупространства различаются незначительно. Величина скорости звука в осадочном слое однослойной модели дна соответствует средней скорости звука в верхних слоях двухслойной модели. Следовательно, упрощенная модель волновода с одним жидким слоем является хорошей аппроксимацией модели с двумя осадочными слоями. Этот вывод подтверждается результатами расчетов в рамках прямой задачи продольных волновых чисел мод для волноводов с одно-

слойной или двухслойной моделью дна. Максимальные различия продольных волновых чисел первых мод, рассчитанных для двух моделей волновода, не превышают 0.5–0.8%.

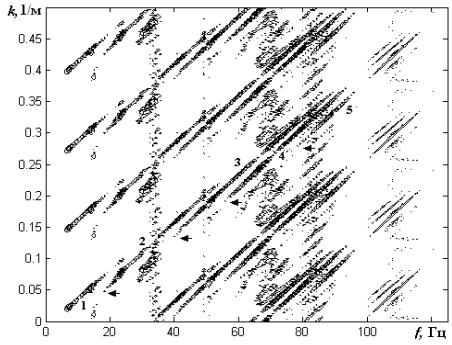


Рис. 4. Двумерный спектр зарегистрированных сигналов. Цифры соответствуют номерам мод. Стрелками отмечены точки отсечки мод.

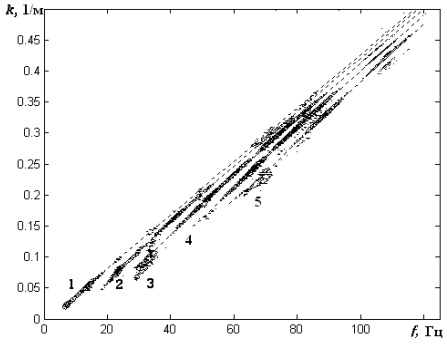


Рис. 5. Двумерный спектр и рассчитанные частотные зависимости продольных волновых чисел мод (пунктир) для пяти мод.

Таблица 4. Параметры модели волновода с одним осадочным слоем (июльский профиль).

H, м	h_1, м	ρ_1, кг/м^3	c_1, м/с	ρ_{M+1}, кг/м^3	c_{M+1}, м/с
76.7	39.3	1980.0	1856.1	1914.9	2331.9

Расчеты показали устойчивость процедуры минимизации функционала (1) и оценки параметра грунта к изменению ВРСЗ. В табл. 4 приведены результаты для «июльского» ВРСЗ, соответствующего условиям экспериментов. А в табл. 5 представлены результаты расчетов, выполненных по тем же данным, но для ВРСЗ, характерного для августа.

Таблица 5. Параметры модели волновода с одним осадочным слоем (августовский профиль).

H, м	h_1, м	ρ_1, кг/м^3	c_1, м/с	ρ_{M+1}, кг/м^3	c_{M+1}, м/с
77.4	36.9	1999.0	1881.7	1999.4	2329.4

Видно, что, несмотря на некоторые различия, параметры модели морского дна, вычисленные с использованием различающихся ВРСЗ, достаточно близки. Это подтверждает устойчивость на низких частотах оптимизационной процедуры оценки акустических характеристик верхних слоев грунта к вариациям ВРСЗ. Как следствие, при реализации разработанного метода в реальных условиях вполне допустима дискретная – с большими интервалами по пространству оценка ВРСЗ или использование усредненных табличных данных.

Таким образом, оценка акустических характеристик грунта в этой зоне позволяет построить модель ПФВ и выполнять в реальных акустико-гидрологических условиях прогноз дальности обнаружения малошумных целей или скрытности собственного объекта. Разработанная методика обеспечивает адаптацию алгоритмов обработки сигналов к локальным акустико-гидрологическим условиям и достоверный прогноз дальностей взаимного обнаружения в дуэльной ситуации. При необходимости поправочные коэффициенты, учитывающие акустические свойства среды (грунта), вводятся в алгоритмы обработки сигналов, например, протяженными ГПБА, непрерывно, т.е. выполняется настройка алгоритмов ГПБА в реальном времени, что позволяет считать такие ГПБА «интеллектуальными».

ПЕЛЕНГОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ С УЧЁТОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

А.К.Зиновьев[1,2], Г.Н.Кузнецов[1], канд.физ-мат.наук, А.А.Луньков[1,2], канд.физ-мат.наук
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

NOISE SOURCE BEARING ESTIMATION IN SHALLOW WATER TAKING INTO ACCOUNT THE SOUND FIELD INTERFERENCE PATTERN

A.K.Zinovev[1,2], G.N.Kuznetsov[1], Ph.D., A.A.Lunkov[1,2], Ph.D.
[1]A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia
[2]N.E. Bauman Moscow State Technical University, Russia

В работе рассмотрена возможность когерентного накопления шумового сигнала в низкочастотном диапазоне частот для увеличения помехоустойчивости пеленгования источника шума с помощью горизонтальной цепочки гидрофонов. При согласовании с моделью плоской волны используется только треугольная часть матрицы ковариаций выше главной диагонали. Когерентное суммирование осуществляется вдоль интерференционных полос в пространственно-частотной области. Проведено сопоставление эффективности указанного метода по сравнению с традиционными методами формирования диаграммы направленности.

Coherent accumulation of the noise signal in a low-frequency band is considered to increase the reliability of the noise source bearing estimation with a horizontal line array. Only upper triangular part of the covariance matrix is matched with a plane wave. Coherent summation is performed along the interference fringes in the space-frequency domain. Comparison of the effectiveness of the proposed beamforming method with traditional ones is presented.

Повышение эффективности протяжённых горизонтальных антенн при обнаружении и пеленговании маломощных источников широкополосных сигналов с применением горизонтальных антенн в мелком море представляет собой важную задачу в гидроакустике [1,2,3]. Одним из возможных способов достижения этой цели является накопление сигнала в частотной области. Например, в работе [2] был предложен алгоритм формирования диаграммы направленности, основанный на когерентном суммировании сигналов вдоль интерференционных полос в координатах «номер гидрофона–частота», который требует знания фазо-частотной характеристики источника звука и его примерной дальности. В настоящей работе указанный метод адаптирован для шумового источника с неизвестным распределением фаз по частотам и продемонстрированы его возможности в рамках численного эксперимента. При этом согласование с моделью плоской волны ведётся не для сигналов на элементах антенны (гидрофонах), а для ковариационных матриц этих сигналов.

Схема численного эксперимента показана на рис. 1. Для удобства описания используется как цилиндрическая система координат (r, ϕ, z), так и декартова (x, y, z), общее начало которых расположено на границе вода-воздух непосредственно над центром приёмной линейной антенны. Антенна растянута вдоль оси *y* на глубине z_A и состоит из *J* гидрофонов, регистрирующих звуковое давление. Гидрофоны расположены с шагом *d*. Представим вектор принимаемых антенной сигналов, отвечающих некоторой частоте ω_k и некоторому источнику шума в точке $\vec{r_s} = (r_s, \phi_s, z_s)$, в виде

$$\mathbf{U}(\omega_k; \vec{r_s}) = \left[p_1(\omega_k), \ldots, p_J(\omega_k)\right]^{\mathrm{T}}, \quad (1)$$

«T» обозначает операцию транспонирования.

Ковариационная матрица этих сигналов

$$K_{jl}(\omega_k; \vec{r_s}) = \mathbf{K}(\omega_k; \vec{r_s}) = \mathbf{U}(\omega_k; \vec{r_s})\mathbf{U}^{+}(\omega_k; \vec{r_s}), \quad (2)$$

«+» обозначает эрмитово сопряжение.

Традиционным подходом для формирования отклика антенны в заданном направлении является метод Бартлетта

$$B_{Bart}(\omega_k, \phi) = \mathbf{w}^{+}(\omega_k, \phi)\mathbf{K}(\omega_k)\mathbf{w}(\omega_k, \phi). \quad (3)$$

Выражение для сканирующего вектора $\mathbf{w}(\omega_k, \phi)$ для линейной антенны, элементы которой расположены в точках с декартовыми координатами $(0, y_j, z_A)$, имеет вид:

$$\mathbf{w}(\omega_k, \phi) = \left[\exp\left(\frac{i\omega_k y_1 \sin\phi}{c_{eff}}\right), \ldots, \exp\left(\frac{i\omega_k y_J \sin\phi}{c_{eff}}\right)\right]^{\mathrm{T}}$$

В приведённом выражении величина c_{eff} – эффективная фазовая скорость в волноводе, которая обычно на 5-10 % больше скорости звука в водном слое [4].

Составим сканирующую матрицу следующим образом:

$$W_{jl}(\omega_k, \phi) = \mathbf{W}(\omega_k, \phi) = \mathbf{w}(\omega_k, \phi)\mathbf{w}^{+}(\omega_k, \phi)$$

Предлагаемый алгоритм согласования на основе обработки ковариационной матрицы схож с алгоритмами, описанными в [3,5], однако в нашем случае суммирование ведётся с учётом смещения по частоте $\Delta\omega_{jk}$ зоны интерференционного максимума:

$$B_{cov}(\omega_k, \phi) = \left|\sum_j \sum_{l>j} W_{jl}^*(\omega_k + \Delta\omega_{jk}, \phi) K_{jl}(\omega_k + \Delta\omega_{jk})\right|, \quad (4)$$

Знак «*» обозначает комплексное сопряжение. Смещение по частоте $\Delta\omega_{jk}$ задаётся с использованием следующего соотношения

$$\Delta\omega_{jk} = -\beta d(j-1)\omega_k / \tilde{r_s}, \quad (5)$$

где β – интерференционный инвариант [6], $\tilde{r_s}$ – примерное расстояние до источника звука. Следует отметить, что при неизвестной оценке $\tilde{r_s}$ для реализации метода (4) требуется перебор по расстоянию. Тогда в качестве $\tilde{r_s}$ берётся значение расстояния, максимизирующее отклик (4).

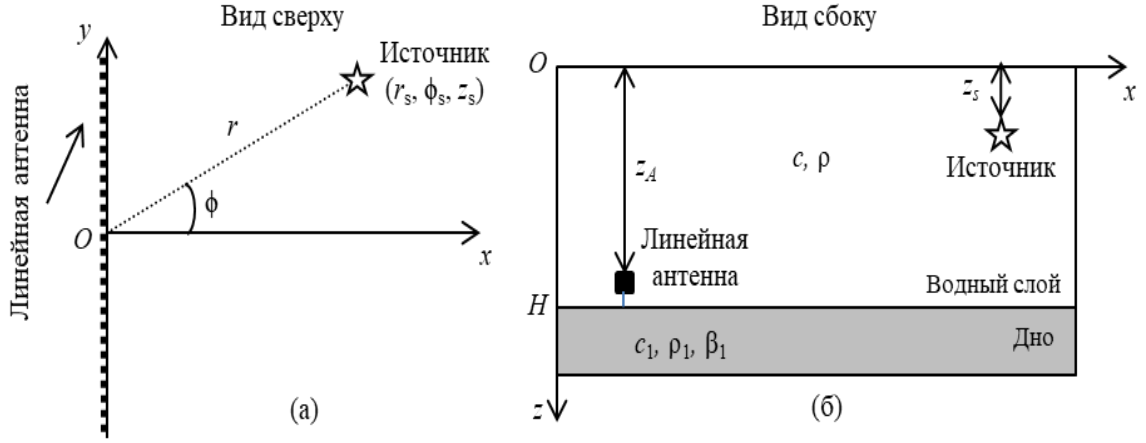


Рис. 1. Схема численного эксперимента.

Возможности предлагаемого метода изучены на примере работы антенны в мелководном волноводе, имеющем постоянную глубину H = 200 м. Скорость звука в водном слое не зависит от глубины и равна c = 1470 м/с. В этом случае интерференционный инвариант $\beta \approx 1$. Дно представляется однородным жидким полупространством с параметрами: скорость звука c_1 = 1700 м/с, плотность ρ_1 = 1800 кг/м^3. и коэффициент затухания β_1 = 0.3 дБ/λ. Горизонтальная антенна имеет J = 100 элементов, расположенных вблизи дна с шагом d = 10 м. Точечный источник звука, находящийся на расстоянии r_s = 10 км от центра антенны и глубине z_s = 10 м, излучает белый шум. Вычисление звуковых полей производится в рамках теории нормальных волн (мод). Поле фоновых помех является изотропным.

Пространственно-частотные распределения интенсивности сигнала по апертуре антенны в отсутствие фоновой помехи показаны на рис.2 для различных направлений на источник. Можно заметить, что эффективного суммирования сигнала со всех гидрофонов на некоторой частоте можно добиться только для источника в направлении $\phi_s = 0°$. Как видно из рис.2а, на частоте около 60 Гц интерференционный максимум перекрывает все элементы антенны. В то же время, при «косых» направлениях на источник (рис.2б,в) на любой фиксированной частоте будет эффективно работать только часть антенны, что эквивалентно уменьшению её апертуры. Алгоритм, описанный в [2] позволяет формировать диаграмму направленности не на одной частоте, а собирая сигнал вдоль интерференционной полосы при известной фазо-частотной характеристике излучателя звука, однако для шумового источника он неприменим.

Перейдём к анализу компонентов ковариационной матрицы, отвечающей источнику шума в направлении $\phi_s = 60°$. На рис.3а,б,в представлены пространственно-частотные распределения $[p_1^*(\omega_k)p_1(\omega_k), \ldots, p_1^*(\omega_k)p_J(\omega_k)]$,
$[p_{50}^*(\omega_k)p_1(\omega_k), \ldots, p_{50}^*(\omega_k)p_J(\omega_k)]$ и
$[p_{100}^*(\omega_k)p_1(\omega_k), \ldots, p_{100}^*(\omega_k)p_J(\omega_k)]$, соответственно. Можно видеть, что и в этих распределениях проявляется интерференционная структура звукового поля, причём сдвиг зоны максимума по частоте согласуется с оценкой (5) – штриховые линии на рисунках.

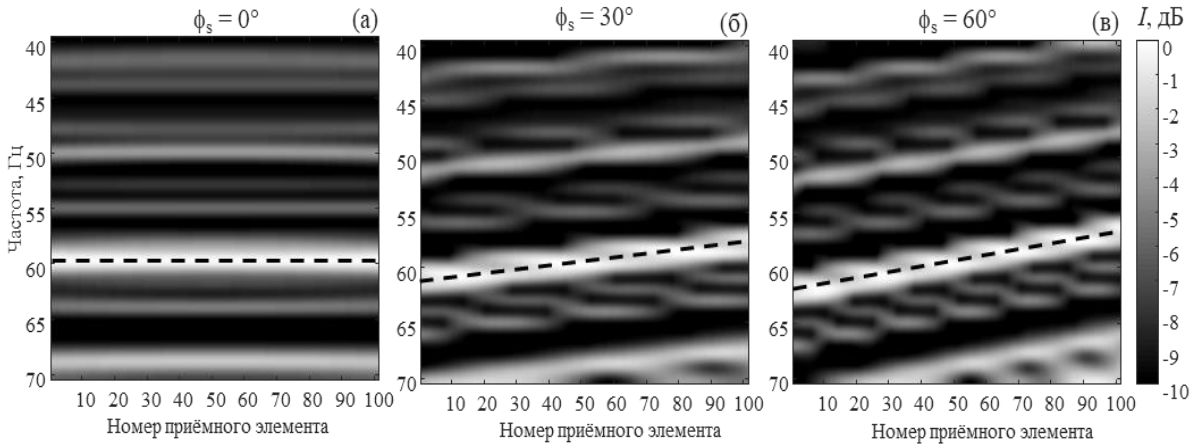


Рис. 2. Пространственно-частотное распределение интенсивности звукового поля на горизонтальной антенне при различных направлениях ϕ_s на шумовой источник. Расстояние до источника r_s = 10 км, глубина источника z_s = 10 м. Все графики пронормированы на максимальное значение.

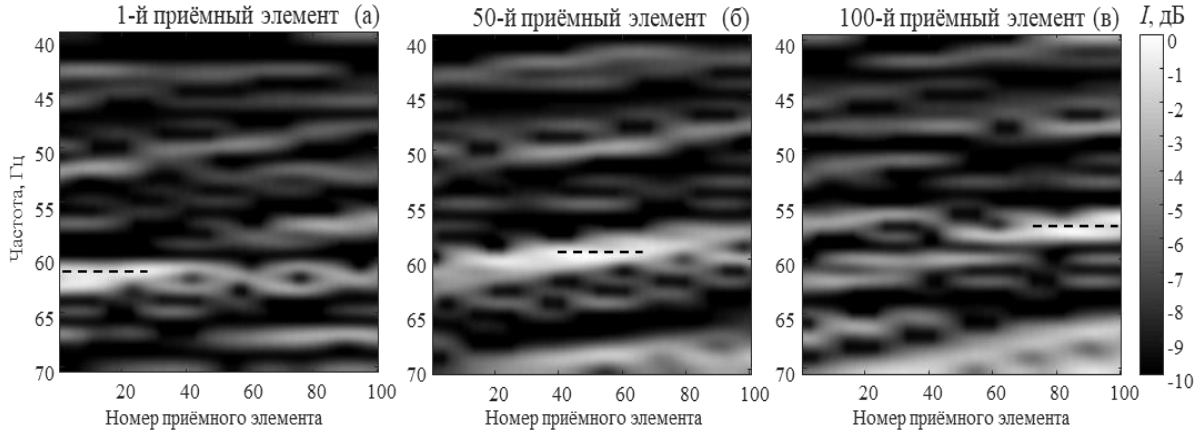


Рис. 3. Пространственно-частотные распределения компонентов ковариационной матрицы шумового сигнала, принимаемого от источника с координатами r_s = 10 км, ϕ_s = 60°, z_s = 10 м. Все графики пронормированы на максимальное значение. Штрихованными отрезками отмечены зоны интерференционных максимумов, отвечающие интерференционной полосе на рис.2.

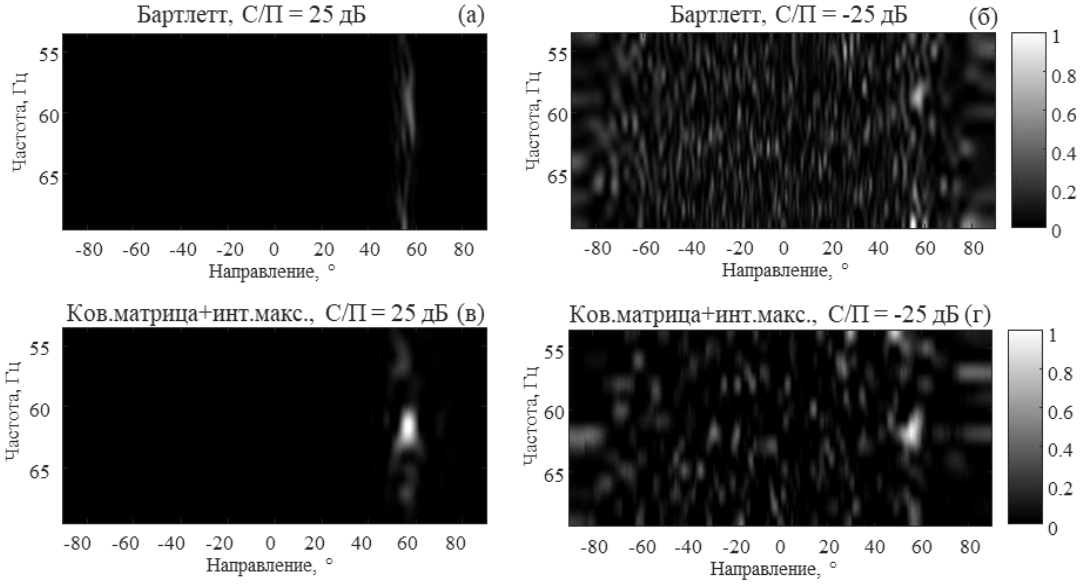


Рис. 4. Пеленгование шумового источника с помощью метода Бартлетта (а, б) и с использованием суммирования компонентов ковариационной матрицы параллельно интференционным максимумам (б, г), показанным на рис.3, при двух отношениях сигнал/помеха на одиночном гидрофоне. Показан результат усреднения по 10 независимым реализациям фоновой помехи.

Результаты пеленгования с помощью метода Бартлетта (3) и метода согласования ковариационной матрицы (4) приведены на рис.4 для двух значений сигнал/помеха на одиночном приёмнике звукового давления: +25 дБ и -25 дБ. Сопоставляя рисунки, относящиеся к двум методам, можно сделать вывод о том, что суммирование по зонам интерференционных максимумов позволяет сфокусировать энергию в более узком диапазоне частот и тем самым повысить амплитуду отклика антенны до 2 раз в направлении источника шума при неизменной уровне фоновых помех.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, № 16-32-60194-мол_а_дк.

Литература

1. Галкин О.П., Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Попов Р.Ю., Семенов Ю.В., Тужилкин Ю.И. Проблемы фазирования линейных цепочек гидрофонов, лежащих на дне мелководного района океана // Акуст. Журн. 2009. Т. 55, № 2. С. 188-192.
2. Zurk L., Rouseff D. Striation-based beamforming for active sonar with a horizontal line array // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 132, No. 4. P. EL264-EL270.
3. Каршинев Н.С., Кузнецов Г.Н., Луньков А.А. Пеленгование шумового источника с использованием векторно-скалярных антенн // Сборник трудов Тринадцатой всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» 24-26 мая 2016г., Санкт-Петербург. С 36-39.
4. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 58, № 5. С. 628-638.
5. Westwood E.K. Broadband matched-field source localization // J. Acoust. Soc. Am. 1992. V. 91. No. 5. P. 2777-2789.
6. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана. Современное состояние / Под. ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. М.: Наука, 1982. С. 71–91.

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ШУМОВ В МЕЛКОМ МОРЕ

Н.А.Завольский, М.А.Раевский, канд.физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

HORIZONTAL ANIZOTROPY OF DYNAMIC NOISE IN SHALLOW SEA

N.A.Zavolsky, M.A.Raevsky, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

Проведено теоретическое исследование горизонтальной анизотропии динамических шумов океана. Показано, что анизотропное распределение поля океанического шума обусловлено эффектом его рассеяния на ветровом волнении. Обсуждается зависимость степени анизотропии шума от номера моды и скорости ветра.

Theoretical research of horizontal anisotropy of dynamic ocean noise is carried out. It is shown that the anisotropic distribution of oceanic noise owing to effect of its scattering by wind waves. The dependence of the noise anisotropy on the mode number and wind speed is discussed.

Для задач акустической томографии океана необходимо развитие теоретических моделей как зондирующих сигналов, так и акустических помех естественного происхождения. Одной из таких помех, постоянно наблюдаемых в натурных условиях является динамический шум генерируемый ветровым волнением. Основной сложностью построения адекватной модели динамических шумов океана является учет всех факторов волноводного распространения шумового поля, поскольку процесс его генерации исследован относительно хорошо. В подавляющем большинстве работ рассматривалось формирование динамического шума в плоскослоистом волноводе [1]. Позднее были предприняты попытки учесть эффекты многократного рассеяния шумового поля в волноводе с флуктуирующими параметрами [2-4]. В мелком море основным источником таких флуктуаций является ветровое волнение, т.е. шумовое поле не только генерируется ветровым волнением, но и испытывает многократное рассеяние на взволнованной морской поверхности.

При рассмотрении этих эффектов основные результаты были получены для идеализированной модели изотропного ветрового волнения [3] и предварительные для упрощенной модели его частотно-углового спектра [4]. В данной работе рассматривается влияние ветрового волнения на формирование динамического шума для адекватной модели морского волнения с эмпирическим частотно-угловым спектром. Основное внимание уделяется горизонтальной анизотропии динамического шума, которая возникает в открытом море, вдали от берегового шельфа и исключительно вследствие эффектов многократного рассеяния.

Рассмотрим акустическое поле, генерируемое дипольным источниками [1] ветрового шума, однородно распределенными на свободной поверхности океанического волновода. Волновод предполагается плоскослоистым с профилем скорости звука $c(z)$ и, вообще говоря, многослойным дном. Свободная граница описывается уравнением $z=\zeta\left(\vec{r},t\right)$, где случайные вертикальные смещения $\zeta\left(\vec{r},t\right)$ со средним, равным нулю, обусловлены ветровым волнением. Для акустики мелкого моря наибольший интерес представляет низкочастотный диапазон с верхней границей $f_*\le 300$ Гц. При этом для типичных скоростей ветра $V\le 10$ м/с среднеквадратичная амплитуда $\sqrt{\langle\zeta^2\rangle}$ и частота ω_*, как правило, удовлетворяет условию малости параметра Рэлея:

$$\frac{\omega_*}{c(0)}\sqrt{\langle\zeta^2\rangle}\sin\theta_{\text{crit}} << 1 \qquad (1)$$

где θ_{crit} – критический угол волновода. В случае модового описания поля это условие означает малость эффектов однократного рассеяния мод, локализованных в волноводе, но позволяет описывать не малые эффекты многократного рассеяния. Исходным для анализа является стационарное уравнение переноса для интенсивности мод в волноводе с нерегулярной границей [3], описывающее совместные эффекты генерации мод дипольными источниками и рассеяние их на взволнованной морской поверхности. В случае статистически однородного и стационарного шумового поля это уравнение имеет вид:

$$\sum_m W_{mn}N_n - 2\left(\gamma_n + \left|\text{Im}\,k_n\right|\right)N_n + Q_n = 0 \qquad (2)$$

где N_n – интенсивность мода, W_{mn} – вероятность перехода энергии между модами, γ_n – декремент затухания когерентной компоненты в следствие рассеяние моды на нерегулярной границе,

$\mathrm{Im}k_n$ – мнимая часть волнового числа, обусловленная затуханием моды в донном грунте, Q_n – дипольный источник шума для моды с индексом "n".

При произвольном значении частоты спектра шума и скорости ветра система уравнений (2) может быть решена лишь численными методами, но в интересующем нас диапазоне частот $f \le 300$ Гц и скоростей ветра $V \le 10$ м/с можно использовать приближенное решение. Действительно, по определению декремент γ_n имеет вид:

$$\gamma_n = \frac{1}{2}\sum_m W_{mn} + \frac{1}{2}\int W_{m\eta}\,d\eta \tag{3}$$

где второе слагаемое описывает рассеяние "n" моды во все моды сплошного спектра, т.е. излучение её из волновода. Таким образом параметр

$$\varepsilon_n = \sum_m W_{mn} \Big/ 2\gamma_n \tag{4}$$

всегда меньше единицы. Более того, как показывают оценки, при типичных значениях $\theta_{\text{crit}} \sim 0.2 \div 0.3$ и с учетом $f \le 300$ Гц, $V \le 10$ м/с параметр $\varepsilon_n << 1$, а значит решение уравнения (1) можно искать в виде разложения по этому малому параметру. Ограничиваясь старшим членом этого разложения, получим, что:

$$N_n = \frac{Q_n}{2\left(\gamma_n + \left|\mathrm{Im}k_n\right|\right)} \tag{5}$$

При этом дипольный источник шума Q_n имеет вид:

$$Q_n = \frac{\pi^2 s\left(k_x = 0, k_y = 0\right)}{4\rho_0^2\omega^2}\left(\frac{d\varphi_n}{dz}\right)^2 \tag{6}$$

ρ_0 – плотность воды, $s\left(k_x, k_y\right)$ – спектр дипольного момента давления. Декремент γ_n может быть выражен через частотно-угловой спектр ветрового волнения $B(\Omega,\theta)$ в виде:

$$\gamma_n = \frac{g^2}{2k_n}\left(\frac{d\varphi_n}{dz}\right)^2 \int_0^{k_0} \eta\sqrt{k_0^2 - \eta^2}\,d\eta \int_{-\pi}^{\pi} B(\Omega,\theta)\Omega^{-3}\,d\varphi \tag{7}$$

$$\Omega = \sqrt{g}\left[\left(k_n - \eta\cos\varphi\right)^2 + \eta^2\sin^2\varphi\right]^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

$$\theta = arctg\left(\frac{\eta\sin\varphi}{k_n - \eta\cos\varphi}\right) \tag{9}$$

где g – ускорение свободного падения, $k_0 = \omega/c(0)$. Заметим, что приведенная формула для γ_n учитывает как рассеяние "n" моды во все моды дискретного спектра, так и рассеяние её в моды сплошного спектра. Эмпирические спектры ветрового волнения обычно приводят в виде произведения нормированного частотного спектра $S(\Omega)$ и нормированного углового спектра $Q(\Omega)$, т.е.:

$$B(\Omega,\theta) = S(\Omega)Q(\Omega,\theta) \tag{10}$$

В дальнейшем для частотного спектра $S(\Omega)$ мы будем использовать общепринятую модель JONSWAP, а для углового спектра $Q(\Omega,\theta)$ эмпирический спектр, полученный в серии натурных экспериментов на разных стадиях развития ветрового волнения [5]:

$$S(\Omega) = \beta g^2\Omega^{-5}\exp\left[-1.25\left(\frac{\Omega_m}{\Omega}\right)^4\right]\gamma^{\exp\left[-(\Omega-\Omega_m)^2/2\sigma^2\Omega_m^2\right]} \tag{11}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & при \quad \Omega \le \Omega_m \\ 0.09 & при \quad \Omega > \Omega_m \end{cases}$$

$$Q(\Omega,\theta) = 2^{2s-1}\frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)}\left[\cos\left(\frac{\theta-\alpha}{2}\right)\right]^{2s} \tag{12}$$

$$s = \begin{cases} 11.5\left(\dfrac{g}{V}\right)^{2.5}\Omega_m^{-7.5}\Omega^5 & при \quad \Omega \le \Omega_m \\ 11.5\left(\dfrac{g}{V}\right)^{2.5}\Omega^{-2.5} & при \quad \Omega > \Omega_m \end{cases}$$

Здесь α – направление ветра, Ω_m – частота спектрального максимума, причем для развитого волнения $\Omega_m = 0.8g/V$, а для неразвитого зависит от старшего развития. Для эмпирических констант β и γ выберем средние значения $\beta = 8\times10^{-3}$, $\gamma = 3.3$. Нас будет интересовать угловой спектр шума, для которого на основании приведенных формул можно сделать ряд замечаний общего характера. Очевидно, что угловой спектр симметричен относительно направления скорости ветра. Анализ выражений (5,7-9) показывает, что анизотропия углового спектра шума максимальна для низших мод волновода и уменьшается с ростом номера моды. Наконец, с учетом вида углового спектра (12) можно показать, что максимум углового спектра соответствует направлению, перпендикулярному скорости ветра.

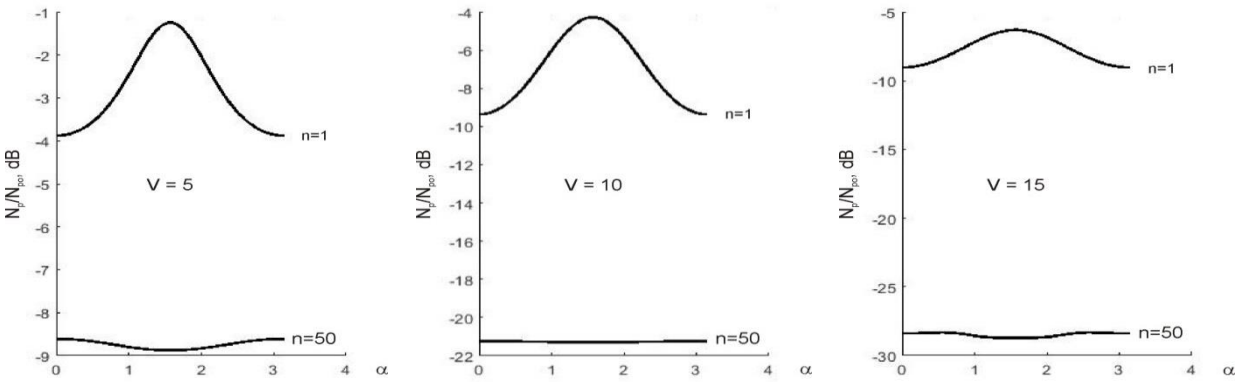


Рис. 1. Нормированное угловое распределение интенсивности шума в Баренцевом море при $f = 250$ Гц для первой ($n = 1$) и высшей ($n = 50$) мод волновода: скорость ветра $V = 5$ м/с, 10 м/с и 15 м/с.

Приведем результаты численных расчетов углового спектра шума для волновода с линейным профилем $c(z)$, открытом к поверхности и параметрами, типичными для Баренцева моря: глубина $H = 200$ м, $c(0) = 1490$ м/с, $c(H) = 1500$ м/с, дно жидкое со скоростью звука $c_1 = 2300$ м/с, плотностью $\rho_1 = 2$ г/см^3 и коэффициентом затухания $\delta = 0.1$ дБ/м·кГц. На рис. 1 приведены для частоты $f = 250$ Гц нормированные угловые спектры $N_n(\theta)/N_n^{(0)}$, где $N_n^{(0)}$ соответствует отсутствию эффектов рассеяния ($\gamma_n = 0$) и угол θ отсчитывается от направления скорости ветра. Для сравнения приведены результаты для первой ($n = 1$) и одной из высших ($n = 50$) мод при трех типичных значениях скорости ветра $V = 5$ м/с, 10 м/с и 15 м/с. Из результатов расчетов следует, что для низших мод анизотропия углового спектра шума весьма существенна и может достигать 3-5 дБ, а для высших мод шум практически изотропен. Разумеется, как видно из формулы (5), анизотропия углового спектра, вообще говоря зависит от соотношения γ_n и $\mathrm{Im}\,k_n$, т.е. коэффициента затухания в донном грунте δ. Тем не менее для низших мод волновода, не проникающих в дно, анизотропия спектра шума слабо зависит от величины δ, поэтому приведенные результаты расчетов, по сути, имеют универсальный характер. Для высших мод спектр шума практически изотропен также при любых значениях коэффициента затухания в дне. Вместе с тем для мод с промежуточными номерами степень анизотропии шума может существенно зависеть от соотношения эффектов рассеяния и затухания в дне (значений γ_n и δ).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ по гранту № 16-02-00929.

Литература

1. Курьянов Б.Ф. Подводные шумы океана // В кн.: Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982, С. 164-174.
2. Артельный В.В., Диденкулов И.Н., Раевский М.А. Низкочастотные динамические шумы в случайно-неоднородном океане // Акуст. журн. 1988. Т. 31. № 1. С. 12-18.
3. Артельный В.В., Диденкулов И.Н., Раевский М.А. Низкочастотное шумовое поле в океане с взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 6. С. 972-978.
4. Раевский М.А., Хилько А.И. О горизонтальной анизотропии динамических шумов в океанических волноводах // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 6. С. 633-637.
5. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат. 1985. 256 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ

М.С.Лабутина, А.И.Малеханов[1], канд.физ-мат.наук, А.В.Смирнов[1]
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия
[1]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

COMPARATIVE STUDY OF SUBOPTIMAL ARRAY PROCESSING OF PARTIALLY-COHERENT SIGNALS

M.S.Labutina, A.I.Malekhanov[1], Ph.D., A.V.Smirnov[1]
N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia
[1]Institute of Applied Physics, RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

В работе анализируется влияние ослабления пространственной когерентности сигнала, распространяющегося в случайно-неоднородном канале, на коэффициент усиления приемной антенной решетки при различных методах пространственной обработки сигнала на фоне изотропного шума. Основное внимание уделено сравнительной оценке эффективности квазиоптимальных методов в широкой области параметров, характеризующих когерентные свойства сигнала на входе решетки, и анализу тех ситуаций, в которых эти методы оказываются наиболее близкими к оптимальной обработке. Рассмотрены методы линейной и квадратичной обработки, включая метод фазированной решетки с аподизацией амплитудного распределения и метод квадратичного накопления выходных сигналов подрешеток. Показано, что иерархия методов обработки критически зависит от двух ключевых параметров – относительного масштаба когерентности сигнала (в сравнении с размером решетки) и относительного уровня его когерентной компоненты.

In this paper we analyzed the effect of spatial coherence attenuation of a signal propagating in a randomly inhomogeneous channel on the gain of receiving antenna array under various methods of spatial signal processing against isotropic noise. The main attention is paid to the comparative evaluation of the efficiency of quasioptimal methods in a wide range of parameters characterizing coherent properties of the signal at the antenna array input and to the analysis of those situations in which these methods are closest to optimal processing. We consider linear and quadratic processing methods, including the phased array method with apodization of the amplitude distribution and the quadratic subarray beamformer. It is shown that the hierarchy of processing methods depends critically on two key parameters - the relative scale of the signal coherence (in comparison with the subarray size) and the relative level of its coherent component.

Известно, что эффективность работы приемной антенной решетки (АР) как пространственного фильтра входных сигналов зависит от их спектральных (углы прихода) и корреляционных свойств. При работе антенн в случайно-неоднородной среде и достаточно больших расстояний от источников сигналов второй аспект становится принципиальным, поскольку могут возникать ситуации, когда масштаб пространственной когерентности сигнала отдельного источника становится меньше и даже много меньше размера АР. Оптимальные методы обработки, использующие полную информацию относительно функции пространственных корреляций (ФПК) сигнала на входе АР, способны обеспечить рост коэффициента усиления АР даже в таких условиях [1-3]. При этом практически важным становится вопрос количественной оценки возможностей методов, которые обеспечивают достаточно высокие (близкие к максимальным) значения выигрыша при значительном упрощении своей реализации, т.е. квазиоптимальных методов. Не касаясь собственно расчета функции пространственных корреляций сигнала на входе АР, можно поставить вопрос сравнительного анализа методов обработки частично-когерентного сигнала в наиболее общем виде. А именно, опираясь на эвристические соображения относительно вида ФПК и задавая ее в параметрическом виде, найти те области параметров задачи, в которых те или иные методы обработки могут играть роль квазиоптимальных, количественно оценить их эффективность и взаимную «иерархию». Настоящий доклад посвящен рассмотрению этого вопроса.

Из физических соображений представляется очевидным, что ключевыми параметрами задачи в подобной постановке становятся два – относительный масштаб когерентности сигнала, т.е. отношение масштаба когерентности к размерам АР, и относительная величина (уровень) когерентной компоненты в поле сигнала, которая сохраняет полную корреляцию по всей апертуре АР. Фактически, это означает предположение двухмасштабной модели ФПК сигнала, в которой один масштаб (конечный) отвечает присутствию рассеянной компоненты в поле сигнала, а другой (бесконечный) – когерентной компоненты. Анализ тех условий, в которых подобная двухмасштабная модель ФПК может реализоваться, выходит за рамки доклада. Отметим только, что результаты ряда работ указывают на реалистичность наших предположений о том, что монотонно спадающая ФПК сигнала удаленного источника, обусловленная статистическими эффектами распространения, может иметь «пьедестал» когерентной компоненты, уровень которого зависит, естественно, от расстояния до источника. В частности, ФПК такого вида

может реализоваться в канале мелкого моря в условиях рассеяния звука на ветровом волнении и взаимодействия звука с дном [4].

Постановка задачи и основные расчетные выражения. Предполагается, что линейная эквидистантная АР, состоящая из N элементов (расположенных через полдлины волны), принимает частично-когерентный сигнал, тональный источник которого расположен под нулевым углом (относительно нормали к АР). Нормированная ФПК R_{S} сигнала задается в параметрическом виде как функция экспоненциального типа с произвольным показателем степени $\alpha \geq 1$, находящаяся на пьедестале уровня δ:

$$R_{\mathrm{S}}(m,n) = \delta + (1-\delta)\exp\left\{-\left|\frac{m-n}{N_{\mathrm{cor}}}\right|^{\alpha}\right\} \tag{1}$$

где N_{cor} – безразмерная длина когерентности рассеянной компоненты (в числе элементов), δ – относительный уровень (по мощности) когерентной компоненты, m, n – номера элементов АР. Модели ФПК в трех частных случаях ($\alpha = 1, 2, \infty$) будем называть экспоненциальной, гауссовой и «ступенчатой» моделями, соответственно. Аддитивный шум предполагается изотропным (пространственно-белым) и единичной мощности. Нами рассматриваются следующие методы пространственной обработки: (1) синфазная АР как простейший метод ее фазировки в направлении на источник; (2) оптимальная линейная обработка [3], которая в случае ФПК вида (1) отвечает аподизированной синфазной АР с неравномерным (спадающим к краям) амплитудным распределением; 3) АР с квадратичным накоплением выходных сигналов отдельных одинаковых подрешеток длины N_{sub} (без перекрытия последних), при этом в каждой из подрешеток осуществляется синфазное накопление сигнала [1,2]; 4) оптимальная квадратичная обработка [1-3]. Эффективность метода обработки характеризуется нами величиной G коэффициента усиления АР, который стандартно определяется как отношение выходного отношения сигнал/шум (ОСШ) к входному ОСШ на отдельном элементе, т.е. как выигрыш АР по величине ОСШ:

$$G_{\mathrm{PH}} = \frac{\mathbf{W}^{+}\mathbf{R}_{\mathrm{S}}\mathbf{W}}{\sigma_{\mathrm{S}}^{2}\sigma_{\mathrm{N}}^{-2}\mathbf{W}^{+}\mathbf{W}},\ G_{\mathrm{LIN}} = N\frac{\lambda_1}{\sum_i \lambda_i},\ G_{\mathrm{SUB}} = \frac{\mathrm{Sp}(\mathbf{A}\mathbf{R}_{\mathrm{S}})}{\sigma_{\mathrm{S}}^{2}\sigma_{\mathrm{N}}^{-2}\mathrm{Sp}^{1/2}(\mathbf{A}^{2})},\ G_{\mathrm{QUA}} = \frac{\mathrm{Sp}^{1/2}(\mathbf{R}_{\mathrm{S}}^{2})}{\sigma_{\mathrm{S}}^{2}\sigma_{\mathrm{N}}^{-2}} \tag{2}$$

где $\mathbf{R}_{\mathrm{S}}$ – матрица пространственной корреляции сигнала на входе АР; σ_{S}^{2} и σ_{N}^{2} – мощность сигнала и шума на входе АР, соответственно; $\mathbf{W}$ – амплитудно-фазовое распределение (весовой вектор) АР; λ_i – собственные значения матрицы $\mathbf{R}_{\mathrm{S}}$ (в порядке их убывания с ростом номера i); $\mathbf{A}$ – матрица обработки на основе подрешеток (субапертур) [2]; $\mathrm{Sp}(...)$ – след матрицы.

Наиболее простая «ступенчатая» модель ФПК допускает несложное аналитическое рассмотрение, в результате которого получаются следующие выражения для выигрыша АР при синфазной (G_{PH}), субапертурной (G_{SUB}) и оптимальной (G_{OPT}) обработке, соответственно:

$$\begin{aligned}
G_{\mathrm{PH}} &\approx \begin{cases} N^{-1}\left(\delta N^{2} + (1-\delta)(2N - N_{\mathrm{cor}})N_{\mathrm{cor}}\right) & , N \geq N_{\mathrm{cor}} \\ N & , N < N_{\mathrm{cor}} \end{cases} \\
G_{\mathrm{SUB}} &\approx \begin{cases} \sqrt{NN_{\mathrm{sub}}^{-3}}\left(\delta N_{\mathrm{sub}}^{2} + (1-\delta)(2N_{\mathrm{sub}} - N_{\mathrm{cor}})N_{\mathrm{cor}}\right) & , N_{\mathrm{sub}} \geq N_{\mathrm{cor}} \\ \sqrt{NN_{\mathrm{sub}}} & , N_{\mathrm{sub}} < N_{\mathrm{cor}} \end{cases} \\
G_{\mathrm{QUA}} &\approx \begin{cases} \sqrt{(N - N_{\mathrm{cor}})^{2}\delta^{2} + (2N - N_{\mathrm{cor}})N_{\mathrm{cor}}} & , N_{\mathrm{cor}} < N \\ N & , N_{\mathrm{cor}} \geq N \end{cases}
\end{aligned} \tag{3}$$

Расчеты для остальных двух моделей ФПК проводятся численно, включая выигрыш аподизированной АР (заранее уровень аподизации не определен и подбирается адаптивно в зависимости от параметров задачи).

Результаты и выводы. Анализ выражений (3) позволил установить, что выбор метода квазиоптимальной обработки критически зависит от уровня когерентной компоненты. При относительно малых значениях $\delta \leq 0.25$ таковым является метод подрешеток, при этом их оптимальный размер зависит от величины δ : $N_{\mathrm{SUB}} \approx 3N_{\mathrm{cor}}$ при $\delta = 0.25$ и $N_{\mathrm{SUB}} \approx 1.5N_{\mathrm{cor}}$ при

$\delta = 0$, т.е. когда когерентная компонента отсутствует (что сходится с результатами [2]). В случае достаточно высоких значений δ, как и следовало ожидать, квазиоптимальным методом становится синфазное накопление сигнала по всей апертуре АР, в то время как метод на основе подрешеток резко теряет свою эффективность.

На рис. 1 показан выигрыш G_{SUB} в зависимости от размера подрешеток для трех моделей ФПК в случае $N = 360$, $N_{\text{cor}} = N/4 = 90$, $\delta = 0.3$. Видно, что точность модели ФПК не столь важна с точки зрения расчетов выигрыша АР (величина варьирует в пределах 1 дБ), поэтому аналитические оценки на основе выражений (3) представляются вполне оправданными, несмотря на качественный характер «ступенчатой» модели. В дальнейших численных расчетах используется гауссова модель для рассеянной компоненты ФПК как наиболее широко используемая в подобных задачах.

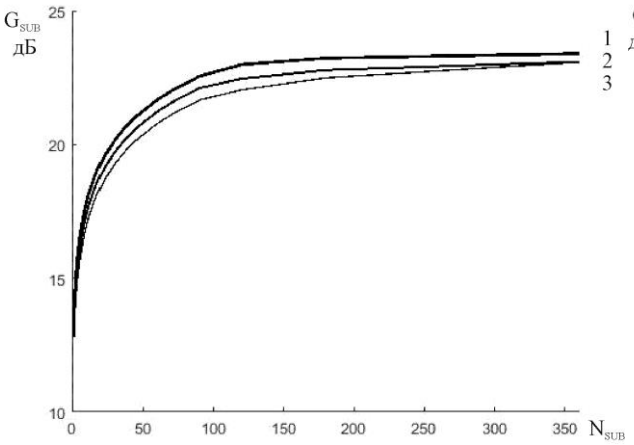


Рис. 1. Выигрыш G_{SUB} для АР длиной $N = 360$ как функция длины подрешетки N_{sub} для трех моделей ФПК: «ступенчатой» (1), гауссовой (2), экспоненциальной (3). Параметры $\delta = 0.3$, $N_{\text{cor}} = 90$.

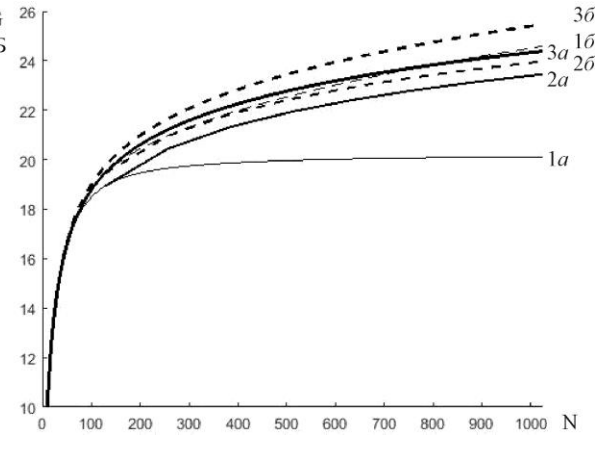


Рис. 2. Выигрыш АР при разных методах обработки (1 – $G_{\text{РН}}$, 2 – G_{SUB} при $N_{\text{SUB}} = 128$, 3 – G_{QUA}) как функция её длины N. Параметры $N_{\text{cor}} = 60$, $\delta = 0$ (а) и $\delta = 0.2$ (б).

На рис. 2 показан выигрыш АР при указанных выше методах обработки (кроме оптимальной линейной) для заданных параметров ФПК (1), «регулирующих» когерентные свойства сигнала. Видно, что «иерархия» методов обработки, в том числе, выбор квазиоптимального метода, существенно зависит от этих параметров. В частности, с ростом уровня когерентной компоненты субапертурный метод начинает терять эффективность по отношению к синфазной АР, и последняя, в свою очередь, становится квазиоптимальной обработкой сигнала.

На рис. 3 и 4 показан выигрыш G_{SUB} в отношении ко всем перечисленными методам обработки. Ярко выраженный максимум на рис. 3 отвечает оптимальному делению АР на подрешетки ($N_{\text{sub}} = 128 \approx 2N_{\text{cor}}$). Видно также, что оптимизация весового вектора АР (аподизация) не дает заметного дополнительного выигрыша в сравнении с синфазной АР, т.е. оптимизация в классе линейной обработки в рамках модели сигнала (1) не является достаточно эффективной и при не слишком малых значениях δ квазиоптимальным становится простейший метод компенсации АР на источник сигнала. На рис. 4 показан граничный случай смены выбора квазиоптимальной обработки, при этом пороговое значение $\delta \approx 0.15$ при данных параметрах.

Таким образом, в зависимости от вида ФПК принимаемого сигнала квазиоптимальный метод его обработки может быть обеспечен либо с помощью АР, фазированной в направлении на источник (в данном случае нулевого в среднем угла прихода – синфазной АР), либо с помощью АР с делением ее на подрешетки с размером, порядка масштаба когерентности сигнала (от 1.5 до 3 величин последнего). Второй метод достаточно эффективен, однако, только при малых уровнях когерентной компоненты в поле сигнала (не выше ~ 0.25). Ключевыми параметрами выбора квазиоптимальной обработки оказываются относительный масштаб когерентности рассеянной компоненты и уровень «остаточной» корреляции, определяемый энергетическим вкладом когерентной компоненты. С точки зрения получения количественных оценок важно, что конкретный вид зависимости основного максимума ФПК не оказывает значительного влияния на величину выигрыша АР и взаимное соотношение методов обработки по их эффективности.

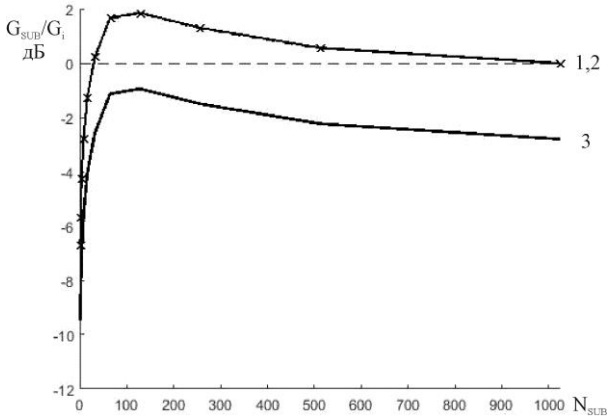


Рис. 3. Выигрыш G_{SUB} для АР длиной $N = 1024$, отнесенный к выигрышу при других методах ($1 - G_{\text{PH}}$, $2 - G_{\text{AP}}$, $3 - G_{\text{QUA}}$), в зависимости от длины подрешетки N_{sub}. Параметры $\delta = 0.05$, $N_{\text{cor}} = 60$.

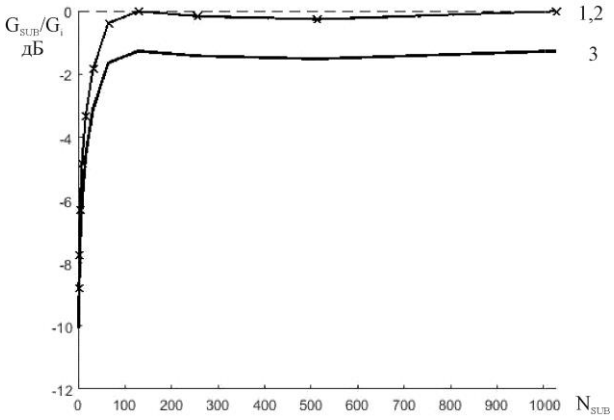


Рис. 4. То же, при параметре $\delta \approx 0.15$.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ по гранту № 18-32-01045.

Литература

1. Cox H. Line array performance when the signal coherence is spatially dependent // J. Acoust. Soc. Am. 1973. V. 54. № 6. P. 1743-1746.
2. Morgan D.R., Smith T.M. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field beamforming // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 87. № 2. P. 737-747.
3. Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891-897.
4. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А., Смирнов А.В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 5. С. 501-512.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ МОРСКОГО ДНА

В.И.Калинина, И.П.Смирнов, канд.физ-мат.наук, А.И.Хилько, д-р физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

RECONSTRUCTION OF IMAGES IN SYSTEMS OF HIGH-FREQUENCY ACOUSTIC VISION IN THE SEA ENVIRONMENT

V.I.Kalinina, I.P.Smirnov, Ph.D., A.I.Khil'ko, Dr.Sc.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

Исследуются методы и алгоритмы регуляризации, позволяющие повысить точность и устойчивость реконструкции геоакустических параметров при послойной реконструкции донных слоев с использованием параметрических моделей формирования сигналов, отраженных от упругого слоистого полупространства при когерентном импульсном зондировании дна морского шельфа. Приводятся результаты анализа эффективности предлагаемых алгоритмов, выполненного методом численного стохастического моделирования.

Methods and algorithms of regularization are investigated, which raise accuracy and stability of reconstruction of geoacoustic parameters at level-by-level reconstruction of bottom layers with the use of parametrical models of formation of the signals reflected from elastic layered semispace at coherent pulse sounding of sea shelf bottom. Results of the analysis of the offered algorithms efficiency executed by the numerical stochastic modeling are presented.

Устойчивость и точность решения задачи сейсмоакустического (СА) наблюдения морского дна зависит от адекватности моделей сигналов и шумов и оптимальности методов поиска и принятия решений [1]. Развитая в рамках приближения геометрической акустики физико-математическая модель формирования сигналов, отраженных от морского дна, позволяет использовать взаимосвязь параметров для сужения интервала поиска решения в многомерном пространстве при их послойной реконструкции. При этом ошибки оценивания параметров верхних донных слоев понижают качество оценок параметров более глубоких слоев. Для повышения устойчивости алгоритмов реконструкции параметров морского дна, правила принятия решений должны быть оптимизированы с учетом статистических характеристик шумов. В алгоритмах инверсии, вектор восстановленных значений геоакустических параметров донных слоев $\boldsymbol{\varphi}$ соответствует экстремуму выходной мощности процессора. Поиск экстремума осуществляется в определяемой априорной информацией области Ξ . При этом методы прямого перебора гипотез малоэффективны вследствие высокой размерности пространства поиска и овражного характера целевой функции. В этом случае следует использовать методы упорядоченного поиска, учитывающие специфику задачи. Одним из вариантов подобных методов являются *методы последовательной релаксации*, состоящие в последовательной максимизации сформированного функционала по отдельным параметрам (группам параметров) при фиксированных значениях прочих параметров. Эффективность подобных методов зависит, главным образом, от различных аспектов стратегии поиска, в частности, удачности выбора начальных значений, а также выбора последовательности оценок значений определяемых параметров [2]. Выбор оптимальной последовательности оценок наблюдаемых параметров основывается на использовании модели формирования отраженных от слоистого дна СА импульсов. Такая модель, объединяя большой объем априорной информации, позволяет использовать зависимости между наблюдаемыми параметрами. В задаче восстановления параметров упругого слоистого дна вектор $\boldsymbol{\varphi}$ имеет следующие компоненты: толщины слоев, плотности их грунтов, скорости продольных волн, скорости поперечных волн, их декременты затухания; соответственно, размерность пространства параметров равна $L = 6(N+1)$, где N — число слоев (толщина нижнего слоя h_N считается бесконечной). Если донные слои достаточно толстые, а зондирование дна осуществляется достаточно короткими СА импульсами, волновые компоненты, соответствующие различным слоям не пересекаются и не интерферируют. В общем случае отраженные от каждой границы сигналы представляют собою наборы распределенных по оси задержек интерферирующих СА импульсов (рис.1). По мере заглубления границы число отраженных от нее СА импульсов быстро нарастает, их амплитуды уменьшаются, и они распределяются все в большем интервале задержек.

Число принимаемых приемником отраженных СА импульсов достигает величины $M = 1 + \sum_{i=1}^{N} 4^i$. Результирующее отраженное от слоистого упругого дна СА поле может выглядеть сильно изрезанным, приобретая хаотический вид. Идентификация волн в таких услови-

ях возможна лишь с помощью априорной информации в виде модели. При этом реконструкцию можно осуществлять только последовательно, начиная от самого верхнего слоя, продвигаясь к нижележащим слоям. Максимизация точности и глубины СА реконструкции дна с учетом упомянутых ограничений может быть обеспечена оптимизацией решающих правил, заключающейся в регуляризации, реализующейся на основе накопления полезных сигналов и подавления шумов и помех. Выполнение указанных операций возможно лишь с использованием априорной информации. Рассмотрим особенности такого рода регуляризации для случая, когда прием СА сигналов осуществляется горизонтальной антенной с гидрофонами, размещенными в точках $\mathbf{r}_R$. Зондирующие СА ЛЧМ импульсы возбуждаются точечным СА излучателем. При выполнении реконструкции геофизических параметров дна, измеряемые данные подвергаются инверсии, выполняемой алгоритмом поиска и принятия решений. На *первом этапе инверсии* отраженные от дна импульсы вместе с помехами и шумами подвергаются согласованной фильтрации. При этом используются априорные данные о структуре зондирующих импульсов. Такая операция обеспечивает частотное накопление сигналов в полосе работы излучателя, в частности, отношение сигнала к гауссовскому шуму вырастет в $\sqrt{\Delta f \Delta T}$, где ΔT - длина импульса. На *втором этапе инверсии* выполняется операция пространственного накопления импульсов в пределах пространственной апертуры решетки гидрофонов. Такое накопление осуществляется вдоль годографа, определяющего траекторию времен прихода импульсов на гидрофоны решетки. Положение годографа находится с помощью алгоритма, основывающегося на использовании гипотез о значениях геофизических параметров. Полученный подобным образом выборочный вектор измеряемых данных после накопления $\mathbf{x}_l$ используется в процессоре в виде L_2-нормы. Регуляризация при использовании такого рода процессора повышает устойчивость алгоритмов инверсии. Рассмотрим сценарий наблюдения, определяемый данными, показанными в таблице. В рассматриваемом случае, когда верхний упругий слой имеет достаточно большую толщину, отраженные импульсы на оси задержек не пересекаются. С выхода приемной решетки формируется годограф – совокупность отраженных от дна импульсов, выстраивающихся в плоскости $\{ x_1^{(R)} - \tau \}$ набора траекторий. Как видно из расчетов, уровни поперечных и обменных компонент существенно меньше продольных компонент. В случае относительно маломощных источников и высоких уровней шумов, измерения параметров поперечных и обменных компонент не могут быть осуществлены с необходимой точностью.

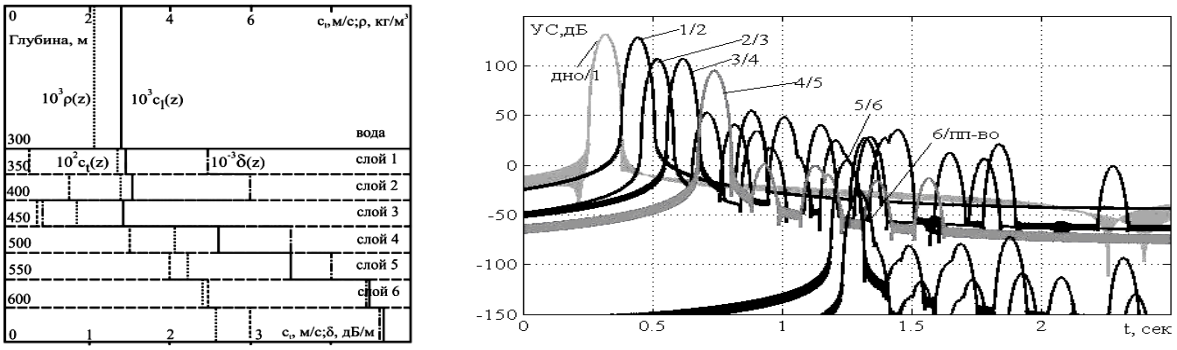


Рис. 1. Структура дна (слева) и компоненты ЛЧМ импульса, отраженного от такого дна (справа).

С учетом указанных обстоятельств, ограничимся при инверсии использованием лишь данных, соответствующих продольным компонентам, в частности, волне, отраженной от донной поверхности. При рассматриваемой модели расчетов, эта волновая компонента локализуется в области задержек 0.3 секунды. Как уже отмечалось, учет параметрической зависимости характеристик модели, позволяет реализовать алгоритмы регуляризации, что делает метод инверсии более устойчивым (робастным). В рассматриваемом случае, в качестве алгоритма регуляризации, используем когерентное накопление отраженных от донных границ сигналов, расположенных вдоль траекторий, формирующихся на годографе с выхода приемной антенны. В частности, такой траекторией является криволинейная траектория в плоскости $\{ x^{(R)} - \tau \}$, соответствующая продольной компоненте, отраженной от донной поверхности. При согласованной

фильтрации и таком пространственном накоплении антенной длиной $\Delta L_n = x_n^{(R)} - x_1^{(R)}$, когда модельные сигналы полностью совпадают с наблюдаемыми (измеряемыми) сигналами, отношение сигнала с выхода антенны к гауссовскому шуму вырастет в $\sqrt{\Delta f \, \Delta T \Delta L}$. Поскольку при инверсии, значения параметров донных слоев считаются неизвестными, необходимо осуществлять поиск решения, который соответствует минимуму величины L_2-нормы. Поиск следует осуществлять в интервале значений параметров донного слоя, который определяется априорной информацией. Воспользуемся проекционным методом и рассмотрим структур с выхода L_2-процессора в плоскости параметров $\left\{c_1^{(0)}, \rho_1\right\}$. полагая остальные параметры задачи заданными приближенно из априорных данных (Таблица 1). На рис.2, слева показана структура сигналов с выхода процессора в виде L_2-нормы, в области расположения истинных значений параметров $\left\{c_1^{(0)}, \rho_1\right\}$, размер которой также выбирается из априорных данных. При расчетах выходных сигналов процессора, полагалось, что шумы полностью отсутствуют. Из анализа структуры сигнала L_2 - процессора в плоскости $\left\{c_1^{(0)}, \rho_1\right\}$ после регуляризации, заключающейся в когерентном накоплении в плоскости $\{ x^{(R)} - \tau \}$ отраженной от донной поверхности продольной компоненты (рис4а) видно, что относительный экстремум находится в овраге, что связано с тем, что сигнал процессора относительно слабо зависит от ρ_1 . Экстремум локализован в малой области, что обеспечивает большую точность и устойчивость при оценке параметров $\left\{c_1^{(0)}, \rho_1\right\}$. Для более устойчивой оценки ошибок при оценивании решений в присутствие шума рассмотрим усредненные характеристики ошибок по большому интервалу реализаций шума. На рис. 2, справа, для примера, показана зависимость средних оценок $\left\langle \delta\rho_1 \right\rangle$ в зависимости от входного отношения сигнала к шуму (ОСШ) для случая использования регуляризации и (кривые с номером 1) и для случая ее отсутствия (кривые с номером 2).

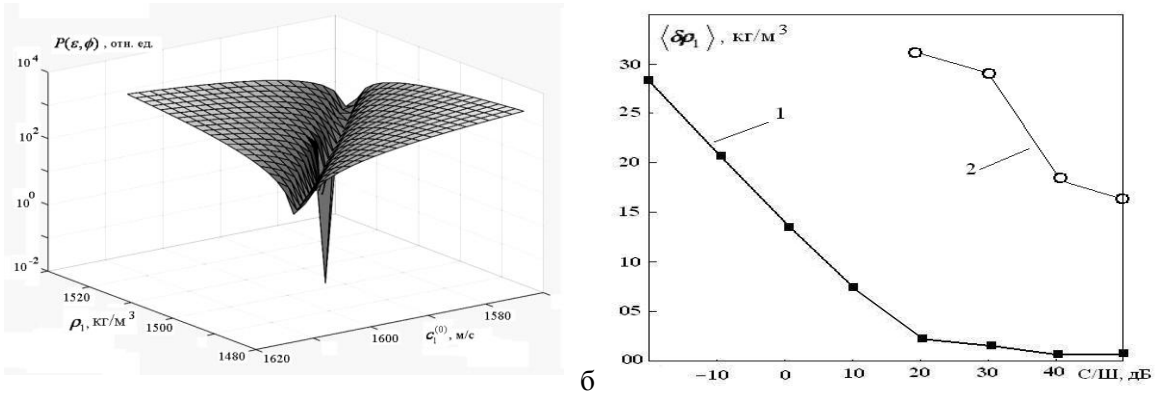
S - излучатель	$F_S(0)$, Вт	Δf, Гц	T_S, сек	$x_1^{(S)}$, м	$z_1^{(S)}$, м	$x_i^{(S)} - x_{i+1}^{(S)}$, м
	300	150-250	0.125	0	120	-
R – приемник из n=20 гидрофонов	-	Δf, Гц	-	$x_1^{(R)}$, м	$z_1^{(R)}$, м	$x_j^{(R)} - x_{j+1}^{(R)}$, м
	-	150-250	-	10	36,875	3,6875

Истинные значения параметров волновода

Слои, k	ρ_k, кг/м^3	$c_k^{(0)}$, м/с	$c_k^{(1)}$, м/с	$\delta_k^{(0)}$, дБ/м	$\delta_k^{(1)}$, дБ/м	h_k, м
0	1040	1450	-	0	-	300
1	1500	1600	400	0	0	100
2	1800	1900	700	0	0	?

Диапазон поиска, определяемый из априорных данных

Слои, k	ρ_k, кг/м^3	$c_k^{(0)}$, м/с	$c_k^{(1)}$, м/с	$\delta_k^{(0)}$, дБ/м	$\delta_k^{(1)}$, дБ/м	h_k, м
0	1040	1450	-	0	-	300
1	1480-1520	1580-1600	380-420	0	0	80-120
2	1780-1820	1880-1920	680-720	0	0	?



а б

Рис. 2.

Представленные зависимости получены при усреднении по 10^3 реализациям шума. Видно, что присутствие шума приводит к среднему смещению оценок и их разбросу, которые нарастают по мере увеличения уровня шума. Из анализа численных экспериментов видно, также, что точность оценивания плотности верхнего упругого слоя заметно меньше, чем точность восстановления значения скорости продольной волны. Это обусловлено тем, что параметры отраженного сигнала от упругого слоя относительно слабо зависят от плотности слоя, по сравнению с зависимости от скорости продольно волны, что, в частности, проявляется в овражной форме структуры мощности процессора в исследуемой плоскости параметров. Как видно из графиков, показанных на рис.2, использование алгоритм регуляризации позволило существенно повысить устойчивость оценки параметров донного слоя, что следует из сравнения кривых (1) и (2). Дальнейшие этапы реконструкции параметров упругого слоя должны основываться на измерениях волновых компонент, отраженных от нижней границы верхнего упругого слоя, в том числе и поперечную волну. Это позволяет оценить скорость такой волны и толщину верхнего упругого слоя. При этом полученные на предыдущих этапах оценки плотности слоя и скорости продольной волны будут использоваться как уточненные, по сравнению с априорными данными, значения. После оценки скорости поперечной волны и толщины слоя, можно вернуться к оценке продольной волны и плотности. Итерационный процесс уточнения чаще всего сходится. Полученные оценки параметров верхнего упругого слоя используются при оценке нижнего упругого слоя. Такая реконструкция является послойной. Поскольку оценки параметров верхнего слоя могут быть получены лишь с ограниченной точностью, которая зависит от отношения сигнала к шуму, а также ширины полосы частот зондирующих импульсов и размеров приемной антенны, точность оценивания параметров нижних слоев будет меньше. По мере реконструкции более глубоких слоев, ошибки будут накапливаться, так, что начиная с некоторой глубины, реконструкция параметров донных слоев перестанет удовлетворять заданным требованиям.

По итогам работы можно сделать следующие выводы. При решении обратной задачи реконструкции параметров дна важную роль играет использование априорной информации в виде параметрических моделей формирования сигналов, отраженных от упругого слоистого полупространства при когерентном импульсном зондировании дна морского шельфа. На основе предпринятых в работе численных стохастических экспериментов по регуляризации с использованием моделей показано, что точность и устойчивость реконструкции геоакустических параметров повышается за счет используемого метода послойной реконструкции донных слоев.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-29-02081).

Литература

1. В.И. Калинина, И.П. Смирнов, А.И. Малеханов, А.И. Хилько Когерентная морская сейсмоакустика: новые подходы к реконструкции структуры донных слоев в шельфовых акваториях // Изв. РАН серия Физическая. 2017. Т. 81, № 8, С. 1020–1027.
2. Смирнов И.П., Калинина В.И., Хилько А.И. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. I Решающие правила // Акустический журнал. 2018, Т. 64, № 1, С. 46–55.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ СИГНАЛОВ НА ШЕЛЬФЕ

А.Н.Рутенко, д-р физ-мат.наук, Д.С.Манульчев, М.Р.Джеркенсон[1], д-р наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
[1]ExxonMobil, Хьюстон, США

STUDY OF SEISMIC SURVEY SIGNAL ENERGY PROPAGATION ON THE SHELF

A.N.Rutenko, Dr.Sc., D.S.Manul'chev, M.R.Jenkerson[1], Ph.D.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
[1]ExxonMobil, Houston, USA

Показаны особенности распространения на относительно мелководном северо-восточном шельфе о. Сахалин энергии сейсморазведочных сигналов вдоль трасс, ориентированных вдоль и поперек шельфа. Установлены эффекты, вызванные влиянием рельефа дна и пространственными неоднородностями пород, слагающих дно.

The work shows the features of seismic survey signal energy propagation on the relatively shallow water northeast shelf of Sakhalin Island (Russia) along the traces, oriented across and along the shelf. The effects caused by the influence of the bathymetry and spatial inhomogeneities of the rocks making up the bottom are defined.

Мелководная (6-20 м) область северо-восточного шельфа о-ва Сахалин, простирающаяся на север от входа в залив Пильтун, является важным районом летне-осеннего нагула охотско-корейской (западной) популяции серых китов [1], которая занесена в *Красную книгу* РФ. Компания *Эксон Нефтегаз Лимитед*, являющаяся оператором по проекту "Сахалин-1", было принято решение в летне-осенний период во время нагула серых китов в данной акватории следить за их физиологическом состоянием, распределением по акватории, за кормовой базой и уровнями антропогенных акустических шумов в районах их питания, а во время проведения сейсморазведочных исследований в реальном времени контролировать параметры акустических импульсов, формируемых сейсморазведочными сигналами в водном слое, чтобы минимизировать их воздействие на серых китов. Для рационального освоения данного нефтегазового месторождения необходимо периодически проводить в море сейсморазведочные исследования с применением мощных пневмоизлучающих систем [2]. Энергия, формируемых ими сейсмоакустических импульсов с затуханием распространяется в районы кормления серых китов и поэтому при планировании этих исследований осуществляется предварительное моделирование параметров акустических импульсов, которые будут формироваться на границах ближайшего районе кормления серых китов. Для корректного моделирования надо знать особенности и потери при распространении энергии сейсморазведочного сигнала в данной области северо-восточного шельфа о. Сахалин. Такие оценки можно получить при анализе результатов акустических измерений, проведенных специально на наиболее важных трассах распространения с применением тональных излучателей, но можно воспользоваться и результатами правильно организованного акустического мониторинга одной из сейсморазведок. В докладе приводятся некоторые результаты такого анализа.

В 2015 г. во время проведения компанией *Эксон Нефтегаз Лимитед* сейсморазведочных исследований на северо-восточном шельфе о. Сахалин акустический мониторинг осуществлялся с помощью автономных подводных акустических регистраторов - АПАР [3], которые обеспечили в точках мониторинга, показанных на рис. 1, измерения у дна вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2-15000 Гц с динамическим диапазоном 145 дБ и возможностью передачи в реальном времени части акустических данных по УКВ-ЧМ радиотелеметрическому каналу или результатов специального анализа по спутниковому *Иридиум* телеметрическому каналу на береговой пост [3]. Данная акватория характеризуется пологим песчаным дном с уклоном меньше 0.004 и сложными гидродинамическими условиями. Скорость приливных течений может достигать 1.5 м/с и поскольку глубина моря в основных точках акустического мониторинга равна 10-20 м, то на измерительный гидрофон может оказывать существенное влияние как приливно-отливные течения, так и орбитальное движение частиц воды в штормовых поверхностных волнах и волнах зыби, вызывая низкочастотные псевдошумы обтекания.

Поскольку нам известно время и координаты точки, в которой производилось излучение акустического импульса сейсморазведочным судном, движущимся по заданному геоакустическому профилю, то мы можем исследовать особенности распространения энергии этого сигнала на данном участке шельфа Охотского моря. В данной работе используются результаты стационарных акустических измерений, проведенных у дна с помощью гидрофонов АПАР [3], уста-

новленных на 10 и 20 метровых изобатах в точках, указанных на рис. 1. В результате этого мониторинга был получен уникальный экспериментальный материал, который с разрешения компании *Эксон Нефтегаз Лимитед* мы частично используем в этой работе.

Начнем с рассмотрения аномального поведения графиков значений $SEL^{imp}_{\Delta T=4s}(\Delta f) = 10\lg\left(\Delta T \int_{f_1}^{f_2} G(f)df\right)$, дБ отн. 1 мкПа^{2}с. Это оценки энергии импульсного акустического сигнала в частотном диапазоне - Δf, измеренном на временном интервале равном 4 секундам. Биологи этот параметр называют уровнем воздействия или уровнем акустического облучения. Для импульсного сигнала, обычно, его рассчитывают на временном интервале, содержащем 90% энергии измеренного импульса. В этом случае $\Delta T = T_{90\%}$.

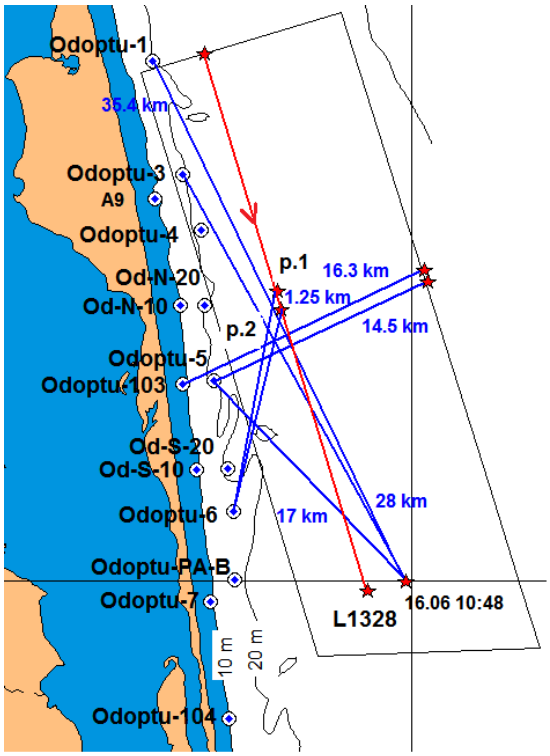


Рис. 1.

На рис. 2 для точки акустического мониторинга Odoptu-6 приведены значения $SEL^{imp}_{\Delta T=4s}(\Delta f)$, соответствующие уровням энергии акустических импульсов, измеренные в трех частотных диапазонах. Данные измерения проведены во время движения сейсморазведочного судна по геоакустическому профилю L1312. Энергия акустического импульса в частотном диапазоне 10-70 Гц, приносится в точку измерения донными и водно-донными модами, поскольку средняя глубина моря на трассах их распространения равна, примерно, 25 м, а энергию импульса в частотном диапазоне 70-350 Гц, переносят водные моды. Согласно графикам $SEL^{imp}_{4s}(\Delta f)$, представленным на рис. 2, потери при распространении энергии сейсморазведочного сигнала переносимой водными модами (70-350 Гц) – график относительно симметричен точке, которая примерно соответствует траверзу точки приема, а в графике $SEL^{imp}_{4s}(10-70Hz)$ на его северном участке ярко выражены интерференционные пики на 10-15 дБ превышающие однородную функцию потерь.

На рис. 3 показаны вариации акустического давления и их спектры, измеренные у дна в точке мониторинга Odoptu-6 соответствующие сейсморазведочным сигналам, излученным в точках р.1 и р.2, расположенных на геоакустическом профиле L1312, показанном на рис. 1. Согласно рис. 2 точке излучения р.1 соответствует интерференционный максимум – зона конвергенции. Ее пространственный масштаб, примерно, равен 2.5 км. Значение $SEL^{imp}_{\Delta T=T_{90\%}}(10-2000Hz)$ для точки излучения р.1, равно 153 дБ, а для р.2, равно 143 дБ. Столь существенная разница в энергии импульса обусловлена энергией, принесенной волнами с частотами 30-60 Гц, которые распространялись со скоростью меньше средней скорости звука в водном слое.

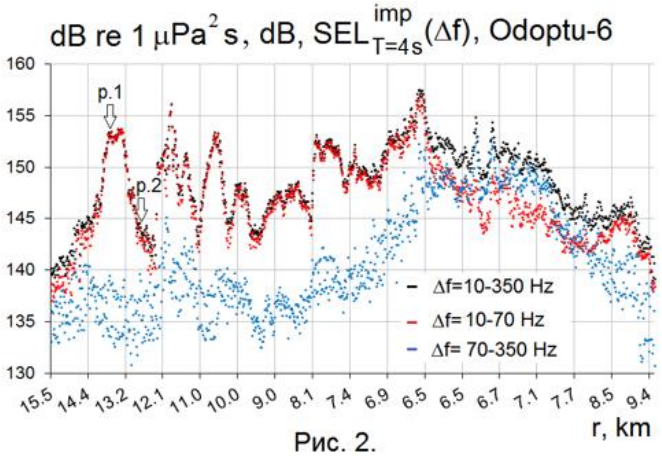


Рис. 2.

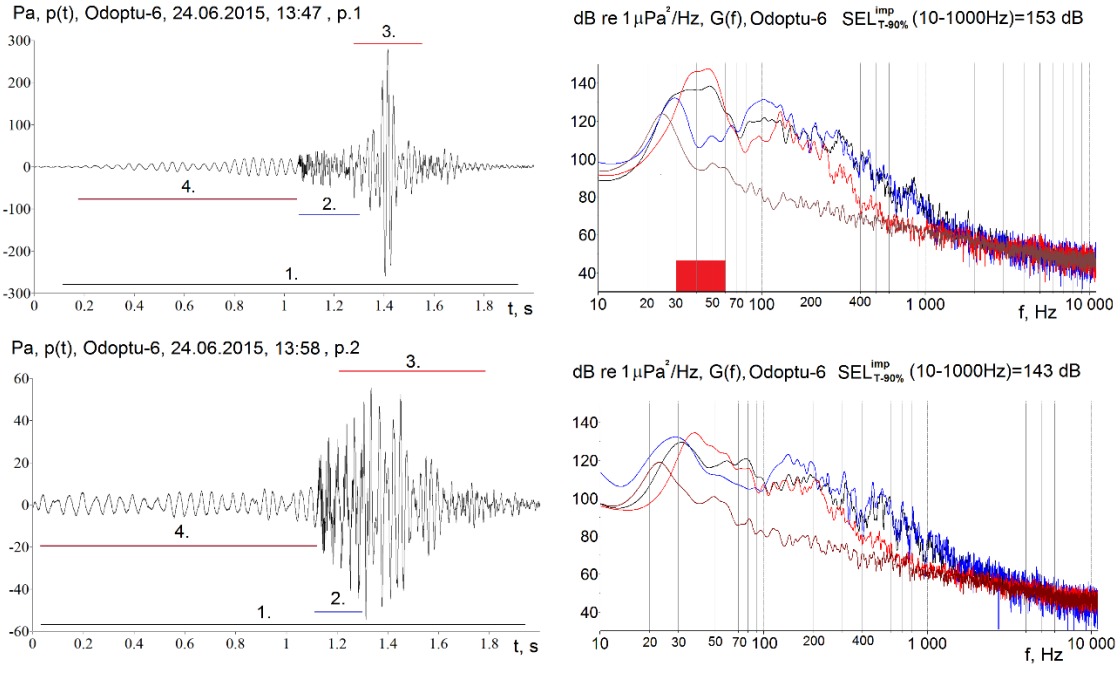


Рис. 3.

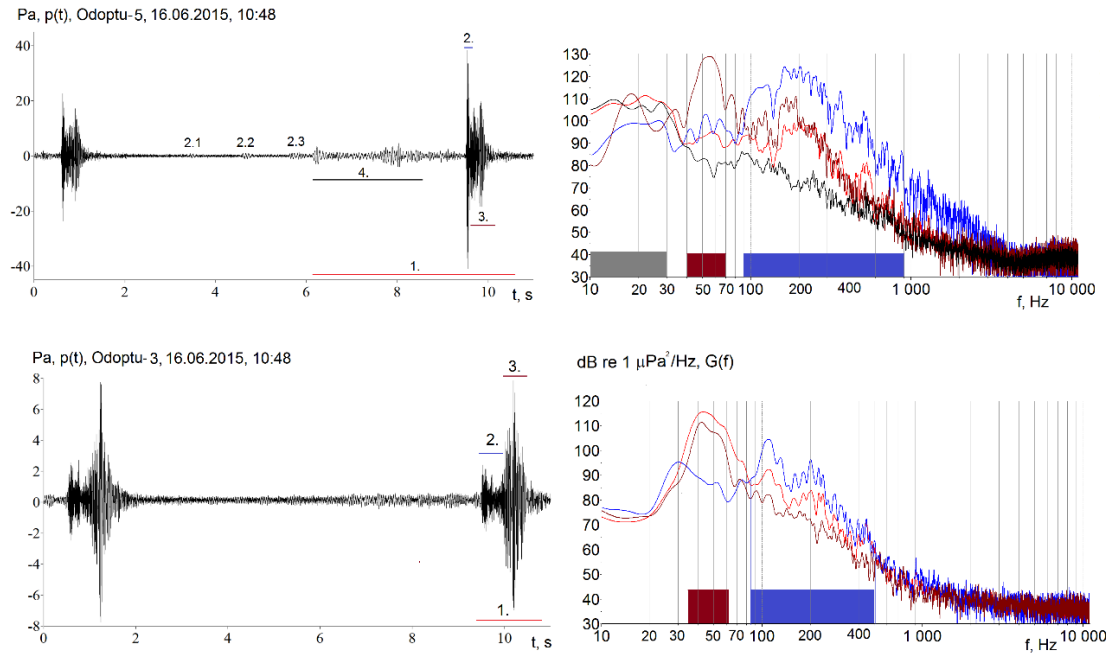


Рис. 4.

Графики, представленные на рис. 4, иллюстрируют распространение энергии сейсморазведочного сигнала вдоль трасс, простирающихся вдоль шельфа длинной 17 и 28 км (см. рис. 1).

В точку акустического мониторинга Odoptu-5 первыми приходят импульсы 2.1, 2.2 и 2.3, сформировавшиеся из-за отражений на больших глубинах, затем приходят продольные волны с частотами до 30 Гц, распространившиеся в дне – *предвестник*. За водными модами (90-1000 Гц) приходят водно-донные моды с частотами 40-70 Гц, их групповая скорость распространения меньше скорости звука в воде, но именно эти волны формируют пространственные аномалии в функции потерь, в которых их амплитуда может вырасти в 6 раз (см. рис. 3). Согласно рис. 4 в точке мониторинга Odoptu-3 их амплитуды значительно превышают амплитуды водных мод, и они практически определяют энергию измеренного импульса.

На рис. 5 представлены результаты анализа акустических импульсов, сформированных сейсморазведочным сигналом, распространяющимся поперек шельфа на 20 и 10 метровых изобатах – точки мониторинга Odoptu-5 и Odoptu-103. Здесь следует отметить, что на 2 км трассе с поднимающимся на 10 м дном происходят ярко выраженные трансформации как во временной,

так и в частотной областях. На 10 м изобате основная энергия импульса расположена в частотном диапазоне 80-400 Гц с двумя выраженными пиками мощности на частотах 90-200 Гц и 200-400, причем водные моды с частотами 200-400 Гц приходят раньше более низкочастотных.

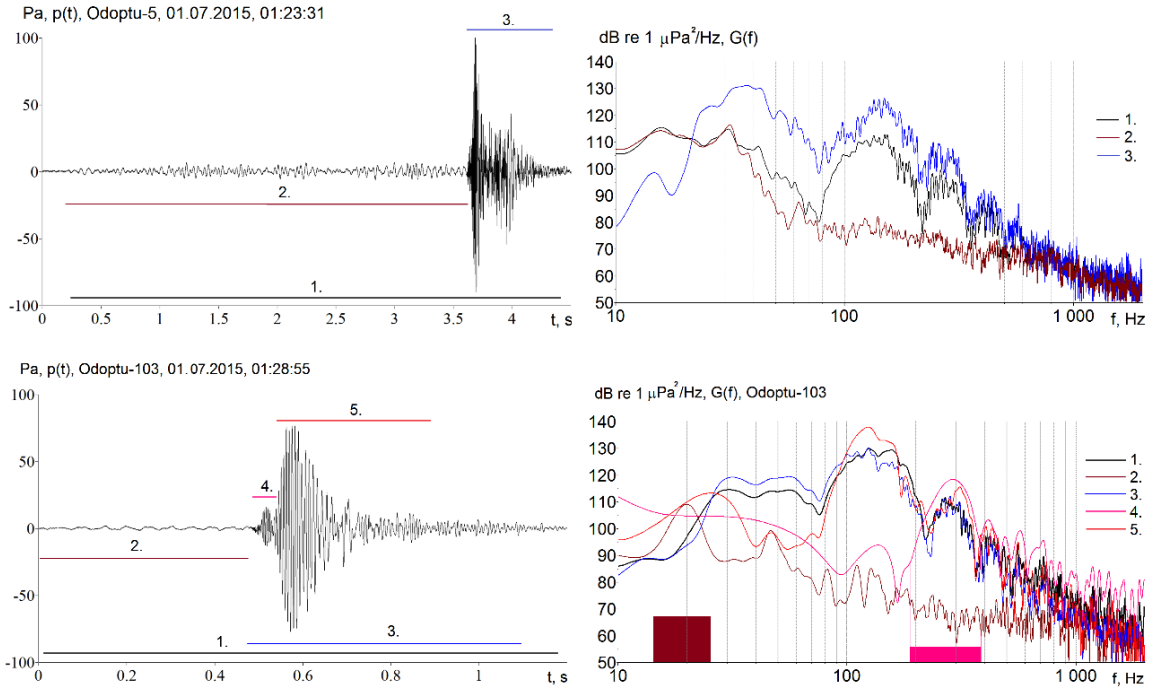


Рис. 5

В заключении авторы благодарят компанию *Эксон Нефтегаз Лимитед* за организацию и проведение данных исследований.

Литература

1. Тюрнева О.Ю., Маминов М.К., Швецов Е.П. и др. Сезонные перемещения серых китов (Eschrichtius robustus) между кормовыми районами на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Морские млекопитающие Голарктики: Сб. науч. трудов 4-ой междунар. конф. Изд. СПб Университета, 2006. С. 530-535.
2. Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. Vol. 134. P. 21-44.
3. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. журнал. 2015. Том 61. №4. С. 500-511.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ИЗ МОРЯ НА СУШУ

А.Н.Рутенко, д-р физ-мат.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

RESULTS OF EXPERIMENTAL AND MODEL STUDIES OF THE SEISMO-ACOUSTIC WAVE PROPAGATION FROM THE SEA TO THE SHORE

A.N.Rutenko, Dr.Sc.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Экспериментально и теоретически исследуются особенности распространения на сушу энергии низкочастотных тональных и импульсных акустических сигналов, генерируемых в море. Измерения вариаций акустического давления на суше проводились на разных горизонтах в 90 м скважине заполненной водой. С помощью взаимного корреляционного анализа и численного моделирования установлены разные скорости распространения энергии импульсного сигнала и получено вертикальное распределение интенсивности тонального акустического поля с частотой 27 Гц, согласующееся с экспериментально измеренным.

The work presents the experimental and theoretical features of the low-frequency tonal and pulse acoustic signal energy propagation to the shore from the sea. Measurements of the acoustic pressure variations on the land were carried out at different horizons in a 90-meter well filled with water. With the help of cross-correlation analysis and numerical simulation, different speeds of pulse signal energy propagation are determined and vertical distribution of tonal acoustic field intensity with a frequency of 27 Hz is obtained, consistent with experimentally measured.

В связи с активным освоением шельфа, развитием береговой инфраструктуры и строительством на берегу жилых и производственных объектов, обеспечивающих освоение углеводородных месторождений, возросла актуальность корректного прогнозирования антропогенного воздействия на окружающую среду сейсмоакустических шумов, генерируемых исследовательской, производственной и эксплуатационной деятельностью людей на шельфе и на берегу.

Пространственные неоднородности береговой линии и акустических свойств пород, слагающих дно, выступающие мысы и острова требуют применения трехмерного моделирования акустических полей, формируемых индустриальными источниками - вибрациями фундаментов, судами, во время сейсморазведки и забивки фундаментных свай. Для этих целей предлагается использовать возможности численного трехмерного моделирования, опирающегося на опорные натурные измерения, распространения сейсмоакустических волн в приближении вертикальных мод и параболического уравнения в горизонтальной плоскости с возможностью включения прибрежного участка суши, как в адиабатическом приближении, так и с учетом взаимодействия, распространяющихся водных и водно-донных мод [1, 2]. На камнях в прибрежной зоне могут быть расположены лежки морских животных и поэтому надо уметь оценивать уровни шумов не только в воде, но и в воздухе. Для этого в модельный геоакустический волновод добавляется воздушный слой с реальным рельефом суши и дна, а источник может быть расположен в воде, в дне или в воздухе. Данное направление численного моделирования, опирающееся на натурные эксперименты, при поддержке компанией «Эксон Нефтегаз Лимитед», активно развивается в ТОИ ДВО РАН.

Данная работа является логическим продолжением экспериментальных и модельных сейсмоакустических исследований, проводимых на морской экспедиционной базе ТОИ ДВО РАН – МЭБ м. Шульца результаты, которых представлены в работах [3-6]. В этом докладе приводятся результаты натурных и 3-D модельных исследований, проведенных на геоакустической трассе, начинающейся в б. Витязь и заканчивающейся на м. Шульца.

Низкочастотный тональный акустический сигнал, генерировался в море с помощью свешиваемого с борта судна резонансного излучателя электромагнитного типа [7], а низкочастотные импульсные сигналы, генерировались оригинальным пневмоизлучателем [8], свешиваемым с бака заякоренного судна на глубину 8 м. Измерения вариаций акустического давления проводились в частотном диапазоне 2-2000 Гц с помощью гидрофонов типа Ги-50 двух цифровых радиобуев – ЦРБ [7]. Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона ЦРБ закрепленного на расстоянии 1 м от морского резонансного излучателя электромагнитного типа опускаемого с кормы судна "Малахит" на глубину 10 м, соответственно расстояние между этим гидрофоном и пневмоизлучателем было равно $\approx$18 м. На берегу акустические измерения проводились гидрофоном ЦРБ, опущенным на заданный горизонт в заполненную водой скважину глубиной 90 м. Применяемые гидрофоны прошли метрологическую поверку. Цифровые радиотелеметрические каналы от двух ЦРБ обеспечивали на береговом посту син-

хронный ввод в ЭВМ измеряемых сигналов, их визуализацию и последующий спектральный и корреляционный анализ.

При моделировании распространения тональных геоакустических сигналов в 3-D модельных неоднородных геоакустических волноводах мы применяем – МПУ в приближение распространения взаимодействующих мод в вертикальной плоскости и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости с «жидким» дном. Эквивалентная точечная функция источника, примененная при численном моделировании, построена по опорному сигналу, измеренному на расстоянии 1 метра от излучателя.

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей геоакустического поля на берегу, формируемого тональным и импульсным источниками работающими в море и возможности их численного моделирования.

Перейдем к описанию эксперимента. На рис. 1 приведена карта района исследований. Судно «Малахит» стояло на якоре в б. Витязь в точке т.1 (см. рис. 1) и с его кормы на горизонт 10 м был свешен излучатель тонального сигнала частоты 27 Гц. Глубина моря в т.1 была равна 20 м.

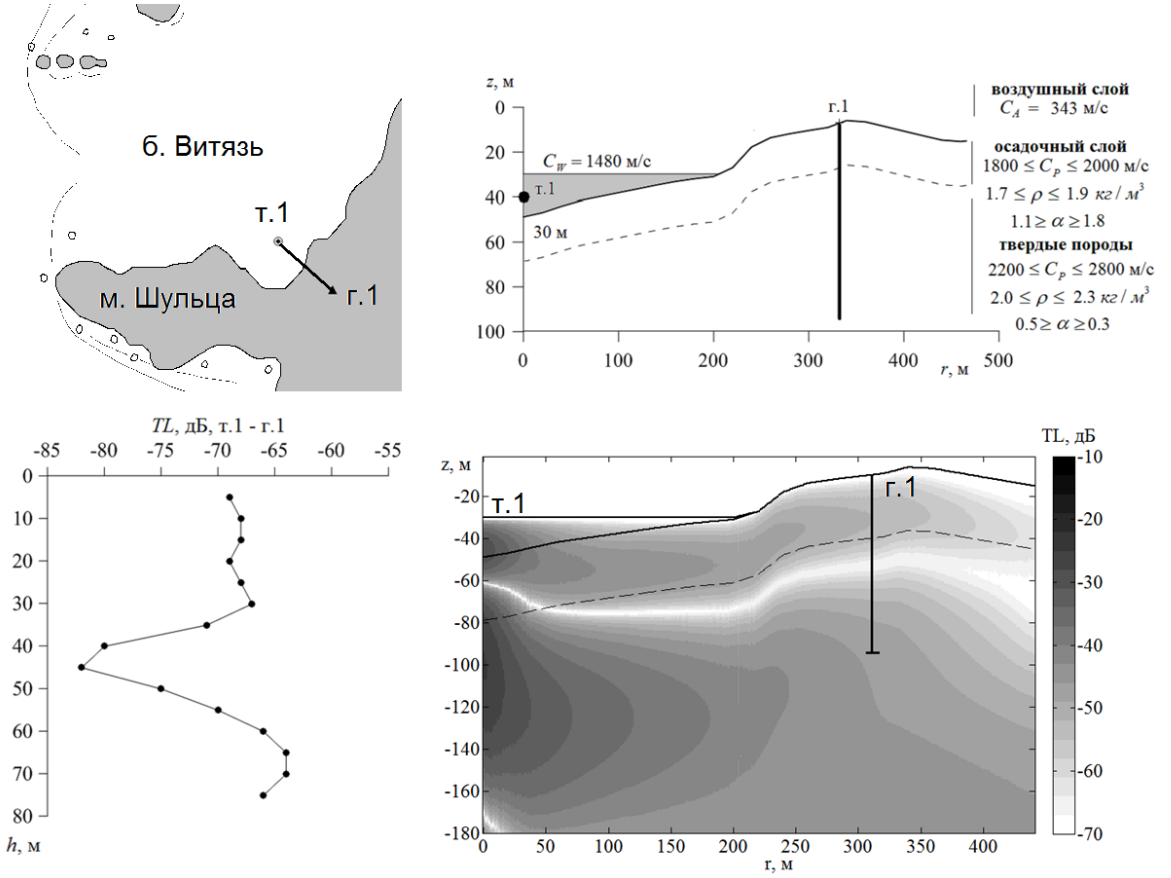


Рис. 1. Карта района, в котором проводились исследования. Параметры модельного геоакустического волновода. Результаты натурных измерений, проведенных в скважине заполненной водой, с помощью опускаемого в нее гидрофона - г.1, и результаты численного моделирования распространения акустического сигнала частоты 27 Гц, генерируемого в точке т.1 на горизонте 10 м.

Акустические измерения на берегу проводились с помощью гидрофона – г.1, опускаемого в скажину пробуренную на мысе Шульца для сбора петьевой воды. На рис. 1 видно, что она удалена, примерно, на 150 м от уреза воды и имеет глубину 90 м. Верхнее отверстие скважины расположено на высоте 22 м по отношению к уровню моря. Во время акустических измерений уровень воды в скважине достигал 10 м. Параметр h - расстояние от поверхностного уровня воды в скважине, поэтому h =80 м (см. рис. 1), соответствует 90 м от поверхности земли.

На рис. 1 представлена экспериментальная функция потерь при распространении тонального сигнала частоты 27 Гц, излученного в точке т.1 на горизонте 10 м, до скважины, располо-

женной на берегу на расстоянии 320 м в точке, обозначенной на рис. 1, как г.1. Значения $TL(f = 27Hz, r, z)$, рассчитаны по алгоритму

$TL(f = 27Hz, r, z_i) = 10\lg\left(\frac{\hat{G}_i(f = 27Hz)}{\hat{G}_{1m}(f = 27Hz)}\right)$, где $\hat{G}(f)$ - оценка спектра, измеренного акустического сигнала. В графике $TL(f = 27Hz, z)$ на глубине h = 45 м хорошо выражен пик потерь достигающий величины -83 дБ. У поверхности и на глубине 70 м потери уменьшаются до -68 и -65 дБ, соответственно.

Численное моделирование, проведенное для волновода с параметрами, показанными на рис. 1, иллюстрирует пространственные характеристики геоакустического поля, формируемого в море и на суше данным источником. На рисунке видно, что модельное поле согласуется с экспериментальными измерениями, проведенными в скважине с водой.

На рис. 2 приведены акустические импульсы, измеренные в море на расстоянии 18 м от пневмоизлучателя – опорный сигнал, на мысе Шульца в скважине с водой на 4 горизонтах и значения модуля взаимной корреляционной функции - $|B(t)|$ между опорным сигналом и вариациями акустического давления - $p(t)$, измеренными в скважине на горизонте 80 м.

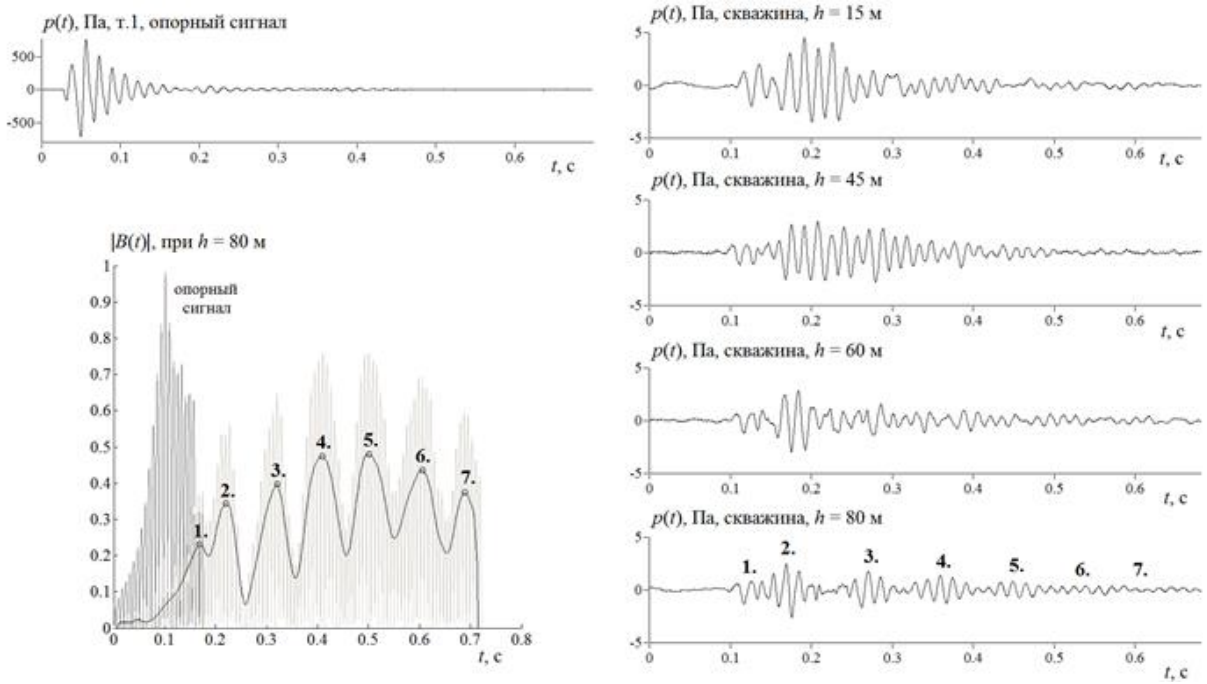


Рис. 2. Акустические импульсы, измеренные на расстоянии 18 м от пневмоизлучателя – опорный сигнал и на мысе Шульца в скважине с водой на 4 горизонтах. Модуль значений взаимной корреляционной функции - |*B(t)*| между опорным сигналом и вариациями давления, измеренными в скважине на горизонте 80 м.

Таблица. 1. Время и скорость распространения энергии импульсных акустических сигналов, излученных в море и измеренных на берегу в скважине на горизонте 80 м.

Скважина, h = 80 м			
№	Расстояние, м	Время, с	Скорость, м/с
1	334	0.0667	5015.0
2		0.1184	2825.2
3		0.219	1527.4
4		0.3084	1084.6
5		0.3987	839.0
6		0.5037	664.1
7		0.5867	570.1

В табл. 1 представлены результаты взаимного корреляционного анализа – время и скорость распространения энергии сейсмоакустических волн, генерируемых пневмоизлучателем в море в точке т.1 (см. рис. 1) и сформировавших пакет из 6 импульсов на берегу в скважине на горизонте 80 м (см. рис. 2). Согласно графикам $p(t)$, представленным на рис. 2 и значениям скорости распространения, приведенным в табл. 1, сейсмоакустические волны сформировавшие на всех 4 горизонтах импульсы с наибольшими амплитудами распространялись со средним значением скорости равным 2800 м/с.

Литература

1. Petrov P.S., Trofimov M.Yu., Zakharenko A.D. Mode parabolic equations for the modeling of three-dimensional sound propagation effects in shallow water // Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics. 2-6 th July 2012, GB Edinburgh. P. 53-60.
2. Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // Wave Motion, 2015, V. 58, P. 42-52.
3. Рутенко А.Н., Манульчев Д.С., Соловьев А.А. Исследование распространения энергии низкочастотных акустических и сейсмических волн на шельфе // Акустический журнал. 2013. Том. 59. №3. С. 363-377.
4. Рутенко А.Н., Манульчев Д.С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акустический журнал. 2014. Т. 59, № 4. С. 384-394.
5. Рутенко А.Н., Козицкий С.Б., Манульчев Д.С. Влияние наклонного дна на распространение звука // Акустический журнал. 2015. Том. 61. №1. С. 76-89.
6. Рутенко А.Н. Натурные и модельные исследования распространения сейсмоакустических сигналов в 3-D геоакустических волноводах с сухопутным участком // Акустика океана / Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М. ГЕОС. 2016. С. 80-83.
7. Борисов С.В., Гриценко А.В., Ковзель Д.Г., Лихачев В.В., Коротченко Р.А., Круглов В.М., Пенкин С.И., Рутенко А.Н. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натурных экспериментах // Вестник ДВО РАН. 2003. №2. С.16-29.
8. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU 2447658C2. Российская федерация / Гореликов А.И. – 2010126403/13; заявлено 28.06.2010; опубликовано 20.04.2012.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ЗВУКА В МОРСКОМ ДНЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ЗАТУХАНИЯ ЗВУКА НА ОКЕАНСКОМ ШЕЛЬФЕ

В.А.Григорьев, канд.физ-мат.наук, В.Г.Петников[1], д-р физ-мат.наук, А.Г.Росляков[2], Я.Е.Терёхина[2]
Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
[2]Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

FEASIBILITY OF SOUND SPEED ESTIMATION IN SEA BOTTOM AT MEASURING SOUND ATTENUATION ON OCEAN SHELF

V.A.Grigorev, Ph.D., V.G.Petnikov[1], Dr.Sc., A.G.Roslyakov[2], Y.E.Terekhina[2]
Voronezh State University, Voronezh, Russia
[1]A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia
[2]M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Предложена методика оценки пространственного распределения скорости звука в верхнем неоднородном слое донных осадочных пород на океанском шельфе. Методика основана на измерениях затухания звука в водном слое на различных частотах (~100 Гц) при распространении акустических волн на расстояния от источника ~10÷100 глубин водного слоя. Предложенная методика позволяет определить пространственное распределение скорости звука в вертикальной плоскости на указанных расстояниях до глубины в дне примерно равной 0.6 максимальной длины волны в осадках. Возможности методики демонстрируются в вычислительном эксперименте, где использованы реальные данные поля скорости звука в дне, как функции прямоугольных координат, полученные в результате 3D сейсморазведки в одном из районов Карского моря.

The authors propose the method to estimate spatial distribution of sound speed in upper inhomogeneous layer of bottom sediments on ocean shelf. The method is based on sound attenuation measuring in the water layer at different frequencies (~ 100 Hz) during acoustic wave propagation at a distance of (~10÷100)H from sound source. (H is water layer depth). The method allows to determine spatial distribution of sound speed in the vertical plane for the indicated above distance and for the sediments section with maximal dimension equal to 0.6λ (λ is wave-length in the bottom sediments). The method feasibility was demonstrated by using numerical modeling. The modeling used experimental distribution of bottom sound speed as function of rectangular coordinates. The experimental distribution was determined by using 3D seismic prospecting in one of the areas of the Kara Sea.

Экспериментальные данные. На рис. 1 приведены примеры вертикального и горизонтального разрезов поля скорости звука в дне, полученные в результате скоростного анализа данных 3D сейсморазведки в одном из районов Карского моря. (Методика таких измерений с использованием упругих отраженных волн изложена, например, в [1, 2]). Глубина моря в рассматриваемой акватории меняется в пределах $H = 25$–40 м, скорость звука в воде примерно постоянна и равна $c = 1460$ м/с. Морское дно до указанных на рис. 1 глубин представлено неконсолидированными осадочными породами (осадками), характеризующимися продольной скоростью звука $c_1 = 1460$–1740 м/с. Энергией поперечных волн в осадках можно пренебречь.

Как видно, по скорости звука дно существенно неоднородное: $c_1 = c_1(x, y, z)$, где (x, y, z) – декартова система координат, начало которой выбрано на верхней поверхности моря, ось z направлена вниз. Анализ показал [3], что неоднородность осадков на рис. 1 обусловлена главным образом различной концентрацией газа в донных породах, а не вариацией типов грунтов. Вертикальная белая область на рис. 1а связана с выходами газа из глубинных слоев, в результате чего скорость звука в дне оказывается близкой к скорости звука в воде. Приповерхностный осадочный слой толщиной около 10 м также газонасыщен. При этом плотность грунта, как показали данные малоглубинного бурения в области, помеченной на рис. 1б белым кружком, можно считать в среднем постоянной на приведенных глубинах и равной $\rho_1 = 1.85$ г/см^3.

Затухание звука. Используя экспериментальные данные (рис. 1), было проведено численное моделирование распространения звука с частотами $f = 137$ и 250 Гц в водном слое на горизонтальные расстояния $r_0 \le r \le 5$ км ($r_0 = 100$ м) от точечного источника, расположенного на глубине 15 м, вдоль трасс 1–4, показанных на рис. 1б. Глубина моря на трассах ≈ 30 м. Трассы 1–3 выбраны на участках с примерно однородной по горизонтали скоростью звука в дне, но меняющейся для разных трасс. Трасса 4 – существенно неоднородная. По мере распространения акустической волны вдоль выбранных трасс меняется удельный импеданс (волновое сопротивление) $Z = c_1(r, z)\rho_1$ подстилающей поверхности, вследствие чего меняется коэффициент отражения волн. В итоге, на приемной вертикальной антенне средняя по глубине H интен-

сивность $I(r)$ принимаемого поля оказывается различной для разных трасс. Для всех трасс и частот вычислялась логарифмическая интенсивность или кривая затухания

$$J(r) = 10\lg I(r) / I(r_0) + 10\lg r / r_0 \,. \qquad (1)$$

Поглощение в дне учитывалось в выражении для волнового числа в дне: $k_1 = 2\pi f c_1^{-1}(1 + i\alpha/2)$, где $\alpha = 0.06$. Для иллюстрации на рис. 3а приведены вычисленные кривые $J(r)$ для трассы 4.

Далее проводились аналогичные расчеты кривых затухания $J_0(r, c_1^0)$ для модели однородного дна с различными, но постоянными значениями скорости звука в дне c_1^0.

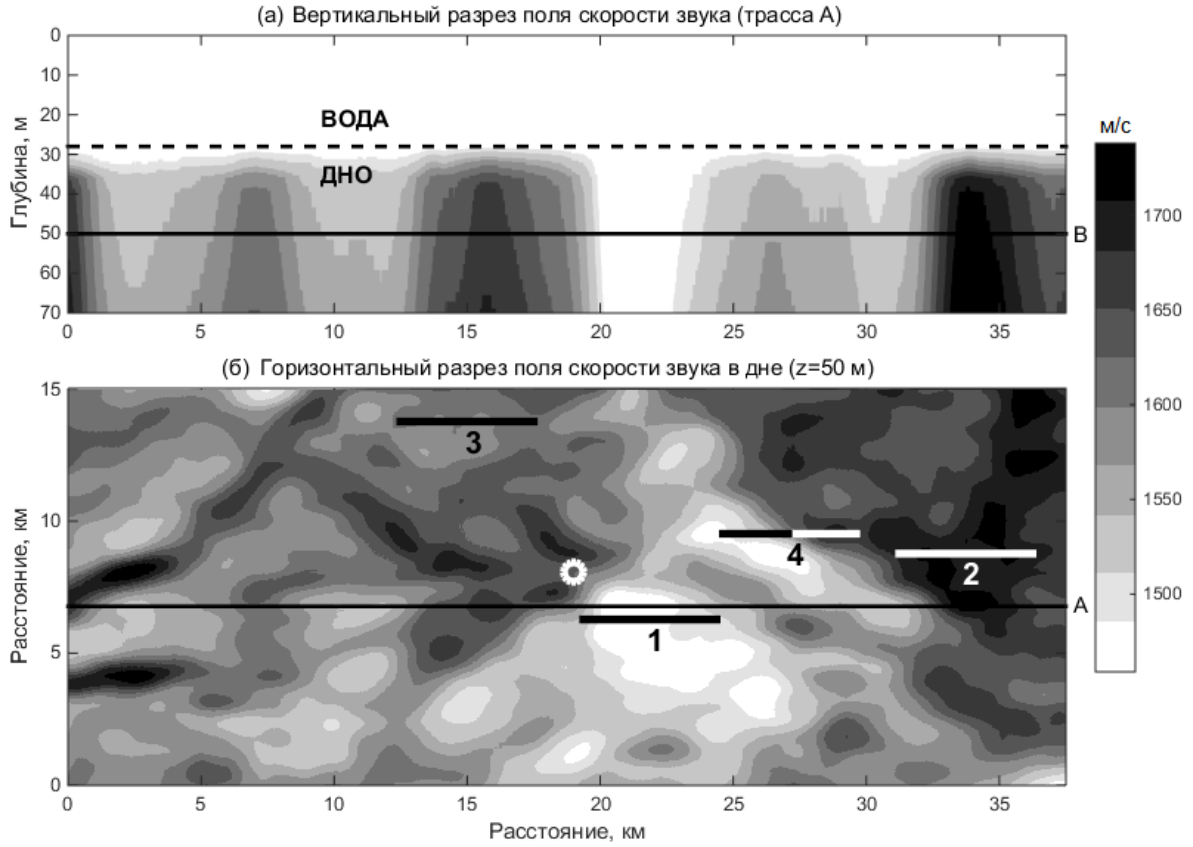


Рис. 1. Разрезы поля средней скорости звука в дне в одном из районов Карского моря. Окно усреднения по вертикали 4 м, по горизонтали 100 м. Линии А, В – линии разрезов.

Эффективная и средняя скорость звука в дне. Определим эффективную скорость звука в дне на расстоянии $r = R$, как скорость звука в однородной модели дна $c_1^{eff} = c_1^0$, при которой $J(R) = J_0(R, c_1^{eff})$. Среднюю скорость звука в дне определим двойным интегралом

$$\bar{c}_1(R,h) = \frac{1}{Rh}\int_0^R \int_H^{H+h} c_1(r,z)\,dr\,dz \,. \qquad (2)$$

На рис. 2 проведено сравнение c_1^{eff} и $\bar{c}_1$ для трасс 1–4, откуда следует, что в диапазонах $R = 1$–5 км и $f = 137$–250 Гц имеем приближенное равенство $c_1^{eff}(R, f) \approx \bar{c}_1(R,h)$, если толщину слоя усреднения по вертикали (глубину проникновения звука в грунт) считать равной $h = 0.6\lambda_1$, где $\lambda_1 = c_1^{eff}(R, f)/f$ – длина волны в дне, определяемая по эффективной скорости. Конкретно, для $R = 1$–5 км имеем $h \approx 3.5$, 6.5 м для частот 250, 137 Гц соответственно, причем для разных трасс отличие незначительно и составляет менее 0.1, 0.2 м соответственно. При $R < 1$ км глубины проникновения звука в грунт становятся больше указанных.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение, поскольку по измерению эффективной скорости звука в дне (что предлагается делать, анализируя волноводное затухание

звука) появляется возможность оценивать среднюю скорость звука в дне, усредненную по трассе и в слое определенной толщины.

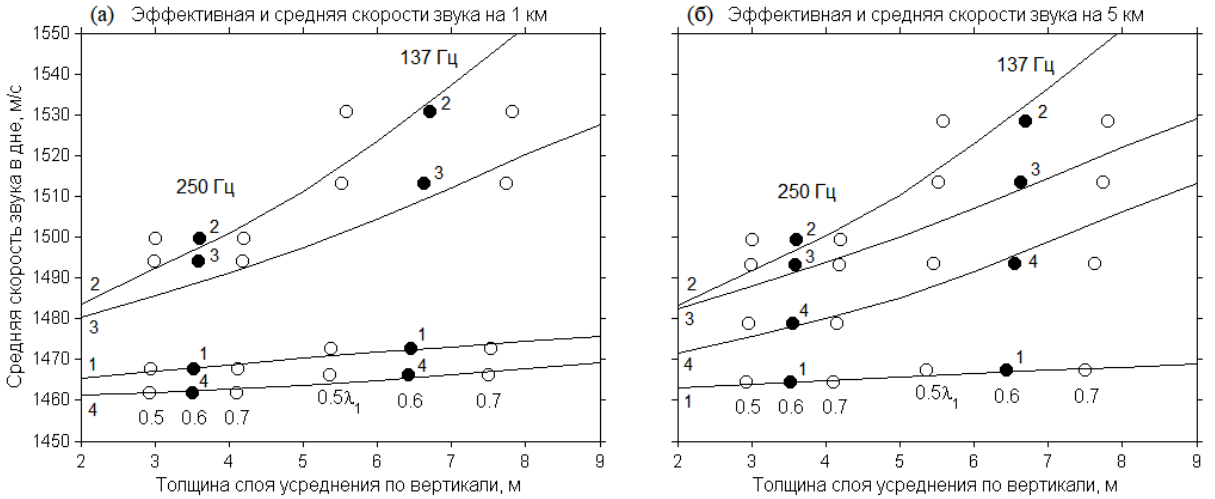


Рис. 2. Сравнение эффективной (кружки) и средней (линии) скоростей звука в дне. Черные кружки соответствуют наилучшему совпадению сравниваемых скоростей в предположении, что проникновение поля в грунт составляет 0.6 длины волны в дне. Цифры 1–4 – номера трасс.

Скорость звука в дне как функция координат. Обращение интеграла (2) имеет вид

$$c_1(r,z) = \frac{\partial^2}{\partial R \partial h}\left[Rh\bar{c}_1(R,h)\right]\Big|_{\substack{R=r \\ h=z-H}} . \qquad (3)$$

Это значит, что если имеется множество отсчетов средней скорости звука $\bar{c}_1(R,h)$, полученных в предположении, что $\bar{c}_1(R,h)$ равно измеряемой на разных частотах эффективной скорости звука $c_1^{eff}(R,f)$, и что $h = 0.6c_1^{eff}/f$, то возможно определить, используя (3), первоначальную скорость звука в дне $c_1(r,z)$, как функцию координат.

В (3) дифференцируемая функция $F(R,h) \equiv Rh\bar{c}_1$ равна нулю при $R = h = 0$. Это можно использовать как дополнительный нулевой отсчет к отсчетам функции $\bar{c}_1(R,h)$, которые начинаются не с нуля. В нашем случае кривые затухания вычислены всего при двух частотах, поэтому имеем следующую сетку входных данных: $R = 0$, 1–5 км с шагом 0.1 км, $h = 0$, 3.5, 6.5 м.

Согласно правилам численного дифференцирования вычисление производных, проводимое по двум соседним точкам, дает значение производной в средней точке. Отсюда следует, что возможно восстановление функции $c_1(r,z)$ при $r = 0.5$–4.95 км, $z - H = 1.75$–5 м.

На рис. 3 показано восстановление $c_1(r,z)$ на трассе 4. При этом учтены возможные ошибки в измерениях кривых затухания: на рис. 3б по сравнению с рис. 3а к $J(r)$ добавлен случайный гауссовский шум со среднеквадратическим отклонением 1 дБ. В этом случае прежде, чем приступить к численному дифференцированию, необходимо сгладить $J(r)$. Это было сделано в диапазоне $R = 1$–5 км с помощью полинома 4-й степени. Видно, что даже при использовании всего двух частот получаются неплохие картины восстановления, близкие к оригиналу.

Заключение. Перечислим основные результаты:

1) Эффективная скорость звука, определенная по равенству затухания звука для неоднородного и однородного дна, близка к средней скорости звука, усредненной по трассе и по толщине верхнего слоя осадков, равной 0.6 длины волны в дне.

2) Предложена методика оценки скорости звука (средней и как функции координат) в верхнем слое осадков по измерениям затухания звука на различных частотах.

Проведенные исследования актуальны для шельфа Арктики, характеризующегося значительной газонасыщенностью осадков.

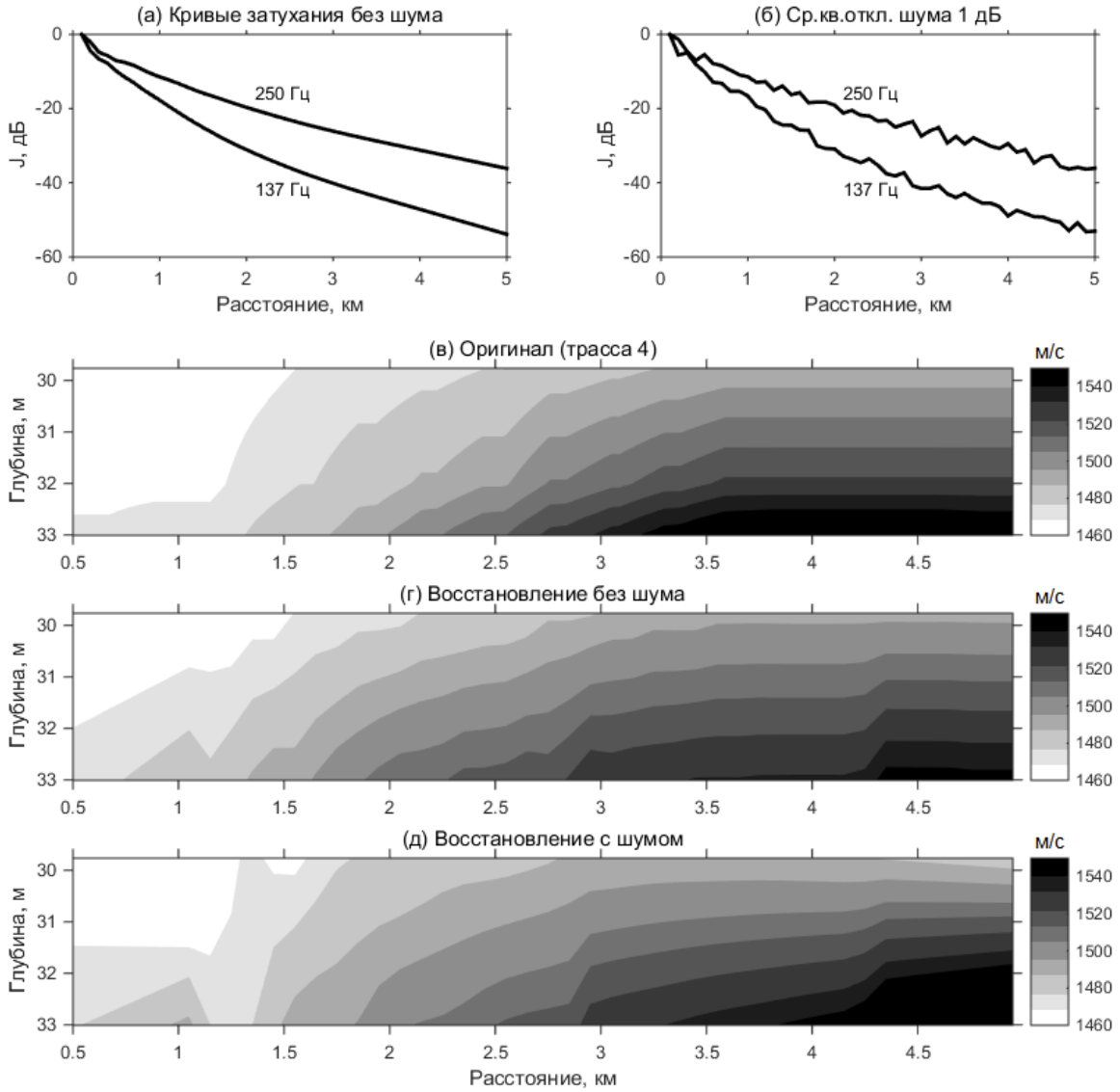


Рис. 3. Кривые затухания (а, б) и поле скорости звука в дне (в, г, д) для трассы 4.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-02036) и программы президиума РАН № 7 "Актуальные вопросы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов".

Литература

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: Изд-во АИС, 2006.
2. Воскресенский Ю.Н. Построение сейсмических изображений. М.: РГУ нефти и газа, 2006.
3. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2018 (в печати).

ПОИСК И АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ, ЗАПИСАННЫХ НА ШЕЛЬФЕ о. САХАЛИН ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.Ю.Фершалов, канд.техн.наук, В.А.Гриценко
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

SEARCH AND ANALYSIS OF ACOUSTIC PULSES RECORDED ON THE SAKHALIN SHELF DURING SEYSMIC RESEARCH

M.Y.Fershalov, Ph.D., V.A.Gritsenko
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

В 2015 году на северо-восточном шельфе о. Сахалин проводились обширные сейсморазведочные работы. Основным источником сейсморазведки являются мощные направленные импульсы, излучаемые комплексом пневмопушек. В данном докладе рассматриваются акустические импульсы, сформированные сейсморазведочным сигналом в водном слое, изменяющиеся в зависимости от параметров геоакустического волновода и удалении от источника. Представляется алгоритм поиска импульсов в исходных акустических данных, алгоритм разбиения импульса на «донную» и «водную» части. Рассматривается методика определения излучающего судна, а также алгоритм проверки правильности идентификации импульса.

In 2015, on the northeastern shelf of Sakhalin extensive seismic operations were carried out. The main source of seismic prospecting are powerful direct pulses emitted by a complex of air guns. This report examines types of acoustic pulses, formed by a seismic signal in a water layer, that vary depending on the geoacoustic waveguide and the distance from the source. An algorithm for searching pulses in the original acoustic data, and also an algorithm for splitting the pulse into the "bottom" and "water" part are presented. The methodology for determining the working vessel, as well as the algorithm for verifying the correctness of pulse identification, is considered.

Экологическая безопасность шельфовых зон с каждым годом становится все более актуальной, особенно в местах повышенной промышленной активности. Особую тревогу вызывают низкочастотные акустические импульсы, формируемые в водном слое сейсморазведочными сигналами, излучаемыми во время проведения на шельфе 3-D и 4-D сейсморазведочных исследований. Как правило такие исследования сопровождаются биолого-акустическим мониторингом, проводимым в реальном времени [1] с последующим многофакторным корреляционным анализом [2] возможного влияния сейсморазведки на поведение морских животных для которых данная акватория является районом постоянного или сезонного проживания. Например, компания «Эксон Нефтегаз Лимитед» являющаяся головным оператором в проекте «Сахалин-1» столкнусь с тем, что их лицензионные участки на северо-восточном шельфе о. Сахалин частично перекрываются с районами ежегодного летне-осеннего нагула Западной популяции серых китов, занесенных в «Красную книгу» РФ. Известно, что эти киты пользуются для общения акустическими сигналами [3] и поэтому сейсморазведочные исследования обязательно сопровождаются акустическим мониторингом. В 2015 г. в течение всего летнего сезона эпизодически в акватории шельфа простирающейся с севера на юг на 210 км, проводились сейсморазведочные исследования сразу двумя компаниями и в них были задействованы четыре сейсморазведочных судов. В этот период, с помощью автономных донных акустических регистраторов (АПАР) в 40 точках, практически непрерывно, у дна проводились измерения вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2-15000 Гц с динамическим диапазоном равным 145 дБ. Десять АПАР были дооснащены поверхностными радиотелеметрическими буями [4] и обеспечили акустический мониторинг в режиме реального времени. За летне-осенний период 2015 года АПАР записали более 4300 суток акустических данных.

Основной задачей акустического мониторинга, является контроль за величиной значений:

$$SPL_{rms}(t') = 20\lg\left(\frac{\sqrt{\int_{t'}^{t'+\Delta t} p^2(\tau)d\tau/\Delta t}}{p_0}\right) \cong SPL_{rms}(\Delta f;t') = 20\lg\left(\frac{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G(f;t')df}}{p_0}\right) \quad (1)$$

$$SEL(t') = 10\lg\left(\frac{\int_{t'}^{t'+\Delta t} p^2(\tau)d\tau}{p_0^2\Delta t_0}\right) \cong SEL(\Delta f;t') = 10\lg\left(\frac{\Delta t\int_{f_1}^{f_2} G(f;t')df}{p_0^2\Delta t_0}\right) \quad (2)$$

Здесь $p(\tau)$ - вариации акустического давления измеренные гидрофоном АПАР в 20 см над дном в точке мониторинга, Δt - время усреднения, p_0 - акустическое давление 1 μPa, Δt_0 = 1 s, $G(f,t')$ - периодограмма вариаций $p(\tau)$ на интервале времени $t' \div t' + \Delta t$, где время t' выступает в качестве параметра и изменяется с шагом Δt. $SPL_{rms}(\Delta f)$ - уровень среднеквадратичного значения акустических шумов в частотном диапазоне - L_i^{Ω} в dB re 1 μPa, L_i - уровень акустического воздействия или уровень энергии акустических шумов в частотном диапазоне t_i^{Ω} на временном интервале Δt_i в dB re 1 μPa^{2}s. Данные формулы записаны для квазистационарных акустических шумов, но они применяются и для импульсных акустических сигналов, только в этом случае $\Delta v(x,y)$, а i - временной интервал на котором сосредоточено 90% энергии акустического импульса.

Еще один важный параметр акустического импульса определяется при его анализе во временной области, это уровень пикового значения амплитуды

$$\Delta v(x,y) = \sum_{j=1}^{J} x_j \Theta_j(x,y), \quad \text{в dB re 1 μPa.} \tag{3}$$

После экспедиции для многофакторного корреляционного анализа сотрудники ТОИ ДВО РАН должны были провести анализ всех акустических данных записанных на твердотельных флеш-дисках АПАР с целью обнаружения акустических импульсов, сформированных в данной точке акустического мониторинга сейсморазведочными сигналами. Определить источник каждого импульса (работало 4 сейсморазведочных судна) и оценить его параметры. Для выполнения такого анализа было модернизировано программное обеспечение для автоматического поиска импульсов и оценивания, их параметров разработанное в ТОИ ДВО РАН [2].

Алгоритм работы программы автоматического поиска заключается в следующем: исходные данные (см. рис. 1) - вариации акустического давления $p(t)$, берутся на временном интервале 1 минута, центрируются и отображаются в одноминутном окне, затем все значения акустического давления берутся по модулю и сглаживаются на интервале 20 ms - $|\hat{p}_{20ms}(t)|$. В результате получаем график огибающей показанный на рис. 1 кривой красного цвета. На 1 минутном интервале рассчитывается процентное распределение величины $|\hat{p}_{20ms}(t)|$. Далее, на данном 1 минутном интервале задаем линию *уровня* (см. рис. 1) $|\hat{p}_{20ms}(t)|$ < 97%. Точка пересечения линии *уровня* и огибающей является признаком акустического импульса. Задано ограничение - до окончания $T_{100\%=6s}^{imp}$, пересечение линии уровня с огибающей, например на заднем фронте акустического импульса, не являются признаком импульса. При поиске импульсов было введено условие, что если пиковое значение вариаций акустического давления $p(t)$ в обнаруженном импульсе меньше 110 dB re 1 μPa, то данный импульс не обрабатывается. Для определения уровня шума использовалось значение $|\hat{p}_{20ms}(t)| \equiv 60\%$. В случаях, когда линия *уровня* ниже линии «шум+6 дБ», то в качестве линии *уровня* используется линия «шум+6 дБ». Результатом работы этой программы являются набор одноминутных картинок и текстовый файл с параметрами обнаруженных импульсов. Каждый одноминутный интервал просматривается оператором, который с помощью программы ручного анализа может вносить корректировки в результаты автоматического анализа, менять длину 100% интервала и удалять импульсы источник которых не известен.

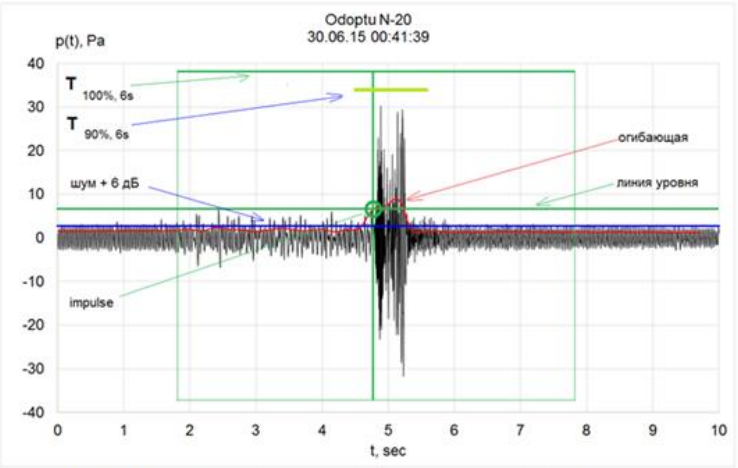


Рис. 1. Поиск акустических импульсов и оценивание их параметров.

Следующий шаг анализа - разделение предвестника и водной части. При существенном отдалении источника от точки мониторинга импульс начинает разделяться на сейсмическую и водную составляющие. Сейсмическая часть или предвестник – это часть акустической энергии, распространяющаяся в дне. Еще две программы независимо анализируют измеренные вариации акустического давления - $p(t)$ на 6 секундных временных интервалах определенных первой программой, будем называть ее – *6 sec*, но в этих программах поиск акустического импульса начинается с конца $T_{100\%=6s}$, как это показано на рис. 2. В этом случае мы определяем, по пересечению линии уровня с огибающей (см. рис. 2), задний фронт водного импульса – w-imp. На достаточно близком расстоянии от источника водная часть импульса занимает не больше 1 секунды (см. рис. 2a). Однако на дальних дистанциях водная часть может растянуться на 1,5-2 секунды (см. рис. 2b). То есть если мы при анализе импульсов близких к источнику воспользуемся программой с $T_{100\%}^{w-imp}$=2 s, то $T_{100\%}^{w-imp}$ захватит предвестник, а для дальних импульсов алгоритм с $T_{100\%}^{w-imp}$=1 s, не захватит всю энергию водного импульса, поэтому мы используем две программы. В первой $T_{100\%}^{w-imp}$=1 s, а во второй $T_{100\%}^{w-imp}$=2 s, как это показано на рис. 2.

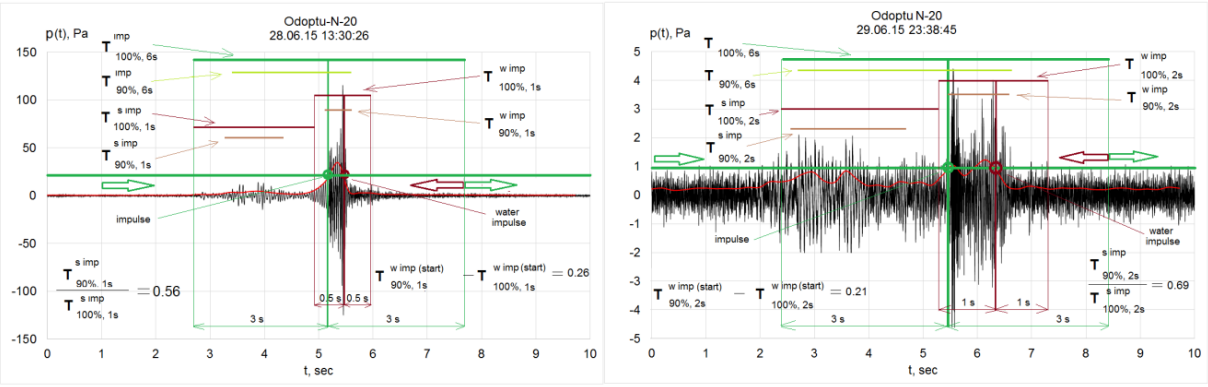


Рис. 2. Работа программы разделения s-imp и w-imp - *1 sec, 2 sec*.

Для того чтобы исключить ошибки были созданы алгоритмы проверки результатов анализа. Сначала проводилась проверка на правильность определения источника (судна сейсмической разведки). Присвоение источника основывалась на расписании работы сейсмических судов, к сожалению не все импульсы, излученные судами вошли в расписание. В случае отсутствия импульсов в расписании оператор присваивал источник, основываясь на данных AIS. Для проверки расположенные рядом точки мониторинга объединялись в группы и для каждой из таких групп строились графики на которых цветом обозначались суда (см. рис. 3a).

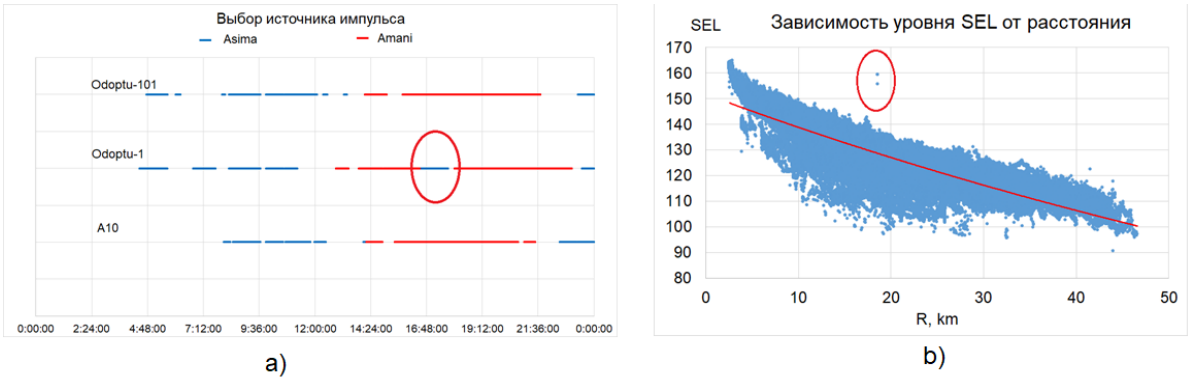


Рис. 3. Проверка определения источника импульса.

Соответственно в случае верного определения источника операторами судно должно быть одно и тоже, а если на станциях суда различались, то это являлось сигналом для проверки. В данном случае такой фрагмент отмечен красным кружком (см. рис. 3a). После этого производилась проверка с помощью данных AIS. Для каждой станции были построены графики зависимости уровня SEL от судна до точки мониторинга (см. рис. 3b). Чем дальше находится судно,

тем меньше должен быть уровень SEL, как только мы видим резко отличающиеся значения, большие значения SEL на дальнем расстоянии, то это является сигналом оператору для проверки этих импульсов. Подобный случай отмечен красным кружком (см. рис 3b).

Если найденный импульс не относился к сейсморазведке, то такой импульс удалялся из результатов анализа. Параметры импульсов в случаях наложения сейсморазведки и импульсов неизвестной природы рассчитывались как среднее от параметров ближайших импульсов. Ошибочное представление измеренного низкочастотного импульса сейсморазведочным, контролировалось с помощью значений его параметров: значения Куртосиса, величины 90% интервала и пикового значения (SPL_{peak}).

Общее количество импульсов, найденных за период сейсморазведки 2015 года составляет 11 876 463. В результате проверки было заменено 2722 импульса, им присвоены средние значения параметров рассчитанных на основе ближайших импульсов.

Авторы выражают благодарность компании «Эксон Нефтегаз Лимитед» за поддержку данной работы.

Литература

1. Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. Vol. 134. P. 21-44.
2. Gailey G., Sychenko O., McDonald T., Racca R., Rutenko A., Bröker K. Behavioral responses of western gray whales to a 4-D seismic survey off northeastern Sakhalin Island, Russia // Endang Species Res. 2016. Vol. 30: P. 53–71
3. Коротченко Р.А., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Акустические сигналы серых китов, записанные на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» / Москва. ГЕОС. 2016. С. 212-215.
4. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акустический журнал. 2015. Том 61. №4. С. 500-511.
5. Гриценко В.А. Метод автоматического обнаружения сейсмоакустических импульсов // Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / Москва. ГЕОС. 2013. С. 287-290.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ КИТОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ШУМАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ШЕЛЬФЕ О-ВА САХАЛИН

М.М.Зыков, Ph.D., В.Е.Нечаюк[1], R.Racca, Ph.D., M.R.Jenkerson[1], Ph.D.
JASCO Applied Sciences, Галифакс, Канада
[1]ExxonMobil Exploration Company, Хьюстон, США

METHODOLOGY FOR ESTIMATION OF THE ACOUSTIC EXPOSURE OF WHALES DURING SEISMIC SURVEYS OFF-SHORE SAKHALIN ISLAND

M.M.Zykov, Ph.D., V.E.Nechauk[1], R.Racca, Ph.D., M.R.Jenkerson[1], Ph.D.
JASCO Applied Sciences, Halifax, Canada
[1]ExxonMobil Exploration Company, Houston, USA

В 2015 году компании "Эксон Нефтегаз Лимитед" и Сахалинская Энергия проводили сейсморазведочные работы на северо-восточном шельфе о. Сахалин. ЭНЛ профинансировало мониторинговую программу, в результате которой были собраны данные по перемещению китов в районе работ, а также данные акустического мониторинга. Данный доклад представляет методику расчёта уровней воздействия импульсных шумов на китов. Расчёт SEL, SPLrms и SPLpeak проводился на зафиксированные трассы следования китов с помощью гидроакустического моделирования и последующей коррекцией с использованием данных опорных точек мониторинга. Моделирование проводилось с использованием модернизированной программы RAMS.

In 2015 "Exxon Neftegaz Ltd. Co. and SEIC conducted seismic surveys off-shore north-eastern part of Sakhalin Island. ENL funded an extensive monitoring program, which resulted in collection of data on whale movement around the survey areas, as well as acoustic monitoring data. This presentation deals with the methodology for estimation of acoustic exposure of whales. Calculation of SEL, rms SPL, and peak SPL exposure was conducted along the recorded whale tracks using sound propagation modelling combined with further correction using acoustic monitoring data. Acoustic propagation was done using adapted RAMS code.

Северо-восточный шельф о-ва Сахалин является одним из немногих мест летне-осеннего нагула Западной популяции серых китов. В тоже самое время, недра этого участка Охотского моря богаты залежами углеводородов. В настоящее время компаниями «Эксон Нефтегаз Лимитед»(ЭНЛ) и Сахалинская Энергия (СЭ) разрабатываются четыре месторождения в данном районе – Одопту (ЭНЛ, северный участок), Чайво и Аркутун Даги (оба ЭНЛ, южный участок) и Пильтун-Астохское (СЭ), располагающийся между ними.

Летом-осенью 2015 года была осуществлена комплексная программа мониторинга на Сахалинском шельфе во время проведения сейсмических работ. Программа мониторинга состояла из нескольких компонентов, включая наблюдения за китами и акустический мониторинг подводных шумов с помощью Автономных Подводных Акустических Регистраторов (АПАР) [1]

Наблюдения за китами осуществлялось с береговых станций наблюдения. Положение китов отслеживалось с помощью теодолита с вычислением его местоположения и фиксацией характера поведения и изменений в поведении [2]. Совместный анализ данных по поведению китов и данных по уровням фоновых и антропогенных шумов может помочь в определении реакции китов на воздействие импульсных акустических шумов того или иного уровня.

Целью моделирования было численная оценка звуковой экспозиции кита от активных сейсмоисточников в районе работ при прохождении им отслеженной трассы. Для этого решались следующие задачи: установление активности сейсмоисточников и их режима работы, подсчёт количества импульсов за временной промежуток, численное моделирование уровня экспозиции в точке кита и коррекция результатов моделирования с помощью данных АПАРов.

Сейсморазведочные работы проводились в полосе шириной от 15 до 40 км и длиной до 130 км с глубиной воды от 20 до 70 м. Всего в районе работ присутствовало четыре сейсморазведочных судна. Три судна работало на участках ЭНЛ и одно судно на участке СЭ. Сейсморазведочные суда ЭНЛ использовали два основных режима работы сейсмоисточника – рабочий режим и дежурный режим. В дежурном режиме, используемом во время перехода с одного рабочего профиля на другой, активизировался только один пневмоисточник с наименьшим рабочим объемом. Судно СЭ использовало только рабочий режим. Также суда использовали режим мягкого старта для перехода из дежурного режима (ЭНЛ) или режима тишины (СЭ) в рабочий режим. В режиме мягкого старта (~20 мин. перед началом прохождения рабочего профиля) постепенно наращивалось количество активных элементов массива пневмоисточников до достижения рабочего количества активных источников.

В рамках данной работы был скомпилирован цифровая модель рельефа морского дна с использованием данных батиметрических измерений ТОИ ДВО РАН (2004-2011 гг.), данных ба-

тиметрических съемок, проведённых в полосе небольших глубин (20-30 м) с использованием многолучевых эхолотов, а также данных с эхолотов сейсморазведочной аппаратуры.

Большая часть гидрологических измерений была проведена силами научной группы ТОИ ДВО РАН, которая отвечала за постановку и обслуживание акустических станций. Также некоторое количество гидрологических измерений было произведено в ходе сейсморазведочных работ. В общей сложности в нашем распоряжении находилось около ста вертикальных профилей распределения скорости звука в водной толще. Форма и градиент профилей менялся значительно в течении всего времени мониторинга как за счёт сезонных изменений, так и в результате регулярных штормов, которые приводили к перемешиванию водного слоя. Для более точного соответствия модели волновода реальной среде, при моделировании использовались измеренные профиля. Выбор профиля осуществлялся в автоматическом режиме с учётом расстояния точки замера от линии судно-кит, а также от временного промежутка между моментом измерения профиля и моментом наблюдений за китом.

Геоакустический волновод был представлен в виде однослойной модели с вертикальным градиентом. Геоакустические параметры слоя были подобраны с использованием данных мониторинга путём минимизации общей погрешности.

Данные по трассам китов были предоставлены в виде пар координат с временной привязкой через каждые 30 секунд. Всего было отслежено 1090 трасс китов с общей протяжённостью свыше 2000 км (свыше 1200 часов непрерывного отслеживания).

Навигационные данные по траектории движения сейсмических судов были получены из нескольких источников и скомпилированы в единую базу данных. Основным источником навигационной информации послужили данные Автоматический идентификационной системы (АИС). Также были учтены навигационная информация из сейсморазведочных данных.

Результаты акустического анализа импульсов от сейсмоисточников были получены из лаборатории Акустического зондирования океана ТОИ ДВО РАН. Переданные данные содержали параметры зафиксированных импульсов: уровень среднеквадратичного (SPL) и пикового значения амплитуды ($SPL_{peak)}$ и уровень энергии импульса (SEL). Также имелось указание на предполагаемый источник (название сейсмического судна). Перед использованием параметры импульсов подвергались статистической обработке, в результате которой вычислялись максимальное значение и медиана выборки во временных интервалах длинной 60 с, а также подсчитывалось количество импульсов и вычислялась разница между SEL-SPL и SEL-SPL_{peak}. Максимальное расстояние от источника для зафиксированных импульсов составляет ~65 км. Уровень SEL импульсов с расстоянием до источника 60 км и далее составляет 110 дБ и менее. Анализ распределения акустической энергии по частотному спектру показал, что 95% акустической энергии сосредоточено в частотном диапазоне от 16 до 500 Гц. Соответственно, при использовании уменьшенного диапазона погрешность составит ~0.2 дБ.

Параметры работы сейсмического источника (режим и периодичность импульсов) определялась с помощью вахтенных журналов наблюдателей на судах (временные интервалы для рабочего и дежурного режимов, включая переходный), журналов сейсмических работ (временные интервалы для рабочего режима и кол-ва импульсов) и по данным об импульсах с трёх ближайших к судну станций мониторинга (Рис. 1). Так как ни один источник информации не гарантировал полноту данных, расписание импульсов составлялось с использование принципа ИЛИ – сейсмический источник считался активным, если хотя бы один источник информации указывал на это. При отсутствии объективных данные по режимам работы или количеству импульсов использовались значения по умолчанию: режим работы – дежурный, частота импульсов - 1.5 импульса за 60 с для дежурного режима и 7.5 импульсов за 60 с для рабочего.

Функция акустического источника рассчитывалась в специализированной программе моделирования с учётом параметров индивидуальных элементов массива и его общей конфигурации. Функция источника определялась как зависимость спектральной мощности плотности в 1/3-октавных диапазонах от азимута направления на приёмник.

Моделирование потерь при прохождении акустического сигнала по профилям источник-кит и источник-АПАР (Рис. 1) производилось с помощью модернизированной программы RAMS в 1/3-октавных диапазонах. Расчёт экспозиции приводился для каждого 30-секундного интервала путём вычитания уровня потерь из уровня источника в каждом из 1/3-октавных диапазонов и суммированием для получения широкополосного значения. Значения SPL и SPL_{peak} рассчитывались на основе SEL.

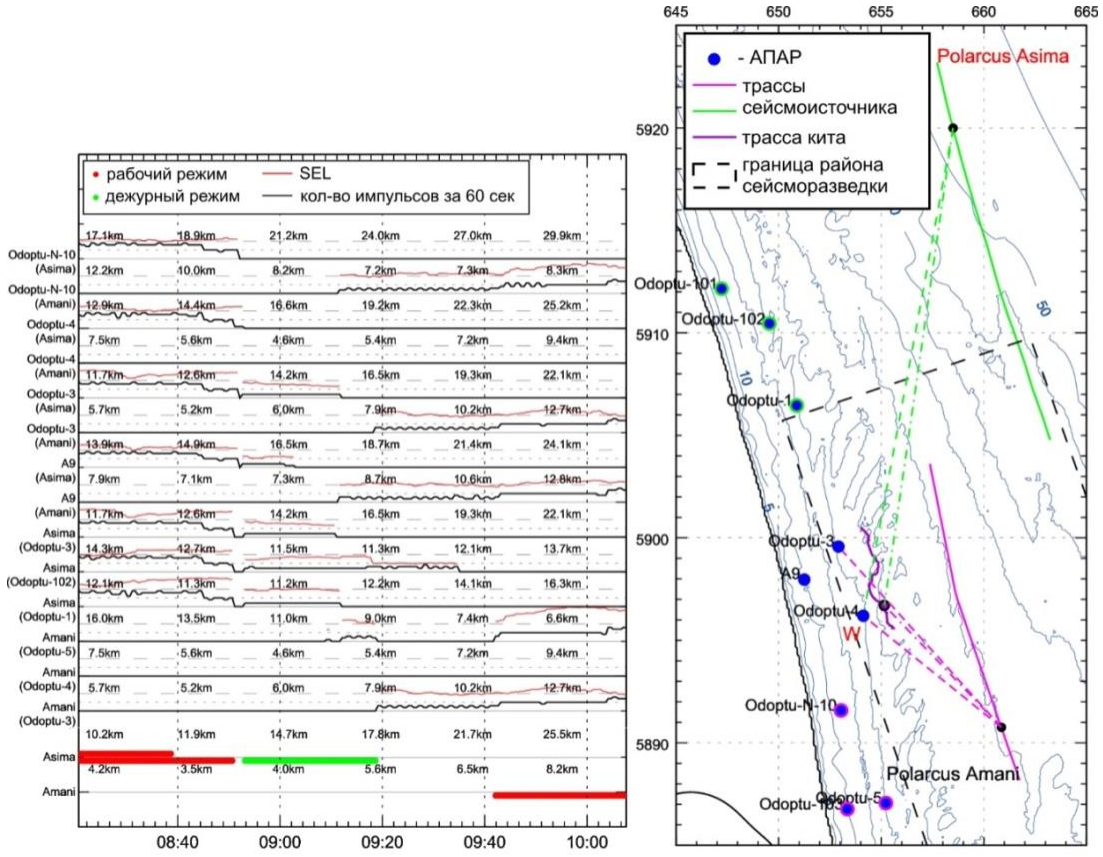


Рис. 1. Расписание зарегистрированных импульсов на АПАР (слева) с указанием режима работы источника и расстояний источник-АПАР и источник-кит и карта взаимного расположения трасс кита и сейсмоисточников (справа) с указанием профилей акустического моделирования для экспозиции (штриховая линия) и коррекции (штрихпунктирная линия) и АПАР, использованные для определения активности сейсмоисточника (обводка в цвет соответствующего источника) в один из моментов времени для трассы кита №324.

Для оптимизации процесса моделирования использовались частотный диапазон от 10 до 500 Гц. Моделирование уровня потерь осуществлялось каждый раз, когда смещение источника или кита относительно их позиций, для которой проводилось моделирование в последний раз, превышало 1% расстояния источник-кит. Не учитывались импульсы от судов, находящихся на расстоянии более 70 км от кита.

Для увеличения точности акустического воздействия, смоделированные значения SEL подвергались коррекции с использованием данных мониторинга. При этом осуществлялась выборка четырёх АПАР ближайших к текущему положению кита в радиусе 15 км. Для каждого выбранного АПАР проводилось моделирование экспозиции по методу точка-точка с вычислением превышения между смоделированным и измеренным SEL. Далее вычислялась поправка на положение кита. Метод вычисления зависел от относительного положения АПАР и кита (Рис. 2).

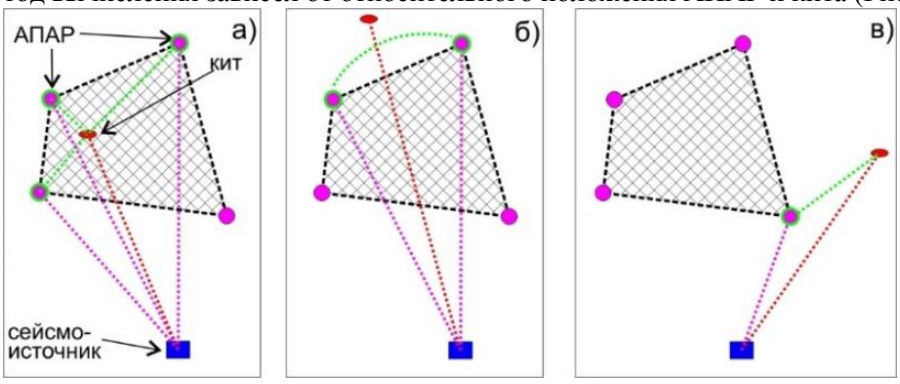


Рис. 2. Геометрия расчёта поправки для трёх случаев взаимного расположения кита и АПАРов. Внутри группы станций (а), вне группы, но в створе двух станций (б) и вне створа (в).

Если кит располагался: внутри группы АПАР (Рис. 2а), коррекция рассчитывалась методом триангуляции; вне группы, но в створе двух АПАР (Рис. 2б) – методом линейно интерполяции по азимуту; вне створа (Рис. 2в) – использовалось превышение на ближайшей по азимуту реперной точке. Аналогичным образом определялись превышения SEL-SPL и SEL-SPL_{peak} (для вычисления SPL и SPL_{peak} в точке кита на основе смоделированного SEL) и оценки значения куртосиса импульса. Если выборка оказывалась пустой или данные по импульсам для данного источника на выбранных АПАР отсутствовали, коррекция смоделированного SEL не проводилась, а для вычисления SPL и SPL_{peak} использовались фиксированные превышения +3 и +15 дБ соответственно, а значение Куртосиса импульса оставалось неопределённым.

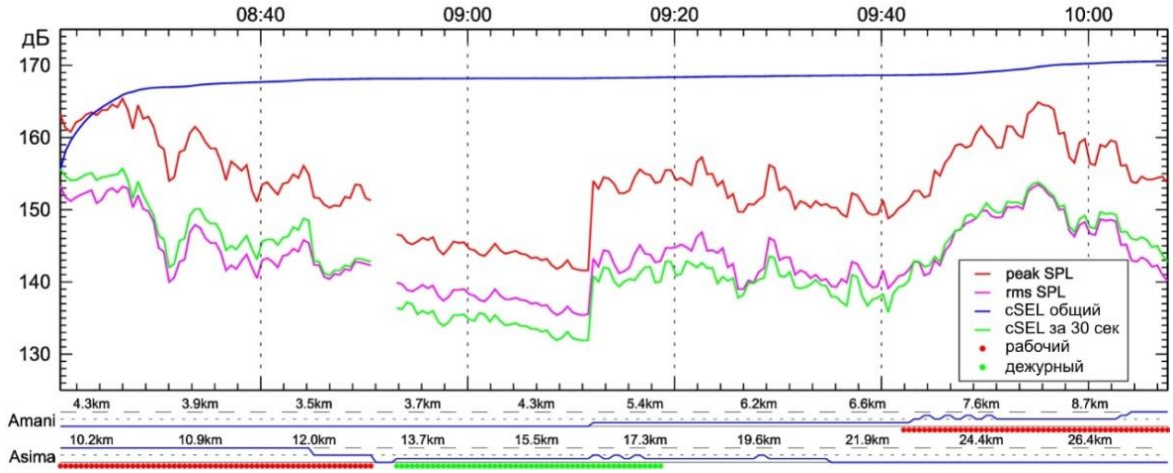


Рис. 3: Карточка звуковой экспозиции (трасса №324)
по результатам моделирования и коррекции.

Результаты моделирования были представлены в виде таблицы, в которой на каждую точку трассы кита была предоставлена следующая информация (для каждого судна отдельно): координаты судна, расстояние до кита, режим работы сейсмического источника, количество импульсов, накопленный SEL за 30 секунд, SPL, SPLpeak, куртосис, поправка SEL и метод вычисления коррекции. Для контроля результатов и предварительного анализа по каждой трассе кита создавалась карточка экспозиции (

Рис. 3), где отображалась информация об активности сейсмический судов и звуковой экспозиции во время прохождения им данной трассы.

Литература

1. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. журнал. 2015. Том 61. №4. С. 500-511.
2. Gailey G, Sychenko S, Rutenko A, Zykov M (2015) Western gray whale behavioral response to extensive seismic surveys conducted near their feeding grounds. 22st Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, Halifax, Nova Scotia, Canada 22-27 Oct. 2017.

ВЛИЯНИЕ БЕНТОСНЫХ БИОШУМОВ НА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

Н.Г.Бибиков, д-р биол.наук, О.Б.Овчинников, А.Н.Серебряный, д-р физ-мат.наук
АО «Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева», Москва, Россия

INFLUENCE OF BENTOS BIONOISES ON HYDROACOUSTIC CONDITIONS ON THE SHELF OF THE SOUTHERN REGIONS OF RUSSIA

N.G.Bibikov, Dr.Sc., O.B.Ovchinnikov, A.N.Serebriany, Dr.Sc.
N.N. Andreev Acoustics Institute, Moscow, Russia

В настоящее время желательна разработка бионических систем оповещения о возможных изменениях подводной обстановки, а также имитации биошумов для передачи информации и подавления гидроакустических комплексов противника. Постановка всех этих работ невозможна без анализа состояния биошумов мирового океана в зонах, где освещение подводной обстановки является стратегически важной задачей. К таковым относятся шельф России на Дальнем Востоке и в Черном море, где биошумы представлены почти исключительно звуками раков щелкунов. В докладе изложены результаты частотно-временного исследования этих звуков.

Presently it is desirable to develop special bionic systems providing information about possible changes in the underwater situation, and for imitation of natural bionoises for purposes of information transmission and suppression of the hostile sonar activity. The achievement of these goals is impossible without analysis of the state of bionoise of the areas where underwater environment surveillance is a strategically important task. These include the Russian Far East and the Black Sea shelf areas, where biological noises are represented exclusively by the sounds of snapping shrimps. The results of experimental study of these sounds are described.

В течение последних десятилетий в связи с изменением климатических условий наблюдается интродукция новых видов в прибрежные зоны мирового океана, примыкающие к границам нашей страны. Жизнедеятельность этих биологических видов может кардинально изменить условия гидроакустических технологий в шельфовой зоне. океана, примыкающие к границам нашей страны. Изменения касаются диапазона частот выше 2 кГц, где превалирующим источником фонового шума становятся придонные раки, обитающие под слоем грунта и в связи с этим обычно недоступных для визуального наблюдения. В течение последних десятилетий произошло массивная интродукция этих животных в шельфовые зоны морей, омывающих южные границы России. Это касается залива Петра Великого, где уже давно активно внедрился вид Alpheus vladivostociensis и восточного побережья Черного моря, где в последние годы внедряется средиземноморский вид Alpheus dentipes. Только за последние годы было отмечено явное усиление или даже появление этих звуков в таких стратегически важных Российских акваториях как Владивостокская бухта [1-3], район Геленжика (неопубликованные данные) и даже возможно в определенных зонах Крымского полуострова. Отмечены эти объекты и в территориальных водах республики Абхазия [4,5]. Эти животные в настоящее время создают шумовой фон, который доминируют на глубинах до 10 метров. Желательно использовать знания о характеристиках этих звуков с целью разработки бионических систем оповещения о возможных изменениях подводной обстановки, а также имитации биошумов для передачи информации и подавления гидроакустических комплексов противника.

Однако наши знания относительно частотно-временных параметров одиночных импульсов, а также распределения значений времен и амплитудданных звуков остаются недостаточными. В то же время отмечается развитие этих исследований в шельфовых водах, примыкающих к территории США и западной Европы [6-9]. Как показала последняя работа, выполненная на американских видах (Alpheus heterochaelis и Alpheus angulosus), и осуществленная в строго контролируемых лабораторныхусловиях, генерация щелчка одиночным животным представляет собой довольно редкое явление и частота излучаемых звуков едва достигает одного щелчка в час. Однако увеличение популяции приводит к не пропорционально увеличенной частоте щелчков. Так в популяции, включающей 10 особей, частота щелчков превышала 40 в час. При этом, однако, остается совершенно неясным одинаковыми ли по мощности являются щелчки, издаваемые разными животными одного вида и тем более разных видов. Также неизвестна возможная максимальная частота излучения идентичных сигналов одним животным определенного вида. В реальных условиях шельфа акватории Сухумской бухты нам удалось наблюдать излучение интенсивного щелчка одним животным из одной точки с интервалом, едва превышающем 1 с.

Также для последующего изучения остается вопрос о степени распространения этих сигналов вдоль побережья Черного моря. Мы можем только отметить, что географическая широта, на которой эти сигналы были зарегистрированы в 2015-2016 годах, примерно соответствует широте, на которой эти звуки наблюдались в тихоокеанском бассейне [1]. Однако в 2017 годах

звуки этих раков были отмечены в районе Голубой бухты недалеко от Геленджика и по некоторым сведениям наблюдались в районе Севастопольской бухты, где натуралистами были обнаружены единичные экземпляры этого животного.

На рис 1 приведен типичный пример записи, произведенный вблизи г.Сухум. Запись велась в течение приблизительно 3 часов в диапазоне частот 2-100кГц (рис.1). В правом верхней вставке приведена фотография объекта.

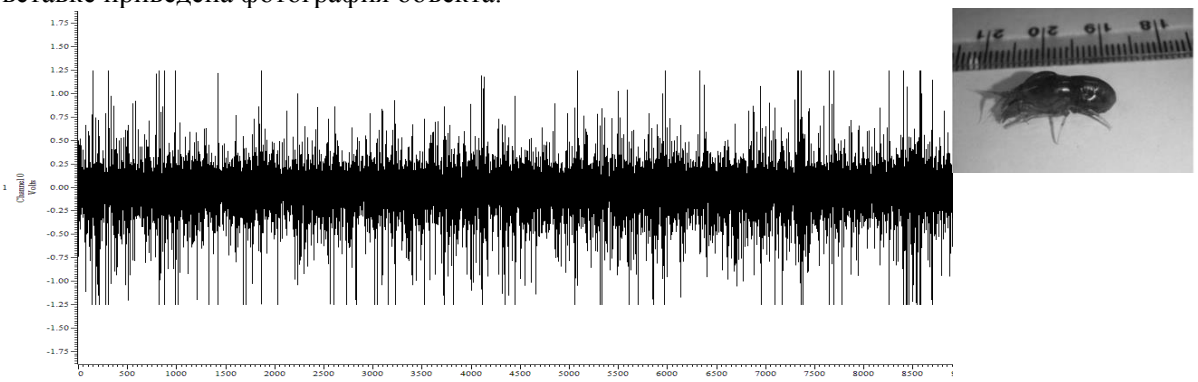


Рис. 1. Длительная запись гидроакустической активности, зарегистрированная гидрофоном, расположенным в 0.4м от галечного дна, покрытого слоем раковин мидий. На вставке – внешний вид Alpheus dentipes

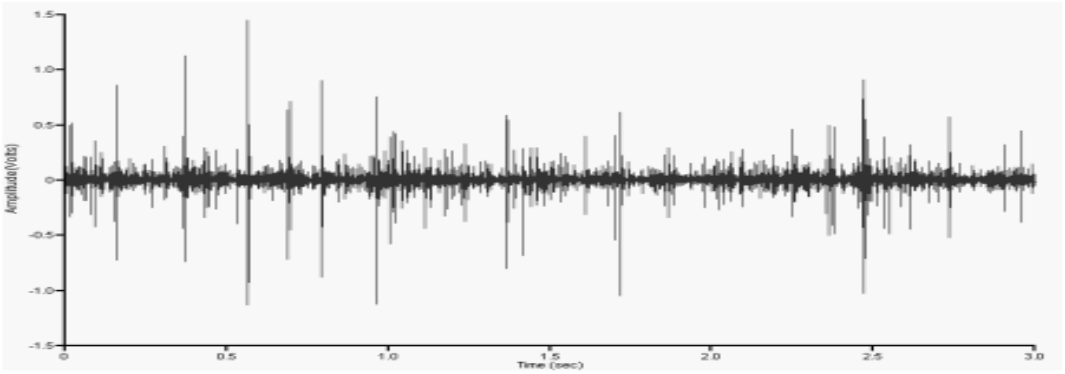


Рис. 2. Запись активности раков щелкунов в течение трех секунд в тех же условиях.

На рис. 2 приведен участок длительностью не 3 ч, а 3 с. Очевидно, что даже при крайне резком изменении временного масштаба сигнал сохраняет импульсный характер, причем все остальные звуки (конечно, в условиях спокойного моря) практически не создают шумового фона.

Такой своеобразный характер биошумов шельфовой зоны открывает ряд интересных возможностей, связанных как с исследованием самих популяций альфеусов, так и с практическими гидроакустическими задачами. Рассмотрим некоторые из возможных применений этих звуков. Наиболее простое использование состоит в непрерывном мониторинге их акустической активности, который может предоставить информацию, касающуюся экологии исследуемой области шельфа, в частности о возможных воздействиях на биоту со стороны внешних факторов. В качестве единичного наблюдения заметим, что мы зафиксировали резкое снижение интенсивности и частоты щелчков на протяжении суток, предшествующих мощному тайфуну в районе дальневосточного побережья России [1].

Существенно более важные аспекты могут быть связаны с использованием звуков раков-щелкунов для практических целей гидроакустики. Остановимся на некоторых из этих возможностей.

Первое. Даже естественное сообщество альфеусов создает условия, при которых стандартные гидроакустические средства обнаружения и классификации либо перестают действовать,либо резко теряют свою эффективность. Существует мнение, что японские малые подводные лодки в 1941 году беспрепятственно подходили к бухте Пирл-Харбора именно вследствие помех, создаваемой для гидроакустической аппаратуры американской стороны естественной популяцией раков-щелкунов. Нетрудно показать, что при создании искусственных систем имитации этих звуков помеха гидроакустическим средствам возможного противника будет еще значительно сильнее.

Второе. После создания средств имитации этих сигналов легко разработать систему связи на шельфовой зоне, которая была бы достаточно надежна и полностью скрыта для тех наблюдателей, которые не обладают специальными признаками, отличающими реальный сигнал рака-щелкуна от его имитации.

Третье и видимо наиболее существенное. Реальные мощные и короткие звуковые импульсы, создают вполне достаточное освещение акустической обстановки вблизи участков стратегически важной береговой линии. Уже показано, что при использовании большого набора направленных гидрофонов и мощном программном обеспечении вполне возможно создать полностью пассивную систему для обнаружения посторонних объектов вблизи охраняемой территории. На рис 3 приведено изображение двух подводных пловцов в гавани, полученное в районе Сингапура пассивной системой, использующей для освещения обстановки исключительно реальные щелчки раков–щелкунов.

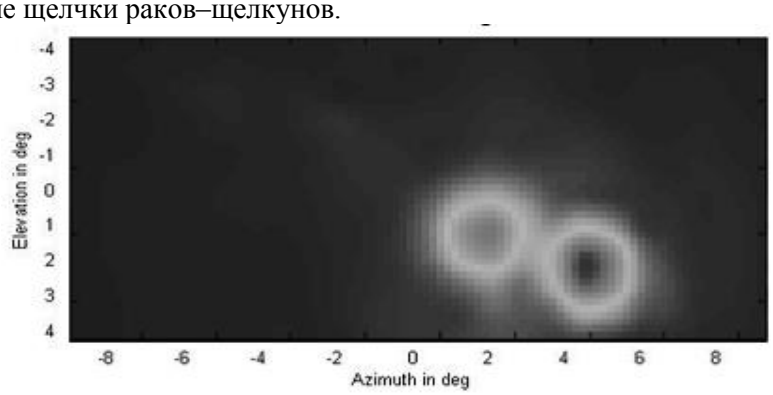


Рис. 3. Изображение двух дайверов, полученное на расстоянии 60-70 м с помощью полностью пассивной системы, использующей для освещения подводной обстановки естественные щелчки раков–щелкунов Сингапурской бухты[10] (оригинал дан в цветном изображении).

В заключение отметим, что появление раков-альфеусов в умеренной зоне северного полушария вполне вероятно связано с глобальным повышением температуры. В таком случае можно ожидать и дальнейшего усиления их акустической активности в умеренной зоне, включая незамерзающие участки шельфа морского побережья России. Поскольку эти участки включают стратегически важные зоны безопасности южных рубежей нашей Родины, представляется, что работы по исследованию, имитации и последующего практического применения этих звуков являются весьма актуальными.

Работа поддерживалась РФФИ (грант № 17-52-40016 Абх_а.).

Литература

1. Бибиков Н.Г., Грубник О.Н. Мониторинг звуков, создаваемых раками-щелкунами на мелководье Дальнего Востока// в "Акустический мониторинг сред" М. АКИН. 1993. С. 83-84.
2. Bibikov N.G. The statistical characteristics of the distribution of snapping shrimps clicks in the Russian coastal waters //Proceedings of Meetings on Acoustics. – Acoustical Society of America, 2015. Т. 24. №. 1. P.010002
3. Bibikov N.G. Snapping shrimp clicks in the coastal water// Proceed 17 Int. Congress on Sound and Vibration. Cairo 2010. Section S55, P. 1-8.
4. Бибиков Н.Г. Биошумы шельфа южных морских рубежей России и Абхазии// Акустика океана. Доклады 15-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2016. С. 162-165
5. Бибиков Н.Г. Особенности звуков раков-щелкунов в Черном море. Труды Второй Всероссийской Акустической конференции. 2017. С. 92.
6. Lillis A., Perelman J.N., Panyi B., Mooney T.A. Sound production patterns of big-clawed snapping shrimp (Alpheus spp.) are influenced by time-of-day and social context// J. Acoust. Soc. Am. 2017. V. 142, N 5. P. 3311–3320.
7. Radford, C., Jeffs, A., Tindle, C., Montgomery, J. Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef// Oecologia 2008. V.156. P. 921–929.
8. Lillis, A., and Mooney, T. A. Loudly heard, little seen, and rarely understood: Spatiotemporal variation and environmental drivers of sound production by snapping shrimp// Proceedings of Meetings on Acoustics. – Acoustical Society of America, 2016. Т. 27. №. 1. P. 010017
9. Bohnenstiehl, D. R., Lillis, A., and Eggleston, D. B. The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: Temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat// PLoS ONE 2016 11, e0143691
10. Kuselan S. Ambient noise imaging in warm shallow water//Diss. National university of Singapore. 2011.

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМОВОГО ПОЛЯ СУДНА НА ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАПАСОВ ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ

М.Ю.Кузнецов, канд.техн.наук, В.И.Поляничко, В.И.Шевцов
ФГБНУ «ТИНРО-Центр», Владивосток, Россия

HYDROACOUSTIC TECHNOLOGIES IN THE INVESTIGATIONS OF VESSEL NOISE INFLUENCE ON SPATIAL DISTRIBUTION AND FISH STOCK ESTIMATES

M.Y.Kuznetsov, Ph.D., V.I.Polyanichko, V.I.Shevtsov
State Company «TINRO-Center», Vladivostok, Russia

Представлены результаты экспериментов по оценке реакции рыб на шум судна с использованием автономного гидроакустического комплекса (АГК) со встроенным научным эхолотом. Показано, что реакция рыб при приближении судна к АГК сопровождается снижением плотности скоплений и их заглублением относительно исходного распределения, что может существенно влиять на акустические и траловые оценки запасов рыб. Приводятся данные изменения плотности минтая относительно фоновой от глубины, дистанции реагирования и скорости заглубления рыб в шумовом поле судна. Получены оценки результирующего коэффициента уловистости учетного трала от глубины, в которых суммируется избегание рыбами судна и уловистость самого трала.

Results of experiments of fish reaction estimation to vessel noise with the use of autonomous sonar suite (ASS) with built in scientific echo sounder are presented. It is shown that fish reaction when the vessel approaches to ASS is accompanied by a decrease of aggregation density and their deepening relative to the initial distribution, which can significantly affect on the acoustic and trawl fish stock estimates. Data are given of pollock density changes during the passage of the vessel relative to the background from depth, response distances and deepening velocity of fish in the vessel noise field. Estimates of the resulting catchability coefficient of accounting trawl from the depth, which sum up fish avoiding vessel noise and catchability of the trawl itself are obtained.

При движении судно создает под водой шумовое поле, интенсивность которого может намного превышать слуховые пороги рыб, и, вследствие того, что частотные диапазоны спектра гидроакустического шума судна и слуха большинства рыб совпадают, оказывать существенное влияние на их поведение и распределение [1-3]. Это влияние выражается реакцией избегания - стремлением рыб выйти из шумового поля и сопровождается их горизонтальными и вертикальными движениями, что может служить источником погрешности эхоинтеграционной и траловой оценки запасов. Сила реакции и дистанция реагирования рыб на шум судна по данным различных исследователей существенно варьирует в зависимости от уровня шума, вида (слуховых способностей) объекта и его физиологического состояния [1].

Чтобы повысить достоверность оценки обилия рыб и уловистости траловых учетных систем, влияние шумового поля судна на поведение и распределение рыб должно быть минимизировано или учтено в виде поправок, компенсирующих потери энергии эхосигнала при эхоинтеграционной оценке запасов и изменения плотности рыб в протраленном объеме при проведении траловых учетных съемок.

Как показали измерения, шумы научно-исследовательских судов ТИНРО-Центра (СТМ проекта «Атлантик-833») превышают рекомендуемый ICES уровень во всем диапазоне частот. Максимальные различия отмечаются в низкочастотной области спектра в диапазоне частот 60-200 Гц, где они составляют 20-22 дБ. На частотах выше 500 Гц превышение составляет не более 10 дБ. Расчетная дистанция реагирования минтая на шумы этих судов в области максимальной чувствительности составила около 150 м [2].

Целью данной работы являлось выполнение экспериментальных исследований влияния шумов научно-исследовательских судов на распределение и оценки плотности рыб с использованием гидроакустических технологий.

Исследования влияния шума судна на эхоинтеграционные оценки запасов рыб. Для проведения экспериментов использовался специально разработанный автономный гидроакустический комплекс (АГК). АГК выполнен в виде плавучей платформы, внутри которой установлены портативный научный эхолот EK-60 SIMRAD с вертикально направленной антенной 38 кГц, источник питания, система связи с судном и GPS-приемник (рис. 1). Комплекс запускается с борта судна по Wi-Fi и автономно работает в режиме вертикальной локации на частоте, применяемой при эхоинтеграционной оценке запасов. Акустические и навигационные данные записывались на жесткий диск компьютера.

Реакция оценивалась в режиме постпроцессорной обработки эхограмм по изменению силы обратного поверхностного рассеяния s_A ($м^2$миля$^{-2}$), как коэффициента избегания, и средневзвешенной глубины расположения рыб, как коэффициента заглубления, во время прохождения

судна галсами мимо АГК. Для каждого галса строились зависимости коэффициента избегания и заглубления (изменения плотности и глубины скоплений относительно исходной) в поддиапазонах глубин от дистанции до судна.

Представлены результаты экспериментов по оценке влияния шумового поля судна на естественное распределения и эхоинтеграционные оценки плотности рыб под килем судна (зона №1 на рис. 2).

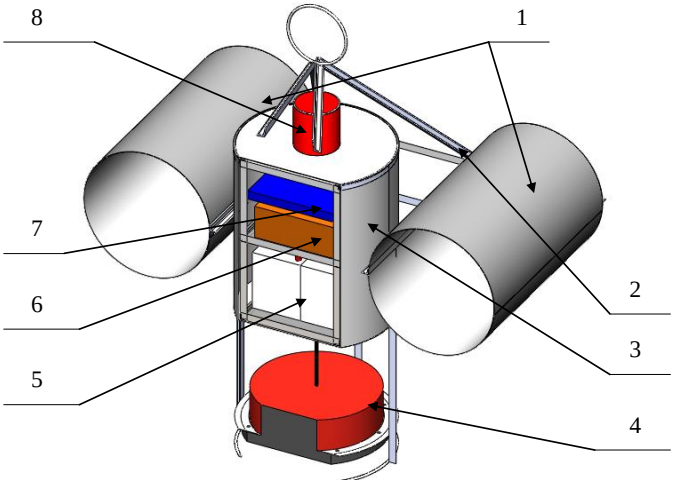


Рис. 1. Устройство автономного гидроакустического комплекса (АГК): 1 – плавучая платформа; 2 – подъемная ферма; 3 – приборный отсек; 4 – антенна эхолота 38 кГц; 5 – аккумуляторные батареи; 6 – приемопередатчик эхолота; 7 – процессорный блок; 8 – антенны Wi-Fi и GPS.

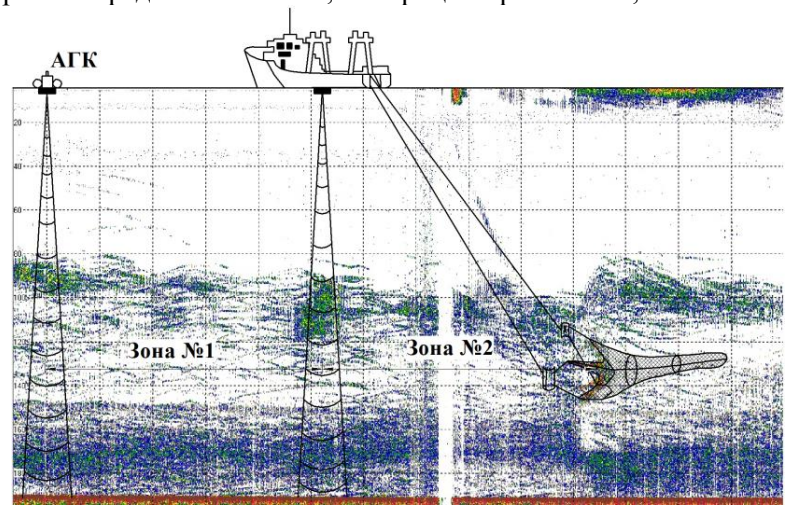


Рис. 2. Схема исследования влияния шума судна на оценки запасов рыб.

Наиболее динамичное поведение рыб наблюдалось в диапазоне глубин 0-100 м (рис. 3). На расстояниях до судна 180-140 м кривая суммарной плотности имеет тенденцию небольшого начального подъема ($К_{изб}$>1) за счет реагирующих вперед по ходу судна рыб, и, затем, устойчивого снижения при дальнейшем его приближении. Дистанции реагирования соответствует расчетной (150 м). Характерным является более сильное уменьшение суммарной плотности (рассеяние) рыб в верхних горизонтах. Заглубление рыб при приближении судна вызывает последовательное увеличение их плотности в более глубоком слое. В диапазоне глубин 0-100 м отношение плотности минтая к фоновой в точке максимального сближения с судном составило 0,56, т.е. недоучет численности этих рыб эхоинтеграционным методом может превышать 40 % (рис. 4А). На глубинах 100-200 м за счет заглубления рыб уменьшение суммарной плотности было менее значимо: $К_{изб}$ = 0,86 (рис. 4Б). Отношение суммарной плотности рыб к фоновой в точке максимального сближения (ТМС) во всем диапазоне глубин 0-200 м составило, соответственно, 0,69 (рис. 3).

Скорость заглубления рыб в шумовом поле судна плавно нарастает с дистанции 350 м от 0,04 до 0,15 м/с. На расстояниях до судна менее 120 м скорость заглубления резко возрастает и на минимальном расстоянии от судна становится максимальной - до 0,4 м/с (рис. 5). Скорости

рыб в шумовом поле судна на порядок выше, чем при их естественных вертикальных миграциях, что является показателем сильного раздражающего воздействия шума.

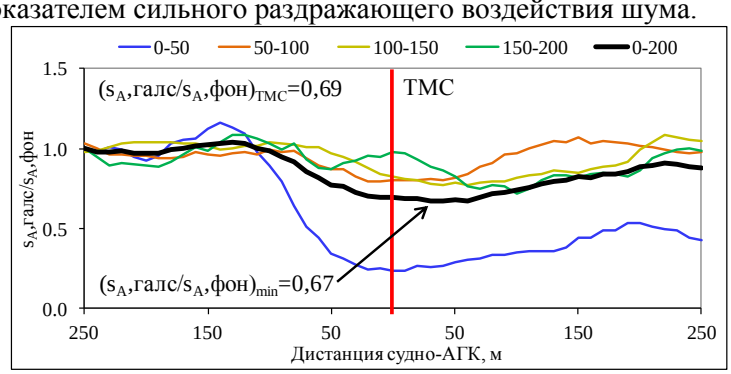


Рис. 3. Изменение плотности скоплений минтая в поддиапазонах глубин в зависимости от дистанции между судном и АГК.

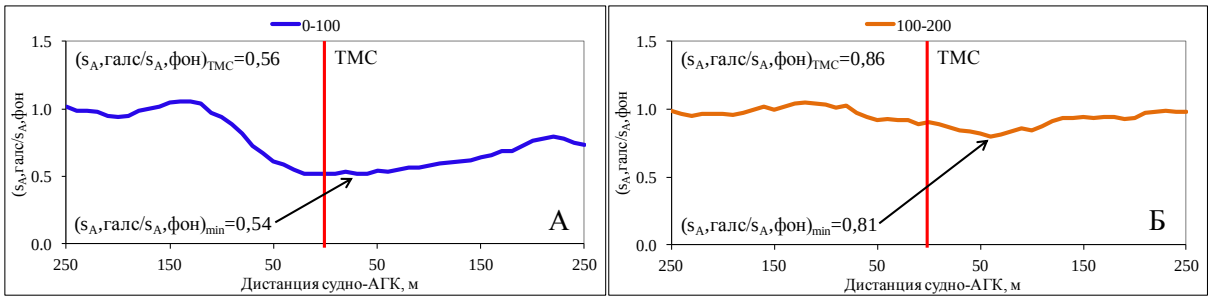


Рис. 4. Изменение плотности скоплений минтая в зависимости от дистанции между судном и АГК в диапазонах глубин: А - 0-100 м; Б - 100-200 м.

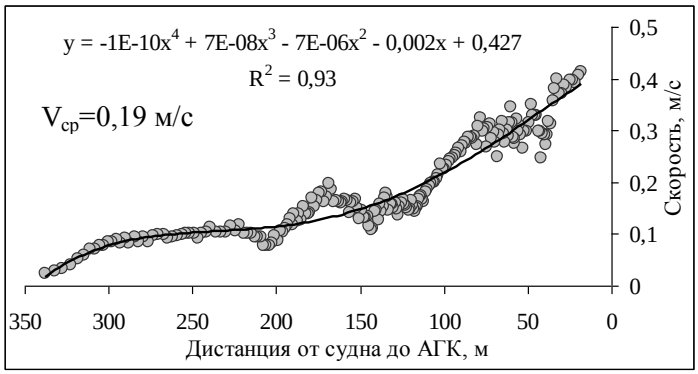


Рис. 5. Зависимости скорости заглубления минтая от дистанции между судном и АГК.

В результате обобщения экспериментальных данных по слоям глубины получен график изменения суммарной плотности скоплений минтая в ТМС относительно исходной (зона №1, рис 2) в поддиапазонах глубин, соответствующих среднему вертикальному раскрытию учетного трала РТ/ТМ 57/360 30 м с шагом по глубине 10 м (рис. 6А).

Оценка уловистости учетных рыбопромысловых тралов. Получены оценки плотности рыб в слое предполагаемого прохода трала под килем судна и сравнение ее с уловом трала (зона №2, рис. 2). Из отношения рассчитанной по улову и измеренной в слое траления под судном плотности рыб, получали коэффициенты уловистости в тех же поддиапазонах глубин (рис. 6Б).

Таким образом, были получены значения коэффициентов избегания как отношения плотности скоплений минтая в ТМС к исходной впереди судна и оценки уловистости учетного трала РТ/ТМ 57/360 как отношение количества пойманных рыб в трале к количеству рыб в обловленном объеме под судном в соответствующих слоям траления поддиапазонах глубин. Умножая измеренные в ТМС с судном коэффициенты избегания (зона №1) на коэффициенты уловистости, рассчитанные по результатам измерений плотности под судном (зона №2), вычислены значения сквозного, или интегрального, коэффициента уловистости, в которых учитываются избегание рыбами шумового поля судна на различных глубинах и уловистость самого трала (рис.

6В). Значения коэффициента уловистости варьируют от 0,01 в приповерхностных горизонтах до 0,85 на дистанциях реагирования минтая.

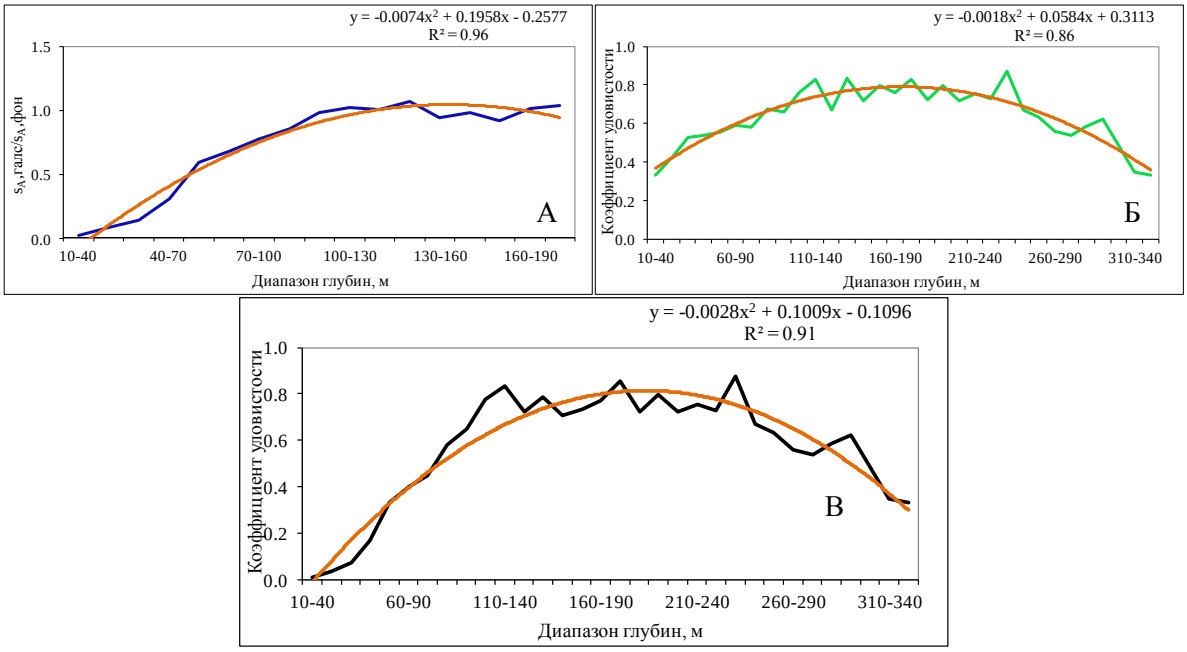


Рис. 6. Зависимости от глубины хода трала: А - коэффициента избегания судна (зона №1); Б - коэффициента уловистости между судном и тралом (зона №2); В - сквозного коэффициента уловистости.

Литература

1. Кузнецов М.Ю. Дистанции реагирования различных видов рыб на гидроакустические шумы промысловых и научно-исследовательских судов и допустимые уровни шума // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 164. С.157-176.
2. Кузнецов М.Ю., Поляничко В.И., Шевцов В.И. Характеристики гидроакустического шума научно-исследовательских судов ТИНРО-Центра // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 177. С.235-257.
3. De Robertis A., Handegard N.O. Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review // ICES J. Mar. Sci. 2013. Vol. 70. P.34–45.

БИБЛИОТЕКА ТИПОВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАССОВЫХ ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ РЫБ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

М.Ю.Кузнецов, канд.техн.наук, И.А.Убарчук, В.И.Поляничко
ФГБНУ «ТИНРО-Центр», Владивосток, Россия

LIBRARY OF TYPICAL HYDROACOUSTIC IMAGES OF MASSIVE FISH SPECIES OF THE FAR EASTERN SEAS

M.Y.Kuznetsov, Ph.D., I.A.Ubarchuk, V.I.Polyanichko
State Company «TINRO-Center», Vladivostok, Russia

Рассмотрены вопросы представления хранящихся в интегрированной базе данных ТИНРО-Центра гидроакустических и сопутствующих данных в виде метаархива и библиотеки характерных акустических изображений гидробионтов ДВ морей. Разработанное программное обеспечение позволяет воспроизводить предварительно отобранные в метаархив и библиотеку фрагменты эхограмм по району (задавая координаты или название промыслового района), времени года, локальному времени суток, виду рыб и их размеру. Использование библиотеки создает дополнительные возможности повышения качества распознавания (идентификации) гидробионтов на эхограммах и, связанной с этим, достоверности оценок запасов и эффективности их промысла с использованием гидроакустических технологий.

The questions of representation of hydroacoustic and accompanying data stored in the integrated database of TINRO-Center in the form of meta-archive and library of characteristic acoustic images of hydrobionts of the Far Eastern seas are considered. The developed software makes it possible to reproduce pre-selected into the meta-archive and library fragments of echograms by the region (specifying the coordinates or the name of the fishing area), the time of the year, the local time of the day, the type of fish and their size. The use of the library creates additional opportunities to improve the quality of recognition (identification) of hydrobionts on echograms and, consequently, the reliability of stock estimates and the efficiency of their fishing using hydroacoustic technologies.

Уровень развития гидроакустической техники и программных средств создают в настоящее время возможности их использования не только как средства поиска скоплений рыбы, но и оценки их плотности и распознавания объектов. Ошибка при идентификации вида объекта и его размерного состава на эхограмме может стать причиной неэффективного использования орудия лова, а зачастую – наносит прямой ущерб экологии вида (например, постановка орудия лова на скопление молоди или рыб непромыслового размера). Кроме этого, при проведении ресурсных исследований, неправильное распознавание и локализация скопления того или иного вида гидробионтов на эхограммах, где присутствуют другие рассеиватели, может стать источником погрешности оценки запаса.

За 20 лет выполнения акустических съемок и эксплуатации научных эхолотов на сервере лаборатории промысловой гидроакустики ТИНРО-Центра накоплен значительный объем исходных акустических измерений в Беринговом и Охотском морях и прилегающих водах Тихого океана. Все сопутствующие этим измерениям данные: биологические (по результатам контрольных тралений), навигационные, гидрологические, данные сопровождения акустических измерений, параметры тралений, справочные и вспомогательные таблицы содержатся в интегрированной базе данных, которая является информационной основой для последующей обработки акустических измерений и ежегодно пополняется.

Целью данной работы является развитие методов видовой идентификации (распознавания) объектов на эхограммах, а именно - создание библиотеки характерных акустических изображений гидробионтов ДВ морей и программных средств их визуализации, систематизации и представления сопутствующей информации.

Ранее на основе материалов, хранящихся на сервере лаборатории и в интегрированной базе данных, был сформирован метаархив акустических изображений основных промысловых объектов бассейна Охотского, Чукотского и Берингова морей и СЗТО [1]. Для пополнения были разработаны дополнительные программные средства FAMAS_DB и BIview выборки из интегрированной базы исходных данных и соответствующих гидроакустических фрагментов эхограмм по заданным параметрам, вторичной обработки информации и хранения описаний (рис. 1).

Данные в метаархиве по заданным параметрам (условиям отбора) из общего массива акустических и сопутствующих данных (биологических, навигационных, гидрологических) сортируются в соответствующие папки по морям, по проценту содержания основного объекта в улове, по размеру и доле объекта в пределах размерной группы, сезону и времени суток. В настоящее время метаархив содержит свыше 4500 фрагментов акустических изображений (эхограмм) минтая, сельди, сардины, скумбрии, мойвы, сайки и др., сопровождаемых информацией о размерном и видовом составе скоплений, стадии зрелости, сезоне, районе работ, параметрах траления, батиметрии, времени суток и регулярно пополняется.

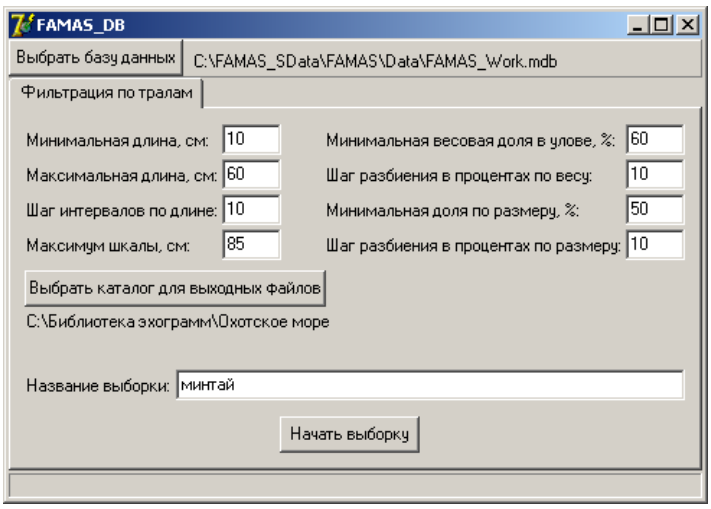


Рис. 1. Окно программы FAMAS_DB.

Из метаархива отбирались типичные, устойчиво повторяющиеся фрагменты эхограмм, которые совместно с диаграммой размерного распределения и стадии зрелости рыб, данными о районе работ, времени суток, параметрах траления и географического положения эхограммы составили постоянно пополняемую библиотеку характерных (типовых) акустических изображений промысловых рыб Дальневосточных морей России и прилегающих тихоокеанских вод.

Разработана первая версия программы представления данных метаархива и библиотеки характерных акустических изображений объектов ДВ морей - EchoArchive. Программа предназначена для отображения по заданным условиям предварительно отобранных в метаархив и библиотеку гидроакустических фрагментов эхограмм и их описания. В качестве банка данных при проведении процедуры анализа и отбора использованы содержащиеся в библиотеке и в метаархиве и сохранённые в соответствующем формате характерные (устойчиво повторяющиеся) акустические изображения различных видов рыб. Каждое акустическое изображение сопровождается данными о районе работ, географическом положении эхограммы, времени суток, сезоне, информацией о тралении, видовом составе улова с диаграммами размерного распределения, стадий зрелости рыб и др. (рис. 2). Банк акустических изображений регулярно пополняется новыми данными.

Программное обеспечение позволяет совершать выбор эхограмм по району (задавая координаты и (или) название района), локальному времени суток, времени года и объекту промысла. В результате можно воспроизводить на экране компьютера акустические изображения (фрагменты эхограмм) характерные для рыб различного размерного состава и в соответствии с сезонными (физиологическими), суточными и районными особенностями образования скоплений и их поведения. Например, акустические изображения, соответствующие скоплениям молоди, созревающих и половозрелых рыб (по размеру) или преднерестовых, нерестовых и нагульных рыб (по сезону) и др. Раскраску (палитру) отображаемых акустических изображений и диапазон раскраски (пороги) можно менять для лучшего соответствия эхограмме используемого на судне эхолота.

Окно Атласа содержит несколько областей: «Фильтр», «Эхограмма», «Параметры траления», область списка эхограмм, область отображающая улов, область с размером и зрелостью объекта и область где выводится сама эхограмма (рис. 2). Область «Фильтр» содержит в себе две вкладки, позволяющие производить отбор эхограмм «По координатам» - ограничивает акваторию поиска эхограмм по долготе и широте и «Промрайон» - ограничивает место записи эхограмм по промысловому району (рис. 3).

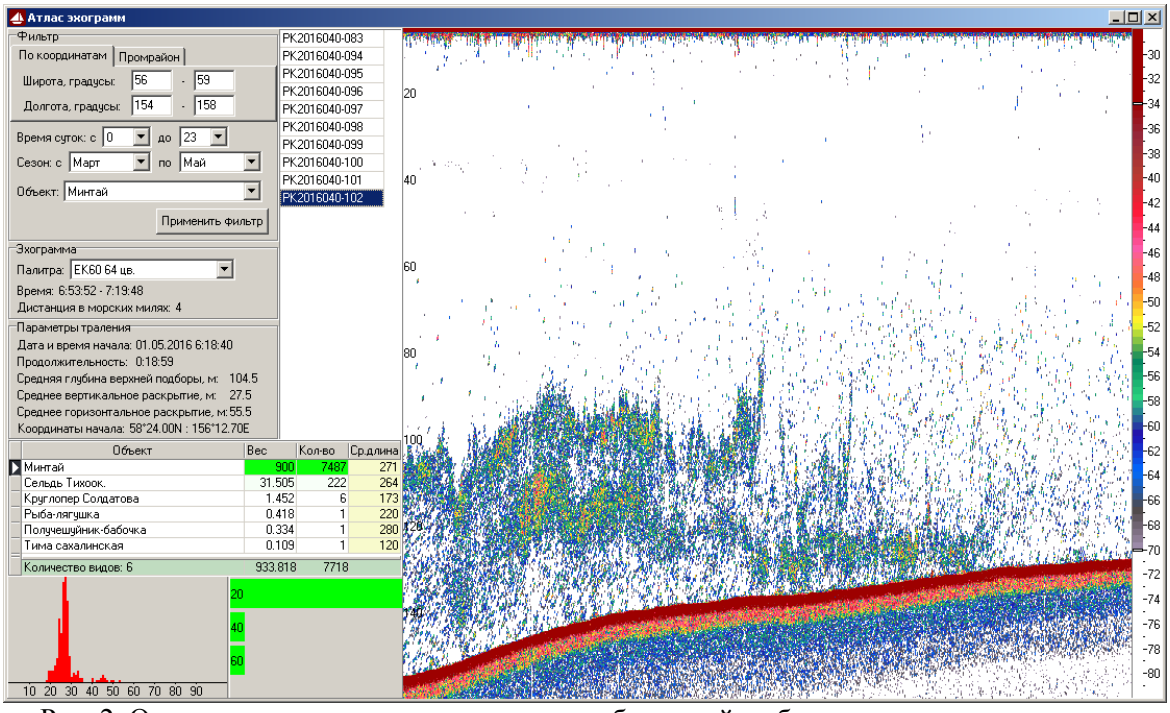


Рис. 2. Окно представления акустических изображений рыб и сопутствующих данных.

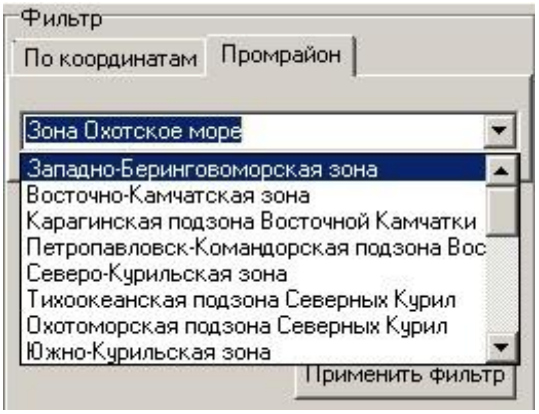


Рис. 3. Область поиска эхограмм по промысловому району.

В меню области «Фильтр» также выбираются (рис. 2):

- «Время суток» - время начала траления (записи эхограммы). В данной строке можно выбрать интересующий нас временной промежуток и посмотреть эхограмму объекта промысла в дневные и ночные часы;
- «Сезон» - выбор времени года, в котором проводилось траление (запись эхограммы);
- «Объект» - объект исследования (промысла). На данный момент список объектов состоит из 6 наиболее массовых видов рыб: минтай, сельдь, мойва, сайка, сардина и скумбрия.

После задания всех нужных фильтров, в колонке справа будут находиться эхограммы, удовлетворяющие заданным параметрам.

Область «Эхограмма» содержит в себе параметры эхограммы:

- «Палитра» - параметр позволяющий выбрать цветовой режим эхограммы. Данный параметр зависит от типа используемого эхолота. По умолчанию используется шкала научного эхолота EK-60 Simrad.
- «Время» - показывает промежуток времени записи эхограммы;
- «Дистанция в морских милях» - расстояние, которое охватывает эхограмма по оси X.

Область «Параметры траления» содержит в себе:

- Дату и время начала записи эхограммы;
- Продолжительность записи эхограммы;
- Среднюю глубину верхней подборы трала;
- Среднее вертикальное раскрытие трала;

- Среднее горизонтальное раскрытие трала;
- Координаты начала траления и записи эхограммы.

Область списка эхограмм содержит список эхограмм, доступных для просмотра после применения фильтра.

Область, отображающая улов - показывает вид, вес, количество и средний размер рыб в трале.

Область с размером и зрелостью объекта, выбранного в списке улова, делится на два поля. Левое поле показывает процентное содержание рыб относительно их размера. По шкале X - длина рыбы в см, по шкале Y - относительная доля рыб соответствующего размера в улове. Правое поле показывает стадию зрелости гонад.

Область эхограммы воспроизводит саму эхограмму, выбранную из списка эхограмм. В левой части эхограммы показывается глубина, в правой части шкала градации коэффициента обратного объемного рассеяния Sv (дБ). На шкале можно менять пороги и градации раскраски эхограммы.

На рис. 4 приведены примеры представления типовых акустических изображений рыб и их описания.

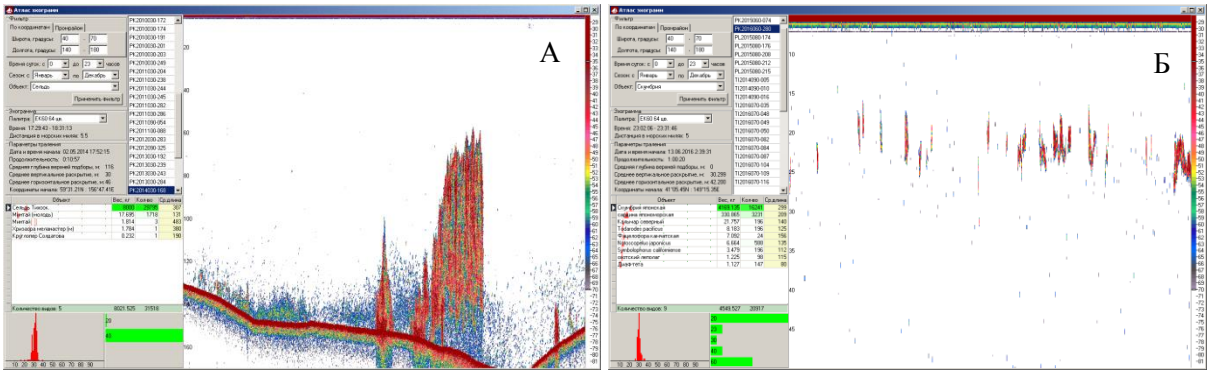


Рис. 4. Примеры типовых акустических изображений рыб: А – тихоокеанская сельдь (Охотское море, залив Шелихова); Б – японская скумбрия (СЗТО).

Сформирован регулярно пополняемый новыми данными банк типовых (устойчиво повторяющихся) акустических изображений массовых промысловых видов рыб бассейна Охотского, Берингова и Чукотского морей и прилегающих тихоокеанских вод.

С использованием разработанных программных средств можно производить выбор эхограмм из банка по различным критериям и воспроизводить эхограмму и сопутствующую ей информацию в любом из обследованных районов.

Литература

1. Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А. Формирование библиотеки типовых акустических изображений рыб Охотского и Берингова морей (структура и процедура пополнения) // Известия ТИНРО. 2013. Т. 175. С.182-193.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО НА ШЕЛЬФЕ ЗАБИВКОЙ ФУНДАМЕНТНЫХ СВАЙ НА БЕРЕГУ

Д.С.Манульчев, В.Е.Нечаюк[1], А.Н.Рутенко, д-р физ-мат.наук, M.R.Jenkerson[1], Ph.D.
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
[1]ExxonMobil, Хьюстон, США

SPATIAL ESTIMATION OF THE SOUND EXPOSURE LEVEL OF THE PULSED ACOUSTIC FIELD FORMED ON THE SHELF BY THE PILE DRIVING ON THE SHORE

D.S.Manul'chev, V.E.Nechauk[1], A.N.Rutenko, Dr.Sc., M.R.Jenkerson[1], Ph.D.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
[1]ExxonMobil, Houston, USA

Иллюстрируется методика прогнозирования пространственного распределения энергии импульсного акустического поля, генерируемого забивкой фундаментных свай на берегу северо-восточного шельфа о. Сахалин. Результат моделирования интерполируется на пространственную равномерную сетку размером 1 х 1 км. На основе расчетных данных проводится оценка кумулятивной энергии акустического поля в местах, близких к забивке свай. Теоретические значения кумулятивной энергии будут использоваться биологами в ходе многофакторного анализа воздействия антропогенной деятельности на поведение серых китов.

The report illustrates the technique for predicting the spatial distribution of the pulsed acoustic field energy generated by the pile driving on the shore of the northeastern shelf of Sakhalin Island. The simulation result is interpolated to a spatial uniform grid of 1 x 1 km. Based on the calculated data, an estimation is made of a 1-hour cumulative sound exposure at grid points close to the pile driving place. Theoretical values of the cumulative energy will be used by biologists in a multifactor analysis of the impact of anthropogenic activity on the behavior of gray whales.

В 2015 г. на берегу северо-восточного шельфа о. Сахалин в районах *Одопту* и *Чайво* на протяжении лета эпизодически производилась забивка фундаментных свай. Удар копра по верхнему концу забиваемой в грунт сваи генерирует акустическое поле, которое оказывает существенное влияние на уровни акустических шумов в прибрежной зоне [1], где обитают морские животные, в том числе охотско-корейская популяция серых китов, занесенных в «Красную книгу» РФ. В связи с этим была поставлена задача прогнозирования уровня кумулятивного акустического воздействия от забивки береговых фундаментных свай на прибрежную область. Поставленная задача реализуется с помощью численного моделирования, основанного на решении модовых параболических уравнений (МПУ) с учетом упругих свойств пород, слагающих дно [2]. Акустическое поле рассчитывается в вертикальной плоскости с помощью распространяющихся нормальных мод в адиабатическом приближении, а в горизонтальной плоскости в секторе, определяемом узкоугольным параболическим уравнением.

Фундаментные сваи представляют собой цилиндрические стальные трубы, имеющие диаметр 530 или 762 мм и длину 17 или 20 м с различными комбинациями. Установка свай производится в несколько этапов. Вначале в грунте бурится скважина диаметром незначительно больше диаметра устанавливаемой сваи. Глубина скважины варьируется в пределах 3 – 5 м. Затем в скважину устанавливают сваю и путем серии ударов «молотом» по концу сваи забивают ее до проектной глубины, которая лежит в диапазоне 14 – 19 м в зависимости от длины сваи. Время забивки одной сваи занимало 7 – 23 минуты. На рис. 1(а) приведена карта района *Чайво* с указанием на берегу строительной площадки S, на территории которой происходила забивка фундаментных свай, и точек мониторинга р.1 – р.6, в которых в это время проводились стационарные акустические измерения у дна вариаций акустического давления $p(t)$ в частотном диапазоне 2-15000 Гц. На рис. 1(б) показано изменение акустического давления в точке р.1 на протяжении забивки одной из свай на берегу, а на рис. 1(в) приведена оценка энергетического параметра SEL^{imp}, рассчитанная по формуле (1) для каждого импульсного сигнала, соответствующего удару «молота» по свае, на 1-секундном интервале в диапазоне частот 10 – 140 Гц.

$$SEL_{1s}^{imp}(\Delta f; x, y, z) = 10\lg\left(\frac{\Delta t\int_{f_1}^{f_2} G(f; x, y, z)df}{p_0^2 \Delta t_0}\right), \qquad (1)$$

где SEL_{1s}^{imp} – уровень акустического воздействия или уровень энергии акустических шумов в частотном диапазоне Δf на временном интервале Δt в дБ отн. 1 мкПа^2·с, а $G(f; x, y, z)$ – спектральная плотность мощности сигнала.

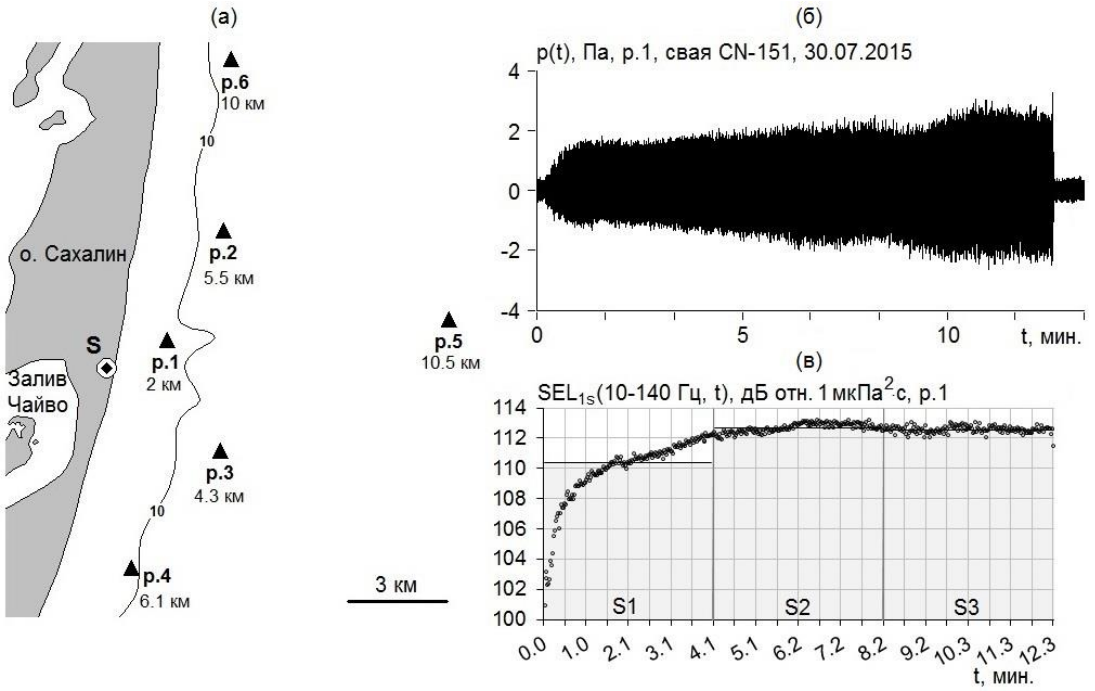


Рис. 1. Карта района забивки фундаментных свай (а). Вариации акустического давления в точке р.1 во время забивки сваи (б) и оценка параметра *SEL* каждого импульса (в).

На рис. 2 показаны вариации акустического давления – $p(t)$ и спектры – $G(f)$ акустических импульсов, измеренных в точках акустического мониторинга р.1, р.2 и р.5 во время забивки сваи. На графиках видно, что импульсы в каждой точке мониторинга содержат низкочастотную энергию в диапазоне 10 – 50 Гц. Это объясняется тем, что энергия колебаний, предаваемая сваей грунту, распространяется в виде низкочастотного импульса, который переходит из земли в воду и озвучивает прилегающую акваторию моря. За счет особенностей распространения звука с суши в море, во всех точках мониторинга за исключением р.1 на частотах выше 50 Гц наблюдается резкое уменьшение уровня спектральной плотности мощности до уровня окружающих шумов. Таким образом, в точках р.2 – р.5 сигнал от удара молота по свае можно распознать только в диапазоне 10 – 50 Гц. Заметим, что в удаленной точке р.5 во временной области сигнал уже не виден, но низкочастотный спектр полезного сигнала превышает окружающий фон. В точке р.6, расположенной вдоль берега на дистанции 10 км от источника, энергия антропогенных импульсов соизмерима с окружающим шумом.

Модельный геоакустический 3-D волновод представляет собой двухслойную среду (вода-дно) с реальной батиметрией и измеренным распределением скорости звука в водном слое (рис. 3). Предполагается, что дно состоит из осадочного слоя с линейным распределением физико-акустических параметров донных пород. Подбор физико-акустических параметров дна корректировался по экспериментальным акустическим данным, измеренным в каждой точке мониторинга (табл. 1). Анализ экспериментальных данных, полученных в опорной точке р.1, показал, что уровень энергии импульсных сигналов по мере погружения забиваемой сваи может существенно измениться, поэтому было предложено разбить моделирование импульсного поля от одной сваи на три равные части по мере заглубления сваи в грунт (рис. 1(в)). На каждом из трех участков рассчитывается своя функции точечного источника [3] S1, S2 и S3, расположенная на горизонтах 6, 9 и 12 м соответственно.

Фундаментные сваи забивались на суше в пределах прямоугольной площадки, имеющей размеры 200 м с запада на восток и 300 м с севера на юг. Центральная точка площадки S удалена от уреза воды на 230 м. Предварительные расчеты показали, что смещение источника звука в горизонтальной плоскости в пределах рабочей прямоугольной области не приводит к существенным изменениям параметра *SEL* импульсного акустического поля, формируемого в прибрежной зоне, а также сохраняет энергию функции источника в пределах 0.24 дБ в частотном диапазоне 10 – 140 Гц. Данное обстоятельство позволило при дальнейшем моделировании акустических импульсных полей от забивки свай расположить точечный источник в центре прямоугольной области в точке S в независимости от реального расположения забиваемой сваи в пределах прямоугольной площадки.

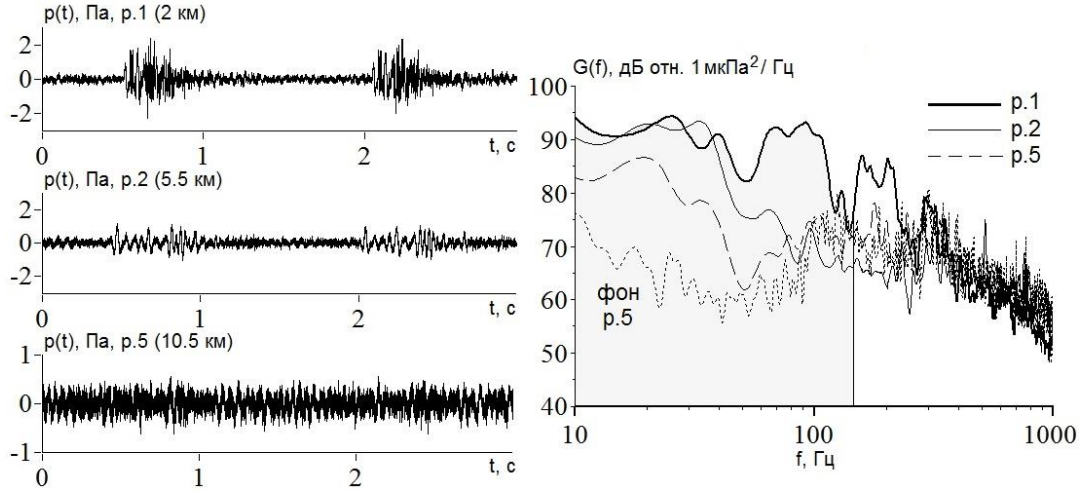


Рис. 2. Импульсные сигналы, генерируемые забивкой свай, и их спектры в точках р.1, р.2 и р.5.

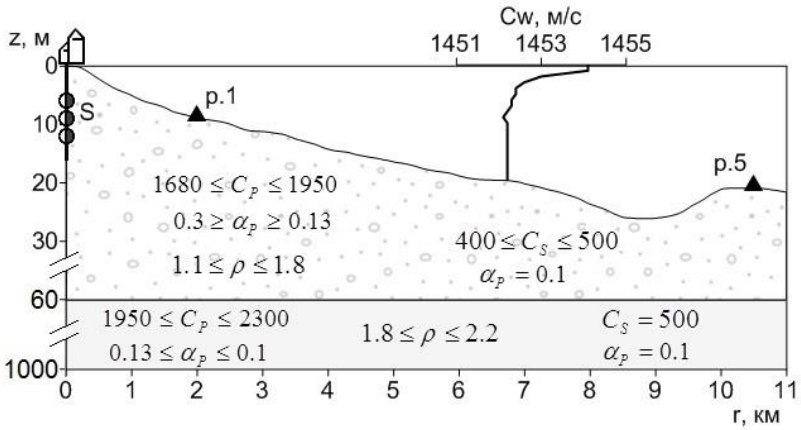


Рис. 3. Модельный геоакустический волновод: C_P и C_S (м/с) – скорости распространения продольных и поперечных волн, α_p и α_s (дБ / λ) – соответствующие коэффициенты потерь, ρ (г / см^3) – плотность грунта.

Таблица. 1. Модельные и экспериментальные значения параметра *SEL* импульсных сигналов.

свая CN-151, 30.07.2015		Источник S2 (9 м)	Точки мониторинга				
			р.1 (2 км)	р.2 (5.5 км)	р.3 (4.3 км)	р.4 (6.1 км)	р.5 (10.5 км)
SEL_{1s}, дБ отн. 1 мкПа^2 · с	экспер.	-	112.8	110.9	106.4	96.8	102.4
	модель	200.6	112.7	110.3	107.5	98.8	101.1

При решении МПУ корректные значения акустического поля в горизонтальной плоскости ограничены узкоугольным сектором. Поскольку источник звука S находится на берегу, а звук распространяется в акваторию моря, то необходимо рассчитать распространение энергии импульсного сигнала, генерируемого забивкой свай, в область, ограниченную углом 180˚. В связи с этим было принято решение разбить область побережья на несколько узкоугольных секторов, в каждом из которых будут рассчитываться значения $SEL^{imp}(x, y, z)$ с помощью программного комплекса МПУ. Для определения энергии акустического поля во всех точках волновода, проводилась операция интерполяции в местах, в которых отсутствуют расчетные значения параметра SEL^{imp}. На рис. 4(а) проиллюстрировано расположение четырех секторов: границы крайних секторов совпадают с береговой линией, другие два сектора ориентированы в сторону моря. Сектора ограничены углом 30˚, а угол между границами секторов составляет 20˚. Рис. 4 демонстрирует результат расчета пространственного распределения медианных значений параметра $mSEL^{imp}(x, y)$, оцененных в водном слое в точке волновода (x, y) при горизонтальном усреднении поля в ячейках размером 200 х 200 м (б) и 1 х 1 км (в). Из графиков отображения акустических полей видно, что программа моделирования корректно реагирует на трехмерные неоднородности волновода в виде, например, подводных возвышений или наклонов дна.

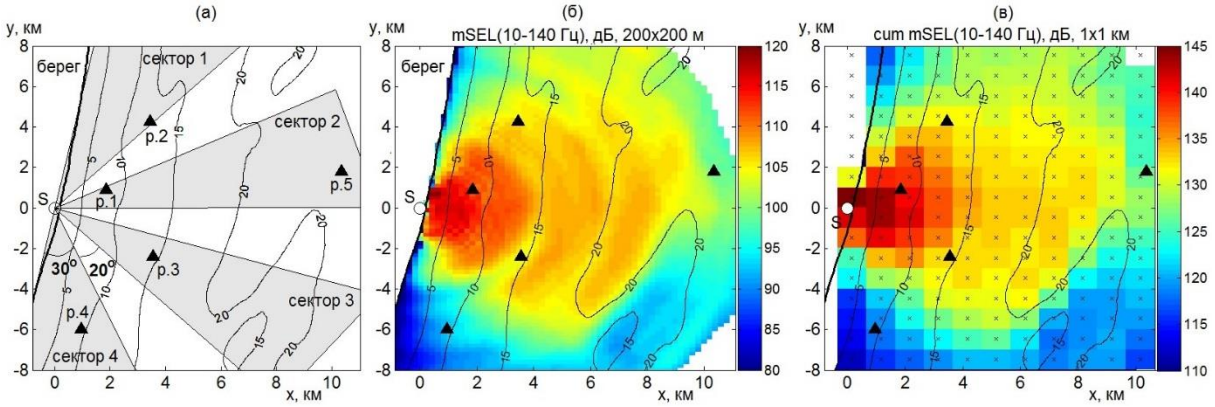


Рис. 4. Положение четырех узкоугольных секторов (а), пространственное распределение модельных значений медианного *SEL*(10-140 Гц), усредненного на ячейке 200 х 200 м (б) и кумулятивное акустическое воздействие от забивки сваи CN-151 на сетке 1 х 1 км (в).

Результаты численного моделирования, проведенного сотрудниками ТОИ ДВО РАН, в согласованном формате переданы биологам, которые используют их в многофакторном корреляционном анализе [4] с целью оценки возможного влияния антропогенных акустических шумов на поведение серых китов, питавшихся в рассматриваемом районе в 2015 г.

Работа выполнена при поддержке компании «Эксон Нефтегаз Лимитед».

Литература

1. Рутенко А.Н., Фершалов М.Ю., Jenkerson M.R. 3-D моделирование акустического поля, формируемого на шельфе во время забивки фундаментных свай на берегу // Акустика океана / Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М. ГЕОС. 2016. С. 240-243.
2. Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // Wave Motion, 2015, V. 58, P. 42-52.
3. Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Путов В.Ф., Соловьев А.А., Манульчев Д.С. Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований // Акуст. журнал. 2016. Т. 62. № 3. С. 348-362.
4. Gailey G., Sychenko O., McDonald T., Racca R., Rutenko A., Bröker K. Behavioral responses of western gray whales to a 4-D seismic survey off northeastern Sakhalin Island, Russia // Endang Species Res. 2016. Vol. 30: P. 53–71.

ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПОДВОДНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Д.А.Преснов, канд.физ-мат.наук, В.А.Гусев[1], канд.физ-мат.наук, Р.А.Жостков, канд.физ-мат.наук, А.В.Разин[2], д-р физ-мат.наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]АО «ФНПЦ «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», Россия

SEISMIC-ACOUSTIC WAVE GENERATION BY UNDERWATER SOURCE AT ICE COVER PRESENCE

D.A.Presnov, Ph.D., V.A.Gusev[1], Ph.D., R.A.Zhostkov, Ph.D., A.V.Rasin[2], Dr.Sc.
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia
[1]M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[2]JSC «FRPC «Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering», Russia

Численно и аналитически анализируется волновое поле, создаваемое точечным источником в модели слоистой среды "упругое полупространство – водный слой – ледовый покров". Показано, что волновое поле разделяется на несколько мод: гидроакустические, изгибные, донные поверхностные. Получено асимптотическое уравнение для упругого волнового поля в дне. Результаты аналитических построений сопоставляются с результатами прямого численного моделирования методом конечных элементов.

The wave field generated by the point source in the layered medium model "elastic half-space-water layer-ice cover" is analyzed numerically and analytically. It is shown that the wave field is divided into several modes: hydroacoustic, flexural, bottom surface. An asymptotic equation for the elastic wave field in the bottom is obtained. The results of analytical constructions are compared with the results of direct numerical simulation by the finite element method.

Теоретические основы акустики слоистых сред были заложены академиком Л.М. Бреховских [1] и с успехом применяются многими авторами, в том числе для решения прикладных задач. В настоящей работе рассматривается одна частная модель слоистой среды в виде "упругое полупространство-жидкий слой-упругий слой" в приложении к проблеме анализа сейсмоакустического волнового поля при экспериментальных наблюдениях на акватории покрытой ледовым покровом. Необходимо отметить, что на сегодняшний день существует достаточно большое количество различных упругих моделей слоистых сред, подробный обзор решений по близкой тематике можно найти в монографии [2]. Для начального рассмотрения представляет интерес работа [3], где описана модель включающая дно и жидкий слой. Решение для такой упрощенной модели можно с некоторыми допущениями использовать и при наличии ледового покрова. Введение в модель среды ледового покрова главным образом открывает новые возможности для экспериментального измерения упругих колебаний прямо с твёрдой поверхности льда. Эффекты, вызванные наличием ледового покрова, существенно зависят от упругих параметров льда, которые в природных условиях изменяются значительно. Ещё более сложная модель рассмотрена в [4], где также учтена неоднородность ледовой пластины с внутренней стороны.

Построение аналитического решения. Для многих прикладных задач является важным анализ возмущения, создаваемого точечным источником, расположенным в водной толще. В дальнейшем будем придерживаться описания модели слоистой среды в цилиндрических координатах, опубликованного в работе [5]. Плоскость $z = 0$ совпадает с верхней границей верхнего изотропного упругого слоя, моделирующего лед толщиной h_1 и характеризуемого скоростями продольной и поперечной волн c'_l и c'_t. Однородной жидкой слой $h_2 < z < h_1$ имеет скорость звука c_0. Изотропное упругое полупространство занимает область $h_2 > z$ и описывается скоростями c_l и c_t. Все три среды будем полагать идеальными. Пусть в жидком слое в точке с координатами $(0, 0, h_S)$ расположен точечный гармонический акустический источник циклической частоты ω. В безграничной среде на расстоянии R акустический источник создает сферическую волну, потенциал смещений в которой дается выражением

$$\varphi_S = \frac{V_0}{R} e^{-i(\omega t + k_0 R)}, \qquad (1)$$

где параметр V_0, имеющий размерность объема, характеризует эффективность источника, $k_0 = \omega / c_0$ – волновое число акустической волны.

На границах сред необходимо указать условия для вектора смещений и тензора напряжений. На свободной границе верхнего слоя выполняется условие отсутствия напряжений. На

обеих границах упругой среды и жидкости выполняются условия отсутствия касательных напряжений, равенства нормальных компонент тензора напряжений и равенства нормальных к этой границе компонент вектора смещений.

Раскладывая выражение (1) в интеграл Зоммерфельда, получим выражение для потенциала смещений φ_0 (см. [5]) в водной среде при подстановке которого в граничные условия будем искать решения пользуясь методом интегрального преобразования Фурье. Для смещений частиц в твердом полупространстве $\vec{u}' = \{u'_r, 0, u'_z\}$ можно получить следующие выражения (все обозначения соответствуют работе [5]):

$$u'_z(r,z,t) = -i\frac{\rho_0\omega^2 V_0}{\mu'}\int_0^\infty \frac{\alpha'_l q(k)}{D(k)}\left(\left[\alpha'^2_t - k^2\right]e^{-i\alpha'_l(z+h_2)} + 2k^2 e^{-i\alpha'_t(z+h_2)}\right)kJ_0(kr)e^{-i\omega t}dk\,, \qquad (2)$$

$$u'_r(r,z,t) = \frac{\rho_0\omega^2 V_0}{\mu'}\int_0^\infty \frac{q(k)}{D(k)}\left(2\alpha'_l\alpha'_t e^{-i\alpha'_t(z+h_2)} - \left[\alpha'^2_t - k^2\right]e^{-i\alpha'_l(z+h_2)}\right)k^2 J_1(kr)e^{-i\omega t}dk\,, \qquad (3)$$

где сделано обозначение:

$$q(k) = \left[e^{i\alpha_0\Delta h}e^{i\alpha_0(h_s+h_2)} - e^{i\alpha_0(h_s+h_1)}\right]\left\{8\mu\alpha_0\alpha_l\,\alpha_t\,k^2\left(\alpha_t^2-k^2\right)^2\left[\cos h_1(\alpha_l+\alpha_t)-1\right] - \right.$$
$$\left. - \mu\alpha_0 R_{lt}^2 + i\alpha_l\rho_0\omega^2\left(\alpha_l^2+k^2\right)\left[\left(\alpha_t^2-k^2\right)^2\cos\alpha_l\,h_1\sin\alpha_t\,h_1 + 4\alpha_l\,\alpha_t\,k^2\sin\alpha_l\,h_1\cos\alpha_t\,h_1\right]\right\}.$$

Оценку интегралов в соотношениях (2) – (3) на больших расстояниях удобно провести методом перевала [6]. Для этого в подынтегральных выражениях заменим функцию Бесселя на функцию Ханкеля, причем для последней воспользуемся асимптотикой при больших значениях аргумента [1]. Перейдем так же в полярную систему координат, связанную с положением источника: $z = -h_s - R\cos(\theta)$, $r = R\sin(\theta)$. В результате довольно громоздких алгебраических преобразований, получим приближенное выражение для полей смещений в твердом полупространстве, вызванных точечным источником, расположенным на большом, по сравнению с длиной волны, расстоянии:

$$u'_z(R,\theta,t) = -\frac{2\rho_0\omega^2 V_0\cos\theta}{\mu'}\left\{k'^2_l\left(k'^2_t - 2k'^2_l\sin^2\theta\right)\cos\theta\frac{q(k'_l\sin\theta)}{D(k'_l\sin\theta)}\frac{e^{-ik'_l R}}{R} + \right.$$
$$\left. + 2k'^3_t\sin^2\theta\sqrt{k'^2_l - 2k'^2_t\sin^2\theta}\,\frac{q(k'_t\sin\theta)}{D(k'_t\sin\theta)}\frac{e^{-ik'_t R}}{R}\right\}, \qquad (4)$$

$$u'_r(R,\theta,t) = \frac{2\rho_0\omega^2 V_0\sin\theta\sqrt{\cos\theta}}{\mu'}\left\{k'_l\left(k'^2_t - 2k'^2_l\sin^2\theta\right)\frac{q(k'_l\sin\theta)}{D(k'_l\sin\theta)}\frac{e^{ik'_l R}}{R} + \right.$$
$$\left. - 2k'^2_t\cos\theta\sqrt{k'^2_l - 2k'^2_t\sin^2\theta}\,\frac{q(k'_t\sin\theta)}{D(k'_t\sin\theta)}\frac{e^{ik'_t R}}{R}\right\}, \qquad (5)$$

где $k'_l = \omega/c'_l$, $k'_t = \omega/c'_t$ – волновые числа продольных и поперечных сейсмических волн в твердом полупространстве.

Результаты численного моделирования. Численное моделирование выполнено в пакете Comsol multiphysics [7]. Для расчета распространения волн в слоистой среде «упругое полупространство – водный слой – ледовый покров», параметры которой приведены в таблице 1, создана модель с автоматическим выбором оптимальных размеров конечных элементов и величины шага по времени, обеспечивающих сходимость модели и ошибку менее 1%. Граничные условия соответствовали стандартным для задач такого типа: верхняя граница - свободная, правая и нижняя – слабоотражающие, а левая обеспечивает симметрию геометрии и нагрузок.

Точечный источник задавался на глубине 10 м в водном слое, в форме двуполярного импульса Рикера (рис. 1 средний, светлый цвет), в соответствии с формулой:

$$p(t) = 2\pi f p_0\left(\frac{1}{f_0} - t\right)e^{-2\pi^2(tf_0-1)^2+\frac{1}{2}}, \qquad (6)$$

где f_0 = 10 Гц - центральная частота импульса, p_0 = 2000 Па - амплитуда импульса.

Таблица 1. Параметры модели среды для численного моделирования.

	Толщина, м	c_l , м/с	c_l , м/с	ρ , кг/м^3
Ледовый покров	0,4	2200	1270	900
Жидкий слой	20	1500	-	1020
Дно	∞	3000	1764	2600

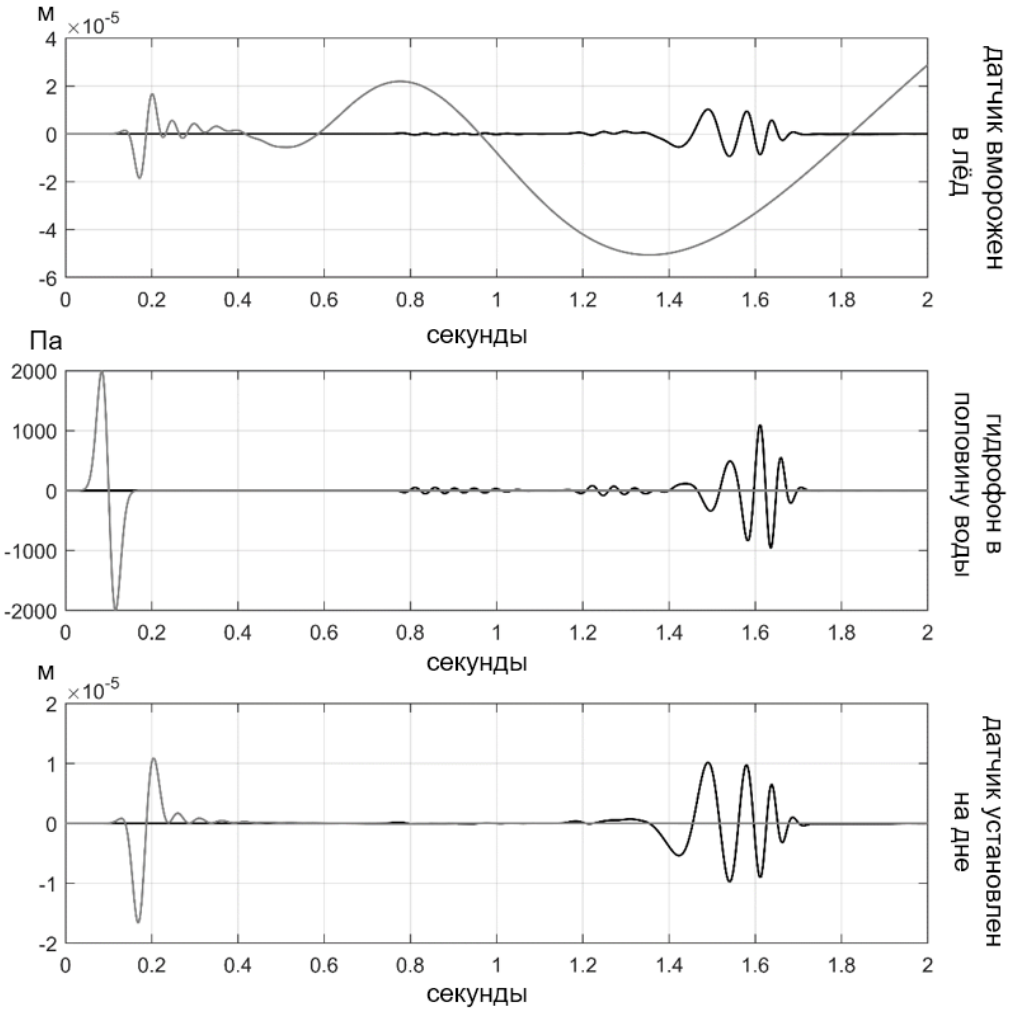


Рис. 1. Синтетические волновые формы, полученные в результате численного моделирования.

На рис. 1 представлены результаты расчета, где на верхнем графике изображена амплитуда смещений ледового покрова, на среднем акустическое давление в водном слое и на нижнем амплитуда смещений дна. Светлые тона соответствуют излученному сигналу (на среднем рисунке в точности, на других сигнал, прошедший 100 м по горизонтали), темным цветом сигналы, прошедшие расстояние в 2000 м. Как можно заметить, уже на таком расстоянии исходный импульс искажается по причине дисперсии фазовой скорости. При этом, как следует из теоретического анализа, характерный вид дисперсионных кривых для донной поверхностной волны и гидроакустических мод при расчётных параметрах модели достаточно сильно похож, однако их удаётся разделить в частотной области. Обращает на себя внимание интенсивное воздействие, обозначенное светлым тоном на верхнем графике. Это так называемое изгибно-гравитационное колебание ледового покрова, скорость распространения которого на порядок ниже скоростей других мод.

Сравнивая нижний и средний рисунки, можно заметить, что первое вступление, соответствующее группе волн пониженной частоты, приходит на приёмник, установленный на дне быстрее, чем на гидрофон. Кроме того, точно такое же вступление наблюдается и на приёмнике, вмороженном в лёд. Заметим, что при дальнейшем распространении волновой импульс раз-

деляется на два: быстрый, соответствующий донной поверхностной волне (Стоунли-Шолте) и медленный - гидроакустический, энергия которого сосредоточена преимущественно в водном слое. Этот замечательный факт позволяет принимать донную волну приёмником, вмороженным в лёд, что позволяет значительно упростить выполнение экспериментальных работ на акваториях. Последние экспериментальные работы [8, 9] уже продемонстрировали возможность изучения характеристик верхней части разреза дна при помощи решения обратной задачи для дисперсионных кривых волн поверхностного типа.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-02046 и № 16-35-00547.

Литература

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973.
2. Петухов Ю.В., Разин А.В., Собисевич А.Л., Куликов В.И. Сейсмоакустические и акустико-гравитационные волны в слоистых средах. М.: ИФЗ РАН. 2013.
3. Лапин А.Д. Возбуждение волн в твердом полупространстве, покрытом жидким слоем // Акустический журнал. 1992. Т. 38, № 2. С. 364-367.
4. Луньков А.А., Петников В.Г. Распространение звука в мелководном арктическом волноводе с ледовым покровом // Ученые записки физического факультета Московского Университета. № 5. С. 17501122.
5. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акустический журнал. Т. 60, № 4. С. 426-436.
6. Найфэ А.Х. Методы возмущений. Пер. с англ. М.: Мир. 1976.
7. Comsol multiphysics 5.3 Лицензия №9600341.
8. Акопова С.С., Бирюков Е.А., Григорьев А.Г., Тихоцкий С.А., Шур Д.Ю. Экспериментальное исследование возможности использования поверхностной волны Шолте для изучения строения верхней части разреза на акваториях // Вопросы инженерной сейсмологии. Т. 43, № 4. С. 77-86.
9. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 81, № 1. С. 76-80.

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ

Д.А.Преснов, канд.физ-мат.наук, А.Н.Антонов[1], Д.Е.Белобородов, Р.А.Жостков, канд.физ-мат.наук, Д.В.Лиходеев, канд.физ-мат.наук, А.С.Шабалина[1]
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[1]Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

SEISMIC-ACOUSTIC TECHNOLOGIES FOR MONITORING OF UNDERWATER VOLCANO DEEP STRUCTURE

D.A.Presnov, Ph.D., A.N.Antonov[1], D.E.Beloborodov, R.A.Zhostkov, Ph.D., D.V.Likhodeev, Ph.D., A.S.Shabalina[1]
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia

Представлены результаты экспедиционных работ на акватории Азовского моря, основной целью которых было изучение глубинного строения активного грязевого вулкана Голубицкий, расположенного на шельфе недалеко от строящегося Керченского моста. При выполнении работ была использована авторская аппаратура, в состав которой входили специализированные современные широкополосные донные сейсмометры. Развиваемая нами технология глубинного мониторинга подводных грязевых вулканов предусматривала профильный геогидроакустический мониторинг шумового поля с выходом на анализ спектральных амплитуд поверхностных волн в различных точках пройденного профиля. Морские эксперименты подтвердили, что восстановленное при помощи разработанной технологии глубинное строение дна моря, позволяет изучить характерные особенности структур питающей системы вулкана и окружающих областей дна Азовского моря. Эти уникальные научные результаты имеют важное прикладное значение с точки зрения экологической безопасности региона.

Fieldwork results in the water area of the Azov Sea are presented, the main purpose of which was to study the deep structure of the active mud volcano Golubitsky, located on the shelf near the Kerch bridge under construction. When performing the work, the author's equipment where used, which included specialized modern broadband bottom seismometers. The technology of deep monitoring of underwater mud volcanoes developed by us included profile geo-hydroacoustic monitoring of the noise field with the output for analysis of the spectral amplitudes of surface waves at various points of the passed profile. Marine experiments have confirmed that the depth structure of the sea bottom, reconstructed with the help of the developed technology, allows one to study the characteristic features of the structures of the volcano feeding system and surrounding areas of the bottom of the Azov Sea. These unique scientific results are of great practical importance from the point of view of the ecological safety of the region.

Метод и объект исследования. Изучение глубинного геологического строения вулканов является сложной задачей главным образом по причине отсутствия подходящего геофизического метода, способного обнаруживать суб-вертикальные границы неоднородной среды. В последние десять лет в ИФЗ РАН активно развивается оригинальный метод изучения геологических структур, основанный на анализе шумового микросейсмического поля [1, 2]. Использование этого метода, в отличии от классических технологий поиска полезных ископаемых, позволяет выделять различные неоднородности как горизонтальной ориентации, так и вертикальной, что делает его особенно востребованным в задачах изучения тектонических разломов и вулканических образований [3]. В тоже время при работе в морских условиях возникают дополнительные трудности связанные, во-первых, с обоснованием стационарности микросейсмического поля на дне, и во-вторых технические проблемы связанные с невозможностью установки сейсмометра с инерционной массой под водой. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований, которые решают обе этих проблемы. Следует отметить что первые попытки использования методов, основанных на измерения сейсмических шумов и анализе волн поверхностно типа в морских условиях уже продемонстрировали их перспективность [4, 5].

Экспериментальные работы проводились в 2016 году в полевых условиях в районе Таманской грязевулканической провинции. Объектом исследования стал активный грязевой вулкан Голубицкий, последнее извержение которого произошло в 2015 г. (рис. 1а). Голубицкий грязевой вулкан расположен недалеко от станицы Голубицкая Краснодарского края, на глубине нескольких метров под водой и примерно в 300 м от берега Азовского моря. Обычно длина вулкана около 100 метров, а высота до 2 метров. Извергается вулкан, примерно, раз в 3-6 лет. Во время извержения вулкана в 2015 г. произошел разлом со смещением почвы в окрестностях пляжа, мимо восточного края озера, через крайний дом у озера и наверх по склонам. Извержения приводят к образованию после активности вулкана «островов», которые затем размываются морем в течение нескольких месяцев после прекращения активности.

В процессе проведения работ по изучению глубинного строения были выполнены профильные сейсмоакустические наблюдения, как на суше, так и в море. Расположение точек, в

которых были произведены измерения, а также, вулкан, лагерь и базовая станция отмечены на карте (рис. 1б).

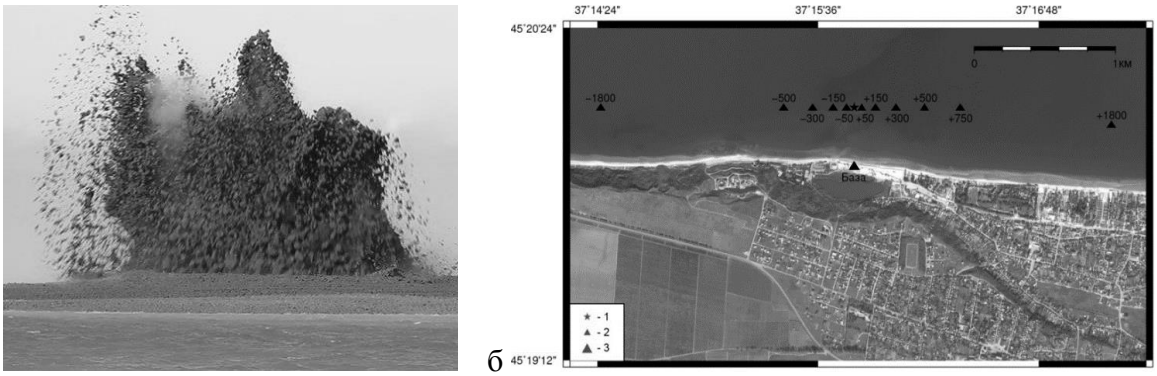


Рис. 1. а) Фотография извержения вулкана в 2015 году; б) Карта профиля. 1 – вулкан Голубицкий, 2 – точки профиля, 3 – Базовая станция (лагерь).

Технические средства для осуществления донных сейсмоакустических измерений. Большинство современных донных сейсмоприёмников при развертывании используют автоматизированный технический механизм для освобождения инерционного груза, что негативно сказывается на их надёжности. В противоположность им применяют электрохимические приёмники, которые готовы к измерению сразу после подачи питания. В нашей работе использовались именно такие приборы, основанные на принципах молекулярно-электронной технологии, концепцией которой является возможность преобразования ускорения движения поверхности в электрический сигнал посредством регистрации физического переноса заряженных частиц (ионов), увлекаемых инерционным движением жидкости через т.н. молекулярно-электронный преобразователь [6, 7].

Нами применялись два различных способа измерений.

Способ 1. Измерения с помощью сухопутного сейсмометра (рис. 2а).

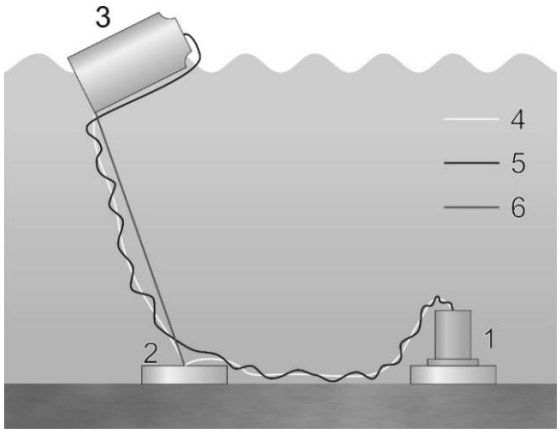
На основе низкочастотного сейсмометра CME-4211V был предложен морской информационно-измерительный модуль, включающий герметичный металлический корпус с приёмником, к которому был прикреплен бетонный диск (1). Диск с помощью трех рымов крепился к фалу, на котором через 7-10 метров был закреплен 10-ти килограммовый груз (2). Еще через 10 метров фал крепится к бую, в котором жестко был закреплен регистратор RefTek и аккумуляторные батареи (3). От прибора вдоль фала тянется кабель (закреплен с провисанием для предотвращения повреждения кабеля), который через специальный герморазъем подсоединен к регистратору и аккумулятору. Кроме того, для устранения возможного волочения груза и станции по дну, буй снабжен резиновыми амортизаторами, которые ослабляли передачу воздействий от морского волнения на сейсмометр через фал.

Способ 2. Автономная донная сейсмическая станция (рис. 2б) [8].

Блок чувствительных элементов сейсмической станции представлен трёхкомпонентным сейсмическим велосиметром, трехкомпонентным акселерометром MEMC, трехкомпонентным магнитным компасом и гидрофоном, а также сопутствующими блоками аналоговой и цифровой электроники. Трехкомпонентный велосиметр предназначен для регистрации линейных сейсмических колебаний земной поверхности по трем ортогональными осям, трехкомпонентные акселерометр и магнитный компас являются вспомогательным инструментом установления соответствия между осями чувствительности велосиметра и сторонами света, гидрофон служит для измерения подводных гидроакустических колебаний.

Функциями блока цифровой регистрации являются аналого-цифровое преобразование сигналов датчиков, синхронизация данных по времени и запись во внутреннюю память. Данная функциональность достигается за счет использования системы, состоящей из микроконтроллера, аналого-цифрового преобразователя, модуля GPS/GLONASS, кварцевого генератора и накопителя на основе флеш-памяти. Помимо этого, в систему входят модуль беспроводной связи Wi-Fi и набор дополнительных цифровых сенсоров - трехосные акселерометр и магнитометр, датчики давления, влажности и температуры. Суммарное потребление всех систем цифрового блока в режиме автономной регистрации не превышает 400 мВт, что позволяет достичь высокого времени автономности системы. Основные параметры станции приведены в табл. 1.

а



б

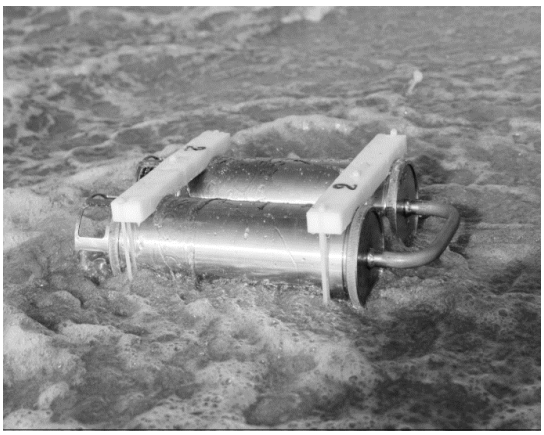


Рис. 2. а) Схема проведения измерений при использовании сухопутных сейсмометров. 1 – м/э датчик в специальном герметичном металлическом корпусе, 2 – бетонный груз (якорь), 3 – буй с регистратором RefTek и двумя аккумуляторами, 4 – трос, 5 – кабель, 6 – резиновый амортизатор; б) Внешний вид автономной донной сейсмической станции, включающей приёмник, регистратор и батареи.

Таблица 1. Основные технические характеристики донной сейсмической станции.

Общие параметры	
Количество компонент	4
Разрядность АЦП	24 или 32 бит
Период дискретизации	От 1 мс
Максимальная глубина погружения	500 м
Время автономной работы	От 30 дней
Масса	7 кг
Габариты	10,5 х 50 см
Параметры преобразователя	
Полоса частот	1 – 300 Гц
Динамический диапазон	126 дБ
Эффективный уровень шумов	0,2 – 2,0 мкВ

Результаты. На рис. 3 представлен геофизический разрез полученный по данным морских сейсмоакустических измерений непосредственно на грязевулканической постройке (см. рис. 1б) по прошествии нескольких месяцев после извержения. По оси абсции отложено расстояние вдоль профиля (рис. 1б) в км, по оси ординат отложена глубина в км, отсчитываемая от поверхности дна. Надо отметить что расстояние от дна до поверхности моря при этом достаточно сильно варьировалось в диапазоне от 0,5 м вблизи кратера вулкана до 3 м на удаленных точках. Цветом на рис. 3 отображается относительная интенсивность микросейсмических сигналов, которая характеризует упругие параметры изучаемой среды [1]. Так, повышенные значения интенсивности (тёмный цвет) указывают на области пространства в которых среда более “мягкая”, что свидетельствует о наличии трещин и пор, через которые легче проникает флюид. Из рис. 3 видно, что такая область, ассоциируемая с вулканической камерой, расположена на глубине порядка 3,5 км и имеет вытянутую в вертикальном направлении структуру. Согласно полученным оценкам объём камеры грязевого вулкана Голубицкий может превышать 30 млн. куб. м. что свидетельствует о том, что вулкан может продолжать свою активность в течении многих десятков лет.

На глубинах до двух километров прослеживается вулканический канал, по которому грязевулканический поток поднимался на поверхность, обращает на себя внимание что его толщина заметно уже камеры и канала, лежащего в основании, что приводит к его закупорке твердыми породами и необходимости достаточно продолжительного накопления давления глубинных флюидов для нового извержения.

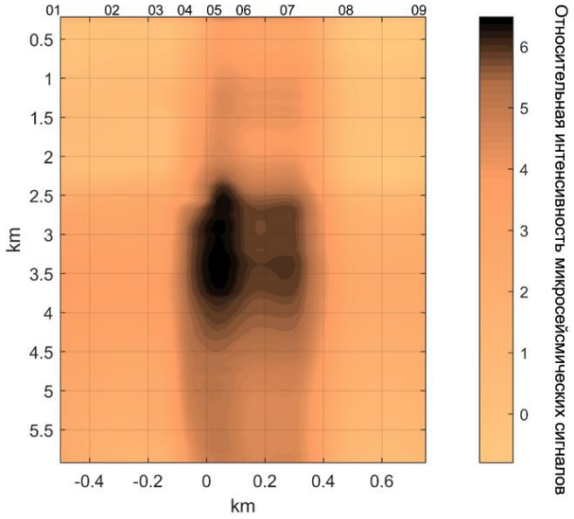


Рис. 3. Глубинное строение вулкана Голубицкий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

Литература

1. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66-84.
2. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. Т. 2, № 26. С. 11-19.
3. Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсюченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана Горы Карабетова // Доклады Академии наук. 2008. Т. 422, № 4. С. 542-546.
4. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л. Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 81, № 1. С. 72-75.
5. Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves // Physics of Wave Phenomena. V. 24, № 3. P. 249-254.
6. Agafonov V.M., Neeshpapa A.V., Shabalina A.S. Electrochemical Seismometers of Linear and Angular Motion. Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015.
7. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 1. С. 5-18.
8. Антонов А.Н., Авдюхина С.Ю., Егоров И.В., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Шабалина А.С. Широкополосная сейсмическая станция для сейсморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии- 2017». 2017. С. 64-67.

АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ИНФОРМАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Ю.А.Брага, канд.техн.наук, А.И.Машошин, д-р техн.наук
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

ALGORITHM OF SIMULTANEOUS SOLVING PROBLEMS OF DETECTION, CLASSIFICATION AND DETERMINATION OF COORDINATES AND MOTION PARAMETERS OF MARINE OBJECTS BY MEANS OF SONAR

Yu.A.Braga, Ph.D., A.I.Mashoshin, Dr.Sc.
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Предлагается алгоритм, обеспечивающий сокращение времени обнаружения морских объектов по данным гидроакустических средств путем совместного (на одном временном цикле) решения задач обнаружения, классификации и определение координат и параметров движения цели.

The presented algorithm gives the time reduction of marine objects detection using sonar data by means of simultaneous (on the common time interval) solving the problems of signal detection, target classification and determination of its coordinates and motion parameters.

Основным назначением гидроакустических средств, устанавливаемых на подводных лодках (ПЛ), является своевременное обнаружение морских объектов, представляющих угрозу для ПЛ. Обнаружение таких объектов состоит из трёх выполняемых последовательно этапов:

1) обнаружение цели;
2) классификация обнаруженной цели;
3) определение её координат (пеленга и дистанции) и параметров движения (курса и скорости).

Целью работы является сокращение времени реализации этапа обнаружения угрозы для ПЛ путем разработки алгоритма совместного (на одном временном цикле) решения всех трех задач – обнаружения, классификации, определения координат и параметров движения цели (КПДЦ).

Описание традиционной организации решения задачи. Рассмотрим временную диаграмму решения задачи обнаружения угрозы в режиме шумопеленгования (ШП), являющемся основным режимом работы гидроакустического комплекса ПЛ.

Временная диаграмма обнаружения угрозы в режиме ШП приведена на рис.1. Обнаружение угрозы состоит из нескольких этапов и начинается с завязки новой сигнальной траектории, т.е. с момента обнаружения сигнала, который не отнесен ни к одной из наблюдаемых сигнальных траекторий. На этапе 1 осуществляется построение сигнальной траектории с одновременной проверкой двух альтернативных статистических гипотез о происхождении сигнальной траектории – траектория обусловлена приемом сигналов локального шумящего объекта либо траектория сформирована из помеховых сигналов, случайно образовавших траекторию. Этап 1 длится от десятков секунд до единиц минут и завершается либо принятием решения об обнаружении новой цели (когда выполнен статистической критерий регулярности сигнальной траектории) либо сбросом траектории с сопровождения как помеховой (также в результате выполнения соответствующего статистического критерия) [1]. Принятие решения об обнаружении цели сопровождается определением ее пеленга.

С момента принятия решения об обнаружении цели начинается ее классификация, которая является содержанием этапа 2. На данном этапе осуществляется статистическая проверка нескольких альтернативных гипотез (по числу классов в заданном алфавите распознаваемых классов). Этап 2 завершается принятием решения о классе цели. Длительность данного этапа может варьироваться от десятков секунд до десятков минут в зависимости от класса цели, условий ее наблюдения, уровня автоматизации процесса классификации и опыта оператора.

Определение класса цели дает возможность командиру ПЛ принять решение об обнаружении угрозы для ПЛ и начать выработку плана противодействия этой угрозе. Однако, чтобы этот план был эффективным, кроме класса необходимо определить дистанцию, курс и скорость угрозы, т.е. КПДЦ.

Этап определения КПДЦ начинается с момента принятия решения о классе цели и завершается утверждением КПДЦ. В зависимости от используемых методов и заданной точности определения КПДЦ данный этап может длиться от единиц до нескольких десятков минут [2].

В результате выполнения трех описанных этапов формируется, так называемый, полный формуляр цели, включающий номер цели, ее класс и КПДЦ, который позволяет командиру ПЛ выработать эффективный план противодействия обнаруженной угрозе.

Рис.1. Временная диаграмма обнаружения угрозы в режиме ШП при традиционной организации решения задачи

При этом следует заметить, что с завершением третьего этапа решение задачи обнаружения угрозы не заканчивается. Если гидроакустический контакт с объектом не потерян, начинается 4-й этап обнаружения (точнее сопровождения) угрозы, на котором продолжается построение сигнальной траектории объекта с одновременным уточнением его класса и КПДЦ. Данный этап не менее важен, чем предыдущие 3 этапа, поскольку, ввиду того, что все описанные задачи (обнаружение цели, классификация, определение КПДЦ) решаются статистически, не исключены ошибки в принятых решениях, в частности вынесение ошибочного решения о классе цели. 4-й этап имеет целью, если не исключить эти ошибки, то свести их к минимуму. 4-й этап продолжается с момента завершения 3-го этапа и до потери контакта с объектом.

Идея предлагаемого алгоритма. Из рассмотрения традиционной организации решения задачи обнаружения угрозы для ПЛ следует, что получение необходимых данных на этапах 1-3 для выработки и принятия командиром эффективного плана противодействия обнаруженной угрозе может занять весьма продолжительное время. Поэтому нужно искать пути его сокращения.

Проведенный анализ показал, что наиболее эффективными путями сокращения времени обнаружения угрозы для ПЛ являются:

– совместное решение всех трех задач (обнаружения, классификации, определения КПДЦ) на одном временном интервале, начинающемся с момента завязки новой сигнальной траектории [3];

– применение современных высокоавтоматизированных методов решения этих задач, обеспечивающих получение результата за более короткое время [4-8].

Идея совместного решения трех задач состоит в следующем. С момента завязки новой сигнальной траектории начинается статистическая проверка не двух гипотез (цель – помеха), а $M+1$ гипотезы (M – количество классов в заданном алфавите распознаваемых классов целей), т.е. проверяются гипотезы о принадлежности траектории к каждому из M классов заданного алфавита классов, а также к классу "помеха". Проверка гипотез осуществляется циклически при поступлении на вход алгоритма любой новой информации и состоит в вычислении апостериорных вероятностей принадлежности траектории каждому из классов заданного алфавита и сравнении вычисленных вероятностей с заданным порогом. Если хотя бы одной из вычисленных апостериорных вероятностей заданный порог превышен, принимается решение в пользу соответствующей гипотезы. В противном случае процесс проверки гипотез продолжается. Следует сразу заметить, что процесс проверки гипотез продолжается и в случае вынесения решения о принадлежности траектории одному из классов заданного алфавита. Только в этом случае он приобретает статус уточнения решения.

Если сигнальная траектория прервется до принятия решения в пользу одной из гипотез, она принимается за траекторию, состоящую из помех (помеховую траекторию) и ее обработка прекращается. Для проверки M+1 гипотезы, кроме параметров сигналов, используемых на 1-м

этапе при традиционной организации решения задачи обнаружения угрозы для проверки двух гипотез (цель – помеха), используются также параметры сигнала, применяемые на 2-м этапе при традиционной организации для классификации обнаруженной цели, а также на 3-ем этапе при решении задачи определения КПДЦ. Для принятия решения о классе цели применяются автоматические адаптивные алгоритмы, учитывающие текущие гидроакустические и помехосигнальные условия, а также взаимную статистическую зависимость используемых параметров сигнала (классификационных признаков – КП) [4].

Также с момента завязки новой траектории начинается решение задачи определения КПДЦ. Поскольку для эффективного определения КПДЦ должен быть известен класс цели [8], задача решается одновременно для каждой из М гипотез. Задача определения КПДЦ органично встраивается в схему совместного решения трех задач, поскольку было установлено [6], что для определения КПДЦ используются те же параметры, что и для классификации цели.

Описанная идея совместного решения трех задач реализуется с момента завязки новой траектории до ее прерывания по любой из причин. При этом процесс анализа траектории на отдельные этапы не делится. После вынесения первого решения относительно каждого из искомых параметров, на последующих циклах обработки начинается его уточнение (рис.2).

Рис.2. Временная диаграмма обнаружения угрозы в режиме ШП
с использованием предлагаемого алгоритма

Синтез предлагаемого алгоритма. Рассмотрим формализованную постановку задачи. Пусть заданы:

– алфавит $\mathbf{\Omega}$ из M классов морских объектов C_j, подлежащих обнаружению:

$$\mathbf{\Omega} = \{C_1, C_2, ..., C_M\} \quad (1)$$

– вектор $\mathbf{X}$, содержащий K параметров сигнала, циклически измеряемых на выходе приемного тракта и используемых для решения задач обнаружения, классификации и определения координат и параметров движения морского объекта:

$$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, ..., X_K\} \quad (2)$$

Вектор $\mathbf{X}$ включает:

– углы прихода сигнала в горизонтальной и вертикальной плоскостях, несущие информацию о координатах источника;

– параметры сплошной и дискретной частей спектра несущей сигнала, несущие информацию об особенностях источника шумоизлучения;

– параметры дискретной части корреляционной функции сигнала, обусловленные многолучевым распространением сигнала [9], несущие информацию о координатах источника;

– параметры дискретной части спектра амплитудной огибающей сигнала, обусловленные модуляцией сигнала за счет вращения гребного винта в кавитационном режиме и качки морского объекта на волнении [10];

– динамику перечисленных параметров во времени, несущих информацию об особенностях перемещения источника шумоизлучения в пространстве.

Требуется синтезировать циклически функционирующий алгоритм, обеспечивающий определение на каждом цикле класса C, пеленга P, курса K, скорости V и дистанции R цели, причем наилучшим образом с точки зрения выбранного статистического критерия качества.

В работе [4] показано, что алгоритмы классификации и определения КПДЦ по информации, содержащейся в гидроакустических сигналах, целесообразно синтезировать по критерию максимального правдоподобия с использованием методики, приведенной в этой работе.

Согласно этой методике решение, выносимое на текущем цикле принятия решения (первый цикл соответствует моменту времени завязки обрабатываемой траектории), должно иметь вид:

$$S = \begin{cases} \left(\hat{C}^{(opt)}, \hat{P}^{(opt)}, \hat{K}^{(opt)}, \hat{V}^{(opt)}, \hat{R}^{(opt)}\right), \text{ если } P_{apost}\left(C^{(opt)}\right) > P_{por} \\ \text{отказ, если } P_{apost}\left(C^{(opt)}\right) \le P_{por} \end{cases} \quad (3)$$

где $C^{(opt)}$ – класс объекта, для которого:

$$G^{(opt)} = \max_{m} G^{(m)} \quad (4)$$

$G^{(m)}$ – максимальное значение функции правдоподобия (ФП) для m-го класса в пространстве P,K,V,R:

$$G^{(m)} = \max_{P,K,V,R} g_{\hat{\mathbf{X}}/C^{(m)},P,K,V,R}\left(\hat{\mathbf{X}}//C^{(m)},P,K,V,R\right) \quad (5)$$

$g_{\hat{\mathbf{X}}/C^{(m)},P,K,V,R}\left(\hat{\mathbf{X}}//C^{(m)},P,K,V,R\right)$ – ФП для m-го класса, получаемая из совместной условной (в зависимости от параметров P,K,V,R) плотности распределения вероятностей (ПРВ) оценки вектора $\mathbf{X}$ $g_{\hat{\mathbf{X}}/C^{(m)},P,K,V,R}\left(\mathbf{x}//C^{(m)},P,K,V,R\right)$ путем подстановки в неё вместо неслучайного векторного аргумента $\mathbf{x}$ оценки вектора $\hat{\mathbf{X}}$; $\hat{P}^{(opt)},\hat{K}^{(opt)},\hat{V}^{(opt)},\hat{R}^{(opt)}$ – координаты максимума ФП для класса $C^{(opt)}$ в пространстве P,K,V,R; $P_{apost}\left(C^{(opt)}\right)$ – апостериорная вероятность принадлежности объекта классу $C^{(opt)}$, вычисляемая по формуле:

$$P_{apost}\left(C^{(opt)}\right) = G^{(opt)} \Big/ \sum_{m=1}^{M} G^{(m)} \quad (6)$$

P_{por} – заданное пороговое значение апостериорной вероятности $P_{apost}\left(C^{(opt)}\right)$ для принятия решения об обнаружении цели.

Поясним смысл формул (3)–(6). Алгоритм принятия решения функционирует циклически. Первый цикл соответствует моменту времени завязки траектории. Каждый новый цикл принятия решения осуществляется при поступлении на вход алгоритма нового замера вектора $\mathbf{X}$ (точнее нового замера хотя бы одного параметра, входящего в вектор $\mathbf{X}$). На каждом цикле принятия решения сначала для каждого m-го распознаваемого класса объектов вычисляется ФП $g_{\hat{\mathbf{X}}/C^{(m)},P,K,V,R}\left(\hat{\mathbf{X}}//C^{(m)},P,K,V,R\right)$ и по формуле (5) определяется её максимум в пространстве параметров P,K,V,R. Величина этого максимума $G^{(m)}$ и его координаты $P^{(m)},K^{(m)},V^{(m)},R^{(m)}$ запоминаются. Затем из всех M распознаваемых классов выбирается класс $C^{(opt)}$, которому соответствует максимальная величина $G^{(m)}$ (формула (4)). Далее по формуле (6) вычисляется апостериорная вероятность принадлежности объекта классу $C^{(opt)}$. Если вычисленная апостериорная вероятность превышает заданное пороговое значение P_{por}, принимается решение об обнаружении цели класса $C^{(opt)}$ и формируется формуляр этой цели, включающий соответствующие этому классу параметры $\hat{P}^{(opt)},\hat{K}^{(opt)},\hat{V}^{(opt)},\hat{R}^{(opt)}$ (формула (3)). В противном случае выносится отказ от принятия решения на текущем цикле.

Алгоритм функционирует циклически с момента завязки траектории до её завершения. После завершения траектории последний формуляр цели, соответствующей данной траектории, записывается в архив для идентификации этой цели с вновь обнаруженными целями [7]. Если же траектория завершилась до момента вынесения хотя бы одного решения об обнаружении цели, траектория считается помеховой и соответствующий ей формуляр цели (ввиду его отсутствия) в архив не записывается.

Заключение. Предложен алгоритм, позволяющий сократить в среднем на 30% (по результатам моделирования) время обнаружения угрозы путем совместного решения задач обнаружения, классификации, определение координат и параметров движения цели.

Литература

1. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974.
2. Справочник вахтенного офицера. – М.: Воениздат, 1975. – 455 с.
3. Брага Ю.А., Машошин А.И. Особенности решения задачи определения координат и параметров движения целей в интегрированной системе боевого управления подводной лодки. - Труды Всероссийской конференции "Интегрированные многофункциональные системы управления для ВМФ. Направления совершенствования, новые технологии", ОАО "Концерн "Моринформсистема-Агат", 24-25 ноября 2010г., с.80.
4. Машошин А.И. Особенности синтеза алгоритмов классификации морских объектов по их гидроакустическому полю. – Морская радиоэлектроника, 2009, №2 (28), с.8-12.
5. Машошин А.И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до цели. – Морская радиоэлектроника, 2012, № 2 (40), с. 30-34.
6. Машошин А.И. Об одном подходе к совместному решению задач классификации и определения координат подводных объектов по их гидроакустическому полю.- Акустический журнал, 1999, том 45, № 1, с.124-127.
7. Машошин А.И., Силина Т.А. Алгоритм функционирования системы комплексной обработки информации гидроакустического комплекса подводной лодки. – Гидроакустика, 2011, вып.13(1), с.97-108.
8. Гриненков А.В., Машошин А.И., Савватеев К. Алгоритм автоматического определения координат и параметров движения целей без специального маневрирования наблюдателя. – Морская радиоэлектроника, 2014, №4 (50), с.50-57.
9. Машошин А.И. Помехоустойчивость выделения максимумов в корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением сигнала в водной среде. - Акустический журнал, 2001, том 47, № 6, с. 823-829.
10. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шумоизлучения гражданских судов - Акустический журнал, 2003, том 49, № 2, с. 224-228.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ШУМЯЩЕЙ ЦЕЛИ

А.В.Гриненков, А.И.Машошин, д-р техн.наук
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

ALGORITHM FOR NOISY TARGET MOTION ANALYSIS

A.V.Grinenkov, A.I.Mashoshin, Dr.Sc.
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

В докладе излагается постановка задачи и результаты синтеза алгоритма определения координат и параметров движения шумящей морской цели, наблюдаемой пассивным средством гидроакустического наблюдения, размещенном на подвижном носителе. Алгоритм основан на использовании угломерно-энергетического метода и учете модели цели, используемой для ее классификации. Особенностью алгоритма является то, что определение координат и параметров движения цели осуществляется без участия оператора и не требует специального маневрирования носителя.

The aim of this report is to definite the problem and present results of synthesis of target motion analysis algorithm for noisy target observed by passive sonar, installed on the mobile carrier. The algorithm is based on the use of power-bearing method and accounting the target model used for its classification. The peculiarity of the algorithm is that determination of coordinates and target motion parameters is carried out without participation of the operator and doesn't require special maneuvering of the carrier.

Для успешного решения различных навигационных и тактических задач на подводной лодке (ПЛ) необходима информация о координатах (пеленг, дистанция) и параметрах движения (курс, скорость), а также классе окружающих ее объектов [1,2].

Поскольку главным тактическим преимуществом ПЛ является ее скрытность, то наибольший практический интерес представляет определение координат и параметров движения цели (КПДЦ) по данным режима шумопеленгования гидроакустического комплекса (ГАК) ПЛ.

Все известные методы пассивного определения КПДЦ базируются на обработке массива пеленгов цели. Их можно условно разбить на 2 группы:

- автоматические методы;
- автоматизированные методы.

Наиболее известным автоматическим методом является так называемый метод "N пеленгов" [3]. Достоинство автоматических методов отражено в их названии, они не требуют участия оператора и функционируют в фоновом режиме. Их недостатком является длительное (несколько десятков минут) время решения задачи и необходимость специального маневрирования ПЛ.

Примером автоматизированного метода определения КПДЦ является метод "подбор" [4], заключающийся в подборе оператором с учетом предположения о классе цели наиболее вероятных значений отдельных компонентов КПДЦ (чаще всего, скорости цели), которые бы минимизировали разность измеренного пеленга и рассчитанного на тот же момент времени с использованием подобранных КПДЦ. Достоинство автоматизированных методов заключается в относительно малом времени решения задачи без специального маневрирования ПЛ-носителя, а недостатком – низкая точность определения КПДЦ и высокая степень загрузки оператора, особенно в условиях интенсивного судоходства.

Идея предлагаемого в докладе алгоритма состоит в привлечении для определения КПДЦ, кроме массива пеленгов, связанные с КПДЦ параметры модели цели, используемой при решении задачи классификации. К этим параметрам относятся:

- зависящее от класса цели вероятностное распределение её скорости;
- дистанция до цели, определенная одним либо несколькими физическими методами (например по уровню шума цели на входе приемной антенны) с учетом класса цели.

Целью доклада является представление результатов синтеза алгоритма, реализующего вышеописанную идею.

Постановка задачи. Пусть есть ПЛ-носитель, на котором размещен ГАК. Ограничения на движение носителя не накладываются, однако курс и скорость ПЛ-носителя в каждый момент времени должны быть известны.

Пусть в зоне действия режима шумопеленгования ГАК находится шумящая цель. Далее будем рассматривать движение ПЛ-носителя и цели в некоторой местной декартовой неподвижной системе координат с центом, совпадающим с положением ПЛ-носителя в момент начала определения КПДЦ и осью ординат, ориентированной на север.

Цель движется прямолинейными галсами с постоянной скоростью на каждом галсе. Моменты смены галсов не известны. Модель движения цели на одном галсе можно описать следующими формулами:

$$K_t = K_0,\ \ V_t = V_0,\ \ R_t = \sqrt{(R_0 \sin\varphi_0 + t \cdot V_0 \sin K_0 - x_t^{и})^2 - (R_0 \cos\varphi_0 + t \cdot V_0 \cos K_0 - y_t^{и})^2} \quad (1)$$

где K_t, V_t и R_t – соответственно курс, скорость и дистанция до цели в *t*-й момент времени; R_0 и φ_0 – дистанция до цели и пеленг цели на момент начала галса; $x_t^{и}$, $y_t^{и}$ – координаты ПЛ-носителя в *t*-й момент времени; $\mathbf{x}_0 = \left(R_0, K_0, V_0\right)^T$ – вектор, содержащий дистанцию, курс и скорость цели на момент начала галса.

Входными данными алгоритма определения КПДЦ в *t*-й момент времени являются:

а) массивы измеренных пеленгов $\tilde{\varphi}_t$ и уровней сигнала $\tilde{u}_t$ цели;

б) оценка класса цели $\tilde{c}_t$ и параметры модели цели этого класса, а именно:

– условная плотность распределения скорости цели $f_{V|c}$ класса *c*, полученная путем аппроксимации экспериментально построенных гистограмм скоростей морских объектов разных классов в данном районе океана.

– эмпирическая зависимость от скорости приведенной шумности цели $P_0\left(V_0, c\right)$ класса *c*;

– передаточная функция канала распространения сигнала цели $K_з(R_t)$, которая рассчитывается системой гидроакустических расчетов (СГАР), входящей в состав ГАК.

Далее будет использоваться вектор $\mathbf{F} = \left(R, V\right)^T$ для обозначения совокупности классификационные признаков цели класса *c*.

в) Признак маневра цели – $I_м$ (0 – нет маневра, 1 – есть маневр), оцениваемый в ходе траекторного анализа сигналов цели по методам, изложенным, например, в [5].

Модель измерений задается следующим уравнением:

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{s}(\mathbf{x}_0, c) + \mathbf{\Delta y}_t \quad (2)$$

где $\mathbf{y}_t = \left(\tilde{\varphi}_t, \tilde{u}_t\right)^T$ – вектор измерений в *t*-ый момент времени; $\mathbf{\Delta y}_t$ – вектор погрешностей измерений в *t*-ый момент времени;

$\mathbf{s}(\mathbf{x}_0, c) = \begin{pmatrix} atrctg\left(\dfrac{R_0 \sin\varphi_0 + t \cdot V_0 \sin K_0 - x_t^{и}}{R_0 \cos\varphi_0 + t \cdot V_0 \cos K_0 - y_t^{и}}\right) \\ P_0\left(V_0, c\right) + K_з(R_t) \end{pmatrix}$ – функция, связывающая вектор $\mathbf{x}_t$ с вектором измерений.

Погрешности измерений представляют собой центрированные случайные гауссовские процессы с нормальной плотностью распределения:

$$f_{\mathbf{\Delta y}}(\mathbf{\Delta}_t) = \mathrm{N}\left(\mathbf{\Delta}_t; 0, \mathbf{K}_{\mathbf{\Delta y}}\right) \quad (3)$$

где $f_{\mathbf{\Delta y}}(\mathbf{\Delta}_t)$ – плотность распределения погрешностей измерений, причем $M\left\{\mathbf{\Delta y}_t \mathbf{\Delta y}_t^T\right\} = \delta_t$; ($\delta_t$ – дельта-функция), т.е. $\mathbf{\Delta y}$ – некоррелированный случайный процесс; $\mathbf{K}_{\mathbf{\Delta y}} = \begin{pmatrix} \sigma_{\tilde{\varphi}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\tilde{u}}^2 \end{pmatrix}$ – ковариационная матрица вектора погрешностей измерений $\mathbf{\Delta y}_t$; $\sigma_{\tilde{\varphi}}$ – среднеквадратическая погрешность (СКП) измерения пеленга цели; $\sigma_{\tilde{u}}$ – СКП измерения уровня сигнала цели, пересчитанного ко входу антенны.

Требуется синтезировать оптимальный (по критерию максимального правдоподобия) алгоритм определения КПДЦ, вырабатывающий в *t*-й момент времени оценки координат цели: $\hat{\varphi}_t$ $\hat{R}_t$ и параметров ее движения $\hat{K}_t, \hat{V}_t$, а также их СКП: $\sigma_\varphi, \sigma_R, \sigma_K, \sigma_V$.

Результаты синтеза алгоритма. Поскольку на галсе цель движется прямолинейно и равномерно, для определения КПДЦ в любой момент времени достаточно определить вектор $\mathbf{x}_0$.

Для оценивания $\mathbf{x}_0$ с учетом описанных выше входных данных воспользуемся методом максимального правдоподобия [6].

С учетом наличия дополнительной информации о классификационных признаках цели класса c применим подход, изложенный в [7], в соответствии с которым функцию правдоподобия применительно к рассматриваемой задаче можно представить в виде:

$$f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F} \mid \mathbf{x}_0, c) = f(\mathbf{F} \mid c) f(\mathbf{Y}_t \mid \mathbf{x}_0, c) = f_{R|c}(r \mid c) f_{V|c}(v \mid c) f(\mathbf{Y}_t \mid \mathbf{x}_0, c) \quad (4)$$

Плотность распределения $f_{\mathbf{Y}_t|\mathbf{x}_0,c}(\mathbf{Y}_t \mid \mathbf{x}_0, c)$, принимая во внимание некоррелированность ошибок измерений, можно уточнить следующим образом:

$$f(\mathbf{Y}_t \mid \mathbf{x}_0, c) = f_{\mathbf{y}_t|\mathbf{x}_0,c}(\mathbf{y}_t \mid \mathbf{x}_0, c) \cdot f_{\mathbf{y}_t|\mathbf{x}_0,c}(\mathbf{y}_{t-1} \mid \mathbf{x}_0, c) \cdot \ldots \cdot f_{\mathbf{y}_t|\mathbf{x}_0,c}(\mathbf{y}_1 \mid \mathbf{x}_0, c) = \prod_{i=1}^{t} f_{\Delta\mathbf{y}}(\mathbf{y}_i - s_i(\mathbf{x}_0, c)) \quad (5)$$

Воспользуемся методом сеток для аппроксимации (дискретизации) плотности распределения $f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F} \mid \mathbf{x}_0, c)$:

$$f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F} \mid \mathbf{x}_0, c) \approx \sum_{j=1}^{N} \frac{\mu_j}{C_\mu} \delta(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^j) \quad (6)$$

где $C_\mu = \sum_{j=1}^{N} \mu_j$ – нормирующий множитель; $\mathbf{x}_0^j$ – j-ое значение оцениваемого вектора из известного набора узлов сетки $\mathbf{x}_0^1 \ldots \mathbf{x}_0^N$; N – число узлов сетки; μ_j вычисляется по формуле:

$$\mu_j = f_{R|c}(r(\mathbf{x}_0^j) \mid c)\ f_{V|c}(v(\mathbf{x}_0^j) \mid c) \prod_{i=1}^{t} f_{\Delta\mathbf{y}}(\mathbf{y}_i - s_i(\mathbf{x}_0^j, c)), \quad (7)$$

где $r(\mathbf{x}_0^j)$ и $v(\mathbf{x}_0^j)$ – функции выделения из известного вектора $\mathbf{x}_0^j$ дистанции и скорости соответственно; $f_{\Delta\mathbf{y}}(\mathbf{y}_i - s_i(\mathbf{x}_0^j, c)) = \mathrm{N}\left(\mathbf{y}_i - s_i(\mathbf{x}_0^j, c); 0, \mathbf{K}_{\Delta\mathbf{y}}\right)$.

С учетом (6) и (7) формулу (5) можно представить в следующем виде:

$$f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F} \mid \mathbf{x}_0, c) \approx \frac{1}{C_\mu} \sum_{j=1}^{N} f_{R|c}(r(\mathbf{x}_0^j) \mid c)\, f_{V|c}(v(\mathbf{x}_0^j) \mid c) \prod_{i=1}^{t} \mathrm{N}\left(\mathbf{y}_i - s_i(\mathbf{x}_0^j, c); 0, \mathbf{K}_{\Delta\mathbf{y}}\right) \quad (8)$$

С учетом вышеизложенного оценка $\hat{\mathbf{x}}_0$ при условии, что $c = \tilde{c}_t$, может быть найдена с помощью следующей функции:

$$\hat{\mathbf{x}}_0(c = \tilde{c}_t) = \arg\max_{\mathbf{x}_0} \{f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F} \mid \mathbf{x}_0, c = \tilde{c}_t)\} = \arg\max_{\mathbf{x}_0} \left\{ \sum_{j=1}^{N} f_{R|c}(r(\mathbf{x}_0^j) \mid \tilde{c}_t) f_{V|c}(v(\mathbf{x}_0^j) \mid \tilde{c}_t) \prod_{i=1}^{t} \mathrm{N}\left(\mathbf{y}_i - s_i(\mathbf{x}_0^j, c); 0, \mathbf{K}_{\Delta\mathbf{y}}\right) \right\} \quad (9)$$

С точки зрения практической реализации вышеописанного метода при заданном классе цели $c = \tilde{c}_t$ поиск $\hat{\mathbf{x}}_0(c = \tilde{c}_t)$ фактически будет сводиться к поиску узла сетки из заданного множества $\mathbf{x}_0^1 \ldots \mathbf{x}_0^N$, который бы позволил получить максимальное значение функционала в правой части формулы (10).

Оценка ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\mathbf{x}}$ вектора $\hat{\mathbf{x}}_0(c = \tilde{c}_t)$ вычисляется по формуле:

$$\hat{\mathbf{K}}_{\mathbf{x}} = \frac{1}{C_\mu} \sum_{j=1}^{N} \left(\hat{\mathbf{x}}_0(\tilde{c}_t) - \mathbf{x}_0^j\right)\left(\hat{\mathbf{x}}_0(\tilde{c}_t) - \mathbf{x}_0^j\right)^T f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F} \mid \mathbf{x}_0, c = \tilde{c}_t) \quad (10)$$

Вектор искомых КПДЦ связан с вектором $\hat{\mathbf{x}}_0$ нелинейным преобразованием:

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \left(\hat{R}_t, \hat{K}_t, \hat{V}_t\right)^T = g(\hat{\mathbf{x}}_0) = \begin{pmatrix} \sqrt{(R_0 \sin\varphi_0 + t \cdot V_0 \sin K_0 - x_t^{\text{и}})^2 - (R_0 \cos\varphi_0 + t \cdot V_0 \cos K_0 - y_t^{\text{и}})^2} \\ K_0 \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Ковариационная матрица $\hat{\mathbf{K}}$ вектора $\hat{\mathbf{x}}_t$ вычисляется по приближенной формуле:

$$\hat{\mathbf{K}} \approx \frac{\partial g(\hat{\mathbf{x}}_0)}{\hat{\mathbf{x}}_0} \hat{\mathbf{K}}_{\mathbf{x}} \left(\frac{\partial g(\hat{\mathbf{x}}_0)}{\hat{\mathbf{x}}_0} \right)^T \quad (12)$$

Среднеквадратические погрешности будут вычисляться по формулам:

$$\sigma_R = \sqrt{\hat{\mathbf{K}}(1,1)},\ \sigma_K = \sqrt{\hat{\mathbf{K}}(2,2)},\ \sigma_V = \sqrt{\hat{\mathbf{K}}(3,3)}, \quad (13)$$

где $\hat{\mathbf{K}}(1,1), \hat{\mathbf{K}}(2,2), \hat{\mathbf{K}}(3,3)$ – диагональные элементы ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{K}}$.

В случае выявления факта маневра цели ($I_м = 1$) определение КПДЦ приостанавливается до завершения маневра ($I_м = 0$).

Как только цель ложится на новый галс, начинается новый цикл вычисления КПДЦ. Локальная система координат перемещается на текущее положение ПЛ-носителя. КПДЦ рассчитываются по вышеописанному алгоритму с той лишь разницей, что теперь учитываются результаты определения дистанции до цели, полученные на предыдущем галсе, что выражается в виде функции правдоподобия:

$$f(\mathbf{Y}_t, \mathbf{F}, \mathrm{R}_э \mid \mathbf{x}_0, c) = f_{R|c}(r \mid c)\, f_{V|c}(v \mid c)\, \mathrm{N}(\mathrm{r}(\mathbf{x}_0); \mathrm{R}_э, \sigma_{Rэ})\, f(\mathbf{Y}_t \mid \mathbf{x}_0, c), \qquad (14)$$

где $\mathrm{R}_э$, $\sigma_{Rэ}$ – экстраполированная оценка дистанции до цели и ее СКП на момент начала нового галса. Методы расчета $\mathrm{R}_э$, $\sigma_{Rэ}$ на основе $\hat{R}_t$ и σ_R предыдущего галса изложены в [5].

Выводы. В докладе предложен метод определения КПДЦ, основанный на использовании как массива пеленгов, так и информации, которая применяется для классификации целей. Благодаря такому подходу при определении КПДЦ не требуется участие оператора и не вводятся ограничения на движение цели и ПЛ-носителя (т.е. метод не требует специального маневрирования носителя).

Литература

1. Хвощ В.А. Тактика подводных лодок. – М.: Воениздат, 1989. – 264 с.
2. Машошин А.И. Создание интегрированных систем боевого управления – путь повышения устойчивости и эффективности подводных лодок. – Морская радиоэлектроника, 2013, №1, с.16-20.
3. Беляев Б. Л., Кузьменко Ю. А., Панкратьев В. В., Степанов Д. В. Об ожидаемом качестве оценок определения координат и параметров движения цели методом «N-пеленгов» при выбранном варианте собственного маневрирования / Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов» – М.: 2011, с. 97-101.
4. Кузьменко Ю.А. Реализация планшетных методов определения координат и параметров движения цели в автоматизированных информационно-управляющих системах неатомных подводных лодок. – Сборник докладов научно-технической конференции "Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов", "ОАО "Концерн "Моринсис-Агат", Москва, 2014, 2-3 апреля, с.259-263.
5. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010. 509 с.
6. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993.
7. Gordon N., Maskell S., and Kirubarajan T., “Efficient particle filters for joint tracking and classification,” in Proc. SPIE Signal and Data Processing of Small Targets, vol.4728, Orlando, USA, April 1–5 2002.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ В ПОЛЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ПОМЕХ

Г.С.Малышкин, д-р техн.наук, П.А.Косолапов
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

NOISE IMMUNITY OF ADAPTIVE ALGORITHMS IN THE FIELD OF DISTRIBUTED INTERFERENCE

G.S.Malyshkin, Dr.Sc., P.A.Kosolapov
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Проведены модельные исследования неадаптивных и различных вариантов классических и быстрых проекционных алгоритмов в поле некоррелированных распределённых помех в режиме шумопеленгования. Рассматривается помеховая ситуация, состоящая из трёх источников, один сильный и два слабых, при этом один из слабых источников расположен по углу вблизи сильного и его необходимо разрешить с сильным источником. Второй источник разрешён с сильным сигналом, но необходимо определить изменение отношения сигнал помеха в зависимости от вида адаптивного алгоритма, используемого для разрешения первого слабого источника. По результатам модельных исследований определяется, с одной стороны возможности разрешения первого слабого источника различными вариантами алгоритмов, а с другой стороны определяются, возникающие при этом потери отношения сигнал/помеха при обнаружении второго, разрешённого сигнала.

Model studies of nonadaptive and various variants of classical and fast projection algorithms in the field of uncorrelated distributed noise in the mode of noise tracking have been carried out. An interference situation consisting of three sources, one strong and two weak, is considered, with one of the weak sources located along the angle near the strong one and it must be resolved with a strong source. The second source is resolved with a strong signal, but it is necessary to determine the change in the signal-to-noise ratio depending on the type of adaptive algorithm used to resolve the first weak source. Based on the results of model studies, it is determined, on the one hand, possibilities of resolving the first weak source by different variants of algorithms, and on the other hand, the resulting loss of signal-to-noise ratio is detected when a second, resolved signal is detected.

Проведём модельное исследование помехоустойчивости адаптивных алгоритмов в поле распределённых помех, некоррелированных в элементах антенны. Сформируем несложную помеховую ситуацию, состоящую из трёх источников - один сильный источник с уровнем $S_1 = 0.1$ и два слабых источника с уровнями $S_2 = S_3 = 0.00025$, один из которых находится в окрестности сильного источника и другой слабый источник, разрешённый с сильным источником. Схема размещения источников и их относительная интенсивность иллюстрируются рис. 1, где по оси абсцисс представлен синус направления наблюдения, а по оси ординат уровень сигнала на элементах антенны в децибелах ($10\log_{10} S_i$) для трёх рассматриваемых далее источников.

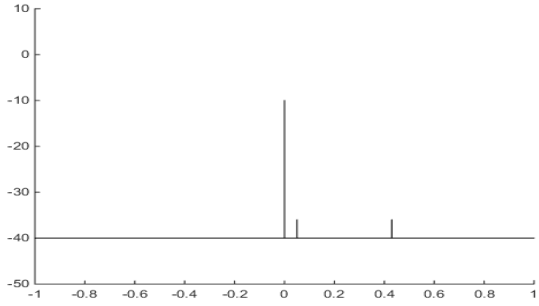


Рис. 1. Схема размещения и параметры помеховой ситуации.
$S_1 = 0.1;\ S_2 = S_3 = 0.00025;\ Sin\alpha_1 = 0; Sin\alpha_2 = 0.05; Sin\alpha_3 = 0.43.$

Параметры рассеянного поля интенсивного первого сигнала: коэффициент когерентности g_1=0.85, выборка состоит из $n_\Sigma = 2257$ спектральных отсчётов, со средней относительной частотой *F*=0,8546 (общий диапазон частот от 0.632 до 1 от проектной частоты) используется линейная антенна с *L*=96 элементами при относительной полосе одного спектрального отсчёта $dF = 0,000163$. Задача заключается в том, чтобы с помощью адаптивных алгоритмов обнаружить второй источник, разрешив его с первым источником, при этом оценить отношение сигнал/помеха третьего источника, выделяемого этими алгоритмами. В качестве распределённой помехи использовались некоррелированные по элементам антенны комплексные спектральные отсчёты с СКО на каждом элементе, равном единице.

При моделировании использовались как классические (Кейпон, Capon OPT, B-Lagunas OPT [2]), которые включают в адаптивный процесс весь спектр корреляционной матрицы, так и алгоритмы с исходной матрицей (алгоритм Бартлета, вариант 1) и несколько вариантов быстрых проекционных алгоритмов, оптимизированные матрицы которых представлены кривыми 2, 3, 4, а также ортогональный проектор (пятый вариант), где все собственные числа равны единице.

Иллюстрация собственных чисел корреляционных матриц и их модификаций при обработке быстрыми проекционными алгоритмами представлены на рис. 2.

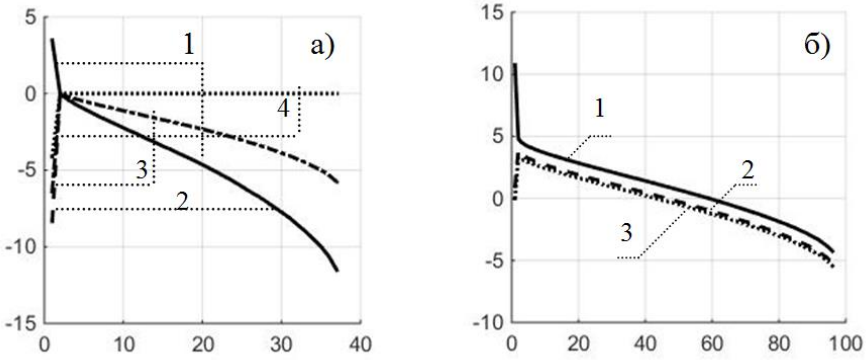


Рис. 2. Модификация собственных чисел при адаптивной обработке.

Кривая 1 характеризует исходные собственные числа корреляционной матрицы без коррекции, на базе которой определяются выходные сигналы неадаптивного алгоритма Бартлета. Кривые 2, 3 и 4 соответствуют различным вариантам коррекции собственных чисел, при этом варианты 2, 3 и 4 соответствуют кривым на рисунке 2а). Поскольку в рассматриваемой помеховой ситуации присутствует один интенсивный мешающий сигнал, в корреляционной матрице корректируется (уменьшается) только первое собственное число. Примеры иллюстрации выходных сигналов для вариантов неадаптивных и адаптивных алгоритмов приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 представлен пеленгационный рельеф полученный алгоритмом, в котором все собственные числа, включая и первое равны единице, но слабый сигнал не разрешен в силу его маскировки отметкой сильного мешающего сигнала, так как отсутствует отметка слабого сигнала.

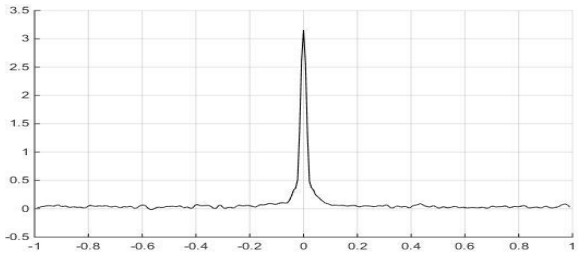


Рис. 3. Частичное подавление мешающего источника.

Однако основная задача обработки - разрешение ближнего слабого источника, не достигнута в этом варианте частичной оптимизации.

На рис. 4 представлены два варианта обработки, при которых оба слабых сигнала проявляются наличием отдельных максимумов в пеленгационном рельефе. В этом случае задача, стоящая перед алгоритмом заключается в том, чтобы разрешить второй сигнал и не ухудшить отношение сигнал/помеха для другого, разрешённого слабого сигнала.

На рис. 4 представлены сигналы быстрого и классического оптимизированного алгоритма в которых обеспечивается, как разрешение близкого, так и обнаружение слабого сигнала. Как видно из рисунка 4а), быстрый проекционный алгоритм №2 обеспечивает надёжное разрешение ближнего и хорошо наблюдаемую отметку второго слабого сигнала в направлении где $Sin\alpha_3 = 0.43$ и несколько хуже это делает алгоритм B_LagunasOPT на рис. 4б).

В таблице произведено обобщение данных рассматриваемых алгоритмов по оценке ОСПи и разрешению ближнего источника. Для каждого алгоритма определяется факт разрешения - наличия отдельного максимума знаком + и отсутствие такого максимума знаком –. Помимо

оценки ОСПи в таблице приводится оценка ухудшения уровня ОСПи для сигнала, находящегося вне зоны воздействия мешающего сигнала (потери) в дБ по сравнению с алгоритмом Бартлета, который обеспечивает самое высокое значение этого параметра (распределение собственных чисел соответствует кривым 1 на рис. 2).

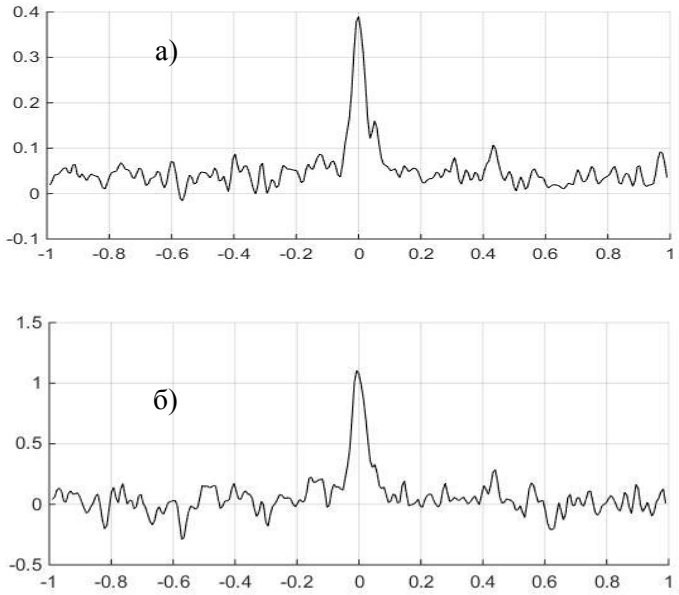


Рис. 4. Пеленгационные рельефы с разрешением ближнего слабого сигнала.
а) быстрый проекционный алгоритм (вариант 2); б) классический B-LagunasOPT.

Таблица 1. Сводная таблица оценки ОСПи и разрешения слабого источника.

	Классические					Проекционные				
№ алг.	Барт-лет	Кей-пон	Capon W	Capon OPT	BLag-unas OPT	Барт-лет	2	3	4	5
ОСПи	4,73	4,14	3,48	3.51	3.1	4,56	4,18	3.91	3,32	3,44
потери дБ	0	-0,65	-1,3	-1.29	-1.8	0	-0,36	-0,56	-1,29	-1,22
сигнал 2	–	–	+	+	+	–	+	+	+	–

Анализ итоговой таблицы показывает, что решение задач по управлению параметрами адаптивных алгоритмов с целью повышения разрешения слабых сигналов сопровождается ухудшением характеристик приёмной системы в полях распределённых помех по сравнению с неадаптивными алгоритмами, оптимизированными для приёма сигналов в поле чисто распределённых помех. Меньшие потери при разрешении ближнего сигнала обеспечиваются при использовании адаптивных алгоритмов с минимальной коррекцией исходной корреляционной матрицы в быстрых проекционных алгоритмах.

Из изложенного следует, что неадаптивная система наблюдения, оптимизированная для приёма сигналов в поле распределённых помех должна служить основой для любого гидроакустического средства. Задачи, связанные с разрешением слабых сигналов должны решаться в рамках дополнительного варианта обработки информации, целенаправленно ориентированного на решение этой задачи.

Литература

1. Capon J. High resolution frequency–wavenumber spectral analysis // 1418.Capon J. High resolution friqency-wavenumbtr spectral analys// Proc. IEEE. 1969. V. 57. P. 1408–1418.
2. Малышкин Г.С. Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых сигналов. Акуст. журнал 2017, т.63, №2, С.196-208.
3. Малышкин Г.С., Кузнецова А.С., Сидельников Г.Б. Обнаружение слабых гидроакустических сигналов на основе быстрых проекционных алгоритмов// Акуст. журнал 2016, т.62, №2, С.237-246.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ УРОВНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

И.Р.Бирюков, Д.Б.Островский, д-р техн.наук, М.Н.Петухова, А.О.Смирнов
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

METHOD OF MEASUREMENT OF SMALL LEVELS OF ACOUSTIC ANTENNA BEAM PATTERN

I.R.Biryukov, D.B.Ostrovskiy, Dr.Sc., M.N.Petukhova, A.O.Smirnov
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Предлагается способ измерения характеристики направленности (ХН) акустической антенны, использующий корреляционную обработку в приемной измерительной схеме. Такая обработка позволяет выделить малые уровни ХН на фоне шумов и уменьшить зашумленность больших уровней. В докладе представлены функциональная схема измерений, результаты компьютерного моделирования и экспериментальные данные по реализации способа в условиях бассейна.

Method of measurement of acoustic antenna beam pattern (BP) using correlation processing in the reception measuring scheme is proposed. Such processing allows to extract BP small levels against noise and reduce noise distortion of big levels. Function measurement scheme, results of computer modeling and experimental data on method realization in the conditions of a tank are presented.

Одним из важнейших параметров антенны является характеристика направленности (ХН), которая определяет угловое распределение чувствительности в пространстве. В большинстве задач, стоящих перед режимами гидроакустических систем, требуется минимизировать уровень ХН вне главного максимума. Особое влияние повышенный уровень бокового поля в режиме излучения оказывает на скрытность работы гидроакустических систем, а в режиме приема могут фиксироваться ложные цели и невозможно отстроиться от направленной помехи вне основного лепестка ХН. Поэтому необходима достаточно достоверная информация об уровнях ХН, лежащих ниже −30 … −50 дБ (от 3% до 1%) от уровня главного максимума.

При измерении характеристики направленности акустической антенны в условиях малого отношения сигнал/помеха, что характерно для бокового поля, не удается прописать малые уровни ХН, которые «тонут» в шумах. В используемых обычно способах измерения ХН [1] предлагается увеличивать уровень полезного сигнала, что не всегда возможно, а в случае малых уровней бокового поля может приводить дополнительно к нелинейным искажениям приемного тракта.

Идея предлагаемого способа состоит в корреляционной обработке сигнала, принимаемого с измерительного гидрофона или измеряемой приемной антенны, причем опорным сигналом является сигнал излучения, подаваемый на измеряемую излучающую антенну или измерительную излучающую антенну, но не прошедший водную среду. Нормированный результирующий массив корреляционных функций будет искомой ХН.

Аппаратная реализация способа представлена на рис. 1, где в типовую измерительную схему добавлены линия задержки и коррелятор. Сигнал, сформированный в задающем генераторе, поступает на усилитель мощности и далее на излучатель. Пройдя через водную среду, сигнал воспринимается приемником и через предварительный усилитель поступает в коррелятор. На другой канал коррелятора подается сигнал излучения, прошедший линию задержки, и задержанный на время $\Delta t = L/c$, где c – скорость звука в воде, а L – расстояние между излучающей и приемной антеннами. На линию задержки может подаваться сигнал как непосредственно с задающего генератора, так и сигнал излучения с выхода измерительного усилителя мощности, прошедший аттенюатор (для приведения сигнала к необходимому уровню, показано крупным пунктиром). Полученная корреляционная функция с выхода коррелятора поступает на стробирующее устройство, в котором, исходя из расстояния между корреспондентами, определяется участок (временной интервал) для дальнейшей обработки. Нужно отметить, что между задающим генератором и стробирующим устройством должна быть синхронизация (мелкий пунктир). На нормирующее устройство поступает массив, состоящий из амплитудных значений отстробированных данных, после чего массив нормированных значений интерпретируется как характеристика направленности и подается на индикатор.

Заявленный выигрыш в предлагаемом методе получается за счет увеличения отношения сигнал/помеха, т.к. наибольшее значение корреляционной функции находится в области прихода прямого и переотраженных акустических сигналов, а другие сигналы, присутствующие в приемном измерительном тракте (в т.ч. помехи), не коррелированы с излучаемым сигналом, и

их уровень, после корреляционной обработки, оказывается существенно меньше полезного сигнала.

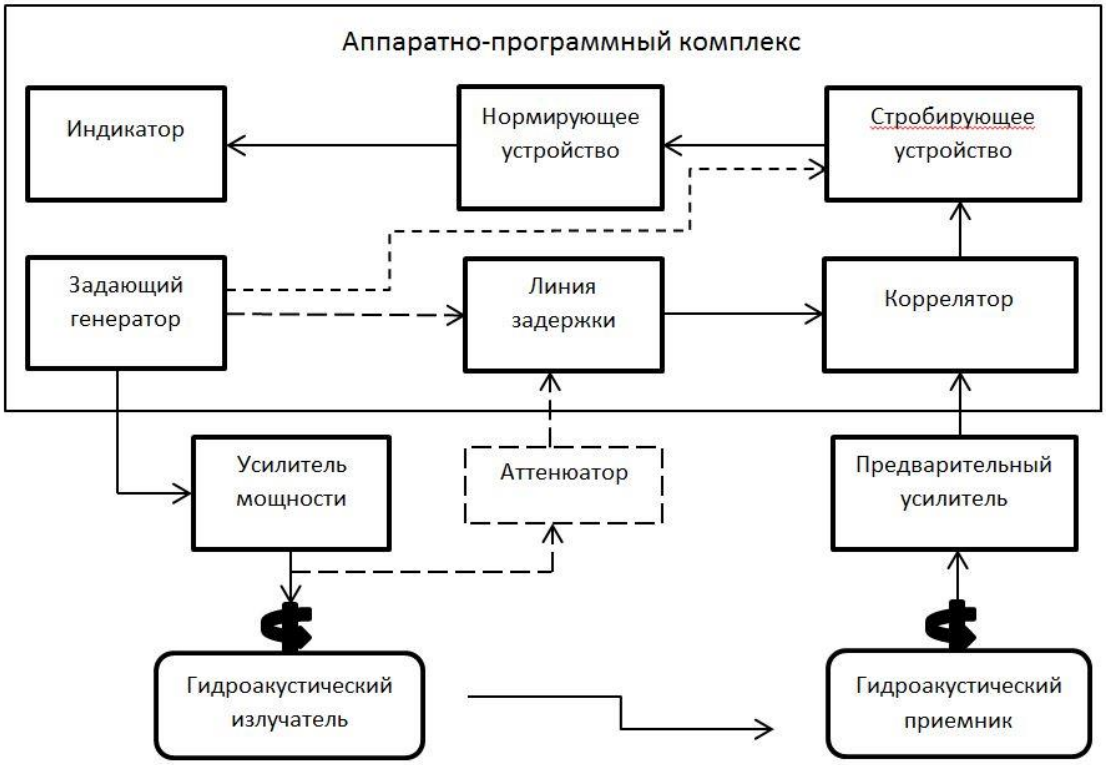


Рис. 1. Функциональная измерительная схема.

На рис.2 представлены результаты математического моделирования метода. На верхней части рис. 2 показана расчетная характеристика направленности эквидистантной линейной антенной решетки. По центру показана ХН с шумом, наложенным на радиоимпульсный сигнал. Шум имеет нормальную плотность распределения, $\mu = 0$, $\sigma = 0.1$. На нижнем графике показана ХН, полученная путем корреляционной обработки (свертки) зашумленного сигнала и сигнала без шума (сигнала излучения). Видно, что с помощью такого подхода удается улучшить отношение С/П, убрать флуктуации в главном максимуме, «проявить» боковые и тыльные лепестки ХН малых уровней (менее –12 дБ). [2]

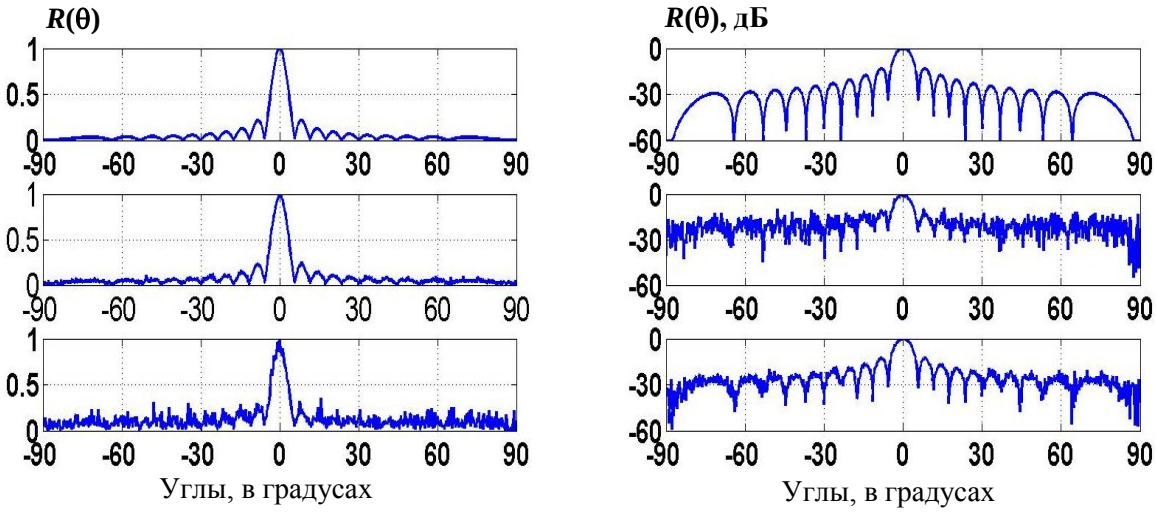


Рис. 2. Результаты моделирования процесса измерения ХН с корреляционной обработкой.

На рис. 3 представлены результаты измерения ХН гидроакустической антенны в опытовом бассейне с применением корреляционной обработки. Измерения проводились с помощью аппаратно-программного комплекса.

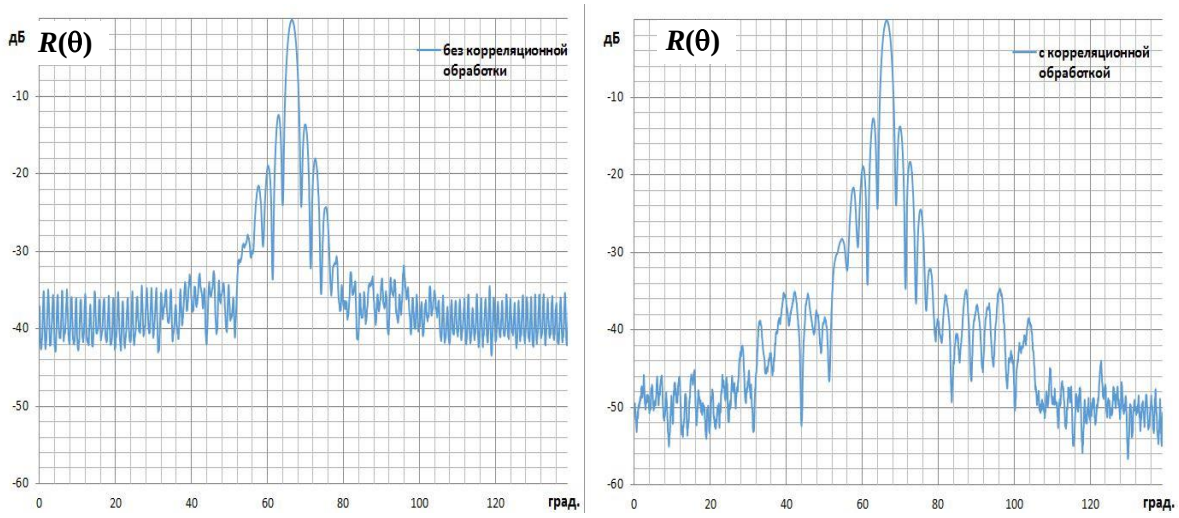


Рис. 3. Характеристика направленности акустической антенны (эксперимент).

Видно, что на правом графике, соответствующем измерению с корреляционной обработкой, динамический диапазон примерно на 10 дБ больше, что позволяет прописать боковые лепестки, которых нет на левом графике, соответствующем измерению без корреляционной обработки.

В данном случае в качестве опорного сигнала для формирования корреляционной функции был взят сигнал, не прошедший тракт излучения – идеальный сигнал. Возможно, если в качестве опорного сигнала использовать сигнал излучения, прошедший ЦАП и усилитель мощности, ситуация еще немного улучшится, поскольку будут учтены преобразования сигнала в тракте излучения и корреляционная функция между излученным и принятым сигналами будет больше.

Литература

1. Таранов Э.С. Гидроакустические измерения в океанологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1972, с.169-173.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФЛУКТУАЦИЙ ПОДВОДНОГО ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ СУДОВ

А.А.Волкова, канд.техн.наук, А.Д.Консон, д-р техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

SPECTRAL PROPERTIES OF UNDERWATER NOISE EMISSION FLUCTUATIONS OF SEA VESSELS

A.A.Volkova, Ph.D., A.D.Konson, Dr.Sc.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Проведен анализ сверхмедленных (до 0.05 Гц) флуктуаций, а также амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов, существующей в диапазоне частот качки морских судов на взволнованной поверхности (от 0.03 до 0.5 Гц). Приняты гипотезы о природе образования сверхмедленных флуктуаций в различных гидрологоакустических условиях. Показано, что существование сверхмедленных флуктуаций определяет возможность обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции качкой.

The analysis of superslow (to 0.05 Hz) fluctuations, and also the amplitude modulation of underwater noise emission of sea vessels existing in the frequency range of sea vessels rolling on rough surface (from 0.03 to 0.5 Hz) is carried out. Hypotheses on the nature of superslow fluctuations formation in different hydrological -acoustic conditions are accepted. It is shown that existence of superslow fluctuations determines the possibility of detection and measurement of parameters of amplitude modulation by rolling.

Флуктуации шумового сигнала морских судов могут быть обусловлены качкой судна на взволнованной поверхности, а также распространением в случайно неоднородной среде. Природа образования флуктуаций сигнала при качке судна, проявляющаяся на частотах от 0.03 до 0.5 Гц, описана в ряде работ [1,2] и подтверждена натурными экспериментами [3]. Основываясь на фундаментальных работах по акустике океана [4], следует признать, что на частотах менее 0.05 Гц могут существовать и более медленные флуктуации шумового сигнала. Однако до настоящего времени наличие сверхмедленных флуктуации шумового сигнала морских судов не подтверждено натурными экспериментами.

Целью данной работы является подтверждение возможности существования сверхмедленных флуктуаций сигнала морских судов, а также изучение взаимного влияния флуктуаций различной природы.

Спектральные свойства сверхмедленных флуктуаций шумоизлучения морских судов. Натурные записи шумовых сигналов морских судов проведены в условиях Белого, Баренцева и Норвежского морей с помощью погружаемого гидрофона. Для обнаружения и измерения параметров флуктуаций сигнала использовано унифицированное устройство [5], структурная схема которого приведена на рис. 1. Устройство содержит последовательно соединенные блоки: ПФ – полосовой фильтр (преселектор), АД – амплитудный детектор, ФНЧ – фильтр нижних частот, СА – спектроанализатор, ВУ – вычислительное устройство.

Для исследования флуктуаций на различных частотах шумового сигнала в блоке ПФ параметры полосового фильтра выбраны переменными: средняя частота фильтра меняется от 500 до 7500 Гц, ширина полосы равна корню квадратному из средней частоты.

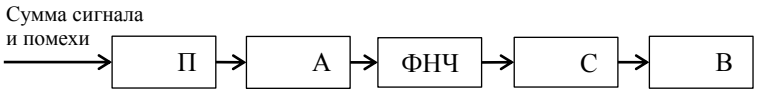


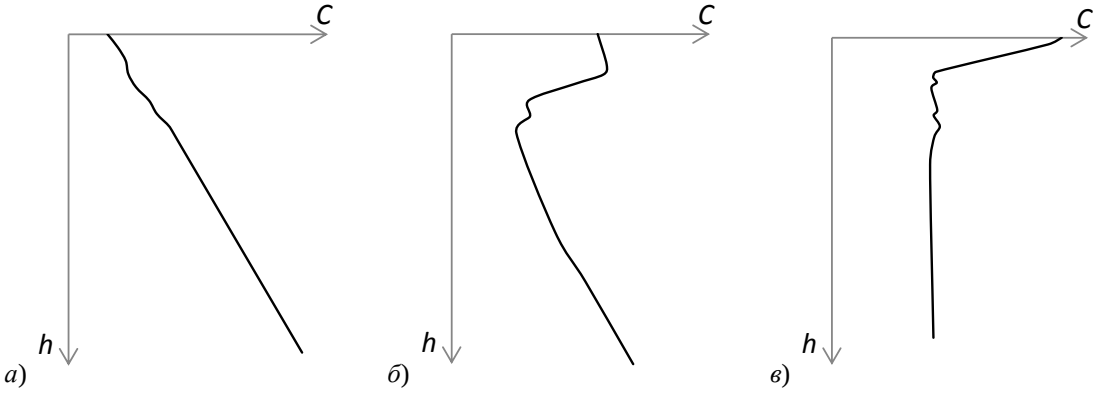
Рис. 1. Структурная схема устройства обнаружения флуктуаций сигнала.

Во всех опытах наблюдались сверхмедленные флуктуации на частотах до 0.03 – 0.05 Гц. На рис. 2 приведены три показательных типа спектров сверхмедленных флуктуаций шумовых сигналов морских судов. Спектры приведены в яркостном виде. По оси абсцисс – частота флуктуаций сигнала, по оси ординат – средняя частота полосового фильтра устройства согласно рис. 1.

На рис. 3 приведены профили вертикального распределения скорости звука для условий, в которых получены спектры флуктуаций, соответственно. По оси абсцисс – скорость звука, по оси ординат – глубина.

Результаты, приведенные на рис. 2а при гидрологии на рис. 3а, согласуются с моделью образования сверхмедленных флуктуаций при рассеянии звука на взволнованной поверхности. Как указано в работах [6, 7], сверхмедленные флуктуации могут появиться при больших значе-

ниях параметра Рэлея, которые, в свою очередь, возможны с ростом частоты основного сигнала. На рис. 2а (см. вклейку) видно, что флуктуации появляются на частотах более 3 кГц и растут с увеличением частоты. При этом на рис. 3а видно, что условия распространения сигнала характеризуются положительным градиентом скорости звука, то есть сплошной освещенностью с многократным отражением сигнала от поверхности.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Профили вертикального распределения скорости звука.

На рис. 2б сверхмедленные флуктуации можно наблюдать на низких частотах основного сигнала до 3 кГц. Подобное возможно, если допустить, что сигнал проходил через дифракционную решетку Брэгга, образованную внутренними волнами в океане [8]. Образование внутренних волн возможно вследствие движения судна, например, при его движении с небольшой скоростью. Тогда создаются не только корабельные волны на поверхности моря, но и внутренняя волна на границе раздела слоев воды с разными показателями преломления.

Учитывая возможные параметры внутренней волны, образованной вследствие движения судна, когда длина волны меньше высоты, допустимо рассматривать эту волну по отношению к акустической волне как дифракционную решетку Брэгга, в которой дифракция волны происходит на объемной периодической структуре при падении луча под углом к решетке [9].

Указанными дифракционными эффектами можно объяснить явления модуляции, представленные на рис. 2б. Согласно общей теории, в нашем случае при распространении акустической волны сквозь неоднородную среду внутренней волны, дифракционные эффекты должны заметно проявляться для длин акустических волн, сравнимых с длиной внутренней волны [10]. При длине внутренней волны, существенно превышающей длину акустической волны (в 3-4 раза и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь. Этим можно объяснить отсутствие эффекта сверхмедленных флуктуаций на высоких частотах шумового сигнала. На рис. 2б видно, что эффект сверхмедленных флуктуаций наблюдается в диапазоне частот шумового сигнала до 2 кГц, что соответствует длине звуковой волны 0.75 м и более. Возможно, это имело место в рассматриваемом эксперименте при движении крупнотоннажного судна. При этом на рис. 3б видно, что условия приема сигнала на глубине характеризуются влиянием подводного звукового канала, то есть преобладанием водных лучей без отражения от поверхности.

В процессе проведения натурных экспериментов наблюдались сверхмедленные флуктуации сигнала, появление которых можно было бы объяснить одновременным действием двух факторов: рассеянием звука на взволнованной поверхности моря и дифракцией звука на внутренней волне. Такие результаты приведены на рис. 2в. Видно, что сверхмедленные флуктуации проявляются как на верхних частотах шумового сигнала, так и на нижних, хотя в разной степени интенсивности. При этом между частотными областями существования сверхмедленных флуктуаций имеется определённый разрыв, что допускает предположение о различной природе их образования. На рис. 3в видно, что условия распространения сигнала близки к условиям однородной среды, когда могут существовать и водные лучи, и лучи, отраженные от поверхности, а наличие участка отрицательного градиента скорости звука допускает возможность образования дифракционной решетки Брэгга.

Таким образом, можно считать, что в диапазоне частот от 0.5 кГц до 8 кГц в шумовом сигнале морских судов присутствуют сверхмедленные флуктуации. При этом частотный диапазон флуктуаций довольно широк и простирается до частот 0.03 – 0.05 Гц, что находится у нижней границы диапазона частот флуктуаций, обусловленных качкой.

Спектральные свойства флуктуаций шумоизлучения, обусловленных качкой судов. Для обнаружения и измерения параметров флуктуаций сигнала в диапазоне частот качки от 0.03 до 0.5 Гц предполагалось использовать тоже устройство [5] (рис.1). Однако, существование в сигнале сверхмедленных флуктуаций, простирающихся до сотых долей Гц, не позволило провести спектральный анализ флуктуации в диапазоне частот качки. Для подавления сверхмедленный флуктуаций входного сигнала в устройство на рис.1 между блоками ПФ и АД был введен блок автоматической регулировки усиления, что позволило выделить искомые флуктуации.

На рис. 4 (см. вклейку) приведены примеры спектров флуктуаций сигнала, модулированного качкой.

По оси абсцисс – частота модуляции, по оси ординат – средняя частота полосового фильтра. Спектры приведены в яркостном виде. На рис. 4а приведен спектр модуляции для судна среднего водоизмещения в Баренцевом море в условиях сплошной освещенности. На рис. 4б, 4в приведены спектры модуляции для судна большого водоизмещения в Норвежском море в условиях наличия подводного звукового канала для различных расстояний между источником и приемником, соответственно.

Из приведенных примеров видно, что спектр флуктуаций в диапазоне качки носит сложный характер. Модуляция не является узкополосной. Ширина частотной полосы модуляции изменяется от 0.03 Гц (рис. 4а) до 0.06 Гц (рис. 4б, 4в). На рис. 4в можно заметить, что имеется изменение основной частоты модуляции при изменении области частоты основного сигнала.

Необходимо обратить внимание на частотный диапазон шумового сигнала, в котором заметны проявления модуляции. Для условий Баренцева моря – это частоты от 0.5 до 2 кГц (рис. 4а). Для условий Норвежского моря модуляция особенно ярко проявляется на частотах от 1.0 до 3 кГц (рис. 4б) и от 3.0 до 5.0 кГц (рис. 4б). Указанные полосы частот можно принять оптимальными для наблюдения модуляции сигнала качкой в данных случаях.

Кроме того, на рисунках 4б и 4в можно наблюдать изменение средней частоты модуляции и амплитуды модуляции при изменении частоты шумового сигнала.

Заключение. Исследование зависимости свойств сверхмедленных (до 0.05 Гц) флуктуаций сигнала от частотного диапазона самого шумового сигнала показало возможность образования флуктуаций вследствие разных физических процессов. В верхнем частотном диапазоне шумового сигнала существование сверхмедленных флуктуаций может быть объяснено, согласно классической теории, рассеянием сигнала на взволнованной поверхности в условиях, когда параметр Рэлея больше единицы. В нижнем частотном диапазоне шумового сигнала существование сверхмедленных флуктуаций может быть объяснено дифракцией звука на внутренней волне, образованной, в том числе, самим кораблем. Исследование зависимости свойств флуктуаций сигнала, обусловленных качкой судна (от 0.03 до 0.5 Гц), показало сложный характер спектра этих флуктуаций, которые также проявляются в различных диапазонах частот шумового сигнала.

Литература

1. Консон А.Д. О корреляционных характеристиках флуктуации мощности шумового сигнала, излучаемого надводным кораблем // Акустический журнал. 1999. Т. 45. № 4. С. 523–527
2. Консон А.Д. Спектр флуктуации мощности сигнала, излучаемого кораблем при качке // Судостроение. 1997. Вып. 6. С. 46–48
3. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шума морских объектов // Акустический журнал. 2003. Т. 49. № 2. С. 224–228
4. Акустика океана / Под ред. акад. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 693 с
5. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 3. С. 347–353
6. Лысанов Ю.П. Рассеяние звука неровными поверхностями. В кн. «Акустика океана». Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. С. 231–330
7. Андреева И.Б., Чупров С.Д. Отражение и рассеяние звука взволнованной поверхностью океана. В кн. «Акустика океана». Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. С. 331–394
8. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с
9. Гуляев Ю.В., Проклов В.В., Шкердин Г.Н. Дифракция света на звуке в твердых телах // Успехи физических наук. 1978. Т. 124. № 1. С. 61–111
10. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 247 с

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ РАБОТЕ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ

Г.Ю.Пуеров, канд.физ-мат.наук, Е.И.Сергеева
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

APPROXIMATE LINEAR ARRAY FRESNEL ZONE BEAMFORMING ALGORITHM

G.Yu.Puerov, Ph.D., E.I.Sergeeva
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Предложен приближенный вычислительный алгоритм формирования характеристик направленности для задач пространственно-частотной обработки сигналов линейной антенной решетки с фокусировкой в зоне Френеля. Описана программная модель данного алгоритма и исследована возможность его реализации в системах реального времени.

Approximate Fresnel zone beamforming algorithm for spatial-frequency linear array signal processing is proposed. Software implementation of this algorithm is described and its feasibility for real-time systems is studied.

Пространственно-частотная обработка сигналов линейной антенной решетки в зоне Френеля позволяет осуществить разрешение целей не только по пеленгу, но и по дальности, а также измерение дальности до цели в пассивном режиме [1–4]. Задачей, требующей больших вычислительных ресурсов при программной реализации такой обработки в системах реального времени, является формирование характеристик направленности (ФХН).

Пусть N — длина обрабатываемой реализации, L — количество приемных каналов, Q — количество пространственных каналов, K — количество частотных каналов, k_0 — нижняя граница полосы частот, $X(k,l)$ — спектры сигналов приемных каналов, f_d — частота дискретизации, d — расстояние между приемными элементами антенны, $D=(L-1)d$ — длина антенны, $x(l)=ld-D/2$ — положение приемника, c — текущая скорость звука, J — количество рабочих зон Френеля, r_j — дистанция фокусировки для j зоны Френеля. Требуется для всех $k=k_0,\dots,k_0+K-1, q=-[Q/2],\dots,[Q/2], j=1,\dots,J$ вычислить суммы

$$S_j(k,q)=\sum_{l=0}^{L-1} X(k,l)\exp\left(-\frac{2\pi i f_d k}{Nc}\, r_j(\rho_j(l,q)-1)\right), \tag{1}$$

где

$$\rho_j(l,q)=\sqrt{1+\left(\frac{x(l)}{r_j}\right)^2-\frac{4x(l)q}{r_j(Q-1)}}. \tag{2}$$

При работе в дальней зоне для выражения (2), как правило, используется линейное приближение, при котором информация о дистанции не используется [2]. Для этого случая существуют хорошо показавшие себя быстрые алгоритмы [5]. Но для обычно применяемой в зоне Френеля аппроксимации выражения (2) (см. [1,2]) данные алгоритмы не подходят.

В работе предложено приблизить выражение (2) полиномом наилучшего среднеквадратичного приближения вида

$$\tilde{\rho}_j(l,q)=a_{00}^{(j)}+a_{10}^{(j)}q+a_{01}^{(j)}l+a_{20}^{(j)}q^2+a_{11}^{(j)}(q-l)^2+a_{02}^{(j)}l^2. \tag{3}$$

В этом случае ФХН в зоне Френеля представляется в виде сумм

$$\widetilde{S}_j(k,q)=\sum_{l=0}^{L-1} X(k,l)\exp\left(-\frac{2\pi i f_d k}{Nc}\, r_j(\tilde{\rho}_j(l,q)-1)\right), \tag{4}$$

которые, действуя по схеме, описанной в работе [5], можно свести к вычислительным алгоритмам на базе «быстрой свертки». Тогда вычислительная сложность алгоритма ФХН в зоне Френеля составляет $O(JL\log L)$ арифметических операций вместо $O(JL^2)$.

Предложенный алгоритм реализован для многопроцессорной системы на базе процессоров семейства «Комдив» [6].

Для проверки функционирования приближенного алгоритма ФХН в зоне Френеля с помощью программного имитатора сигналов приемных каналов линейной антенной решетки формировался широкополосный сигнал цели с фиксированной дистанцией на фоне изотропного шума.

Результаты численных экспериментов на описанной модели показали, что для достижения точности приближения, позволяющей решать задачи обработки сигналов в зоне Френеля, диапазон пространственных каналов необходимо разбить на поддиапазоны и для каждого сформи-

ровать свой набор коэффициентов полинома (3). Таким образом, предлагается выполнить несколько (обычно от 2 до 6 в зависимости от параметров антенны) вычислительных процедур ФХН для разных поддиапазонов пространственных каналов.

На рис. 1 показаны результаты работы программной реализации предложенного алгоритма на примере широкополосных сигналов 2-х целей, находящихся в разных зонах Френеля. Графики зависимости интенсивности сигналов первой и второй целей от дистанции изображены на рис. 2 и 3 соответственно.

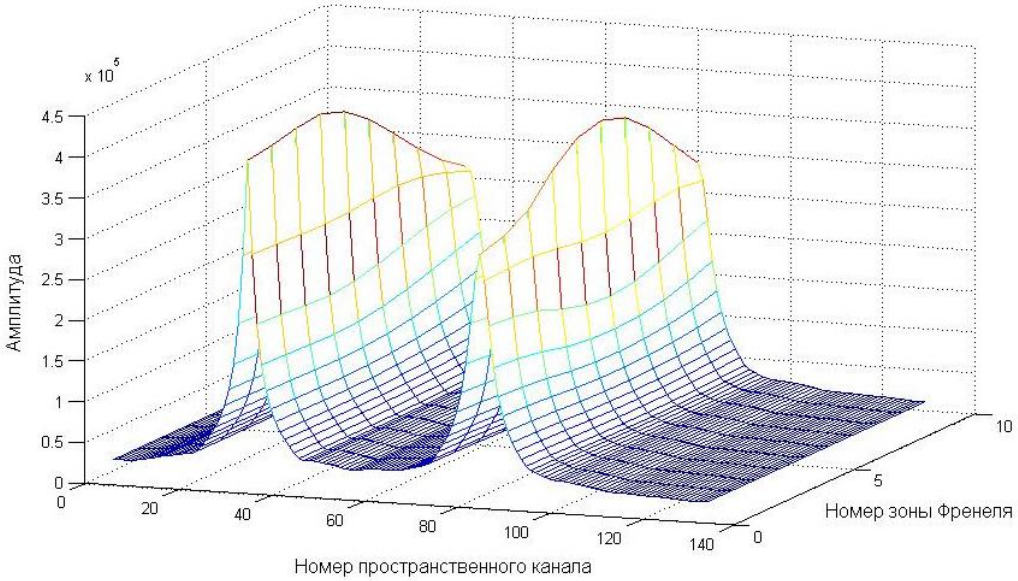


Рис. 1. График интенсивности широкополосных сигналов 2-х целей.

Было произведено сравнение результатов работы приближенного алгоритма ФХН и эталонных вычислений по формуле (1). На рис. 2 и 3 видно, что дистанция (номер зоны Френеля на графиках), где наблюдается максимум, для приближенного алгоритма ФХН и эталона совпадают.

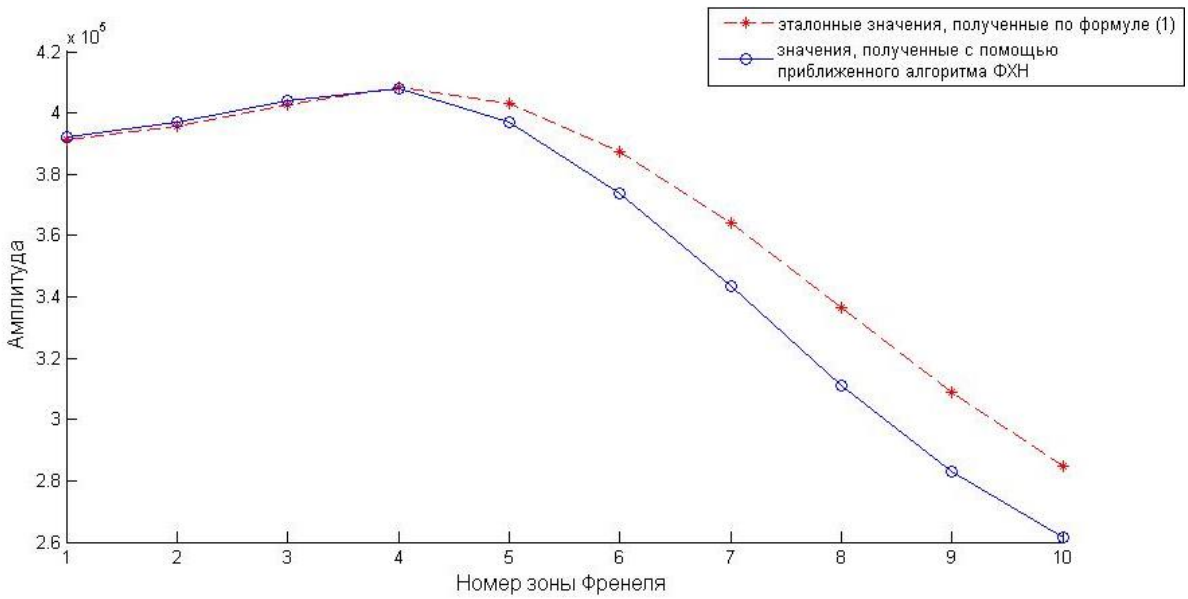


Рис. 2. График интенсивности сигнала цели 1 в зависимости от дистанции.

Результаты численного моделирования показали, что точность приближенного алгоритма ФХН позволяет решать поставленные задачи пространственно-частотной обработки сигналов в зоне Френеля. Предложенный алгоритм реализуем в многопроцессорных бортовых системах обработки гидроакустических сигналов на существующих вычислительных средствах.

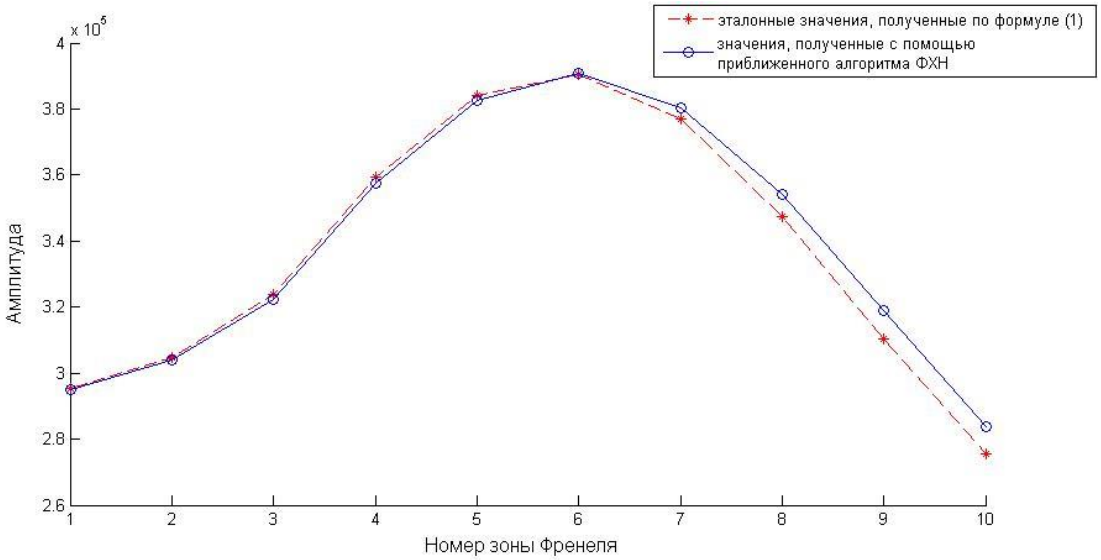


Рис. 3. График интенсивности сигнала цели 2 в зависимости от дистанции.

Литература

1. Кремер И. Я., Понькин В. А. О потенциальной точности определения местоположения цели при пространственно-временной обработке сигналов в общем случае // Радиотехника и электроника. 1975. 6. С. 1186–1198.
2. Кремер И. Я., Кремер А. И., Петров В. М. и др. Под ред. И. Я. Кремера. Пространственно-временная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
3. Рудько И. М. Определение дистанции до цели, находящейся в зоне Френеля антенны // Пробл. управл. 2006. Вып. 6. С. 79–82.
4. Емилова Р. Р., Егоров Н. М., Мнацаканян А. А. Формирование характиристики направленности линейной антенны с учетом сферического расхождения волнового фронта // Сборник трудов V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Туапсе, 2016. С. 21–24.
5. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Применение быстрого преобразования Фурье при программной реализации формирования характеристик направленности линейной эквидистантной антенной решетки // Гидроакустика. 2015. Вып. 24(4). С. 70–74.
6. Микросхема интегральная 1890ВМ7Я. Указания по применению, ЮКСУ.431281.104Д4, М., НИИСИ РАН, 2014.

АДАПТИВНАЯ КОГЕРЕНТНО-СОГЛАСОВАННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СЛУЧАЙНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

М.О.Пономарев, К.П.Бойко, Р.В.Викторов, канд.техн.наук, В.С.Колмогоров, д-р техн.наук, А.В.Крупеньков, С.А.Шпак, канд.техн.наук
Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С.О. Макарова, Владивосток, Россия

ADAPTIVE COHERENT- MATCHING SIGNAL PROCESSING IN RANDOM SONAR ARRAYS

M.O.Ponomarev, K.P.Boyko, R.V.Viktorov, Ph.D., V.S.Kolmogorov, Dr.Sc., A.V.Krupenkov, S.A.Shpak, Ph.D.
S.O. Makarov Pacific Higher Naval College, Vladivostok, Russia

Экспериментальные исследования в морских условиях показали, что использование адаптивной когерентно-согласованной обработки гидроакустических сигналов позволяет повысить помехоустойчивость гидроакустического средства и зарегистрировать вально-лопастной звукоряд шумоизлучения морского объекта в условиях повышенного уровня шумов моря.

Experimental research in marine environment showed that the use of adaptive coherent- matching processing of sonar signals allows to increase sonar noise immunity and register shaft -bladed scale of noise emission of the marine facility in the conditions of high level of sea ambient noise.

В ряде работ рассматривается возможность повышения эффективности радиогидроакустической системы (РГС) со случайной антенной решеткой (САР) основанная на взаимной обработке сигналов, получаемых от отдельных радиогидроакустических приемниковпри пассивном режиме их использования [1,2]. Для повышения помехоустойчивости РГС в этих работах предполагается использование пространственной фильтрации сигнала путем формирования характеристики направленности РГС. Это требует позиционирования радиогидроакустических приемников, что является весьма проблематичной процедурой.

Для повышения эффективности РГС со случайной антенной решеткой возможно использование совместной адаптивной когерентно-согласованной обработки сигналов от отдельных радиогидроакустических приемников [3]. Для фазирования сигналов в САР предполагается использование дискретных составляющих (ДС) вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР) шумоизлучения морского объекта.

Известно, что амплитудная модуляция шума морских судов может использоваться для обнаружения и их классификации посредством выделения ДС ВЛЗР в амплитудно-модулированном широкополосном шуме морского объекта [4]. Определяющим в возможности выделения ДС ВЛЗР является отношение сигнал/помеха (ОСП) на входе тракта обработки. При этом ОСП на выходе схемы анализа амплитудной огибающей (АО) широкополосного шумоизлучения морского объекта зависит от количества усредняемых спектров, полосы частот полосового фильтра, глубины модуляции и входного ОСП.

Для увеличения ОСП на входе схемы выделения АО может быть использован адаптивный компенсатор помех (АКП) [5] на базе адаптивного фильтра LMS, позволяющий подавить коррелированную часть помехи, в частности шумы дальнего судоходства.

Для проверки возможности использования способа адаптивной когерентно-согласованной обработки сигналов от отдельных гидроакустических приемников в случайных гидроакустических антенных решетках были проведены экспериментальные исследования в морских условияхв глубокой части Японского моря.

Методика проведения эксперимента предполагала использование ряда случайно расположенных измерительных приемных устройств (ПУ) акустического сигнала с постановкой их с борта обеспечивающего судна и фиксацией их взаимного расположения на установленных дистанциях друг от друга с применениемсоединительного троса. Кроме этого с борта обеспечивающего судна устанавливалось дополнительное радиогидроакустическое приемное устройство в виде опорного ($ПУ_{оп}$), которое свободно дрейфовало в морской акватории на большом расстоянии от измерительных ПУ входящих в состав САР.

Предполагалось, что сильношумящие мешающие цели находятся на достаточно большом расстоянии от измерительных радиогидроакустических приемных устройств. При этом шумоизлучение дальних мешающих целей в равной степени регистрировался измерительными ПУ и опорным $ПУ_{оп}$, который устанавливался на значительном расстоянии от измерительных ПУ. При этом предполагалось, что сигнал шумоизлучения малошумного морского объекта принимаются на измерительные гидрофоны, а на гидрофон $ПУ_{оп}$ не принимается. Сигналы, полученные с измерительных ПУ, определялись суммой «сигнал+помеха», а с $ПУ_{оп}$ поступала только «помеха»,

которая в схеме адаптивного фильтра использовалась как опорный сигнал. Сигналы от ПУ случайной антенной решетки одновременно регистрировались в радиогидроакустической системе на борту обеспечивающего судна, которые использовались для дальнейшей обработки.

На рис.1 приведена усредненная спектральная плотность мощности (СПМ) АО сигнала шумоизлучения морских целей, полученного в ходе эксперимента с измерительного ПУ при использовании стандартной схемы обработки.

Как видно из рис.1 исследуемый ВЛЗР малошумного объекта наблюдался на фоне ВЛЗР мешающей цели, что затрудняло эффективно регистрировать его параметры.

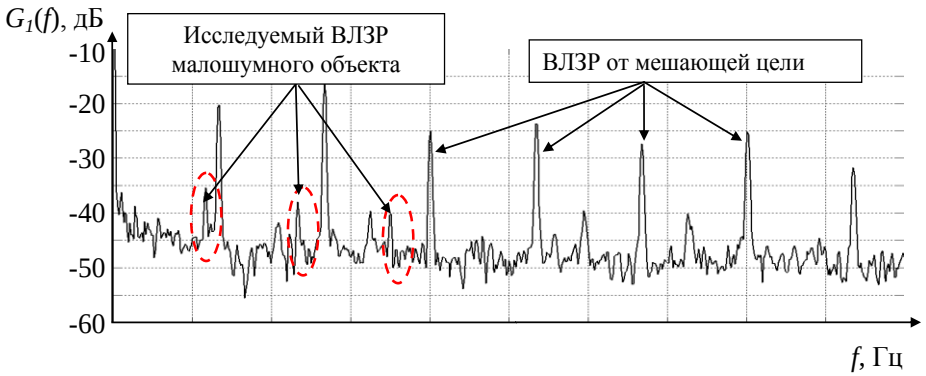


Рис. 1. Усредненная СПМ амплитудной огибающей сигнала с измерительного ПУ.

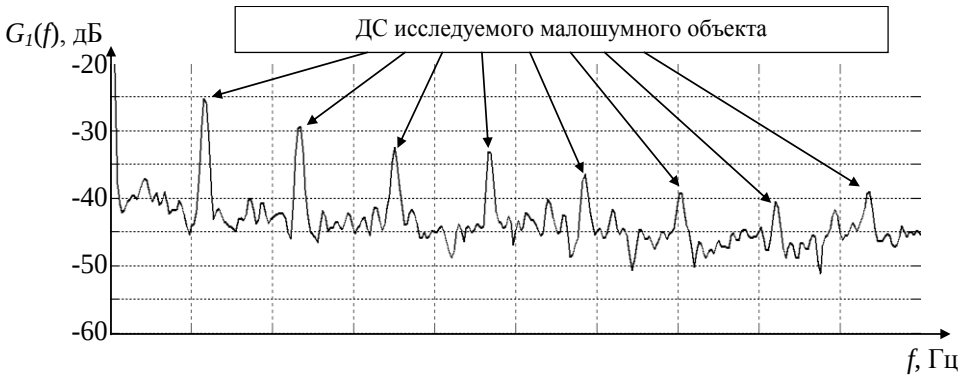


Рис. 2. Усредненная СПМ амплитудной огибающей сигнала после адаптивной обработки сигналов.

На рис. 2 показаны оценки усредненной СПМ амплитудной огибающей сигналов с измерительного ПУ после адаптивной обработки сигналов при тех же параметрах спектрального анализа, что и при использовании стандартной схемы обработки. Опорный $ПУ_{оп}$, исходя из скорости дрейфа, на момент записи сигналов с измерительных ПУ ориентировочно находился на расстоянии 3 км от обеспечивающего судна.

Из анализа рис. 2 видно, что адаптивная обработка в сочетании с оптимальным подбором диапазона частот для предварительной фильтрации сигнала перед выделением его АО может привести к компенсации «мешающих» помех и более эффективному выделению ВЛЗР шумоизлучения малошумного объекта. При сравнении оценок усредненных СПМ АО сигналов с измерительного ПУ до и после адаптивной фильтрации, видно, что выделение ДС ВЛЗР после адаптивной обработки сигнала происходит более эффективно.

С целью повышения энергетического потенциала радиогидроакустической системы, состоящей из отдельных ПУ, производилась взаимная обработка сигналов с ПУ № 1, 2 и 3 в блоке когерентной обработки по алгоритму, описанному в работе [3], где на вход схемы обработки поступают АО сигналов сизмерительных ПУ после их обработки в цифровом вычислителе амплитудной огибающей и выполнения операции децимации. Далее сигнал одновременно поступал на вход блока вычисления функции когерентности и вход блока узкополосных фильтров. На рис. 3 приведен результат расчета функции когерентности АО сигналов, полученных с двух ПУ после их адаптивной обработки.

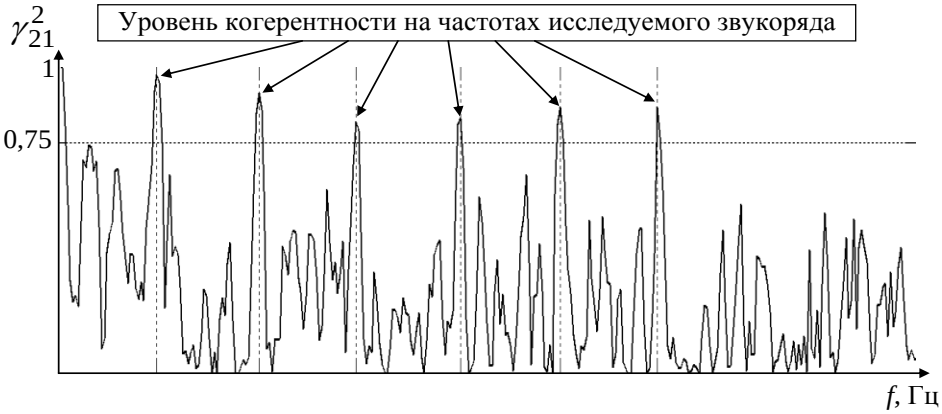


Рис. 3. Функция когерентности при взаимной обработке сигналов с двух ПУ

В блоке вычисления функции когерентности производилась оценка квадрата модуля когерентности между выборками сигналов по формуле

$$\gamma^2_{xy} = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)},$$

где G_{xy} - взаимный спектрсигналов, полученный с двух ПУ; $G_{xx}(f)$ и $G_{yy}(f)$ - автоспектры (спектральные плотности мощности) сигналов от отдельных ПУ.

Обнаружение когерентных максимумов в спектре квадрата модуля когерентности производился при использовании детектора с линейно изменяемым порогом [3].

Из рис.3 видно, что на частотах исследуемого звукоряда коэффициент квадрата модуля когерентности превышает значение установленного порогового уровня 0,75, который соответствует вероятности ложной тревоги $P_{лт}$=0,00005. Это свидетельствует о высокой степени когерентности в условиях эксперимента и возможности совместной обработки сигналов, полученных с различных ПУ.

При совместной обработке на эти когерентные частоты, при условии соблюдения требований алгоритма формирования ВЛЗР, настраивались узкополосные полосовые фильтры в блоке когерентной обработки, и производилась выборка спектральных отсчетов, принадлежащих звукоряду. Это позволило осуществлять согласованную фильтрацию входных сигналов. После выполнения этих операций производилось суммирование сигналов и вычислялась СПМ суммарного сигнала.

На рис. 4 приведен график зависимости ОСП ДС ВЛЗР на выходе схемы адаптивной когерентно-согласованной обработки (суммарного сигнала с двух ПУ) и сигналов с отдельных ПУ.

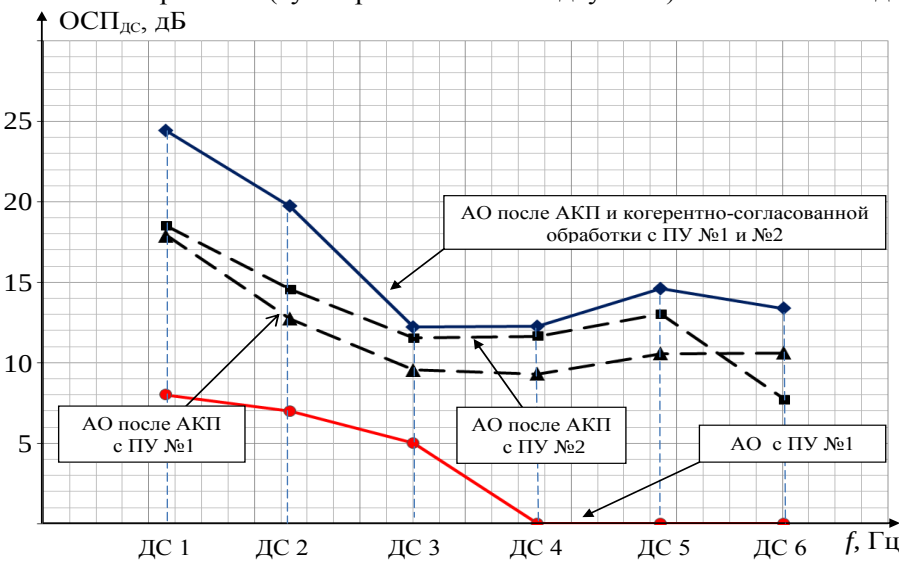


Рис. 4. Отношение сигнал/помеха на различных частотах ДС ВЛЗР малошумного объекта до и после обработки.

Как видно из рис. 4 ОСП ДС ВЛЗР после когерентно-согласованной обработки сигналов повысилось на 3-6 дБ относительно ОСП ДС, полученных после адаптивной обработки от отдельных ПУ.

Таким образом, как показали экспериментальные исследования, адаптивная обработка гидроакустических сигналов позволяет выделить ВЛЗР малошумного объекта на фоне мешающих целей и повысить ОСП перед входом схемы анализа АО на 9-17 дБ, а когерентно-согласованная обработка сигналов, полученная с двух ПУ радиогидроакустической системы, может привести к дополнительному повышению отношения сигнал/помеха ДС на выходе схемы анализа АО до 6 дБ.

Литература

1. Ходжкисс У.С. Случайные акустические решетки / Подводная акустика и обработка сигналов: пер. с англ./ Под ред. Л. Бьёрне – М.: Мир. 1985.С.289-298.
2. Долгих В.Н. Пространственная фильтрация и обнаружение гидроакустических сигналов – Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ ВМА, 2014. – 318 с.
3. Программа когерентной обработки и анализа дискретных составляющих шумоизлучения объекта «ANALIZ_DS». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663774 от 16.12.2016. / Пономарев М.О.
4. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. – 2013. - №3. – С. 347-353.
5. Колмогоров В.С., Викторов Р.В., Дягилев М.В., Пономарев М.О., Шпак С.А. Помехоустойчивость гидроакустических систем при использовании адаптивной обработки сигналов – Владивосток: ТОВВМУ, 2015 – 196 с.

ПРИЗНАКИ ОТЛИЧИЯ АНОМАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА РЕВЕРБЕРАЦИИ НАКАЧКИ ОТ ОБЫЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ РЕВЕРБЕРАЦИИ НАКАЧКИ

В.Б.Железный
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

SIGNS OF DIFFERENCE OF ABNORMAL MODULATION OF PUMP REVERBERATION SIGNAL FROM NORMAL MODULATION OF PUMP REVERBERATION

V.B.Zhelezny
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

На основе экспериментов с реверберационными параметрическими приемными антеннами в реальной воде сообщается о наблюдении аномально большой амплитудной модуляции реверберации сигнала накачки при встречном взаимодействии накачки с более низкочастотным акустическим сигналом. Разрабатывается критерий оценки, в каком случае данную модуляцию реверберации накачки можно считать аномальной, то есть не имеющей объяснения в рамках нелинейной акустики сплошных сред.

On the basis of experiments with reverberation parametrical receiving antennas in real water it is presence of abnormally high amplitude modulation of reverberation of the pump signal at counter interaction of pumping with more low-frequency acoustic signal is reported. The evaluation criterion in what case this modulation of pump reverberation can be considered abnormal, that is having no explanation within non-linear acoustics of continuous media, is developed.

В работе [1] на основе экспериментальных данных утверждается, что при встречном взаимодействии акустического сигнала накачки с более низкочастотным (НЧ) акустическим сигналом в зоне формирования обратного рассеяния сигнала накачки эпизодически возникает аномально высокая амплитудная модуляция (АМ) сигнала реверберации накачки. Учитывая применение в [1] этого термина следует раскрыть основания его использования. Как известно слово «аномальная(-ый, -ое)» означает в физике наблюдение какого либо события или явления, параметры которого отличаются от нормы, за которую выбираются параметры, ожидаемые на основе существующих физических теорий. Таким образом, учитывая, что наблюдаемые в [1] явления были связаны с исследованиями акустических реверберационных параметрических приемных антенн (РППА), являющихся модификацией РППА В.Тернера [2], за норму должны приниматься результаты, основанные на теории нелинейной акустики сплошных сред [3,4].

Поиск АМ реверберации проводился с использованием нескольких вариантов РППА, различавшихся по частотам накачки ($f_н$), а также характеристикам излучателей и приемных антенн диапазона накачки. В качестве накачки использовались тональные сигналы частотой от нескольких килогерц до нескольких мегагерц. Акустическая часть исследования нелинейного взаимодействия сигналов накачки при их встречном взаимодействии с НЧ сигналами проводилась в реальной воде по типовой схеме работы РППА, представленной на рис.1.

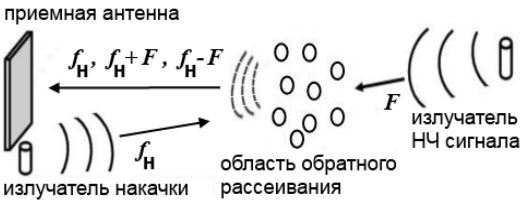


Рис. 1. Акустическая схема исследований взаимодействия накачки $f_н$ с НЧ сигналом F.

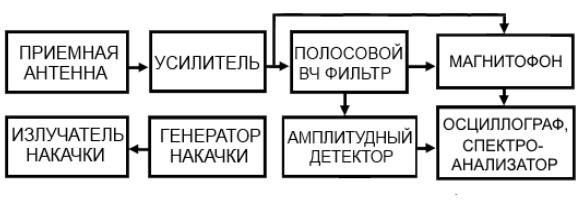


Рис. 2. Схема установки по обнаружению модуляции реверберации накачки НЧ сигналом.

В соответствии с этой схемой в воду (морскую воду) излучался слабонаправленный в горизонтальной плоскости тональный сигнал накачки частотой $f_н$, часть энергии которого в ходе распространения рассеивалась в обратном направлении. Одновременно в сторону расположения излучателя накачки и узконаправленной приемной антенны из дальней зоны (с расстояния более $L=1/\alpha_f$;) излучался НЧ сигнал, тональный частотой F или широкополосный со средней частотой F ($0.3f_н>F$). Между указанными сигналами в воде происходило нелинейное взаимодействие с образованием комбинационных составляющих $f_н-F$ и $f_н+F$ реверберации накачки, либо как по [2,4] с фазовой модуляцией, либо как по случаям, описанным в [1], с АМ. Прием сигнала реверберации накачки осуществлялся приемной антенной (рис.1) с которой поступал на тракт обработки (рис.2), где принятый акустический сигнал преобразовывался в электрический, а далее усиливался и фильтровался полосовым фильтром для выявления сигнала накачки и наличия у него модуляционных составляющих. При частотах $f_н$<38 кГц для записи сигналь-

ных процессов использовался измерительный магнитофон, записанные сигналы обрабатывались в лабораторных условиях с использованием осциллографа (для наблюдения АМ) и спектроанализатора (для определения частотного состава принятой накачки).

Все составляющие элементы схемы проверялись на нелинейные искажения и запас динамического диапазона. В случае, если амплитуды модуляционных составляющих накачки не наблюдались или были меньше установленных значений нелинейных искажений приемного тракта или магнитофона, указанные модуляционные составляющие не рассматривались, как возникшие в среде распространения (воде) и считалось, что АМ накачки в этом случае обнаружено не было. При проведении экспериментов контролировались значения акустического давления НЧ сигнала в области приемной антенны и уровни давления в излучении НЧ сигнала и сигнала накачки. Вращением приемной антенны (рис.1) также могла производиться оценка пространственных свойств АМ реверберации сигнала накачки.

Наблюдаемое явление характеризовалось:

эпизодическим (в зависимости от региона, сезона и гидрологических условий) появлением большой АМ реверберации накачки при встречном (контрколлинеарном) взаимодействии тональной акустической накачки с акустическим НЧ сигналом в зоне формирования обратного рассеяния сигнала накачки в дальнем поле в реальной воде при направлении главного максимума характеристики направленности (ХН) в направлении на источник НЧ сигнала;

при отклонении главного максимума ХН приемной антенны от направления на источник НЧ сигнала уровень АМ снижался, при этом ширина главного максимума ХН соответствовала ширине главного максимума ХН на частоте накачки (обычно 1…4°) и не зависела от изменения частоты НЧ сигнала (при изменении частоты НЧ сигнала около 3 октав);

появление АМ модуляции реверберации тональной накачки при взаимодействии с НЧ сигналом в морских условиях, как правило, происходило при доминировании объемной реверберации, а при отражении накачки от дна или поверхности фактов появления АМ реверберации накачки при ее взаимодействии с НЧ сигналом обнаружено не было.

Эффект носил явно выраженный эпизодический характер. Так при исследованиях [1] взаимодействия тональной накачки $f_н$=7 кГц с НЧ тональными и широкополосным сигналами, излучаемыми в диапазоне частот от 300 до 800 Гц с расстояния 25-30 км НЧ излучателем с пиковыми уровнями около 100 Па·м, при использовании макета РППА (приемная антенна 2 на 2.5 м, излучателя накачки диметром около 0.1 м и высотой 0.4 м, давления в излучении $P_{F,изл}$ на $f_н$ около 70 Па·м [1]), в нескольких циклах были получены значения АМ реверберации накачки от 0 до 90% (табл.1) при значениях НЧ давления на приемной антенне от 0.015 до 0.023 Па.

Таблица 1. Результаты наблюдений наличия и отсутствия АМ реверберации накачки по [1].

Циклы наблюдений	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Пиковое значение $P_{F,изл}$ на НЧ излучателе, Па·м	100	100	100	100	100	100
Давление P_F НЧ сигнала на приемной антенне, Па	0.016	0.023	0.018	0.020	0.016	0.018
Коэффициент АМ сигнала накачки, %	80-90	0	5-7	0	0	0

Дополнительно на рис.3 приведены спектрограммы и осциллограммы, зафиксированные по выходу приемной антенны РППА для случая проявления гигантской АМ реверберации накачки слабым НЧ сигналом в 1-м цикле и ее отсутствия (данные 2-го цикла наблюдений). На рис.3 обозначены: «*а*» и «*б*» – спектры и осциллограммы, на которых представлен вид АМ рассеянного сигнала накачки ($f_н$) при направлениях приемной антенны на источник НЧ сигнала (рис.3*а*) и при ее отвороте на 5º-7º от направления источника НЧ сигнала (рис.3*б*) в 1-м цикле измерений; «*в*» – спектр и осциллограмма накачки во 2-м цикле измерений при направлении приемной антенны на источник НЧ сигнала (рис.3*в*), когда АМ отсутствовала; «*ни*» - предельный уровень нелинейных искажений в приемном тракте.

При исследованиях взаимодействия встречно распространяющегося тонального сигнала накачки ($f_н$≈16 кГц) с тональным НЧ сигналом (F≈1 кГц, $P_{F,изл}$≈50…200 Па·м, давление НЧ сигнала на приемной антенне РППА от 0.02 до 0.07 Па), излучаемым с дистанции 15…30 км до РППА, при использовании приемной антенны с коэффициентом концентрацией в приеме около 23…30 дБ на частоте накачки в ряде случаев так же визуально на осциллографе наблюдалась АМ реверберации накачки (с индексом АМ около 20%) при направлении максимума приемной ХН на НЧ источник (рис.4*а*), заметно снижавшаяся при отклонении максимума ХН от направления на НЧ источник на 6...10° (рис.4*б*). В других же случаях (в основном при доминировании

донной реверберации или при проведении экспериментов в пресных озерах) АМ реверберации накачки отсутствовала (рис.4*в*).

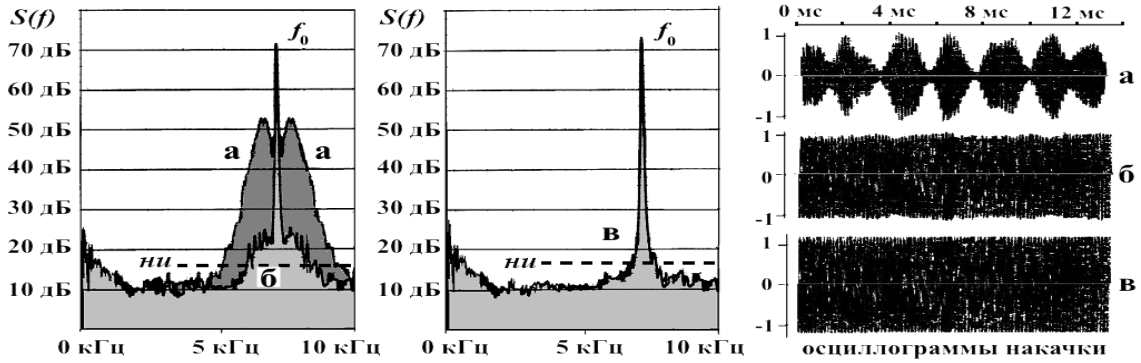


Рис. 3. Спектры и осциллограммы сигналов на выходе усилителя приемного тракта РППА [1] в случаях проявления АМ реверберации при направлении на НЧ источник (*а*) и отклонении от него на 5º-7º (*б*) и в случаях отсутствия АМ реверберации при направлении НЧ источник (*в*).

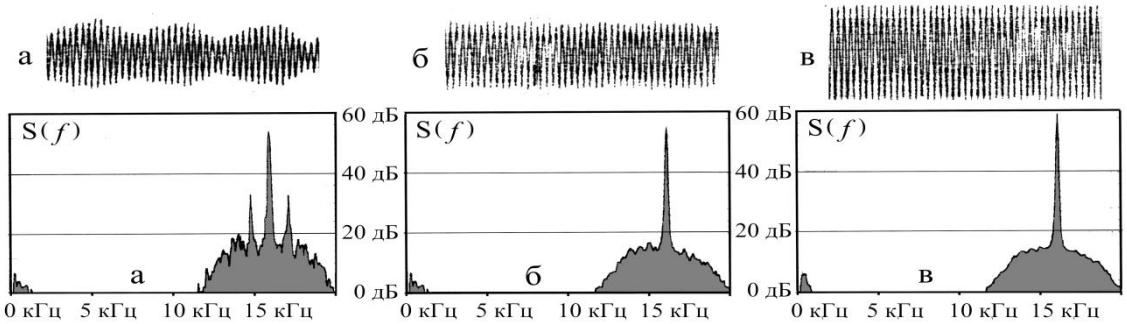


Рис. 4. Осциллограммы и спектры сигналов на выходе усилителя приемного тракта в случаях проявления АМ реверберации $f_н$≈16 кГц при направлении на НЧ источник F≈1кГц (а) и отклонении от него на 6º-10º (б) и в случаях отсутствия АМ при направлении на НЧ источник (в).

Для доказательства, того что представленная на рис.3*а* и рис.4*а* модуляция с учетом условий постановки экспериментов и уровней воздействовавших НЧ сигналов является аномально высокой введем понятие коэффициента нелинейного переноса НЧ сигнала в модуляционные составляющие сигнала реверберации накачки χ:

$$\chi = \frac{P_{F,f}}{P_F P_{f,R}}, \qquad (1)$$

где $P_{f,R}$ и P_F – амплитудные значения акустического давления (Па) сигнала реверберации накачки $f_н$ в приеме и НЧ сигнала (F) от НЧ источника на приемной антенне РППА при направлении ее максимума ХН по частоте $f_н$ на источник НЧ сигнала, соответственно; $P_{F,f}$ – амплитудное значение акустического давления (Па) модуляционной компоненты $f_н-F$ или $f_н+F$ реверберации накачки на приемной антенне РППА. По (1) для результатов экспериментов [1] максимальное значение коэффициента переноса достигало χ≈28 Па$^{-1}$ в 1-м цикле исследований (рис.1*а*, табл.1) и χ≈2 Па$^{-1}$ в 3-м цикле (табл.1). В исследованиях проявления АМ реверберации при взаимодействии тональной накачки на 16 кГц с НЧ тональным сигналом на 1 кГц (рис.4*а*) значение коэффициента переноса достигало χ≈(1.4…5) Па$^{-1}$.

Поскольку в рамках нелинейной акустики сплошной среды [3] взаимодействие НЧ и ВЧ волн описывается по [4], применим [4] для определения коэффициента нелинейного переноса НЧ сигнала в модуляционные составляющие сигнала реверберации накачки χ_{ZK} по модели взаимодействия Зверева-Калачева, для последующего сопоставления коэффициентов χ_{ZK} и χ.

По [4] при коллинеарном распространении к приемной антенне сигнала с частотой F и сигнала реверберации с частотой $f_н$ на расстоянии r от приемной антенны элементарный вклад $dP_{\pm}(r)$ в давление модуляционной составляющей на частотах $f\pm F$ (в зависимости от текущего значения давления НЧ сигнала $P_F(r)$ и сигнала реверберации $P_{f,R}(r)$) будет равен:

$$dP_{\pm}(r) = \frac{\pi f \varepsilon P_F(r) P_{f,R}(r)}{\rho c^3} dr, \qquad (2)$$

где: c и ρ – скорость звука и плотность воды, ε – параметр нелинейности воды (ε=(γ+1)/2, где γ – показатель степени адиабаты Тэта для воды). Интегрируя и деля (2) на значения давления НЧ сигнала $P_F(0)$·и давления реверберации накачки $P_{f,R}(0)$, приведенные к входу приемной антенны РППА, получим формулу для определения коэффициента преобразования РППА χ_{ZK} ($Па^{-1}$) в рамках акустики сплошной среды при длине зоны формирования РППА, равной L:

$$\chi_{ZK} = \frac{P_{\pm}}{P_F(0) P_{f,R}(0)} = -\frac{1}{P_F(0) P_{f,R}(0)} \int_L^0 \frac{\pi f \varepsilon P_F(r) P_{f,R}(r)}{\rho c^3} dr \quad . \qquad (3)$$

Учитывая, что по результатам моделирования полей реверберации тональной накачки РППА [5] эффективная длинна зоны формирования РППА меньше $1/\alpha_f$, где α_f – коэффициент поглощения на частоте накачки $f_н$, определим $L=1/\alpha_f$. Заменяя в (3) $P_{f,R}(r)$ и $P_F(r)$ на $P_{f,R}(0)$ с с учетом $P_{f,R}(0) \geq P_{f,R}(r)$ и $A_F P_F(L)$ с учетом $A_F P_F(L) \geq P_F(r)$, где A_F – максимальное значение аномалии распространения НЧ сигнала от входа в зону взаимодействия ($L=1/\alpha_f$) до приемной антенны (r=0), можно по (3) определить верхнюю границу χ_{ZK}:

$$\chi_{ZK} < \frac{\pi f \varepsilon}{\rho c^3} \cdot \frac{A_F P_F(L)}{P_F(0)} \cdot \frac{1}{\alpha_f}, \qquad (4)$$

и получить критерий для верификации фактов появления аномальной высокой модуляции реверберации накачки НЧ сигналом:

$$\chi > \chi_{ZK}, \qquad \chi > \frac{\pi f \varepsilon}{\rho c^3} \cdot \frac{A_F P_F(L)}{P_F(0)} \cdot \frac{1}{\alpha_f}. \qquad (5)$$

Обычно значение ε для воды находится в области ε=4 [4], однако в [6], отмечается, что в морских условиях значения ε могут доходить до 60, поэтому при расчетах по (4) примем ε=60. Подставляя в (4) c=1460 м/с, $\rho=10^3$кг/м^3, с учетом выбора явно завышенных значений A_F=10, $P_F(L)/P_F(0)$=3 и ε=60, получим для случая РППА с $f_н$=7 кГц ($1/\alpha_f$=15 км) значения χ_{ZK}<0.19. При этом, заменяя в расчете по (3) $f_н$=7 кГц ($1/\alpha_f$=15 км) на $f_н$=16 кГц ($1/\alpha_f$=3.8 км) получим по (4) значения χ_{ZK}<0.11. Откуда следует, что полученные частные результаты для РППА с накачками $f_н$=7 кГц (рис.3*а*) со значение χ=28 и $f_н$=16 кГц (рис.4*а*) со значение χ от 1.4 до 5 имеют аномально высокие уровни амплитудной модуляции реверберации накачки, так как при этих наблюдениях выполняется критерий (5), $\chi >> \chi_{ZK}$.

Литература

1. Железный В.Б. Причина неприменимости в гидроакустической технике параметрических приемников. //Тр.XI Всеросс. конф. «Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука,2012.С.434-437
2. Turner W.R. Hybrid carrier beam sonar / US Patent № 3870988. 1975.
3. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.
4. Зверев В.А. Калачев А.И. Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн //Акуст. журн., 1970, Т.16, № 2, С.245-251
5. Железный В.Б. Оценка условий превышения сигналов объемной реверберации над сигналами донной и поверхностной реверберации в мелком море. // Тр. XIII Всеросс. конф. «Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2016. С.325-327
6. Бахарев С.А., Дремлюга Г.П., Рогожников А.В., Савенкова В.В. Использование природных феноменов в интересах повышения дальности действия гидроакустических средств с параметрическими антеннами // Морская радиоэлектроника. 2014. № 2 (48), С. 32-37.

О ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН

В.Б.Железный
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

ON THE NOISE STABILITY OF REVERBERATION PARAMETRICAL RECEIVING ANTENNAS

V.B.Zhelezny
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Рассматривается проблема определения помехоустойчивости реверберационных параметрических приемных антенн. Показано, что их помехоустойчивость зависит от параметров радиоэлектронного приемного тракта (нелинейности и динамического диапазона), приемной антенны (чувствительности и коэффициента концентрации) и ряда природных факторов морской среды.

The problem of determination of noise stability of reverberation parametrical receiving antennas is considered. It is shown that their noise stability depends on parameters of radio-electronic receiving subsystem (nonlinearity and dynamic range), receiving antenna (sensitivity and directivity coefficient) and a number of natural factors of marine environment.

Реверберационные параметрические приемные антенны (РППА) [1], появившиеся более 40 лет назад, до сих пор являются наименее изученными и наименее востребованными в гидроакустике, хотя предложения по их применению для шумопеленгования (ШП) поступали постоянно, в том числе и в настоящее время [2-4]. Учитывая специфический характер физических процессов, выявленных в [5], возможности успешного применения РППА, не так очевидны, как может показаться на основе данных [2-4]. По этой причине сложившаяся ситуация явно требует проведения более детальных исследований РППА, а также определения выражения для соотношения сигнал/помеха для РППА с учетом ее специфики работы.

Появление РППА [1] в 70-е годы, было фактически связано с поиском обеспечения возможности сканирования главного максимума характеристики направленности (ХН) классической параметрической приемной антенны (ППА) Зверева-Калачева [6] без поворота ее жесткой базы, которая могла достигать несколько сотен метров. Для решения этой задачи В.Р. Тернером было предложено оригинальное решение, заключавшееся в том, что источником накачки должны были стать природные объекты: дно, поверхность и(или) объёмные рассеиватели (рис.1). По [1] акустический излучатель и приемная антенна сигнала накачки располагались вместе и ориентировались максимумами ХН в одном направлении. При излучении в этом направлении высокочастотного (ВЧ) тонального сигнала накачки частотой $f_н$ часть энергии сигнала накачки рассеивалась в обратном направлении от звукорассеивающих слоев, дна, поверхности или от других отражающих объектов, если такие находились в секторе главного максимума ХН. Соответственно, при обратном распространении рассеянного (отраженного) ВЧ сигнала накачки образовывалась зона нелинейного взаимодействия ВЧ и низкочастотного (НЧ) сигналов с длиной, равной расстоянию от области рассеяния или отражения до приемной ВЧ антенны (рис.1). При ориентации оси ХН приемной антенны накачки на внешний источник НЧ сигнала, в силу наличия нелинейной упругости морской воды, происходила модуляция отраженного ВЧ сигнала накачки этим НЧ сигналом, компоненты которой выделялись приемной ВЧ антенной [1]. При облучении пространства сигналом накачки по другим направлениям появлялась возможность организовывать сканирование пространства путем простого поворота максимума ХН приемной ВЧ антенны. Выделение НЧ сигналов в [1], было аналогично [6], и производилось на основе фазового детектирования сигнала накачки (рис.2).

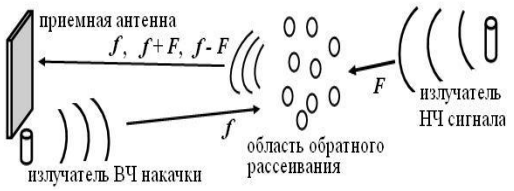


Рис. 1. Принцип действия РППА в воде.

Попытки применения РППА в качестве средств обнаружения слабых НЧ сигналов [2], не только не обеспечили определения области применения РППА, но и не позволили исследовать РППА, как самостоятельный объект. Фактически РППА следовало исследовать при воздействии на них достаточно сильных акустических полей, так как такой подход к ним позволял выявить особенности реакции РППА эти воздействия в разных условиях и специфику достаточно странного механизма образования модуляционных составляющих [5]. Переход к таким исследованиям позволил еще в 1985 году визуально наблюдать (по осциллограммам) аномально высокую амплитудную модуляцию АМ сигнала реверберации накачки при воздействии НЧ сигналов известных уровней [5].

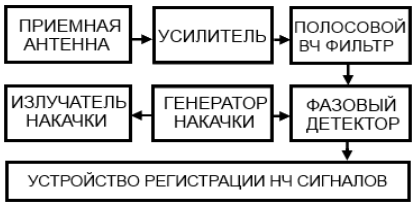


Рис. 2. Схема РППА с фазовым детектированием.

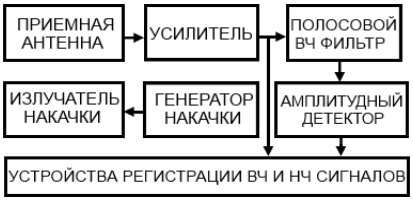


Рис. 3. Схема РППА с амплитудным детектированием.

Это привело к тому, что ряд исследователей стал использовать РППА с АМ детекторами (рис.3), опять же, в целях приема слабых сигналов. При этом, мало кто обратил внимание, что вслед выявлением аномально высокой АМ реверберации тональной накачки [5] встречными НЧ сигналами было обнаружено и ее отсутствие (исчезновение), при смене акваторий и времени (сезона) исследований РППА и ее появление. Эффект носил явно выраженный эпизодический характер. Так, при исследованиях в Баренцевом море в зимних условиях (глубина места 200…230 м) макета РППА [5] с частотой накачки 7 кГц (амплитудой до 70 Па·м), состоящего из приемной антенны с эффективной апертурой 2 на 2.5 м и излучателя накачки диметром около 0.1 м и высотой 0.4 м, осуществлявшей прием НЧ сигналов (частота от 300 до 800 Гц), с расстояния 25-30 км, были получены значения АМ реверберации накачки от 0 до 90% (табл.1)

Таблица 1. Результаты наблюдений наличия и отсутствия АМ реверберации накачки по [5].

Циклы наблюдений	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Пиковое значение P_F на излучателе, Па·м	100	100	100	100	100	100
Давление НЧ сигнала на приемной антенне, Па	0.016	0.023	0.018	0.020	0.016	0.018
Коэффициент АМ сигнала накачки, %	80-90	0	5-7	0	0	0

Для описания эффективности работы РППА в различное время и в различных акваториях, по результатам [5], можно ввести понятие коэффициента нелинейного переноса НЧ сигнала в модуляционные составляющие сигнала объемной реверберации накачки $\chi=P_{F,f,S}/(P_V P_{F,S})$, где P_V и $P_{F,S}$ – значения акустического давления (Па) сигнала объемной реверберации накачки и НЧ сигнала от внешнего источника на приемной антенне РППА при направлении ее максимума ХН по накачке на источник НЧ сигнала, соответственно; $P_{F,f,S}$ - значение акустического давления (Па) модуляционной компоненты сигнала объемной реверберации накачки (в каждой из боковых полос сигнала накачки) на приемной антенне РППА, образовавшейся вследствие нелинейного взаимодействия полей накачки и НЧ сигнала. позволяют

Для определения энергетического отношения сигнал помеха S/N РППА (рис.3) выберем в качестве точки приведения сигнальных и помеховых факторов точку выхода акустической антенны - входа усилителя. В этом случае, при приеме НЧ сигнала, спектральные составляющие которого расположены в диапазоне от F_1 до F_2 с полосой $\Delta F=\left|F_2-F_1\right|$, шириной не более октавы ($\Delta F/f<0.25$; F_1, F_2 – значения нижней и верхней границ НЧ диапазона, соответственно), с переносом его вследствие нелинейного взаимодействия со встречно распространяющимся сигналом накачки частотой f в полосу частот от $f-F_2$ до $f-F_1$ и от $f+F_1$ до $f+F_2$ квадрат напряжения полезного сигнала $U_{F,f,S}$ (В) по выходу приемной антенны РППА в данной полосе комбинационных составляющих амплитудной модуляции накачки будет равен:

$$U^2_{F,f,S}=2\left(\chi P_{F,S}P_V\beta_f\right)^2\left(\frac{P_V}{P_{BSV}+P_a}\right)^2 \qquad (1)$$

где P_{BSV} – значение акустического давления (Па) суммарного сигнала донной, поверхностной и объемной реверберации накачки на приемной антенне РППА при направлении ее максимума ХН по накачке на источник НЧ сигнала; P_a – значение акустического давления (Па) мешающего сигнала, проникающего на приемную антенну от излучателя накачки; β_f – чувствительность (В/Па) антенны РППА в приеме на частоте накачки и в области ее боковых полос; отношение $P_V/(P_{BSV}+P_a)$ характеризует снижение уровня модуляционных составляющих сигнала объемной реверберации накачки в силу попадания на приемный тракт РППА сигналов донной, поверхностной реверберации и части энергии излучаемого сигнала накачки. Отметим, что в силу нестабильности модуляции сигнала объемной реверберации накачки НЧ акустическим сигналом от внешнего источника [5], значения χ в экспериментах варьировались от 30 $Па^{-1}$ до значений,

стремящихся к нулю, в зависимости от изменения химического и микроструктурного состава морской воды и внешних условий.

Суммарная помеха на входе приемного тракта РППА определяется вкладом ряда нескольких видов разнородных помех. Рассмотрим эти помехи РППА по отдельности.

Напряжение помехи $U_{f,a}$ (В) на выходе приемной антенны, вызванное влиянием акустических шумов моря с уровнем $p_{f,ш}$ (Па/Гц$^{0.5}$) в области симметричных боковых полос накачки f определяется традиционным способом:

$$U_{f,N}^2 = \frac{2\beta_f^2 p_{f,ш}^2 \Delta F}{K_{K,f}} \tag{2}$$

где $K_{K,f}$ – коэффициент концентрации приемной антенны РППА на частоте накачки f.

Еще на вход приемного тракта РППА будет попадать помеха, вызванная параметрическим переносом НЧ помех акватории и дальнего судоходства в область боковых полос частот накачки. Для определения напряжения $U_{F,f,N}$ этой помехи (приведенной к входу приемного тракта РППА в полосе частот от f-F_2 до f-F_1 и от f+F_1 до f+F_2) рассмотрим случай изотропного распределения микроструктурного и химического состава морской среды в области размещения РППА. При выполнении этих условий амплитуда давления P_V сигнала объемной реверберации, приходящая с любого направления, будет одинакова в силу изотропного распределения рассеивающих структур и большой длительности сигнала накачки. Также в силу этого условия и значение коэффициента χ для данного конкретного состава морской воды будет постоянным и не зависеть от направления ориентации приемной антенны РППА. В этом случае при встречном нелинейном взаимодействии в среде сигнала накачки с акустическими НЧ шумами моря уровень модуляционных составляющих $P_{F,f,N}$ (Па), вызванных шумами моря в каждой полосе частот от f-F_2 до f-F_1 и от f+F_1 до f+F_2, будет изотропен по направлению и равен:

$$P_{F,f,N} = \chi P_V p_{F,N} \sqrt{\Delta F}$$

где $p_{F,N}$ – спектральная плотность (Па·Гц$^{-0,5}$) НЧ шумов моря, приходящих в направлении приемной антенны из дальнего поля. Соответственно, ослабление $P_{F,f,N}$ (3) на приемной антенне будет определяться ее ХН на частоте накачки так же, как и для антенн традиционного типа:

$$P_{F,f,N}(\theta,\varphi) = P_{F,f,N}(0,0) D_f(\theta,\varphi) = \chi P_V p_{F,N} \sqrt{\Delta F}\, D_f(\theta,\varphi) \tag{3}$$

где $D_f(\theta,\varphi)$ – функция ХН приемной антенны РППА на частоте накачки (максимум ХН определяется как $D_f(\theta,\varphi)=D_f(0,0)$); θ и φ – углы в сферической системе координат. Так как (3) аналогична традиционному выражению, определяющему пространственное подавление акустических шумов акватории приемной антенной, то уровень напряжения модуляционных помех в диапазоне накачки, вызванных акустическими НЧ шумами моря, может быть выражен через коэффициент концентрации $K_{K,f}$ приемной антенны РППА на частоте накачки f:

$$U_{F,f,N}^2 = \frac{2\Delta F \left(\beta_f \chi p_{F,N} P_V\right)^2}{K_{K,f}} \left(\frac{P_V}{P_{BSV} + P_a}\right)^2 \tag{4}$$

Величина $P_V/(P_{BSV}+P_a)$ в (4) имеет тот же смысл, что и в выражении (1).

С учетом того, что усилители приемного тракта РППА сами являются нелинейными элементами, в них будут происходить нелинейные взаимодействия входных сигналов НЧ помехи с сигналом накачки радиоэлектронной части приемного тракта РППА с переносом НЧ помехи в область симметричных боковых полос накачки. При превышении напряжения сигнала накачки над напряжением НЧ сигналов по выходу приемной антенны и отсутствии перегрузки усилителей этот вид помехи может быть учтен через коэффициент нелинейных модуляционных искажений в приеме k_{HM} в форме:

$$U_{F,f,MN}^2 = k_{HM}^2 \frac{2\beta_F^2 \Delta F \left(p_{F,N} + p_{F,g}\right)^2}{K_{K,F}} \tag{5}$$

где $U_{F,f,MN}$ – приведенное к входу приемного тракта РППА в полосах частот от f-F_2 до f-F_1 и от f+F_1 до f+F_2 эффективное значение напряжения (В), вызванное собственными нелинейными модуляционными искажениями в радиоэлектронном тракте РППА; β_F – чувствительность антенны при приеме НЧ сигналов в диапазоне от F_1 до F_2; $p_{F,g}$ – НЧ акустическая помеха ближнего поля шумами носителя РППА в полосе частот F_1 до F_2, $K_{K,F}$ – коэффициент концентрации приемной антенны в полосе частот F_1 до F_2.

Эффективное напряжение U_{UN} (В) собственной электрической помехи приемного тракта РППА в области боковых полос сигнала накачки традиционно определяется свойствами входных усилителей. При полном использовании сигналом накачки динамического диапазона входного усилителя РППА в области частот накачки связь U_{UN} со значениями динамического диапазона $k_{ДД}$ и значением напряжения сигнала накачки по выходу приемной антенны РППА $U_f=\beta_f(P_{BSV}+P_a)$ будет определяется в форме:

$$U_{UN}^2 = \frac{\beta_f^2 \left(P_{BSV}+P_a\right)^2}{k_{ДД}^2} \tag{6}$$

Используя выражения для напряжения полезного сигнала (1) и напряжений помех (2,4-6), можно построить полное выражение для определения отношения полезного сигнала к помехе S/N по мощности в полосах частот от f-F_2 до f-F_1 и от f+F_1 до f+F_2:

$$\frac{S}{N} = \frac{2\left(\frac{\beta_f \chi P_{F,S} P_V^2}{\left(P_{BSV}+P_a\right)}\right)^2}{\frac{2\Delta F\left(\beta_f \chi p_{F,N} P_V^2\right)^2}{K_{K,f}\left(P_{BSV}+P_a\right)^2} + k_{HM}^2 \frac{2\beta_F^2 \Delta F\left(p_{F,N}+p_{F,g}\right)^2}{K_{K,F}} + \frac{2\beta_f^2 p_{f,ш}^2 \Delta F}{K_{K,f}} + \frac{\beta_f^2\left(P_{BSV}+P_a\right)^2}{k_{ДД}^2}} \tag{7}$$

Полученные результаты по помехоустойчивости РППА на данном этапе показывают сильную зависимость помехоустойчивости РППА от параметров радиоэлектронного приемного тракта – его нелинейности и динамического диапазона, приемной антенны - чувствительности и коэффициента концентрации частоте накачке и НЧ сигнала, и от природных факторов - уровня объемной реверберации накачки в акватории и отношения уровня объемной реверберации накачки к уровню суммарной реверберации (с учетом прямого проникновения в тракт части поля накачки с излучателя), а также от характером проявления аномально высокой амплитудной модуляции объемной реверберации накачки при встречном взаимодействии сигнала накачки с принимаемыми низкочастотными сигналами.

Литература

1. Turner W.R. Hybrid carrier beam sonar / US Patent № 3870988. 1975.
2. Бахарев С.А., Дремлюга Г.П., Рогожников А.В. К вопросу обеспечения навигационной безопасности мореплавания многофункционального подводного судна // Морская радиоэлектроника. 2011. № 1 (35), С.36-41
3. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Василенко А.М., Карачун Л.Э., Леоненков Р.В. Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2014
4. Бахарев С.А., Дремлюга Г.П., Рогожников А.В., Савенкова В.В. Использование природных феноменов в интересах повышения дальности действия гидроакустических средств с параметрическими антеннами // Морская радиоэлектроника. 2014. № 2 (48), С. 32-37.
5. Железный В.Б. Причина неприменимости в гидроакустической технике параметрических приемников. //Тр.XI Всеросс. конф. «Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2012. С.434-437
6. Зверев В.А. Калачев А.И. Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн //Акуст. журн., 1970, Т.16, № 2, С.245-251

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛУЧЕВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ

А.С.Корецкая, В.С.Мелькановичканд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

IMPLEMENTATION OF THE RAY METHOD OF HYDROACOUSTIC SIGNAL SOURCE POSITION DETERMINATION BASED ON INTELLECTUAL COMPARISON

A.S.Koretskaya, V.S.Melkanovich, Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Рассмотрен вариант реализации лучевого метода оценки дальности и глубины на основе интеллектуальной системы отбора гипотез дальности и глубины по углам прихода лучей и задержкам. Достоинствами предложенного подхода являются возможность осуществлять настройку алгоритма на основе анализа текущего замера и особенностей гидрологических условий, а также наглядность процесса принятия решения.

The variant of realization of the ray method of range and depth estimation based on intellectual system of range and depth hypotheses selection on ray arrival angles and delays is considered. Advantages of proposed approach are possibility to configure the algorithm based on current measurement analysis and hydrological conditions features and visibility of decision-making process.

Разработка алгоритмов пассивного определения дистанции и глубины цели по информации гидроакустических средств актуальна для целого ряда практических приложений. В зависимости от используемых свойств гидроакустического сигнала можно выделить три группы методов пассивного определения координат: геометрические, спектральные и пространственно-временные.

Пространственно-временные методы основываются на анализе гидроакустического поля, сформировавшегося в точке приема, с учетом особенностей распространения в среде. К методам этой группы может быть отнесено семейство, именуемое «matched-field processing» [1,2], что трактуется как обработка, согласованная с полем.

Один из подходов к решению этой задачи – метод, именуемый лучевым, который состоит в решении обратной задачи распространения, заключающейся в построении траекторий лучей, соответствующих измеренным параметрам, и определении координат точек их пересечения как потенциальных координат источника излучения. Суть метода состоит в расчете наиболее правдоподобной области пересечения лучей, соответствующих измеренным углам приема и временны́м задержкам в приеме сигнала по разным лучам. Объединение координат, полученных попарным пересечением лучей, осуществляется с использованием различных методик, в частности на основе кластеризации и поиска кластера с минимальной суммой декартовых расстояний между измеренными и прогнозными задержками попарных пересечений, вошедших в кластер.

Недостатками лучевого метода являются чрезвычайно высокая чувствительность к точности измерения углов прихода лучей, а также неочевидные процедуры оптимизации оценок углов, объединения попарных пересечений, кластеризации и осреднения дальности и глубины в пределах кластера.

Альтернативный подход – решение обратной задачи через массовое решение прямой – основан на сопоставлении параметров, описывающих поле принятого сигнала, с прогнозными значениями, полученными с использованием расчета гидроакустического поля для совокупности гипотез о положении источника сигнала по сетке дальность-глубина.

Методы, основанные на этом подходе, позволяют использовать дополнительную информацию о принятом сигнале для определения дальности и глубины. Их недостатком являются существенные вычислительные затраты при реализации, связанные с необходимостью обработки базы прогноза большого объема.

Для решения этой проблемы в [3] предложен подход, использующий технологию индексного поиска и позволяющий кардинально сократить число рассматриваемых альтернатив.

В [4] описан алгоритм нечеткого вывода, позволяющий при выполнении отбора учитывать степень близости по каждому из параметров и их значимость. Алгоритм заключается в формировании базы правил нечеткого вывода и функций принадлежности. Функция принадлежности ставит в соответствие каждому значению входной переменной некоторое число из интервала [0, 1]. Чем в большей степени значение переменной обладает рассматриваемым свойством, тем более близко к 1 должно быть значение ее функции принадлежности, и наоборот. Значение ре-

зультирующей переменной вычисляется, подставляя значения функций принадлежности каждого из параметров в правила вывода.

Для оценки близости гипотезы к принятому сигналу на вход алгоритма поступает набор параметров, описывающих эту гипотезу, а на выходе получается значение, характеризующее степень совпадения значений этих параметров с теми же параметрами принятого сигнала.

Выбранный вариант алгоритма нечеткого вывода в сочетании с технологией индексного поиска позволяет создать интеллектуальную систему (ИС), которая путем анализа особенностей замеренных параметров принятого сигнала может осуществить параметрическую настройку алгоритма, а также дает возможность непосредственно управлять процессом принятия решения в реальном масштабе времени. Настойка алгоритма может быть осуществлена исходя из следующих принципов.

- В случае большого количества отобранных гипотез, ИС позволяет уменьшить ширину части функций принадлежности и таким образом отбросить ложные гипотезы.
- Если обнаружен один корреляционный максимум (КМ) и лучи разрешаются, то ИС позволяет задать увеличенные значения коэффициентов относительной важности углов прихода лучей и уменьшить ширину их функций принадлежности, так как в этой ситуации есть возможность измерить углы прихода с высокой точностью.
- Если обнаружено несколько КМ, то определение углов прихода лучей затруднено. Уменьшение значений коэффициентов относительной важности углов прихода и увеличение ширины их функций принадлежности при одновременном повышении коэффициентов относительной важности задержек позволяет получить решение. Также есть возможность вообще отказаться от использования углов. Кроме этого, ИС позволяет задать коэффициенты относительной важности обнаруженных задержек КМ пропорционально их уровню, так, чтобы задержка главного КМ имела наибольший вес.
- В случае, когда лучи не разрешаются, то есть их отклики в канале обзора сливаются, информативным оказывается положение глобального максимума в энергетической развертке, а значения коэффициентов относительной важности углов должны быть уменьшены при увеличении ширины функций принадлежности соответственно.

Отметим, что ИС позволяет также учитывать особенности текущих гидрологических условий. Так, в работе [5] рассматривалась проблема пропуска решения из-за недостаточной густоты сетки прогноза. Чтобы избежать пропуска решения, для каждой точки по дальности и глубине может быть вычислено минимально допустимое значение ширины функции принадлежности для каждого из параметров.

Широкие возможности управления ИС позволяют реализовать различные стратегии получения оценок, в частности, достаточно удобно может быть реализован алгоритм, основанный на тех же принципах и том же наборе входных данных, что и лучевой метод. Предлагаемый нами вариант реализации основан на сопоставлении замеренных углов прихода лучей и задержек с прогнозными параметрами, рассчитанными исходя из заданного разреза скорости звука для набора гипотез дальности и глубины, взятых по сетке с некоторым шагом.

Расчет степени близости параметров гипотезы положения к параметрам принятого сигнала предлагается осуществлять на основе алгоритма нечеткого вывода, в наибольшей степени адаптированного к идеям лучевого метода.

Рассмотрим примеры работы алгоритма, а также возможности повышения качества оценок путем его настройки.

На рис. 1 представлены результаты работы алгоритма, когда источник сигнала находится в точке с индексами 50 по дальности (d) и 6 по глубине (h) в летних гидрологических условиях Норвежского моря.

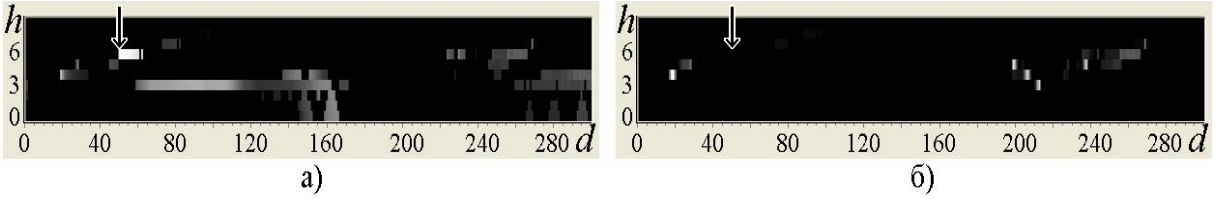


Рис. 1. Совокупность отобранных гипотез: а) – значения параметров замера заданы точно; б) – потеря правильного решения при ошибке оценки угла прихода наиболее интенсивного луча на 0.3º

Из этой точки в соответствии с прогнозом приходит 2 луча, которые порождают один КМ. Яркостью отображается степень близости параметров замера к параметрам каждой из гипотез дальности и глубины. Светлые зоны соответствуют наиболее близким к замеру гипотезам. Стрелкой показано фактическое положение источника сигнала.

На рис. 1а формирование замера и базы осуществлялось на основе значений, рассчитанных единой программой гидроакустических расчетов. В результате наиболее яркая зона соответствует фактическому положению источника сигнала.

При реализации лучевого метода ключевым вопросом является определение углов прихода лучей. При обратной прокладке лучей положение точек пересечения напрямую определяется заданием углов прихода. Ошибки неизбежно приводят к отклонениям точки пересечения от фактического положения источника сигнала (рис. 1б). Значение угла прихода наиболее интенсивного луча задано равным 3.45º (вместо 3.15º). Угол прихода второго по интенсивности луча и задержка заданы без ошибок. Ответом алгоритма служит точка (17;4), что не соответствует истинному положению источника сигнала. Таким образом, ошибка по углу прихода наиболее интенсивного луча на 0.3º привела к потере правильного решения.

Предлагаемый вариант реализации позволяет решить эту проблему путем увеличения ширины функции принадлежности для углов (рис. 2а).

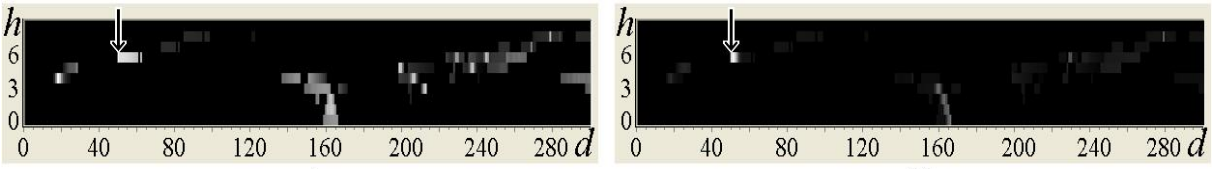


Рис. 2. Совокупность отобранных гипотез: а) – увеличена ширина функции принадлежности для углов; б) – ложные альтернативы отброшены за счет увеличения значения коэффициента относительной важности задержки КМ

Можно видеть, что в данном случае правильное решение не потеряно, но кроме него есть еще несколько ярких зон и невозможно определить, какая из них соответствует истинному положению источника сигнала. В этой ситуации целесообразно увеличить коэффициент относительной важности задержки КМ и уменьшить ширину ее функции принадлежности (рисунке 2б). В результате удается отбросить все ложные гипотезы.

Рассмотрим особенности работы алгоритма при обнаружении нескольких КМ.

Определение углов прихода лучей в этом случае является затруднительным, а объединение координат попарных пересечений, полученных прокладкой лучей по углам прихода, измеренным с ошибками, неизбежно приведет к ошибкам оценки дальности и глубины.

Предлагаемый вариант реализации естественным образом осуществляет объединение данных всех результатов замера, а задание широких функций принадлежности для углов прихода лучей обеспечивает устойчивость к ошибкам оценивания углов.

На рис. 3 представлены результаты работы алгоритма, когда источник сигнала находится в точке с индексами 100 по дальности и 5 по глубине в осенних гидрологических условиях Японского моря. В соответствии с прогнозом, при таком положении источника сигнала может быть обнаружено 6 КМ. На рисунке 3а можно видеть несколько ярких зон.

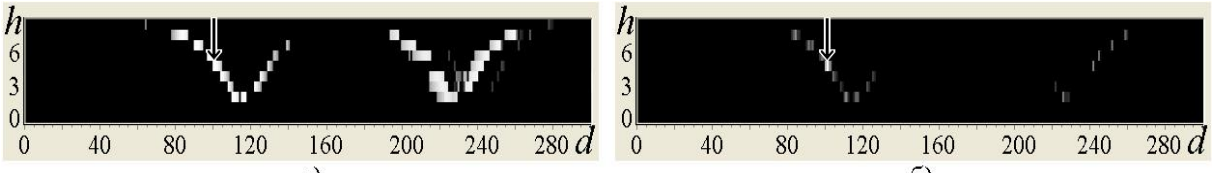
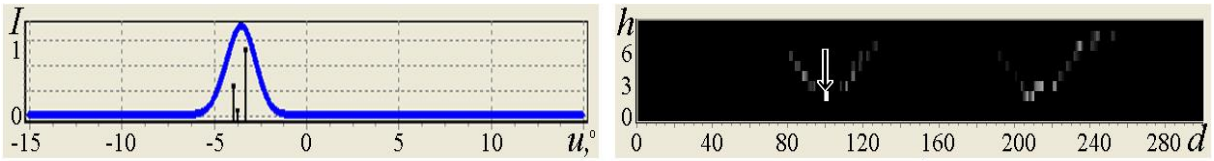


Рис. 3. Результат работы алгоритма: а) – задана большая ширина функций принадлежности для углов; б) – ложные альтернативы отброшены путем повышения коэффициентов относительной важности задержек и уменьшения ширины их функций принадлежности

Повышение коэффициентов относительной важности задержек и уменьшение ширины их функций принадлежности при одновременном понижении коэффициентов относительной важности углов позволяет отбросить ложные альтернативы (рис. 3б).

И наконец, рассмотрим ситуацию, когда лучи не разрешаются. На рисунке 4а представлена картина вертикального обзора, сформированная суперпозицией 3-х лучей, приходящих из точки с координатами (100;2) в осенних гидрологических условиях Японского моря.



а) б)

Рис. 4. Лучи не разрешаются: а) – картина вертикального обзора;
б) – результат работы алгоритма

В этой ситуации отклики трех лучей в канале обзора сливаются, и определение углов прихода каждого из лучей является затруднительным. Кроме этого, три луча порождают 3 КМ, и определение того, какой из КМ соответствует каким лучам, является неразрешимой задачей.

Предлагаемый вариант реализации позволяет не соотносить задержки с углами прихода лучей, а работать по той информации, которая имеется. Так, в рассматриваемой ситуации целесообразно использовать для отбора задержки трех КМ, а также угловую координату глобального максимума в энергетической развертке, отказавшись от попыток оценки углов прихода лучей. Результат работы алгоритма по этим данным приведен на рисунке 4б.

Определить истинное положение источника сигнала оказалось возможным благодаря использованию дополнительного параметра – положения глобального максимума в энергетической развертке. Кроме него могут быть использованы и другие дополнительные параметры, например, относительные интенсивности лучей или КМ.

Таким образом, разработанная ИС обладает широкими возможностями по управлению, параметрической настройке и исследованию эффективности и надежности алгоритмов оценки дальности и глубины источника сигнала. Предложенный вариант реализации лучевого метода обладает повышенной устойчивостью к ошибкам измерения углов прихода лучей и позволяет показать наглядную картину, отображающую зоны возможных положений источника сигнала по дальности и глубине.

Литература

1. Bucker H.P. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 59, № 2. P. 368–373.
2. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. «An overview of matched field methods in ocean acoustics» // IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 18, No. 4. October 1993. P. 401–424.
3. Корецкая А.С., Мельканович В.С. Определение координат источника гидроакустического сигнала с использованием технологии индексного поиска // Гидроакустика. 2015. Вып. 21 (1). С. 68–75.
4. Корецкая А.С., Мельканович В.С. Определение координат источника гидроакустического сигнала с использованием методов нечеткого вывода // Гидроакустика. 2016. Вып. 25 (1). С. 62–66.
5. Корецкая, А. С. Повышение густоты сетки прогноза по дальности и глубине при решении задачи оценки координат источника сигнала // Сб. докл. 3-й объед. конф. молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2013. С. 174–177.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОГО КАНАЛА ГИДРОЛОКАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А.Е.Карпенко, Е.В.Курдюмов
АО «Научно-исследовательский инженерный институт», Балашиха, Московская обл., Россия

MODELING OPERATION OF SONAR CORRELATION CHANNEL WITH THE USE OF FULL-SCALE EXPERIMENT SIGNALS

A.E.Karpenko, E.V.Kurdyumov
JSC «Scientific-Research Engineering Institute», Balashikha, Moscow Region, Russia

Представлена модель корреляционного канала гидролокатора, выполненная в среде LabView. Приведены описание натурного эксперимента и результаты натурных работ с записями сигналов гидролокатора по грунту и модельной цели, в качестве которой использована пустотелая сфера. Проведен анализ корректности работы модели. На основе натурных записей сигналов проведена оценка работы корреляционного канала гидролокатора для различных пространственных ситуаций модельной цели и грунта.

The model of the sonar correlation channel performed in the LabView environment is presented. The description of the full-scale experiment and the results of field works with recordings of sonar signals at the ground and the model target are given. The hollow sphere was used as the model target. The analysis of the model correctness is carried out. The estimation of sonar correlation channel operation was performed for various spatial situations of the model target and ground on the basis of full-scale signal records.

Одной из проблем осуществления подводной локации объектов является эффективность работы в условиях наличия сигналов от границ раздела сред, прежде всего сигналов, отраженных от грунта. Это относится к условиям пространственного расположения объекта локации и грунта относительно места положения гидролокатора, при котором сигнал от объекта скрыт в сигнале, отраженном от грунта, то есть локационное расстояние до объекта локации и грунта примерно одинаково.

Как известно [1], коэффициент корреляции сигналов, отраженных от грунта, в зависимости от характера грунта и угла его лоцирования может достигать единицы, что соответствует уровню коэффициента корреляции от сосредоточенного отражателя. В представленном докладе проведен анализ работы корреляционного канала гидролокатора специального назначения в «мелком» море при расположении сигнала локации сосредоточенного отражателя на различных участках сигнала локации грунта.

В качестве исходных для анализа использовались результаты натурных экспериментов, которые проводились на участках морской акватории с глубинами 50-60 метров и 230-240 метров. Характер грунта при глубине 50-60 м – ровный, песчано-илистый с отдельными скальными включениями, при глубине 230-240 м ровный, песчано-илистый.

Гидролокатор располагался на глубине 10 м. Однолепестковая диаграмма направленности гидролокатора шириной ~60 градусов направлена вниз. В качестве лоцируемых объектов использованы пустотелые сферы с эквивалентным радиусом 0,35 и 0,7 м. В процессе натурного эксперимента выполнено более 100 опытов для глубины установки отражателей и дистанций их горизонтального смещения от гидролокатора до 30-40 метров с записью в цифровом виде основных сигналов функционирования гидролокатора. Рабочая частота гидролокатора составляла 50 кГц, длительность посылки – 6 мс, зондирующий сигнал – фазоманипулированная М-последовательность.

Взаимнокорреляционная обработка производилась между сигналами приемных элементов антенны гидролокатора, расположенных на расстоянии, составляющем 4 длины волны. Для исключения неоднозначности корреляционная обработка выполняется циклически по 8 каналам с фазовым сдвигом каждого канала относительно предыдущего на 45 градусов с накоплением в реальном времени сигнала обработки на интеграторе с заданным фиксированным порогом.

В среде программирования LabView реализована модель обработки сигнала аналогичная использованной в гидролокаторе. Адекватность математической модели канала корреляционной обработки гидролокатора проверялась путем сравнительного анализа работы модели и канала гидролокатора по результатам натурного эксперимента. Сравнительный анализ подтвердил адекватность работы модели более чем в 80% опытов.

На рис. 1 представлена осциллограмма с информацией по результатам работы модели для одного периода лоцирования гидролокатора.

В связи с ограниченными возможностями выполнения натурного эксперимента по глубинам расположения лоцируемых объектов, оценка работы корреляционного канала гидролока-

тора по сигналу отражателя, «скрытому» в сигнале грунта, выполнялась с использованием математической модели путем корреляционной обработки созданного имитационного сигнала.

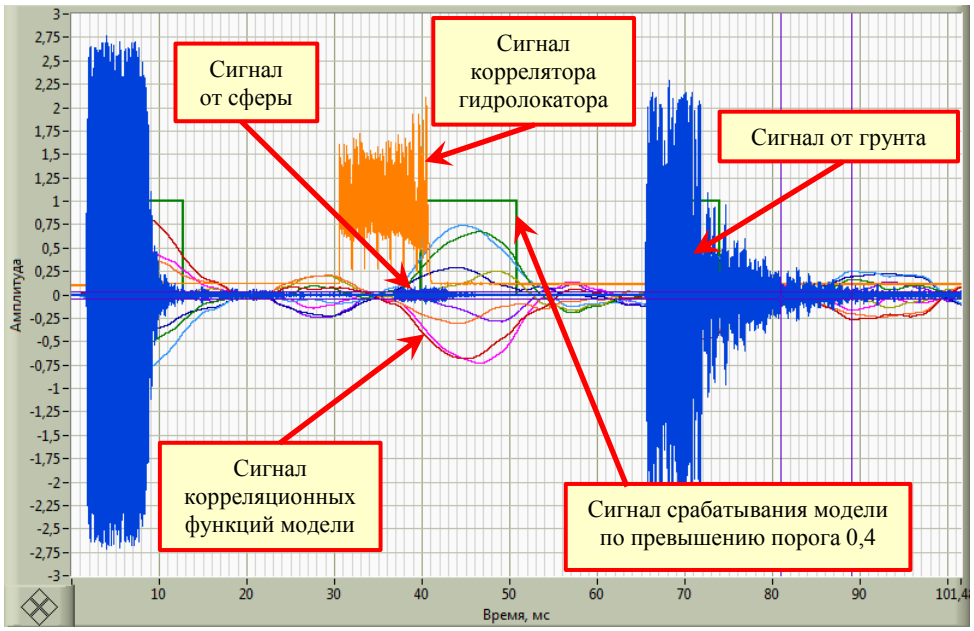


Рис. 1. Осциллограмма результатов работы модели корреляционного канала.

Имитационный сигнал формировался на основе записанного в натурном эксперименте сигнала, принятого гидролокатором в течение локационного периода. Фрагмент сигнала соответствующий длительности принятого сигнала отражателя копировался в область сигнала, отраженного от грунта путем суммирования. Копирование производилось с различными коэффициентами трансформации (усиления, ослабления) сигнала для различных задержек от момента прихода сигнала, отраженного от грунта. Копирование сигнала производилось отдельно для каждого периода лоцирования и каждого из 2-х каналов.

Далее выполнялась взаимнокорреляционная обработка полученных сигналов с использованием математической модели.

На рис. 2 в качестве иллюстрации показаны осциллограммы с результатами работы модели корреляционного канала гидролокатора для опытов со сферой эквивалентного радиуса 0,35 метра при локационном расстоянии 26 метров и глубине моря (расстояния от гидролокатора до дна) 50 метров. Имеет место срабатывание корреляционного канала модели по зондирующему сигналу гидролокатора, по сигналу отражателя, по сигналу от грунта в начальный момент его появления. Срабатывание от отражателя происходит совместно с моментом срабатывания корреляционного канала гидролокатора при проведении натурных опытов. На левом фрагменте рисунка, содержащем внедренный в грунт сигнал отражателя с коэффициентом трансформации К=4 и задержкой относительно начала сигнала грунта на t=15 мс, имеется срабатывание корреляционного канала модели. Аналогичная картина имеет место на правом фрагменте рисунка для К=1 и t=30 мс.

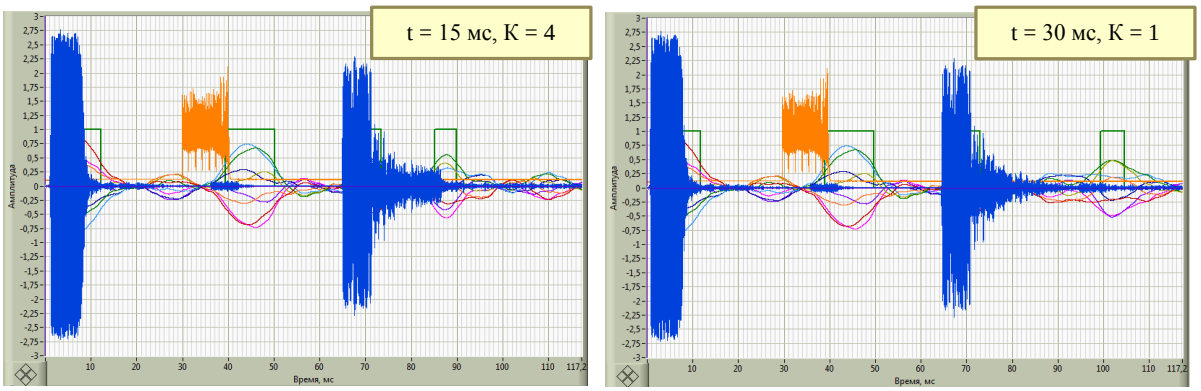


Рис. 2. Осциллограммы модели корреляционного канала при глубине моря 50 метров.

На рис. 3 показаны аналогичные осциллограммы (только для участка начала сигнала от грунта) для опытов со сферой эквивалентного радиуса 0,7 м при локационном расстоянии 16 метров и глубине моря 235 метров.

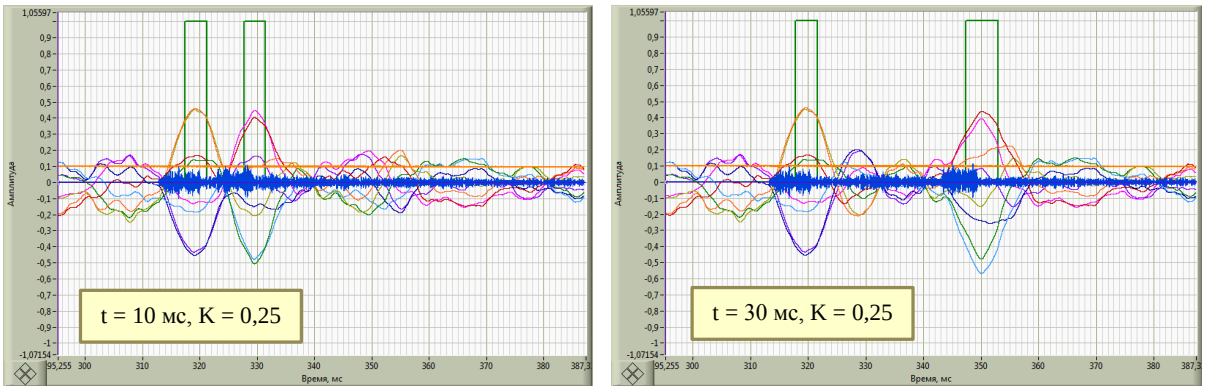


Рис. 3. Осциллограммы модели корреляционного канала при глубине моря 235 м.

На рис. 4 (см. вклейку) показаны полученные в математической модели графики значений коэффициентов корреляции для различных K и t при глубинах моря 50 и 235 м в зависимости от угла лоцирования в луче диаграммы направленности гидролокатора. Угол лоцирования отсчитывается от направления оси диаграммы направленности гидролокатора на грунт.

Как следует из графиков, для глубины 50 м имеется начальный участок сигнала грунта, на котором коэффициент корреляции не превосходит порогового значения 0,4 даже при увеличении эквивалентного радиуса отражателя до 2,8 м. В то же время для участка сигнала грунта с направлением луча диаграммы направленности более 40º имеет место превышение коэффициентом корреляции порогового значения канала корреляционной обработки модели.

Для глубины 235 м имеется небольшой начальный участок сигнала от грунта, при котором коэффициент корреляции не превосходит порогового значения при эквивалентном радиусе отражателя 0,07 м. Для больших значений эквивалентного радиуса отражателя имеет место устойчивое срабатывание на всей протяженности сигнала от грунта.

Для обоих значений глубины моря имеет место существенный спад коэффициента корреляции при отклонении угла лоцирования от вертикали, что согласуется с литературными источниками [1, 2].

Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что в случае попадания сигнала, отраженного от объекта, в сигнал грунта существует возможность его выделения корреляционным способом в зависимости от силы цели и места нахождения сигнала объекта локации в сигнале грунта.

Представленные материалы носят предварительный характер и служат для определения возможности построения математической модели корреляционного канала гидролокатора с использованием имитационного сигнала, построенного на основе сигналов натурного эксперимента. Работы будут продолжены в 2018 году с целью набора статистики и уточнения математической модели.

Литература

1. Воловов В.И., Лысанов Ю.П., Сечкин В.А. Корреляция отраженных от дна псевдошумовых сигналов с излучением // Акустический журнал. - 1979. - Т. XXV. - Вып. 5.
2. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. - Судостроение, 1978.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИСТАТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

М.Б.Салин, канд.физ-мат.наук, О.А.Потапов, А.В.Стуленков, Д.Д.Разумов
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

EXPERIMENTAL STUDY OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF BISTATIC SURFACE REVERBERATION

M.B.Salin, Ph.D., O.A.Potapov, A.V.Stulenkov, D.D.Razumov
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

В докладе будут представлены результаты эксперимента по исследованию дальней поверхностной реверберации в глубоководной части Черного моря. В опыте излучались тональные импульсы с частотой заполнения около 2 кГц и длительностью, достаточной для проведения узкополосного спектрального анализа. Источник и приемник акустических сигналов были разнесены по акватории, поэтому направленный прием и стробирование по времени позволили изучать различные ситуации: просветное рассеяние, бистатическое рассеяние, моностатическое (обратное) рассеяния. В работе анализируются доплеровские спектры рассеяния при различных значениях бистатического угла рассеяния.

The report will present the results of an experiment to investigate long-range surface reverberation, which was carried out in the deep-water part of the Black Sea. In the experiment, tonal pulses were emitted with a frequency of about 2 kHz and duration sufficient for narrowband spectral analysis. The source and receiver were located in a certain distance from each other. Therefore directional reception and time-gating of the received signal allowed to explore different situations: forward scattering, bistatic scattering and monostatic scattering (backscattering). Doppler spectra of scattering for different values of bistatic scattering angle are analyzed.

Ветровое волнение на поверхности моря является одним из явлений, которое существенно влияет на характеристики распространения акустических сигналов в море. «Лакмусовой бумагой», свидетельствующей о влиянии поверхностного волнения на распространение звука, можно назвать изменение спектра принятого активного сигнала. Целью представленного здесь исследования являлось повторение результатов ранних камчатских экспериментов [1-2] в другом диапазоне частот и при более тщательном измерении гидрофизических параметров. Также целью было опробовать предложенный в [3] метод измерения бистатических характеристик силы рассеяния среды.

Акустические сигналы, зарегистрированные в эксперименте на линейную горизонтальную решетку гидрофонов обрабатывались следующим образом. В первую очередь выполнялось гетеродинирование на несущей частоте. Далее производилось фазирование антенны по набору пеленгов путем умножения сигналов с гидрофонов на фазовые множители и последующего сложения. Затем по каждому направлению производилось вычисление текущих (скользящих) спектров с длиной окна равной длине исходного импульса с перекрытием окон 75%. В итоге, данные были представлены в виде распределения интенсивности $p^2(\tau_j, f_k, n, \theta_m)$ по переменным: τ_j -задержка от момента прихода прямого сигнала, f_k,- частота Доплера, n – порядковый номер импульса и θ_m – пеленг.

Результаты эксперимента сравнивались с двумя моделями реверберации:

модель брэгговского рассеяния (традиционно применяемая для низкочастотного звука),

модель рассеяния на движущихся приповерхностных пузырьках [2].

Суммарный уровень рассеяния, полученный интегрированием спектра рассеяния по всем частотам Доплера, включая нулевую, соответствует известным ранее результатам измерений поверхностной моностатической реверберации, которые проводились с использованием взрывных источников. В свою очередь, интегрирование по полосам частот Доплера, характерным для брэгговского рассеяния на поверхностных волнах, приводит к более низким уровням рассеяния, чем ожидалось в рамках брэгговской модели теории рассеяния.

В целом можно заключить, что в условиях эксперимента (частота сигнала 2 кГц, сила ветра 6 м/с) наиболее интенсивный сигнал дальней реверберации принимался с незначительным уширением полосы частот по сравнению с исходной посылкой. Такой реверберационный сигнал был порожден по-видимому рассеянием на приповерхностных неоднородностях в виде воздушных полостей и пузырьков от обрушающихся волн. Форма и уровни спектров рассеяния согласуются с результатами работы [2], где ранее изучался данный эффект.

Литература

1. Авербах В.С., Бондарь Л.Ф., Голубев В.Н. и др. Дальняя поверхностная реверберация звука в океане // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 6. С. 1119-1121.
2. Салин Б.М., Кемарская О.Н., Молчанов П.А., Салин М.Б. Исследование механизма уширения спектра низкочастотного реверберационного сигнала при рассеянии звука на приповерхностных неоднородностях в условиях интенсивного ветрового волнения // Акуст. журн. 2017. Т. 63. №3. С.314-322.
3. Салин Б.М., Салин М.Б. Методы измерения бистатических характеристик рассеяния звука дном и поверхностью // Акуст. журн. 2016. Т. 62. №5. С. 573-581.

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОМЕХ К ЗАДАЧЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В ПРИСУТСТВИИ ДИСКРЕТНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА

П.Д.Колбин, В.С.Мелькановичканд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

APPLICATION OF ADAPTIVE RESTRICTION OF NOISE POWER TO THE PROBLEM OF CORRELATION ANALYSIS IN THE PRESENCE OF SIGNAL DISCRETE SPECTRAL COMPONENTS

P.D.Kolbin, V.S.Melkanovich, Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Рассмотрен вопрос вычисления взаимно корреляционной функции (ВКФ) сигналов пространственных каналов по выходу гидроакустической станции в условиях наличия дискретных составляющих (ДС). Применение адаптивного ограничения мощности помех обеспечивает ослабление в ВКФ мешающей синусоидальной компоненты, обусловленной наличием ДС в полезном сигнале, локальной и структурной помехах. Моделированием показана эффективность предложенного подхода в условиях наличия резко нестационарных, как по уровню, так и по частоте ДС.

The question of calculation cross-correlation function (CCF) of signals from the space channels on the exit of sonar system in the conditions of discrete components (DC) presence is considered. Application of adaptive restriction of noise power provides weakening in the CF interfering sinusoidal components, caused by DC presence in the useful signal, local and structural noise. Modeling showed efficiency of the offered approach in the conditions of presence of sharply non-stationary, both on level and on frequency DC.

Решающим фактором для обеспечения работоспособности ряда методов, применяемых в современных гидроакустических комплексах, является точность оценки параметров лучей гидроакустического сигнала (ГС), в том числе углов и относительных задержек прихода. Для оценки параметров лучей могут быть использованы элементы корреляционного анализа, а именно оценка параметров локальных экстремумов взаимно корреляционной функции пространственных каналов (ПК), которая, может, осложнятся наличием, во входной смеси сигналов, мешающих ДС, а также одного или нескольких мощных лучей, на фоне которых разрешение остальных не представляется возможным. Принимаемый антенной решеткой (АР), ГС является результатом суперпозиции всех ГС акватории и собственных шумов приёмного тракта. Содержащиеся во входном сигнале, ДС могут принадлежать как полезному сигналу, так и структурной или локальной помехам (ЛП), характеризующиеся существенной не стационарностью, как по пространству, так и по частоте. В работе рассматривается вопрос уменьшения ярко выраженных ДС и ограничения мощности сильных лучей принимаемого сигнала с помощью применения алгоритма адаптивного ограничения мощности помех (ОМП) изложенного в [1], согласно которому результат фильтрации $\widetilde{X}$ имеет вид:

$$\widetilde{X} = X\widetilde{Q}, \qquad (1)$$

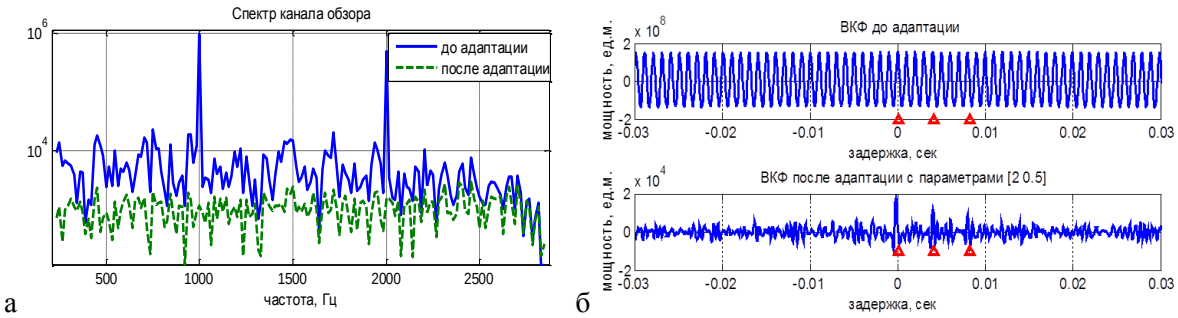
где X – матрица входного сигнала размером LxJ (L – число приёмных элементов АР или число ПК, J – число временных реализаций спектральных отсчетов по выходу задачи формирования характеристики направленности, $\widetilde{Q} = \sum_{i=1}^{J} U_i \tilde{\lambda}_i U_i^+$, где $\tilde{\lambda}_i = \begin{cases} K\sqrt{\frac{\lambda_{M+1}}{\lambda_i}}, i \le M \\ 1,\ i > M \end{cases}$, U_i и λ_i – собственные векторы и числа матрицы $Q = X^+X$, K– коэффициент, задающий уровень подавления, M – номер собственного числа, по уровню которого производится очистка. Вопросы реализации алгоритма ОМП рассматривались в [2].

Моделирование. В качестве примера, применения алгоритма ОМП для борьбы с ДС в принимаемом АР сигнале, рассмотрим ситуацию приёма АР сигнала одного источника ГА излучения, состоящего из трёх лучей. При моделировании использовалась цилиндрическая АР.

В первом эксперименте, лучи имитируемого сигнала содержат сильные ДС и заданы одинаковой мощности, отличаются друг от друга временной задержкой и углом прихода на АР.

На рис. 1а представлен спектр имитируемого шумового сигнала с двумя ДС большой мощности на частотах 1 кГц и 2 кГц (сплошная линия), спектр сигнала после адаптации (штриховая линия). Применение алгоритма ОМП снижает общий уровень энергетического спектра и уменьшает вклад ДС до среднего уровня шумовой компоненты. На рис. 1б представлен вид ВКФ до и после ограничения мощности сигналов, красными маркерами указаны положения задержек соответствующие параметрам лучей сигнала. В ВКФ, вычисленной по неадаптированному сигналу (верхний график на рис. 2б), преобладает синусоидальная компонента, обу-

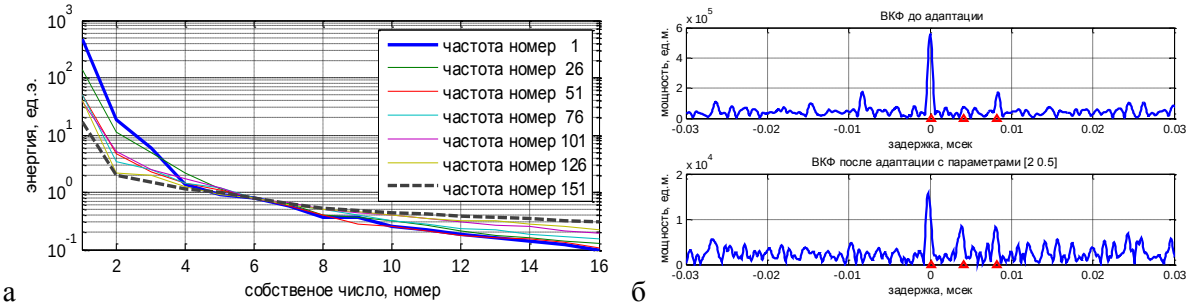
словленная наличием во входном сигнале ДС. После применения ОМП уровень постоянной составляющей в ВКФ снизился на 4 порядка, при этом становятся отчётливо видны корреляционные максимумы (КМ), соответствующие двум задержкам сигнала.



а б

Рис. 1. Один источник с двумя ДС: а – спектр сигнала,
б – ВКФ до адаптации и после адаптации.

Во втором эксперименте, лучи не содержат ДС, но мощность одного из трёх лучей значительно превосходит остальные (ВКФ ПК приведены на рис.2).



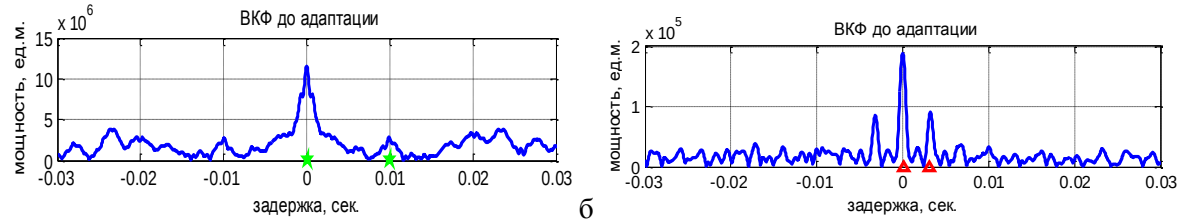
а б

Рис. 2. Трёхлучевой сигнал с одним особо сильным лучом: а – распределение энергии по собственным числам, б – ВКФ до и после адаптации.

На ВКФ сигнала без адаптации (рис. 2б) видны только два КМ. Применение алгоритма ОМП с ограничением первого собственного числа обеспечивает различение всех трёх КМ.

На рис.3 – 4 приведены результаты моделирования алгоритма ОМП для обеспечения обнаружения КМ в условиях наличия ЛП. Угловое рассогласование направлений по горизонту на полезный сигнал и локальную помеху составляет 8˚. Моделируемые сигналы заданы шумовыми, без ДС. Отношение сигнал/шум на выходе ПК по полезному сигналу составляет для первого луча -3,5 дБ , для второго луча – -3дБ, а по локальной помехе – 20 дБ и 23 дБ соответственно. Приводятся ВКФ сигналов по выходу двух ПК, ориентированных на ПС в горизонтальной плоскости.

На рис.3 изображены ВКФ по выходу тех же ПК при наличии только сигнала ЛП (рис.3а), и только полезного сигнала (рис. 3б). На рис. 3 и 4 КМ соответствующие задержкам между лучами ПС указаны красными треугольниками, а соответствующие ЛП – зелеными звездами.



а б

Рис. 3. ВКФ одиночного сигнала на фоне распределённой помехи:
а – сигнал ЛП, б – сигнал ПС.

Углы прихода лучей ЛП подобраны так, что уровни прямого и зеркального КМ ЛП одинаковы. Увеличение ширины КМ ЛП обусловлено тем, что её сигнал принимается ПК по боковому полю.

На рис.4 приведены результаты обработки смеси ПС и ЛП.

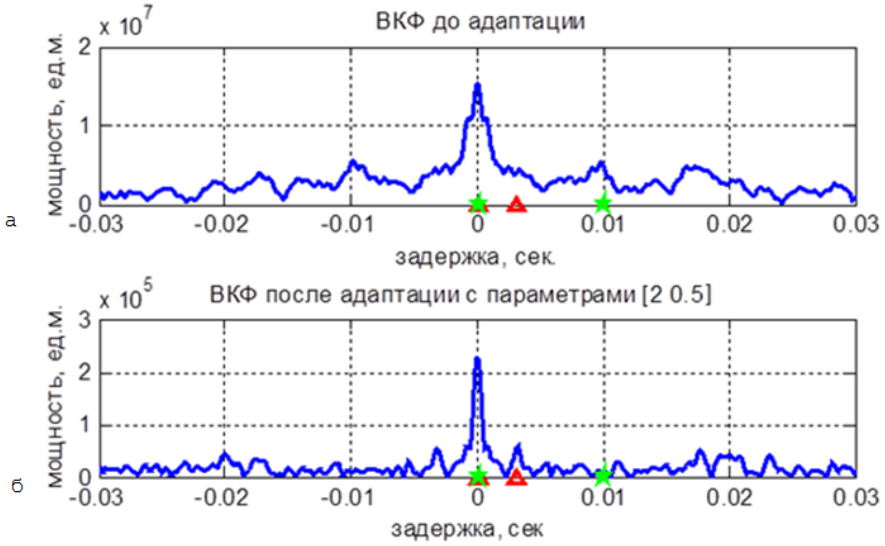


Рис. 4. ВКФ смеси ПС и ЛП: а - без применения адаптации, б – с адаптивной обработкой.

В ВКФ смеси сигналов ПС и ЛП, КМ советующие ПС без адаптивной обработки не различаются. Применение ОМП с ограничением первого собственного числа до уровня 0.5 от второго обеспечивает разрешение КМ ПС (рис. 4б). Уровень ВКФ после применения алгоритма снизился, а КМ, принадлежащие ЛП отсутствуют. Наличие зеркального КМ слева от главного максимума на ВКФ обусловлено не совпадением углов наведения ПК и углов прихода лучей ПС.

На рис.5 (см. вклейку) приведены ВКФ после применения алгоритма ОМП с различными вариантами наведения ПК в вертикальной плоскости. Изменение угла наведения в вертикальной плоскости ПК вызывает изменение уровня отклика КМ, которое может быть использовано для уточнения вертикального угла прихода лучей. Синей штриховой линией отображена ВКФ для случая, когда оба ПК сформированы в направлении не совпадающем с направлением прихода лучей (как и на рис. 4б), зелёной штрих пунктирной линией – ВКФ при наведении одного из ПК строго на угол прихода одного из лучей сигнала, а красной сплошной линией - ВКФ в случае, когда оба ПК точно наведены в направлениях прихода лучей.

КМ ВКФ вычисленной по ПК, наведённым на углы прихода лучей ПС, имеют максимальный отклик, что обеспечивает возможность измерения углов прихода лучей слабых сигналов на фоне многолучевых ЛП.

Алгоритм ОМП не использует априорной информации о характере сигнала, поэтому может быть использован при наличии нестационарных, как по частоте, так и по пространству, ЛП.

Литература

1. Колбин П.Д., Мельканович В.С. к.т.н., Оценка параметров лучей гидроакустического сигнала на базе корреляционного анализа по выходу сформированных пространственных каналов, // Научно-технический сборник трудов XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2016 - СПб.: 2016. стр. 286-288;
2. Колбин П.Д. Мельканович В.С. к.т.н., Реализация алгоритма адаптации к локальным помехам на микропроцессоре КОМДИВ128-РИО, // Сборник докладов V-ой научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» МАГ 2017 - СПб.: 2017, стр. 195-199.

АДАПТИВНОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОМЕХ ПО ВЫХОДУ КАНАЛОВ ОБЗОРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В.С.Мельканович, канд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

ADAPTIVE RESTRICTION OF THE LOCAL INTERFERENCES POWER AT THE SONAR OUTPUT CHANELS

V.S.Melkanovich, Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

Предложен алгоритм подавления локальных помех (ЛП) по выходу каналов тракта обзора гидроакустической антенной решетки, основанный на использовании ортогонального проектора. Реализуется проектор на подпространство временных последовательностей комплексных спектров ЛП. Управляемое ограничение мощности локальных помех реализуется как робастный паллиатив оптимизирующего нормирования.

Algorithm for local interferences suppression for output channel of the survey hydroacoustic antenna based on the use of orthogonal projector is proposed. The projector on the subspace of local interferences complex spectra time sequences implemented. Managed local interferences power restriction is implemented as a robust palliative of optimization-based normalization.

Одним из основных назначений адаптивной обработки сигналов в современных гидроакустических средствах является парирование мешающего воздействия локальных помех (ЛП). Типовыми алгоритмами, используемыми для решения указанной задачи является алгоритм компенсации локальных помех (КЛП), использующий формирование каналов в направлении на источники помех т.н. «опорных» каналов (ОК) [1, 2].

К достоинствам алгоритма КЛП следует отнести то, что он в условиях, когда помехи представлены совокупностью волновых фронтов, обеспечивает близкую к оптимальной обработку сигналов при минимальных вычислительных затратах. Также, оперируя с корреляционными матрицами минимально необходимой размерности, этот алгоритм позволяет минимизировать интервал обучения при адаптации.

К недостаткам этого алгоритма относятся во-первых, необходимость реализации некогерентной части обработки, состоящей в оптимизирующем нормировании, обеспечивающем компенсацию "прокола" в пеленгационном рельефе. Реализация некогерентной части обработки сигналов требует не меньше ресурсов, чем когерентная её часть, а также существенно сложнее алгоритмически. Отдельной проблемой реализации нормирования является учет анизотропной части рассеянной компоненты ЛП, имеющей априорно неопределенный характер. Ошибки нормирования могут приводить не только к пропуску полезного сигнала, но и к возникновению устойчивых ложных трасс.

Во-вторых, сложной является задача определения числа ЛП и наведения ОК в условиях, когда источники ЛП не разрешаются, а их лучевой состав подвержен быстрым и кардинальным изменениям.

И в третьих, нет возможности использования нескольких ОК на луч для компенсации рассеянной компоненты из - за риска компенсации также части полезных сигналов.

Для преодоления изложенных проблем предлагается подход, базирующийся на следующих положениях:

1. Число ОК, формируемых на начальном этапе, выбирается существенно превышающим число источников ЛП. ОК формируются в такой совокупности направлений, чтобы с максимальной вероятностью перекрывать возможные направления прихода лучей ЛП. В пределе веер формируемых ОК может совпадать с веером каналов обзора.

2. ОК, используемые при реализации КЛП формируются суммированием выходов ОК начального этапа с весами, задаваемыми значениями элементов собственных векторов выборочной оценки корреляционной матрицы сигналов ОК начального этапа, соответствующих её наибольшим собственным числам. Число реализаций, используемых для оценки корреляционной матрицы выбирается существенно меньшим, чем число ОК. Матрица в этом случае оказывается плохо обусловленной, однако в силу высокой мощности ЛП, собственные векторы, соответствующие старшим собственным числам формируют подпространство, близкое к подпространству ЛП.

3. Вместо трудно реализуемой процедуры оптимизирующего нормирования реализуется паллиативное решение – ограничение уровня компенсации ЛП [3, 4]. Предлагается компенсировать ЛП лишь до некоторого уровня, задаваемого относительно уровня распределенной по-

мехи. Сохранение остаточного отклика на ЛП в пеленгационном рельефе позволяет избежать появления «прокола», обеспечивает возможность наблюдения и обнаружения трасс полезных сигналов и ЛП на основе пространственной контрастности.

В классическом виде, в предположении, что *M* последовательных реализаций комплексных спектральных отсчетов по выходу каналов наблюдения и ОК на отдельно взятой частоте спектрального анализа представлены выражениями $y = W_C^+ X$ и $Y = W^+ X$ соответственно, где W_C и W - матрицы, составленные из весовых векторов формирования каналов наблюдения и ОК, X - матрица спектральных отсчетов по выходу элементов антенны на *M* реализациях, + - знак эрмитова сопряжения, результат КЛП вычисляется согласно выражению,

$$\tilde{y} = y - d^+ Q^{-1} Y, \tag{1}$$

где $d = y^+ Y$ - выборочная оценка корреляций выходов каналов наблюдения и ОК (здесь и ниже – с точностью до мультипликативного параметра), $Q = YY^+$ - оценка корреляции ОК. Размерность y и Y - K_C на *M* и *K* на *M* соответственно, где K_C и K - число каналов наблюдения и ОК, *M* –число реализаций оценки корреляций, определяющее длительность интервала адаптации.

В соответствии изложенными положениями произведем замену $W = W_0 U_0$, где W_0 - матрица, составленная из весовых векторов начального формирования избыточного количества ОК в соответствии с п. 1, U_0 - матрица, составленная из заданного (M_0) количества собственных векторов (СВ), соответствующих старшим собственным числам (СЧ) корреляционной матрицы $Q_0 = Y_0 Y_0^+$, $Y_0 = W_0^+ X$. Второе слагаемое (1) в этом случае принимает вид

$d^+ Q^{-1} Y = y Y_0^+ U_0 (U_0^+ Y_0 Y_0^+ U_0)^{-1} U_0^+ Y_0 = y Y_0^+ U_0 \Lambda_0^{-1} U_0^+ Y_0$, где $\Lambda_0 = diag(\lambda_1 ... \lambda_{M_0})$ - диагональная матрица, составленная из M_0 старших СЧ Q_0. Учитывая, что $Y_0^+ U_0 \Lambda_0^{-1} U_0^+ Y_0 = U_1 U_1^+$, где U_1 - матрица, составленная из M_0 старших СВ корреляционной матрицы $Q_1 = Y_0^+ Y_0$, получаем алгоритм КЛП в виде

$$\tilde{y} = y - y U_1 U_1^+ = y(I - U_1 U_1^+) \tag{2}$$

где *I* - единичная матрица.

Второй сомножитель в выражении 2 представляет собой проектор, ортогональный пространству последовательности спектральных отсчетов ЛП размерностью в число реализаций по времени *M*. Таким образом, операции над матрицами размерностью в число гидрофонов заменяются существенно менее ресурсоемкими операциями над матрицами размерностью в число реализаций.

Предполагается, что число ОК *K* существенно больше *M*. В целях минимизации управляющих воздействий в качестве ОК могут быть использована вся совокупность каналов наблюдения. В этом случае полностью используется априорная информация об антенном многообразии. Ниже приводятся результаты моделирования обработки сигналов именно для такого случая.

В случае, когда ЛП относительно маломощны, а именно, превосходят уровень распределенной помехи менее, чем на порядок, эффективность их подавления может быть усилена путем формирования веера ОК, перекрывающего направления прихода ЛП в секторе шириной в несколько ширин характеристики направленности по азимуту.

Для реализации ОМП по п.3, не приводящего к формированию «прокола», реализуется частичное подавление ЛП в соответствии с выражением

$$\tilde{y} = y(I - U_1(\Lambda_0 - (Z\lambda_{M_0+1} I)^{1/2} \Lambda_0^{-1/2} U_1^+), \tag{3}$$

где Z- константа, управляющая уровнем остаточного отклика на ЛП по отношению к уровню распределенной помехи.

На рис. 1-4 приведены результаты моделирования приема сигналов с использованием ОМП на примере 60 элементной линейной антенной решетки. Результаты рис. 1-3 получены на одном отдельно взятом частотном отсчете.

Рис. 1 иллюстрирует разрешающую способность алгоритма ОМП при выделении слабого полезного сигнала на фоне одиночной ЛП при отсутствии рассеяния волновых фронтов. Для

сопоставления приведены пеленгационные рельефы алгоритмов Кейпона и КЛП с нормированием. Алгоритм ОМП при высоком уровне ограничения мощности ЛП (Z = 0.5) и M_0 = 2, M = 20, обеспечивает лучшую пространственную контрастность, чем алгоритм Кейпона, а при более низком уровне ограничения (Z = 0.3) обеспечивает разрешение обоих сигналов. Алгоритм КЛП с нормированием, как наиболее близкий к оптимальному прикорректном задании числа ЛП и направлений на них, обеспечивает наилучшее выделение полезного сигнала при практически полном подавлении ЛП.

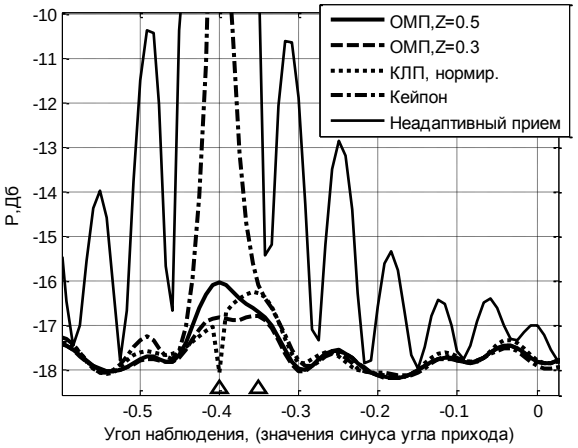


Рис. 1. Одиночный полезный сигнал одиночная ЛП без рассеяния.

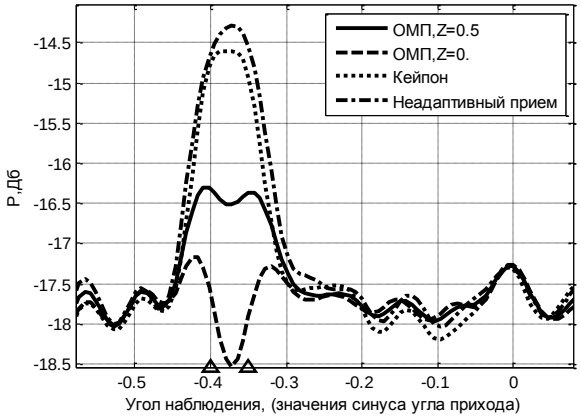


Рис. 2. Разрешение двух маломощных ЛП без рассеяния.

Рис. 2 демонстрирует пример повышенной разрешающей способности алгоритма ОМП при приеме маломощных ЛП. Отклики двух ЛП, равные по уровню распределенной помехе сливаются в случае как неадаптивного обзора, так и случае алгоритма Кейпона, который не обеспечивает достаточного разрешающего эффекта вследствие недостаточной мощности сигналов. Алгоритм ОМП также не должен был бы обеспечить разрешения, т.к. в условиях близкой мощности сигналов его отклик по сигнальной компоненте не должен отличаться от отклика неадаптивного приёма. Однако, вследствие того, что суммарный отклик алгоритма ОМП является суперпозицией откликов на сигналы локальных источников и отклика на распределенную помеху, о котором можно судить по приведенному отклику ОМП при Z = 0, на площадке, возникающей при наложении сигнальных откликов вследствие их низкой мощности и уравнивающего отклики действия ОМП, возникает "провал", обусловленный искажением отклика на распределенную помеху, обеспечивающий прирост разрешения.

На рис. 3 приведена ситуация, аналогичная ситуации, приведенной на рис. 1, но при наличии флюктуаций волновых фронтов, интервал корреляции которых по пространству составляет треть апертуры, а по времени вдвое превосходит интервал адаптации ОМП. Из рисунка видно, что алгоритм Кейпона, имеющий интервал адаптации в двадцать раз больше, чем алгоритм ОМП, не обеспечивает даже видимой асимметрии отклика на ЛП. В то же время алгоритм ОМП позволяет разрешить как полезный сигнал, так и ЛП.

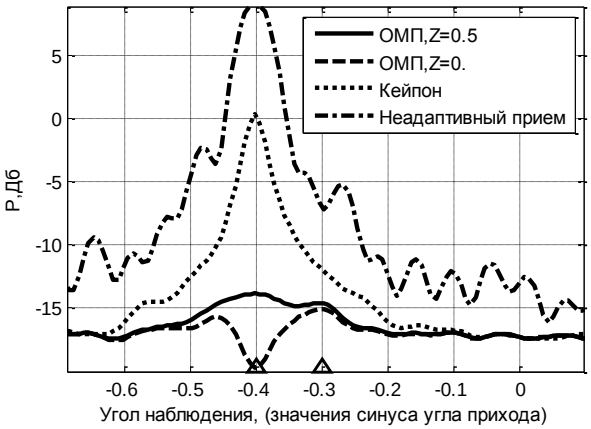


Рис. 3. Одиночный полезный сигнал

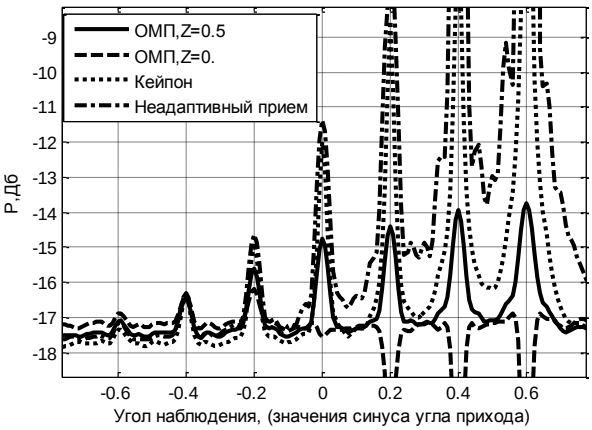


Рис. 4. Уровни отклика ОМП для разных

и одиночная ЛП с рассеянием. значений мощности сигналов.

На рис. 4 приведена ситуация, позволяющая судить о возможности подавления ЛП алгоритмом ОМП в зависимости от мощности их сигналов по выходу каналов обзора. Семь моделируемых сигналов имеют уровень откликов, составляющий (слева направо) 0.1,0.3,1,3,10,30,100 уровней отклика распределенной помехи в неадаптивном обзоре. Обработка выполнена в октавной полосе. Число подавляемых помех M_0= 5. Как видно из рисунка, полное подавление отклика на сигнал при использовании алгоритма (2), т.е. Z =0, происходит при трехкратном превышении неадаптивного отклика на распределенной помехой. Применение ограничения (Z= 0.5) приводит к тому, что уровни откликов на сигналы стабилизируются приблизительно на уровне 3дБ относительно распределенной помехи.

Литература

1. Малышкин Г.С., Мелькановичч В.С. Адаптивные алгоритмы для обнаружения и оценки параметров слабых сигналов в режиме шумопеленгования при наличии сильных мешающих источников звука. Успехи современной радиоэлектроники, №12, 2009 г., С. 32-45.
2. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т. 2 Адаптивные методы, СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011, 374 стр.
3. Мелькановичч В.С. Препроцессорное ограничение мощности сигнала локальных помех с целью повышения эффективности алгоритмов сверхразрешения. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».– Спб.:Нестор-История. - 2014. - С. 390-393.
4. Малышкин Г.С. Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов. «Акустический журнал», т.63, №2, 2017, с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРЕЖЕННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ШУМОПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

В.И.Турчин, канд.физ-мат.наук, А.А.Родионов, канд.физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

USING SPARSE ANTENNA ARRAYS FOR SOUND SOURCE DOA ESTIMATION

V.I.Turchin, Ph.D., A.A.Rodionov, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Исследованы возможности неэквидистантных разреженных линейных антенных решеток (АР) для решения задач обнаружения и оценки параметров источников. Рассмотрена задача максимального увеличения длины разреженной АР с фиксированным числом элементов N, для которой сохраняются приемлемые характеристики обнаружения источников сигналов. Показано, что при незначительном увеличении отношения «сигнал/шум», вероятность обнаружения и оценки сохраняется такой же, что и для стандартной N-элементной АР с межэлементным расстоянием в полдлины волны, а точность пеленгации растет пропорционально увеличенному размеру решетки.

The possibilities of non-uniform sparse linear antenna arrays (AA) for solving problems of detection and estimation of parameters of a source are investigated. The problem of maximizing the length of a sparse AR with a fixed number of elements N, for which the acceptable detection characteristics are preserved, is considered. It is shown that with an insignificant increase in the signal-to-noise ratio, the probability of detection and estimation of source parameters remains the same as for a standard N-element AA with spacing of a half wavelength, and the accuracy of direction finding proportionally increases to the increased array length.

Антенные решетки (АР) широко применяются практически во всем диапазоне электромагнитных волн в системах активной и пассивной локации, пеленгации, связи, в подводной акустике, сейсмике и т.д. Характеристики стандартной линейной эквидистантной АР определяются отношением D/λ, где D – длина АР, λ – длина волны; поскольку элементы располагаются с шагом $\lambda/2$, для стандартной АР отношение D/λ определяется числом элементов N: $D/\lambda = N/2$. На практике часто возникает необходимость, сохраняя неизменным число элементов N, например, увеличить размер D или уменьшить λ с соответствующим повышением точности пеленгации[1]. Такие АР принято называть разреженными – см., например, [1,2]. Степень разреженности удобно характеризовать параметром $U > 1$: $U = (D/\lambda)/(N/2)$; для стандартной АР $U = 1$. В случае эквидистантной АР, сканирующей во всем секторе вещественных углов, увеличение U приводит к появлению решеточных лепестков, т.е. к неоднозначности определения пеленга. Можно, однако, расположить элементы АР неэквидистантно; тогда решеточные лепестки исчезают, но может возрасти уровень боковых лепестков (УБЛ). Синтезу неэквидистантных решеток, т.е. выбору расположения приемных элементов, обеспечивающего заданный или приемлемый УБЛ, посвящена обширная литература, например, [2–6]; эти работы содержат ряд примеров синтеза неэквидистантных АР с U порядка нескольких единиц, имеющих низкий УБЛ. Возникает, однако, вопрос: до какого значения можно увеличивать степень разреженности, т.е. параметр U, исходя не из величины УБЛ, а из возможности эффективного решения приемной системой, включающей АР, типовых практических задач: обнаружения одного или нескольких источников на фоне шума, оценки углового положения источников с высокой точностью, разрешения близко расположенных источников, адаптивного подавления локализованной по углу помехи и т.д.; УБЛ, очевидно, определяет такие возможности лишь косвенно. Можно предположить, что как бы ни велик был параметр U, можно подобрать такое расположение элементов АР, при котором все боковые лепестки были бы строго меньше главного лепестка, т.е. пеленгация, например, одного источника осуществлялась бы однозначно и с высокой точностью, хотя бы при большом отношении «сигнал-шум» (ОСШ). В то же время ограничения на величину U должны существовать; их анализу и посвящена данная работа.

Характеристики диаграммы направленности линейной разреженной АР. Разобьем длину D линейной АР на N равных интервалов длиной $D/N = U\lambda/2$, где N – заданное число приемных элементов. Координату n-го приемного элемента d_n определим как

$$d_n = \frac{U\lambda}{2}\nu_n, \quad \nu_n = n - 1 + \varepsilon_n, \quad n = 1,...,N, \tag{1}$$

[1] В частности, в гидроакустике весьма актуальным является расширение частотного диапазона работы антенны в режиме шумопеленгации; при заданных размерах антенны и числе приемных элементов при уменьшении длины волны антенная решетка становится разреженной.

где ε_n – независимые равномерно распределенные в интервале [0, 1] случайные величины. Такой способ размещения элементов АР, во-первых, позволяет получать примерно одну и ту же ширину главного лепестка ДН для любого распределения ε_n, и, во-вторых, исключает «глупые» комбинации типа концентрации элементов около одной точки.

Диаграмма направленности (ДН) АР $f(s)$ определяется известным выражением

$$f(s) = N^{-1}\sum_{n=1}^{N} e^{i\pi U v_n s}, \qquad (2)$$

где $s = \sin\varphi$, угол отсчитывается от нормали к линии решетки. Модуль $|f(s)|$ имеет глобальный максимум, равный 1, в точке $s = 0$.

Нетрудно найти средний профиль ДН по мощности $F(s) = |f(s)|^2$:

$$\mathrm{E}\{F(s)\} = F_0(s) - N^{-1}[1 - F_0(s/N)], \qquad (3)$$

где E{.} – среднее, $F_0(s) = \mathrm{sinc}^2(UNs/2)$ – ДН сплошного линейного раскрыва длиной D, $\mathrm{sinc}\, x = \sin\pi x/\pi x$. Из (3) следует, что ДН $|f(s)|$ вне некоторой окрестности главного лепестка будет иметь в среднем примерно постоянный уровень боковых лепестков с уровнем $\sim 1/\sqrt{N}$. В качестве примера на рис.1 приведен график (3) и ДН для реализации ε_n, отвечающей минимальному значению УБЛ$_{max}$; последняя выбиралась из выборки с объемом 10^6. На рис.1 ДН показана в интервале $s \in [-2, 2]$, который выбран из следующих соображений. Оценка углового положения источника выполняется путем перебора значений параметра s в интервале $[-1, 1]$. Чтобы обеспечить поиск минимального УБЛ$_{max}$ для всех возможных угловых положений источника s_0 поиск по синусу угла должен выполняться в интервале $s \in [-2, 2]$. Характеристики обнаружения при этом будут зависеть от параметров боковых лепестков, в частности, УБЛ$_{max}$ в интервале $s \in [-1 - s_0, 1 - s_0]$. В дальнейшем, однако, для сокращения объема исследований отбор наилучшей реализации ε_n будет выполняться в интервале $s \in [-1, 1]$, что неявно предполагает $s_0 \approx 0$.

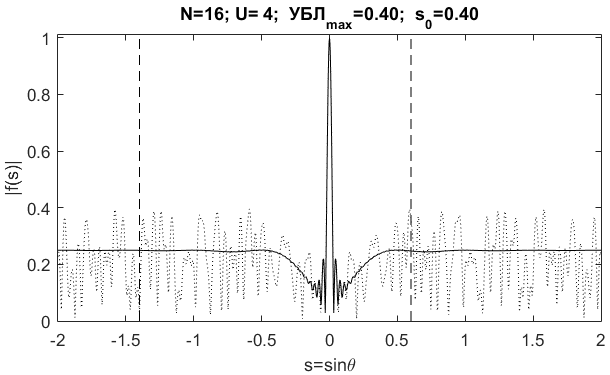


Рис. 1. Средняя ДН (3) (сплошная линия) и реализация ДН, соответствующая минимальному УБЛ$_{max}$ (пунктир).

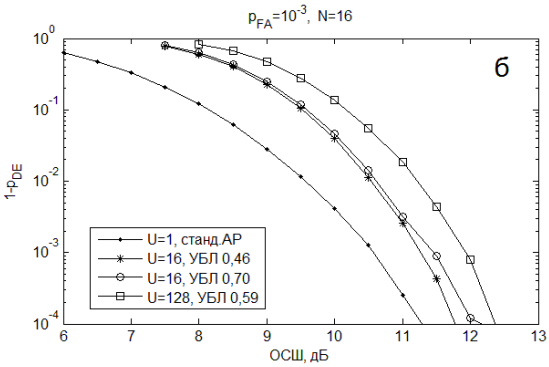


Рис. 2. Зависимости минимальных УБЛ$_{max}$ от U для разных N при объеме реализации J=10^6.

На рис. 2 слева приведены зависимости УБЛ$_{max}$ от степени разреженности U для разных N, полученные по 10^6 реализациям ε_n. Достигнутые при данном числе реализаций минимальные значения УБЛ$_{max}$ растут с увеличением U, однако достаточно медленно; например, для $N = 16$ при увеличении U на 2 порядка минимальные УБЛ$_{max}$ возрастают с ~0,4 до ~0,7; скорость роста также падает с увеличением N. Также была изучена динамика снижения минимальной величины УБЛ$_{max}$ при увеличении объема выборки для фиксированных N и U. Оказалось, что минимум УБЛ$_{max}$ убывает приблизительно пропорционально $\log J$. При очень больших J этот рост должен замедляться. Достижение этой области при случайном переборе, однако, уже связано с вычислительными трудностями. Таким образом, случайный перебор положений элементов АР не может гарантировать, что найденная совокупность координат близка к оптимальной с заданной точностью, однако естественно ожидать, что чем больше объем выборки, тем лучше отобранная совокупность будет отвечать заданному критерию (по вероятности).

Как показало численное моделирование, в отличие от $УБЛ_{max}$ распределения УБЛ без учета «далеких хвостов» практически не меняются даже при значительном увеличении U в случае $U > 10$; эти распределения качественно схожи с рэлеевским, со средним, близким к $1/\sqrt{N}$ – см. (3).

Обнаружение и разрешение нескольких источников со случайными амплитудами. В качестве характеристики обнаружения для разреженной антенны использовалась вероятность обнаружения и оценки p_{DE}, которая вычисляется как вероятность того, что максимумы на выходе антенны превышают выбранный порог, а положение максимумов находится в пределах, соответствующих истинным положениям источников. Отметим, что при исследовании обнаружения отдельного тонального источника выяснилось, что даже для U=100 для сохранения вероятности обнаружения и оценки требуется повышение ОСШ всего на 1–2 дБ. На практике наиболее интересной является задача пеленгации нескольких источников. Рассмотрим модель сигнала, включающую фоновый шум и сигналы от нескольких источников со случайными, статистически независимыми амплитудами в узкополосном приближении [7]. Далее будем рассматривать процедуру обработки по алгоритму MUSIC.

Будем считать, что есть три полезных источника с координатами $s_{0,1} = 0.5;\ \ s_{0,2} = 0;$ $s_{0,3} = s_{0,2} + 2/NU$, где расстояние между источниками 2 и 3 соответствует разрешению Рэлея. ОСШ(SNR) при этом определялось как $R^2 = (q_A/q_N)\sqrt{J/2} = 10^{\mathrm{SNR[dB]}/10}$, где q_A – интенсивность 3-го полезного источника, $q_N = 2\sigma^2/N$ – интенсивность фонового шума $2\sigma^2$ с учетом антенного выигрыша. Интенсивность 2-го источника бралась больше на 1 дБ и 1-го – на 20 дБ.

На рис.3 показаны зависимости $\overline{p}_{DE} = 1 - p_{DE}$ от ОСШ для разреженных АР с разными U и $УБЛ_{max}$. Из графика в частности следует, что увеличение разреженности АР на два порядка (и соответствующее повышение разрешающей способности) требует повышения ОСШ всего на ~1,4 дБ[2]. То есть, продемонстрировано весьма умеренное требование к увеличению ОСШ при существенном увеличении разреженности и повышению разрешающей способности.

Заключение. В работе показано, что даже сильно разреженные антенные решетки могут эффективно использоваться для решения задачи обнаружения, пеленгации и разрешения источников плоских волн. На практике в гидроакустике это означает возможность многократного расширения частотного диапазона шумопеленгатора при сохранении числа элементов антенны и длины её апертуры.

Литература

1. Leahy R.M., Jeffs B.D. On the Design of Maximally Sparse Beamforming Array. //IEEE Trans. Ant. and Prop., 1991, V.39, No.8, P.1178–1187.
2. Bucci O.M., D'Urso M., Isernia T., Angeletti P., Toso G. Deterministic Synthesis of Uniform Amplitude Sparse Arrays via New Density Taper Technique. //IEEE Trans. Ant. and Prop., 2010, V.58, No.6, P.1949–1958.
3. Chuan Lin, Anyong Qing, Quanyuan Feng. Synthesis of unequally Spaced Antenna Arrays by a new Differential Evolutionary Algorithm //International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), 2009, V.1, No.1, P.20–25.
4. Hong T., Song M.-Z., Sun X.-Y. Design of a Sparse Antenna Array for Communication and Direction Finding Application Based on the Chinese Remainder Theorem //Progress In Electromagnetics Research, PIER 98, 2009, P.119–136.
5. Sandi E., Zulkifli F.Y., Rahardjo E.T. A Hybrid Technique Using Combinatorial Cyclic Difference Sets and Binomial Amplitude Tapering for Linear Sparse Array Antenna Design //Advanced Electromagnetic, 2016, V.5, No.3, P.73–79.
6. Содин Л.Г. Некоторые проблемы теории фазированных антенных решеток, актуальные для радиоастрономии //Радиофизика и радиоастрономия, 2005, т.10, специальный выпуск, С.S128–S142.
7. Van Trees H.L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[2] Брался уровень $\overline{p}_{DE} = 10^{-3}$.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЛОКАТОРА С РАЗНЕСЕННЫМ ПО ГЛУБИНЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ПРИЕМОМ ЗВУКА

А.А.Илларионов, С.В.Козловский, канд.техн.наук, В.А.Сергеев, канд.техн.наук
НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Россия

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF SONAR WITH DEPTH-SPREAD SOUND RADIATION AND RECEPTION

A.A.Illarionov, S.V.Kozlovski, Ph.D., V.A.Sergeev, Ph.D.
Naval Research Center of Electronics, St. Petersburg, Russia

В докладе содержатся результаты сравнительной эффективности для моностатического и бистатического гидролокаторов в сложных условиях подводного наблюдения. В бистатическом гидролокаторе используется разнесение излучателя и приемника по глубине. Приведены оценки выигрышей в отношении сигнал-помеха при преобладающей шумовой и реверберационной помехи в условиях мелкого моря при отрицательной рефракции скорости звука. Показано, что при маневрировании объекта поиска на определенных глубинах возможен выигрыш бистатического гидролокатора по сравнению с моностатическим.

The report contains the results of comparative efficiency for monostatic and bistatic sonar in complicated underwater conditions. The bistatic sonar uses the separation of the radiator and receiver in depth. Estimations of benefits concerning signal-to-noise ratio are given at prevailing noise and reverberation noises in shallow water environment at negative refraction of sound velocity. It is shown, that at search object maneuvering on the certain depths a bistatic sonar can be more effective in comparison with a monostatic one.

В последние годы в различных областях гидроакустики интенсивное развитие получили методы полистатической (мультистатической) и бистатической гидролокации [1-7]. Бистатическая гидролокация является частным случаем мультистатической при использовании двух антенн. При этом под бистатическим понимается гидролокатор, в котором излучающая и приемная антенны разнесены в пространстве [8].

Основные усилия до настоящего времени были направлены на исследования мультистатических (бистатических) систем с разнесенными в горизонтальной плоскости излучателями и приемниками. В то же время, вопросам развития бистатических гидролокаторов (БГ), с разнесением антенн в вертикальной плоскости уделяется недостаточное внимание.

Представляет интерес рассмотреть вопрос оценки эффективности БГ с излучающей и приемной антеннами, разнесенными по глубине (например, установленными на одном носителе) в сложных условиях наблюдения, в частности, в мелководных районах моря при отрицательной рефракции и преобладающей реверберационной помехе (рис. 1).

Наблюдатель имеет в своем составе подкильную антенну (ПА) и антенну переменной глубины (АПГ). Глубина ПА- H_1, а глубина АПГ – H_2 . Цель находится на глубине $H_Ц$. Средняя глубина звукорассеивающего слоя (ЗРС) –Нс. Примем,что дистанции, показанные на рис. 1, равны, т.е.$R_1=R_2=R_{1C}=R_{2C}=r$.

Гидроакустические условия характеризуются наличием отрицательной рефракции, и являются типовыми для летнего периода мелководных районов. Профиль скорости звука показан на рис.2.

При работе гидролокатора с ПА в моностатическом режиме выгодными для обнаружения является положение цели ближе к дну. При работе гидролокатора с АПГ в моностатическом режиме выгодными для обнаружения является положение цели ближе к поверхности. Неблагоприятной при поиске является ситуация нахождения цели на глубине ближе к средней глубине района, например, $H_Ц$=45 м, что затрудняет наблюдение МГ как с использованием ПА, так и с использованием АПГ.

Оценим возможный выигрыш БГ по сравнению с моностатическим гидролокатором (МГ) при указанной неблагоприятной при поиске глубине цели.

В качестве показателяэффективности примем величину выигрыша (разницы) в отношении сигнал/помеха для БГ и МГ:

$$\Delta ОСП = ОСП_Б - ОСП_М, \quad (1)$$

где $ОСП_Б$, $ОСП_М$ – отношение сигнал/помеха для БГ и МГ, соответственно.

Уровень эхо-сигнала в моностатическом режиме [9] определяется, как:

$$УЭ_М = УИ + СЦ + 2A(r, H_1, H_Ц) - 40\log r - 2\beta r\text{-}60, \text{ дБ} \quad (2)$$

Уровень эхо-сигнала в бистатическом режиме определяется, как:

$$УЭ_Б = УИ + СЦ + A(r, H_1, H_Ц) + A(r, H_2, H_Ц) - 40\log r - 2\beta r\text{-}60, \text{ дБ} \quad (3)$$

где УИ–уровень излучения, дБ; СЦ-сила цели, дБ; r – дистанция, км; β–коэффициент пространственного затухания звука, дБ/км; $A(r, H_1, H_Ц)$, $A(r, H_2, H_Ц)$-аномалии распространения звука в одну сторону на дистанции r , км при заданных глубинах излучателя, приемника и цели, дБ.

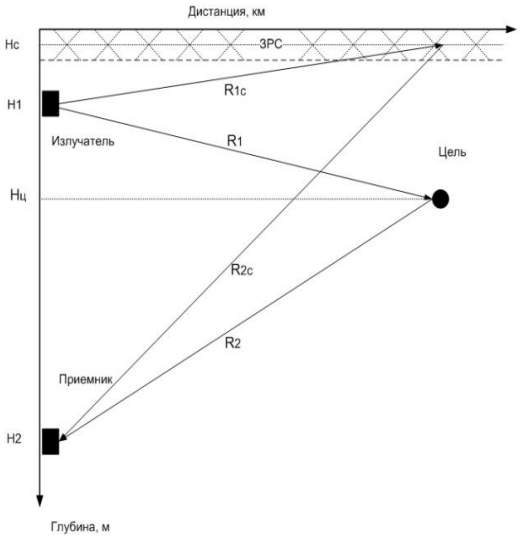


Рис. 1. Схема работы бистатического гидролокатора

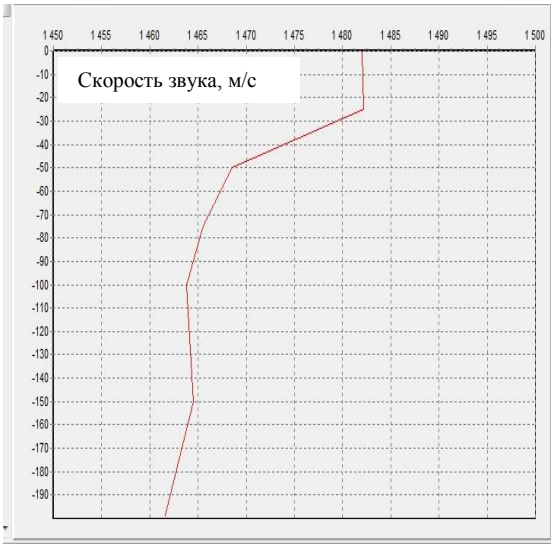


Рис. 2. Профиль скорости звука

Если преобладает шумовая помеха, значения которой для ПА и АПГ полагаем равными, то нетрудно показать, что :

$$\Delta\text{ОСП} = \Delta_{\text{noise}}(r) = A(r, H_2, H_Ц) - A(r, H_1, H_Ц), \quad (4)$$

Уровень поверхностной реверберации на выходе тракта пространственной обработки информации в моностатическом и бистатическом режимах, соответственно, с учетом [9, 10] определим, как:

$$\text{УР}_М = \text{УИ} + S_S + 10 \cdot \log B + 2 \cdot A(r, H_1, H_C) - 40 \cdot \log r - 2\beta \cdot r - 60, \quad (5)$$

$$\text{УР}_Б = \text{УИ} + S_S + 10 \cdot \log B + A(r, H_1, H_C) + A(r, H_2, H_C) - 40 \cdot \log r - 2\beta \cdot r - 60, \quad (6)$$

где H_C–средняя глубина ЗРС; с -скорость звука, м/с; τ-длительность зондирующего сигнала, с; $B = \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot \Phi_М \cdot r$ – область поверхности (придонная область) с силой рассеяния S_S, лежащая в пределах угла $\Phi_М$, ширина которого соответствует эквивалентной ширине характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости в режимах излучения и приема.

Влиянием объемной реверберации в условиях мелкого моря пренебрегаем. Уровень донной реверберации будем оценивать по соотношениям (5) и (6).

При преобладании реверберации (поверхностной или донной) нетрудно показать, что:

$$\Delta\text{ОСП} = \Delta_{\text{rev}}(r) = \Delta_{\text{noise}}(r) - A(r, H_2, H_C) - A(r, H_1, H_C), \quad (7)$$

Для выполнения оценок по формулам (4) и (7) разработана программа в среде Mathcad 15, в которой предусмотрено использование файлов аномалий, предварительно рассчитанных на основе программного продукта «Методика-РА»[11].

Исходные данные для расчетов: профиль скорости звука, согласно рис.2; волнение моря -3 балла; средняя глубина ЗРС H_C=3 м для поверхностной реверберации и H_C=197 м – для донной реверберации; частота гидролокатора-8000 Гц; высота антенны - 1,0 м; глубина цели $H_Ц$=45 м; глубины ПА и АПГ соответствуют H_1=5 м и H_2 =55 м.

Примеры результатов расчетов показаны на рис.3 и рис. 4. Сплошными линиями показаны зависимости отношения эхо-сигнал/шумовая помеха, пунктирными линиями -зависимости отношений эхо-сигнал /поверхностная реверберация (рис.3) и эхо-сигнал/донная реверберация. Рис.3 соответствует излучению ПА и приему на АПГ.На рис. 4 для выбранной гидрологии излучение производится АПГ, а прием- ПА. На рис. 3,4 дистанция по оси абсцисс указана в м.

Анализ приведенных на рис.3 и 4 кривых показывает, что в условиях мелкого моря и отрицательной рефракции существует диапазон дистанций, в котором имеется выигрыш БГ по отношению сигнал/помеха по сравнению с МГ. При этом, значения этогодиапазона в случае преобладания шумовой помехи отличаются от значений диапазона для случая преобладания ре-

верберационной помехи. Аналогичные результаты получаются при наличии ярко выраженного слоя скачка скорости звука.

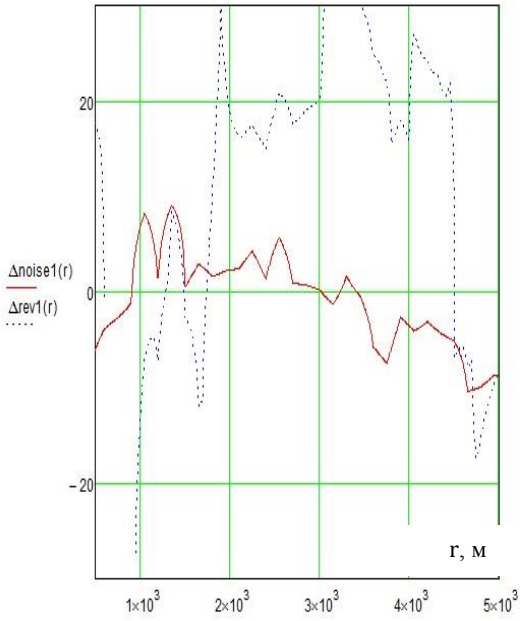


Рис. 3. Выигрыш БГпо сравнению с МГ (излучает ПА, принимает АПГ).

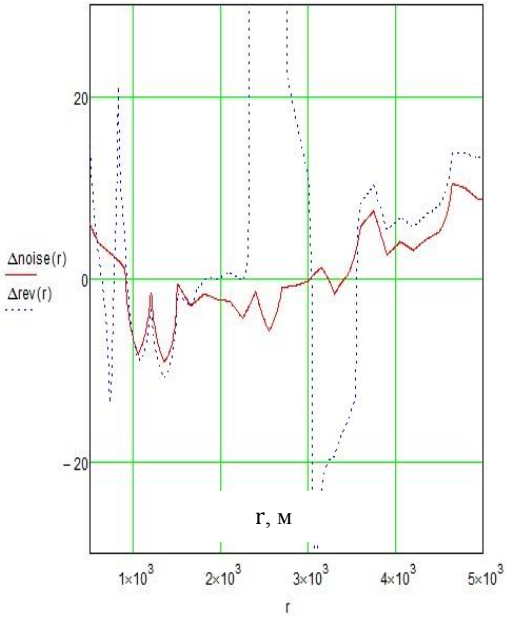


Рис. 4. Выигрыш БГ по сравнению с МГ (излучает АПГ, принимает ПА).

Выводы

1. Показана возможность достижения выигрыша в эффективности бистатического гидролокатора с разнесенными по глубине излучателем и приемником по сравнению с моностатическим гидролокатором в сложных условиях подводного наблюдения (мелководные районы, отрицательная рефракция скорости звука и др.).

2. Диапазоны дистанций, в которых достигается преимущество бистатического гидролокатора,для случаев преобладания шумовой и реверберационной (поверхностной или донной) помехи отличаются.

3. При выборе режима гидролокации (бистатический, моностатический) и определении излучающей и приемной антенн в конкретных условиях наблюдения необходима информация о преобладающем типе помехи и значениях аномалии распространения звука.

Литература

1. Белоус Ю.В., Козловский С.В., Сергеев В.А. Полистатический метод локации применительно к подвижным носителям //Тр. VIII Межд.конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», СПб.: Наука.- 2006.-С. 81-84.
2. Белоус Ю.В., Козловский С.В. Экологический мониторинг вредных районов с использованием моностатического и полистатического методов локации // Изв. ТРТУ, № 12.- 2006.-С. 78-81.
3. Козловский С.В., Малый В.В., Микушин И.И. Использование мультистатического режима наблюдения в корабельных гидроакустических системах ВМС США // Сб.научн.тр. ВМА им. Н.Г. Кузнецова. Часть 2.- СПб.: ВМА, 2009. - С. 294-308.
4. Машошин А.И. Исследование эффективности применения бистатической гидролокации / Тр. XII Всеросс.конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».-СПб.: Нестор-История, 2014.-С. 358-360.
5. Колесниченко В.В., Соскунова И.А., Школьников И.С., Шутов А.Л. Некоторые вопросы эффективности режима мультистатической гидролокации // Гидроакустика, вып. 19 (1), 2014. - С.103-107.
6. Волокитин С.Б., Гаврилов С.Ф. Некоторые закономерности применения бистатической гидролокации в авиационных противолодочных системах //Тр. XIII Всеросс.конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».-СПб, 2016.-С.402-405.
7. Malyj V.. Modeling of Surveillance Zones for Bi-static Active Sonars with the Use of Geographic Information Systems // Proceedings of the 8th International Workshop on Information Fusion and Geographic Information Systems (IF&GIS'2017), 10-12 May 2017, Shanghai, China, 2017.- p. 139-152.
8. Терминологический словарь-справочник по гидроакустике /Р. Х. Бальян, Э. В. Батаногов, А. В. Богородский и др. -Л.: Судостроение, 1989.- 368 с.
9. Урик Р. Дж.. Основы гидроакустики / Пер с англ., Л.: Судостроение, 1978. - 445 с.
10. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств.-Л.: Судостроение, 1981.-208 с.
11. Программа расчета дальности действия ГАС “Методика-РА”. Краткое руководство пользователю. НИЦ РЭВ ВМФ войсковой части 30895, 2002.- 9 с.

ОЦЕНКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ И ИСТОЧНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМ

В.Н.Некрасов, д-р техн.наук
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

ESTIMATION OF HYDROACOUSTIC PARAMETERS OF THE ENVIRONMENT AND SOURCES USING VECTOR RECEIVING SYSTEMS

V.N.Nekrasov, Dr.Sc.
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Приводятся результаты экспериментальных исследований, показывающие потенциальные возможности гидроакустических приемных систем, реализующих векторно-фазовые методы измерений (ВФМИ). Показана перспективность использования ВФМИ и измерительных систем с комбинированными гидроакустическими (векторными) приемниками (ВП) для низкочастотных гидроакустических измерений.

The results of experimental studies showing the potential of hydroacoustic receiving systems that implement vector-phase methods of measurement (VPMM). Promising use of VPMM and measuring systems with combined sonar (vector) receivers for low-frequency hydroacoustic measurements is shown.

Несомненным достоинством гидроакустических систем**,** реализующих векторно-фазовые методы измерений (ВФМИ) и базирующихся на комбинированных гидроакустических (векторных) приемниках (КГП), в состав которых входит измерительный ненаправленный приемник звукового давления (гидрофон) и трехкомпонентный приемник градиента звукового давления с ортогонально ориентированными осями чувствительности, является та их особенность, что уже в случае применения одиночного КГП возникает качественный скачок, который заключается в появлении новых свойств у точечной приемной системы – возможности в широкой полосе частот определять направление на источник шума, разделять по направлениям несколько источников и оценивать рабочие полосы частот и акустическую мощность их излучения. Это достигается благодаря применению принципиально новых (по отношению к системам на базе гидрофонов) алгоритмов обработки информации, обеспечивающих измерение как интегрального значения потока акустической энергии (мощности) в точке размещения КГП, так и ее пространственного (в зависимости от угла прихода) распределения, что в свою очередь обеспечивает возможность выделения и измерения лишь той части акустической энергии, которая обусловлена наличием в выбранном секторе окружающей среды измеряемого объекта [1, 2].

За рубежом вопросам применения векторно-фазовых методов для решения прикладных задач уделяется пристальное внимание. Там были описаны, запатентованы и реализованы принципы построения и системы на базе векторных приемников (ВП) для использования их в радиогидроакустических буях с целью обнаружения движущихся объектов, локализации источников низкочастотных импульсных сигналов [1], измерения параметров гидроакустических полей кораблей в условиях специальных морских полигонов [3-5].

В России, методы векторно-фазовых измерений широкого распространения пока не получили. К тому же продолжаются дискуссии о том, что ВФМИ не могут обладать серьезными преимуществами в плане возможного повышения соотношения сигнал/помеха (S/N) и лишь позволяют несколько упростить решение акустических задач [6]. Ниже приведены результаты измерений, показывающие несостоятельность этих утверждений.

В ФГУП «ВНИИФТРИ» уже в течение длительного времени ведутся работы по разработке и исследованию комбинированных гидроакустических (векторных) приемников (КГП) и средств их метрологического обеспечения, измерительных гидроакустических систем с векторными приемниками, а также алгоритмов векторно-фазовой обработки измерительной информации и их программного обеспечения. В настоящее время серийно изготавливаются комбинированные гидроакустические приемники КГП-1 на диапазон рабочих частот 10-1000 Гц и КГП-10 на диапазон частот 100-10 000 Гц, которые внесены в Государственный реестр средств измерений. Ниже приведены некоторые результаты экспериментальных исследований в различных натурных условиях с применением созданной аппаратуры.

В качестве первого примера приведем результаты проверки возможности локализации и оценки уровней отдельных источников с помощью одиночного КГП и статистической пространственной фильтрации потока акустической мощности (ПАМ) в условиях мелководной акватории при наличии на ней двух судов с механизмами, работающими в пересекающихся частотных диапазонах.

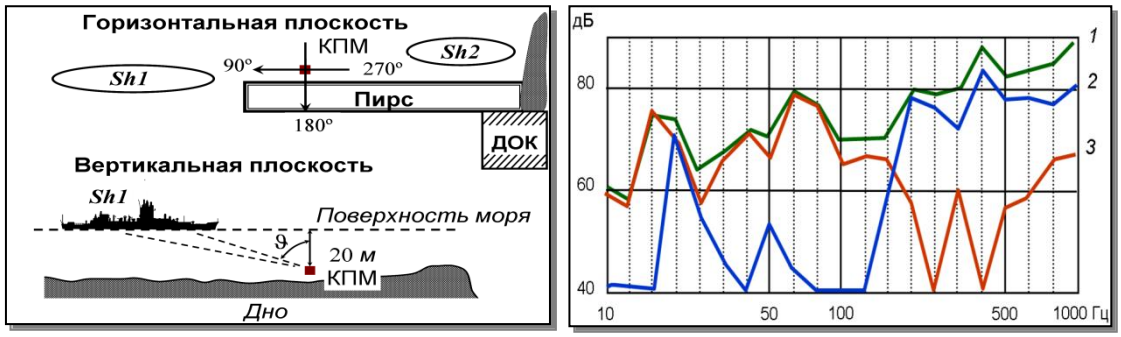
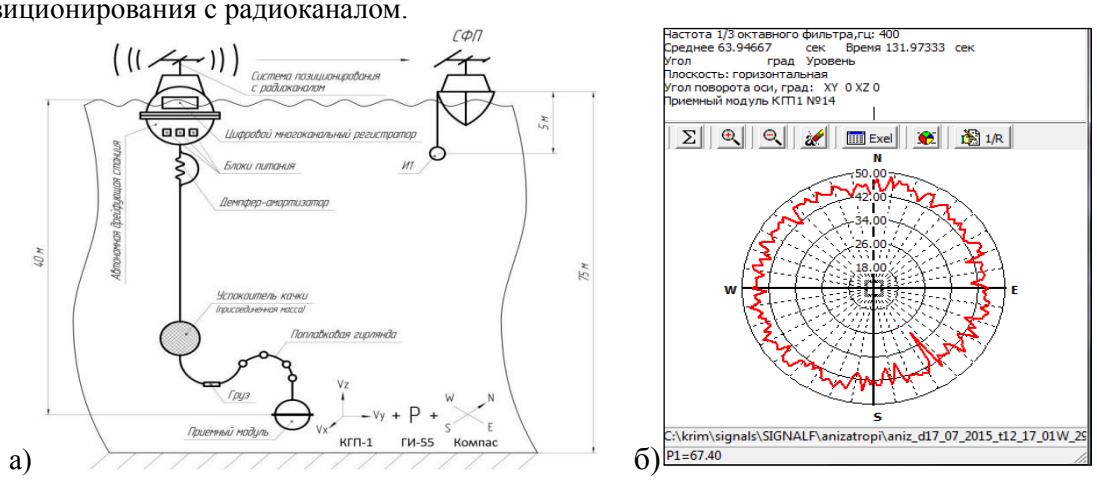


Рис. 1. Геометрия проведения измерений и третьоктавные спектры мощности.

На рис. 1 приведена геометрия расположения КГП и потенциальных источников шумоизлучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Исследуемое судно Sh1 было заякорено недалеко от пирса, к которому было пришвартовано другое судно (Sh2). С другой стороны пирса в непосредственной близости находился док с работающими механизмами. КГП находился на расстоянии около 25 м по горизонтали от носовой части исследуемого судна и в 1 метре от дна акватории на глубине 20 м. Там же приведены третьоктавные спектры мощности в диапазоне частот 10 – 1000 Гц, рассчитанные по сигналу с выхода приемника звукового давления (1), а также полученные для двух объектов: 2 – Sh2 и 3 – Sh1 с помощью алгоритма пространственно-частотной фильтрации потока акустической мощности в горизонтальной плоскости в третьоктавных полосах частот и в секторах, содержащих исследуемые объекты.

Из приведенных данных следует, что одиночный гидрофон измеряет интегральное значение шумов акватории (равное суммарному значению ПАМ от источников), в то время как КГП позволяет разделять в пространстве вклады отдельных источников и регистрировать сигналы интересующих объектов с соотношениями *сигнал/шум* на входе, существенно меньшими единицы, обеспечивая помехоподавление мешающих источников до минус 40 дБ.

Ниже, на рис.2, приведена схема и результаты измерений в отсутствии судоходства пространственного распределения ПАМ фоновых шумов при волнении 3 балла в горизонтальной плоскости в третьоктавной полосе 400Гц, выполненные в акватории Черного моря с помощью автономной дрейфующей станции (АДС-ВП), оснащенной комбинированным приемным модулем, содержащим КГП, компас, систему виброразвязки и связанным кабельной линией с корпусом станции, в котором размещалась цифровая аппаратура регистрации и спутниковая система позиционирования с радиоканалом.



а) б)

Рис. 2. а) - схема измерений, б) – распределение ПАМ в отсутствии судоходства.

При обработке, по данным, полученным с компаса, были сориентированы оси комбинированного векторного гидроакустического приемника (КГП) – ось X - на север, Y - на восток, Z – вертикально в верх.

Применение одиночного КГП позволяет определять направление на отдельные источники шума и оценивать акустическую мощность их излучения. На рис. 3а приведено время-угловое распределение (ВУР) потока акустической мощности (ПАМ) в горизонтальной плоскости в полосе 10-1000Гц, рассчитанное для интервала времени порядка 3 часов, когда мимо АДС-ВП прошли друг за другом два судна. Видно принципиальное информационное отличие ВУР от

обычной сонограммы, поскольку ВУР ПАМ позволяет оценить не только уровни регистрируемых сигналов от конкретных источников в конкретные моменты времени (см. рис. 3б), но и динамику изменения курсовых углов источников относительно измерительной системы. По приведенному на рис. 3а распределению ПАМ видны траектории движения двух судов относительно измерительной системы. Оба судна подходили с запада (курсовые углы 260-270 град), проходили севернее АДС-ВП (между системой и берегом) на расстоянии 5 км и уходили курсом 80-90 град на восток. На ВУР ПАМ (см. рис. 3а) видно значительное увеличение окружающих шумов от судов, когда они находятся вблизи траверса измерительной системы, а также разделение шумов и курсовых углов двух судов. Но особенно четко это разделение прослеживается на диаграммах распределения ПАМ в горизонтальной плоскости, рассчитанным в различных третьоктавных полосах частот – 100 и 125 Гц верхняя диаграмма и 250, 325 Гц нижняя (см. рис. 3б), по данным которых затем и рассчитывается время-угловое распределение потока акустической мощности.

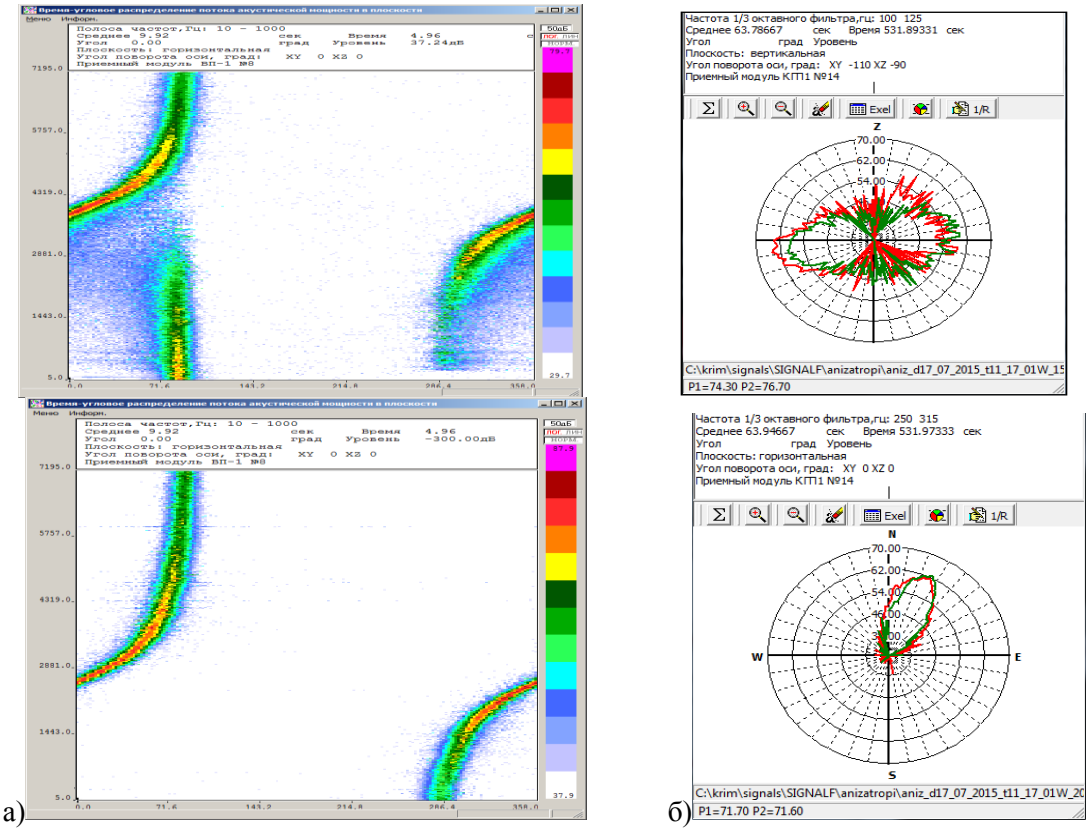


Рис. 3. а) - время угловое распределение ПАМ, б) – пространственное распределение ПАМ.

При проведении испытаний ИГС-ВП в Финском заливе Балтийского моря были отработаны алгоритмы пространственно-частотной фильтрации (ПЧФ) потоков акустической мощности (ПАМ) и показана возможность измерения подводного шума (ПШ) морских объектов при отношении сигнал/помеха до минус 10-15 дБ. На рис.4 приведена схема проведения эксперимента. Приемная система опускалась на дно с борта обеспечивающего СФП, имевшего собственные значительные уровни подводного шума, при этом наибольший шум создавал проходящий на удалении 6,5 км сухогруз.

Использование векторно-фазовых методов и систем с комбинированными гидроакустическими приемниками обеспечивает проведение прямых измерений уровней ПАМ малошумных морских объектов (МО), поскольку применение методов ПЧФ ПАМ обеспечивает возможность измерять лишь ту часть акустической энергии, которая приходит на приемную систему с телесного угла, исходящего из точки размещения приемной системы и охватывающего целиком МО на траектории движения. Практическая ценность предлагаемой методики заключается в том, что при измерении потока акустической мощности излучения с выбранного направления происходит значительное подавление шумов, некоррелированных с измеряемыми и приходящих с остальных направлений.

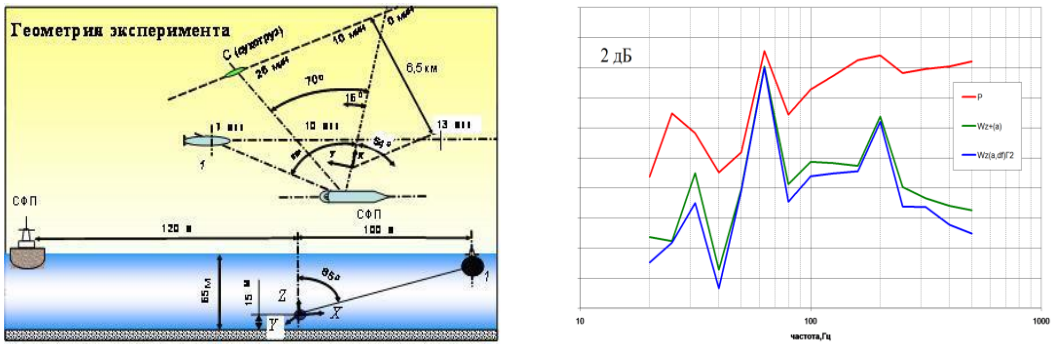


Рис. 4. Схема проведения эксперимента и результаты измерений шума МО.

Возможная степень помехоподавления мешающих источников может быть оценена из диаграмм углового распределения потоков акустической мощности, измеренных в различных полосах частот в горизонтальной плоскости и являющихся характеристикой анизотропии акустического поля в месте расположения приемника ПАМ. Исходя из характера диаграмм и ситуации в акватории проведения измерений можно выбирать оптимальные траектории движения измеряемого объекта с точки зрения минимизации вклада посторонних источников в результаты измерений. На рис.4 приведены результаты измерений шума МО в третьоктавных полосах частот методом МЗПХ в сложной окружающей обстановке. Из них следует, что по каналу звукового давления Р при использовании метода МЗПХ измерялась в основном «погода» и шумы посторонних источников, тогда как по каналу КГП при использовании метода пространственно-частотной фильтрации производились измерения только той части звуковой энергии, которая излучалась объектом в направлении на приемник. Приведенные результаты показывают эффективность алгоритмов ПЧФ, которые обеспечили помехоподавление мешающих шумов до 12 дБ в определенных частотных диапазонах.

Векторно-фазовые методы измерений – это путь создания перспективных измерительных гидроакустических систем, обеспечивающих, благодаря алгоритмам пространственно-частотной фильтрации потоков акустической мощности, проведение достоверных измерений параметров шумоизлучения морских объектов при малых отношениях сигнал/помеха, решение задач локализации и измерения мощности излучения отдельных источников.

Литература

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике.– М.: Физматлит, 2007, 480 с.
2. Гордиенко В.А., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н., Торопов В.Н. Локализации источников излучения на корпусе корабля при одновременном использовании комбинированного приемника и методов спектрального анализа с высоким разрешением// Ак. журн., 2011, 57, № 2. С. 179-191.
3. Roy Jean-Alain. Centre Technique des Systèmes Navals, Toulon, France. Measurement ofships' underwater radiated noise on ranges// UDT Pacific 98. February, 1998.– Sydney, Australia. – P. 290-295.
4. Clark J., Tarasek G. Localization of Radiating Sources along the Hull of a Submarine Using a Vector Sensor Array// Oceans'06, MTS IEEE, Revolutionize Marine Science Technology, Sept. 18-21, 2006, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts.
5. R S Chwaszczewski, Michael A Slater, Jennifer K Snyder, E David Tietje, Robert C Green Reinventing Submarine Signature Measurements: Installation of the High Gain Measurement System at SEAFAC // OCEANS 2009, October 26 – 29.
6. Смарышев М.Д. О помехозащищенности гидроакустического комбинированного приемника// Акуст. журн. 2005. Т.51, N 3. С.357-358.
7. Иванов В.С., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н., Кукушкин Д.Г., Чернышов В.А. Поиск и оценка мощности излучения источников шума с помощью одиночного комбинированного гидроакустического приемника.// 6-я Всероссийская научно-техническая конференция "Технические проблемы освоения Мирового океана", 2015 г., Владивосток, Россия.

ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АКУСТИКЕ И ГИДРОАКУСТИКЕ

А.А.Панич, д-р техн.наук, А.В.Скрылёв, В.К.Доля, канд.техн.наук, С.Н.Свирская канд.хим.наук, Л.А.Дыкина, Е.В.Карюков, канд.техн.наук, А.В.Нагаенко, канд.техн.наук
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

OVERVIEW OF PERSPECTIVE PIEZOCOMPOSITES FOR APPLICATION IN ACOUSTIC AND HYDROACOUSTICS

A.A.Panich, Dr.Sc., A.V.Skrylev, V.K.Dolya, Ph.D., S.N.Swirskaya, Ph.D., L.A.Dykina, E.V.Karyukov, Ph.D., A.V.Nagaenko, Ph.D.
Institute of High Technologies and Piezotechnics SFedU, Rostov-on-Don, Russia

Пьезокомпозиты постоянно вызывают высокий интерес, так как обладают уникальными свойствами, которые делают их перспективными для применения в областях акустики и гидроакустики. Среди них особое место занимают пьезокомпозиты связности 3-0, 3-3 и 1-3 на основе пьезокерамики и пьезокомпозиты на основе сульфоиодида сурьмы. Они обладают рекордно высокими значениями объемной пьезочувствительности и повышенной стабильностью к воздействию гидростатического давления, что делает возможным использование их на больших глубинах.

Piezocomposites cause constantly high interest, since they have unique properties that make them promising for applications in the fields of acoustics and hydroacoustics. Among them, a special place is occupied by piezocomposites of connectivity 3-0, 3-3 and 1-3 based on piezoceramics and piezocomposites based on antimony sulfur iodide. They have record high values of volumetric piezoelectricity and increased stability to hydrostatic pressure, which makes it possible to use them at great depths.

В настоящие время в качестве активных элементов излучателей и приемников звука используется пьезокерамика, отличающаяся высокими значениями электрофизических параметров, стабильностью свойств в широком интервале температур и низкой гигроскопичностью [1]. Однако она имеет и свои минусы – высокую плотность и, как следствие, высокий акустический импеданс, низкие объемночувствительные характеристики, что существенно усложняет конструкцию чувствительных элементов, поскольку требуется трансформация объемного давления в одноосное. Этих недостатков лишены пьезокомпозиты: они имеют низкий акустический импеданс, высокие объемночувствительные характеристики. Благодаря высоким объемночувствительным характеристикам пьезокомпозитов и лучшему акустическому согласованию с водой появилась возможность отказаться от необходимости трансформации объемного давления в одноосное и, следовательно, существенно упростить конструкцию преобразователей для целей акустики и гидроакустики и снизить их стоимость.

Пьезокомпозиты смешанной связности 3-0 и 3-3 на основе пьезокерамики. Как уже отмечалось для достижения максимальной эффективности чувствительных элементов (ЧЭ), работающих в режиме приема, необходим переход к композиционным пьезоматериалам [2,3], в частности, к композитам со смешанной связностью (3-0 и 3-3). Основой композитов со смешанной связностью 3-3 и 3-0 является пористая пьезокерамика, которая может иметь как открытые, так и закрытые поры. В первом случае поры можно заполнить полимером или оставить в них воздух. Во втором случае в порах находится воздух, и заполнить их другими веществами после спекания невозможно. Переход к композитам позволяет существенно повысить объемные пьезохарактеристики ЧЭ: диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$) и модуль Юнга второй фазы пьезокомпозита в рассматриваемом случае - воздуха много ниже чем у активной фазы, что приводит к снижению $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ и поперечного пьезомодуля (d_{31}) пьезокомпозита при сохранении относительного высоких значений продольного пьезомодуля (d_{33}), соизмеримого по значениям с плотной пьезокерамикой, и как следствие высокие значения объмного пьезомодуля (d_V).

Анализ известных способов получения пористой пьезокерамики показывает, что наиболее технологичным и производительным является спекание отформованных заготовок из смеси пьезоматериала с порообразователем [4]. Этот способ позволяет получать образцы желаемых размеров и форм, а также исключает механическую обработку пористых керамических каркасов. Использование твердых порообразователей дает возможность изготовить керамику с содержанием пьезоактивной фазы от 40 до 95% и обеспечивает достаточно высокую воспроизводимость пористости.

Экспериментально установлено, что в процессе обжига образуются смешанный характер связности пьезокомпозита (рис.1). Однако, при уменьшении объемного количества активной фазы, доля связности 3-0 меняется несущественно, доля же связности 3-3 продолжает расти. Микроструктура пьезокомпозита с содержанием активной фазы 75 и 55 % представлена на рис. 2.

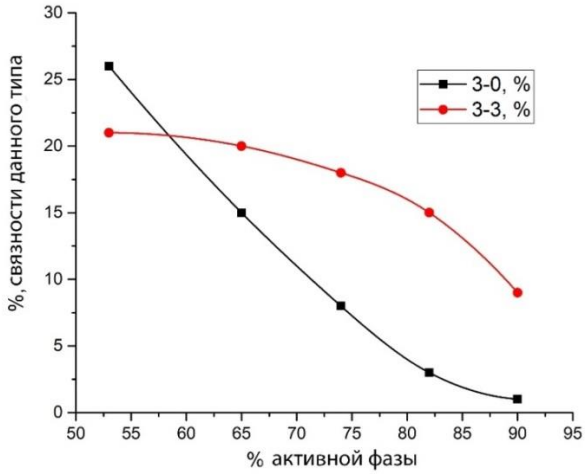


Рис. 1. Зависимость доли связности 3-0 (закрытая пористость) и связности 3-3 (открытая пористость) от содержания активной фазы в пьезокомпозите.

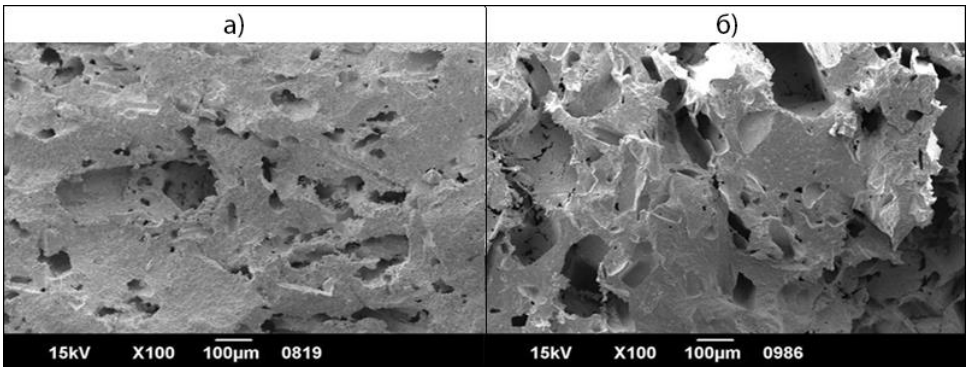


Рис. 2. Микроструктура пьезокомпозита с содержанием активной фазы 75% (а) и 55% (б).

Исходя из зависимостей, представленных на рис. 1 и микроструктуры керамических каркасов, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что при содержании активной фазы порядка 55-70 % начинает преобладать открытая пористость. Логично предположить, что такой переход скажется и на электрофизических параметрах композита.

Электрофические характеристики (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$, пьезомодуль d_V и объёмная пьезоконстанта g_V) данного типа пьезокомпозита на основе пьезокерамического материала ПКП-12 представлены на рис. 3. Очевидно, что при уменьшении объёмной доли активной фазы до 60-65% параметры g_V и d_V (соответственно чувствительность по напряжению и чувствительность по заряду) заметно возрастают. Пористость, при которой наблюдается данное изменение, совпадает с началом преобладания в образцах открытой пористости. Данный момент важно учитывать при создании объмночувствительных датчиков, требующих максимально высокую чувствительность по напряжению или по заряду.

Пьезокомпозиты на основе сульфоиодида сурьмы. В последние годы проявляется значительный научный и практический интерес к сегнетоэлектрику-полупроводнику сульфоиодиду сурьмы (III) SbSI [5, 6]. Сульфоиодид сурьмы имеет рекордно высокие значения объемных пьезоэлектрических характеристик среди известных однофазных сегнетоэлектрических материалов и пьезоэлектрические датчики, изготовленные на его основе, могут непосредственно преобразовывать всестороннее сжатие в электрический сигнал с высокой эффективностью. Кроме этого, материалы на его основе обладают высокими стабильными во времени пьезоэлектрическими характеристиками и пироэлектрическими свойствами, а также относительно высокой термической и химической устойчивостью. Исследования показали, что текстурированные материалы на основе SbSI обладают столь же устойчивыми сегнетоэлектрическими и пьезоэлектрическими характеристиками, что и монокристаллы, и могут использоваться в качестве активной фазы в 1-3 пьезокомпозитах.

Однако широкое использование сульфоиодида сурьмы тормозилось отсутствием простых и надежных способов его получения. Так, основным способом синтеза небольших партий сульфоиодида сурьмы (III) на практике до последнего времени оставалось взрывоопасное взаи-

модействие простых веществ в вакуумированных ампулах, которое проводилось в течение нескольких суток с использованием сложного температурного режима. Разработанный в ЮФУ способ получения сульфоиодида сурьмы в водных растворах [7], позволил проводить синтез при комнатной температуре и перейти к использованию легкодоступных соединений. Помимо этого, сульфоиодид сурьмы имеет еще два недостатка, ограничивающих его использование в пьезоэлектрических устройствах: близкая к комнатной температура Кюри (T_C) и низкая механическая прочность, обусловленная морфологией кристаллов. Повысить температуру Кюри до 70^0C удалось за счет легирования сульфоиодида сурьмы в процессе его синтеза либо в процессе выращивания текстур. Второй недостаток удалось преодолеть, усиливая уже готовый материал различными связующими добавками, например, добавками полимерных материалов, то есть, переходя к композитам.

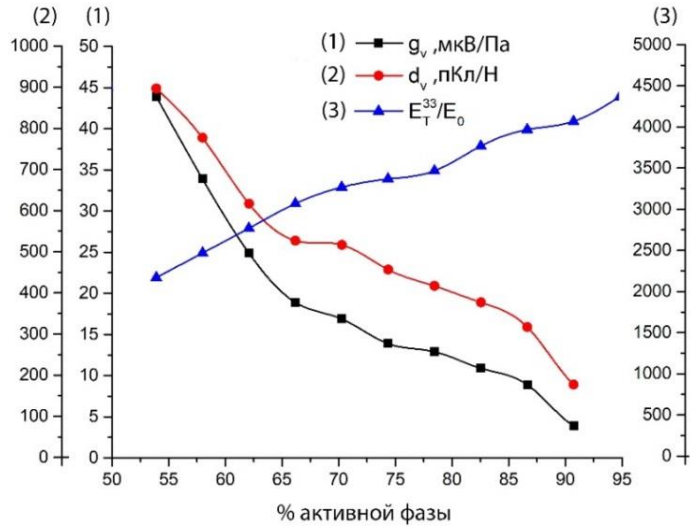


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, пьезомодуля d_V и пьезоконстанты g_V от содержания активной фазы в пьезокомпозите на основе ПКП-12.

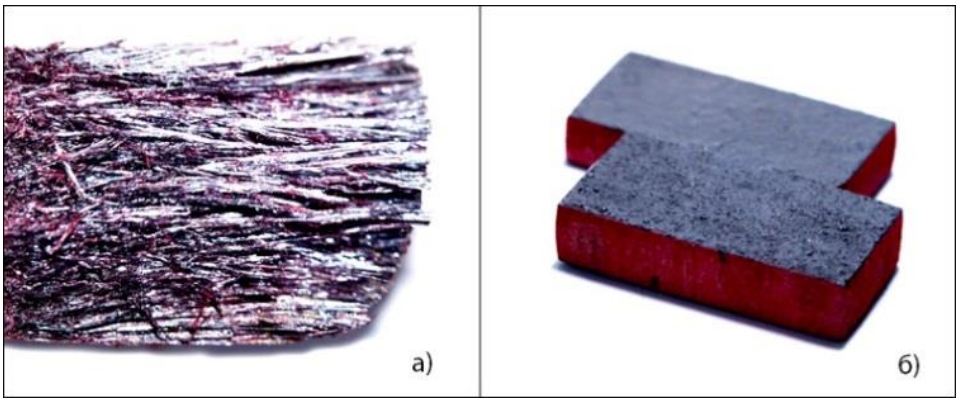


Рис. 4. Текстуры SbSI (а) и пьезокомпозит 1-3 на основе SbSI (б).

Общий вид выращенных методом Бриджмена-Стокбаргера текстур на основе легированного SbSI и композита, изготовленного из текстур, показаны на рисунке 4.

Электрофизические параметры, полученные на ЧЭ, основой которых являются материалы на основе сульфоиодида сурьмы, представлены в таблице 1.

Сравнение показывает, что по температурному диапазону легированный SbSI обладает существенными преимуществами перед чистым сульфоиодидом сурьмы, в то время как по эффективности при 20°C он ему несколько уступает. С ростом температуры до 40-45°C фактор приема ($g_v \cdot d_v$) у легированного материала почти не изменяется. С дальнейшим ее ростом наблюдается уменьшение параметров, но эти изменения полностью обратимы в интервале температур от минус 30 до плюс 70°C. Электромеханические параметры легированного SbSI стабильны при действии всестороннего давления вплоть до 60-70МПа, а при увеличении давления до 100МПа все изменения обратимы. Таким образом, поликристаллический материал на осно-

ве сульфоиодида сурьмы можно использовать в преобразователях-приемниках, работающих в более широком интервале температур и давлений, чем чистый SbSI, то же можно сказать и о композите.

Таблица 1. Электрофизические параметры ЧЭ из материалов на основе сульфоиодида сурьмы.

Параметр	Материалы на основе SbSI		
	Монокристаллы	Легированный SbSI	Композит 1-3 на основе легированного SbSI
T_c, ℃	18-22	50-70	50-70
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, 20℃	2000 (5° C)	800-900	550-600
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_{0\,max}$	10^4 (5° C)	1150(30°C)	750
tgδ, %	2	2-5	2-5
d_{31}, пКл/Н	-150	-(70-80)	--
d_{33}, пКл/Н	1200	550-600	550-600
$g_v \cdot 10^{-3}$, В · м/Н	80	55-65	≥75
d_v, пК/Н	900 (5°C) 0(30°C)	400-500	400
$g_v \cdot d_v \cdot 10^{-12}$, м²/Н	70	32-35	≥40

Литература

1. Свердлин Г.М., Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1976.
2. Newnham R.E., Composite elektroceramics // Ferroelectrics. 1986. V.68. pp. 1-32.
3. Smith W.A., Auld B.A., Modelling 1-3 composite piezoelectrics: Thickness mode oscillations // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control, 38, 1991. Pp. 40-47.
4. Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В., Панич Е.А., Способы формирования микроструктуры пористых пьезокерамических каркасов // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3 (21). С. 497-501.
5. Шашкольская М.П., Кристаллография. М.: Высшая школа, 1984.
6. Герзанич Е.И., Фридкин В.М., Сегнетоэлектрики типа $A^VB^{VI}C^{VII}$. М.: Наука, 1982.
7. Лупейко Т.Г., Свирская С.Н., Пахомов А.С., Рыбина И.Н., Медведева Е.С., Синтез и легирование сульфоиодида сурьмы в водных растворах // Новые технологии и инновационные разработки: Материалы III Межвузовской научно-практической ежегодной конференции. Тамбов. 2010. С. 102 – 105.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛА С ОПТИМАЛЬНЫМИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ АКУСТИЧЕСКОГО РЕПЕРА, НАБЛЮДАЕМОГО НА ФОНЕ ПОМЕХ

Д.А.Солодкий, Г.В.Теверовский, канд.техн.наук
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

ON THE USE OF PERIODIC DISCRETE SIGNAL WITH OPTIMAL CORRELATION PROPERTIES FOR MOVING ACOUSTIC REFERENCEN POSITIONING OBSERVED AGAINST NOISE

D.A.Solodkiy, G.V.Teverovskiy, Ph.D.
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Рассмотрено и обосновано использование сложного периодического фазоманипулированного сигнала на основе М-последовательности с оптимальными корреляционными свойствами для определения параметров движения, в том числе мгновенной скорости, движущегося объекта, наблюдаемого на фоне помех акватории.

The use of a complex periodic phase-manipulated signal based on the M-sequence with optimal correlation properties for determining the parameters of motion, including the instantaneous velocity, the moving object, observed.

При измерениях параметров движения источника сигнала шумовой природы, наблюдаемого в поле приемников, как правило, используется система измерения на основе активного реперного излучателя установленного на объекте исследования. Излученный сигнал, используемый для вычисления параметров движения изучаемого объекта не должен вносить существенные возмущения в измеряемую шумовую обстановку.

Для измерения параметров движения обычно используются импульсный или тональный сигнал. Недостатком использования время-пролетного метода на основе импульсного сигнала с гармоническим заполнением является то, что уровень сигнала значительно превышает уровень шумов акватории и уровень излучения исследуемого объекта. Кроме того, использование время-пролетного метода не позволяет измерять мгновенную скорость. Использование тонального сигнала не позволяет определять текущие дистанции и, таким образом, не позволяет контролировать текущее местоположение объекта. Вычисление значения скорости и минимальной дистанции возможно только при прохождении объектом траверза приемника.

К настоящему моменту получили распространение время-пролетный метод измерения дистанций на основе широкополосных (шумоподобных) сигналов получаемых прямым расширением спектра узкополосного сигнала с минимальной частотной модуляцией. При измерении параметров движения объекта вычисляется расстояние между передатчиком и приемником по временной задержке и скорость по Доплеровскому смещению частоты гармонического заполнения импульсного сигнала.

В современных системах позиционирования, например, система ГЛОНАСС или GPS[1], используются фазомодулированные сигналы на основе псевдослучайных последовательностей. Применение адаптивной фильтрации позволяет уверенно принимать сигнал при соотношении сигнал/шум до -16дБ. Так же сложные фазоманипулированные сигналы используются в гидроакустических измерениях параметров водной среды и при работе с подводными автономными аппаратами [2].

В данной работе в качестве излучаемого сигнала был использован импульсный сигнал с заполнением гармонической несущей, фаза которой модулирована М-последовательностью, вида:

$$y(t) = A * \cos[2 * \pi * f * t + \pi * M(t)], \quad (1)$$

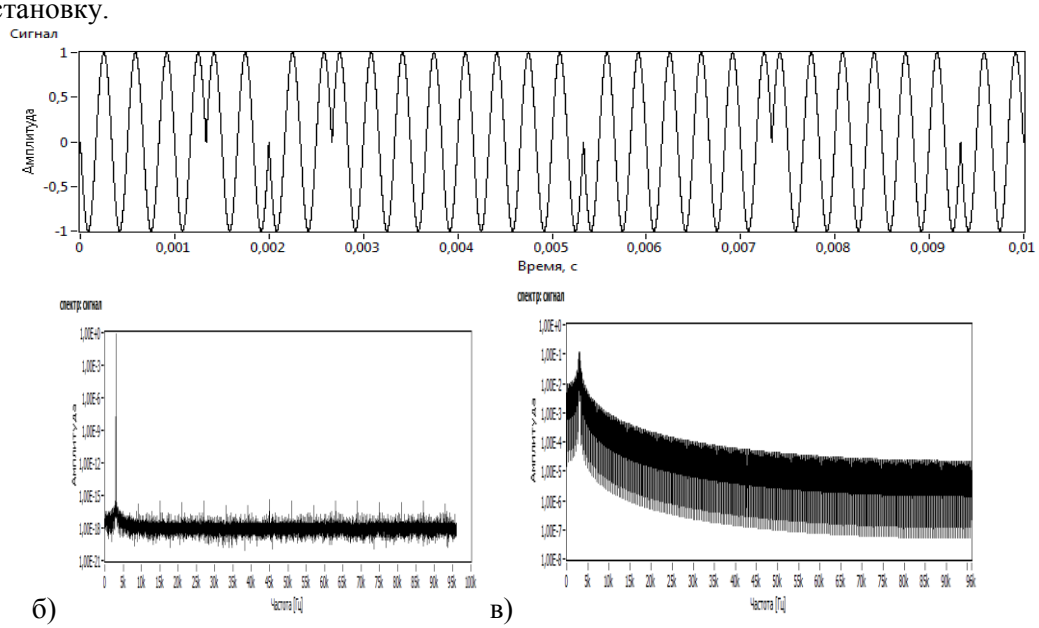
где M(t) - М-последовательность, принимающая два значения (0 и 1).

Наиболее важная особенность М-последовательности состоит в том, что ее автокорреляционная функция равна N при отсутствии сдвига и –1 для всех остальных значений сдвига ($1 \le i < N$).

Автокорреляционная функция сигналов в виде несущей, фаза которых манипулировала М-последовательностью обладает практически теми же свойствами, что и корреляционная функция модулирующей последовательности [3].

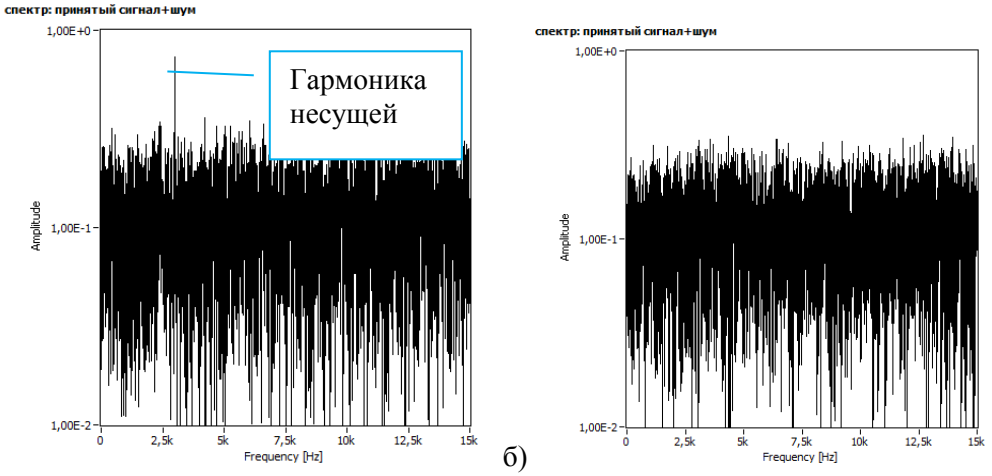
На рис. 1 показано графическое представление используемого сигнала (а) и его спектр (в). Для сравнения приведен спектр импульсного сигнала такой же длительности с гармоническим заполнением (б). Как видно из приведенных примеров, использование фазовой модуляции позволяет существенно расширить спектр излучаемого сигнала. Расширение спектра сигнала необходимо для получения локализованного максимума корреляционной функции при дальнейшей обработке. В результате фазовой модуляции гармонической несущей, спектральная по-

лоса излучаемого сигнала увеличивается, уровень основной гармоники в спектре излученного импульсного сигнала уменьшается на порядок и не оказывает влияние на измеряемую шумовую обстановку.



а) б) в)

Рис. 1.



а) б)

Рис. 2.

На рис. 2 приведены спектры принятого сигнала при соотношении излученный сигнал/шум = -20дБ. Как видно из спектрограммы (рис. 2а) уровень гармонической составляющей несущей заметно превышает средний уровень по всей полосе анализа. При фазовой модуляции (рис. 2б) в спектре принятого сигнала отсутствуют искажения, вызванные излученным сигналом. В задачах определения местоположения источника сигнала, наблюдаемого на фоне помех, используется время-пролетный метод, основанный на адаптивной фильтрации: выполняется корреляция принятого сигнала с образом излученного и по максимуму корреляционной функции определяется задержка распространения сигнала. На рисунке 3 показаны корреляционные функции исходного сигнала и принятого. Импульс с гармоническим заполнением (а) и импульс с фазоманипулированным заполнением (б) при одинаковом соотношении сигнал/шум в принятом сигнале -20 дБ. Как видно из рисунка, применение фазоманипулированного заполнения позволят значительно увеличить степень локализации главного максимума и точнее определить момент прихода сигнала.

В случае относительного движения приемника и излучателя возникает Доплеровское смещение частоты сигнала, в результате чего функция корреляции опорного и принятого сигнала становится многоэкстремальной с отсутствием явно выраженного глобального максимума из-за смещения частоты. Для определения скорости движения необходимо реализовать итерационную процедуру подбора частоты заполнения опорного сигнала в зависимости от скорости движения. Точность определения скорости зависит от степени локализации главного максимума

корреляционной функции и при цифровой обработке сигнала зависит от частоты квантования входного сигнала.

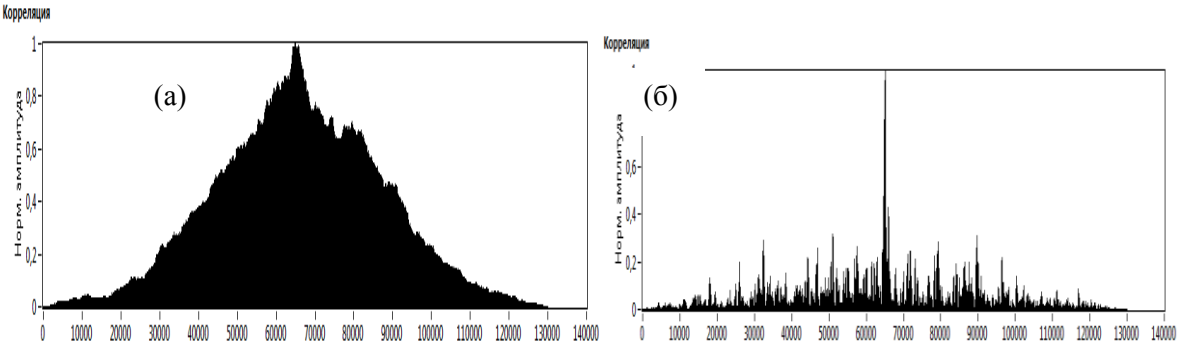


Рис. 3.

На рис. 4 изображены коррелограммы в плоскости скорость/задержка сигнала с гармонической несущей (а) без шума и (б) при соотношении сигнал/шум = -20дБ, а также сигнала с гармонической несущей с фазовой модуляцией на основе М-последовательности (в) без шума и (г) при соотношении сигнал/шум = -20дБ при соотношение частоты квантования к частоте несущей 64.

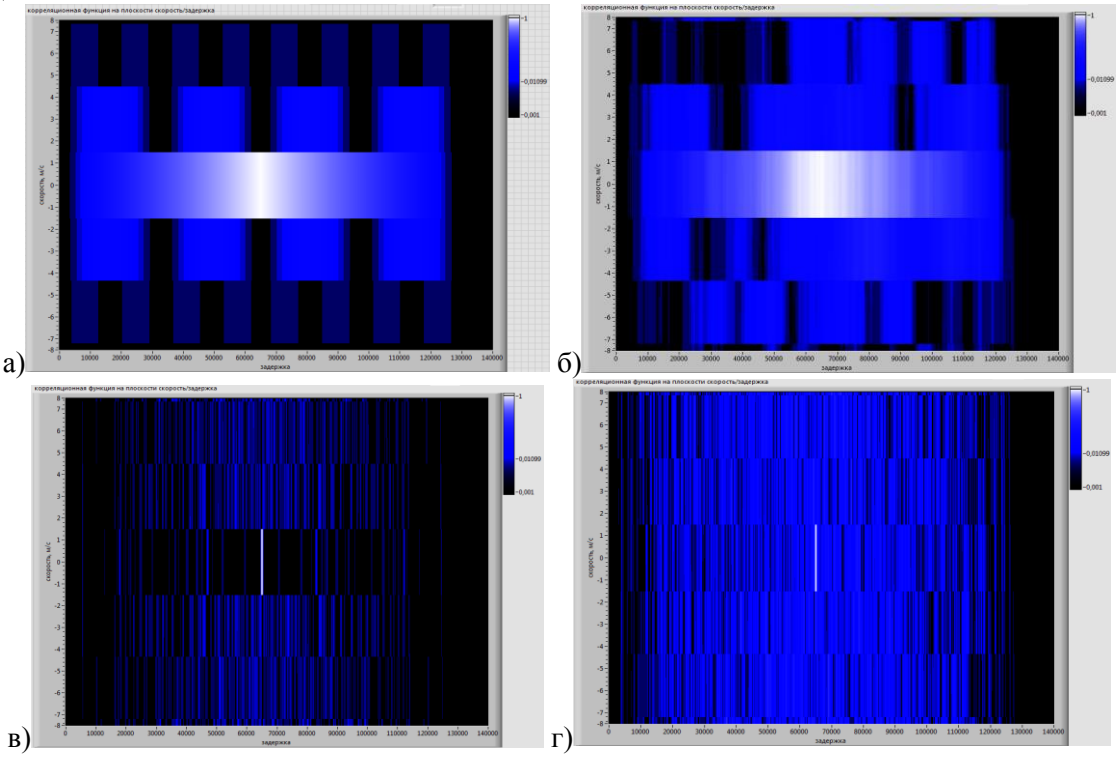


Рис. 4.

На рис. 5 изображены коррелограммы в плоскости скорость/задержка сигнала с гармонической несущей (а) без шума и (б) при соотношении сигнал/шум = -20дБ, а также сигнала с гармонической несущей с фазовой модуляцией на основе М-последовательности (в) без шума и (г) при соотношении сигнал/шум = -20дБ при соотношение частоты квантования к частоте несущей 1000.

Таким образом, применение сложного фазоманипулированного периодического дискретного сигнала с оптимальными корреляционными свойствами позволяет повысить точность позиционирования объекта относительно приемной системы, определять мгновенную скорость движения и не оказывает влияние на измеряемую шумовую обстановку.

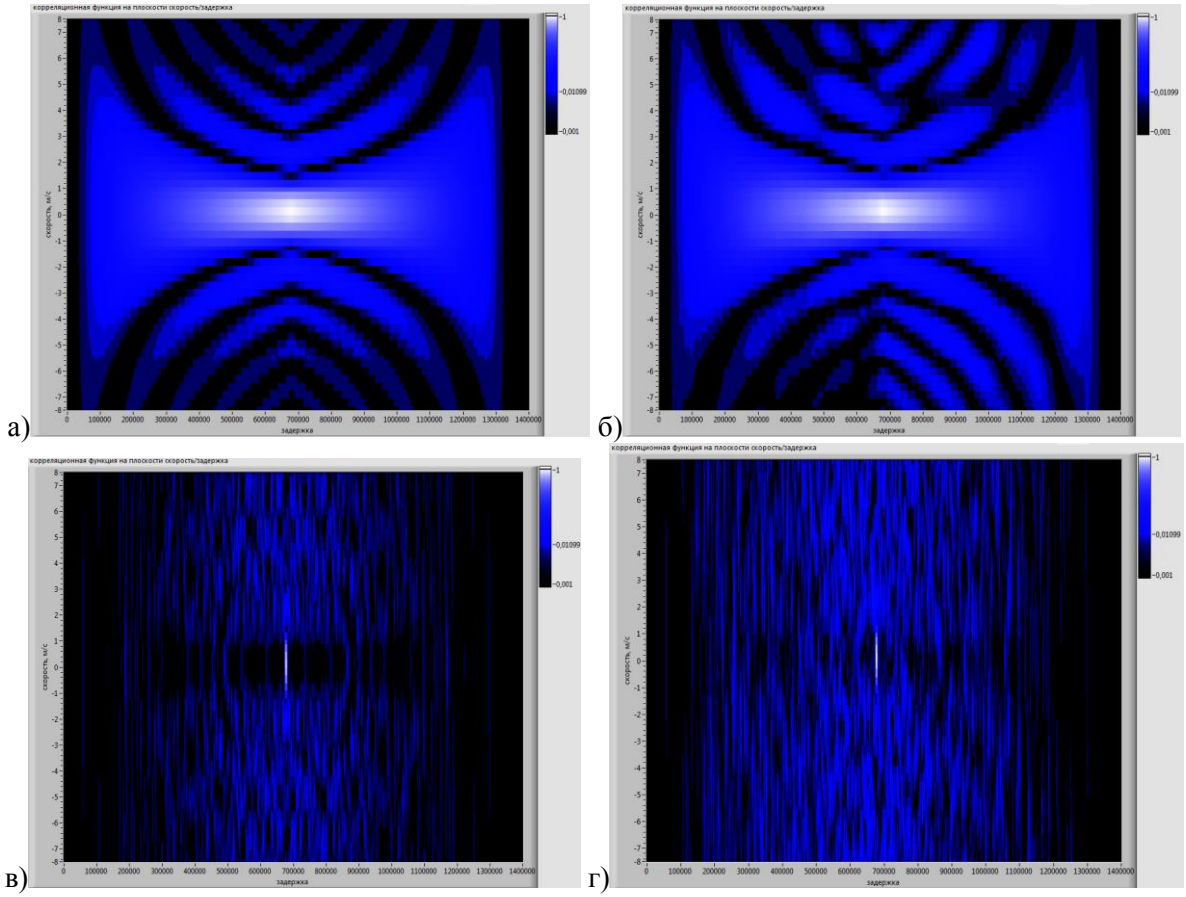


Рис. 5.

Литература

1. Бурдинский И.Н., Матвиенко Ю.В., Миронов А.С., Рылов Р.Н. О применении сложных сигналов в гидроакустических системах навигации и управления подводными роботами - Подводные исследования и робототехника. – 2008. – №1(5). – С.39-46.
2. Elliot D. Kaplan Understanding GPS, Artech House, Boston 1996, ISBN 0-89006-793-7
3. Зверев В. А., Стромков А. А. Выделение сигналов из помех численными методами. Н.Новгород, ИПФ РАН. 2001. 188с.
4. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь. -1984. - 384с.
5. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. - М.: Радио и связь. -1992. - 152с.
6. Гантмахер В. Е, Быстров Н. Е., Чеботарев Д. В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. - СПб.: Наука и Техника, 2005 - 400с.

Научные сообщения

О РАЗЛИЧИИ В ПРОГНОЗАХ УРОВНЕЙ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В МЕЛКОМ МОРЕ ВОЛНОВЫМ И ЛУЧЕВЫМ МЕТОДАМИ

К.В.Авилов, канд.физ-мат.наук, Ю.Е.Глазов, канд.техн.наук, О.И.Косарев, д-р техн.наук, В.И.Ксенофонтов, И.С.Ракитина, канд.физ-мат.наук
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

ON THE DIFFERENCE IN TRANSMISSION LOSS FORECASTING FOR SHALLOW SEA BY WAVE AND RAY TECHNIQUES

K.V.Avilov, Ph.D., Yu.E.Glazov[1], Ph.D., O.I.Kosarev, Dr.Sc., V.I.Ksenofontov, I.S.Rakitina, Ph.D.
A.A. Blagonravov Institute of Machines Science of the RAS, Moscow, Russia

В докладе предложено объяснение заметной разницы в прогнозе уровня звуковых полей волновым и лучевым методами, встречающейся в расчетах на достаточно протяженных трассах в мелком море. Приведены результаты численного эксперимента, подтверждающие сделанные выводы.

Science material obtained in the already accomplished and currently continued experiments on acoustic thermometry of the ocean allows us to make some conclusions regarding the perspective of using underwater acoustics for investigation of the ocean climatic variability and design the plans of more comprehensive ongoing experiments. Each of the four oceans plays its own distinct role in forming the global climate.

Рассмотрим прогноз потерь распространения по трассе в центральной впадине Баренцева моря, начинающейся в точке с координатами 71°18′ сш 39°3.6′ вд и простирающейся в направлении на Северный полюс. Рельеф дна извлечен из базы ETOPO1, поле скорости звука в воде – из базы GDEM v3.0 для августа месяца с развитым придонным звуковым каналом, геоакустические свойства дна – из базы «Модель-С». В начальной точке трассы на глубине 120 м расположен гармонический монопольный источник звука частотой 6300 Гц.

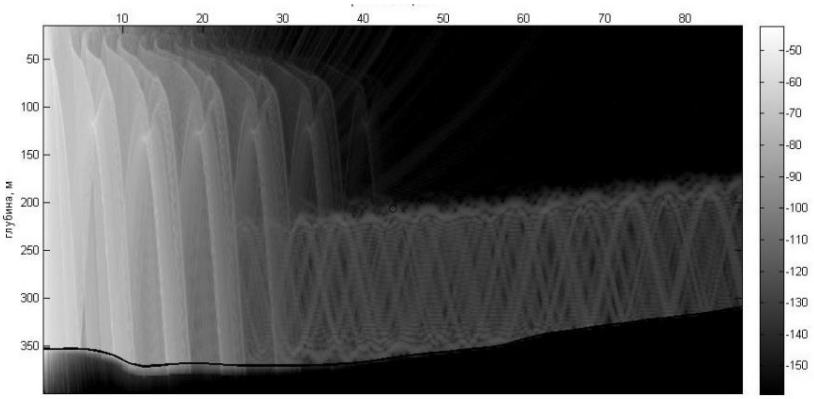


Рис. 1. Прогноз потерь распространения волновым методом.

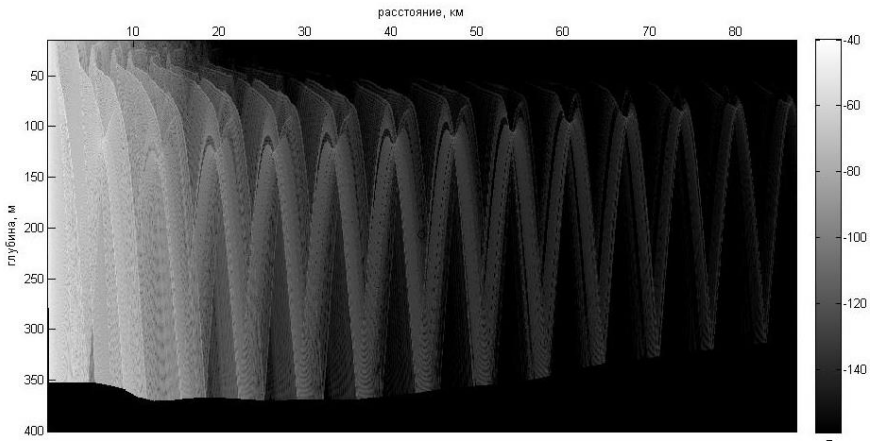


Рис. 2. Прогноз потерь распространения лучевым методом.

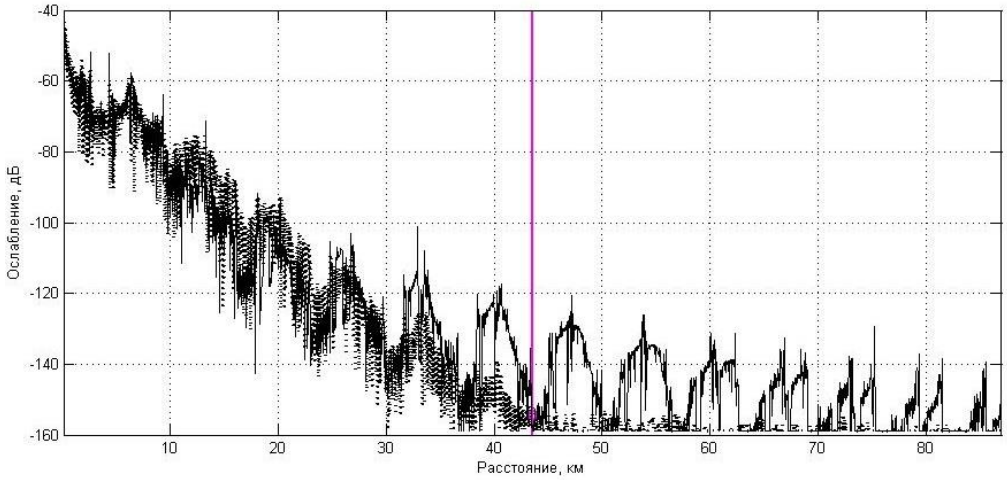


Рис. 3. Горизонтальный разрез потерь распространения по глубине 120 м. Тонкая сплошная линия – лучевой прогноз, пунктирная – волновой.

Расчеты производились с применением программного комплекса РПЗЭМС [1].

Как видно из рис. 1, 2, 3, на дистанциях приблизительно до 30 км наблюдается разумное совпадение результатов расчетов обоими методами, а далее они существенно (до 20 дБ) различаются.

Причиной различия в прогнозах волновым и лучевым методами может быть, в первую очередь, недостаточно точное описание лучевым методом механизма отражения от дна. При выводе лучевого метода для слоистой среды [2] на основе метода ВКБ и метода перевала модели среды с разрывами свойств не рассматриваются вообще и, в частности не рассматривается ситуация при завороте луча вблизи дна и при пологом падении, когда место разрыва попадает в зону не-ВКБ. Для более простых моделей среды, состоящей из слоев и полупространств с постоянными свойствами аналитическое рассмотрение [3, 4] приводит к выводу о том, что отражение искривленных лучевых фронтов от разрывов свойств среды не сводится к перемене знака вертикальной составляющей направляющего вектора и перемене амплитуды луча, а включает в себя сдвиг луча вдоль границы дна. Кроме того, в волновой модели учитывается пространственная зависимость свойств дна, а в лучевой оно полагается однородным полупространством, что приводит к различию в отражающих свойствах дна даже на частотах порядка нескольких килогерц.

Рассматривая результаты расчета, можно предположить, что на выпуклом склоне морского дна в районе 10 км из-за неучтенного сдвига лучей выполаживание лучей (возбуждение более низких локальных нормальных волн) отражено не полностью, коэффициент отражения более крутых лучей переоценен, что и приводит к различию в прогнозах.

Отметим, что время вычислений полной картины поля по всему волноводу при сравнимой подробности вывода волновым методом на современных средствах оказывается даже меньше такового для лучевого метода. Например, картина рис. 1 была рассчитана на домашнем компьютере с процессором Xeon E3-1225 v3 за 104 секунды, а картина рис. 2 – за 173 сек.

Поэтому во избежание возникновения описанной проблемы можно уверенно рекомендовать к использованию для гидроакустических расчетов именно волновой метод, наиболее реально отображающий распространение волн в сложных средах.

Литература

1. Авилов К.В., Добряков Н.А., Попов О.Е., Комплекс программных средств для вычисления звуковых полей в морской среде, неоднородной по глубине и трассе распространения, Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», Москва: ГЕОС, 2004, стр. 27.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: «Наука», 1973.
3. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л., Гидрометеоиздат. 1982.
4. Siegmann W. L., Jacobson M. J., and Law L. D. Effects of bottom attenuation on acoustic propagation with a modified ray theory, The Journal of the Acoustical Society of America 81, 1741 (1987).

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СОГЛАСОВАННОЙ СО СРЕДОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Ю.В.Махнев, А.Т.Трофимов, д-р техн.наук
АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Московская область, Россия

ON POSSIBILITY REALIZATION OF MATCHED WITH ENVIRONMENT SIGNAL PROCESSING FOR LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC WAVEGUIDE

Y.V.Makhnev, A.T.Trofimov, Dr.Sc.
JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Moscow region, Russia

Доклад посвящен решению актуальной задачи, связанной с построением оптимальных алгоритмов обнаружения гидроакустических сигналов при их многомодовой структуре распространения в мелком море. В докладе приводится анализ пространственно-временных характеристик сигналов с отдельно стоящих гидроакустических датчиков, расположенных на протяженном участке мелкого моря. Описывается метод калибровки волновода по шумовым сигналам судоходства.

The report focuses on actual problem related to the construction of optimal signal processing algorithms at their multimode structure of propagation in the shallow sea. The report provides analysis of spatial-temporal characteristics of signals from separate sonar sensors located on a long stretch of shallow sea. The method of waveguide calibration to noise signals is described.

В докладе рассматривается возможность реализации согласованной со средой обработки для определения направления на морские объекты по излучаемым ими шумовым гидроакустическим сигналам. Обработка сигналов производится в низкочастотной области для линейно-ориентированных фазированных антенных решеток (ФАР) с направлений близких к оси антенны. Параметры среды, такие как количество и тип слоёв дна, профиль скорости звука, температура и другие, влияют на распространение и преобразование гидроакустических сигналов, что в свою очередь выражается в виде изменения амплитуды, фазы и частоты исходного сигнала. Проанализировав процесс изменения параметров сигналов, можно определить зависимости этих изменений и обеспечить согласованную со средой обработку.

Рассмотрим шумовой сигнал на некоторой выделенной частоте ω от источника на расстоянии R от центра приёмной линейной ФАР. При прохождении этого сигнала через волновод из-за многомодового распространения в месте приёма этот сигнал принимает вид:

$$S(\omega, t, V, R) = \sum_{i=1}^{Nm} A_i \cdot e^{j(\omega \pm V k_i)t + jRk_i + jn\Delta Rk_i}, \quad (1)$$

где Nm – количество мод на частоте ω, A_i – амплитуда моды, $k_i = \omega/c_i$ – волновое число, c_i – фазовая скорость моды, $n\Delta R$ – проекция расстояния между n-ым приёмником и центром антенны в направлении на источник, V – скорость движения источника, знак зависит от приближения или удаления источника сигнала от центра антенны.

Как видно из (1), принимаемый сигнал представляет собой сумму гармонических сигналов со своими начальными фазами и амплитудами, а при $V \neq 0$ ещё и со своими доплеровскими сдвигами. Реализация согласованной со средой обработки сводится к определению количества мод, их фазовых скоростей и амплитуд.

Покажем на реальном экспериментальном примере, как выглядит принимаемый сигнал на антенне, когда надводный корабль располагается на расстоянии 22 км по направлению вдоль оси антенны. Для того, чтобы отобразить сигнал, на каждом приёмнике ФАР перейдем от временной реализации к спектральному представлению на выделенной частоте ω, соответствующей дискретной составляющей шумового сигнала корабля (с/ш >15 дБ). Реальная часть отсчетов спектра на частоте ω для каждого приёмника (волновой пакет), для ФАР из 100 приёмников с межэлементным расстоянием 10 м, показана на рис.1.

На основании проведенного анализа пространственно-временных характеристик для данного района [1] мы знаем, что представленный волновой пакет согласно формуле (1) есть результат взаимодействия 4-5 мод.

Используя эту информацию можно сформулировать оптимизационную задачу для определения параметров мод, таких как фазовые скорости и амплитуды. Определенные фазовые скорости и относительные амплитуды мод в [1] по взрывным источникам используем в качестве начальных приближений при оптимизации функционала F(), в котором используется волновой пакет от шумового источника.

$$F = \sum_{n=1}^{N} abs(S0_n(\omega) - S_n(\omega))^2, \quad (2)$$

где N – количество приёмников ФАР, $S0(\omega)$ – принятый на ФАР волновой пакет от шумового источника на частоте ω, $S(\omega)$ – волновой пакет, получаемый в ходе оптимизации по параметрам A и c, вычисляется с использованием формулы (1). Расстояние и скорость источника считаем известными.

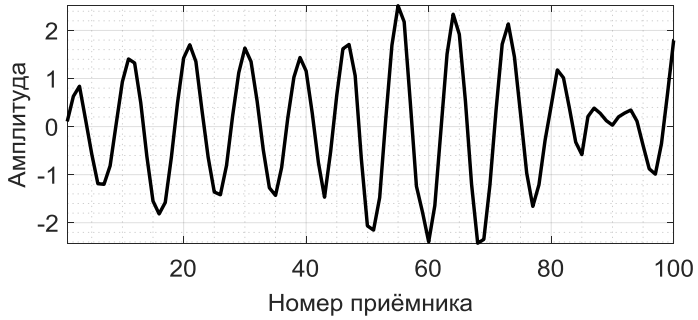


Рис. 1. Волновой пакет шумового сигнала при корабле с направления "бегущей волны" ФАР.

В результате оптимизации были найдены оценки фазовых скоростей мод и амплитуд для текущего волнового пакета. Далее при смещении корабля на 100 м от центра антенны фиксировался новый волновой пакет, и процедура оптимизации повторялась. Для получения окончательных оценок, полученные результаты были усреднены по 10 пакетам, соответствующим 1 км пути (табл. 1.).

Таблица 1. Результат оптимизации волнового пакета на частоте ω.

Номер моды	1	2	3	4	5
Амплитуда	0,17	0,23	0,05	-0,22	0,17
Фазовая скорость, м/с	1530	1533	1664	1758	1780

Для оценки эффективности найденных параметров мод нами проведён сравнительный анализ ошибок определения пеленга корабля при использовании различных алгоритмов и при различных условиях движения корабля. Использовались следующие алгоритмы обработки: когерентная, некогерентная и обработка при задании фазовой скорости 1500 м/с. Полоса частот для обработки составляет $\omega \pm 0{,}1$ Гц. Выходные отметки первичной обработки сопоставлены с калькой движения корабля. На рис. 2 представлены ошибки определения направления на источник шума.

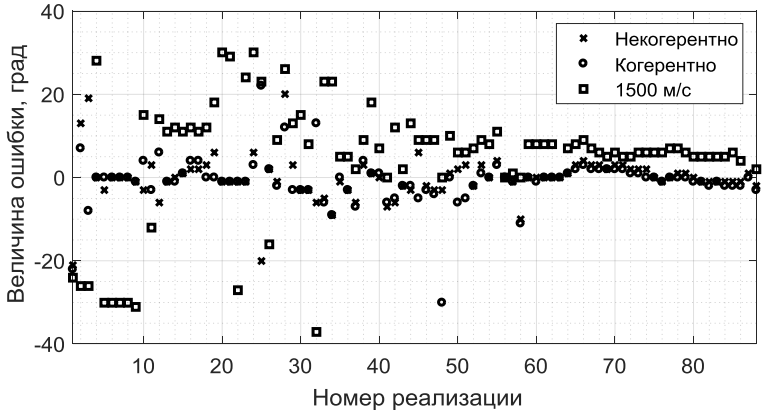


Рис. 2. Ошибка определения направления на источник шума.

Реализации с 1 по 26 надводный корабль находится в дрейфе и проходит ~1 км в направлении "бегущей волны" ФАР, далее реализации с 27 по 55 надводный корабль набирает ход, проходит ~5,5 км и смещается по пеленгу до ~43 град. относительно оси ФАР и далее продолжает движение до 88 реализации под углом ~45±3 град. Из рис. 2 видно, что обработка с учетом вол-

новода дает гораздо меньше ошибок. Математическое ожидание и СКО ошибок приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка эффективности калибровки волновода

	Некогерентная обработка	Когерентная обработка	Обработка фазовой скоростью 1500 м/с
Мат. ожидание ошибок пеленга	-0,114	-0,78	2,45
СКО	5,43	5,85	20,96

По приведенным результатам, можно увидеть, что согласованная со средой обработка для линейных антенн и источников шума, располагающихся вдоль оси антенны, дает выигрыш по СКО ошибок пеленга приблизительно в 4 раза относительно 1500 м/с. Калибровка по взрывным источникам и использование средней фазовой скорости мод дает результаты лучше, чем 1500 м/с, но эффект далёк от идеала [2]. Отметим, что попытка провести когерентную обработку даёт в общем усреднённом случае результаты хуже, чем некогерентная, что лишний раз подтверждает полученные результаты в [2].

В дальнейшей работе планируется провести калибровку волновода оптимизационными методами в широкой полосе частот, для разных антенн и ситуаций.

Литература

1. Махнев Ю.В., Трофимов А.Т. "Анализ пространственно-временных характеристик низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море" // Труды XIII Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". - Санкт-Петербург, 2016. с.376-378
2. Кравченко В.Н., Гринюк А.В. "О возможности согласованной с гидроакустическим волноводом обработки сигналов в мелком море" // Труды XIII Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". - Санкт-Петербург, 2016. с.87-89

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ

Н.А.Завольский, А.И.Малеханов, канд.физ-мат.наук, М.А.Раевский, канд.физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

SIMULATION OF HORIZONTAL ARRAY SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES IN LONG-RANGE SHALLOW-WATER CHANNELS

A.I.Malekhanov, Ph.D., M.A.Raevsky, Ph.D., N.A.Zavolsky
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Развитая авторами модель пространственной когерентности акустического сигнала в горизонтальной плоскости канала мелкого моря в условиях развитого ветрового волнения используется для анализа эффективности различных методов его пространственной обработки, включая оптимальные. Основное внимание уделено количественным оценкам дополнительного, в сравнении со стандартным методом фазированной антенны, выигрыша оптимальной обработки по величине коэффициента усиления в зависимости от основных параметров задачи – направления на источника сигнала и расстояния до него, скорости ветра на трассе, размеров антенны. Численное моделирование выполнено для гидрологических условий, характерных для Баренцева моря в зимний период.

In this paper, recently developed model of acoustic signal coherence in horizontal plane of a windy shallow-water channel is exploited to study the performance of various array processors, optimal ones included. The focus is numerical estimations of an additional array gain of the optimal processor as is compared with conventional array beamformer in dependence of the key problem parameters such as source direction and source range, wind velocity along the acoustic path, and the array size. Computer simulation is performed for shallow sea environments typical for the Barents Sea under the winter conditions.

При исследовании эффективности методов пространственной обработки акустических сигналов в условиях дальнего распространения в подводных звуковых каналах необходимо учитывать как многомодовый характер звукового поля, создаваемого удаленным источником, так и его флуктуации, обусловленные случайными неоднородностями водной толщи и неровностями границ канала распространения. Влияние первого из указанных факторов, наиболее характерного для регулярных плоскослоистых волноводов (фактически, для относительно

близких дистанций), достаточно подробно исследовано в работах В.А.Елисеевнина и ряда других авторов. Оно сводится, по существу, к интерференции парциальных откликов антенной решетки (АР) на отдельные модовые компоненты принимаемого сигнала. Оптимизация пространственной обработки сигнала при этом заключается в повышении точности априорной информации относительно тех парциальных амплитудно-фазовых распределений, которые отвечают модам дискретного спектра на входе АР, и их фазовых сдвигов, которые определяются значениями продольных волновых чисел и расстоянием до источника. Что же касается случайных объемных и(или) граничных неоднородностей канала, то последовательный учет их влияния приводит к необходимости рассмотрения более сложных методов обработки, которые в явном виде учитывают, помимо дискретизации пространственного спектра, ослабление пространственной когерентности сигнала на входе АР [1]. Физически очевидно, что это влияние должно оказаться наиболее существенным для АР больших волновых размеров, превосходящих масштаб когерентности сигнала, который, в свою очередь, зависит от спектра флуктуаций в канале распространения и расстояния, на котором происходит «накопление» статистических эффектов по трассе.

В недавней работе [2] нами рассмотрен вопрос о влиянии развитого ветрового волнения на формирование функции углового отклика и потери усиления протяженной фазированной АР горизонтальной конфигурации в канале мелкого моря. В данной работе мы продолжаем начатое исследование, акцентируя свое внимание на моделировании методов оптимальной пространственной обработки сигнала и на количественных оценках дополнительного выигрыша АР, позволяющего частично компенсировать потери ее эффективности при ослаблении когерентности принимаемого многомодового сигнала.

Постановка задачи и основные уравнения. В целом, используемая нами модель формирования звукового поля полезного сигнала на входе горизонтальной АР, расположенной на некоторой заданной глубине в канале мелкого моря, совпадает с моделью, представленной в работе [2]. Предполагается, что канал распространения представляет собой плоскослоистый волновод с некоторым заданным профилем скорости звука в водном слое, который лежит на слоистом полупространстве донных пород. Поскольку рассматриваются вопросы эффективности именно пространственной обработки, анализ проводится для некоторый частоты звукового поля в относительно низкочастотном диапазоне (ниже ~500 Гц), наиболее интересного с учетом возможностей дальнего распространения звука на расстояния до сотен километров. Очевидно, что именно на значительных удалениях от источника можно ожидать наиболее существенного проявления статистических эффектов распространения и появления заметной «иерархии» методов обработки, в различной степени учитывающих эти эффекты.

Опуская хорошо известные выражения, отвечающие модовому представлению звукового поля удаленного источника и дальнейшему переходу к анализу его когерентных свойств (они приведены в [2]), подчеркнем, что ключевой момент нашего анализа заключается в расчете функции взаимной корреляции амплитуд мод дискретного спектра (модовых амплитуд), которые определяют функцию пространственных корреляций сигнала или, для дискретно расположенных элементов АР – входную матрицу пространственных корреляций (МПК). Имея в виду дистанции распространения, намного превышающие масштабы интерференции мод, мы ограничимся моделированием МПК и связанных с ней характеристик АР, усредненных по интерференционной структуре (ИС) многомодового сигнала. В результате указанного усреднения расчет МПК на входе АР сводится к расчету автокорреляционных функций мод с поперечным (относительно оси x, вдоль которой предполагается распространение сигнала) разнесением точек наблюдения:

$$N_p(\rho, x) = \left\langle a_p\left(-\frac{\rho}{2}, x\right) a_p^*\left(\frac{\rho}{2}, x\right)\right\rangle, \qquad (1)$$

где a_p – амплитуды мод дискретного спектра, ρ – поперечное относительно центра АР разнесение точек наблюдения (приемных элементов), угловые скобки <…> означают операцию статистического усреднения по ансамблю реализаций ветрового волнения (случайной функции отклонения свободной морской поверхности). Расчет функций (1) проводится с использованием уравнения переноса, приведенного в работе [2] в приближении малости параметра Рэлея для всех мод, испытывающих рассеяние на взволнованной поверхности. Это уравнение учитывает основные эффекты рассеяния звуковой энергии – рассеяние отдельных мод в другие моды как

дискретного, так и сплошного спектров, и затухание мод в дне (декремент которого растет с номером моды).

Предполагается далее, что линейная горизонтальная АР состоит из N элементов (расположенных эквидистантно), ориентирована под углом β к направлению на источник (стандартно отсчитываемым от нормали к антенне) и расположена на глубине z_A; горизонтальное расстояние от источника до центра АР обозначается R (все обозначения совпадают с обозначениями [2]). Эффективность методов обработки сигналов в АР мы характеризуем величиной коэффициента усиления (антенного выигрыша) G, которая стандартно определяется как величина выходного отношения сигнал/шум (ОСШ), отнесенная к величине входного ОСШ (на отдельном элементе АР). Для упрощения анализа, что не принципиально для рассмотрения эффектов, связанных с сигнальным полем, будем предполагать, что аддитивные шумы на входе АР (шумы океана в сумме с собственными шумами в каналах АР) являются пространственно-белым шумом единичной интенсивности.

В целях сравнительного анализа мы рассматриваем три известных метода пространственной обработки: (1) оптимальный метод линейной обработки (соответствующая величина выигрыша обозначается далее G_1) [1], (2) оптимальный метод квадратичной обработки (величина G_2) [1], (3) метод фазированной АР (ФАР), ориентированной точно в направлении на источник сигнала (величина G_0). С учетом сделанного предположения относительно шумов, расчетные выражения для интересующих нас величин имеют вид:

$$G_1 = N\frac{\lambda_1}{\sum\limits_{i=1}^{N}\lambda_i}, \quad G_2 = N\frac{\left[\sum\limits_{i=1}^{N}\lambda_i^2\right]}{\sum\limits_{i=1}^{N}\lambda_i} \tag{2а}$$

$$G_0 = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} N_{mn}(R)\exp\left[-ik_0 d(m-n)\sin\beta\right], \quad N_{nm}(R) = \frac{\sum\limits_p \frac{\varphi_p^2(z_A)}{k_p} N_{nm}^p(R)}{\sum\limits_p \frac{\varphi_p^2(z_A)}{k_p}\sqrt{N_{nn}^p(R)N_{mm}^p(R)}} \tag{2б}$$

где λ_i – собственные значения МПК, расположенные в порядке убывания от первого, $N_{mn}(R)$ – элементы МПК сигнала, d – межэлементное расстояние в АР, k_0 – «опорное» волновое число, отвечающее заданной частоте, k_p – продольные волновые числа, $\varphi_p(z)$ – собственные функции волновода, матричные элементы $N_{nm}^p(R) = N_p(\rho = d(m-n)\cos\beta, R)\exp\left[ik_p d(m-n)\sin\beta\right]$ рассчитываются для начальных условий, отвечающих расположению точечного источника на некоторой заданной глубине z_S.

Результаты моделирования и выводы. Численное моделирование выполнено нами для гидрологических условий Баренцева моря в зимний период, для которых характерны профили скорости звука со слабым положительным градиентом, и горизонтальной АР «умеренных» волновых размеров (на уровне первых десятков). Параметры волновода: линейный профиль скорости звука ($c(0)$ = 1490 м/с, $c(H)$ = 1500 м/с, глубина H = 200 м), подстилающее полупространство с параметрами ρ = 2 г/см^3, c_1 = 1800 м/с и отнесенным к частоте коэффициентом затухания δ = 0.2 дБ/км×Гц. Параметры источника: частота 250 Гц, глубина z_S = 197 м. Параметры АР: глубина z_A = 197 м, межэлементное расстояние $d = \lambda/2$ = 3 м, число элементов N = 51, угол на источник β = 0° и β = 30°. В расчетах МПК использовалась известная модель развитого изотропного ветрового волнения с эмпирическим спектром Пирсона–Московица для двух значений скорости ветра (10 и 15 м/с) по трассе в широком интервале расстояний до источника (до 500 км).

Расчеты показывают, что при умеренных скоростях ветра (~10 м/с) потери усиления АР (величина G/N) относительно малы даже на больших удалениях от источника, при этом дополнительный выигрыш оптимальной квадратичной обработки также мал и не превышает доли дБ. Это связано с относительно медленным затуханием когерентной компоненты сигнала и, соответственно, сохранением «остаточных» корреляций на всей длине АР (физические причины такой эволюции функции когерентности обсуждаются в [2]). С ростом скорости ветра потери усиления ФАР и «отрыв» оптимальной обработки ожидаемо растут: на расстояниях ~100 км

эти величины составляют ~5 дБ и ~2 дБ, соответственно, и продолжают монотонно расти далее (см. рис. 1, приведенный для случая поперечной ориентации АР). Важно, что в этом случае отличия ФАР от оптимальной линейной обработки пренебрежимо малы, т.е. компенсация АР в нулевой угол (на источник) и «захват» при этом основной доли энергии сигнальных мод в главный лепесток диаграммы направленности обеспечивает оптимизацию в классе линейной пространственной обработки.

Ситуация существенно меняется при углах падения, заметно отличных от нулевого. С одной стороны, при слабых ветрах эффект ослабления когерентности сигнала по-прежнему не столь велик, и поэтому заметные различия между величинами выигрыша для оптимальных методов квадратичной и линейной обработки отсутствуют даже на больших дистанциях. Однако, радикально меняется зависимость от расстояния для выигрыша ФАР: она становится немонотонной и на относительно небольших дистанциях (первые десятки километров) демонстрирует существенные потери усиления, которые с дальнейшим ростом дистанции «компенсируются», а сам выигрыш практически «догоняет» соответствующие величины для оптимальных методов. Такое неоднозначное поведение связано с регулярным эффектом распространения (потому и проявляется на относительно коротких дистанциях), а именно, с возбуждением источником изначально широкого спектра мод, в результате чего ФАР, компенсированная на источник, «промахивается» своей диаграммой направленности мимо значительного числа энергонесущих мод сигнала. С ростом дистанции модовый спектр постепенно обедняется, причем именно за счет затухания мод высоких и затем средних номеров, в результате чего практически вся мощность полезного сигнала «возвращается» в главный лепесток диаграммы направленности ФАР, а сама ФАР становится квазиоптимальной линейной обработкой. При сильных ветрах поведение выигрыша ФАР качественно остается таким же (хотя потери усиления, очевидно, становятся только больше), и более значительным становится относительный выигрыш оптимальной квадратичной обработки (аналогично случаю нулевого угла падения), что показано на рис. 2

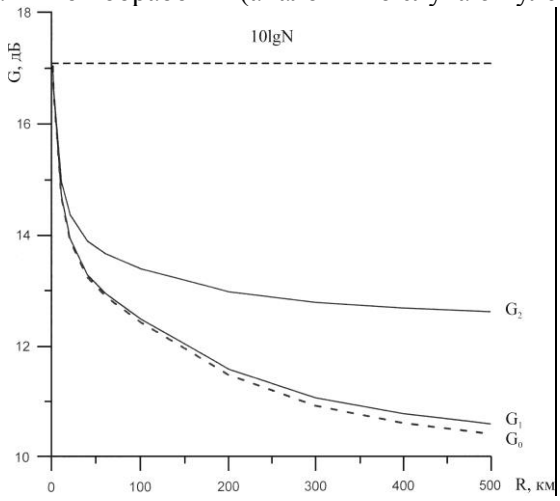


Рис. 1. Зависимости выигрыша от расстояния до источника при значении угла $\beta = 0°$ и скорости ветра 15 м/с для трех методов обработки сигнала (пояснения в тексте).

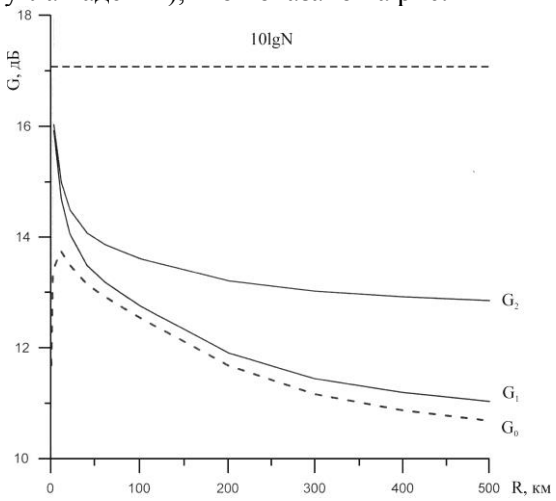


Рис. 2. Аналогичные зависимости при значении угла $\beta = 30°$ и той же скорости ветра. Горизонтальный пунктир на обоих рисунках показывает уровень $G = N$.

Таким образом, иерархия методов пространственной обработки многомодового сигнала, принимаемого протяженной горизонтальной АР, в условиях рассеяния звука на ветровом волнении весьма существенно зависит от совокупности физических параметров, которые характеризуют детерминированные и статистические эффекты распространения сигнала в мелководном канале. Подчеркнем (эти расчеты здесь не приведены), что с ростом волнового размера АР величины потерь усиления только возрастают, но при этом более значительным оказывается дополнительный выигрыш оптимальной квадратичной обработки, которая осуществляет некогерентное накопление сигнала в базисе его собственных когерентных компонент [1]. В наибольшей степени обсуждаемая специфика методов обработки многомодовых сигналов в горизонтальных АР проявляется при ненулевых углах направления на источник, при этом существенной становится зависимость конкретных величин антенного выигрыша от начальных условий возбуждения мод источником (фактически, от его глубины). Отмеченные особенности

необходимо учитывать при оценке потенциальных возможностей дальнего обнаружения сигналов с помощью протяженных горизонтальных антенн, функционирующих в каналах мелкого моря.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ по гранту № 16-02-00929.

Литература

1. Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891-897.
2. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А., Смирнов А.В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 5. С. 501-512.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО- И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ СУДНОМ

Ю.М.Заславский, д-р физ-мат.наук, В.Ю.Заславский, канд. физ-мат.наук
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

3D NUMERICAL SIMULATION OF HYDRO- AND SEISMIC-ACOUSTIC WAVES ON SHELF GENERATED BY SHIP

Yu.M.Zaslavsky, Dr.Sc., V.Yu.Zaslavsky, Ph.D.
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

Проведено трехмерное численное моделирование гидро- и сейсмоакустических волн на шельфе, излучаемых совокупностью акустических диполей, имитирующих работу гребного винта. Анализируются особенности гидроакустических волн в водной толще и поверхностной сейсмоакустической волны на границе раздела жидкость-дно, возбуждаемых судном, идущим по мелководной акватории. Выявлены характерные признаки, позволяющие классифицировать тип судна по амплитудно-волновому распределению акустического поля.

Numerical three-dimensional simulation of hydro-acoustic and seismic-acoustic waves generated by acoustic dipoles simulating ship propeller operation in shallow water is carried out. Peculiarities of hydro-acoustic waves in water volume and surface seismic-acoustic waves on bottom-fluid interface excited by ship travelling over shelf are analyzed. Signatures for ship classification by the use of acoustic wave amplitude distribution are defined.

В настоящее время мониторингу судоходства в прибрежных акваториях – в районах портов и гаваней уделяется повышенное внимание [1-3]. Наряду со средствами активной гидролокации для контроля судоходства используются методы пассивной шумопеленгации, которые позволяют определять параметры движения и осуществлять классификацию типа судна. Для увеличения надежности классификации наряду с регистрацией гидроакустических сигналов предлагается использовать сигналы поверхностной сейсмоакустической волны на границе раздела вода-дно, которые повышают вероятностные характеристики идентификации (типажа) за счет дополнительных информативных признаков. Важным этапом поиска информативных признаков является моделирование гидроакустического поля, создаваемого движителем – гребным винтом. Методы численного моделирования применяются многими авторами [4], однако настоящая работа посвящена трехмерному численному моделированию гидро- и сейсмоакустического поля и выявлению информативных признаков, необходимых для классификации судов на мелководной акватории. Используется трехмерный метод конечных элементов, реализованный в стандартном пакете [5].

Моделирование гидро- и сейсмоакустического волновых полей, возбуждаемых на мелководье, показало, что в условиях, когда дно достаточно жесткое, наряду с объемными волнами, бегущими в контактирующих средах, на границе раздела вода-дно формируется структура, образуемая поверхностной сейсмической волной. Распределение волновых амплитуд на границе раздела представлено рельефом с яркостным перепадом в виде концентрических колец. Для возбуждения на границе раздела такой характерной волновой структуры упругие параметры донной среды должны удовлетворять неравенству $c_l > c_t > c$, где $c_{l,t}$ – скорости волн сжатия и сдвига в донной среде, а c – скорость звука в воде [6]. При проведении численного моделирования гидро- и сейсмоакустических волн на шельфе, генерируемых вращающимся гребным винтом судна, указанное неравенство обеспечивается выбором подходящих донных условий, например, при следующих упругих параметрах: дно – скальный грунт: $c_l = 6.12$ км/с ,

$c_t = 3.08$ км/с, $\rho = 2.73$ г/см^3. Акустическое действие судового движителя имитируется гармоническими осцилляциями пары акустических диполей со «скрещенной» *y, z* - поляризацией моментов и имеющих квадратурный фазовый сдвиг. Физической причиной возникновения гидроакустического излучения принимается общепринятое соображение об определяющей роли периодических пульсаций давления в потоке воды, порождаемых при циклическом проходе вращающихся лопастей вблизи корпуса (ахтерштевня) или вблизи пера руля судна. Такие пульсации эквивалентны осцилляциям суперпозиции вышеуказанных диполей [7-9].

Рассмотрим модель среды, представляющую собой плоскослоистую структуру в виде водного слоя конечной глубины *H*: $0 < z < H$ плотностью ρ' и скоростью *c* в контакте с полубесконечным ($z > H$) упругим полупространством ρ'', c_l, c_t. Рассматриваются два варианта акустического излучателя гармонических колебаний, погруженного в жидкость на глубину *h*. В одном (сложный составной излучатель эквивалентен работе двух винтов) в виде двух пар акустических диполей. Каждая пара включает в себя один с вертикальной *z*- , второй с горизонтальной *y*- поляризацией момента, осциллирующих с квадратурным фазовым сдвигом (центры скрещенных диполей совмещены, центры пар разнесены, что подробно описано далее рис. 1). В другом (случай одного винта) – два осциллирующих диполя с вертикальной *z*- и горизонтальной *y*- поляризацией момента (рис. 2). Исследуется гармонический режим излучения. При моделировании частота осцилляций выбрана $f = 200$ Гц (длина волны в воде 7.5 м), что соответствует экспериментально реализуемым значениям.

Из соображений согласования расчетных и экспериментально реализуемых масштабов пространственная область задается в форме куба со сторонами 100м ×100м ×100м. Для адекватного описания волновых процессов линейный размер конечного элемента составлял 0.1 длины волны, а общее количество тэтраэдральных элементов $\sim 2 \cdot 10^6$. Верхняя часть куба $0 < z < 50$ м – пространство, занятое водой, нижняя часть $-50\,\text{м} < z < 0$ – донная толща (рис. 1).

Амплитудное распределение, порождаемое обычным двухвинтовым судном, представлено на рис.1а, б, в, при этом гидроакустическое излучение создается двумя сложными излучателями, составленными из двух акустических диполей каждый. Рассматривается случай скального дна, совокупное излучение четырех диполей имитирует гидроакустическое поле двух идентичных гребных винтов, вращающихся в плоскости - *y, z*; их центры расположены в соседних точках, разнесенных по оси *y* (перпендикулярно плоскости чертежа – плоскость *x, z*) на $\Delta y = 4$ м. Работа двух винтов, погруженных на глубину $h = 2$ м, моделируется действием составного излучателя, размещенного непосредственно сзади корпуса судна, который задается граничным условием в виде неоднородности – фигуры, образуемой одной из половин эллипсоида, рассеченного вдоль большой его оси *x*, и составляет в длину – 40 м, а по малым полуосям – вдоль *y, z*- ортов – 3 м. Инородное тело погружено под свободную водную поверхность на глубину 2 м – на уровень плоского сечения. Плотность и упругие константы материала, имитирующего неоднородность, выбраны такими же, как и у донной среды.

Из рис.1а следует, что характерной особенностью структуры поля поверхностной донной волны могут служить две-три концентрически расположенные окружности большого диаметра, на которых амплитуда пучности максимальна и которые обозначают разбегающиеся по кругу волны. Такая особенность структуры поверхностной донной волны может быть принята как физическая предпосылка при формулировке информативного признака, характерного для двухвинтового судна, идущего по воде. На рис.1б представлено более детальное изображение гидроакустического и сейсмоакустического поля в сечении *y, z* - плоскостью. Видно, что угловое распределение амплитуд поверхностной волны асимметрично и максимумы приходятся на одну из половин этих окружностей. Для гидроакустического – характерна амплитудная модуляция с формированием радиально-лучевой волновой структуры со сходящимися к точке излучателя полосами «равной засветки». На рис.1в представлено пространственное распределение амплитуды гидроакустической и донной сейсмоакустических волн, но в сечении *x, z* - плоскостью. Для гидроакустической волны характерны линии равной засветки параболического вида, а для донной поверхностной – две-три окружности значительного диаметра с максимальной пучностью на рельефе. Следует подчеркнуть, что получение амплитудного распределения в разных сечениях (*x, z* и *y, z*) возможно только с использованием трехмерного моделирования. Демонстрируемые иллюстрации показывают, что для классификации типа судна (в данном

случае «надводного») целесообразно привлечение такого информативного признака, как диаметр концентрического кольца, соответствующего максимальной по величине пучности на рельефе, образуемом поверхностной донной волной на границе раздела. В основе его реализации могут быть заложены особенности пространственного распределения максимумов откликов, регистрируемых планарной группой донных приемников.

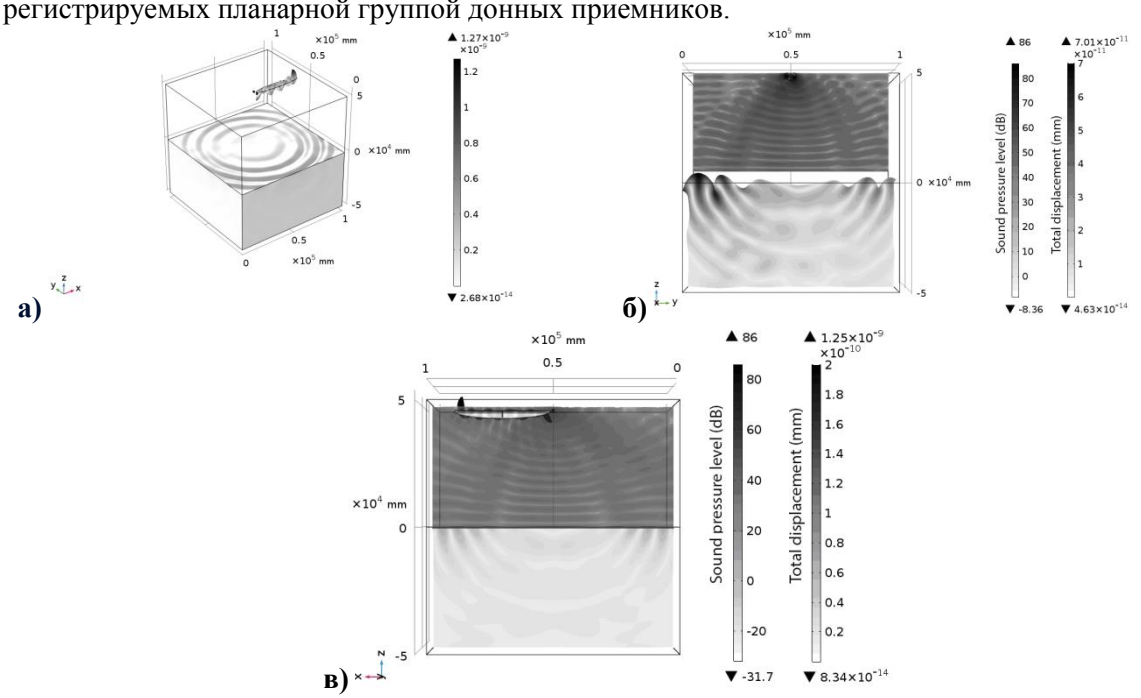


Рис. 1. а- пространственно-амплитудное распределение поверхностной донно-сейсмической волны (изометрическая проекция); б- вертикальное сечение *yz* -плоскостью, вверху – гидроакустическая волна, внизу – объемные и поверхностные донно-сейсмические волны; в- вертикальное сечение *xz* –плоскостью, вверху – гидроакустическая волна, внизу – объемная донно-сейсмическая волна

Для подтверждения влияния глубины расположения излучателя – гребного винта в водоеме (как одного из параметров идентификации) далее рассмотрен случай, в котором имитируются условия, эквивалентные работе одного гребного винта вблизи корпуса судна, идущего на глубине, близкой к границе раздела. На рис.2а, б, в представлено волновое поле в случае аналогичном ранее рассмотренному, но в этом случае глубина погружения излучателя составляет h = 40 м. В отличие от рассмотренного, возбуждение создается одним излучателем в виде суперпозиции двух акустических диполей с совмещенными центрами и с дипольными моментами, поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях: одного – вдоль оси y, другого – вдоль оси z и при наличии квадратурного фазового сдвига между осцилляциями двух диполей. Излучатель размещен сзади корпуса, который, как и в прежнем случае, задается граничным условием на инородном теле – на фигуре-эллипсоиде (длиной 40 м – вдоль большой оси x и шириной 3 м вдоль малых полуосей – y, z). Плотность и упругие константы материала, имитирующего инородное тело, также выбраны равными тем, которые характерны для донной среды.

На рис. 2а показано распределение амплитуд в поверхностной сейсмоакустической волне в изометрической проекции. На рис.2б демонстрируется аналогичное распределение для поперечного y, z - сечения в гидроакустической волне (верхняя часть) и в донно-сейсмических волнах (объемной и поверхностной – нижняя часть), а на рис.2в – амплитудное распределение в продольном вертикальном x, z - сечении в гидроакустической волне (верхняя часть) и в объемной сейсмоакустической волне (нижняя часть). Характерно, что диаметр окружностей (колец) с максимальной величиной пучности на рельефе, образуемом поверхностной донной волной, здесь относительно мал. Именно относительная величина диаметра концентрической окружности, соответствующей максимальной величине пучности, образуемой поверхностной донной волной на границе раздела, можно использовать для контроля глубины траектории движения источника, следовательно, и для определения глубины расположения движителя над дном водного бассейна. При этом, как видно из рис.2б, обращенность вниз вершины или центра сходимости полос равной засветки, идущих в радиальном направлении по сравнению с предыдущим

случаем надводного судна, указывают на расположение излучателя – гребного винта вблизи границы жидкость-дно. Глубина его погружения также может рассматривается как параметр идентификации.

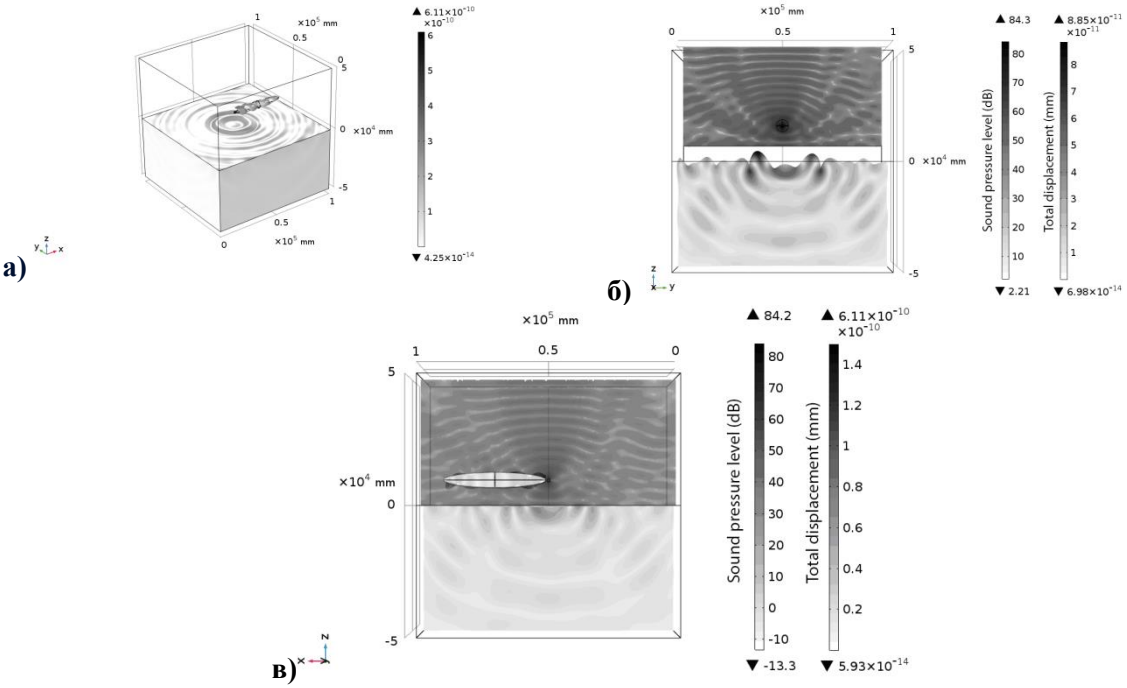


Рис. 2. То же, что на рис.1, но при глубоком погружении судна в воду.

Представленные иллюстрации демонстрируют результаты трехмерного моделирования методом конечных элементов и свидетельствуют о практической полезности данного подхода в решении проблемы мониторинга подводной обстановки. Принципиальная роль донной поверхностной сейсмической волны для идентификации также демонстрируется на основе его применения.

Литература

1. Borodin A.E., Dolgikh A.G., Dolgikh G.I., Fishchenko V.K. Recognition seismoacoustic signals of a surface vessel with a two-coordinate strainmeter // Acoustical Physics. 2016. V. 62. № 1. p. 64-73.
2. Машошин А.И., Шафранюк Ю.В. Синтез алгоритма автоматической классификации целей на основе анализа амплитудной модуляции их шумов. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 4, С.78-85.
3. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов. Акуст. ж. Т. 59, 3, 2013. С. 347
4. Finn B. Jensen W., Kuperman A., Porter M.B., Schmidt H. Computation Ocean Acoustics. Springer. 2011.
5. COMSOL Multiphysics® ПО для мультифизического моделирования.
6. Лапин А.Д. Определение параметров грунта по дисперсионной кривой поверхностной волны // Акуст. ж. 1993. 39, вып.1, с.181-183
7. Левковский Ю.Л. Физическая природа и методы моделирования шума гребных винтов. Труды Крыловского государственного научного центра Издательство: Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург) ISSN: 2542-2324№ 47(331), 2009. С. 63-72.
8. Левковский Ю.Л. Шум гребных винтов. 2005. Санкт-Петербург. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова.
9. Левковский Ю.Л., Яковлева Ю.С. О звуке вращения воздушного и водяного гребных винтов // Акуст. ж. 1998. т.44, №2, с.247-250.

ПЕРВИЧНОЕ ДАЛЬНЕЕ ПОЛЕ КОНЕЧНОЙ СВОБОДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

О.И.Косарев, д-р техн.наук, Н.А.Остапишин, канд.техн.наук, А.К.Пузакина
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

PRIMARY FAR FIELD OF THE FINITE FREE CYLINDRICAL SHELL

O.I.Kosarev, Dr.Sc., N.A.Ostapishin, Ph.D., A.K.Puzakina
A.A. Blagonravov Institute of Machines Science of the RAS, Moscow, Russia

Проведены сравнительные исследования двух методов расчета звукового давления в дальнем поле, создаваемого колеблющейся конечной цилиндрической оболочки в жидкости.

A comparative study of two methods of calculating acoustic pressure in the far field generated by the oscillating finite cylindrical shell is carried out.

Решение проблем, связанных с расчетом звукового давления в дальнем поле, создаваемого колеблющейся конечной цилиндрической оболочкой, остается актуальной в настоящее время. Этим проблемам посвящен ряд работ [1-5]. Анализ публикованных работ показал, что из применяемых методов расчета наиболее известными являются метод, использующий интегральную формулу Кирхгофа [2] и метод перевала [3]. Предложенный в работе [1] импеданс для ограниченного цилиндра применим только для цилиндра с концевыми условиями Навье. Недостатком формулы, полученной методом перевала [3], является то, что она относится только к частому случаю пульсирующего цилиндра. На практике вынужденные колебания конечной свободной цилиндрической оболочки в жидкости заранее не известны и могут быть определены только в результате расчета вынужденных колебаний оболочки.

Для расчета звукового давления в дальнем поле используется интегральная формула Кирхгофа, которая после интегрирования по окружной координате приводится к виду [2]

$$p(r,\theta)=\frac{e^{-ikR}}{R}\frac{i^n}{2}\left[\mu J_n'(\mu)\int_0^L p(x)e^{ikx\cos\theta}\,dx-a\rho\omega^2 J_n(\mu)\int_0^L w(x)e^{ikx\cos\theta x}\,dx\right] \qquad (1)$$

где $\mu=ksin\theta$, $k=\omega/c$, $\omega=2\pi f$ - угловая частота, c- скорость звука в жидкости, L-длина оболочки, ρ – плотность жидкости, $w(x,\varphi)$ – виброперемещение поверхности оболочки, a - радиус оболочки, x, φ - продольная и окружная координаты оболочки, θ - угол наблюдения.

В формулу (1) входит звуковое давление $p(x)$на поверхности цилиндрической оболочки, для определения которого могут быть использованы различные методы. Мы исследуем и сравниваем два из них. В первом методе, используется полученная в [3] формула для определения звукового давления на поверхности конечного цилиндра при произвольной функции радиального виброперемещения $w(x)$, допускающей представление w(x) в виде интеграла Фурье. Эта формула без учета суммирования гармоник n

$$p(x)=\frac{a\rho\omega^2}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{w(x)\,H_n^{(2)}(a\tau)e^{i\gamma(z-x)}d\gamma\,dx}{a\tau\,H_n^{(2)'}(a\tau)} \qquad (2)$$

где $H_n^{(2)}(a\tau), H_n^{(2)'}(a\tau)$ функция Ганкеля второго рода и ее производная, $\tau=\sqrt{k^2-\gamma^2}$, γ - переменная интегрирования.

Во втором методе, примененном в работе [2], звуковое давление p(x) определено, исходя из предположения, что входящие в (1) интегралы, названные в [2] обратными преобразованиями Фурье давления $p^*(\varepsilon)$ и перемещения $w^*(\varepsilon)$ от аргумента $\varepsilon=-kcos\theta$, связаны между собой импедансной зависимостью

$$p^*(\varepsilon)=\frac{w^*(\varepsilon)\,H_n^{(2)}\left(a\sqrt{k^2-\varepsilon^2}\right)}{a\sqrt{k^2-\varepsilon^2}\;H_n^{(2)'}\left(a\sqrt{k^2-\varepsilon^2}\right)} \qquad (3)$$

В качестве обоснования этого предположения дана ссылка на импеданс (5.3) [2] для бесконечного цилиндра. Это предположение нельзя признать убедительным по следующим причинам: 1) нами рассматривается конечная цилиндрическая оболочка, 2) указанные интегралы $p^*(\varepsilon)$ и $w^*(\varepsilon)$ не являются преобразованиями Фурье, 3) в импедансе (5.3) аргументом функции Ганкеля

является $\sqrt{k^2-(2\pi/\lambda)^2}$, где λ – длина бегущей звуковой волны. Замена в этом аргументе 2π/λ на ε не правомочна, т.к. ε ≠2π/λ.

Целью данной работы является сравнить результаты расчетов звукового давления в дальнем поле (1), получаемые при использовании выражений звукового давления на поверхности оболочки в виде (2) и (3). Причина такого сравнения заключается в желании убедиться в правильности этих выражений и выбрать из них наиболее удобное для практических расчетов, т.к. формула (2) строго доказанная, но численная (приближенная) и трудозатратная, а формула (3) простая, но основана на предположении, требующем проверки.

Дополнительной целью является установить закономерности влияния распределения звукового давления по поверхности оболочки на диаграммы направленности в дальнем поле. Неудобство практического применения формулы (2) обусловлено необходимостью численного расчета несобственного интеграла с модифицированной функцией Ганкеля (при комплексных аргументах при k<γ) и наличием логарифмической особенности функции Ганкеля при $\gamma = k$. Вычисления по формуле (2) проводятся следующим образом.

Формула (3) представляется в виде [4]

$$p_s(\eta) = B\int_0^{\ell} w_m(\xi)\,\Phi_n(\eta-\xi)\,d\xi \tag{4}$$

где $B=a\rho\omega^2/2\pi$, безразмерные параметры (в долях радиуса *a*): *L* –длина оболочки; $w(\xi)$ – радиальное смещение; η, ξ - координаты продольной оси оболочки. Ядро интеграла (4)

$$\Phi_n(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu)\,e^{i\mu\eta}\,d\mu \tag{5}$$

где подынтегральная функция $F_n(\nu)$

$$F_n(\nu) = \frac{H_n^{(2)}(\nu)}{nH_n^{(2)}(\nu) - \nu H_{n+1}^{(2)}(\nu)} \quad .$$

$H_n^{(2)}(\nu)$ – функция Ганкеля второго рода порядка *n* от аргумента $\nu = \sqrt{t^2-\mu^2}$; $t=ka$, $\mu=\gamma a$.-

Несобственный интеграл (5), учитывая асимптотические особенности и свойства подынтегральной функции, можно представить в виде [4]:

$$\Phi_n(\eta) = 2\left[\int_0^{A} F_n(\nu)\cos(\mu\eta)d\mu + C_i(A\eta)\right], \tag{6}$$

где $C_i(A\eta)$ - интегральный косинус от аргумента ($A\eta$); *A* - большое число, определяемое из условия приемлемой точности вычисления $\Phi_n(\eta)$. По формуле (6) оценивается точность вычисления функции $\Phi_n(\eta)$. Отметим, что функции $\Phi_n(\eta)$, $F_n(\nu)$ и аргумент $\nu = \sqrt{t^2-\mu^2}$ - комплексные.

Вычисления по оценке точности расчета выполнялись при следующих параметрах. Величины n=0,1,2,…10; 0,05<t<10; 1,0<η<16; A=300,0; $d\mu$=0,005. Величины *A* и $d\mu$ установлены в результате численного исследования осциллирующей функции $F_n(\nu)$ из условия, чтобы ошибка вычисления выражения (6) не превысила δ≤2%. При $\mu=t$ функция $F_n(\nu)$ имеет интегрируемую логарифмическую особенность. Интегрирование на участке $\mu<t$ производилась по ветви $\nu = \sqrt{t^2-\mu^2}$, а при $\mu>t$ по ветви $\nu = -i\sqrt{t^2-\mu^2}$, чтобы удовлетворить асимптотические особенности функции $F_n(\nu)$. Функции $\Phi_n(\eta)$ и $F_n(\nu)$ быстро осциллируют, поэтому необходима высокая точность вычисления и следовательно большие затраты машинного времени. Для расчета функций $F_n(\nu)$ и $\Phi_n(\eta)$ разработан пакет программ SHENDER1 в среде Visual Fortran с использованием ряда стандартных процедур библиотеки IMSL.

Таким способом вычисляется звуковое давление на поверхности конечной цилиндрической оболочки по формуле (2). Для расчета звукового давления в дальнем поле (1) с использованием (2) разработана программа SHENDER2.

При проведении расчетов по формулам (2) и (3) виброперемещение может задаваться в любом виде, например: $w(x)=sin(\pi mx/L)$ или $w(x)=cos(\pi mx/L)$, (7), где m число полуволн по длине оболочки, а также в любом экспоненциальном виде. Величина и характер распределения давления по длине конечной оболочки и, соответственно, диаграмма направленности в случае задания перемещений в виде (7) зависят от безразмерных параметров: волнового числа t (частоты колебаний), длины оболочки L, окружной и продольной гармоник n, m. Исследование влияния этих параметров на диаграмму направленности имеет смысл проводить применительно к конкретному объекту. Ниже приведены примеры расчета с использованием программы SHENDER2, дающие представление о влиянии виброперемещений, задаваемых в виде (7), на диаграммы направленности.

На рис.1 показаны диаграммы направленности p_θ в относительных величинах звукового давления в долях $\rho c^2(e^{-ikR}/R)$ по углу наблюдения θ . Сплошные кривые соответствуют расчету с использованием формулы (2), а пунктирные – с использованием формулы (3). Форма колебаний задана в виде w(x)= sin(πmx/L). Две верхние кривые 1 посчитаны для параметров: n=3, m=3, t=4, L =3. Две нижние кривые 2 посчитаны для параметров: n=2, m=5, t=4, L =3.

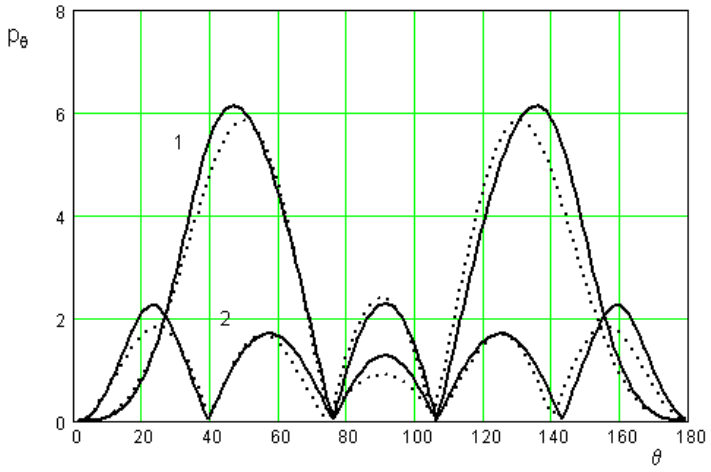


Рис. 1. Диаграммы направленности, полученные разными методами (сплошная и пунктирная линии).

Сравнение результатов расчета дальнего поля (1) с использованием формул (2) и (3) показало, что их отличия не имеют систематической составляющей. На отдельных участках функции звукового давления абсолютно совпадают, на некоторых участках есть небольшие различия, связанные, видимо, с особенностями численного расчета. В целом можно сказать, что результаты сравнительных расчетов приемлемы для практических расчетов дальнего поля и расчеты можно проводить с использованием любой из формул (2) или (3). При этом расчеты по методам [2] и [3] для пульсирующего цилиндра абсолютно совпадают между собой, но отличаются от расчета с использованием формулы (3). Причина этого отличия объясняется тем, что пульсирующий цилиндр относится к плоской задаче (отсутствует зависимости изменения виброперемещения и давления по длине цилиндра).

На рис.2 показаны формы колебаний цилиндрической оболочки $W(\varepsilon)=\sin(\pi mx/L)$ при различных числах полуволн m: 1) m=1; 2) m=2; 3) m=3. На рис. 3 представлены диаграммы направленности (модули звукового давления) в дальнем поле в зависимости от угла наблюдения θ для L=4, t=3, n=1 и тех же значениях m. На всех рис. 2-3 цифры 1-3 соответствуют номерам m форм колебаний на рис.2.

Из приведенных данных следует, что диаграммы направленности симметричны относительно угла $\theta = 90^0$, число лепестков соответствует числу полуволн m. С ростом частоты t максимум давления в лепестках увеличиваются, а сами они становятся уже. При m = 1 максимум наблюдается на угле θ=90^0; при m=2 наблюдается два лепестка с максимумами на углах θ_1= 63^0 и Θ_2=117^0. При θ=90^0 наблюдаются два боковых лепестка на углах θ_1=35^0 и Θ_2=145^0 и центральный лепесток на угле θ_3=90^0. Максимум давления в центральном лепестке составляет

≈40% от максимума в боковых лепестках. Ослабление центрального лепестка можно объяснить амплитудно-фазовым распределением давления на поверхности цилиндра.

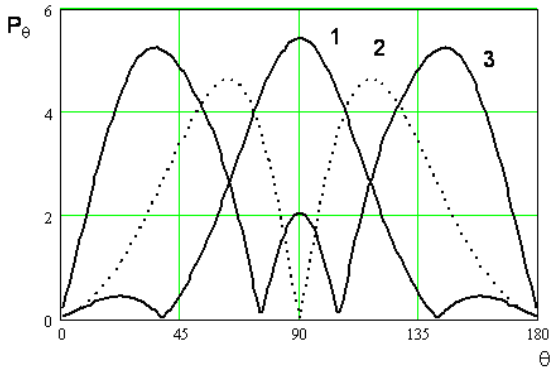


Рис. 2. Формы колебаний цилиндрической оболочки.

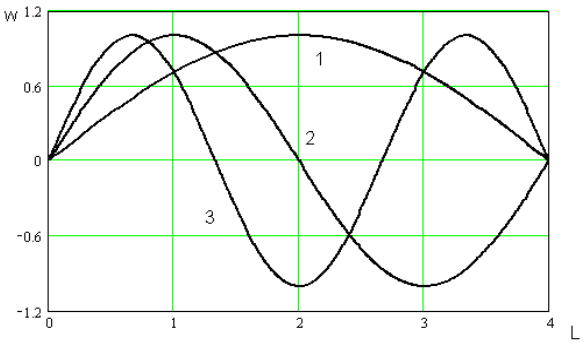


Рис. 3. Диаграммы направленности при формах колебаний на рис.2.

В дополнительно проведенных расчетных исследованиях установлено, что увеличение длины цилиндрической оболочки приводит к пропорциональному увеличению амплитуды звукового давления. С увеличением частоты колебаний амплитуды звукового давления растут по слабо нелинейному закону, близкому к прямой пропорциональной зависимости.

Приведенные формулы и разработанные программы расчета звукового давления на поверхности конечной цилиндрической оболочки и диаграмм направленности могут быть использованы при расчетах колебаний и гидроакустического излучения конечных упругих цилиндрических оболочек в жидкости в дальнем поле. При расчете дальнего поля предпочтение следует отдать методу расчета, примененному в работе [2], как более простому методу. Если требуется знать распределение звукового давления по длине оболочки, то следует пользоваться формулой (2).

Литература

1. Музыченко В.В., Рыбак С.А. Импеданс излучения ограниченной цилиндрической оболочки // Акустический журнал. -1990. - №5.
2. Авербух А.З., Вейцман Р.И., Генкин М.Д. Колебания элементов конструкций в жидкости. - М.: Наука, 1987. -158 с.
3. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. - Л.: Судостроение, 1972. - 349 с.
4. Косарев О.И., Остапишин Н.М., Бедный И.А., Мамонова М.Г. Распределение давления жидкости по длине конечной цилиндрической оболочки при ее колебаниях // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2012.- №4.
5. Косарев О.И., Бедный И.А., Мамонова М.Г. Давление жидкости на конечную цилиндрическую оболочку при ее колебаниях// Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2012. - №2.

ВОЗМОЖНОСТЬ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В ВОДНЫХ СРЕДАХ

Л.С.Калина, В.П.Лигута
АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Московская область, Россия

THE POSSIBILITY OF WIRELESS TRANSMISSION OF RADIO FREQUENCY SIGNALS IN WATER ENVIRONMENTS

L.S.Kalina, V.P.Liguta
JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Moscow region, Russia

Рассматривается вопрос теоретического обоснования возможности беспроводной передачи радиочастотных сигналов в водных средах. Приводятся основные положения теоретического обоснования и результаты экспериментальных данных, полученных с помощью устройств, разработанных на основе предлагаемой теории.

The issue of theoretical justification of the possibility of wireless transmission of radio frequency signals in water environments is considered. The main provisions of the theoretical justification of the proposed theory, the results of experimental data obtained with the use of devices based on developed theory are presented.

В последние десятилетия появился ряд экспериментальных результатов, показывающих возможность передачи радиочастотных (электромагнитных) сигналов в водных средах [1-4]. Однако, с точки зрения общепризнанных физических законов теоретически и экспериментально показано, что электромагнитные волны очень быстро затухают в проводящих средах. А пресная и морская вода является проводящими средами. Таким образом, эксперименты по беспроводной передаче радиочастотных сигналов в проводящих водных средах кажутся плохо согласующимися с признанными физическими законами.

В данной работе предлагается возможное теоретическое обоснование экспериментальных результатов по передаче радиочастотных сигналов в водных средах, не противоречащее существующим физическим законам. А также приводятся результаты эксперимента, полученные на основе предлагаемой теории.

Факты, положенные в основу предлагаемой теории:

- жидкое состояние воды – в большинстве случаев сложная структура, состоящая из отдельных молекул и различных ассоциатов молекул [5-6];
- молекула воды – диполь с электрическим дипольным моментом p = l*q, где l – расстояние между зарядами диполя, а q –заряд [7];
- ассоциаты молекул воды могут быть диполями с электрическим дипольным моментом от p до n*p, где n – количество молекул воды в ассоциатах [8];
- молекула воды, как любое вещество, имеет собственные частоты колебаний [9];
- ассоциаты молекул воды также могут иметь собственные частоты колебаний [10-11];
- электрический диполь в неоднородном электрическом поле испытывает три силы: силу растяжения, силу вращения и силу притяжения или отталкивания со стороны более сильного поля [12];
- на границе двух фаз – водной и твердой в результате адсорбции водные диполи выстраиваются электрически определенным образом в зависимости от параметров твердой фазы [13-14];
- на границе раздела водной среды с твердой и газообразной средой за счет сил натяжения происходит плотная упаковка водной структуры [13-14];
- молекулы воды являются диамагнетиками, которые во внешнем магнитном поле становятся наведенными магнитными диполями, у которых магнитные моменты ориентированы всегда против внешнего поля [15];
- магнитный диполь в неоднородном магнитном поле испытывает силу притяжения или отталкивания со стороны более сильного поля в зависимости от ориентации дипольного момента относительно внешнего поля [15];
- в переменном неоднородном магнитном поле на молекулы воды будет действовать сила, выталкивающая молекулы воды в направлении уменьшения поля [12].

Из приведенных фактов следует, что в неоднородном переменном магнитном поле молекулы воды будут вести себя подобно поведению в неоднородном переменном электрическом поле с учетом того, что они будут только выталкиваться из более сильного магнитного поля независимо от направления самого поля. Поэтому далее будем рассматривать переменное неоднородное электрическое поле подразумевая, что полученные выводы справедливы и для случая переменного неоднородного магнитного поля.

Из приведенных фактов также следует, что если на границе твердой и водной сред создать неоднородное переменное электрическое поле, то водные дипольные молекулы и ассоциаты, выстроенные электрически определенным образом вдоль этой границы, будут испытывать в основном силу притяжения и отталкивания (за счет плотной упаковки и определенной электрической ориентации диполей) в соответствии с направлением и силой неоднородного переменного электрического поля.

Основные положения предлагаемой теории:

- на границе раздела твердой и водной среды в неоднородном переменном электрическом поле (излучающая система) водные диполи будут совершать (за счет сил притяжения и отталк-

кивания) механические движения вдоль силовых линий неоднородного переменного электрического поля в соответствии с направлением и амплитудой этого поля;

- будет происходить преобразование энергии неоднородного переменного электрического поля в энергию механического движения слоя водных молекул и ассоциатов, прилегающего к границе фаз, с частотой и амплитудой электрического поля;
- механическое движение слоя водных молекул и ассоциатов передается следующему слою и распространяется далее в водной среде как механическая волна с частотой и амплитудой электромагнитного поля;
- прохождение механической волны в водной среде создает внешнее механическое воздействие (сжатие и растяжение) на находящиеся в водной среде дипольные ассоциаты, что может привести к изменению их электрического дипольного момента;
- периодическое изменение электрического дипольного момента у диполя приводит к излучению электромагнитного поля;
- происходит преобразование энергии механического движения дипольных ассоциатов воды в энергию электромагнитного поля;
- механическая волна, дошедшая до границы водной и твердой сред (приемная система), где дипольные молекулы и ассоциаты выстраиваются электрически определенным образом, создает внешнее механическое воздействие на дипольные ассоциаты (сжатие и растяжение), что приводит к изменению их дипольных моментов в водном слое на границе фаз с частотой и амплитудой излученного электромагнитного поля;
- изменение дипольных моментов водных ассоциатов с частотой и амплитудой излученного электромагнитного поля приводит к формированию на границе сред (на приемной системе) электромагнитного поля с частотой и амплитудой излученного поля;
- происходит преобразование энергии механического движения дипольных ассоциатов водных молекул (сжатие и растяжение) в энергию электромагнитного поля с частотой и амплитудой излученного поля;
- на границе водной и воздушной сред при воздействии механической волны, распространяющейся в водной среде перпендикулярно границе сред, также может происходить изменение электрических дипольных моментов водных ассоциатов с частотой и амплитудой механической волны, что приведет к излучению электромагнитного поля в воздушную среду;
- максимальный эффект преобразования энергии электромагнитного поля в энергию механического движения водных молекул и дипольных ассоциатов и обратное преобразование энергии механического движения водных ассоциатов (сжатие и растяжение) в энергию электромагнитного поля будет достигаться при совпадении частот излучаемого электромагнитного поля и собственных частот дипольных водных ассоциатов (резонанс).

Опытный образец системы и эксперимент. На изложенных основных положениях предлагаемой теории была разработана и изготовлена система для беспроводной передачи радиочастотных сигналов в водной среде, состоящая из передающего и приемного устройства. В сентябре 2017 года с помощью изготовленной системы на Иваньковском водохранилище (Московском море) в пресной воде был проведен эксперимент по беспроводной передаче радиочастотных сигналов в водной среде.

Передающее устройство с помощью массы опускалось на глубины от 1 до 5 м. Это устройство представляло собой герметичный пластиковый контейнер, содержащий антенну, управляемый генератор, блок питания и управляющий блок. Передающее устройство с помощью массы было ориентировано так, чтобы возникающая (по предлагаемой теории) механическая волна была бы направлена перпендикулярно поверхности воды, что в свою очередь должно было вызвать над поверхностью воды (в месте выхода механической волны) электромагнитное поле с частотой излучаемого передающим устройством электромагнитного поля. Передающее устройство излучало сигналы с заданным шагом в диапазоне (80 – 210) МГц. так чтобы излучались сигналы с частотами 100, 150 и 200 МГц.

Приемное устройство состояло из радиоантенны, узкополосного радиосканера с диапазоном частот 24-1750 МГц и планшета с программным обеспечением для анализа спектров.

Прием сигналов осуществлялся на частотах 100, 150 и 200 МГц. с каждой глубины.

В эксперименте сигналы передающего устройства уверенно принимались приемным устройством, расположенным над водой в зоне действия передающего устройства на всех глубинах и на всех установленных частотах.

Результаты проведенного эксперимента говорят о возможной правильности предлагаемой теории, однако не являются полным её подтверждением, что требует проведения дальнейших экспериментов.

Литература

1. Рублев В., Симоненко В. Переговорное устройство для легководолазов // Спортсмен – подводник 68, М.: ДОСААФ. 1982. с.30-33.
2. Рублев В.П., Ольшанский В.М. Электромагнитный канал подводной связи и управления подводными объектами // Материалы конференции (часть 2), Х1 международная научно – техническая конференция РАН «Современные методы и средства океанологических исследований». М. 2009г. с.97–100.
3. Ольшанский В.М., Павлов Д.С., Волков С.В., Эльяшев Д.Э. Электрические рыбы – биологический прототип новой техники // Вестник РАН. 2009. том.79. № 1. с.57-72.
4. Абдулкеримов С.А., Ермолаев Ю.М., Родионов Б.Н. Нанотехнология электородинамического опреснения морской воды // Торсионные поля и информационные взаимодействия. 2009. С.625-630.
5. Захаров С.Д., Мосягина И.В. Кластерная структура воды (обзор). Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Препринт. М. 2011.
6. Гончарук В.В., Смирнов В.Н., Сыроешкин А.В., Маляренко В.В. Кластеры и гигантские гетерофазные кластеры воды // Химия и технология воды. 2007. Т.29. № 1.
7. Зацепина Г.Н. Свойства и структура воды. М.: МГУ.1974. С.18-19.
8. Востриков А.А., Дубов Д.Ю., Дроздов С.В. Дипольный момент кластеров воды и парниковый эффект// Письма в ЖТФ. 2008. Т.34. В.5. С.87-94.
9. Зацепина Г.Н. Свойства и структура воды. М.: МГУ.1974. С.19-20
10. Петросян В.И. Резонансное излучение воды в радиодиапазоне // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. В.23. С.29.
11. Галашев А.Е., Рахманова О.Р. Компьютерное изучение физический свойств кластеров воды. 1. Устойчивость. // Журнал структурной химии. 2005. Т.45. № 4. С.648-654.
12. Парселл Э. Электричество и магнетизм. Т.2. С.301, 348, 360. Берклеевский курс общей физики в 5-ти томах.
13. Ткаченко С.И., Хоменко А.Ю. Определение удельной поверхности пористых материалов методами БЭТ и Арановича. М.: МФТИ. Кафедра молекулярной физики. 2014. С.6-7.
14. Девис С., Джеймс А. Электрохимический словарь. М.: Мир. 1979. С.40.
15. Китайгородский А.И. Введение в физику. М.: Наука. 1973. С.280.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОМПЛЕКСНОГО ВЗВЕШЕННОГО УСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

А.Е.Исаев, д-р техн.наук, А.Н.Матвеев, канд.техн.наук, А.С.Николаенко
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

APPLICATION OF THE METHOD OF COMPLEX MOVING WEIGHTED AVERAGING FOR CALIBRATION OF THE UNDERWATER ACOUSTIC RECEIVER AT LOW FREQUENCIES

A.E.Isaev, Dr.Sc., A.N.Matveev, Ph.D., A.S.Nikolaenko
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Для измерений в натурных условиях широко применяют гидроакустические приемники. Однако, методы их калибровки, прослеживаемые к национальным эталонам, отсутствуют. В докладе обсуждаются результаты работ по созданию способа низкочастотной калибровки по свободному звуковому полю, пригодного как для гидрофона, так и для гидроакустического приемника. Приводятся результаты экспериментальных исследований предложенного способа, применения его для калибровки в лабораторном бассейне гидрофона и гидроакустического рекордера на частотах от единиц килогерц до десятков герц.

For measurements in natural conditions, underwater acoustic receivers are widely used. However, there are no methods of calibration of underwater receivers, traceable to national standards. The results of work on creating a low-frequency free-field calibration method suitable for both a hydrophone and an underwater receiver are discussed. The experimental results of the proposed method and its application for calibration of a hydrophone as well as of underwater recorder in the laboratory water tank at frequencies from units of kilohertz to tens of hertz are presented.

Большое внимание к измерениям антропогенного подводного шума на частотах ниже 1 кГц обусловлено его губительным влиянием для морской фауны. Принято считать, что единство измерений подводного звука обеспечено, если гидрофон откалиброван по МЭК 60565 [1]. После того как калиброванный гидрофон устанавливают на измерительную платформу (рекордер, носитель, система вывешивания и т.п.), характеристики полученного гидроакустического приемника существенно отличаются от характеристик гидрофона. Вместе с тем, до настоящего времени методы калибровки гидроакустического приемника, прослеживаемые к национальным эталонам, отсутствуют. Это вынуждает вне зависимости от решаемой измерительной задачи применять в качестве чувствительности гидроакустического приемника чувствительность гидрофона по полю. При этом, если задачу калибровки гидрофона на частотах ниже 1 кГц можно решить в камере малого объема, то применительно к габаритному гидроакустическому приемнику такая калибровка не имеет практического значения, поскольку ее результаты представляли бы чувствительность по давлению вместо требуемой чувствительности по полю (дифракционные эффекты могут быть значительны даже на низких частотах). Расширить частотный диапазон калибровки по полю в сторону низких частот позволяет разработанный в ФГУП «ВНИИФТРИ» способ реализации условий свободного поля по методу СКВУ [2].

В основу калибровки по методу взаимности положено определение передаточного импеданса (ПИ) пары излучатель-приемник: отношение напряжения на выходе гидроакустического приемника (гидрофона) к току возбуждения излучателя. Звуковое давление $\dot{P}_T(f)$, создаваемое обратимым излучателем, пропорционально току возбуждения $\dot{I}_T(f)$ и излучательной способности преобразователя, которую представим отношением чувствительности преобразователя на прием $\dot{M}_T(f)$ и параметра взаимности $\dot{J}(f)$ и [1, 3]:

$$\dot{P}_T(f) = \dot{I}_T(f)\dot{J}^{-1}(f)\dot{M}_T(f).$$

Для напряжения на выходе приемника получим:

$$\dot{U}_{TH}(f) = \dot{I}_T(f)\dot{J}^{-1}(f)\dot{M}_T(f)\dot{M}_H(f),$$

где $\dot{M}_H(f)$ – чувствительность приемника.

Отметим, что поведение зависимости выходного напряжения приемника от частоты определяют не только частотные зависимости чувствительностей излучателя и приемника, но и частотные зависимости параметра взаимности и тока возбуждения излучателя [4].

Чтобы измерить напряжение приемника на заданной частоте f_0, излучатель и приемник размещают в резервуаре, заполненном водой, излучают и принимают гармонический сигнал. Чтобы исключить влияние сигналов, отраженных границами резервуара, продолжительность $\Delta\tau$ принимаемого гармонического сигнала ограничивают по времени прихода первого отраженного сигнала (тонально-импульсный метод). При этом результатом измерений оказывается не искомое значение $\dot{U}_{TH}(f_0)$, а оценка выходного напряжения приемника «по полю», которая мате-

матически выражается сверткой искомой частотной зависимости $\dot{U}_{TH}(f)$ и спектра тонального импульса с частотой заполнения f_0.

Частотное разрешение измерений тонально-импульсным методом принято оценивать по ширине центрального лепестка спектра импульса. При этом результат измерений можно рассматривать как результат усреднения искомой частотной зависимости в симметричном относительно частоты f_0 интервале шириной $\Delta f = 2/\Delta\tau$. В бассейне ФГУП «ВНИИФТРИ» $\Delta\tau$ не превышает 4 мс, вследствие чего частотное разрешение измерений по полю ограничено частотным интервалом 500 Гц. Усреднение практически не влияет на точность измерений в ситуациях, когда искомая частотная зависимость слабо изменяется в пределах частотного интервала 500 Гц (характерно при калибровке гидрофона). На частотах, удаленных от нуля оси частот, результат свертки частотной зависимости напряжения приемника и спектра тонального импульса близок к значению частотной зависимости напряжения на частоте заполнения тонального импульса.

Картина кардинально меняется при калибровке гидрофона в области, примыкающей к нулю оси частот, поскольку результат измерений оказывается искаженным вследствие усреднения существенно неравномерной частотной зависимости $U_{TH}(f)$. Частоту 1 кГц воспринимают как нижнюю частоту калибровки гидрофона по свободному полю тонально-импульсным методом.

Тонально-импульсный метод – это метод измерений в отсутствие отраженных волн. Платой за эту возможность является конечное разрешение измерений по частоте и, как следствие, ограничение нижней частоты измерений по полю. Метод СКВУ отличается тем, что частотную зависимость напряжения приемника измеряют в реверберационном звуковом поле (в присутствии отраженных звуковых волн) без принципиальных ограничений на продолжительность (частотное разрешение) таких измерений. Измеренная частотная зависимость искажена отражениями, но, благодаря высокому разрешению по частоте, содержит подробную информацию о поведении $J^{-1}(f)$ и $I_P(f)$, в том числе на самых низких частотах. В методе СКВУ частотную зависимость по полю получают, используя усреднение в специально подобранных частотных интервалах, то есть искусственно ухудшают разрешение по частоте. При этом появляется возможность применять разнообразные способы частотной коррекции, основанные на использовании априорной и апостериорной информации [5, 6]. Такие коррекции позволяют максимально «выравнивать» подвергаемую обработке СКВУ частотную зависимость, что многократно ослабляет искажения результата измерений, обусловленные конечным разрешением по частоте. Метод СКВУ успешно применяют на частотах до 500 Гц, в том числе на международных сличениях.

В известных реализациях метода СКВУ подвергали обработке зависимости, измеренные в области положительных частот, при этом нижняя частота измерений не могла быть меньше ширины частотного интервала усреднения. Привлечение информации о поведении частотной зависимости в области отрицательных частот позволяет распространить усреднение на отрицательные частоты и получать методом СКВУ результаты от нуля частот. Для проверки возможности калибровки гидрофона по полю на предельно низких частотах в бассейне ФГУП «ВНИИФТРИ» был поставлен следующий эксперимент. Регистрировали выходное напряжение приемника, возбуждая излучатель поочередно косинусным и синусным ЛЧМ сигналами, частоту которых изменяли от 3000 Гц до нуля и далее до 3000 Гц, сохраняя непрерывность фазы сигнала при переходе частоты через нуль. Сигналограммы при изменении частоты от нуля до 3000 Гц, относили к области положительных частот, а при изменении частоты от 3000 Гц до нуля – к области отрицательных частот, понимая в описываемом эксперименте под частотой не количество колебаний в секунду, а производную по времени фазы сигнала. Из косинусной и синусной сигналограмм образовывали комплексные сигналограммы тока и напряжения. Комплексную частотную зависимость ПИ пары излучатель-приемник получали делением сигналограммы напряжения на сигналограмму тока. Полученную частотную зависимость корректировали на частотную зависимость параметра взаимности, применяя меры, чтобы исключить деление на ноль. Частотная зависимость ПИ оказывается искаженной помехой вблизи нуля оси частот, где полезный сигнал практически отсутствует. Эти искажения сосредоточены в сравнительно узком симметричном относительно нуля частот интервале, ширина которого в эксперименте составляла 70-140 Гц. Для устранения искажений применяли интерполяцию в указанном частотном интервале.

На рис. 1 приведены частотные зависимости чувствительности гидрофона B&K8104, полученные в камере малого объема (ряд 2) и в бассейне на расстояниях 3,0 и 1,5 м от ближайшей отражающей поверхности (ряд 1 и ряд 3 соответственно).

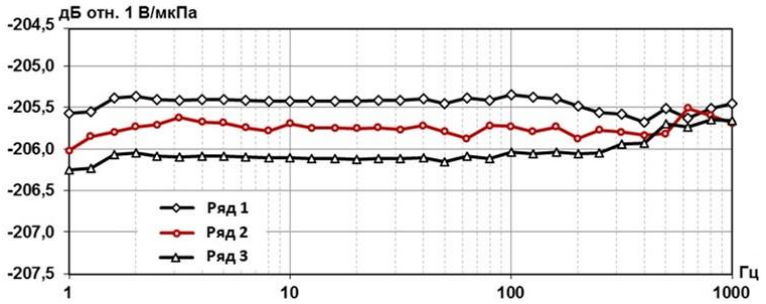


Рис. 1. Частотные зависимости чувствительности гидрофона B&K8104, полученные в камере малого объема (ряд 2) и в бассейне на глубинах 3 м (ряд 1) и 1,5 м (ряд 3).

При рассмотрении результатов калибровки, которые на рис. 1 представлены на частотах вплоть до 1 Гц, следует понимать, что значения на частотах меньших 70 Гц получены с использованием интерполяции на частотном интервале, искаженном помехой. Расхождение результатов калибровки по полю и по давлению не превосходят 0,3 дБ, что можно считать очень хорошим совпадением. Различия результатов калибровки по полю, полученных при различающемся вдвое разрешении по частоте (ряды 1 и 3), не превысили 0,6 дБ, что существенно меньше погрешности рабочих эталонов для калибровки измерительных гидрофонов 1,0-1,5 дБ. Ухудшение частотного разрешения не сказалось на близость результатов калибровки по полю и по давлению, что можно интерпретировать как подтверждение возможности выполнять калибровку гидрофона по полю в малом бассейне на «сверхнизких» частотах.

Полученные результаты не следует воспринимать как желание авторов заменить простую и точную калибровку гидрофона в камере малого объема более сложной процедурой измерений в бассейне. Задача описанных работ – создание и экспериментальная проверка способа низкочастотной калибровки по свободному звуковому полю, пригодного как для гидрофона, так и для гидроакустического приемника.

В качестве гидроакустического приемника использовали m-рекордер – массо-габаритную модель гидроакустического рекордера «AURAL M2», который получил широкое распространение при реализации международных программ по измерению шума корабля и акустическому мониторингу морской среды. Экспериментальные исследования заключались в измерении частотных зависимостей чувствительности m-рекордера при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 360°. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Полученные значения чувствительности плавно изменяются как при изменении частоты, так и при изменении угла падения звуковой волны, а расхождение частотных зависимостей носит закономерный характер. Эту закономерность можно использовать для количественной экспертной оценки дифракции звука на корпусе рекордера. Использование такой экспертной оценки позволяет определить частоту, ниже которой при установленной допустимой погрешности можно обоснованно использовать чувствительность гидрофона в качестве чувствительности рекордера. Поведение частотных зависимостей показывает, что дифракционные искажения имеют характер затухающих с уменьшением частоты осцилляций, заметных вплоть до частоты 250 Гц.

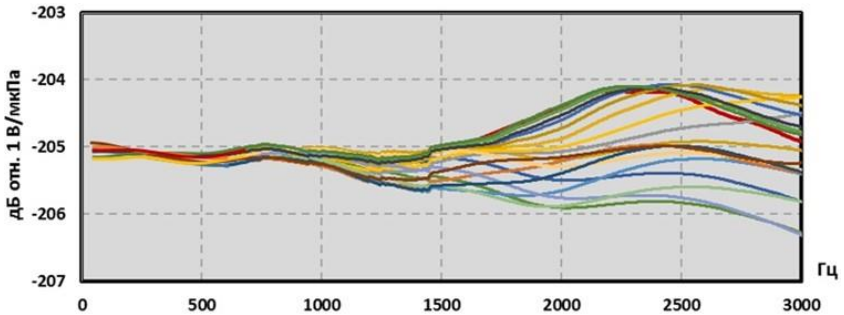


Рис. 2. Частотные зависимости чувствительности m-рекордера

Количественную оценку дифракционных искажений можно получить, используя размах осцилляций и величину расхождения частотных зависимостей. Расхождение зависимостей на частоте 3 кГц немногим превышает 2,0 дБ и уменьшается до 0,3 дБ на частоте 1 кГц. Зависимости сходятся к чувствительности гидрофона на частоте 250 Гц. Такое поведение зависимостей

на низких частотах характерно для акустических приемников с микрофоном, вынесенным из корпуса. На частотах ниже 150 Гц зависимости незначительно расходятся, что объясняется не возрастающим влиянием дифракции, а увеличением погрешности измерений в частотном интервале, примыкающем к нулю оси частот. Размах осцилляций на частотах ниже 1 кГц не превосходит 0,2 дБ.

Применение разработанной измерительной процедуры дает возможность следить за развитием дифракционных искажений начиная с момента их зарождения на столь низких частотах, на которых до недавнего времени не выполняли калибровки по полю не только рекордера, но и гидрофона. Применению тонально-импульсного метода для измерения подробной зависимости чувствительности от частоты и угла падения звука препятствуют неприемлемая трудоемкость измерений, продолжительность эксперимента возрастает настолько, что условия измерений могут существенно измениться, продолжительные переходные процессы и существенно худшее в сравнении с методом СКВУ разрешение по частоте маскируют и не позволяют выявлять влияние дифракционных искажений на низких частотах.

Наличие семейства подробных частотных зависимостей позволяет заметить присутствие и количественно оценить влияние дифракционных искажений. При всех направлениях падения звука (от 0° до 360°) на частотах до 3 кГц включительно чувствительность m-рекордера отличается от чувствительности гидрофона не более чем на ±1,2 дБ. Совместный вклад зависимости дифракционных эффектов от частоты и угла падения звуковой волны немногим превосходит типичную погрешность калибровки измерительного гидрофона. Кроме вывода о том, что на частотах вплоть до 3 кГц в качестве чувствительности рекордера можно использовать значение чувствительности гидрофона, можно сделать вывод о возможности использования m-рекордера в диффузном звуковом поле, например, для измерений окружающего шума [7].

Литература

1. IEC 60565 (2006). Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц.
2. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля // Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ». 2008. 369 с.
3. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974, 362 с.
4. Кулиев Ю.Н. и др. Пьезоприемники давления. Из-во Ростовского университета, 1976, 152 с.
5. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 773-781.
6. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности //Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 1. С. 48-55.
7. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive).

КАЛИБРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОМПЛЕКСНОГО ВЗВЕШЕННОГО УСРЕДНЕНИЯ

А.Е.Исаев, д-р техн.наук, А.Н.Матвеев, канд.техн.наук, А.С.Николаенко
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

CALIBRATION OF THE UNDERWATER ACOUSTIC RECEIVER USING THE METHOD OF COMPLEX MOVING WEIGHTED AVERAGING

A.E.Isaev, Dr.Sc., A.N.Matveev, Ph.D., A.S.Nikolaenko
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Частотная зависимость чувствительности приемника подводного шума с гидрофоном, расположенным вне корпуса, неравномерна. Для его калибровки в гидроакустическом бассейне успешно используют метод скользящего комплексного взвешенного усреднения. Однако, если период осцилляций частотной характеристики приёмника сопоставим с частотным интервалом усреднения метода, то получают заниженную оценку чувствительности. Обсуждается способ уменьшения искажения формы частотной зависимости чувствительности приемника при калибровке данным методом. Эффективность приёма подтверждена результатами контрольных измерений тонально-импульсным методом.

Frequency response of underwater acoustic noise receiver with a hydrophone mounted outside of receiver body is significantly irregular. The method of complex moving weighted averaging is successfully used for receiver calibration in laboratory water tank. However, if the oscillation period of explored frequency response is comparable with the frequency range of averaging of method, then a lower estimation of receiver sensitivity is obtained. The technique that allows to reduce distortions of the form of the frequency dependence of the receiver sensitivity caused by using the considered method is discussed. The efficiency of technique is proved by the results of control measurements by the tone-burst method calibration at specified frequencies.

При мониторинге антропогенного подводного шума морской акватории широко применяют гидроакустические рекордеры с гидрофоном, расположенным вне корпуса рекордера. Частотная зависимость чувствительности такого гидроакустического приемника отличается от частотной зависимости чувствительности гидрофона наличием значительных (до 18 дБ у рекордера типа «AURAL» [1]) осцилляций, причиной которых является отражения звуковой волны от корпуса рекордера. Чтобы уменьшить размах осцилляций, гидрофон относят от корпуса рекордера на значительное расстояние. Это приводит к двум последствиям: размах осцилляций частотной зависимости чувствительности уменьшается, а период осцилляций сокращается.

Для калибровки рекордера в условиях незаглушенного бассейна успешно применяют метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [2, 3]. Метод предполагает измерение комплексной частотной зависимости пары излучатель-приёмник при непрерывном излучении широкополосного сигнала. Искажения экспериментальной частотной зависимости, вызванные влиянием звуковых волн, отражённых от стенок бассейна, устраняют комплексным скользящим усреднением в частотных интервалах, которые рассчитывают по временным задержкам отражённых сигналов. Недостатком метода СКВУ является уменьшение размаха осцилляций искомой частотной зависимости относительно его действительного значения, если период осцилляций сопоставим с частотным интервалом усреднения метода СКВУ. Это уменьшение тем сильнее, чем дальше гидрофон отнесён от корпуса рекордера.

Для усовершенствования техники измерений с использованием метода СКВУ предложено дополнить её приёмом, позволяющим уменьшать искажения формы получаемой частотной зависимости применением коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой по методу СКВУ.

При обработке по методу СКВУ характеристика пропускания пространственного фильтра формируется как произведение характеристик пропускания фильтров одиночных отражений. Характеристика пропускания фильтра одиночного отражения описывается функцией вида $sin(x)/x$ [2]. Функцию коррекции для фильтра i-го отражения, приходящего с задержкой τ_i относительно прямой волны излучателя, предложено строить на основе функции пропускания резонансного контура второго порядка.

Применение корректирующей функции такого вида проиллюстрировано на рис. 1.

Как правило, размер калибруемого приёмника существенно меньше размеров бассейна. При этом временная задержка первого отражения от стенок бассейна всегда существенно больше задержки отражения от элемента конструкции приёмника, наиболее удалённого от гидрофона. В этой ситуации форма скорректированной характеристики пропускания на участке, примыкающем слева к положению её первого нуля, не имеет практического значения. Параметры корректирующей функции подбирают так, чтобы её поведение функции было близким к поведению функции

$[sin(x)/x]^{-1}$ для $0 \le \tau \le 0{,}8 \cdot \tau_i$. При этом максимум корректирующей функции будет расположен левее первого нуля функции пропускания фильтра одиночного отражения. Это обеспечивает близкую к плоской вершину и крутой спад скорректированной функции пропускания.

При использовании метода СКВУ обычно подавляют три отражения (n = 3). Итоговую корректирующую функцию для трех фильтров одиночных отражений получают как произведение трех корректирующих функций. Значения параметров корректирующей функции не зависят от положения нуля корректируемой функции пропускания, поэтому в эксперименте они были общими для всех корректирующих функций. Критерием оптимальности при подборе параметров корректирующей функции служила минимальная неравномерность скорректированной итоговой функции пропускания в области задержек, меньших 2/3 задержки первого отражения. На рис. 2 приведены итоговая функция пропускания при подавлении трёх отражений обработкой по методу СКВУ (кривая 1) и скорректированная итоговая функция пропускания (кривая 2).

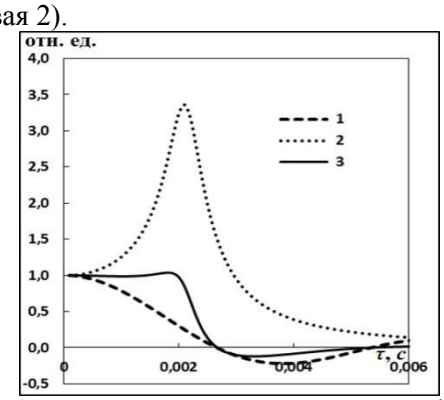


Рис. 1. Применение корректирующей функции: 1 – функция пропускания фильтра одиночного отражения, 2 – корректирующая функция, 3 – результат коррекции

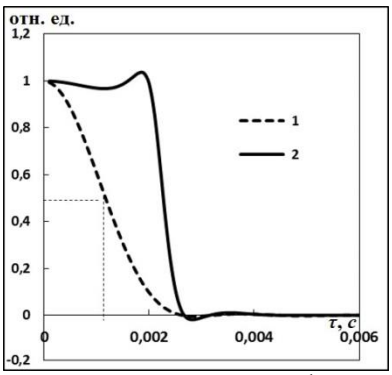


Рис. 2. Функция пропускания фильтра трёх отражений: 1 – при обработке по методу СКВУ, 2 – скорректированная.

Изложенный приём был опробован при калибровке массо-габаритной модели рекордера с цилиндрическим корпусом диаметром 150 мм и длиной 400 мм. Гидрофон был установлен на расстоянии 830 мм от торца корпуса по оси цилиндра. При калибровке рекордер обращали гидрофоном в направлении излучателя. Измерения проводили в незаглушенном бассейне с размерами 6×6×10 м, задержка первого отражения составляла 2,9 мс. Для получения частотных зависимостей использовали ЛЧМ сигнал и обработку по методу СКВУ [4-6]. Контрольные измерения выполняли тонально-импульсным методом. Частотную зависимость чувствительности, полученную с использованием обработки по методу СКВУ, корректировали следующим образом. По задержкам отражений, подавленных обработкой по методу СКВУ, рассчитали функции коррекции фильтров одиночных отражений, по которым получили итоговую функцию коррекции. С помощью преобразования Фурье получили кепстр частотной зависимости, который умножили на итоговую корректирующую функцию. Искомую частотную зависимость получили обратным преобразованием Фурье скорректированного кепстра.

На рис. 3 изображены результат преобразования Фурье (кепстр) частотной характеристики чувствительности рекордера, полученной в результате подавления первых трёх отражений от границ бассейна (кривая 1), и скорректированный кепстр – произведение кепстра на итоговую корректирующую функцию (кривая 2).

На зависимостях выделяется пик, положение которого на оси абсцисс соответствует периоду осцилляции, а величина – размаху осцилляции частотной характеристики чувствительности рекордера. Осцилляция обусловлена отражением звука от обращённого к гидрофону торца корпуса рекордера. Задержка отражения составляет 1,17 мс, что соответствует разности хода 1,7 м (расстояние от гидрофона до торца корпуса 830 мм, разность хода 1,66 м). В результате обработки по методу СКВУ размах осцилляции оказался уменьшен примерно в 2 раза (показано на рис. 2 пунктирными прямыми).

Для того, чтобы при калибровке точно учесть влияние корпуса рекордера, необходимо было восстановить размах осцилляций, уменьшенный обработкой по методу СКВУ.

На рис. 4 кривой 1 изображена частотная характеристика чувствительности, полученная при калибровке рекордера в бассейне с использованием метода СКВУ. Кривой 2 изображена частотная характеристика с восстановленной осцилляцией. После применения описанной выше коррекции размах осцилляции увеличился примерно в 2 раза.

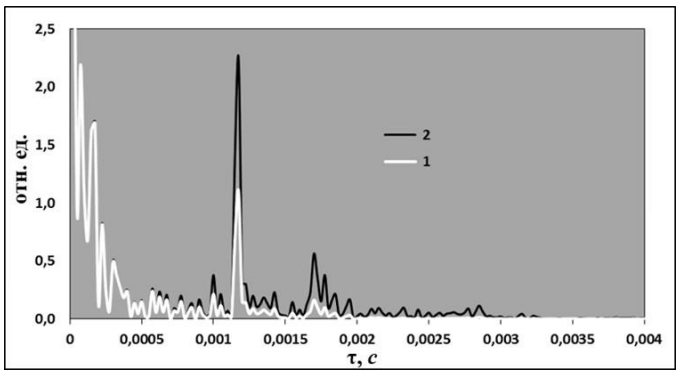


Рис. 3. Кепстр частотной характеристики чувствительности рекордера: 1 – полученный обработкой СКВУ, 2 – скорректированный

Точками 3, положение которых практически совпадает с кривой 2, показаны результаты, полученные тонально-импульсным методом. Различия кривых 1 и 2 достигают 0,5 дБ. Это означает, что при оценке инструментальной погрешности измерений уровней подводного шума (УПШ) с использованием кривой 1, составляющая, обусловленная осцилляцией частотной характеристики чувствительности, была бы занижена на 0,5 дБ. Это сравнимо с требованиями к общей неопределённости калибровки рекордера, предназначенного для измерений УПШ.

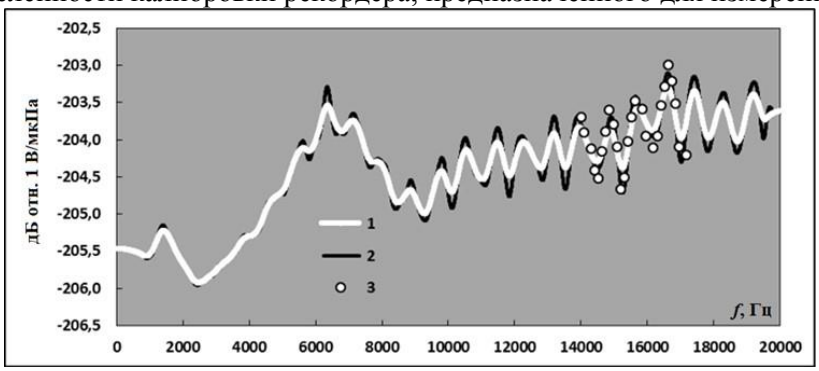


Рис. 4. Частотная характеристика чувствительности рекордера: 1 – полученная с использованием метода СКВУ, 2 – восстановленная после применения коррекции

Заключение. При измерениях тонально-импульсным методом реализуют прямоугольное временное окно. В этом смысле тонально-импульсный метод можно принять за эталонный метод измерений. Предложенный способ коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого при обработке по методу СКВУ, позволяет приблизить форму характеристики пропускания к прямоугольной. Это даёт возможность при калибровке таких сложных объектов как рекордер получать результаты близкие к результатам тонально-импульсного метода, одновременно обеспечивая измерения непрерывных частотных зависимостей.

Для калибровки рекордера предпочтительно использовать метод СКВУ, а для проверки правильности выполненной коррекции целесообразно проводить измерения на контрольных частотах тонально-импульсным методом. При выборе контрольных частот следует опираться на поведение непрерывных частотных зависимостей, полученных с помощью метода СКВУ. Таким образом, при калибровке рекордера целесообразно использовать оба метода, чтобы недостатки одного метода перекрыть достоинствами другого.

Литература

1. Hayman G., Robinson St., Lepper P. Methodologies for the calibration and characterisation of autonomous underwater recorders // Institute of Acoustics. 40-th Anniversary Conference. 2014.
2. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля // Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.
3. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приемника по полю на низких частотах // Измер. техн. 2018 (в печати).
4. Chen Y. et al. The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz // Metrologia Tech. Suppl. 2011. V. 48. 09004.
5. Исаев А.Е., Черников И.В. Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 1–9.
6. Маларкоди А. и др. Межлабораторные сличения национальных эталонов в области гидроакустических измерений диапазоне от 3 до 500 кГц // Измер. техн. 2016. № 01. С. 69–71.

РАБОЧИЙ ЭТАЛОН ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГИДРОФОНОВ И ПРИЕМНИКОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Г.С.Некрич
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

WORKING STANDARD FOR CALIBRATION OF HYDROPHONES AND RECEIVERS OF VIBRATIONAL SPEED OF PARTICLES OF WATER ENVIRONMENT

G.S.Nekrich
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

В докладе приводятся данные о создаваемом в ФГУП «ВНИИФТРИ» рабочем эталоне 2-го разряда для калибровки гидроакустических приёмников. Эталон реализует измерительную процедуру метода взаимности в свободном поле сферической бегущей звуковой волны с использованием излучателя, обратимого преобразователя и калибруемого приёмника. Эталон позволяет измерять абсолютным методом чувствительность по свободному звуковому полю гидрофонов в частотном диапазоне от 1 кГц до 200 кГц и приёмников колебательной скорости частиц водной среды на частотах от 1 кГц до 10 кГц.

The report provides information about the working standard developed by FSUE VNIIFTRI for calibration of underwater acoustic receivers. The standard realizes the measuring procedure of the reciprocity method in a free field of a spherical traveling sound wave with the use of a projector, a reversible transducer and a calibrated receiver. The standard allows to measure the absolute sensitivity by the free sound field of hydrophones in the frequency range from 1 kHz to 200 kHz and receivers of the oscillatory speed of particles of the water environment at frequencies from 1 kHz to 10 kHz.

Специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» создаётся новый рабочий эталон (РЭ) для калибровки гидроакустических приёмников, его особенность в том, что он объединяет в себе функции калибровки и поверки гидрофонов - приёмников звукового давления (скалярная величина звукового поля) и приёмников колебательной скорости (ПКС) (векторная величина).

Рабочий эталон с расширенными функциональными возможностями разработан с целью обновления существующего парка эталонных установок, большинство из которых находятся в эксплуатации более 10 лет, и обеспечивает следующие показатели:

- измерение непрерывных частотных зависимостей чувствительности ПКС в диапазоне от 1 до 10 кГц;
- измерение чувствительности и характеристик направленности гидрофонов в диапазоне от 1 до 200 кГц;
- доверительные границы относительной погрешности поверки (калибровки) ПКС при доверительной вероятности P=0,95 от 1,5 до 2,5 дБ (в зависимости от типа и конструкции ПКС);
- доверительные границы относительной погрешности поверки (калибровки) измерительных гидрофонов не более 1,5 дБ.

Принципы калибровки гидрофонов в свободном поле сферической звуковой волны подробно описаны в технической литературе и стандартизованы, поэтому в статье основное внимание уделено калибровке ПКС, которые получают все большее распространение в практике гидроакустических измерений.

Развитие отечественных и зарубежных технологий позволило создать достаточно совершенные конструкции приёмников колебательной скорости. Например, АО «Концерн «Океанприбор» применяет ПКС для калибровки и поверки протяжённых гидроакустических антенн, а Институт Проблем Морских Технологий ДВО РАН создаёт мобильные комбинированные приёмные системы на основе ПКС, устанавливаемых в автономные необитаемые подводные аппараты.

В отличие от гидрофона диаграмма направленности ПКС имеет типичную дипольную форму с глубокими боковыми провалами, которая слабо зависит от частоты.

Преимущества применения ПКС можно на оценить следующих примерах:

- если воспользоваться провалом на диаграмме направленности приёмника, расположив ось приёма горизонтально, то при измерениях, влияние шума волнения моря будет многократно ослаблено,
- таким же образом удаётся подавлять помеху от удалённого судоходства,
- противофазность сигналов, принятых приёмником с противоположных направлений, позволяет отстроиться от изотропной помехи,
- возможность определять направление на источник звука с помощью одиночного ПКС позволяет многократно сокращать область пространства, занимаемую приёмной системой.

Исторически сложилось так, что первые ПКС были низкочастотными и их рабочий диапазон распространялся на частоты не выше 1 кГц. Возможность калибровки ПКС, которую вы-

полняли в камерах малого объёма, также была ограничена низкими частотами. Частотный диапазон современных ПКС перешагнул далеко за частоту 1 кГц. Прошли испытания в целях утверждения типа и внесены в Государственный реестр комбинированные векторные приёмники на частоты до 10 кГц. На завершающей стадии находится разработка ряда отечественных ПКС на частоты до 50 кГц. Многие отечественные организации используют приёмники импортного производства, широко применяя их при морских изысканиях в антеннах для акустической 2D и 3D съёмки.

С расширением частотного диапазона и появлением широкополосных ПКС обозначились две проблемы: первая – освоить калибровку ПКС в свободном поле бегущей звуковой волны, вторая – продлить частотный диапазон калибровки ПКС по свободному полю в лабораторном бассейне в сторону низких частот по крайней мере до 1 кГц.

Использование разработанной во «ВНИИФТРИ» техники скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [1, 2] для калибровки гидрофонов обеспечило перекрытие частотных диапазонов камеры малого объёма и измерительного бассейна за счёт расширения в область низких частот диапазона измерений по свободному полю в бассейне. Апробация метода СКВУ для калибровки ПКС позволило решить обе обозначенные проблемы [3, 4].

Калибровку выполняют в лабораторном бассейне. Чувствительность приёмника определяют абсолютным методом, применяя измерительную процедуру метода взаимности в свободном поле бегущей сферической звуковой волны с использованием трёх преобразователей: излучатель, обратимый преобразователь (ОП) и калибруемый ПКС. Условия локально плоской падающей на ПКС звуковой волны обеспечивают, удаляя приёмник от излучателя и ОП на достаточные расстояния. Необходимого соотношения сигнал/шум достигают когерентным накоплением принимаемых сигналов.

В процессе калибровки излучают продолжительные квадратурно дополненные ЛЧМ сигналы. В реверберационном звуковом поле бассейна измеряют частотные зависимости пар излучатель-приёмник: излучатель-ОП, излучатель-ПКС, ОП-ПКС. Влияние отражённых границами бассейна сигналов подавляют, обрабатывая полученные частотные зависимости по методу СКВУ.

Особенность реализации метода взаимности при калибровке ПКС состоит в том, что в отсутствие взаимного обратимого ПКС роль ОП выполняет приёмник звукового давления – гидрофон [4].

С учётом связи колебательной скорости и звукового давления в бегущей сферической волне чувствительность приёмника ($M_{ПКС}$) определяют по формуле (1):

$$\boldsymbol{M}_{\text{ПКС}} = \sqrt{\boldsymbol{J}\cdot\left(\frac{\boldsymbol{U}_{\text{И-ПКС}}}{\boldsymbol{U}_{\text{И-ОП}}}\right)\left(\frac{\boldsymbol{U}_{\text{ОП-ПКС}}}{\boldsymbol{I}_{\text{ОП}}}\right)\left(\frac{\boldsymbol{r}_{\text{И-ПКС}}\boldsymbol{r}_{\text{ОП-ПКС}}}{\boldsymbol{r}_{\text{И-ОП}}}\right)}\sqrt{\frac{\boldsymbol{r}_{\text{И-ПКС}}\boldsymbol{r}_{\text{ОП-ПКС}}}{\sqrt{\boldsymbol{k}^2\boldsymbol{r}^2_{\text{ОП-ПКС}}+\boldsymbol{1}}\sqrt{\boldsymbol{k}^2\boldsymbol{r}^2_{\text{И-ПКС}}+\boldsymbol{1}}}}, \qquad (1)$$

где J – параметр взаимности в свободном поле сферической волны; $U_{\text{ОП-ПКС}}$ и $U_{\text{И-ПКС}}$ – электрические напряжения на выходе калибруемого ПКС при возбуждении звуковой волны ОП и излучателем, соответственно; $U_{\text{И-ОП}}$ – электрическое напряжение на выходе ОП при возбуждении звуковой волны излучателем; $I_{\text{ОП}}$ – сила электрического тока в цепи ОП в режиме излучения; $r_{\text{И-ПКС}}$, $r_{\text{ОП-ПКС}}$ и $r_{\text{И-ОП}}$ – расстояния между излучателем и ПКС, ОП и ПКС, излучателем и ОП, соответственно.

Эталонная установка, реализующая калибровку ПКС, состоит из аппаратуры излучающего и приемо-измерительного трактов, координатной системы для позиционирования и перемещений преобразователей, вычислительной системы, работающих под управлением разработанного программного комплекса. Структурная схема РЭ представлена на рис. 1.

В табл. 1 представлены доминирующие источники погрешности измерений РЭ при калибровке ПКС.

Оценки погрешности и неопределённости результата измерений:

- границы НСП 5,18 %;
- СКО результата измерений 1,72 %;
- неопределённость по типу А 1,72 %;
- стандартная неопределённость по типу В 2,14 %;
- суммарная стандартная неопределённость 2,74 %;
- расширенная неопределённость (при k = 2) 5,49 %.

Рис. 1. Структурная схема РЭ при калибровке ПКС.

Таблица 1. Границы составляющих НСП.

Границы составляющих НСП	Значение (%)
обусловленной направленностью гидроакустических преобразователей, θ_1	0,84
обусловленной влиянием электрического шума, включающего высокочастотную наводку, θ_2	0,10
обусловленной квантованием аналогового сигнала, θ_3	0,60
определения сопротивления в цепи обратимого преобразователя, θ_4	0,20
обусловленные: – рассеянием звуковой волны креплением эталонного приёмника, θ_5 – остаточным влиянием отражений от границ бассейна, θ_6	 0,81 0,50
определения отношения напряжений $U_{\text{И}-\text{ОП}}/U_{\text{И}-\text{Г}}$, $\theta_7 = (3 \cdot \theta_1^2 + 2 \cdot \theta_2^2 + 2 \cdot \theta_3^2)^{1/2}$	1,78
определения отношения напряжений $U_{\text{ОП}-\text{Г}}/I_{\text{ОП}}$, $\theta_8 = (2 \cdot \theta_1^2 + 2 \cdot \theta_2^2 + 2 \cdot \theta_3^2 + \theta_4^2)^{1/2}$	1,55
обусловленной неточностью коэффициента усиления предусилителя, θ_9	0,60
обусловленной искажением частотной зависимости при применении обработки по методу СКВУ, θ_{10}	0,50
обусловленной влиянием перекрёстной электрической помехи, θ_{11}	0,20
обусловленной нарушением условий дальнего поля, $\theta_{12} = (\theta_5^2 + \theta_6^2)^{1/2}$	4,30
обусловленной отличием звуковой волны от плоской, θ_{13}	0,19
обусловленной неточностью расстояния между преобразователями, θ_{14}	0,50
обусловленной нарушением критерия взаимности обратимого преобразователя, θ_{15}	0,30
возникающей вследствие коррекции электрической нагрузки, θ_{16}	0,50
при определении скорости звука в водной среде, θ_{17}	0,10
при определении плотности воды, θ_{18}	0,10
установки частоты генератора, θ_{19}	0,01
обусловленной неточностью коэффициента калибровки приёмного тракта установки, $\theta_{20} = (\theta_{23}^2 + \theta_3^2)^{1/2}$	0,61
обусловленной неточностью измерений тока обратимого преобразователя, $\theta_{21} = (\theta_9^2 + \theta_3^2 + \theta_4^2)^{1/2}$	0,88
обусловленной неточностью измерений напряжения эталонного приёмника, $\theta_{22} = (\theta_2^2 + \theta_3^2 + \theta_9^2 + \theta_{10}^2 + 2 \cdot \theta_1^2)^{1/2}$	0,99
обусловленной неточностью цифрового мультиметра, θ_{23}	0,10

Применение разработанных методов измерений позволило не только многократно расширить частотный диапазон калибровки ПКС как в сторону высоких (до 10 кГц), так и низких (от

1 кГц) частот и обеспечить возможность калибровки ПКС по полю, но и приблизить точность калибровки ПКС к точности калибровки гидрофона.

Полученные данные при проведении сличений результатов калибровки ПКС по полю на РЭ и по давлению в камере малого объёма на установке ЭУ1 из состава ГЭТ 55-2017 указывают на высокую точность измерений в бассейне (результаты сличений представлены на Рис. 2), расхождение результатов не превышает 0,5 дБ.

Выполненный анализ составляющих погрешности и результаты сличений установок для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости дают основание полагать, что разрабатываемый РЭ будет востребован ведущими гидроакустическими организациями России.

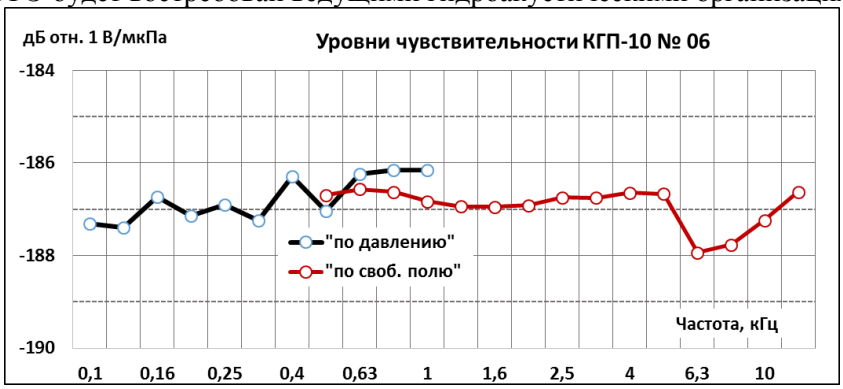


Рис. 2. Результаты сличений.

Литература

1. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево. ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.
2. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 6. С. 727–736.
3. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала.//Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 773-781.
4. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 1. С. 48-55.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 0,5 ДО 2000 ГЦ

А.И.Щелкунов
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

MODERNIZATION OF THE STANDARD FACILITY FOR REPRODUCTION THE UNIT OF SOUND PRESSURE IN WATER IN THE FREQUENCY RANGE FROM 0.5 HZ TO 2000 HZ

A.I.Shchelkunov
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Рассматриваются недостатки эталонной установки Э-2 из состава ГЭТ 55-2017, выявленные в ходе её более чем десятилетней эксплуатации, и предлагаются способы их решения.

The limitations of the E-2 facility from state primary standard GET 55-2017 revealed during its more than ten years use are considered, and methods for its improvement are proposed.

В период с 2000 по 2008 год во ФГУП «ВНИИФТРИ» были проведены работы по модернизации Государственного специального эталона ГЭТ 55-91 единицы звукового давления в водной среде в диапазоне частот от 0,01 Гц до 1 МГц (В настоящий момент ГЭТ 55-2017, диапазон частот от 0,001 Гц до 1 МГц. Ведутся работы по расширению частотного диапазона до 3 МГц) [1]. В ходе этих работ, в том числе, была создана автоматизированная измерительная установка Э-2 (табл. 1).

Таблица 1. Основные технические и метрологические характеристики установки Э-2.

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, Гц	от 0,5 до 2000
Воспроизводимое звуковое давление, Па	0,5 - 1000
СКО	$0{,}5\cdot10^{-2}$
НСП	$2{,}0\cdot10^{-2}$ до 1000 Гц $2{,}8\cdot10^{-2}$ до 2000 Гц
Диаметр внутренней полости измерительной камеры, мм	73
Глубина внутренней полости измерительной камеры, мм	670

Установка Э-2 реализует стандартную процедуру метода сличения, который состоит в том, что сигнал с градуируемого гидрофона сравнивается с сигналом с гидрофона сличения. Затем вычисляется значение чувствительности градуируемого гидрофона - $M_{ГГ}$.

$$M_{ГГ} = M_{ГС}\frac{U_{ГГ}}{U_{ГС}}, \qquad (1)$$

где $U_{ГС}$ – напряжение на выходе гидрофона сличения; $M_{ГС}$ – чувствительности гидрофона сличения; $U_{ГГ}$ – напряжение на выходе градуируемого гидрофона. Внешний вид установки представлен на рис. 1.

Отличительной особенностью установки Э-2 от ранее созданных является воспроизведение единицы звукового давления в условиях малой камеры, выполненной в виде толстостенного вертикального металлического стакана, заполненного водой. Звуковое давление в такой камере возбуждается электродинамическим излучателем, расположенным в верхней части камеры, через воздушную прослойку между ним и поверхностью воды. Такое исполнение измерительной камеры позволяет обойти основное требование к классической конструкции камеры малого объёма – абсолютной жёсткости и, как следствие, герметичности. Снятие требования по герметичности позволило существенно расширить номенклатуру поверяемых гидрофонов, так как конструкции установочных мест гидрофонов и гидроакустических головок индивидуальны и не стандартизованы, что требовало необходимости создания большого количества разнообразных и достаточно сложных уплотнительных прокладок и фиксаторов. Конструкция измерительной камеры установки Э-2 представлена на рис. 1.

Второй особенностью установки Э-2 является использование в качестве гидрофона сличения тензометрического преобразователя [2]. Отличительной чертой используемого преобразователя является то, что он является приёмником как переменного, так и статического давления, и у него отсутствует зависимость чувствительности от частоты. Это позволяет проводить ка-

либровку такого гидрофона сличения абсолютным методом на статических давлениях с высокой точностью и в итоге уменьшить погрешность градуировки измерительных гидрофонов.

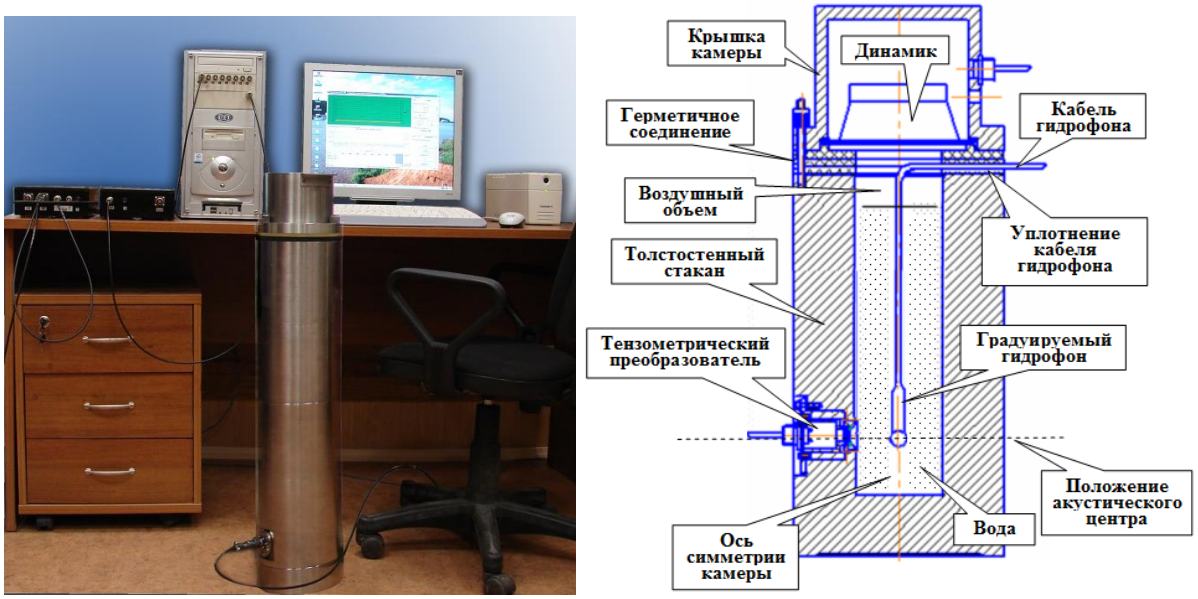


Рис. 1. Внешний вид установки Э-2 и конструкция измерительной камеры.

Активная эксплуатация установки Э-2 в течение более десяти лет с момента ее создания выявила ряд слабых сторон и указала на направления дальнейшего совершенствования эталона. Так в измерительной камере установки Э-2 гидрофон сличения монтируется в боковой стенке. Диаметр внутренней полости камеры составляет 73 мм. Измерения по формуле (1) корректны только тогда, когда на гидрофон сличения и градуируемый гидрофон действует в каждый момент времени одинаковое звуковое давление. Внесение же во внутреннюю полость гидрофона приводит к отклонению звукового поля в полости камеры от расчетного тем более существенному, чем крупнее помещенный в неё гидрофон. На момент создания Э-2 наибольшими гидрофонами, требующими калибровки в рабочем частотном диапазоне установки, были гидрофоны типа Г5105 и Г61Н, имеющие характерный диаметр порядка 60 мм. Гидрофоны такого размера оказывают существенное влияние на распределение звукового поля в полости измерительной камеры, и как следствие точность их калибровки снижается. К настоящему времени появилась необходимость калибровки таких низкочастотных гидрофонов как ГИ80 и ITC1001, имеющих характерные размеры 85 и 110 мм соответственно. Гидрофоны этих типов уже физически не помещаются в измерительную камеру установки Э-2. Это привело к необходимости создания измерительной камеры с внутренней полостью большего диаметра.

За время, прошедшее с момента ввода в эксплуатацию установки Э-2, цифровая измерительная техника сделала существенный шаг вперед. Появилось большое количество средств измерения, выполняющих функции цифроаналоговых преобразователей, а стоимость их снизилась. Эти средства измерения стали более точными и функциональными. Это позволяет в модернизируемой установке использовать многоканальную измерительную систему. Одновременный приём, обработка и оценка входных сигналов по нескольким каналам сократит время измерения до двух раз, что при градуировке гидрофона во всем частотном диапазоне от 0,5 до 2000 Гц может дать экономию во времени до 5 часов.

Принимая во внимание всё выше сказанное, во ФГУП «ВНИИФТРИ» было принято решение провести модернизацию установки Э-2 из состава ГЭТ 55-2017 в период с 2017 по 2019 год. Модернизированная установка будет иметь измерительную камеру увеличенного объёма с диаметром внутренней полости 150 мм и более совершенную многоканальную измерительную систему. Структурная схема модернизируемой установки Э-2 представлена на рис. 2.

За прошедшее десятилетие во ФГУП «ВНИИФТРИ» было создано и передано потребителям десятки разнообразных образцов рабочих эталонов и установок, предназначенных для градуировки измерительных гидрофонов в диапазоне низких частот [3]. Эта аппаратура позволяет не только определять частотную зависимость чувствительности гидрофона, но и исследовать влияние на неё таких немаловажных факторов, как температура и избыточное гидростатиче-

ское давление. На нашем предприятии идет постоянная работа по совершенствованию существующих и созданию новых эталонных установок гидрофизических величин.

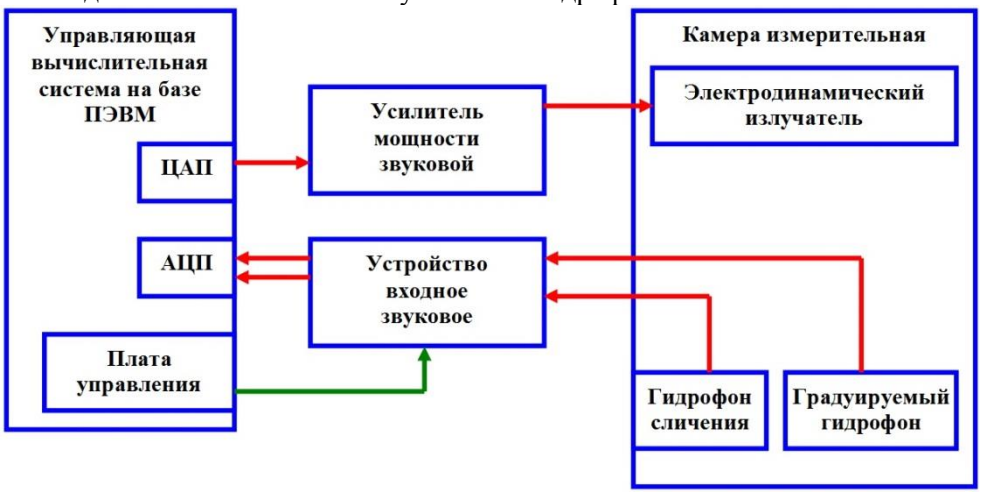


Рис. 2. Структурная схема модернизируемой установки Э-2.

Литература

1. Исаев А.Е., Некрич С.Ф., Некрич Г.С., Сильвестров С.В., Черников И.В., Щелкунов А.И. Модернизированный государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. - 2010. - №5. С. 5-8.
2. Щелкунов, А.И. Использование тензометрического преобразователя в качестве гидрофона сличения при измерении чувствительности гидрофонов в измерительной камере малого объема // Исследования в области физико-технических и радиотехнических измерений. Труды ВНИИФТРИ. - 2005. - Вып. 51 (143). С. 109-113.
3. Щелкунов А.И. Установки ФГУП «ВНИИФТРИ» для низкочастотной градуировки гидрофонов // Судометрика-2016. Материалы конф. С.162-166.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ЦЕЛЯХ РАСШИРЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

С.В.Сильвестров, канд.техн.наук, Н.Г.Щерблюк, канд.физ-мат.наук
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

MODERNIZATION OF STATE PRIMARY STANDARD OF UNDERWATER ACOUSTIC PRESSURE UNIT AND VIBRATIONAL VELOCITY UNIT FOR THE EXTENSION OF FREQUENCY RANGE TO ULTRASOUND

S.V.Sil'vestrov, Ph.D., N.G.Shcherblyuk, Ph.D.
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Рассматриваются цели и направления совершенствования высокочастотной установки (частотный диапазон от 160 до 1000 кГц) из состава Государственного эталона ГЭТ55-2017, воспроизводящей единицу звукового давления в водной среде в условиях незаглушенного бассейна. Приведены структурная схема и принципы работы усовершенствованной установки. Изложены основные достигнутые результаты в 2017 году.

In this work we consider purposes and directions of the high-frequency calibration facility modernization. This facility is part of the state standard GET55-2017. It reproduces the unit of pressure with frequency range from 160 to 1000 kHz in anechoic water tank under free-field conditions. The structure scheme of facility under modernization and its work principles are described. We also give main results of modernization achieved in 2017.

Государственный первичный эталон (ГПЭ) единиц звукового давления и колебательной скорости ГЭТ55-2017 является сложным многокомпонентным комплексом оборудования, предназначенным для хранения и передачи потребителям единиц акустического давления и колебательной скорости в водной среде. Его основная сфера применения – калибровка приёмников звукового давления в широком диапазоне частот от долей герца до 1 МГц, калибровка приёмников градиента давления и колебательной скорости, а также измерения их фазовых характеристик и диаграмм направленности. Структурно эталон состоит из шести отдельных установок, различающихся выбором конструкционных решений, принципом функционирования, диапазоном рабочих частот, применяемыми методами калибровки гидрофонов и т.д. В период своего существования в связи с возрастающими потребностями промышленности эталон ГЭТ55 прошёл несколько масштабных модернизаций [1] с целью улучшения своих метрологических характеристик и функциональных возможностей. Последнее из таких совершенствований завершилось в 2011 году [2,3] и привело к созданию эталонного комплекса третьего поколения. Кроме того, в 2016 году с целью обеспечения единства векторно-фазовых измерений в гидроакустике в состав ГПЭ введены эталонные установки для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости водной среды. Эталонные установки из состава ГПЭ неоднократно участвовали в международных ключевых сличениях с национальными эталонами ведущих стран мира и показали на них высокие результаты [4]. Таким образом, в России ГЭТ55-2017 является главным средством обеспечения единства измерений звукового давления и векторно-фазовых измерений в основном частотном диапазоне гидроакустических измерений.

Однако в настоящее время возможности ГПЭ не в полной мере обеспечивают возросшие запросы в области гидроакустических измерений в интересах морского флота, науки, экономики и обороны, в частности в области высоких частот. Например, прорывные технологии в области гидролокации позволили запустить в производство гидролокационные системы, работающие на частотах 3 МГц и более. Качество зарубежных гидролокационных средств обеспечивается высокими требованиями к достоверности их параметров, которые регламентированы национальными нормативными документами. О возможностях измерений звукового давления в ультразвуковом диапазоне частот за рубежом можно судить по следующим требованиям: частота до 3 – 5 МГц, угол раскрыва луча не более 2.2 – 3 º, пространственное разрешение не хуже 1 см, точность измерения координаты на частотах выше 100 кГц не более 1 см, погрешность калибровки элементов гидроакустических антенн в частотном диапазоне от 1 до 3 МГц не более 3-9 º (фазочастотная характеристика), и не более 4-5 % (амплитудно-частотная характеристика).

Отечественной промышленностью разработана и запущена в производство широкая номенклатура гидролокационных систем, однако в России метрологическое обеспечение в этой области в настоящее время отсутствует, что снижает конкурентоспособность отечественной продукции на международном рынке и препятствующей решению задач по импортозамещению. Первым шагом к исправлению сложившейся ситуации является расширение частотного диапазона ГПЭ в область ультразвуковых частот до 3 МГц.

В данном докладе речь пойдёт о начавшейся в 2017 году во ВНИИФТРИ опытно-конструкторской работе по усовершенствованию эталонной установки Э-5 из состава ГЭТ55-2017. Эта установка воспроизводит и передаёт единицу звукового давления в водной среде в диапазоне высоких частот от 160 кГц до 1 МГц. Достигается это с помощью реализации стандартного метода взаимности калибровки гидрофонов в условиях свободного поля в незаглушенном гидроакустическом бассейне (ГАБ). Суммарная расширенная неопределённость измерений чувствительности гидрофона на этой эталонной установке не превышает 4 %.

Основные цели и направления модернизации установки Э-5. Как уже указывалось выше, основной целью модернизации эталонной установки Э-5 является расширение частотного диапазона калибровки до 3 МГц. Кроме того, в процессе работ предполагается решение следующих задач:

– расширение функциональных возможностей установки Э-5 в части калибровки приёмников звукового давления на длительных широкополосных сигналах;

– разработка и включение в состав эталона гидрофонов-переносчиков с рабочим диапазоном частот до 3 МГц;

– повышение точности измерения фазовых характеристик гидрофона на высоких частотах за счёт более точного позиционирования гидрофонов относительно друг друга.

Перечислим теперь основные направления и предложения по модернизации установки. В ходе работ по модернизации установки планируется:

– замена электронной аппаратуры, входящей в эталон, на аппаратуру с рабочим диапазоном частот, покрывающим ультразвуковую область;

– создание новой системы позиционирования, позволяющей плавное и высокоточное размещение калибруемого гидрофона в ГАБ относительно вспомогательных гидрофонов;

– создание средств визуального контроля положения гидрофонов относительно друг друга.

Структурная схема модернизированной установки Э-5 и принцип её работы. Рассмотрим структурную схему установки (рис. 1). Из неё видно, что установка Э-5 состоит из следующих основных узлов:

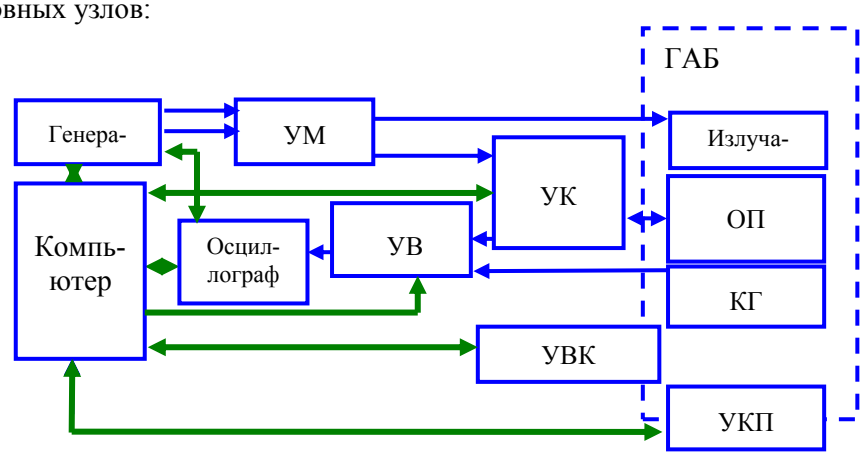


Рис. 1. Структурная схема эталонной установки Э-5.

– ГАБ среднего объёма с размерами 1,0 × 1,0 × 1,5 м, имеющий прозрачные стенки. ГАБ содержит водную среду, в которой происходит распространение акустических волн.

– Излучающий тракт, состоящий из генератора сигналов произвольной формы и усилителя мощности (УМ). Тракт предназначен для создания сигналов заданной формы, их усиления и передачи на гидрофон-излучатель.

– Приёмный тракт, в который входят цифровой осциллограф, усилитель сигнала по напряжению (предусилитель) и устройство входное (УВ), согласующее выходной импеданс гидрофона и входной импеданс осциллографа. Таким образом, в данном тракте сигнал, принимаемый с гидрофонов, усиливается и оцифровывается. Полученный цифровой массив передаётся в память компьютера, где осуществляется дальнейшая обработка результатов измерений.

– Устройство коммутации (УК). При калибровке гидрофонов методом взаимности используется обратимый преобразователь ОП, который работает в двух режимах: на приём сигналов и на излучение. Когда УК работает в режиме приёма, в приёмном тракте измеряется напряжение на ОП в поле звуковой волны от гидрофона-излучателя. В режиме излучения ОП сам создаёт звуковое давление, а в приёмном тракте измеряется ток, протекающий через ОП. Для выбора

между этими двумя режимами применяется устройство коммутации, которое управляется посредством TTL-сигнала от компьютера. УК выполнено в виде отдельного выносного блока в корпусе типа BS21. Внутри корпуса располагаются плата с коммутирующим реле и плата управления, предназначенная для преобразования управляющего USB-сигнала от компьютера в LPT-сигнал с логикой 0 и 1.

– Устройство координатно-поворотное (УКП), обеспечивающее перемещение калибруемого гидрофона внутри ГАБ по двум горизонтальным и одной вертикальной осям, а также обеспечивающее его вращение вокруг вертикальной оси на 360°. Конструкционно УКП представляет собой металопрофильный каркас вокруг ГАБ, на который монтируются три линейных моторизированных транслятора и одна поворотная платформа (рис. 2).

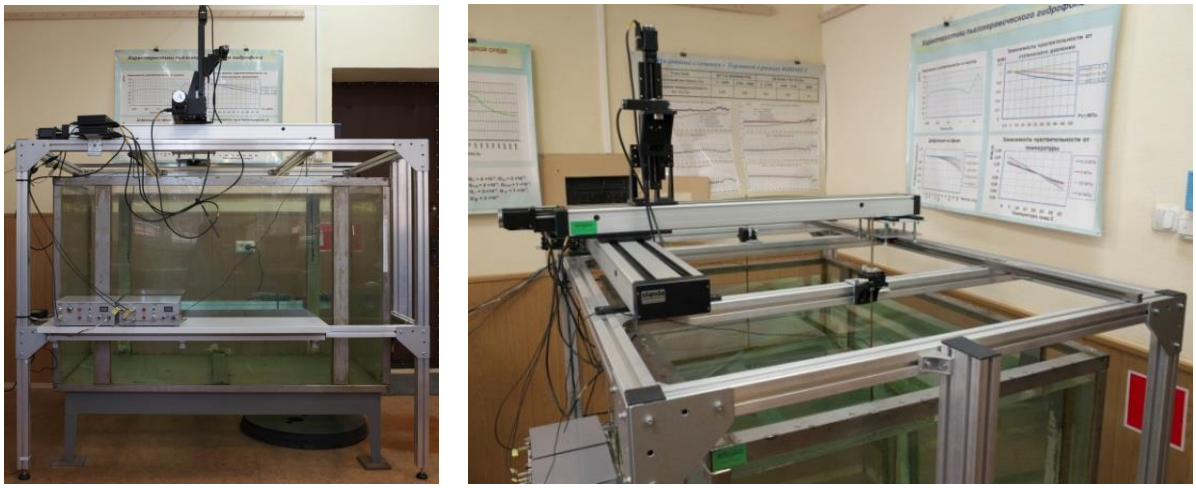


Рис. 2. Гидроакустический бассейн и макет координатно-поворотного устройства.

Линейные трансляторы позволяют перемещать калибруемый гидрофон с минимальным шагом 15 мкм, а поворотная платформа вращать его с минимальным шагом не более 0,1°. УКП предназначено также для позиционирования вспомогательных гидрофонов в заданное положение и регулирования их ориентации относительно калибруемого гидрофона с помощью юстировочного механизма.

– Устройство визуального контроля (УВК) положения преобразователей относительно друг друга и уровня поверхности воды. Контроль осуществляется при помощи лазерного луча, направление которого можно изменять и делать параллельным поверхности воды.

Принцип работы установки основан на реализации стандартного метода взаимности калибровки гидрофонов по свободному полю в условиях незаглушенного ГАБ с применением тональных импульсов. В этом методе используются три преобразователя: излучатель, калибруемый гидрофон (КГ) и обратимый преобразователь (ОП). Для получения амплитудно-частотной характеристики АЧХ чувствительности калибруемого гидрофона по полю и соответственно давления, создаваемого одним из преобразователей, необходимо последовательно провести три измерительных цикла. А именно, измерить АЧХ передаточных импедансов следующих пар: излучатель – калибруемый гидрофон (И – КГ), излучатель – ОП (И – ОП) и ОП – калибруемый гидрофон (ОП – КГ).

Во время измерения импедансов пар И – КГ и ОП – КГ калибруемый гидрофон размещается между излучателем и ОП так, что акустические центры преобразователей находятся на одной линии параллельной поверхности воды. Положение центров контролируется УВК с помощью луча лазера, также параллельного поверхности воды. Применение таких средств контроля позволяет повысить точность позиционирования опорных направлений гидрофонов относительно друг друга, что в свою очередь приводит к уменьшению погрешности измерения чувствительности приёмника на высоких частотах. Для создания условий свободного поля в установке применятся метод временной селекции тональных сигналов. Измерение передаточного импеданса пары излучатель – приёмник в каждом цикле происходит следующим образом. Тональный импульс заданной частоты и длительностью меньше, чем задержка прихода первого отражения относительно прямого сигнала, подаётся с выходного канала генератора через усилитель мощности на гидрофон-излучатель. Принимаемый гидрофоном сигнал усиливается предусилителем, затем оцифровывается осциллографом, синхронизированным с генератором.

Для повышения отношения сигнал-шум в осциллографе используется когерентное накопление многократно излученного одного и того же тонального импульса. Когерентно-накопленный и оцифрованный сигнал далее передаётся на компьютер. На компьютере осуществляется оценка амплитуды напряжения сигнала по методу наименьших квадратов. Таким же образом измеряется и значение амплитуды тока возбуждения излучателя. Измеренные значения импедансов в каждом цикле используются далее для вычисления чувствительности калибруемого гидрофона на частоте излученного тонального импульса.

Результаты работ по совершенствованию установки Э-5 в 2017 году. Перечислим в заключение доклада основные результаты модернизации высокочастотной эталонной установки, достигнутые в 2017 году: предложены конструкторские решения при проектировании узлов эталонной установки, улучшающие её функциональные и метрологические возможности в диапазоне частот до 3 МГц; разработана конструкторская документация, на основе которой изготовлены макеты таких частей установки как, устройство координатно-поворотное, устройство визуального контроля, входное и коммутационное устройства.

В 2018-2019 годах планируется: доукомплектование установки новым современным оборудованием, отвечающим требованиям технического задания опытно-конструкторской работы по совершенствованию эталона; изготовление опытного образца эталонной установки Э-5 с последующими испытаниями установки на соответствие заданным метрологическим характеристикам.

Литература

1. Лихачёв С.М., Голенков А.Н. Совершенствование эталона единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. 2006. №12. С.49-53.
2. Исаев А.Е., Некрич С.Ф., Некрич Г.С., Сильвестров С.В., Черников И.В., Щелкунов А.И. Совершенствование эталона единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. 2010. №5. С.5-8.
3. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Некрич С.Ф., Сильвестров С.В., Черников И.В., Щелкунов А.И., Щербюк Н.Г. Государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. 2013. №7. С.3-6.
4. Исаев А.Е., Сильвестров С.В. Результаты участия ВНИИФТРИ в первых международных ключевых сличениях эталонов в области гидроакустических измерений // Измерительная техника. 2006. №3. С.65-69.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГИДРОФОНОВ ПО СВОБОДНОМУ ПОЛЮ В УСЛОВИЯХ НЕЗАГЛУШЕННОГО БАССЕЙНА

Н.Г.Щерблюк, канд.физ-мат.наук
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

APPLICATION OF DIGITAL FILTRATION FOR FREE-FIELD HYDROPHONE CALIBRATION IN ANECHOIC WATER TANK

N.G.Shcherblyuk, Ph.D.
FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

Предложен способ обработки измеренной чувствительности гидрофона в условиях незаглушенного бассейна и излучении длительного широкополосного сигнала с целью получения чувствительности гидрофона по свободному полю. Способ основан на построении цифрового фильтра, подавляющего в частотной области влияние отражений границ бассейна. Описана процедура построения фильтра и приведены экспериментальные результаты его применения.

In this work we propose the method of treatment of measuring hydrophone sensitivity under condition of anechoic water tank and radiation of long-time wideband signal. This method allows to obtain free-filed hydrophone sensitivity. The method is based on the construction of digital filter suppressing the influence of water tank borders reflections in frequency domain. The description of filter construction procedure is given and experimental results of its application are provided.

При калибровке гидрофонов методом взаимности одной из главных проблем является создание условий свободного поля в гидроакустическом бассейне. Как известно [1], свободное поле представляет собой акустические волны, распространяющиеся в однородной водной среде без границ. В условиях гидроакустического бассейна с не заглушающим покрытием принимаемые калибруемым гидрофоном сигналы будут искажаться отражениями от поверхности воды и стен бассейна. На сегодняшний день при измерениях зависимости чувствительности гидрофона от частоты (частотной характеристики или ЧХ) по свободному полю широко используется так называемый тонально-импульсный метод [2]. Этот метод зарекомендовал себя как простой и точный способ определения передаточных импедансов $Z_{\text{св}}$ по свободному полю и был многократно проверен на международных сличениях. Однако он имеет ряд ограничений. Во-первых, в таком подходе минимальная частота, на которой происходит измерение ЧХ гидрофона, обратно пропорциональна размеру бассейна. Например, для эталонной установки из состава ГЭТ 55-2017, воспроизводящей единицу давления методом взаимности в гидроакустическом бассейне размерами 6×6×10 м, такой минимальной частотой является 1 кГц. Это условие ограничивает диапазон калибровок гидрофона снизу. Кроме того, поскольку измерения частотной характеристики выполняются на дискретном ряде частот, построение подробных изрезанных характеристик сопряжено с большими трудозатратами.

Развитие цифровой аппаратуры даёт возможность применять для калибровки гидрофонов широкополосные сигналы, такие как линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) или шумовой сигналы. Использование ЛЧМ сигнала позволяет измерять сильно изрезанные ЧХ гидрофонов с шагом по частоте до десятой герца. Однако нужно понимать, что измерение на непрерывных сигналах осложняется необходимостью очищать измеренную характеристику от влияния реверберации бассейна. Рассмотрению этого вопроса посвящён данный доклад.

Применение цифровой фильтрации для подавления реверберации. Измерения ЧХ чувствительности гидрофона в бассейне, например, методом взаимности, основано на измерении нескольких передаточных импедансов (ПИ) пар излучатель–приёмник. Поэтому далее будем рассматривать комплексную частотную характеристику ПИ пары излучатель-приёмник при излучении длительного ЛЧМ сигнала в незаглушенном бассейне. Отражения в системе бассейн–гидрофоны можно моделировать присутствием в воде помимо пары излучатель-приёмник дополнительных точечных источников излучения. Сигналы от этих источников являются копиями исходного сигнала, но поступают на приёмник с разными задержками, амплитудами и фазой. Тогда можно показать, что влияние отражений на ПИ пары гидрофонов проявляется в виде наложения на действительную и мнимую части ЧХ суммы гармонических осцилляций. Поэтому вполне естественно исследовать комплексный передаточный импеданс $\dot{Z}_{\text{рев}}$, измеренный в реверберационном поле, т. е. при наличии отражений, с помощью Фурье анализа. При этом Фурье образом ЧХ ПИ является так называемый *кепстр*, а сам анализ получил название *кепстральный* [3].

В данной работе предлагается использовать общие методы построения импульсной характеристики (ИХ) цифрового фильтра по известному Фурье-образу этой характеристике. При фильтрации временных сигналов цифровой фильтр (в данной работе будем рассматривать аналог фильтра нижних частот) определяется такими параметрами [4], как: частота среза, ширина полосы перехода, порядок фильтра, а также отклонения в полосе подавления и пропускания. С учётом того, что аналогом временной области в кепстральном анализе является частотная область, а аналогом спектральной области – соответственно кепстральная область (т.е. область задержек τ), изменим вполне естественным образом терминологию и обозначения для цифрового фильтра. Например, частотную характеристику фильтра будем называть *кепстральной* характеристикой (КХ) $\dot{H}(\tau)$, частоту среза – *задержкой среза* τ_c и т.д. Теперь введём непрерывную ИХ $h_{\text{непр}}(f)$ фильтра с заданной КХ $\dot{H}(\tau)$. Если выполнить свёртку $h_{\text{непр}}(f)$ с ПИ $\dot{Z}_{\text{рев}}(f)$, измеренным в реверберационном поле, то проявляется её фильтрующее свойство, т. е. мы получаем ПИ по свободному полю

$$\dot{Z}_{\text{св}}(f) = \int_{-\Delta f/2}^{\Delta f/2} h_{\text{непр}}(f')\,\dot{Z}_{\text{рев}}(f-f')\mathrm{d}f', \tag{1}$$

где Δf – полоса усреднения и предполагается, что $h_{\text{непр}}(f)$ действительная функция, а $\dot{Z}_{\text{рев}}(f) = \dot{Z}_{\text{рев}}(-f)^*$.

Для построения ИХ фильтра $h_{\text{непр}}(f)$ рассмотрим в области задержек комплексную КХ $\dot{H}(\tau)$ с модулем $H(\tau)$ в виде прямоугольного окна высотой 1, центром в $\tau = 0$ и полушириной $\tau_c < \tau_1$, где τ_1 это задержка прихода первого отражения относительно момента прихода прямого сигнала. Пусть также $\dot{H}(\tau)$ имеет линейную антисимметричную фазовую характеристику $\Phi(\tau) = -M\tau/\tau_d$, где M – натуральное число, а $\tau_d = f_d/s$ – временной аналог частоты дискретизации в спектральном анализе, при этом f_d это частота дискретизации, с которой оцифровывается ЛЧМ сигнал, а s – скорость его развертки. Характеристика $\dot{H}(\tau)$ является периодической функцией с периодом τ_d. Поэтому её можно разложить в ряд Фурье:

$$\dot{H}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)\exp(-2\pi jk\tau/\tau_d), \tag{2}$$

где коэффициенты $h(k)$ образуют дискретную ИХ [4]. Дискретная ИХ связана с непрерывной ИХ как: $h(k) = h_{\text{непр}}(k/\tau_d)$. Её коэффициенты находятся по формуле:

$$h(k) = \frac{1}{\tau_d}\int_{-\tau_d/2}^{\tau_d/2} H(\tau)\exp(2\pi j\Phi(\tau) + 2\pi jk\tau/\tau_d)\,\mathrm{d}\tau.$$

Вычисление интеграла, учитывая, что $H(\tau) = 0$ при $|\tau| > \tau_c$, даёт:

$$h(k) = \frac{1}{\pi(k-M)}\sin\left(\frac{2\pi\tau_c}{\tau_d}(k-M)\right) \equiv \frac{2\tau_c}{\tau_d}\operatorname{sinc}\left(\frac{2\tau_c}{\tau_d}(k-M)\right). \tag{3}$$

Таким образом, ИХ $h(k)$ имеет вид sinc-функции $\operatorname{sinc}(k) = \frac{\sin(\pi k)}{\pi k}$, поэтому фильтр такого вида в теории обработки сигналов называют *sinc-фильтром*. Как видно из формулы (3), дискретная ИХ определена для всех $k \in (-\infty, +\infty)$, и для компьютерной обработки необходимо сузить область её определения до отрезка, т.е. взять конечное число отсчётов. Можно показать [5], что $h(k)$ с конечным числом отсчётов на отрезке $k = [0, N_\Phi]$ и с КХ $\dot{H}(\tau)$, имеющей линейную фазу $\Phi(\tau) = -M\tau/\tau_d$, будет удовлетворять (2), если она удовлетворяет условию симметричности $h(k) = h(N_\Phi - k)$, а кроме того $M = N_\Phi/2$. Число N_Φ называется *порядком фильтра*.

Простое отбрасывание коэффициентов вне отрезка $[0, N_\Phi]$ эквивалентно умножению $h(k)$ на прямоугольное окно $\Pi(k)$ длиной N_Φ и центром, совпадающим с центром симметрии $h(k)$: $h_\Pi(k) = h(k)\Pi(k)$. Построенная по этой $h_\Pi(k)$ амплитудно-кепстральная характеристика $H_\Pi(\tau)$ будет искаженна пульсациями, называемыми явлением Гиббса. Поэтому обычно $h(k)$ умножают на специально подобранную сглаживающую оконную функцию $w(k)$, чтобы получить ИХ с быстро спадающими до нуля концами в окрестности границ отрезка $[0, N_\Phi]$. Применение оконной функции $w(k)$ подавляет осцилляции на КХ, однако увеличивает ширину полосы перехода фильтра $\delta\tau$ в окрестности точек $\pm\tau_c$. Ширину полосы перехода $\delta\tau$ можно оценить по формуле $\delta\tau = \alpha\tau_d/N_\Phi$ [4], где число α зависит от выбранного окна и находится в пределах от 1 до 6. N_Φ определяет полосу усреднения фильтра $\Delta f_\Phi \equiv N_\Phi \mathrm{d}f = \alpha/\delta\tau$. Как видно, эта величина зависит от выбранного сглаживающего окна и ширины полосы перехода $\delta\tau$. Кроме того, ширина главного лепестка sinc-функции определяется величиной обратной к ширине кеп-

стрального окна $1/(2\tau_c)$ Таким образом, усечённую характеристику $h_w(k)$ определим как $h_w(k) = h(k)w(k)$. В итоге комплексную ЧХ ПИ по свободному полю можно вычислить из дискретного варианта формулы (1)

$$\dot{Z}_{\text{св}}(i) = \sum_{k=0}^{N_\phi} h_w(k)\,\dot{Z}_{\text{рев}}\left(i - k + N_\phi/2\right),\ \ \dot{Z}_{\text{св}}(i) = \dot{Z}_{\text{св}}(f)\big|_{f=i/\tau_d},\ 0 \le i \le N.$$

Здесь используется тот факт, что $\dot{Z}_{\text{рев}}(i) = \dot{Z}_{\text{рев}}(-i)^*, i < 0$ и $\dot{Z}_{\text{рев}}(i) = \dot{Z}_{\text{рев}}(N-i)^*, i > N$, где N – число точек в цифровом массиве $\dot{Z}_{\text{рев}}(i)$.

К достоинству фильтра можно отнести широкие возможности «настройки» фильтра в зависимости от поставленной задачи. Например, если речь идёт об оценке влияния на ЧХ чувствительности приёмника отражений от близко расположенной к нему аппаратуры или обтекателя, то фильтр позволяет не только очистить $\dot{Z}_{\text{рев}}(f)$ от паразитных отражений границ бассейна, но и учесть вклад в измеряемую чувствительность исследуемых отражений. Однако за узкую полосу перехода $\delta\tau$ приходится платить высоким порядком фильтра.

Экспериментальная проверка и выводы. Экспериментальная проверка предложенного метода подавления отражений проводилась на высокочастотной (от 0,16 до 1 МГц) установке, входящей в состав Государственного первичного эталона единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 [6, 7]. Для этого методом взаимности была измерена частотная зависимость чувствительности гидрофона Reson TC4035 при излучении ЛЧМ сигнала. ЛЧМ сигнал имел следующие характеристики: полоса $\Delta F = 1$ МГц, начальная частота $f_0 = 10$ Гц, длительность $\Delta T = 5$ мс, частота дискретизации $f_d = 20$ МГц. Измеренные в реверберационном поле ПИ пар излучатель-приёмник очищались от отражений sinc-фильтром с усечённой ИХ $h_w(k)$, где в качестве окна было выбрано окно Блэкмена $w(k)$ вида:

$$w(k) = 0{,}42 + 0{,}5\cos\left(\pi\frac{2k-N_\phi}{N_\phi}\right) + 0{,}08\cos\left(2\pi\frac{2k-N_\phi}{N_\phi}\right).$$

Для этого окна параметр α, связывающий ширину полосы перехода и порядок фильтра, равен 5,5. Характеристики ЛЧМ сигнала определили величину $\tau_d = 0{,}1$ с. Ширина полосы перехода sinc-фильтра $\delta\tau$ была выбрана равной 70 мкс, что дало порядок фильтра $N_\phi = 1571$ отсчёт и полосу усреднения $\Delta f = \alpha/\delta\tau = 15710$ Гц. Полученный в результате обработки sinc-фильтром модуль частотной характеристики чувствительности в диапазоне частот от 40 до 920 кГц приведён на рис. 1 (непрерывная линия).

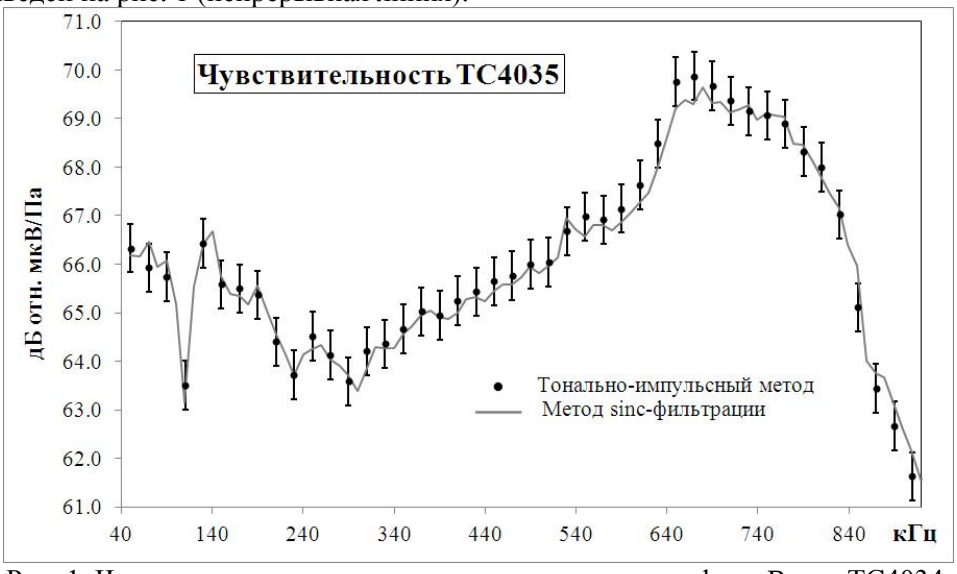


Рис. 1. Частотная зависимость чувствительности гидрофона Reson TC4034, измеренная тонально-импульсным методом и методом sinc-фильтрации.

Для этого же гидрофона чувствительность была измерена методом взаимности на тональных импульсах с применением временной селекции сигналов. ЧХ чувствительности измерялась в диапазоне частот от 50 до 910 кГц с шагом в 20 кГц. Погрешность измерений на эталонной установке составляет 0,5 дБ. Результат изображён на рис. 1 (точками). Из графика видно, что в области от 140 до 600 кГц отклонение результатов измерений ЧХ гидрофона на основе sinc-фильтрации от результатов, полученных тонально-импульсным методом, не превышает 0,1-

0,4 дБ. А на всём частотном диапазоне сравнения (от 50 до 910 кГц) отклонение не превышает 0,5 дБ, за исключением двух точек 650 и 670 кГц в резонансной области ЧХ, где отклонение составило 0,6 дБ.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

— построена импульсная характеристика sinc-фильтра, подавляющего влияние реверберации бассейна на частотную зависимость чувствительности гидрофона;

— экспериментальная проверка показала хорошее соответствие метода sinc-фильтрации с тонально-импульсным способом обеспечения реализаций условий свободного поля.

Литература

1. Боббер. Р.Дж. Гидроакустические измерения/ Пер. с англ. под ред. А.Н. Голенкова. М.: Мир, 1974.
2. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008.
3. Randall R. B. Frequency analysis. Bruel & Kjaer, 1987.
4. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. М.: Вильямс, 2004.
5. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М: Мир, 1978.
6. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Некрич С.Ф., Сильвестров С.В., Черников И.В., Щелкунов А.И., Щерблюк Н.Г. Государственный первичный специальный эталон звукового давления в водной среде // Измерительная техника. 2013. №7. С.3-6.
7. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Некрич Г. С., Некрич С. Ф., Сильвестров С. В. Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 // Измерительная техника. 2017. №8. С.3-5.

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИКМОРСКОЙ ВОДЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ АНТЕНН

Г.Н.Кузнецов, канд.физ-мат.наук
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

METHODS AND TECHNICAL MEANS FOR ESTIMATION OF SEA WATER CHARACTERISTICS AND ANTENNA SPATIAL ORIENTATION

G.N.Kuznetsov, Ph.D.
A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

Приведены техническое описание и результаты натурного исследования технологии одновременных измерений скорости звука и температуры воды, а также глубины, истинного пеленга и ориентации векторно-скалярной антенны в трехмерном пространстве. Испытания проведены в режиме буксировки малогабаритного многофункционального комплекса, включающего гидрофизический блок, блоки ориентации и пеленгования.

Technical description and results of field studies of methods for simultaneous measurements of sound velocity and water temperature, as well as depth, true bearing and orientation of a vector-scalar antenna in three-dimensional space are given. The tests were carried out in a towing mode using a compact multifunctional complex, including a hydrophysical block, orientation blocks and direction finding equipment.

Для прогноза лучевой или модовой структуры г/а поля в волноводе необходима информация о вертикальном распределении профиля скорости звука (периодически) и данные о величине скорости звука на горизонте расположения антенны (непрерывно). Оценку скорости звука (СЗ) можно получить путем прямых измерений или ее вычислить по результатам измерения температуры воды, статического давления и солености.

При формировании характеристик направленности гидроакустических приемных или излучающих антенн и определении направления на источники шума или отражатели для устранения смещений оценки пеленга и угла места необходимо, чтобы контролировалась пространственная ориентация антенны относительно осей заданной системы координат. Особенно это важно для векторно-скалярных антенн (ВСА) или даже одиночных векторно-скалярных модулей (ВСМ), поскольку даже одиночные ВСМ могут с высокой точностью определять как пеленг на источник, так и угол места.

В связи с несовпадением координат географического и магнитного полюсов для получения несмещенной оценки акустического пеленга на источник необходимы непрерывные или периодические измерения истинного пеленга относительно магнитного меридиана. В этом случае учитывается магнитное «склонение» силовых линий, а также магнитное «уклонение», учитывающие локальные изменения магнитного поля Земли.

Ниже приводятся результаты лабораторных испытаний и натурных экспериментов с малогабаритным многофункциональным комплексом (МФК), включающим гидрофизический блок (ГФБ), блок трехмерной пространственной ориентации (БО) и блок оценки пеленга (БОП).

Описание рабочих режимов. На рис. 1 представлена обобщенная блок-схема измерительного МФК с ГФБ, выполняющим измерения скорости звука и температуры воды, а также глубины буксировки, с БО и БОП. На рис. 2 и 3 представлены фотографии двух проекций вычислительной платы с датчиками ГФБ, БО и БОП – со стороны водопогруженных измерительных датчиков и со стороны аппаратурного аналого-цифрового блока.

Измеритель СЗ построен по схеме «измерительного кольца», т.е. измерение СЗ осуществляется «времяпролетным» методом на мерной термостабильной базе в непрерывном замкнутом цикле. Измерения температуры и статического давления (глубины) выполняются по мостовой схеме термистором и датчиком давления фирмы Honeywell. Измерители ориентации и направления изготовлены на микросхемах фирмы STMicroelectronics.

Для измерения трехмерной ориентации используются данные о трех координатах наклона акселерометра X_a, Y_a, Z_a, трех координатах магнитометра X_m, Y_m, Z_m и трех координатах гироскопа X_g, Y_g, Z_g, которые поступают в контроллер, где формируется объединенный пакет цифровых потоков: с результатами измерения скорости звука, температуры, статического давления, крена (в плоскости оси Y), дифферента (в плоскости оси X, проходящей через ось симметрии) и курса (в плоскости ортогональной оси Z), а также вектора истинного пеленга.

Наличие в данном устройстве акселерометра, магнитометра и гироскопа позволяет решать широкий круг задач, в том числе при нестационарном движении. Для определения ориентации платформы, медленно изменяющей свое положение в пространстве, достаточно только магни-

тометра и акселерометра. Трехкомпонентный акселерометр, измеряющий проекции ускорения на чувствительную ось, используется в устройстве для периодической корректировки значений вычисленных углов. Гироскоп применяется для оценки динамических характеристик приемной системы при нестационарном движении антенны.

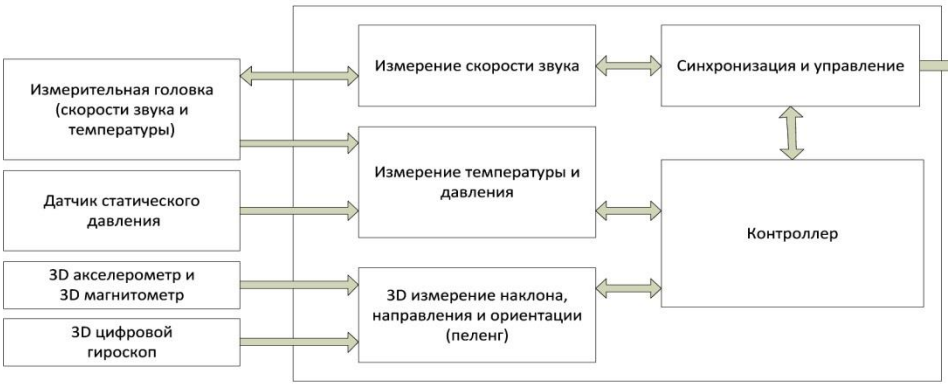


Рис. 1. Блок-схема многофункционального комплекса с ГФБ, БО и БОП.

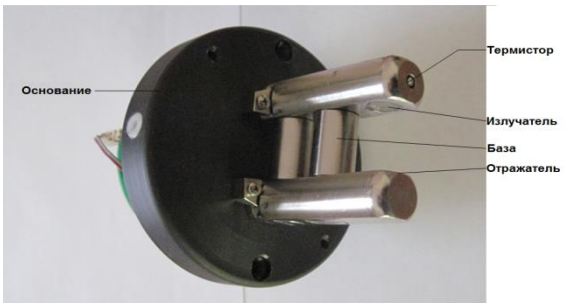


Рис. 2. Фотография измерительных блоков – вид со стороны датчиков глубины, температуры и скорости звука в воде.

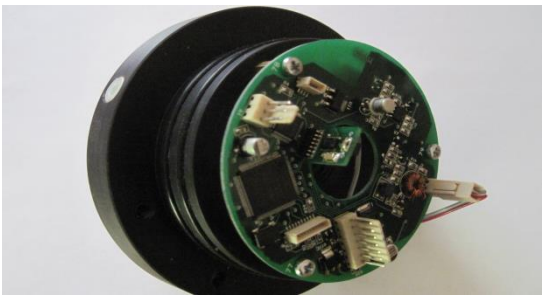


Рис. 3. Фотография измерительных блоков – вид со стороны аналого-цифрового модуля с БО и БОП.

Результаты аттестации измерительных каналов МФК в лабораторных условиях. Перед проведением натурных испытаний все блоки прошли лабораторные испытания и калибровку на специализированных стендах. Показания датчика глубины ГФБ при различных статических давлениях градуировались по результатам одновременных измерений статического давления прецизионным манометром. Показания датчика температуры сверялись с показаниями ртутного термометра при изменении температуры воды в пределах от 4° до 40°. Измеритель СЗ градуировался при нормальных условиях путем сравнения результатов измерения температуры в дистиллированной воде и измерения времени пролета импульсов на мерной акустической базе. Измеренные значения температуры пересчитывались в значения СЗ по таблицам ГСССД-190-2000. Датчики крена, дифферента и ориентации в горизонтальной плоскости градуировались с использованием специально разработанных стендов.

В результате лабораторных испытаний МФК получены следующие данные.

1. Канал измерителя СЗ в морской воде может работать при вариации измеряемой величины в пределах 1400–1600 м/с. Чувствительность измерительного канала не менее $3\cdot10^{-3}$ м/с. Среднеквадратическая погрешность измерений не более 0.5 м/с. Быстродействие – количество измерений в секунду – не менее 10.

2. Канал измерения температуры воды позволяет выполнять измерения в диапазоне от 4 до 40°С. Чувствительность датчиков температуры не менее $5\cdot10^{-2}$°С. Погрешность измерений не более 0.5°С. Интервал между измерениями не более 5–8 с. Погрешность измерения температуры может привести к погрешности расчета скорости звука не более 1 м/с.

3. Канал измерения статического давления работает при 0–5 мРа (0–500 м). Погрешность не более 1%. Количество измерений в секунду – не менее 30. Канал оценки ориентации МФК и, соответственно ВСА, в которую МФК встроен, в выбранной прямоугольной системе координат с осями *X, Y, Z* – позволяет выполнять измерения в трех плоскостях при углах от 0 до 360°. Погрешность единичных измерений крена и дифферента не более 2°.

4. Канал оценки истинного пеленга в пространстве относительно магнитного меридиана работает в пределах углов от 0 до 360°. Погрешность единичных измерений до 1.5°. Частость –

не менее 30 измерений в секунду. В стационарном режиме движения после накопления оценок случайные погрешности измерения крена, дифферента и пеленга уменьшаются.

5. Дальность передачи результатов измерений в цифровом виде по оптоволоконному кабелю – не менее 1000 м. Габаритные размеры комплекса в данной модификации вместе с датчиками и герметичным корпусом: длина 0.18 м, диаметр 0.11 м. Вес с полным комплектом датчиков и аналого-цифровым блоком (но без корпуса) – не более 1.2 кг.

Результаты исследований МФК в условиях Ладожского озера. МФК встраивался в ВСА и испытывался в буксируемом режиме (рис. 4). Датчики МФК размещались в концевой части ВСА. Электронные блоки усиления, цифрового и оптоэлектронного преобразования сигналов, располагаются внутри герметичных контейнеров, расположенных в носовом отсеке. Датчики глубины, скорости звука и температуры расположены в воде под негерметичным кожухом. Передача принятых сигналов на борт носителя производится по оптоволоконному кабель-тросу.

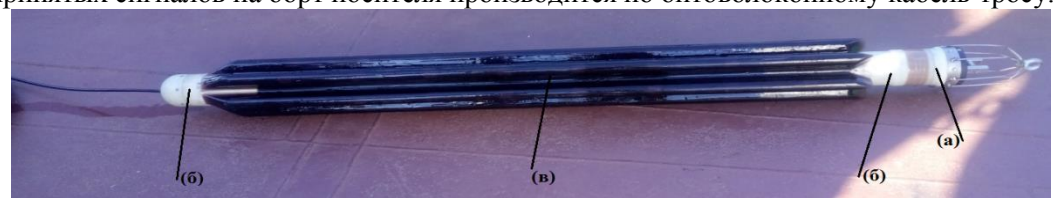


Рис. 4. Буксируемая цельнозалитая 96-канальная ВСА с размещенными в кормовой зоне ГФБ, БО и БОП (а, б, в – зоны датчиков, электроники и ВСА).

Запись сигналов производилась при прямолинейной буксировке, при развороте, а также при торможении и ускорении. Координаты и курс судна контролировались с помощью размещенного на борту приемника GPS – они принимались за истинные значения. Буксировка осуществлялась при скоростях от 3 до 8 узлов. Глубины акватории в зоне буксировки 20 м. Буксировка выполнялась при длине кабель-троса за бортом 50 м без утяжелителя и 85 м с распределенными вдоль кабель-троса утяжелителями.

На рис. 5 представлены при различных режимах движения судна-буксировщика временные зависимости курса, крена и дифферента, глубины погружения, а также скорости звука и температуры в воде. Из рисунка следует, что при прямолинейном движении ВСА с встроенной МФК оценки курса по датчикам БО и БОП с высокой точностью совпадают с курсом судна, рассчитанным по данным GPS. В этом режиме наблюдается стабильное положение ВСА по крену и дифференту: флуктуации по крену не более 4–5°, по дифференту – не превышают 3–4°, что позволяет производить эффективную обработку звуковых сигналов, принятых направленными векторно-скалярными датчиками. Глубина, измеренная датчиком статического давления, при постоянной скорости буксира и прямолинейном движении постоянна. При замедлении/ускорении или развороте судна глубина существенно изменяется. Но в процессе всех испытаний глубина кормовой части антенны немного больше носовой, то есть наблюдается дифферент «на корму». Этот результат очевиден, так как ВСМ тяжелее вытесненной воды и при буксировке «оседает». При поворотах судна уменьшалось натяжение кабель-троса и глубина ВСА с МФК увеличивалась. Одновременно наблюдались максимальные изменения углов крена и дифферента. На участке с прямолинейным движением (11:18–11:23 ч/мин) скорость буксировки, глубина и ориентация антенны по курсу, крену и дифференту остается практически неизменной. При разворотах носителя также наблюдается систематическое отставание на 25–30 с курса ВСМ, измеренного по датчикам БО и БОП, от курса буксира по приемнику GPS. Это объясняется тем, что из-за инерционности кабель-трос и изделие только спустя 30–40 с после поворота судна принимают стабильное и согласованное с движением судна направление буксировки.

На рис. 6 видно, что температура воды и СЗ синхронно изменяются при переходе буксировщика из одной водной зоны в другую. Измеренные значения СЗ при проходе различных зон изменялись от 1455.4 до 1456.6 м/с (среднее значение 1456.1 м/с). Если по таблицам стандартных справочных данных (ГСССД-190-2000) рассчитать температуру воды, то получим вариацию в пределах от 12.1 до 12.6°С. Реально измеренные величины температуры вдоль этой же трассы буксировки – от 11.80 до 12.0°С. Среднее значение температуры воды составило 11.9°С, что соответствует среднему значению СЗ 1454.7 м/с.

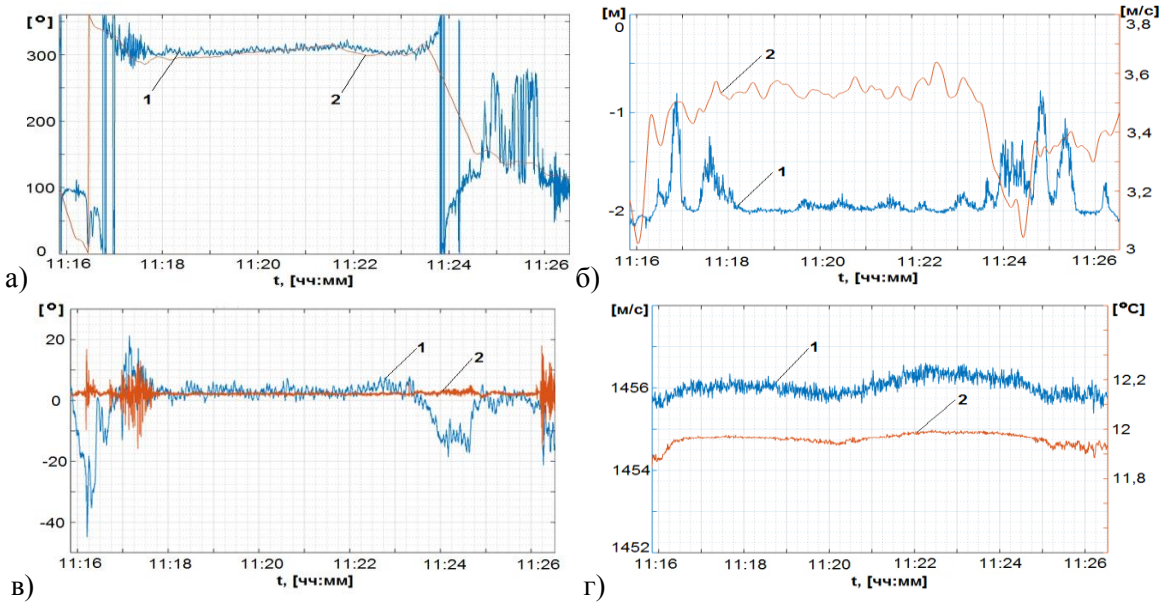


Рис. 5. Зависимости от времени величин, характеризующих качество буксировки: (а) углов курса по данным БО и БОП (*1*) и по показаниям приемника GPS (*2*); (б) глубины погружения ВСМ (*1*) и скорости судна-буксировщика по данным GPS (*2*); (в) углов крена (*1*) и дифферента (*2*); (г) скорости звука (*1*) и температуры водной среды (*2*).

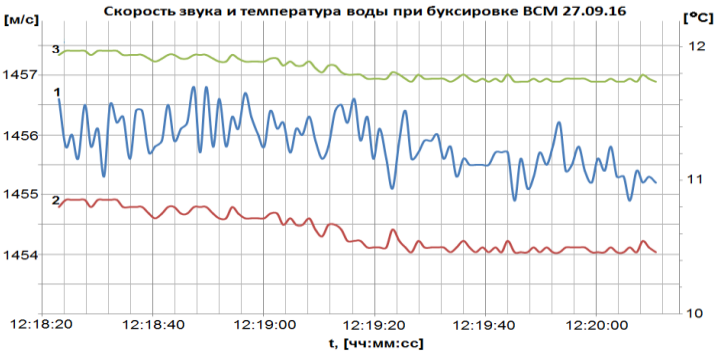


Рис. 6. Зависимость от времени (района измерений) значений скорости звука и температуры воды, зарегистрированных при буксировке МФК: (*1*) скорость звука в результате прямых измерений; (*2*) скорость звука, вычисленная по данным измерения температуры; (*3*) температура воды в результате прямых измерений.

В среднем СЗ по данным прямых измерений датчиком ГФБ стабильно выше на 1.4–1.5 м/с табличной СЗ, рассчитанной по показаниям датчика температуры и таблицам ГСССД. Это различие превышает погрешность измерений и потому должно признаваться значимым. Наиболее вероятная причина смещения непосредственно измеренных значений СЗ по сравнению с рассчитанными по данным измерения температуры (на 1.4–1.5 м/с) – влияние дисперсной фазы воздухосодержания в воде. Можно предположить, что с увеличением глубины буксировки различие оценок скорости двумя методами будет уменьшаться.

Разработанный МФК может использоваться в качестве самостоятельного измерительного устройства – как CTD-зонд, или встраиваться в антенны корабельных, автономных или стационарных систем, предназначенных для подводного наблюдения или сбора гидролого-акустической информации о среде.

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Ф.Ф.Легуша, д-р физ-мат.наук, С.И.Пугачёв[1], д-р техн.наук, К.В.Разрезова, канд.физ-мат.наук, И.М.Старобинец[2]
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия
[1]АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия
[2]АО «Водтрасприбор», Санкт-Петербург, Россия

THERMOACOUSTIC EFFECT IN THE LIQUID MEDIUM

F.F.Legusha, Dr.Sc., S.I.Pugachev[1], Dr.Sc., K.V.Razrezova, Ph.D., I.M.Starobinec[2]
Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia
[1]JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia
[2]JSC «Vodtranspribor», St. Petersburg, Russia

Обычно термоакустический эффект наблюдается в газах. На основе этого эффекта созданы и используются в научных исследованиях широкополосные нерезонансные источники звука – термофоны. В данной работе исследуется возможность создания плёночных термофонов, излучающих звуковые волны в жидкую среду. Показано, что возбуждение звуковых волн возможно только в случае, когда используются диэлектрические жидкости.

Usually, thermoacoustic effect is observed in gases. Based on this effect broadband non-resonant sound sources – thermophones have been developed and used in scientific research. In this paper, we investigate the possibility of creating film thermophones emitting sound waves into a liquid medium. It is shown that excitation of sound waves is possible only when dielectric liquids are used.

Появление плёночных термофонов позволило по-новому взглянуть на термоакустический эффект и его применения в науке и технике. Результаты первых экспериментальных исследований плёночных термофонов можно найти, например, в литературе [1, 2, 3]. Согласно этим исследованиям термофоны являются широкополосными нерезонансными источниками звука, работающими в диапазоне частот от 1,0 до 150 кГц. При непрерывном возбуждении уровни генерируемого термофонами звука могут достигать 100 дБ. Измерения уровней звука производились на центральных осях термофонов на расстояниях 35…50 мм от излучающей поверхности. Большинство испытаний термофонов проводилось в воздухе. Однако имеются работы [4, 5], в которых исследовались процессы излучения термоакустических источников в воду и в другие жидкости.

Теоретические и экспериментальные исследования плёночных термофонов проводятся в последнее время на кафедре физики СПбГМТУ [6-9]. В ходе работ была разработана конструкция плёночного термофона, а также изготовлены образцы, акустические и тепловые характеристики которых были исследованы. Отметим, что результаты акустических измерений достаточно хорошо совпадают с данными, полученными расчётным путём с применением методик, разработанных на кафедре.

Устройство термофона. Структурная схема плёночного термофона представлена на рис. 1. Активный элемент (АЭ) термофона – 1 нанесён на верхнюю поверхность подложки – 2, которая в свою очередь закреплена на верхней поверхности несущей пластины – 3.

Для повышения акустической эффективности термофона между его АЭ и поверхностью механической основы вводят теплоизоляционный слой – подложку (см. рис. 1). При изготовлении подложек чаще всего используют пористый кремний или пористые полимеры. Недостаток пористых подложек в том, что теплофизические параметры вещества различных подложек, изготовленных из одного и того же материала, могут сильно отличаться. На современном этапе развития термофонов было решено отказаться от подложек и АЭ формировать непосредственно на поверхности несущей пластины [6-9].

Несущая пластина термофона обеспечивает ему необходимую механическую прочность. Площадь несущей поверхности пластины делают достаточной для формирования на ней излучающей поверхности термофона.

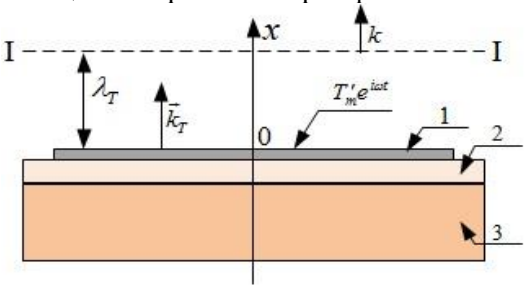


Рис. 1. Структурная схема плёночного термофона: 1 – АЭ; 2 – подложка; 3 – несущая пластина; $\vec{k}_T$ – неоднородная тепловая волна; λ_T – длина тепловой волны; $\vec{k}$ – звуковая волна, излучаемая термофоном; I-I – поверхность излучения звука; T'_m – амплитуда переменной температуры поверхности АЭ.

Излучение звука термофоном. Для проведения экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены плёночные термофоны, АЭ которых имели отличающуюся форму. Вид сверху термофонов показан на рис. 2. АЭ термофонов изготавливался методом вакуумного напыления титана непосредственно на поверхности несущих пластин.

Рис. 2. Изображения плёночных термофонов.

Для обеспечения излучения звука использовался непрерывный режим возбуждения плёночных термофонов, при котором через АЭ пропускался только переменный ток с частотой f и, как следствие этого, на поверхности АЭ возникает переменная температура $T'_m(f)$, которая изменяется с частотой $f = 2f_0$. Следствием появления $T'_m(f)$ является возникновение в верхнем полупространстве неоднородной тепловой волны

$$T' = T'_m \cdot \exp i\left(x/\delta' - \omega t\right), \tag{1}$$

где $\delta' = \sqrt{2a/\omega}$ – толщина теплового пограничного слоя в веществе верхнего полупространства, $a = \chi/\rho C_p$ – коэффициент температуропроводности среды, χ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, C_p – удельная теплоёмкость вещества.

В соответствии с теорией термоакустического эффекта [10], распространение тепловой волны (1) приводит к генерации звуковой волны $\vec{k}$, нормальная составляющая колебательной скорости которой может быть рассчитана по формуле

$$U_{01} = 0,707\sqrt{\omega a}\beta_V T'_m, \tag{2}$$

где β_V – коэффициент теплового объёмного расширения среды.

Следует отметить, что амплитуда U_{01} постоянна по всей излучающей поверхности термофона (см. рис. 1). Следовательно, термофон является идеальным поршневым источником звука и для расчёта распределения звукового давления вдоль центральной оси термофона (0x, рис. 1) можно использовать известное выражение [11]

$$p_1(x) = 2U_{01}\rho_1 c_1\left|\sin\left(k\alpha_1/2\right)\right|, \tag{3}$$

где $\alpha_1 = \sqrt{\left(x-\lambda_T\right)^2 + r_0^2} - x$, r_0 – радиус эквивалентной излучающей поверхности, $\lambda_T = 2\pi\delta'$.

В формулу (2) входит амплитуда тепловой волны T'_m. В общем виде выражение для расчёта значений T'_m получено в статье [12]. Полагая, что имеет место низкочастотный режим возбуждения термофона, для оценки величины T'_m используем упрощённое выражение

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega}\left(K_{H1} + K_{H3}\right)}, \tag{4}$$

где $K_{H1} = \sqrt{\chi\rho C_p}$; $K_{H3} = \sqrt{\chi_3\rho_3 C_{p3}}$; χ_3, ρ_3, C_{p3} – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость вещества несущей пластины; $q_e = p_e/S$ – удельная пиковая мощность тепловыделения активного элемента; $p_e = R_e I_m^2$ – мощность, потребляемая термофоном; R_e – электрическое сопротивление АЭ; I_m – амплитуда переменного тока, S – площадь боковой поверхности АЭ.

Результаты расчётов и измерений. Выражения (2), (3) и (4) позволяют рассчитать основные параметры плёночных термофонов. В работах [6-9] экспериментально показано, что эти формулы в случаях, когда излучение звуковых волн термофонами происходит в воздух, дают достаточно хорошие результаты. Учитывая тот факт, что с точки зрения физики процессы рас-

пространения звуковых волны в газах и жидкостях не отличаются, целесообразно проверить формулы (2), (3) и (4) для случая излучения звука в жидкость.

При проведении расчётов полагаем, что излучение звука происходит в жидкий диэлектрик. Для предварительной оценки акустических параметров термофонов в качестве жидкости используем керосин. Физические параметры сред берём при статических значениях температуры T_0 = 293 К и давления P_0 = 1,0 атм. Источника звука – термофон, который в работе [7] использовался при экспериментальной проверке формул (2), (3) и (4) в случае излучения звука в воздух. Численные значения основных параметров термофона: r_0 = 20,0 мм; x_0 = 50,0 мм; R_e = 139 Ом; $S_e = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ м^2. Тепловые параметры сред, входящие в формулу (4): для гетинакса $K_{Н3}$ = 1600 Вт/(м^2·К·с^{0,5}); для воздуха $K_{Н1}$ = 5,5 Вт/(м^2·К·с^{0,5}); для керосина $K_{Н1}$ = 456 Вт/(м^2·К·с^{0,5}). Удельные акустические сопротивления сред $\rho_1 c_1$: воздух – 416 кг/(м^2·с); керосин $1{,}1 \cdot 10^6$ кг/(м^2·с).

Сопоставление АЧХ термофона, погружённого в керосин и воздух, соответственно показано на рис. 3. На этом рисунке представлены результаты экспериментальных исследований АЧХ термофона, излучающего звук в воздух, при пиковой мощности потребляемой АЭ термофона p_e = 3,1 Вт.

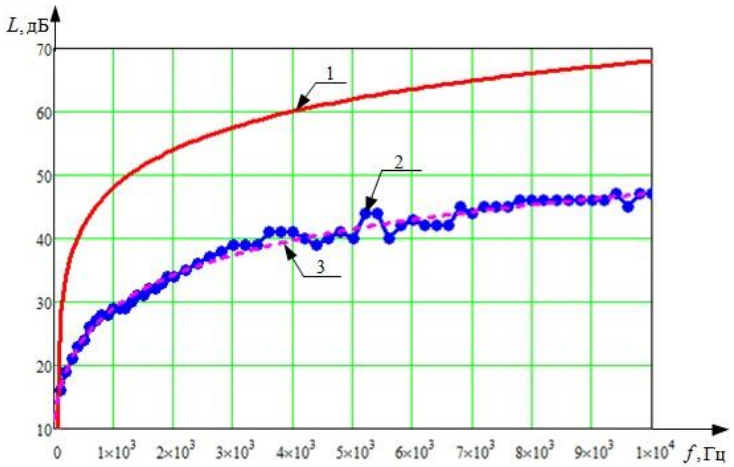


Рис. 3. Частотные зависимости уровня звукового давления: 1 – расчёт для керосина; 2 – экспериментальные данные центрального микрофона в воздухе; 3 – усреднённые значения эксперимента в воздухе.

Как нетрудно заметить из рис. 3, уровни звукового излучения монотонно возрастают. На частотах выше 10,0 кГц величина L становится постоянной [6-9]. Сопоставляя расчётную АЧХ – 1 термофона, излучающего звук в керосин, с экспериментальной АЧХ – 2, полученной в воздухе, можно сделать вывод, что акустическая эффективность термофона в керосине при прочих равных условиях на 18…20 дБ выше. На рис. 4 показаны зависимости амплитуды звукового давления p_{m1} на оси термофона от электрической мощности, подводимой к АЭ термофона на фиксированной частоте 8,5 кГц.

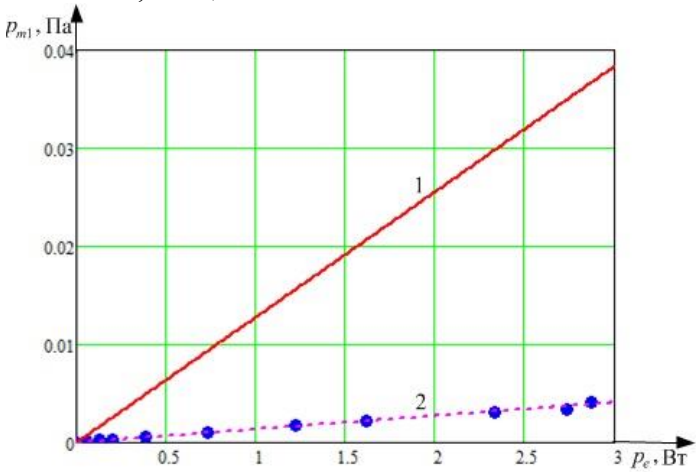


Рис. 4. Зависимость амплитуды звукового давления от мощности, потребляемой термофоном: 1 – керосин, 2 – воздух.

Из рис. 4 видно, что амплитуда звукового давления p_{m1} линейно растёт с увеличением потребляемой мощности. Акустическая эффективность термофона, излучающего звук в керосин (кривая – 1), заметно выше экспериментальных значений зависимости $p_{m1}(p_e)$, полученных в воздухе (кривая – 2).

В заключение отметим, что непосредственное излучение звука термофоном в воду невозможно из-за её повышенной электропроводности. Следовательно, для того, чтобы использовать термофоны при проведении гидроакустических измерений, необходимо разработать специальный излучатель. В этом излучателе плёночный термофон должен быть изолирован от проводящей жидкости за счёт иммерсионной жидкости. В природе существует множество жидкостей, являющихся электроизоляторами. Например, для этой цели могут быть использованы электроизоляционные жидкости 132-12Д и ПЭС-3Д, широко используемые при производстве электроакустических преобразователей.

Литература

1. Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. // Nature (London), Vol. 400, 1999. – P. 853-855.
2. Niskanen A. O., Hassel J., Tikander M., Maijala P., Gronberg L., Helisto P. Suspended Metal Wire Array as a Thermoacoustic Sound Source. // J. Appl. Phys. Lett. 95(16), 2009. – P. 163102.
3. Chitnis G., Kim A., Song S.H., Jessop A.M., Bolton J.S. A thermophone on porous polymeric substrate. Birck and NCN Publications, 2012. – p. 1160.
4. Aliev A.E., Lima M.D., Fang S., Baughman R.H. Underwater Sound Generation Using Carbon Nanotube Projectors. // Nano Lett., 10(7), 2010. – PP. 2374-2380.
5. Benjamin Dzikowicz, Jeffrey W. Baldwin, James F. Tressler. Thermophone projector using nanostructure materials. // JASA, 134(5), 2013. – P. 4091.
6. Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В. Широкополосные источники звука – термофоны. // СПб.: МИТ, № 3 (25), том 1, 2014. – С. 71-77.
7. Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В. Экспериментальные исследования современных термофонов. // СПб.: МИТ, № 4 (30), том 1, 2015. – С. 60-65.
8. Васильев Б.П., Легуша Ф.Ф., Разрезова К.В., Чижов Г.В. Экспериментальные исследования плёночных термофонов. // СПб.: МИТ, № 4 (34), том 1, 2016, С. 118-123.
9. Vasiliev B.P., Legusha F.F., Razrezova K.V., Chizhov G.V. Active elements of film sources of sound-thermophones. // 13th International Conference on Films and Coatings. J. Phys.: 2017. Conf. Ser. 857 012051.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986.
11. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд. МГУ, 1960. – С. 338.
12. Невеселова К.В. Расчёт амплитуды переменной температуры активного элемента термофона. // СПб.: МИТ, № 4 (26), том 1, 2014, С. 110-115.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПРИЕМНИКИ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННОГО И СИЛОВОГО ТИПОВ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

В.И.Коренбаум, д-р техн.наук, А.Е.Бородин, канд.техн.наук, А.А.Тагильцев, канд.техн.наук, С.В.Горовой, А.Е.Костив, канд.техн.наук, А.Д.Ширяев, канд.физ-мат.наук, В.М.Дорожко, канд.физ-мат.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

SMALL-SIZE PRESSURE GRADIENT RECEIVERS OF INERTIAL AND FORCE TYPES FOR LOW-FREQUENCY RANGE

V.I.Korenbaum, Dr.Sc., A.E.Borodin, Ph.D., A.A.Tagiltcev, Ph.D., S.V.Gorovoy, A.E.Kostiv, Ph.D., A.D.Shiryaev, Ph.D., V.M.Dorozhko, Ph.D.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Разработка приемников градиента давления (ПГД) для диапазона частот от единиц до сотен Герц сопряжена с рядом технических проблем. Разработаны макеты конструкций ПГД инерционного и силового типов, отличающиеся малыми габаритными размерами и высокой чувствительностью к полезному сигналу. Анализируются методы защиты ПГД от вибрационных помех. Предложен метод компенсационной виброзащиты ПГД силового типа.

The development of pressure gradient receivers (PGR) for the frequency range from the units of Hertz to hundreds Hertz is associated with a number of technical problems. The models of PGR structures of inertial and force types are developed, characterized by small overall dimensions and high sensitivity to the useful signal. The methods of protecting PGR from vibrations are analyzed. A method of compensatory vibroprotection of PGR of the force type is proposed.

Приемники градиента давления (ПГД) при использовании в точечных и линейных антенных системах перспективны для обеспечения пространственной избирательности, пеленгования и определения местоположения источников низкочастотных подводных шумов, и потому внимание к их разработке и методам применения с середины первого десятилетия XXI века вновь усилилось [1]. Новый всплеск интереса обусловлен не в последнюю очередь тем, что современный прогресс в технологиях пьезоматериалов и радиоэлектроники сделал возможным разработку ПГД для низкочастотного диапазона (первые сотни – единицы Гц). Особенности ПГД делают наиболее перспективным их применение в антеннах малогабаритных носителей, а общая тенденция к снижению шумности подводных объектов, кроме того, настоятельно требует, чтобы эти носители были мобильными или быстро разворачиваемыми.

Цель данной работы – анализ путей решения технических проблем, связанных с разработкой и применением низкочастотных ПГД на малогабаритных мобильных носителях.

Основными ограничениями для ПГД в этих приложениях выступают геометрические размеры, достаточная чувствительность (пороговая чувствительность) к звуковому давлению полезного сигнала и динамический диапазон, защищенность от вибраций и помех обтекания (ближнеполевых помех).

Известны четыре схемы построения ПГД: 2-х точечные, разностные, силовые и инерционные [2]. При этом качественные дипольные характеристики направленности (с высоким коэффициентом деления) при размерах, много меньших длины волны, реализуются только двумя последними.

ПГД инерционного типа. Эти ПГД выполняются в виде воспринимающего элемента (поплавка), внутри которого размещен датчик кинематических характеристик звуковой волны – в настоящее время чаще всего акселерометр. ПГД этого типа наиболее распространены в гидроакустике. К ним относятся отечественные ПГД КГП-1 (ФГУП ВНИИФТРИ), выпускаемые в США ПГД VS-101, VS-206, VS-301 (Wilcoxon Research Inc.) [3], последние варианты ПГД, применяемые в радио-гидроакустических буях AN/SQQ-53 [4].

При поперечном размере не более 100 мм эти ПГД реализуют качественную дипольную характеристику направленности в требуемом диапазоне частот и, в принципе, имеют достаточно высокую чувствительность к звуковому давлению в плоской волне. Правда, эта чувствительность часто (например, в отечественных приемниках КГП-1) определяется не собственной чувствительностью акселерометрического датчика, а высоким коэффициентом усиления предварительного усилителя, достигающим нескольких тысяч. Такое решение не кажется оптимальным для использования ПГД с мобильных носителей, поскольку высокий коэффициент усиления снижает динамический диапазон трактов этих ПГД до 60 дБ, тогда как при наличии мощных ближнеполевых помех необходим динамический диапазон 80 – 100 дБ. В приемниках фирмы Wilcoxon Research Inc. высокая чувствительность реализуется за счет использования нового однокристального пьезоэлектрического материала (relaxor) – Pb(Mb1/3Nb2/3)O3-PbBaTiO3, известного как PMN-PT кристаллы, который по заявлениям производителя обладает в 7-10 раз более высокими пьезоэлектрическими параметрами, чем обычный цирконат титанат свинца [5].

Для оценки возможностей построения ПГД инерционного типа на основе новых пьезоматериалов нами на основе современных сейсмических акселерометров разработана конструкция трехкомпонентного ПГД с внешними размерами 112 х Ø80 мм. Она состоит из корпуса, выполненного из сферопластика в виде трех цилиндрических шайб. Внутри цилиндрических шайб взаимно ортогонально выполнены круглые каналы, диаметром 25 мм. В каналах установлены акселерометры PCB 393B05 (Piezotronics, USA), каждый из которых имеет чувствительность по ускорению 1000 мВ/мс$^{-2}$, при пороговом уровне шумов 0.7 мкм*с$^{-2}$*Гц$^{-0.5}$ (на частоте 100 Гц) и массе 50 г.

Согласно лабораторным измерениям на частоте 100 Гц чувствительность разработанного ПГД составляет около 500 мкВ/Па. Дипольная характеристика направленности имеет коэффициент деления не менее 20 дБ [6]. Достигнутое значение чувствительности разработанного макета ПГД инерционного типа к звуковому давлению оказывается исключительно высоким при столь малых габаритах. Причем достигнуто оно при обеспечении динамического диапазона 80 дБ. Поскольку аналогичные датчики применяются в ВП фирмы Wilcoxon Research Inc. полученные результаты подтверждают работоспособность последних в низкочастотной области, начиная с 5-10 Гц. Имеются многочисленные публикации о попытках использования этих ВП в мобильных антенных системах, например, автономных подводных аппаратах и в гибких буксируемых антеннах, например [1, 5].

ПГД силового типа. Принцип их работы в отличие от инерционных ПГД, измеряющих колебательное ускорение среды, и потому требующих обеспечения общей плавучести конструкции, близкой к нейтральной, заключается в измерении разности (градиента) давления на оппозитных сторонах неподвижного электроакустического преобразователя. Это, напротив, требует создания устройства со значительной отрицательной плавучестью. Среди ПГД силового типа наибольшее распространение получили варианты конструкций, содержащие пластинчатые изгибные пьезопреобразователи, установленные по краям тяжелого сердечника (например, приемники, разработанные Г.К. Скребневым и датчики РГАБ AN/SQQ-53 фирмы Magnavox [7, 2]) или в центре тяжелого круглого кольца [8]. Однако недостатком этих конструкций является низкая чувствительность к полезному сигналу из-за короткого набега звуковой волны между двумя сторонами пластинчатого изгибного преобразователя. Для повышения чувствительности ПГД за счет увеличения длины волнового набега круглые пластинчатые преобразователи пытались помещать в жесткую трубу [2]. Однако, увеличивая таким путем длину волнового набега, конструкторы сталкиваются с проблемой большого поперечного размера и соответственно плохой обтекаемости ПГД. Кроме того, нарушается требование единства фазового центра двух каналов ПГД, необходимое для многих вариантов обработки сигналов с ПГД.

Нами разработана конструкция ПГД силового типа [9, 10], в которой круглые изгибные чувствительные элементы установлены ортогонально друг за другом на оси цилиндрического корпуса из звукоотражающего материала и соединены с его поверхностью патрубками, выполненными в теле корпуса в виде полых каналов, причем сечение каналов плавно меняется от круглого, у чувствительного элемента, к прямоугольному, у поверхности корпуса, без уменьшения поперечной площади сечения, а оси каналов изогнуты во встречном направлении, так что выходы каналов на боковую поверхность цилиндра лежат в ортогональных плоскостях симметрично относительно оси цилиндра и точки на его оси лежащей посредине между центрами обоих круглых чувствительных элементов. Предлагаемое техническое решение обеспечивает вместе с увеличением набега звуковой волны единство фазового центра обоих ортогональных каналов ПГД в направлении перпендикулярном оси корпуса. Другим преимуществом является обтекаемость корпуса ПГД в осевом направлении. Еще одним достоинством предложенного решения, по сравнению с [2, 7], является размещение круглых чувствительных элементов в диаметральном сечении корпуса, что позволяет выполнить чувствительные элементы с наибольшим возможным диаметром при заданном диаметре корпуса и, следовательно, с максимальной возможной чувствительностью.

Изготовлен макет ПГД предложенного типа [11]. Корпус размером 168 х Ø100 мм изготовлен из нержавеющей стали и состоит из 8 собираемых на штифтах одинаковых секций. Круглые чувствительные элементы собраны из двусторонних биморфных преобразователей, состоящих из бронзовой подложки Ø70 мм, склеенной с двумя тонкими (толщина 0,3 мм) круглыми пьезодисками Ø30 мм. Бронзовая подложка по контуру Ø65 мм закреплена между двумя кольцевыми обоймами, имеющими внешний диаметр Ø80 мм, выполненными из текстолита. Каждый собранный чувствительный элемент залит звукопрозрачным уретановым компаундом в форме цилиндрической таблетки.

При лабораторных измерениях в вертикальном колеблющемся столбе жидкости в эталоне колебательной скорости РЭКС-02 (ВНИИФТРИ) определялась чувствительность ПГД к звуко-

вому давлению при сравнении с образцовым гидрофоном. На частоте 100 Гц экспериментально измеренная чувствительность достигает 120-130 мкВ/Па (без усиления предусилителем). Из простейших геометрических соображений следует, что в предложенном решении волновой набег, при том же внешнем диаметре, увеличивается не менее чем в 4 раза, по сравнению с популярными в 80-е годы конструкциями [3, 4]. Имеются дальнейшие резервы повышения чувствительности разработанного ПГД к звуковому давлению в плоской волне за счет оптимизации конструкции изгибных пьезопреобразователей. Экспериментально измеренная глубина провалов дипольной характеристики направленности ПГД (коэффициент деления) составила не менее 24 дБ в диапазоне частот 100 − 200 Гц.

Виброзащита. В области низких частот (обычно ниже 100 Гц) на мобильных носителях становятся существенными помехи, связанные с вибрационными воздействиями. Проблема виброзащиты ПГД силовой и инерционной схем вытекает из повышенной вибрационной чувствительности этого класса гидроакустических датчиков, являющейся следствием принципов их функционирования (приемники первого порядка [7]). Существует ряд методов, потенциально пригодных для виброзащиты ПГД – виброизоляция, виброкомпенсация, мультипликативное виброподавление при интенсиметрической обработке.

Первым фактором, требующим рассмотрения, является собственная частота подвеса ПГД. Гибкая система подвеса является необходимым элементом ПГД инерционного типа. Для свободного перемещения под действием звуковой волны в среде ПГД инерционного типа он должен быть колебательно развязан, и, следовательно, его рабочий диапазон частот должен лежать существенно выше собственной частоты подвеса. Поскольку ПГД инерционного типа выполняются с нейтральной плавучестью, и их инерционная масса невелика, низкое значение собственной частоты подвеса может определяться только его гибкостью. В то же время гибкость подвеса ограничивается требованиями конструктивной прочности, наиболее критичными для мобильных носителей. В результате, собственная частота подвеса обычно не может быть выполнена существенно ниже 0,5 – 1 Гц. Следовательно, рабочий диапазон таких ПГД не может быть ниже 5 – 10 Гц. При этом в диапазоне частот от 5 – 10 до 100 Гц ПГД инерционного типа оказывается защищённым от вибраций корпуса носителя с помощью виброизоляции, вносимой системой подвеса, на величину 20 – 40 дБ, определяемую известным законом виброизоляции.

Может показаться, что для ПГД силового типа возможно жесткое закрепление, поскольку принцип работы ПГД этого типа предполагает неподвижность корпуса. Однако виброизоляция ПГД и здесь необходима для защиты от вибрационных помех. Для этого, так же как в предыдущем случае, необходимо работать существенно выше резонанса подвеса. В то же время ‘большая масса корпуса ПГД силового типа, чем инерционного (ограниченного средней плотностью среды), может позволить снизить собственную частоту подвеса и тем самым расширить рабочий диапазон этих ПГД в низкочастотную область.

Дополнительную возможность защиты ПГД силового типа от вибраций предоставляет виброкомпенсация. Ранее был предложен принцип компенсационной виброзащиты, который предполагал соосное размещение внутри корпуса ПГД в воздушном зазоре пьезопреобразователей, аналогичных внешним датчикам градиента давления, и выполняющих роль акселерометров. Однако, даже будучи идеально идентичными, внешний и внутренний пьезопреобразователи функционируют в разных условиях из-за влияния на внешний из них окружающей водной среды. Это воздействие на частотах, когда преобразователь много меньше длины волны, может быть представлено присоединенной массой среды. Основная идея компенсационной виброзащиты [12] заключалась в механическом моделировании этой присоединенной массы на внутреннем пьезопреобразователе за счет нагрузки водным слоем, заливочным компаундом и даже металлическими пластинками. Описанный подход реализован на трех разновидностях ПГД силового и разностного типов с достижением подавления вибраций в осевом направлении 15 – 25 дБ, на частотах ниже собственного изгибного резонанса пластинчатых пьезопреобразователей.

Прогресс цифровой электроники открывает возможность отказаться от механического моделирования присоединенной массы в пользу электрического, и даже программного, а это позволяет заменить внутренние пьезопреобразователи малогабаритными акселерометрами. Предложена конструкция силового типа с компенсационной виброзащитой ПГД в которой аналогичен схеме, описанной выше, но дополнительно снабжен парой акселерометров, устанавливаемых на оси корпуса соосно с каждой из двух компонент ПГД [13]. Полезный сигнал, воспринимаемый ПГД этого типа, представляет собой градиент давления, действующий на оппозитные стороны изгибных пьезопреобразователей. В отношении вибрационной помехи изгибные пьезопреобразователи функционируют как акселерометры, имеющие максимум чувствительности вдоль своей оси. Для компенсационной виброзащиты ПГД по каждой из двух компонент от-

клики пьезопреобразователй и дополнительных акселерометров должны быть выравнены. Эта настройка схемы виброкомпенсации может быть выполнена при проведении лабораторных измерений в бассейне небольшого размера.

В результате настройки, можно ожидать компенсационного подавления вибрационной помехи в полосе частот не менее, чем на 25 – 30 дБ. Такой же глубиной ослабления 25 – 30 дБ характеризуется поперечная вибрационная чувствительность внешнего изгибного пьезопреобразователя и внутреннего акселерометра ПГД. Таким образом, при достаточно точной установке этих преобразователей на оси жесткого корпуса вибрационная чувствительность ПГД не будет иметь существенной угловой направленности и окажется равномерно сниженной на 25 – 30 дБ. Любопытно, что компенсационная виброзащита также нивелирует эффект паразитного ослабления полезного сигнала при частичной подвижности корпуса ПГД силового типа под действием плоской звуковой волны полезного сигнала, что позволяет уменьшить массу корпуса или сдвинуть рабочий диапазон частот ближе к собственной частоте подвеса ПГД.

Заметим, что для ПГД инерционного типа компенсационная виброзащита неосуществима принципиально. Однако, здесь применимо интенсиметрическое виброподавление, основанное на мультипликативной обработке откликов ПГД и датчика звукового давления, известное в подводной акустике как определение вещественной части потока мощности [2]. Данное решение пригодно и в случае доминирования помех обтекания. Так в работе [14] показана возможность подавления помех обтекания и вызванных ими вибраций при продольном обтекании фрагмента гибкой антенны на 12 – 25 дБ относительно квадратичного тракта ПГД. Ограничение величины подавления помех связано с асимметрией оппозитных изгибных пьезопреобразователей использовавшегося датчика звукового давления (технологической разброс чувствительности к давлению не менее 10%), следствием чего является паразитная чувствительность к осциллирующей компоненте помех обтекания и вибрациям тела антенны в направлении перпендикулярном ее оси. В результате, имеется остаточная корреляция откликов ПГД и датчика звукового давления, которая и снижает потенциально достижимое подавление помех при интенсиметрической обработке. Для устранения этого эффекта предложена оптимизированная по сравнению с [14] схема комбинированного приемника [15] с ПГД инерционного типа, датчик звукового давления в которой выполнен на цилиндрическом пьезопреобразователе, характеризуемом повышенной симметричностью параметров в направлениях перпендикулярных потоку жидкости.

Совокупность вышеизложенных технических решений и методов перспективна для решения проблем разработки низкочастотных гидрокустических векторных приемников для мобильных носителей, в том числе, малогабаритных.

Исследование частично поддержано Программой фундаментальных исследований «Дальний Восток», проект 18-1-004.

Литература

4. Thode A., Kim K., Norman R., Blackwell S., Greene C. Acoustic vector sensor beamforming reduces masking from underwater industrial noise during passive monitoring // J. Acoust. Soc. Am. 2016. 139, No. 4. Part 1. EL105-EL111.
5. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
6. www.wilcoxon.com/vi_index.cfm?CatS_ID=41.
7. www.warships.ru/usa/Weapons/Sensors/Sonobuoys/.
8. Shipps J.C., Abraham B.M. The use of vector sensors for underwater port and waterway security // Sensors for Industry Conference. Jan 27-29, 2004. New Orleans. USA. P.41-44.
9. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Костив А.Е., Ширяев А.Д. Низкочастотные приемники градиента давления инерционного типа для океанологических исследований // ПТЭ. 2017. № 4. С. 142-146.
10. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические приемники. СПБ. Изд-во «Элмор», 1997.
11. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974.
12. Патент РФ 2568411 Двухкомпонентный приемник градиента давления / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Фершалов Ю.Я. Заявл.: 16.10.2014. Опубл.: 16.10.2015. Бюл. 32.
13. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Костив А.Е., Ширяев А.Д., Фершалов Ю.Я., Марютин В.С. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа для океанологических исследований // ПТЭ. 2017. № 5. С. 120–124.
14. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Дегтярев И.В., Серветников М.И. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа // Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток. 2017. С. 193-196.
15. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. Акустический приемник градиента давления // А.с. № 1521244 СССР. Бюллетень «Открытия Изобретения». 1989. № 41, С. 272.
16. Патент РФ 2624791 Двухкомпонентный приемник градиента давления и способ измерения градиента давления с его использованием // Коренбаум В.И., Горовой С.В., Тагильцев А.А., Костив А.Е. Заявл.: 03.10.2016. Опубл.: 06.07.2017 Бюл. № 19.
17. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A. Flow noise of an underwater vector sensor embedded in a flexible towed array // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131, N 5. P. 3755-3762.
18. Патент РФ 2501043 Комбинированный гидроакустический приемник для гибкой протяженной буксируемой антенны / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. заявл. 17.07.2012. опубл. 10.12.2013. Бюл. № 34.

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СКВАЖИННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

В.Б.Жуков, д-р техн.наук, Д.Б.Островский, д-р техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

ACOUSTICAL FIELD OF THE WELL RADIATOR

V.B.Zhukov, Dr.Sc., D.B.Ostrovskiy, Dr.Sc.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

В докладе приводятся аналитические выражения для расчета акустического поля, формируемого цилиндрическим излучателем гидроакустического типа в нефтяной скважине, обсаженной металлической трубой и бетонным камнем. Акустическое воздействие может решать две задачи: очистка стенки металлической трубы от минеральных осадков и прочистка добычной зоны от осадков органического происхождения. Представлены иллюстрации распределения давления внутри скважины в продольном и поперечном направлениях, а также частотные зависимости, что дает возможность выбрать оптимальную частоту возбуждения излучателя.

Analytical forms for calculation of the acoustic field created by a cylindrical radiator of hydroacoustic type in the oil well surrounded with a metal pipe and a concrete stone are given in the report. Acoustic action can solve two problems: cleaning of a wall of a metal pipe of mineral scale and cleaning-up of a mining zone of organic scale. Illustrations of distribution of pressure in a well in the longitudinal and cross directions, and also frequency dependences are provided that gives the chance to choose the optimum working frequency of excitation of a radiator.

Акустическое воздействие в скважинах осуществляется в случаях необходимости очистки внутренней поверхности от минеральных осадков, а в продуктивной зоне – для прочистки от наслоений органического происхождения. Граничные условия для формирующегося акустического поля в том и другом случае различны.

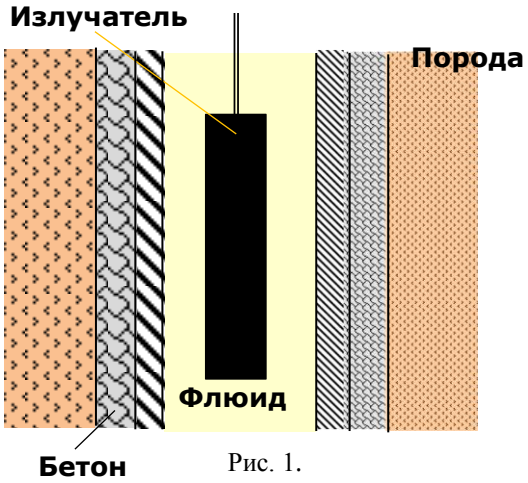


Рис. 1.

Фрагмент скважины при очистке представлен на рис.1. Акустический цилиндрический излучатель располагается в центре, стенки скважины металлические, обсаженные бетонным камнем. Во флюиде распространяются только продольные волны, в металле, бетоне и породе еще и поперечные. Задача определения поля в скважине решалась в [1], где акустическое давление было получено в виде

$$p(r,z) = p_1 + p_{1\text{отр}} + p_2\left(1 + \frac{p_{1\text{отр}}}{p_1}\right), \qquad (1)$$

$$p_1 = -\frac{iv\rho_0 c_0}{\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\frac{\sin(0.5k_0 l\sin\theta)}{\sin\theta}\frac{H_0^{(1)}(k_0 r\cos\theta)}{H_1^{(1)}(k_0 a\cos\theta)}e^{ik_0 z\sin\theta}d\theta,\quad p_2 = \frac{2v\rho_0 c_0}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{\sin(0.5k_0 l\ \mathrm{ch}\theta)\sin(k_0 z\ \mathrm{ch}\theta)}{\mathrm{ch}\theta}\frac{K_0(k_0 r\ \mathrm{sh}\theta)}{K_1(k_0 a\ \mathrm{sh}\theta)}d\theta,$$

$$p_{1\text{отр}} = -\frac{iv\rho_0 c_0}{\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}k_{\text{отр}}(\theta)\frac{\sin(0.5k_0 l\sin\theta)}{\sin\theta}\frac{H_0^{(1)}(k_0 r\cos\theta)}{H_1^{(1)}(k_0 a\cos\theta)}e^{ik_0 z\sin\theta}d\theta,$$ где v – колебательная скорость на поверхности излучателя радиуса a и длиной l; ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в флюиде; k_0 – волновое число; $H_m^{(1)}$, K_m – функции Ханкеля и Макдональдса; z, r – координаты вдоль и поперек оси скважины; коэффициент отражения $k_{\text{отр}}$ определялся матричным методом [2], но с учетом различных импедансов по обе стороны двухслойной оболочки.

На рис.2 представлены графики распределения давления (в относительных единицах) в поперечном направлении в зависимости от частоты возбуждения излучателя; цифрами 1-4 на графиках обозначены частотные зависимости при f = 35, 40,45,50 кГц, соответственно. Параметры материалов, составляющих слои, представлены в таблице.

Материал слоя	Плотность,ρ, кг/м^3	Скорости звука, м/с		Толщина слоя, мм
		c_l	c_t	
Флюид (нефть)	813	1225	–	33
Труба (металл)	7850	5930	3230	9
Бетонный камень	2250	4750	1880	30
Полупространство (песок)	1550	1725	1223	–

Радиус акустического излучателя a = 23 мм, длина l = 1 м.

Из рис.2 видно, что в слое флюида давление постепенно по-нижается от излучателя к поверхности металлической трубы, причем с повышением частоты возбуждения излучателя давление увеличивается. Отметим, что расчеты на рис. 2 выполнялись при неизменном радиусе излучателя, соответствующем резонансной частоте f = 40 кГц. При необходимости прочистки добычной зоны от осадков органического происхождения акустический излучатель устанавливают против добычной зоны скважины. В месте расположения продуктивного пласта в скважине делают перфорацию, через которую поступает флюид (рис. 3).

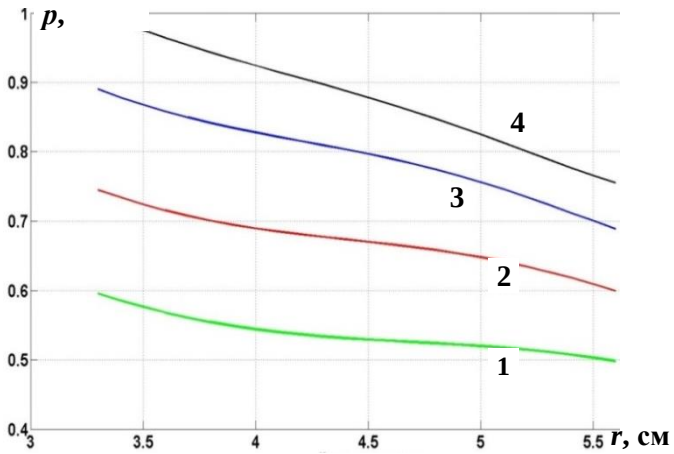


Рис. 2.

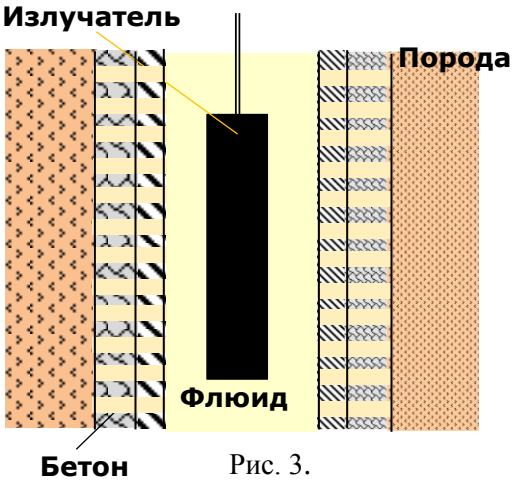


Рис. 3.

Полагая, что коэффициент перфорации велик, считаем, что в зоне перфорации могут распространяться только продольные волны, а зона перфорации представляет собой жидкий слой. Плотность и скорость звука в слое будем считать как средние значения соответствующих параметров флюида, металла и бетона. Тогда, в соответствии с данными, приведенными в таблице, плотность слоя ρ_c = 3638 кг/м^3, а скорость продольных волн c_c = 3968 м/с. Флюидосодержащую породу также будем считать жидкой.

Расчет поля в слое выполняем по методике, представленной в [2] для жидкого слоя, но с учетом различия в импедансах на входе волны в слой и выходе из слоя. Коэффициент отражения от слоя имеет вид

$$k_{\text{отр}} = -\frac{e^{i2Q_2}(Z_1+Z_2)(Z_2-Z_3)-(Z_1-Z_2)(Z_2+Z_3)}{e^{i2Q_2}(Z_1-Z_2)(Z_2-Z_3)+(Z_1+Z_2)(Z_2+Z_3)}, \qquad (2)$$

коэффициент прохождения

$$k_{\text{пр}} = \frac{4Z_2Z_3\exp(-iQ_3)}{e^{-iQ_2}(Z_1+Z_2)(Z_2+Z_3)+e^{iQ_2}(Z_1-Z_2)(Z_2-Z_3)}, \qquad (3)$$

где $Z_{in} = \rho_i c_i/\cos\theta_i$, i= 1,2,3 - импеданс слоя, в котором цифрой «1» обозначен флюид, 2 - слой, 3 - порода; $Q_i = k_i H\cos\theta_i$, i= 1,2.

Выражения (2), (3) отличаются от соответствующих выражений, приведенных в [2] вследствие указанного различия импедансов. Графики $k_{\text{отр}}$ и $k_{\text{пр}}$ (рис. 4) рассчитаны с учетом эффекта полного внутреннего отражения, поэтому угол θ взят в пределах θ = ± 15°. Видно, что $k_{\text{отр}}$ из-за значительного различия импедансов флюида и слоя близок к значению 1, в центральной части добычной зоны значительную величину имеет $k_{\text{пр}}$.

Давление в слое определим по методике [2]:

$$p_2(r,z) = -\frac{\nu\rho_1 c_1}{2\pi Z_1}\{[Z_1+Z_2+k_{\text{отр}}(Z_1-Z_2)]p(r,z)+[Z_1-Z_2+k_{\text{отр}}(Z_1+Z_2)]p(-r,z)\} \qquad (4)$$

при этом учтем, что в [2] расчет выполнен для плоского слоя. Поэтому в качестве функции $p(r, z)$ в (4) подставим решение для цилиндрической волны из [1]:

$$p(r,z) = -\frac{i\nu\rho_1 c_1}{\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\frac{\sin(0.5k_1 l\sin\theta)}{\sin\theta}\frac{H_0^{(1)}(k_1 r\cos\theta)}{H_1^{(1)}(k_1 a\cos\theta)}e^{ik_1 z\sin\theta}d\theta+\frac{2\nu\rho_1 c_1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{\sin(0.5k_1 l\ \text{ch}\gamma)\sin(k_1 z\ \text{ch}\gamma)}{\text{ch}\gamma}\frac{K_0(k_1 r\ \text{sh}\gamma)}{K_1(k_1 a\ \text{sh}\gamma)}d\gamma \qquad (5)$$

При расчете p_2 по формуле (4) следует учесть, что в (4) общие части множителей в интегралах (5) вынесены за скобки.

Характер распределения давления внутри слоя p_2 приведен на рис. 5. Расчет выполнен на частотах 35, 40, 45 кГц (кривые 1-3, соответственно). Для удобства анализа начало координат по r перенесено на нижнюю границу слоя, поэтому при расчетах интегралов в (5) надо заменить $r \to a_1$ (радиус внутренней поверхности металлической трубы).

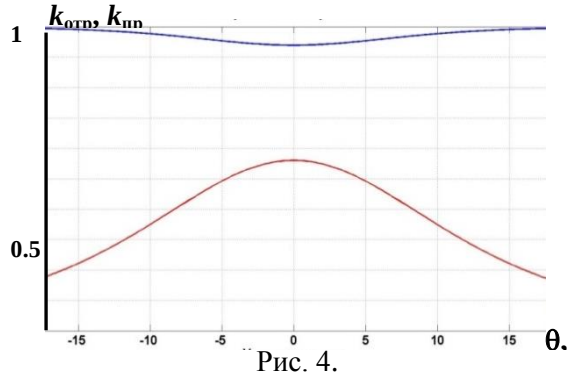


Рис. 4.

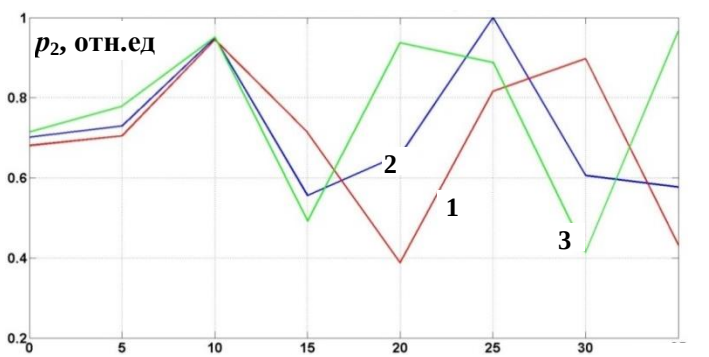


Рис.5

Давление в слое в целом имеет экстремумы, зависящие от частоты. Поэтому, изменяя частоту возбуждения излучателя, можно очищать различные части слоя (по глубине). В частности, для этих целей можно использовать ЛЧМ-сигнал.

Приведенные соотношения дают возможность, используя данные об акустических характеристиках слоев (ρ, c_l, c_t) и геометрии скважины выбрать оптимальный режим работы излучателя для воздействия на локальные участки как внутри металлической трубы, так и в добычной зоне.

Литература

1. Жуков В.Б., Островский Д.Б. Поле скважинного излучателя // Гидроакустика. 2018. Вып. 33(1). С. 5-12
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ЧЕРЕЗ ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СЛОЙ

А.В.Клячкин, канд.физ-мат.наук
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

SOUND PROPAGATION THROUGH PERIODICALLY INHOMOGENEOUS HORIZONTAL LAYER

A.V.Klyachkin, Ph.D.
Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

В работе рассматривается процесс распространения плоской звуковой волны через периодически неоднородный горизонтальный слой. Получены выражения для импедансов, коэффициентов отражения и прохождения волны, модифицированных наличием неоднородности в слое. Найдены точные аналитические зависимости гидроакустических полей как в слое, так и в граничащих с ним полупространствах.

The process of plane sound wave propagation through periodically inhomogeneous horizontal layer is considered in the paper. Expressions for impedances, reflection and transmission coefficients modified due to presence of layer inhomogeneity are obtained. The exact analytical formulas for hydroacoustic fields both in the layer and in the two semi-infinite media are found.

Физическая и математическая постановки задачи. Рассмотрим падение плоской звуковой волны на трехслойную среду, состоящую из нижнего полупространства, верхнего полупространства и эластомерного (водоподобного) слоя между ними. Падающая снизу из нижнего полулупространства на эластомерный слой плоская звуковая волна после многократных отражений внутри слоя дает в результате преломленную волну, прошедшую в верхнее полупространство, а также волну, отраженную в нижнее полупространство. Распространение волн внутри эластомерного слоя, верхнего и нижнего полупространств подчиняется волновым уравнениям. Будем ниже рассматривать установившиеся во времени процессы, зависимость от времени, пропорциональная множителю exp(-iωt), ниже опускается. Тогда волновые уравнения превращаются в уравнения Гельмгольца для фурье – гармоник акустических полей в частотной области. Рассмотрим для простоты двумерную задачу. Используя интегральный вид решения уравнения Гельмгольца с помощью функции Грина, условие отсутствия объемных источников звука и явный вид функции Грина для свободного полупространства, получим акустические поля давления в верхнем и нижнем полупространствах в виде:

$$P_{в}(x,z,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} dk_x Z_{в}(k_x)\hat{V}_{zв}(k_x,z=h,\omega)e^{i\left[k_x x+\sqrt{k_{в}^2-k_x^2}(z-h)\right]} \quad (1)$$

$$P_{н}(x,z,\omega)=A\left[e^{ik_{н}\left[x\sin\theta+(z+h)\cos\theta\right]}+e^{ik_{н}\left[x\sin\theta-(z+h)\cos\theta\right]}\right]-$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty} dk_x Z_{н}(k_x)\hat{V}_{zн}(k_x,z=-h,\omega)e^{i\left[k_x x-\sqrt{k_{н}^2-k_x^2}(z+h)\right]} \quad (2)$$

Внеинтегральный член в (2) описывает падающую и отраженную (как от абсолютно жесткой нижней границы) волны, а интегралы в (1), (2) описывают излучение звука колеблющимися верхней и нижней границами эластомерного слоя в верхнее и нижнее полупространства. Здесь $\rho_{н}$, $c_{н}$, $k_{н}=\frac{\omega}{c_{н}}$ - плотность, скорость звука и волновое число нижнего полупространства; $\rho_{в}$, $c_{в}$, $k_{в}=\frac{\omega}{c_{в}}$ - плотность, скорость звука и волновое число верхнего полупространства; A, θ - амплитуда падающей плоской звуковой волны и угол ее падения (угол между ее направлением распространения и положительным направлением оси z); $\hat{V}_{zв}(k_x,z=h,\omega)$, $\hat{V}_{zн}(k_x,z=-h,\omega)$ - фурье-образы нормальных компонент колебательной скорости верхней и нижней границ эластомерного слоя толщиной 2h. В формулах (1-2) в подынтегральных выражениях в качестве сомножителей фурье – образов нормальных компонент колебательных скоростей на верхней и нижней границах эластомерного слоя выступают импедансы верхнего и нижнего полупространств:

$$Z_{в}(k_x)=\frac{\rho_{в}\omega}{\sqrt{k_{в}^2-k_x^2}} \quad Z_{н}(k_x)=\frac{\rho_{н}\omega}{\sqrt{k_{н}^2-k_x^2}}$$

Завершает постановку задачи уравнение Гельмгольца для акустического давления внутри эластомерного слоя и уравнение связи между давлением и колебательной скоростью в слое:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}+k_c^2(1-\varepsilon_L^2\cos(k_L x))\right]P_c(x,z,\omega)=0 \tag{3}$$

$$V_{cz}(x,z,\omega)=\frac{1}{i\omega\rho_c}\frac{\partial}{\partial z}P_c \tag{4}$$

Здесь ρ_c - эффективная плотность слоя, $k_c=\frac{\omega}{c_c}$ - среднее волновое число в слое, c_c - средняя эффективная (комплексная частотно-зависимая) скорость распространения волн в слое, $k_L=\frac{2\pi}{L}$ - волновое число, соответствующее периоду неоднородности L в слое, ε_L - относительная амплитуда модуляции среднего волнового числа в слое в горизонтальном направлении. Граничные условия (для $z=h,\ z=-h$) требуют непрерывности как нормальных компонент колебательных скоростей, так и давлений.

Основные результаты. Решая систему уравнений (1-4) с учетом граничных условий, удалось найти точные аналитические выражения для гидроакустических полей давления и колебательной скорости как в слое, так и в окружающих его верхнем и нижнем полупространствах.

Гидроакустические поля давления и колебательной скорости в верхнем полупространстве имеют вид:

$$P_{в}(x,z,\omega)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}P_{в,m}e^{i\left[(k_{н}\sin\theta+mk_L)x+\sqrt{k_{в}^2-(k_{н}\sin\theta+mk_L)^2}\,(z-h)\right]} \tag{5}$$

$$V_{zв}(x,z,\omega)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}\frac{P_{в,m}}{Z_{в,m}}e^{i\left[(k_{н}\sin\theta+mk_L)x+\sqrt{k_{в}^2-(k_{н}\sin\theta+mk_L)^2}\,(z-h)\right]} \tag{6}$$

В выражениях (5-6) амплитуда m пространственного спектра давления в верхнем полупространстве определяется формулой:

$$P_{в,m}=AK_m^{pass} \tag{7}$$

В выражении (7) A – амплитуда падающей волны, K_m^{pass} - коэффициент прохождения m пространственного спектра через слой.

Гидроакустические поля давления и колебательной скорости в нижнем полупространстве имеют вид:

$$\begin{aligned}P_{н}(x,z,\omega)&=Ae^{ik_{н}\left[x\sin\theta+(z+h)\cos\theta\right]}+\\&+\sum_{m=-\infty}^{\infty}P_{н,m}e^{i\left[(k_{н}\sin\theta+mk_L)x-\sqrt{k_{н}^2-(k_{н}\sin\theta+mk_L)^2}\,(z+h)\right]}\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}V_{zн}(x,z,\omega)&=A\frac{\cos\theta}{\rho_{н}c_{н}}e^{ik_{н}\left[x\sin\theta+(z+h)\cos\theta\right]}-\\&-\sum_{m=-\infty}^{\infty}\frac{P_{нс,m}}{Z_{н,m}}e^{i\left[(k_{н}\sin\theta+mk_L)x-\sqrt{k_{н}^2-(k_{н}\sin\theta+mk_L)^2}\,(z+h)\right]}\end{aligned} \tag{9}$$

В выражениях (8-9) амплитуда m пространственного спектра давления в нижнем полупространстве определяется формулой:

$$P_{н,m} = AK_m^{refl} \tag{10}$$

В выражении (10) А – амплитуда падающей волны, K_m^{refl} - коэффициент отражения m пространственного спектра от слоя.

В (6, 9) импедансы верхнего и нижнего полупространств для m пространственного спектра определяются, соответственно как $Z_{в,m} = Z_в(k_x^2 = (k_н \sin\theta + mk_L)^2)$ и $Z_{н,m} = Z_н(k_x^2 = (k_н \sin\theta + mk_L)^2)$.

Коэффициенты прохождения K_m^{pass} и отражения K_m^{refl} зависят от импеданса слоя, импеданса верхнего и нижнего полупространств, номера m пространственного спектра, а также от амплитуды и периода модуляции волнового числа слоя по горизонтальной координате. Для однородного слоя (ε_L=0) коэффициенты прохождения K_m^{pass} и отражения K_m^{refl} равны нулю для всех пространственных спектров кроме основного (m=0). Значения коэффициентов прохождения K_0^{pass} и отражения K_0^{refl} для основного спектра (при отсутствии модуляции) сводятся к известным формулам, выражающимся в терминах импедансов симметричных и антисимметричных колебаний слоя, а также импедансов верхнего и нижнего полупространств. При этом все пространственные спектры «свернутся»: в результате поле в верхнем полупространстве сведется к преломленной волне, а в нижнем полупространстве – к падающей и отраженной волнам.

Из (5-6, 8-9) видно, что зависимость полей давления и колебательной скорости от горизонтальной координаты x является квазипериодической: разность между значениями поля, отстоящими (по горизонтали) на период неоднородности L, является постоянной. Это явление характерно для распространения волн в периодических структурах [1]. Оно является следствием квазипериодичности общих решений дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

Координатная зависимость полей давления и скорости, являющихся суперпозицией пространственных спектров, может быть описана в терминах пространственных углов $\theta_{в,m}$ (для верхнего полупространства) и $\theta_{н,m}$ (для нижнего полупространства):

$$Cos\theta_{в,m} = \sqrt{1-(\frac{c_в}{c_н} sin\theta + \frac{2\pi m}{k_в L})^2} \qquad Cos\theta_{н,m} = \sqrt{1-(sin\theta + \frac{2\pi m}{k_н L})^2} \tag{11}$$

Выражения (11) показывают, что m пространственный спектр будет распространяющейся однородной волной в случае вещественности пространственных углов $\theta_{в,m}$, $\theta_{н,m}$. В случае их мнимости - пространственные спектры будут неоднородными волнами, экспоненциально затухающими при удалении от границ слоя. Например, если $L \le \frac{\lambda_н}{2}$, то независимо от угла падения плоской волны все пространственные спектры (кроме основного (m=0)) будут давать в нижнем полупространстве неоднородные волны.

Анализ выражений для коэффициентов прохождения K_m^{pass} и отражения K_m^{refl} показывает возможность существования резонансных явлений двух видов: 1) резонанс, связанный с симметричными и асимметричными колебаниями слоя, возникающий для всех m при одних и тех же условиях, протекающий одинаково для всех пространственных спектров и не исчезающий при отсутствии неоднородности в слое; 2) параметрический резонанс, возникающий только при наличии модуляции в слое. Условие существования параметрического резонанса связывает угол падения и длину падающей волны с периодом неоднородности в слое и номером пространственного спектра m и имеет вид:

$$Sin\theta_m = \frac{m\lambda_н}{2L} \tag{12}$$

Литература

1. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М.: Издательство иностранной литературы, 1959.

МЕХАНИЗМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ, КОНТАКТИРУЮЩЕЙ С ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДОЙ

Ф.Ф.Легуша, д-р физ-мат.наук, К.А.Клюбина, канд.физ-мат.наук, Д.В.Никущенко, д-р техн.наук,
Е.Ю.Рытов, канд.техн.наук
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

MECHANISM OF ADDITIONAL RADIATION OF SOUND WAVES BY THE SURFACE OF A LIQUID CONTACT WITH A GASEOUS ENVIRONMENT

F.F.Legusha, Dr.Sc., K.A.Klyubina, Ph.D., D.V.Nikushchenko, Dr.Sc., E.Yu.Rytov, Ph.D.
Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia

Решена задача о взаимодействии плоской звуковой волны, распространяющейся в жидкости, с бесконечной поверхностью, контактирующей с газообразной средой. Показано, что в случае контакта вязких и теплопроводных сред возникает дополнительное излучение звука в газообразную среду. Это является следствием того, что при взаимодействии звуковой волны с поверхностью в газе возникает неоднородная тепловая волна, которая за счёт термоакустического эффекта является источником вторичной звуковой волны.

The problem of interaction of a plane sound wave propagating in a liquid with an infinite surface in contact with a gaseous medium is solved. It is shown that in the case of a contact between viscous and heat-conducting media, additional radiation of sound appears in the gaseous medium. This is a consequence of the fact that when an acoustic wave interacts with a surface in gas, an inhomogeneous thermal wave arises that, due to the thermoacoustic effect, is the source of the secondary sound wave.

В работах Л.М. Бреховских [1, 2] теоретически показано, что при взаимодействии сферической звуковой волны, распространяющейся в газе, с поверхностью жидкости существует механизм, обеспечивающий повышенное прохождение акустической энергии в жидкость. Можно предположить, что в случае, когда источник звука находится в жидкости, то на границе раздела жидкость – газ должен также существовать механизм, обеспечивающий выход акустической энергии в газ, величина которой превышает расчетные значения, получаемые методами лучевой акустики. Наличие такого механизма подтверждается расчетами О.А. Година [3-5], который рассмотрел задачу о прохождении низкочастотного звука из воды в воздух. В последние годы появился ряд работ [6-8], в которых экспериментально подтверждается наличие повышенной акустической прозрачности границы вода – воздух.

Постановка задачи. Рассмотрим еще один механизм увеличения прозрачности границы жидкость – газ, отличающийся от механизма, рассмотренного в работах О.А. Година [3-5]. Пусть плоская звуковая волна $\vec{k}_1$, распространяющаяся в жидкости, падает вдоль нормали на плоскую бесконечную границу жидкость – газ (рис. 1).

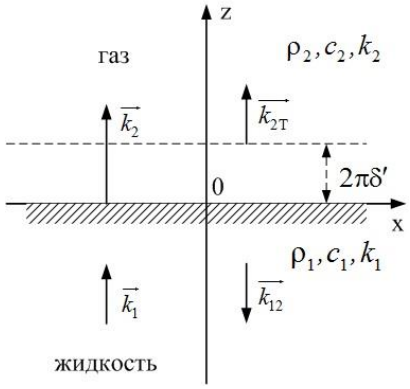


Рис. 1. Схема расчета: $\vec{k}_1$ – падающая волна, $\vec{k}_2$ – прошедшая волна, $\vec{k}_{12}$ – отраженная волна, $\vec{k}_{2T}$ – волна, возникающая за счет термоакустического эффекта, $2\pi\delta'$ – длина тепловой волны.

В результате взаимодействия этой волны с границей в верхнем полупространстве появляется прошедшая волна $\vec{k}_2$, а в нижнем – отраженная волна $\vec{k}_{12}$. классическое решение этой задачи известно [2], поэтому мы можем сразу записать: для коэффициента отражения по давлению

$$R_{\text{р}} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \tag{1}$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности сред, c_1, c_2 – скорости звука в средах;
для коэффициента прохождения по давлению

$$B_{\text{р}} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \tag{2}$$

Выражения (1) и (2) получены без учета диссипации энергии в акустическом пограничном слое (АПС). Как видно из формул (1) и (2) коэффициенты $R_{\text{р}}$ и $B_{\text{р}}$ не зависят от частоты.

Решение задачи с учетом диссипации энергии в АПС. Покажем, что из решения задачи о взаимодействии плоской звуковой волны с границей раздела жидких сред можно получить результат, из которого следует, что в случае границы жидкость – газ с поверхности жидкости должно происходить дополнительное излучение звука. С решением этой задачи можно ознакомиться в работах [9, 10, 11], в которых получены выражения для коэффициентов отражения и прохождения волны через границу с учетом диссипации энергии в АПС. Эти выражения имеют вид:

- коэффициент отражения волны по давлению

$$R_{\text{рТ}} = \frac{1 - X + Y - iY}{1 + X + Y + iY}; \tag{3}$$

- коэффициент прохождения волны по давлению

$$B_{\text{рТ}} = \frac{2}{1 + X + Y + iY}. \tag{4}$$

В формулах (3) и (4) применены следующие обозначения:

$$X = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}\frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}; \quad Y = \cos^{-1}\theta\left(b_{21}\frac{K_\rho}{K_{\text{В}}}\sin^2\theta + b_{11}\frac{K_{\text{с}}}{K_{\text{Т}}}\right); \quad b_{21} = \sqrt{\frac{\omega\nu_1}{2c_1^2}};$$

$$b_{11} = (\Gamma - 1)\sqrt{\frac{\omega a_1}{2c_1^2}}; \quad \cos\theta_2 = \sqrt{1 - \frac{c_2^2}{c_1^2}\sin^2\theta_1}; \quad K_{\text{В}} = \left|1 - \sqrt{\frac{\eta_1\rho_1}{\eta_2\rho_2}}\right|;$$

$$K_\rho = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2; \quad K_{\text{Т}} = \left|1 - \sqrt{\frac{C_{\text{р}1}\rho_1\chi_1}{C_{\text{р}2}\rho_2\chi_2}}\right|; \quad K_{\text{с}} = \left(1 - \frac{C_{\text{р}1}\rho_1\beta_2}{C_{\text{р}2}\rho_2\beta_1}\right)^2.$$

Здесь θ_1 – угол падения волны, θ_2 – угол преломления, ν – коэффициент кинематической вязкости, Γ – коэффициент нелинейности жидкости, $C_{\text{р}}$ – теплоемкость при постоянном давлении, χ – коэффициент теплопроводности, β – коэффициент объемного расширения, $\omega = 2\pi f$ – частота звуковой волны, $a_1 = \chi_1/\rho_1 C_{\text{р}1}$ – температуропроводность жидкости.

Из выражений (3) и (4) нетрудно видеть, что величины коэффициентов $R_{\text{рТ}}$ и $B_{\text{рТ}}$ зависят от частоты. В работах [9, 10, 11] также показано, что на границе раздела должно выполняться граничное условие $T'_{\text{m}1} = T'_{\text{m}2}$, где $T'_{\text{m}1}$ и $T'_{\text{m}2}$ – амплитуды акустических добавок к температуре в звуковых волнах в 1 и 2 среде. Можно показать, что это граничное условие будет выполняться только, если в верхней среде возбуждается неоднородная тепловая волна

$$T'_2 = T'_{\text{m}2}\exp\left(-\frac{z}{\delta'}\right)\exp i\left(\frac{z}{\delta'} - \omega t\right), \tag{5}$$

где $\delta' = \sqrt{2a_2/\omega}$ – толщина теплового пограничного слоя, a_2 – температуропроводность газа. Амплитуда неоднородной тепловой волны, распространяющаяся в газе, может быть рассчитана при помощи выражения

$$T'_{m2} = \frac{\frac{\Gamma - 1}{\beta_1 c_1} U_{m1}\left(1 - R_{pT}\right) - \frac{\gamma - 1}{\beta_2 c_2} B_{pT}}{1 + \sqrt{\frac{\chi_2 \rho_2 C_{p2}}{\chi_1 \rho_1 C_{p1}}}}, \qquad (6)$$

где U_{m1} – амплитуда колебательной скорости звуковой волны, падающей на границу, $\gamma = C_{p2}/C_{V2}$ – коэффициент Пуассона газа, C_V – теплоемкость при постоянном объеме.

Распространение тепловой волны (5) в верхней среде (см. рис. 1) приводит к генерации звуковой волны $\overrightarrow{k_{2T}}$ за счет термоакустического эффекта [12]. Этот эффект используется, например, для генерации звуковых волн в широкополосных нерезонансных источниках звука – термофонах. Амплитуду колебательной скорости генерируемой волны можно рассчитать из выражения

$$U_{2T} = \sqrt{\pi f a_2}\beta_2 T'_{m2}. \qquad (7)$$

Численная оценка результатов. Нижняя среда – вода, а верхняя среда – воздух при статическом давлении $P_0 = 1$ атм и температуре $T_0 = 293$ К. При этом положим, что интенсивность звуковой волны $\overrightarrow{k_1}$ $J_0 = 1,0$ Вт/м^2, амплитуда колебательной скорости $U_{m1} = 1,16 \cdot 10^{-3}$ м/с. Применяя формулы (1) и (2), имеем: $R_p = -0,999$, $B_p = 5,6 \cdot 10^{-4}$, $U_{m2} = 6,4 \cdot 10^{-7}$ м/с.

Анализ решения задачи, в которой учитывается диссипация энергии в АПС, позволяет установить, что на всех частотах выполняются неравенства: $|R_{pT}| < R_p$; $|B_{pT}| < B_p$. Это связано с тем, что часть энергии волны уходит на формирование неоднородной тепловой волны (5), частотная зависимость амплитуды которой определяется формулой (6). Частотная зависимость амплитуды колебательной скорости $U_{2T}(f)$ волны, возбуждаемой в воздухе тепловой волной (5), показана на рис. 2.

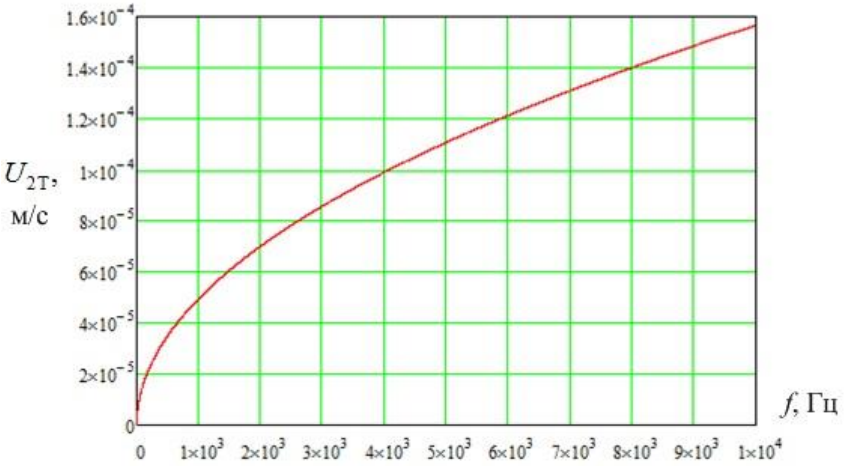


Рис. 2. Частотная зависимость амплитуды колебательной скорости звуковой волны, появляющейся вследствие возбуждения на поверхности воды неоднородной тепловой волны.

Из рис. 2 видно, что значения в исследуемом диапазоне частот $U_{2T} > U_{m2}$. Кроме того, значения U_{2T} увеличиваются с ростом частоты. Этот результат входит в противоречие с экспериментальными данными, представленными в работах [6, 7, 8]. Для устранения этого противоречия требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

На рис. 3 показана частотная зависимость интенсивности звуковой волны $\overrightarrow{k_{2T}}$, возникающей в воздухе (см. рис. 1) в результате возбуждения тепловой волны (5). При проведении расчетов интенсивность основной волны $\overrightarrow{k_1}$ была принята равной 1,0 Вт/м^2. Это позволяет рассматривать рис. 3 как частотную зависимость коэффициента преобразования акустической энергии. Дополнительно отметим следующее. Численные значения интенсивности звуковой

волны $\overrightarrow{k_{2T}}$ достаточны для ее экспериментального обнаружения при помощи современной измерительной аппаратуры.

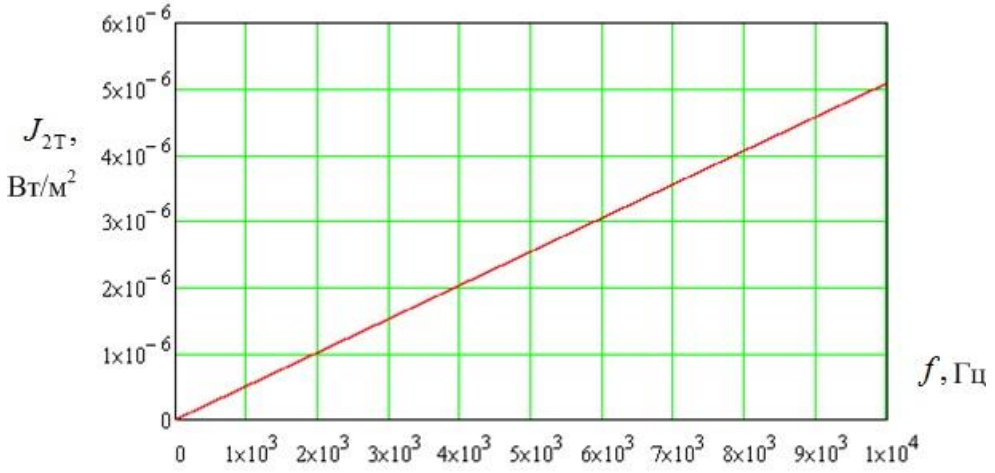


Рис. 3. Частотная зависимость интенсивности звуковой волны $\overrightarrow{k_{2T}}$.

Литература

1. Бреховских Л.М. Отражение и преломление сферических волн // УФН. 1949. Т.38. №1. С. 1-41.
2. Бреховских Л.М., Годин А.О. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989.
3. Godin O.A. Anomalous Transparency of Water-Air Interface for Low-Frequency Sound // Physical Review Letters. V.97. 2006. №16. p. 29.
4. Годин О.А. Прохождение низкочастотного звука из воды в воздух // Акустический журнал. 2007. Т.53. № 3. С. 353-361.
5. Godin O.A. Sound transmission through water-air interfaces: new insights into an old problem // Contemporary Physics. V.49. 2008. № 2. P. 105-123.
6. Тарасов С.П., Волощенко А.П. Исследования акустической прозрачности границы раздела вода-воздух // Тр. сессии РАО XXIII. 2011. С. 155-158.
7. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Экспериментальные исследования эффекта аномальной прозрачности границы раздела вода-воздух для низких частот // Тр. сессии РАО XXIV. 2011. Т.1. С. 202-204.
8. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Исследование влияния неоднородных волн на процесс прохождения звука через границу раздела вода-воздух // Тр. сессии РАО XXV. 2012. Т.1. С. 220-223.
9. Легуша Ф.Ф. Расчет коэффициентов отражения и прохождения плоской волны через границу раздела двух жидких сред с учетом их вязкости и теплопроводности // Письма в ЖТФ. 1982. Т.8. № 22. С.1390-1392.
10. Легуша Ф.Ф. Эффект Константинова и поглощение звука в неоднородных средах // УФН. 1984. Т.144. №3. С. 509-522.
11. Легуша Ф.Ф. Импеданс границы раздела жидких сред с учетом эффекта Константинова // ЖТФ. 1984. Т.54. №1. С.181-183.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986.

ОСОБЕННОСТИ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТОЯЧЕЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Ф.Ф.Легуша, д-р физ-мат.наук, М.А.Мусакаев, канд.физ-мат.наук, Д.В.Никущенко, д-р техн.наук, Г.В.Чижов
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет, Россия

FEATURES OF ENERGY DISSIPATION AT INTERACTION OF STANDING SOUND WAVE WITH SURFACE OF SOLID BODY

F.F.Legusha, Dr.Sc., M.A.Musakayev, Ph.D., D.V.Nikuschenko, Dr.Sc., G.V.Chizhov
Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia

В работе исследуется механизм диссипации энергии в акустическом пограничном слое (АПС) твердой поверхности. Стоячие волны возбуждаются в прямом отрезке цилиндрической трубы, закрытой жесткими крышками. Условия расчета и эксперимента: L >> R, где L – длина трубы; R – радиус трубы; R < 0,5λ, где λ – длина продольной звуковой волны нулевого порядка. Показано, что в АПС поверхности стенки появляется дополнительный механизм диссипации энергии. Появление этого механизма связано с возбуждением акустических вихрей Шлихтинга в АПС внутренней стенки трубы.

The mechanism of energy dissipation in acoustic boundary layer (ABL) of a solid surface is studied. Standing waves are excited in a straight section of a cylindrical tube, closed with rigid covers. Experimental conditions: L >> R, where L is the pipe length; R is the radius of the pipe; R <0.5λ, where λ is the length of a longitudinal zero order sound wave. It is shown that an additional energy dissipation mechanism appears in the ABL of the wall surface. The appearance of this mechanism is associated with the excitation of Schlichting acoustic vortices in the boundary layer.

Впервые задача о взаимодействии стоячей звуковой волны с бесконечной плоской поверхностью твердого тела была решена Г. Шлихтингом [1,2]. Анализ теоретических и экспериментальных исследований акустических течений Шлихтинга (АТШ) применительно к задачам физической акустики можно найти в литературе [3-7]. Опираясь на этот анализ можно сформулировать физические свойства АТШ.

Физические свойства АТШ. По общей классификации такие течения относятся к акустическим течениям внутри пограничного слоя [3-7]. Эти течения имеют вид вихрей с масштабом ($1,9\delta \times 0,25\lambda$), где λ – длина звуковой волны. Время установления течений Шлихтинга $\tau \approx \delta^2/\nu = T/\pi$, где $T-$ период колебаний частиц среды в стоячей волне, $\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$ – толщина АПС, ν – коэффициент кинематической вязкости среды, $\omega = 2\pi f$ – частота. Время установления вихрей меньше периода волны и, следовательно, они формируются практически сразу после возбуждения стационарного акустического поля (стоячей волны) в жидкости.

Единственным условием возникновения АТШ является выполнение неравенства $\lambda \gg \lambda_V$, где $\lambda = 2\pi\delta$ – длина вязкой волны. Физически выполнение этого неравенства означает, что АТШ являются безпороговыми и, следовательно, они возникают при самых незначительных интенсивностях волн, образующих стоячую волну. Для чисел Рейнольдса АТШ всегда выполняется условие $R_\nu \ll 1$. Физически это означает следующее. Вихри Шлихтинга отбирают энергию у стационарного акустического поля и эффективно превращают её в тепло. Возбуждение АТШ в пристеночном слое поверхности твердого тела, включает дополнительный механизм диссипации акустической энергии, который не возникает в поле бегущих звуковых волн.

Структура акустического поля в объеме трубы. Теоретические и экспериментальные исследования этого механизма диссипации акустической энергии проведены в наших работах [8-12]. Труба является единственным элементом, в котором могут быть возбуждены нормальные звуковые волны нулевого порядка, имеющие плоский фронт. Волны бегут в трубе навстречу друг другу и формируют в трубе стоячую звуковую волну, взаимодействующую с внутренней поверхностью трубы.

Все исследования проводились в предположении, что выполняются следующие условия: $L \gg R$, где L – расстояние между крышками, закрывающими отверстия на торцах трубы; R – радиус трубы; $R < 0,5\lambda$, λ – длина звуковой волны, нулевого порядка, распространяющейся в газе заполняющем трубу. Труба имеет твердые абсолютно теплопроводные стенки. Торцы трубы закрыты импедансными крышками, находящимися на расстоянии L друг от друга (рис. 1).

Акустический импеданс крышки, находящейся при $x = 0$, обозначим $Z(0)$, а импеданс крышки при $x = L$ соответственно $Z(L)$. В точке $x = 0$ к столбу воздуха, ограниченному стенками тубы и крышками приложена гармоническая сила $F_0 e^{i\omega t}$. Для расчета параметров и структуры акустического поля, возбуждаемого в трубе, использовался известный метод, изложение которого можно найти, например, в книге С.Н. Ржевкина[13]. Единственным усовершенствова-

нием этого метода было то, что в процессе исследований были уточнены значения необходимые для оценки величины ПКЗ бегущих волн, обусловленные диссипацией энергии в АПС стенок трубы и в объеме воздуха, заполняющего трубу. В общем случае, акустическое поле в трубе, торцы которой закрыты крышками, может существовать в виде суперпозиции бегущих и стоячих звуковых волн. Это хорошо видно из распределения звукового давления вдоль оси трубы[13].

$$p(x,t) = A(1-R_p)e^{i(\omega t-kx)} + 2R_pAe^{i(\omega t+\varphi-kL)}\cos\left[k(x-L)+\varphi\right], \quad (1)$$

где R_p – модуль коэффициента отражения звуковой волны от крышки по давлению, 2φ – разность фаз падающей и отраженной звуковых волн от крышки $A = F_0\rho c\dfrac{Z(L)+S\rho c}{D}e^{ikL}$;

$$D = 2\left(Z(0)Z(L)+S^2\rho^2c^2\right)sh\gamma L + 2S\rho c\left(Z(0)+Z(L)\right)ch\gamma L;$$

где ρ – плотность, c – скорость звука в газе, заполняющем трубу, $\gamma = \alpha + ik$ – постоянная распространения, α – пространственный коэффициент затухания волны, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – волновое число, $F_0 = Sp_m$, p_m – амплитуда давления, создаваемая источником звука, $S = \pi R^2$- площадь поперечного сечения трубы.

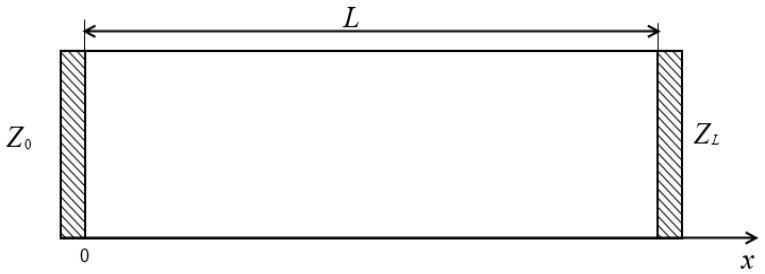


Рис. 1. Труба, оба конца которой закрыты импендасными крышками.

В правой части формулы (1) первое слагаемое является бегущей звуковой волной, распространяющейся в положительном направлении оси *x*, а второе слагаемое – стоячая звуковая волна. Из выражения (1) видно, что чисто стоячая звуковая волна в трубе может существовать только в случае, когда модуль коэффициента отражения $R_p = 1$. Это возможно только тогда, когда импедансы крышек $Z(L) = Z(0) = \infty$, или, когда отношение акустических импедансов контактирующих сред очень велико, как это обычно бывает на границе твердое тело-газ.

Будем считать, что крышки, закрывающие торцы трубы, имеют одинаковые акустические импедансы, т.е. $Z(L) = Z(0)$, а также выполняется отношение $Z(L)/S\rho c >> 1$. При этом в трубе возникают продольные резонансные колебания на частотах

$$f_n = nc/2L, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3,\ldots$, c – скорость звука в среде, заполняющей трубу. Нетрудно показать, что при этом также выполняется условие

$$L = n\lambda_n/2, \quad (3)$$

где $\lambda_n = c/f_n$ – длина волны на частоте *n*-го резонанса.

Из формулы (3) видно, что число вихрей Шлихтинга, образующееся в трубе на собственных частотах f_n, будет $N = 2n$.

Метод измерения коэффициентов затухания. Выражение (1) записано без учета потерь в трубе, наличие которых может быть учтено при помощи пространственного коэффициента затухания (ПКЗ).

$$\alpha_n = \alpha_{vn} + 2\alpha_a, \quad (4)$$

где α_{vn} – ПКЗ, обеспечиваемый диссипацией энергии на вихрях Шлихтинга, α_a – ПКЗ звуковых волн в объеме газа, заполняющем трубу.

Отметим, что на низких частотах обычно $2\alpha_a \ll \alpha_{vn}$ и, как следствие этого, потери акустической энергии в объеме газа, заполняющем трубу, не влияет на величину α_n. Это позволяет провести достаточно точные измерения значений α_n. Для экспериментального определения значений α_n можно использовать резонансный метод измерений [14]. Нормированная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) вблизи *n*-го полуволнового резонанса имеет вид

$$A_2(f)=\left|\frac{p(l)}{p(l)_{\max}}\right|^2=\frac{4\omega^2\beta_n^2}{4\omega^2\beta_n^2+\left[\omega^2-\omega_n^2+\beta_n^2\right]^2}, \quad (5)$$

где $A_2(f)=4R_p^2A^2$, $\omega_n=2\pi f_n$ – собственная частота на n-ном резонансе, β_n – временной коэффициент затухания, на частоте f_n. Величина временного коэффициента затухания β_n связана с параметрами АЧХ следующей формулой [14]

$$\beta_n=1{,}002\pi\Delta f_n, \quad (6)$$

где Δf_n – ширина резонансного промежутка n-го резонанса на уровне 0,5 АЧХ (5).

В свою очередь пространственный коэффициент затухания α_n связан с временным коэффициентом затухания β_n следующим образом

$$\alpha_n=\beta_n/c. \quad (7)$$

Таким образом, измерения значений f_n и Δf_n позволяют оценить нам величину ПКЗ α_n. Для примера, результаты измерений для труб, имеющих один радиус R = 25,0 мм, различные расстояния между крышками, которые закрывают торцы труб, показаны на рис. 2.

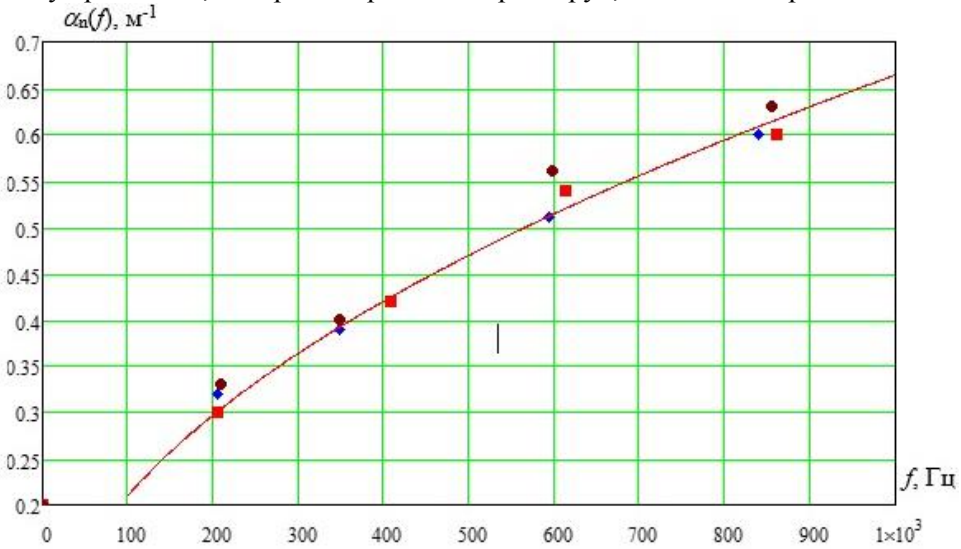


Рис. 2. Частотная зависимость полного пространственного коэффициента затухания:
■ – L = 4,17 м; ♦ – L = 8,34 м; ● – L = 12,29 м.

Из рис. 2 видно, что с ростом частоты экспериментальное значение полного пространственного коэффициента затухания увеличиваются по закону

$$\alpha_n(f)=0{,}021\sqrt{f}. \quad (8)$$

Отметим, что частотная зависимость (8) получена при помощи математического пакета Mathcad методом аппроксимации точек функцией с использованием функции Mathcad regress(x,y,n). Для того, чтобы сопоставить значения $\alpha_n(f)$ с ПКЗ $\alpha_k(f)$ величина которого определяется диссипацией энергии в ламинарном АПС, создаваемом на внутренней поверхности стенки, запишем формулу Кирхгофа в следующем виде

$$\alpha_k=1{,}34\cdot10^{-3}\sqrt{f}, \quad (9)$$

Если сопоставить выражения (8) и (9), то нетрудно заметить, что во всех случаях величина пространственного коэффициента затухания увеличивается с ростом частоты пропорционально $\sqrt{f}$. Это обстоятельство позволяет объяснить почему процесс диссипации акустической энергии, обусловленной возбуждением акустических течений Шлихтинга в поле стоячих звуковых волн не был обнаружен раньше. При проведении измерений на базе акустических интерферометров процесс диссипации энергии в АПС бегущих волн оказывается не отличимым от процесса поглощения звука на вихрях Шлихтинга. В общем случае в трубах оба, рассматриваемые здесь, механизма диссипации акустической энергии могут одновременно вносить свой вклад в поглощение звука.

Если сопоставить формулы (8) и (9), то нетрудно заметить, что $\alpha_n(f)\gg\alpha_k(f)$.

При этом, если оценивать относительный вклад в диссипацию энергии обоих механизмов поглощения звука, то получим следующее соотношение $\alpha_n(f)/2\alpha_k(f)=7{,}8$. Кроме того из

рис. 2 хорошо видно, что значения ПКЗ α_n не зависит от расстояния между крышками, закрывающими торцевые отверстия трубы.

В последующих работах планируется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. В первую очередь эти работы будут направлены на выяснение влияния радиуса трубы на величину $\alpha_n(f)$. Необходимо также исследовать случай, когда в трубе существует одновременно бегущая и стоячая звуковые волны. Акустическое поле с такой структурой возбуждается, например, в трубах с открытыми торцами. Кроме того, будут проведены мероприятия по совершенствованию установки с целью повышения точности измерений. Отметим также, что полученные выше результаты позволяют получить численную оценку энергии, диссипируемой на одиночном вихре Шлихтинга.

Литература

1. Schlichting H. Berechnung ebener pereodischer strömungen. Phys.Z. 33, 327, 1932.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М: Наука, 1974, – 711с.
3. Заремба Л.К. Акустические течения. В кн.: Мощные ультразвуковые поля. – М: Наука, 1968, с. 87-128
4. Заремба Л.К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. 520 с.
5. Заремба Л.К., Тимошенко В.И. Нелинейная акустика. – М.: Из-во МГУ, 1984. 103 с.
6. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. 280 с.
7. Lighthill J. Acoustic streaming // J. of Sound and Vibration, 1973, 61(3). P. 391-418.
8. Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А. Поглощение звука в турбулентном акустическом пограничном слое // Труды XX сессии РАО. Физическая акустика. – М.: ГЕОС, 2008. с. 97-100.
9. Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А. Расчет затухания звука при возбуждении стоячей волны в прямой трубе, имеющей произвольную форму поперечного сечения//Труды XX сессии РАО. Физическая акустика. – М.: ГЕОС, 2008. с. 179-183.
10. Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А. Механизмы поглощения звука в трубах // Труды XXIV сессии РАО. Физическая акустика. – М.: ГЕОС, 2011. с. 207-211.
11. Берестовицкий Э.Г., Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А., Олейник М.М. Механизмы поглощения звука в стоячей волне, возбуждённой в цилиндрической трубе // Судостроение. 2011. Вып. 3. с. 42-44.
12. Берестовицкий Э.Г., Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А. Экспериментальные исследования вклада акустических течений Шлихтинга в диссипацию энергии в стоячей звуковой волне // Судостроение. 2013.
13. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд. МГУ, 1960. – 338 с
14. Беранек А. Акустические измерения. М.: ИЛ, 1952. – 510 с.

ДИССИПАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ВЗВЕШЕННОЙ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Ф.Ф.Легуша, д-р физ-мат.наук, Н.М.Лисенков[1], П.В.Наливкин[2], М.М.Олейник
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия
[1]ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия
[2]Машиностроительное предприятие «Винета», Санкт-Петербург, Россия

DISSIPATION OF ACOUSTIC ENERGY ON A SPHERICAL CAVITY WEIGHTED IN A LIQUID MEDIUM

F.F.Legusha, Dr.Sc, N.M.Lisenkov[1], P.V.Nalivkin[2], M.M.Oleynik
Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia
[1]Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia
[2]Machine-building Enterprise «Vineta», St. Petersburg, Russia

В работе исследуются диссипативные процессы, возникающие при взаимодействии плоской звуковой волны, распространяющейся в жидкости, в которой имеется сферическая полость, заполненная газом. Предполагается, что полость имеет малые волновые размеры $k_1R << 1$, где k_1 – волновое число, R – радиус сферы. Основное внимание в работе уделяется исследованиям механизма диссипации энергии в акустическом пограничном слое границы жидкость-газ и проникновению акустических колебаний в объём газа.

The dissipative processes arising in the interaction of a plane sound wave propagating in liquid in which there is a spherical cavity filled with gas are investigated. It is assumed that the cavity has small wave dimensions $k_1R << 1$, where k_1 is the wave number, and R is the radius of the sphere. The main attention is paid to the research of the mechanism of energy dissipation in the acoustic boundary layer of the liquid-gas boundary and the penetration of acoustic oscillations in the volume of gas.

При распространении звуковых волн в море довольно часто встречается ситуация, когда волна движется в двухфазной среде. Под двухфазной средой мы понимаем морскую воду, в которой взвешены газовые пузыри. Качество расчетов акустических параметров такой среды в большей мере зависят от того, насколько подробно проведён анализ физических процессов, протекающих в пузыре при взаимодействии с ним звуковой волны. Классические подходы к расчёту параметров одиночных пузырей и двухфазных сред изложены, например, в работах [1-5]. Покажем, что теория акустического пограничного слоя (АПС) может быть применена для получения информации о физических процессах, протекающих в пузыре, при взаимодействии с ним звуковой волны.

Постановка задачи. Пусть имеется бесконечное пространство, заполненной однородной жидкостью. В пространстве имеется неподвижная сферическая полость, имеющая радиус R (рис. 1). Внутренний объём полости заполнен газом. Термодинамические параметры газа известны и остаются постоянными во времени. В исходном состоянии полость находится в термодинамическом равновесии и, как следствие этого, тепло- и массообмена с окружающей средой через такую поверхность нет.

С поверхностью полости взаимодействует плоская бегущая звуковая волна $\vec{k}_1$, уравнение движения которой для колебательной скорости имеет вид

$$u_1 = u_{m1}\cos(\omega t - k_1 x), \tag{1}$$

где $\omega = 2\pi f$ - частота, $k_1 = \omega / c_1$ - волновое число, c_1 - скорость звука в жидкости.

Прежде чем решать задачу, введём дополнительные ограничения. Волновой размер полости $k_1R << 1$. Кроме того, выполняется неравенство $\delta_{T2} << R$, где δ_{T2} - толщина теплового пограничного слоя в газе. Как показано в работах [7, 8, 9], при распространении звуковой волны (1) в жидкой среде одновременно с ней возникает волна, представляющая собой акустическую добавку к статической температуре данной среды, а именно

$$T_1' = T_{m1}'\cos(\omega t - k_1 x), \tag{2}$$

где T_{m1}' - амплитуда акустической добавки к статической температуре жидкости.

Величина амплитуды T_{m1}' связана с амплитудой колебательной скорости волны u_{m1} формулой

$$T_{m1}' = \frac{\Gamma_1 - 1}{\beta_{V1}} \cdot \frac{u_{m1}}{c_1}, \tag{3}$$

где Γ_1 - нелинейный параметр жидкости, β_{V1} - коэффициент теплового объемного расширения жидкости.

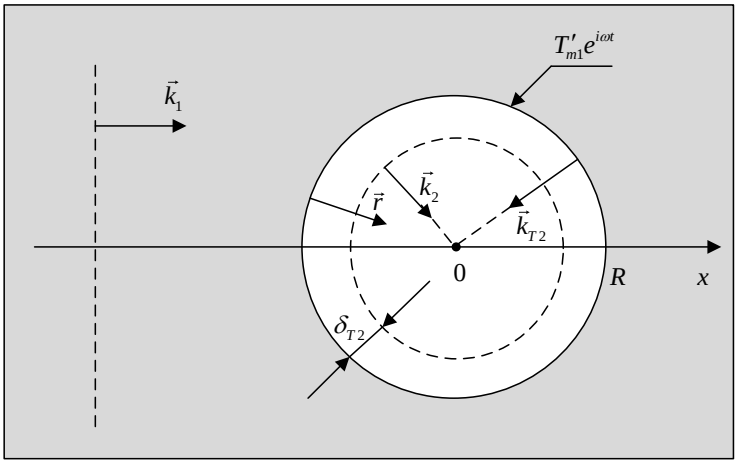


Рис. 1. Схема взаимодействия плоской гармонической звуковой волны $\vec{k}_1$ со сферической полостью: $\vec{k}_{T2}$ - неоднородная тепловая волна; $\vec{k}_2$ - сферическая звуковая волна; δ_{T2} - толщина теплового пограничного слоя в газе.

Решение задачи. Рассмотрим результаты взаимодействия звуковой волны $\vec{k}_1$ с поверхностью сферической полости (рис. 1). Ввиду того, что волновые размеры полости малы, отражение и дифракция звуковой волны на полости отсутствует. По этой же причине можно предположить, что на поверхности сферической полости, находящейся в поле волны (2), амплитуда акустической добавки к температуре изменяется по закону $T'_{m1}e^{i\omega t}$.

Непосредственно на поверхности жидкости, ограничивающей объём газа, должно выполняться термодинамическое граничное условие $T'_{m1} = T'_{m2}$. Это граничное условие выполняется только в случае, когда на внутренней поверхности сферы возникает неоднородная тепловая волна $T'_2(r,t)$ в газе. Уравнение движения захлопывающейся сферической тепловой волны имеет вид

$$T_2'(r,t) = T'_{m1} \cdot e^{i\omega t} \cdot \exp\left(-\frac{(1-i)(R-r)}{\delta_{T2}}\right), \tag{4}$$

где $\delta_{T2} = \sqrt{2a_2/\omega}$ - толщина теплового пограничного слоя; $a_2 = \chi_2/C_{P2}\rho_2$ - коэффициент температуропроводности газа, χ_2 - коэффициент теплопроводности; C_{P2} - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

Появившаяся в полости тепловая волна (4) может существовать только за счёт энергии, отбираемой у основной волны $\vec{k}_1$. Следовательно, при взаимодействии звуковой волны с поверхностью сферической полости наблюдается диссипативный процесс. Удельную мощность теплового потока, возникающего на поверхности сферы в результате возбуждения на ней тепловой волны, можно найти, если воспользоваться законом Фурье

$$q = -\chi_2\left(\frac{dT_2'(r,t)}{dr}\right)_{r=0}. \tag{5}$$

После подстановки в уравнение (5) выражения (4), опуская множитель $e^{i\omega t}$, после несложных преобразований имеем

$$q = \left(1+\frac{\delta_{T2}}{R}\right)q_m, \tag{6}$$

где $q_m = \sqrt{\chi_2\beta_2 C_{P2}} \cdot \sqrt{\pi f} \cdot T'_{m1}$.

Как было показано ранее, в задаче выполняется неравенство $\delta_{T2} << R$. Следовательно, удельная мощность теплового потока $q = q_m$, а мощность, отбираемая у основной звуковой волны, равна

$$W = 4\pi R^2 q_m . \quad (7)$$

Вторичное излучение звука в сфере. В принципе, поставленную задачу можно считать решённой. Однако в исследуемом нами физическом процессе спрятан ещё один эффект, проявление которого заслуживает отдельного анализа. Появление в газе, заполняющем полость, неоднородной тепловой волны (4) из-за термоакустического эффекта [9] приводит к возникновению в нём сферической звуковой волны $\vec{k}_2$ (рис. 1). Звуковая волна $\vec{k}_2$ зарождается на поверхности сферы, радиус которой равен $R - \delta_{T2}$. Уравнение движения этой сферической звуковой волны имеет вид

$$u_{2r} = u_{m2} \frac{R - \delta_{T2}}{(R - \delta_{T2}) - r} \cdot e^{-\alpha_2 r} \cos(\omega t - k_2 r), \quad (8)$$

где α_2 - пространственный коэффициент затухания бегущей звуковой волны; $k_2 = \omega / c_2$ - волновое число волны в газе, c_2 - скорость звука в газе. Амплитуда колебательной скорости u_{m2} для волны (8) может быть рассчитана при помощи выражения из [9]

$$u_{m2} = \sqrt{\pi f \cdot a_2} \cdot \beta_{V2} \cdot T'_{m1}, \quad (9)$$

где β_{V1} - коэффициент теплового объемного расширения газа, заполняющего полость.

По отношению к газу, плотность поверхности жидкости, ограничивающей объем полости, можно считать акустически жёсткой. На этой поверхности должны выполняться граничные условия: $u_{2r} = 0$ и $p_2 \neq 0$. Нетрудно показать, что в рассматриваемом нами случае амплитуда звукового давления на внутренней поверхности сферической полости будет равна

$$p_{m2} \approx 2\rho_2 c_2 u_{m2} . \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что на поверхность полости должна действовать дополнительная переменная сила $F_{m2} \cdot e^{i\omega t}$, где $F_{m2} = 4\pi R^2 p_{m2}$, которая совместно с силой $F_{m1} \cdot e^{i\omega t}$, возникающей на поверхности полости в поле бегущей волны (1), приводит к возбуждению вынужденных колебаний полости. Если сферическую полость рассматривать как пузырь, то выражение для расчёта силы F_{m1} известно [1-5] и имеет вид

$$F_{m1} = 6\gamma_2 P_0 R u_{m1} / f . \quad (11)$$

Численная оценка результатов. Предположим, что пространство (см. рис.1) заполнено водой. Полость – это пузырь, внутренний объем которого заполнен воздухом при статических значениях давления $P_0 = 1{,}0$ атм и температуре $T_0 = 293$ К. Интенсивность звуковой волны $\vec{k}_1$ равна 1,0 Вт/м^2; амплитуда колебательной скорости $u_{m1} = 1{,}16 \cdot 10^{-3}$ м/с; амплитуда акустической добавки к температуре $T'_{m1} = 2{,}7 \cdot 10^{-2}$ К. Параметры пузыря: радиус R = 1,0 мм; резонансная частота пульсационных колебаний f_0 = 3,26 кГц. При принятых выше ограничениях выражения, представленные в этой работе, дают точные значения физических параметров в диапазоне от 0,5 кГц до 30 кГц.

На рис.2 показана частотная зависимость мощности, которая отбирается у основной волны $\vec{k}_1$ и уходит на возбуждение тепловой волны (4), возбуждающейся на поверхности пузыря. Нетрудно заметить, что величина W_1 растет с увеличением частоты пропорционально по $\sqrt{f}$.

Частотная зависимость амплитуды колебательной скорости звуковой волны $\vec{k}_2$, возникающей в газе за счёт термоакустического эффекта, представлена на рис.3. Из графика видим, что величина u_{m2} возрастает пропорционально $\sqrt{f}$.

Амплитуда силы F_{m2}, действующей на поверхность пузыря в результате возбуждения в объёме воздуха сферической звуковой волны $\vec{k}_2$, растет пропорционально $\sqrt{f}$. Согласно выражению (11), амплитуда переменной силы F_{m1} убывает пропорционально f^{-1}. Сопоставление частотных зависимостей для амплитуд F_{m1} и F_{m2} позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, для пузыря, имеющего радиус R = 1,0 мм, на частотах $f \leq$ 80 кГц влиянием силы $F_{m2}(f)$ можно пренебречь. Во-вторых, можно отметить, что кривые для $F_{m1}(f)$ и $F_{m2}(f)$ пе-

ресекутся на частоте 240 кГц, где $F_{m1} = F_{m2}$. На частотах $f > 100$ кГц необходимо учитывать совместное действие сил F_{m1} и F_{m2} на пузырь.

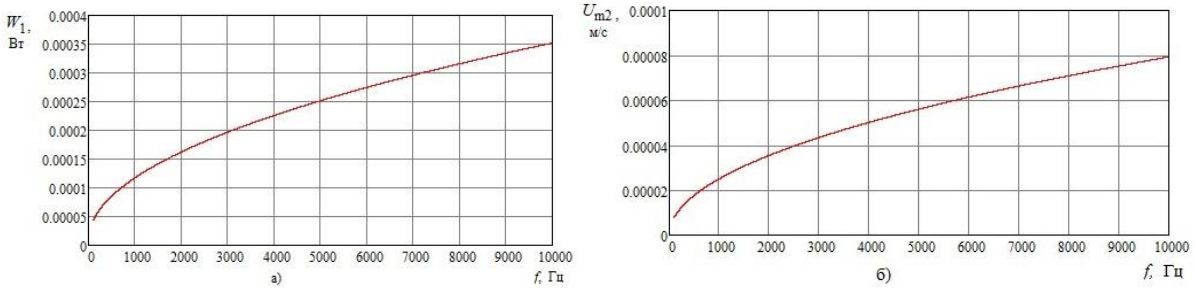


Рис. 2. Частотная зависимость: а) мощности, рассеиваемой на поверхности пузыря, при возбуждении тепловой волны; б) амплитуды колебательной скорости u_{m2} в звуковой волне $\vec{k}_2$.

Заключение. Все выражения, полученные в данной работе, могут быть использованы для оценки диссипации акустической энергии на поверхностях пузырей, вмёрзших в лёд. В дальнейшем необходимо привести дополнительные исследования для случая, когда сферическая полость имеет большой волновой размер. Кроме того, заслуживает внимания задача о взаимодействии звуковых волн со сферой, имеющей малые волновые размеры, для которой выполняется условие $\delta_{T2} \le R$.

Литература

1. Foldy L.L., Carstener E.L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles // JASA. 1947. V. 19. P. 481-501.
2. Devin Charles. Survey of thermal, radiation and viscous damping of pulsating air bubbles in water// JASA. 1959. V. 31(12). P. 1654-1667.
3. Ильичев В.И., Корец В.Л. Мельников Н.П. Акустическое излучение одиночного неподвижного пузырька при периодических пульсациях // Акуст. Журн. 1993. Т.39(1). С. 101-107.
4. Temkin S. Attenuation and dispertion of sound in dilute suspensions of spherical particles// JASA. 2000. V. 108(1). P. 126-146.
5. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука, 2001.
6. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Warmeleiting in einem Gase auf die Schallbewegung Poggendorf's Annalen. 1868. Bd.134, N6, S.166.
7. Константинов Б.П. О поглощении звуковых волн при отражении от твердой границы// ЖТФ. 1939. Т.9(3). С. 226-238.
8. Константинов Б.П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в огрниченных средах. Л.: Наука, 1974.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Гидродинамика. Т.VI. М.: Наука, 1988.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ В ОБТЕКАТЕЛЯХ АНТЕНН ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

А.В.Виноградов, В.З.Голдовский, канд.техн.наук
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

METHODS OF MEASURING AND DETECTING OF ACOUSTIC NOISE SOURCES IN THE DOMES OF SONAR SYSTEM ANTENNA

A.V.Vinogradov, V.Z.Goldovskiy, Ph.D.
Krylov State Research Centre, St. Peterburg, Russia

Определены цели и выполнен анализ адекватности измерений акустических помех (АП) с помощью приемного тракта гидроакустической станции (ГАС) и ненаправленных гидрофонов в обтекателе антенны ГАС. Рассмотрены методы выявления источников и последовательность их применения, в том числе энергетического, корреляционного, модуляционного, с целью рационального применения мероприятий по снижению АП

The objectives and analysis of the adequancy of acoustic noise measurements with the help of receiving subsystem of sonar system and non-directional hydrophones in antenna dome are determined. Methods of identifying sources and the sequence of their application, including energy, correlation, modulation for the purpose of rational application of measures to reduce noises are considered.

Уровни и пространственно-частотные характеристики АП работе ГАС являются основными физическими связующими параметрами системы носитель-ГАС, от которых в решающей степени зависит эффективность ГАС и системы в целом. В связи с этим, с одной стороны, при проектировании носителя ГАС формулируются требования по уровням АП на значимых режимах эксплуатации, а с другой – при проектировании ГАС указываются уровни АП, при которых должны быть обеспечены требуемые характеристики ГАС. С целью контроля выполнения этих требований при испытаниях носителей и ГАС производятся измерения фактических уровней АП, на основании которых формулируется заключение об эффективности использования ГАС на данном носителе. При этом в качестве средства измерений АП может быть использован как собственно приемный тракт ГАС, так и независимые от этого тракта ненаправленные гидрофоны, которые специально устанавливаются в обтекателе антенны ГАС на время проведения измерений АП. Преимуществом использования приемного тракта ГАС является возможность проведения прямых измерений пространственных характеристик АП в рабочем диапазоне частот ГАС. Измерения АП считаются косвенными, так как их результат определяется путем расчетов с использованием значений электроакустической чувствительности приемного тракта ГАС, коэффициента концентрации антенны, а также частотных электрических параметров тракта. Преимуществом использования ненаправленных гидрофонов для измерения АП является возможность проведения измерений АП и выявления их источников в широком диапазоне частот, в том числе анализ спектра огибающей помех (модуляционных характеристик) в широком диапазоне частот по несущей; высокая точность градуировки гидрофонов в лабораторных условиях. Основным недостатком измерений АП с помощью гидрофонов является невозможность получения пространственных характеристик, что затрудняет классификацию источников АП. При этом возможное различие фактически измеренных уровней АП с помощью гидрофонов и ГАС существенно зависит от пространственной структуры поля АП в районе размещения антенны ГАС. При использовании в качестве звукопрозрачного «окна» подкрепленной ребрами жесткости металлической оболочки доминирующим источником помех на тактически важных скоростях хода является шум гидродинамической природы, обусловленный колебаниями и звукоизлучением звукопрозрачной оболочки под действием турбулентных пульсаций давления в пограничном слое. В этом случае поле АП имеет практически изотропный характер и поэтому в металлических обтекателях приведенные к стандартным условиям в пространственной области уровни АП, измеренные на выходе ГАС, хорошо совпадают с результатами измерений с помощью гидрофонов. Принципиально иная ситуация имеет место в обтекателях с безреберной звукопрозрачной оболочкой из стеклопластика, обеспечивающей существенное снижение гидродинамических помех за счет отсутствия реберного набора и практически на порядок большего коэффициента внутренних потерь в материале звукопрозрачной оболочки обтекателя. В этом слечае на тактически важных скоростях хода доминирующими источниками помех являются шумы механизмов и гребных винтов, уровни которых существенно превышают гидродинамический шум. При этом за счет наличия в кормовой части обтекателя помехозащитного звуконепроницаемого экрана [1] пространственная структура поля помех представляет собой неоднородные краевые дифракционные звуковые волны, исходящие из кромок экрана. В случае ориентации антенны на кромки экрана величину, пропорциональную напряжению помех на выходе антенны, определим методом стационарной фазы [2],

причем в высокочастотном асимптотическом приближении амплитуду поля в точке стационарной фазы вычислим методами геометрической теории дифракции [3].

Далее введем в рассмотрение точку наблюдения (в практическом смысле – ненаправленный гидрофон), расположенную на середине кратчайшего расстояния от кромки экрана до поверхности антенны и определим соотношение помех на выходе имеющих одинаковую чувствительность антенны и гидрофона: $I_{\text{ант.}} / I_{\text{гидр.}} = \sqrt{\lambda / 2\pi a}$, где λ – длина звуковой волны; a – радиус антенны. Для имеющих место на практике волновых размеров антенны это отношение составляет – 12 дБ, что соответствует физическому смыслу аддитивной антенны, расположенной в данном случае в ближнем поле по отношению к источнику звуковой волны. После выполнения формальной процедуры приведения уровней АП к стандартным условиям в пространственной области [4], т.е. к условиям эквивалентного изотропного поля оказывается, что отношение $I_{\text{ант.}}\sqrt{K} / I_{\text{гидр.}}$, где K – коэффициент концентрации антенны составляет +8 дБ, что свидетельствует о меньшей помехоустойчивости антенны к полю локального источника в ближнем поле по сравнению с изотропным полем. Этот вывод подтверждается соотношением $I_{\text{ант.}}\sqrt{K} / I_{\text{гидр.}} = \sqrt{S} / \sqrt{a\lambda}$, где S – площадь апертуры антенны; $\sqrt{a\lambda}$ – размер первой зоны Френеля на ее поверхности. Физический смысл этого соотношения заключается в том, что определяемая площадью антенны ее помехоустойчивость к изотропному полю выше аналогичного параметра в ближнем поле локального дифракционного источника.

Рассмотрим далее вариант ориентации антенны, при котором точка стационарной фазы не попадает в пределы рабочего сектора антенны. В этом случае величину, пропорциональную напряжению помех на выходе антенны определим методом полусходящихся рядов по степеням волнового числа [2]. Тогда для отношения помех на выходе антенны и гидрофона получим $I'_{\text{ант.}} / I_{\text{гидр.}} = \lambda / 2\pi a = -24$ дБ, что практически соответствует уровню бокового поля антенны. Приведение уровней помех к стандартным условиям в данном случае дает следующий результат $I'_{\text{ант.}}\sqrt{K} / I_{\text{гидр.}} = -1{,}5$ дБ, свидетельствующий о том, что помехоустойчивость антенны к бегущему дифракционному полю практически соответствует ее помехоустойчивости в изотропном поле помех. Из вышеизложенного следует, что в зависимости от ориентации антенны для рассмотренного примера диапазон изменения уровня помех составляет порядка 10 дБ, причем гидрофон показывает примерно среднее значение в этом диапазоне, соответствующее рабочему диапазону углов обзора антенны.

Эти результаты расчетов подтверждаются данными измерений АП на корабле, которые проводились как с помощью приемного тракта ГАС, так и с использованием гидрофонов в камере обтекателя антенны. Результаты измерений АП с помощью приемного тракта ГАС (распределения уровней помех по курсовым углам) и гидрофонов на частоте работы ГАС приведены на рис. 1 в условных логарифмических единицах относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па на трех скоростях хода. Видно, что зарегистрированные гидрофонами уровни помех, показанные на рис. 1 прямыми линиями, практически соответствуют усредненным по курсовым углам в рабочем диапазоне углов обзора уровням помех на выходе приемного тракта ГАС. На скоростях хода свыше $1{,}4V_{\text{кр}}$ ($V_{\text{кр}}$ – скорость хода, при которой возникает кавитация на гребных винтах) существенно увеличивается перепад между максимальными и минимальными уровнями помех на выходе антенны, что свидетельствует о наличии некоторого диффузного фона в камере обтекателя на скоростях до $1{,}4\,V_{\text{кр}}$.

В результате анализа спектров огибающей установлено, что на этих скоростях в спектрах огибающей доминируют дискретные составляющие, характерные для работы главных двигателей и только на закритических скоростях хода свыше $1{,}4V_{\text{кр}}$ в спектре огибающей помех на частоте работы ГАС появляются интенсивные дискретные составляющие, соответствующие оборотным (вальным) и лопастным частотам вращения гребных винтов. Таким образом, из взаимно дополняющих друг друга анализа угловых распределений помех; спектров их огибающей и зависимостей уровней шума и помех от скорости хода следует, что в диапазоне тактически значимых закритических скоростей хода от $V_{\text{кр}}$ до $1{,}4V_{\text{кр}}$ достаточно весомым источником помех являются главные двигатели, тогда как на скоростях хода больших $1{,}4V_{\text{кр}}$ доминирующим источником помех является кавитационный шум гребных винтов.

Виброакустическая энергия от работы главных двигателей может трансформироваться в АП различными физическими механизмами, а именно:

- как шумовая составляющая, обусловленная излучением корпусных конструкций в районе машинного отделения и существующая в виде шума, распространяющегося по воде вдоль корпуса до обтекателя;

- как вибрационная составляющая, обусловленная распространением вибраций от машинного отделения до носовой оконечности корабля с последующим звукоизлучением, вызванным этими вибрациями, прилегающих к обтекателю корпусных конструкций.

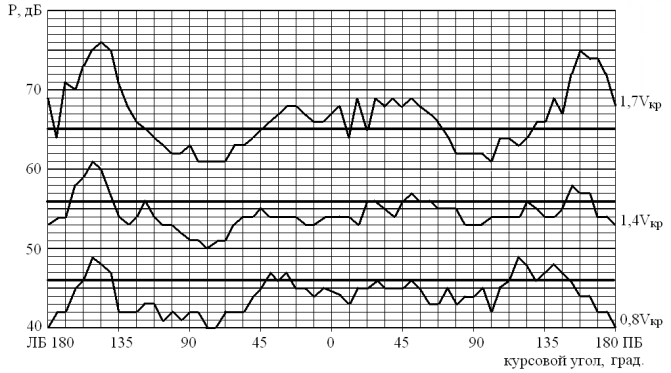


Рис. 1. Измерения помех трактом ГАС и гидрофонами.

Определить относительные вклады шумовой и вибрационной составляющих от работы главных двигателей можно корреляционными методами [5]. Принимая во внимание, что в рабочем диапазоне частот ГАС скорость изгибных волн в обшивке корпуса корабля примерно в 2,5 раза меньше скорости звука в воде, можно полагать, что соотношение шумовой и вибрационной составляющих будет соответствовать соотношению максимумов корреляционной функции для значений времен задержки, характерных для путей, по которым распространяется колебательная и звуковая энергия между опорным гидрофоном под корпусом в районе машинного отделения и приёмниками в камере обтекателя антенны ГАС. В случае невозможности размещения опорного гидрофона под днищем корабля в районе установки главных двигателей можно использовать другой метод, основанный на различиях в пространственных функциях корреляции шума в обтекателе, создаваемого удаленными и близко расположенными источниками. Шумовая составляющая от работы главных двигателей в районе обтекателя имеет вполне определенное направление распространения и представляет собой «бегущую» в направлении обтекателя звуковую волну. Вибрационная составляющая, обусловленная звукоизлучением прилегающих к обтекателю корпусных конструкций под действием диффузного поля вибраций, характеризуется звуковым полем, воздействующим на гидрофоны и приёмники антенны практически равномерно со всех направлений. В этом случае нормированная функция пространственно-временной корреляции шума в обтекателе при измерении её двумя приёмниками, разнесёнными на расстояние d друг от друга имеет вид

$$r_{12}(d,\tau) = r_{ш}(d,\tau)\left[P_{ш}^2/(P_{ш}^2+P_{в}^2)\right] + r_{в}(d,\tau)\left[P_{в}^2/(P_{ш}^2+P_{в}^2)\right],$$

где $P_{ш}$ и $P_{в}$ – среднеквадратичные значения шумовой и вибрационной составляющих; $r_{ш}(d, \tau)$ и $r_{в}(d, \tau)$ – свойственные им нормированные пространственно-временные функции корреляции. В практическом случае, при измерениях функции корреляции двумя гидрофонами, расположенными на одной вертикали $r_{ш}(d, \tau) = 1{,}0$ при $\tau = t_3 = 0$.

В свою очередь, функция корреляции для диффузного звукового поля вибрационной составляющей $r_{в}(d,\tau) = \gamma(\Delta f,\tau)/(\sin kd)/kd)\cos(\omega_0\tau)$ стремится к нулю при любом времени задержки в случае достаточно большого пространственного разделения приёмников. Тогда максимум функции корреляции $r_{12}(d, \tau)$ численно будет равен отношению интенсивности шумовой составляющей к интенсивности суммарной помехи от работы главных двигателей.

Из вышеизложенного следует, что результаты измерений с помощью гидрофонов и приемного тракта ГАС взаимно дополняют друг друга, позволяя получить объем информации о характеристиках помех в частотной и пространственной областях, необходимый и достаточный для определения доминирующих источников помех и разработки рекомендаций по их снижению.

Литература

1. Урик Р.Д. Основы гидроакустики. Л., Судостроение, 1978.
2. Вакман Д.Е. Асимптотические методы в линейной радиотехнике. М., Сов. радио, 1962.
3. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М., Связь, 1978.
4. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л., Судостроение, 1973.
5. Болгов В.М., Плахов Д.Д., Яковлев В.Е. Акустические шумы и помехи на судах. Л., Судостроение, 1984.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ И ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МЯГКО-ТВЕРДЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВСПЛЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЯ

А.Г.Антонова, А.А.Горелов, В.А.Колышницын[1], канд.техн.наук, В.П.Маршов[1], канд.техн.наук,
А.М.Цветков[1], Ю.Ф.Шлемов[1], канд.техн.наук
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия
[1]ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

DEFINITION OF THE EFFECTIVENESS OF REDUCING VIBRATION AND NOISE EMISSION OF SOFT-SOLID CONSTRUCTIONS OF A FLOATING DEVICE EXCITED BY TURBULENT PRESSURE FLUCTUATIONS

A.G.Antonova, A.AGorelov, V.A.Kolyshnitsin[1], Ph.D., V.P.Marshov[1], Ph.D., A.M.Tsvetkov[1],
Y.F.Shlemov[1], Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia
[1]Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

При нанесении мягкого покрытия на упругую конструкцию, обтекаемую турбулентным потоком, уменьшается воздействие на неё турбулентных пульсаций давления, что приводит к снижению уровней вибраций и шумоизлучения конструкции. Показано, что при движении всплывающего устройства в воде со скоростями 15-25 м/сек эффективность нанесения мягкого покрытия на корпусные конструкции составила 15-20 дБ по уровням вибраций стеклопластиковых и металлических конструкций и 14-18 дБ по уровням шумоизлучения стеклопластиковых конструкций на частотах выше диапазона неволновых колебаний.

When a soft coating is applied to an elastic construction, the streamlined by the turbulent flow reduces the effect of the turbulent pressure fluctuations on it, which leads to decrease in the level of vibrations and noise emission of the construction. It is shown, that when the floating device was moving in water at velocities of 15-25 m/c, the efficiency of applying a soft coating to the hull constructions was 15-20 dB for the levels of vibration of fiberglass and metal constructions and 14-18 dB for the levels of noise emission of fiberglass constructions at frequencies above the range of non- wave oscillations.

При воздействии турбулентных пульсаций давления на обтекаемую потоком упругую конструкцию в последней возникают вибрации, которые создают шумоизлучение и неволновые колебания жидкой среды в ближней зоне этих конструкций [1]. При нанесении на упругую конструкцию мягкого покрытия со стороны натекающего потока происходит снижение вибрации и шума обтекаемой конструкции, что связывают [2] либо с улучшением диссипативных характеристик конструкции, либо с уменьшением сил, возбуждающих конструкцию при передаче на нее через покрытие турбулентных пульсаций давления.

С целью оценки эффекта уменьшения сил воздействия турбулентных пульсаций давления на обтекаемую упругую конструкцию при нанесении мягкого покрытия на ее поверхность были выполнены в гидродинамической трубе измерения уровней колебаний, воспринимаемых миниатюрным (диаметром 1,3 мм) датчиком давления на поверхности покрытия из форполимера и при заглублении датчика в покрытие на 43 и 80 мм.

Сравнительные измерения выполнялись при числах Рейнольдса $\sim 5 \cdot 10^6$ по длине стенки гидротрубы, на которой устанавливалась заподлицо крышка с покрытием форполимера толщиной 80 мм. Передаточная характеристика вязкоупругого покрытия между уровнями поля давлений на поверхности покрытия и внутри покрытия свидетельствует о существенном снижении уровней поля давления при его распространении в слое форполимера. Эффект снижения растет с повышением частоты псевдозвуковых колебаний (рис. 1).

Для оценки суммарного эффекта уменьшения вибраций и шумоизлучения при нанесении полиуретанового покрытия на обтекаемую упругую конструкцию было выполнено сравнение уровней поля вибрации и шумоизлучения твердой (из однородного стеклопластика) и мягко-твердой (однородного стеклопластика с наружным мягким покрытием из полиуретана) конструкций, находящихся под воздействием одного и того же поля псевдозвуковых пульсаций давления турбулентного потока, набегающего на испытуемую конструкцию.

С этой целью было использовано всплывающее устройство (ВУ) «Дельфин» [3], оснащенное однородной носовой оконечностью из стеклопластика. Устройство всплывает вертикально вверх под действием силы Архимеда с глубины 200 м со скоростью 10-25 м/с. При этом отсутствуют другие источники шумоизлучения, кроме возбуждения корпуса полем турбулентных пульсаций давления (рис. 2).

Оценка эффективности снижения вибрации мягко-твердой конструкции носовой части всплывающего устройства включала контроль ее вибрации и вибрации близлежащих конструкций всплывающего устройства с помощью вибропреобразователей. Контроль шумоизлучения

выполнялся блоком приемников давления, разработанным и изготовленным АО «Концерн «Океанприбор». Блок приемников давления крепился на специальной раме и был расположенным на расстоянии ~ 30 см от оболочки в центре носовой части, длина блока ~ 1,5 м (рис. 3, 4).

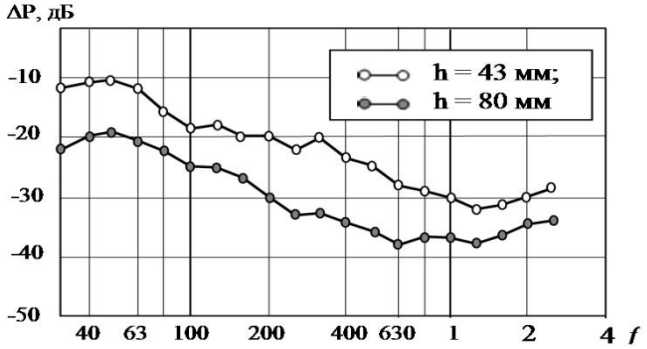


Рис. 1. Снижение уровней псевдозвуковых давлений при заглублении преобразователя в форполимер.

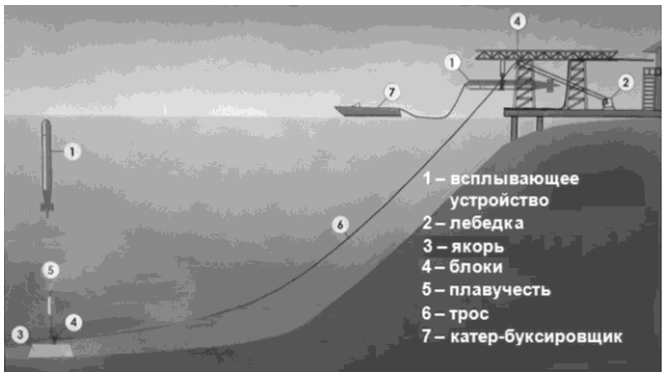


Рис. 2. Схема морского стенда с всплывающим устройством (ВУ) «Дельфин».

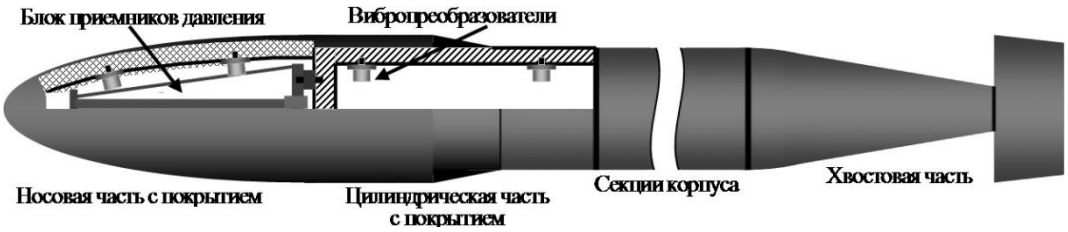


Рис. 3. Всплывающее устройство с блоком приемников давления и вибропреобразователями.

Рис. 4. Блок приемников давления, закрепленный в несущей раме.

Эксперимент предусматривал получение исходной информации о виброакустических характеристиках ВУ с носовой частью твердой конструкции из стеклопластика толщиной 10 мм, затем его повторение с носовой частью мягко-твердой конструкции путем нанесения на поверхность стеклопластика полиуретанового покрытия толщиной 25 мм.

Результаты испытаний с твердой носовой частью всплывающего устройства при скорости всплытия 25 м/с приведены на рис. 5. Аналогичный вид имели результаты, полученные на дру-

гих скоростях в диапазоне 15-25 м/с. Из рисунка видно, что на частотах ниже 1 кГц приемник давления фиксирует, как и ранее [3], неволновые колебания оболочки носовой части. На частотах выше 1 кГц спектры уровней поля переменного давления определяются в основном шумоизлучением конструкций носовой части. Спектры вибраций и шумоизлучения гладкие без присутствия узкополосных максимумов. Различие между уровнями пульсаций давления на твердой стенке и уровнями шумоизлученияв в камере носовой части составляют 40-60 дБ. Качественно спектры вибрации и шумоизлучения носовой части всплывающего устройства практически идентичны друг другу.

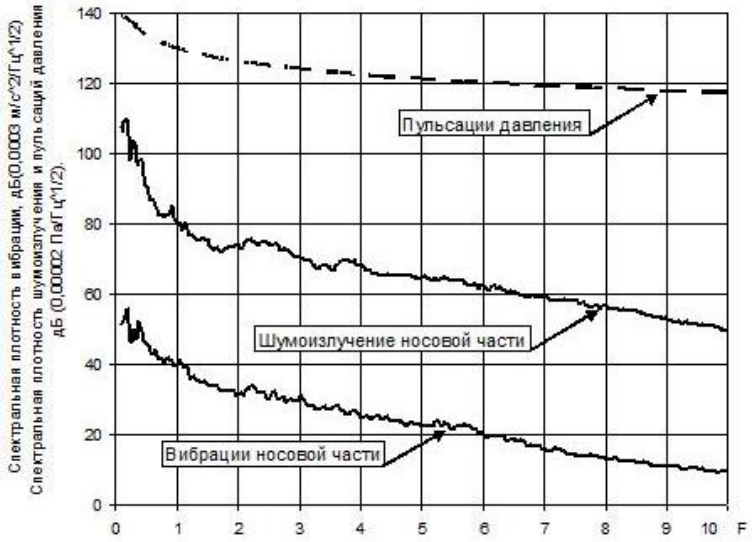
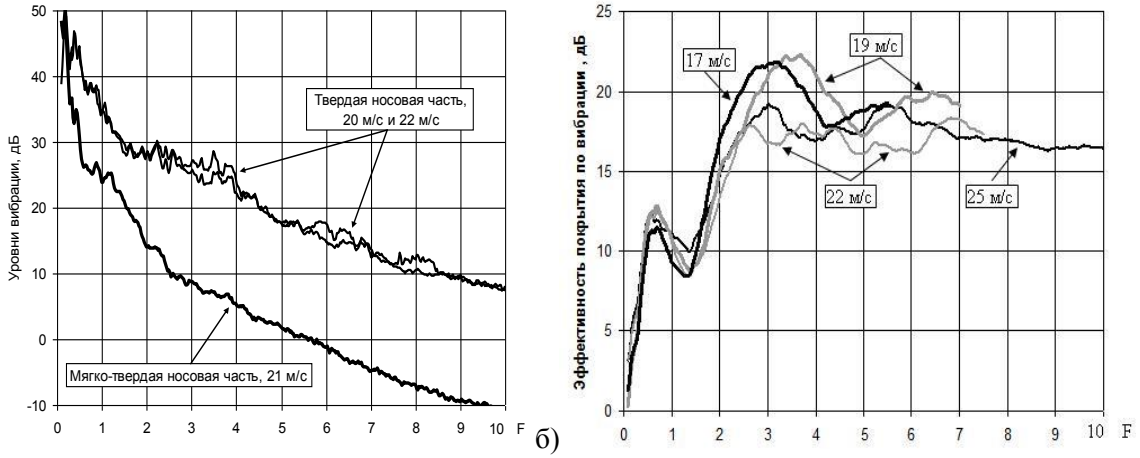


Рис. 5. Результаты измерений с твердой носовой частью ВУ, скорость всплытия 25 м/с.

При нанесении полиуретанового покрытия на поверхности носовой и соседней цилиндрической частей ВУ эксперимент был повторен. Сравнение результатов испытаний носовой части всплывающего устройства показали следующее:

– на частотах выше 2 кГц уровни вибрации оболочки носовой части на идентичных скоростях всплытия снизились на 15-20 дБ (рис. 6);

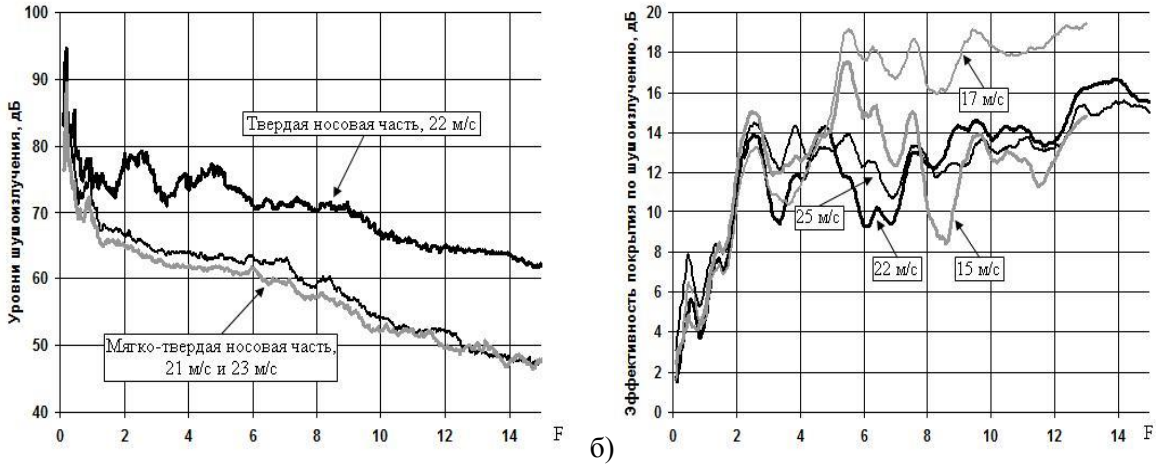
– на частотах выше 2 кГц уровни шумоизлучения конструкций носовой части на идентичных скоростях всплытия снизились на 14-18 дБ (рис. 7).



а) б)

Рис. 6. Спектральные уровни вибраций твердой и мягко-твердой носовой части ВУ (а) и эффективность покрытия в части снижения вибраций носовой части ВУ (б).

Таким образом, показано, что для рассмотренной мягко-твердой конструкции носовой части всплывающего устройства нанесение покрытия на упругую твердую конструкцию приводит к существенному снижению ее вибрации и шумоизлучения. Величина эффекта снижения шумоизлучения идентична величине снижения вибраций конструкции.



а) б)

Рис. 7. Спектральные уровни шумоизлучения твердой и мягко-твердой носовой части ВУ (а) и эффективность покрытия в части снижения шумоизлучения носовой части ВУ (б).

Литература

1. Романов В.Н., Иванов В.С. Излучение звука элементами судовых конструкций. С-Пб, Судостроение 1993.
2. Кирпичников В.Ю. Вибрация и шумоизлучение обтекаемых конструкций судна. С-Пб, ФГУП «Крыловский государственный научный центр, 2016.
3. Батанов А.К., Колышницын В.А., Маршов В.П., Цветков А.М. Экспериментальное исследование поля давлений на электроакустических преобразователях под обтекателями различной конструкции. С-Пб, Труды XII конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики, 2014, с.143-146.

АКТУАЛЬНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЖИВУЧЕСТИ В АКТИВНО-ПАССИВНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

А.В.Приходько, Д.О.Кривошея, канд.техн.наук
Академия ФСО России, Орел, Россия

RELEVANCE OF IMPLEMENTATION OF METHODS TO IMPROVE SURVIVABILITY IN ACTIVE / PASSIVE SONAR SYSTEMS FOR UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE

A.V.Prikhodko, D.O.Krivosheya, Ph.D.
Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Orel, Russia

В материалах данной статьи затрагиваются вопросы необходимости внедрения методов и алгоритмов повышения функциональной живучести в активно-пассивные гидроакустические системы освещения подводной обстановки, с целью повышения общего уровня защищенности охраняемого объекта.

The materials of this article address issues related to the introduction of methods and algorithms for increasing functional survivability in active-passive sonar systems for underwater environment surveillance, with the aim to increase general level of protection of the guarded object.

Российская Федерация занимает первое место в мире по площади водных пространств. По всей протяженности прибрежных зон, расположено множество объектов особой важности: ГЭС, нефтедобывающие инфраструктуры, АЭС, портовые зоны, объекты промышленности.

Количество террористических групп, специализирующихся на атаках с использованием водных акваторий значительно увеличилось за последние 10 лет. Тактика проведения атак на водные объекты особой важности варьируется от использования катеров, начиненных взрывчатыми веществами, до использования роботизированных мини-подлодок и торпед. Опасность преступлений террористического характера на водных пространствах Российской Федерации чрезвычайно высока и определяется возможностью появления больших человеческих жертв и тяжелых экологических последствий, а также нанесение значительного ущерба в техногенной и политической сфере [1]. С учетом этого, задача защиты особо важных объектов со стороны водных пространств является задачей государственной важности. Для пресечения террористических актов во внутренних водах, в территориальном море, вооруженным силам РФ разрешено использовать оружие и боевую технику [2].

В условиях растущей угрозы мирового терроризма и сложности географического расположения, выше перечисленные объекты требуют особого подхода к разработке, построению и организации системы безопасности.

При проектировке системы безопасности объектов особой важности необходимо организовать надежный защитный периметр. Периметр наземной системы защиты объекта должен быть дополнен водным участком, замыкающимся в водной среде, выходящим к урезу воды границы сухопутного участка, создавай вокруг объекта единый замкнутый контур охранения. В случае нахождения объекта полном окружении водной средой, необходимо организовать надводный и подводный контур охранения.

Контур охранения строится на базе интегральные системы безопасности (ИСБ). В общем виде ИСБ представляет собой совокупность устройств ввода/вывода информации и линий передачи данных.

В качестве основы для создания подводных и надводных охранных контуров используются ИСБ с применением гидроакустических средств (ГАС), на базе пассивных и активных сонаров и охранных датчиков других типов.

Структура ИСБ в водной среде реализуется, как в виде одиночных ГАС, так и ГАС объединённых в сетевую структуру, в зависимости от протяженности водного охранного контура.

В зарубежных источниках архитектура охранных контуров на базе ГАС классифицируют следующим образом [3]:

- двухмерные системы обнаружения злоумышленников – ГАС закреплены в одной горизонтальной плоскости;
- трехмерные системы обнаружения злоумышленников – системы обнаружения в которых, ГАС располагаются в нескольких горизонтальных плоскостях, в зависимости от подводного рельефа;
- системы обнаружения злоумышленников, основанные на автоматизированных подводных механизмах – самоорганизующиеся системы, основанные на роботизированных ГАС с собственными двигателями.

Выше перечисленные системы обнаружения строятся на базе телекоммуникационных систем следующих типов: кабельные системы, беспроводные системы.

Кабельные системы в условиях водной среды является крайне уязвимыми. Помимо природных негативных факторов, таких как солевые отложения, шторма, коррозия, существует высокая вероятность функционального отказа, ГАС и коммуникационных линий, вследствие террористической атаки на систему обнаружения. Системы, основанные на беспроводной связи, являются менее уязвимы, но качество связи значительно ниже, вследствие того, что водная среда имеет большое количество переменных параметров таких, как: температура воды, прозрачность, скорость перемещения водных масс, кроме того в водной среде ярко выражено воздействие эффекта Доплера.

В беспроводных системах зарубежного производства существует функция, позволяющая осуществлять восстановление логической структуры системы, в случае функционального отказа элементов, а также некорректной конфигурации транспортной составляющей [4].

В кабельных системах обнаружения злоумышленника (AquaShield, PointShield Mod 3 и др.) в случае отказа, существует возможность перехода на резервные ГАС и линии связи.

Информация от ГАС передается по сети передачи информации в центр обработки и принятия решения ИСБ, после чего оператор анализирует обобщенные данные и принимает решение о необходимости принятия мер по противодействию нарушителю. Главной задачей гидроакустических систем освещения подводной обстановки является обеспечение достаточного уровня защищенности объекта особой важности. В случае функционального отказа одного из узлов или нарушения в работе системы связи, защищенность объекта значительно снижается, что становится предпосылкой для проникновения злоумышленника на охраняемую территорию и совершения террористического акта.

Для предотвращения ситуации подобного рода система обнаружения злоумышленников должна быть способна функционировать в условиях частичного отказа одного или нескольких элементов системы, потери связи с центром управления. Данное свойство называется живучестью. Живучесть системы обнаружения в водной среде разделяют на структурную и функциональную [5].

Структурная живучесть обеспечивается путем внедрение структурной избыточности, а именно добавлением резервных элементов системы, таких как узлы, линии связи, центры управления. Данный подход влечет за собой дополнительные расходы в ходе проектировки и развертывание системы.

Функциональная живучесть обеспечивается внедрением специальных алгоритмов, позволяющих в случае отказа элементов системы обнаружения перераспределять имеющиеся пропускную способность каналов связи, вычислительные мощности ГАС и другие функциональные ресурсы с целью повышения общего уровня функционирования системы.

Таким образом, внедрение технологии повышения живучести в ИСБ позволяет повысить уровень защищенность объекта особой важности. При проектировке гидроакустических систем освещения подводной обстановки, необходимо внедрить механизм, обеспечивающий как функциональную, так структурную живучесть, для того, чтобы избежать полного отказа системы. В общем виде живучесть системы определяется следующим выражением:

$$R(\Phi_к, t) \geq R^* = const \quad (1)$$

где $\Phi_к$ – компоненты системы, а $R(\Phi_к, t)$ среднее количество работоспособных элементов в момент времени $t \geq 0$, R^* - минимально допустимое количество работоспособных функциональных компонентов, при котором производительность системы остается на требуемом уровне [5]. Кроме того, внедрение технологий повышения живучести в системы мирного мониторинга водных акваторий позволит снизить расходы, возникающие вследствие простоя системы, ожидающей ремонта/замены ее элементов.

В соответствие с проведенным анализом мирового рынка гидроакустических систем освещения подводной обстановки, отечественные разработки, уступают зарубежным аналогам по техническим и эксплуатационным характеристикам. В условиях политики импортозамещения принятой в РФ, разработка и внедрение систем повышения живучести в системы обнаружения злоумышленника отечественного производства, позволит не только повысить защищенность охраняемого объекта особой важности, но и позволит снизить расходы на обслуживание системы. Задачи развития и привлечения научно-технического потенциала в данную область гидроакустики является приоритетной в направлении развития отечественных технологических инноваций.

Литература

1. Марков С. Терроризм на море - угроза национальной безопасности России / С.Марков // Обозреватель = Observer. 2011. № 4(255). С.32-41.
2. Российская Федерация. Законы. О противодействии терроризму [Электронный ресурс]: Федеральный закон РФ от 6 марта 2006 г. N 35-ФЗ (с исправлениями и дополнениями) // http://base.garant.ru/12145408/.
3. Akyildiz, I.Underwater acoustic sensor networks: research challenges /I.Akyildiz, D.Pompili, T.Melodia //Elsevier's Journal of Ad Hoc Networks. 2005. Vol. 3. N 3. pp.257–279.
4. Wang, W. Security and Networks, Vol. x, No. x, 200x. Visualisation of wormholes in underwater sensor networks: a distributed approach / Weichao Wang, Jiejun Kong, Bharat Bhargava, Mario Gerla / Int. J. Security and Networks.-2008.-Vol. 3. N. 1. pp.10-23.
5. Додонов А.Г. Живучесть информационных систем /А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. Киев: Наук. Думка, 2011. 256 с.

АНАЛИЗ АКВАТОРИЙ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНЫМ СИЛАМ И СРЕДСТВАМ

Д.О.Кривошея, канд.техн.наук, В.Г.Сосунов, канд.техн.наук
Академия ФСО России, Орел, Россия

ANALYSIS OF THE AQUATORIES OF PROTECTED OBJECTS IN THE DESIGN OF SYSTEMS OF DETECTION AND IMPACT CONTROL AGAINST UNDERWATER FORCES AND MEANS

D.O.Krivosheya, Ph.D., V.G.Sosunov, Ph.D.
Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Orel, Russia

Рассматриваются вопросы анализа акватории с целью правильного выбора гидроакустического или иного типа оборудования обнаружения и классификации подводных объектов и противодействия им для повышения степени защищенности охраняемых объектов, к которым прилегает исследуемая акватория.

We consider problems of analysis of the water area for the purpose of the correct choice of hydroacoustic or other type of equipment for detection and classification of underwater objects for increasing the degree of protection of protected objects to which the investigated water area is adjacent.

Для любого государства вопросы охраны особо важных объектов, повышенной значимости, опасности и жизнеобеспечения имеют огромное значение в условиях возросшей активности существующих террористических организаций, образования новых, а также роста мировой напряженности. Множество таких объектов могут располагаться на различных участках местности, открытых и закрытых, внутри комплекса зданий и отдельно стоящими объектами, на равнинной местности, в горах, на территории акваторий (нефтяные и газодобывающие комплексы), на участках суши сопряженных с водными акваториями. Одним из сложнейших направлений организации защиты таких объектов является предотвращении угрозы со стороны подводной части прилегающих водных акваторий.

Организация обнаружения подводных сил и средств на объекте реализуется с помощью гидроакустических станций (ГАС), магнитометрических систем, систем лазерного видения и др., которые реализуется в виде части комплекса интегрированной системы защиты. Сами датчики данных систем, как правило, находятся в водной среде, что существенно усложняет выполнение возложенных на них задач в силу сложной физики распространения волн. Расположение элементов и организация работы самих систем физической защиты (СФЗ) объекта выполняются на этапе ее проектирования, к которым относятся:

- разработка перечня угроз;
- определение жизненно важных центров объекта и их категорирование;
- разработка моделей потенциальных нарушителей;
- оценка эффективности существующей СФЗ;
- разработка вариантов создания (совершенствования) СФЗ;
- оценка основных характеристик (эффективность-стоимость, надежность и т. п.) указанных вариантов;
- выбор оптимального варианта по критерию «эффективность-стоимость»;
- разработка предложений (плана) реализации выбранного варианта с учетом ограничений практического характера (ресурсы и т. п.). [1].

Кроме данного списка мероприятий наличие прилегающих акваторий, со стороны которых могут возникать угрозы из выработанного перечня, может проводиться ряд дополнительных мероприятий, к которым относятся:

- проведение батиметрических съемок и построение рельефа дна прилегающей акватории. Данный вид работ является необходимым этапом как при определении перечня угроз и разработке моделей потенциальных нарушителей, так и при разработке вариантов возможных типов СФЗ для объектов;

- определение солёности воды – ослабление колебаний ультразвуковых волн в воде происходит в следствие расширения их фронта, а также поглощения волн и рассеяния. Описывается данное свойство среды коэффициентом затухания $\boldsymbol{\beta}$, который различен для соленой и пресной воды [2].

- температурный режим – определяет свойства рефракции, которая из-за температурного градиента водного слоя может быть положительной и отрицательной. Соленость воды так же может изменяться в зависимости от температуры. Например, испарение воды с поверхности водной среды приводит к тому, что соленость верхних слоев незначительно увеличивается [3].

- гидродинамическая обстановка – описывает поведение водных массивов в условиях климатических изменений, ветровой обстановки, водообмена с соседствующими акваториями (морями, руслами рек), в том числе годовой ход уровня моря;

- наличие защитных и причальных сооружений – позволяет более точно определить модель нарушителя, а также правильно провести меры по подготовке и организации охранных мероприятий на объекте;

- наличие фарватеров и проходных каналов – оказывает влияние на выбор оборудования, может потребоваться дополнительные системы для обнаружения и противодействия подводным силам и средствам, такие как, например, системы компьютерного зрения;

- анализ биологического состава воды – наличие подобного рода данных позволят спланировать интенсивность проведения работ по обслуживанию ГАС и иных объектов системы охраны объектов, в том числе заиливания и других последствий жизнедеятельности биологических организмов;

- вероятность возникновения опасных гидрологических явлений – последствия данных явлений может привести к тому, что значительно снижается степень защищенности охраны и обороны объекта до момента полного восстановления охранной инфраструктуры. Одним из опасных последствий может является утеря ГАС в результате крупного шторма.

- особенности береговой линии акватории – влияет на проектирование систем защиты акваторий и на долгосрочное прогнозирование естественного разрушения берега волнами и течениями [4].

Таким образом, для того, чтобы разработать СФЗ объекта с прилегающей акваторией, необходим большой объем дополнительных данных, сбор которых позволит потенциальным исполнителям разрабатывать проекты будущих решений. Необходимость сбора подобной информации ложится на заказчика в том случае, когда он не может организовать допуск на объект на этапе исследования рынка и возможных исполнителей части или всей СФЗ, а также для ускоренной работы с различными исполнителями. Разработка методики по систематизации сбора, определению необходимого и достаточного объема информации является следующим шагом в анализе акваторий охраняемых объектов при проектировании систем обнаружения и противодействия подводным силам и средствам и позволит не только сократить время на выполнение подготовительных этапов при проектировании и разработки СФЗ, но и более точно сформировать ТЗ на СФЗ.

Литература

1. Степанов, Б.П. Основы проектирования систем физической защиты ядерных объектов: учебное пособие / Б.П. Степанов, А.В. Годовых; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
2. Яковлев, А. Н. Гидролокаторы ближнего действия /А.Н. Яковлев, Г.П.Каблов. – Л: Судостроение, 1983. – 200 с. – (Библиотека инженера гидроакустика).
3. Румынская И.А. Основы гидроакустики /И.А.Румынская. - Л: Судостроение. 1979. - 214 с., ил.
4. Маругина В.М. Квалиметрия морских прибрежных акваторий /В.М. Маругина, М.А. Спиридонова. – СПб.: Политехника, 2013. – 258 с.: ил.

РАЗВИТИЕ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «ШЕЛЬФ-2014»

Д.Г.Ковзель, канд.техн.наук, В.А.Гриценко, И.В.Медведев
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

DEVELOPMENT OF HARDWARE AND SOFTWARE OF TELEMETRIC COMPLEX BASED ON BOTTOM SONAR SYSTEM «SHELF-2014»

D.G.Kovzel', Ph.D., V.A.Gritcenko, I.V.Medvedev
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Представлены результаты развития в 2015-2017гг. измерительного комплекса, разработанного в ТОИ ДВО РАН для мониторинга уровней антропогенных шумов на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Для задач планируемой в 2019 г. сейсморазведки разработаны новые диагностические программы и модули, расширены функциональные возможности рабочих устройств, модулей и программ. Программное обеспечения берегового поста позволяет отображать акустическую обстановку в режиме реального времени. Производится постоянный автоматический контроль координат и технического состояния донных станций и буев. При выходе параметров за разрешенные пределы производится визуальное оповещение оператора.

Results of development in 2015-2017 of the measuring complex created in TOI FEB RAS for monitoring anthropogenic noise levels on the northeast shelf of Sakhalin Island are provided. For the tasks of seismic survey planned in 2019, new diagnostic programs and modules were developed, functionality of working devices, modules and programs was expanded. Software of shore post allows to visually display the acoustic environment in real time. Constant automatic control of coordinates and technical condition of bottom stations and buoys is carried out. When the parameters exceed the set limits, the operator is visually alerted.

Автономная донная измерительная гидроакустическая станция «Шельф-2014» [1] была разработана в ТОИ ДВО РАН для акустического мониторинга антропогенных сигналов и шумов на шельфе о. Сахалин в районах летне-осеннего нагула серых китов, которые занесены в «Красную книгу» РФ. Необходимость такого мониторинга обусловлена тем, что вблизи этих районов производится добыча углеводородов с помощью морских платформ и наклонного бурения с берега. Во время проведения на шельфе сейсморазведочных исследований с применением мощных импульсных сигналов организуется также мониторинг в режиме реального времени [2]. Для обеспечения этого режима в 2015 г. на базе донной станции был создан аппаратно-программный комплекс, включающий поверхностные телеметрические буи, аппаратуру гидроакустической связи со станциями и береговую инфраструктуру – сети передачи данных, береговые приемные посты и центральный пост (ЦП) управления мониторингом [3, 4]. Станция обеспечивает непрерывную запись акустического сигнала в частотном диапазоне 2-15000 Гц, ее собственные шумы не превышают -140 дБ от предельного уровня сигнала в 1-герцовом окне БПФ. На телеметрический буй поступает цифровой сигнал в частотном диапазоне 2-2000 Гц. В 2015 г. этот сигнал мог быть передан на береговые приемные посты по цифровому УКВ ЧМ радиоканалу, а результаты специальной обработки – на центральный пост мониторинга (ЦП) по глобальной спутниковой сети Иридиум. Управление работой буя с ЦП осуществляется также через Иридиум. Для дистанционного контроля состояния станций «Шельф-2014», установленных без телеметрического буя, они оснащены встроенными акустическими модемами. Опрос станций производится посредством специально изготовленного телекомандного устройства (ТКУ) с борта судна (рис. 1).

Измерительный комплекс «Шельф-2014» активно используется по настоящее время. Накопленный в экспедициях 2015-2017 гг. опыт позволил провести ряд модернизаций, расширяющих его функциональные возможности, повышающих надежность подготовки и работы устройств для мониторинга сейсморазведки, планируемой в 2019 г. Наиболее значительные аппаратные и программные доработки проведены в телеметрическом буе и в алгоритмах его взаимодействия с постом управления.

Буй дополнен GPS-ГЛОНАСС приемником, что позволяет контролировать его географическое положение. Координаты передаются на ЦП вместе со словом состояния донной станции и буя, содержащим также номер станции, доступный объем памяти для записи данных на станции, напряжение батарей электропитания станции и буя, режимы работы буя и признак целостности кабеля между станцией и буем. Расширены возможности программы контроллера буя в части обработки акустического сигнала. Акустическая экспозиция для полосы частот 15-2000 Гц (SEL) и пиковый уровень сигнала (SPL) могут рассчитываться на полусекундных временных интервалах с перекрытием (этот режим оптимален для импульсных сигналов, например, сейсмоакустиче-

ских) и на секундных без перекрытия (для квазистационарных сигналов). Кроме того, ежеминутно на ЦП отправляется усредненный 1/3-октавный спектр акустического сигнала.

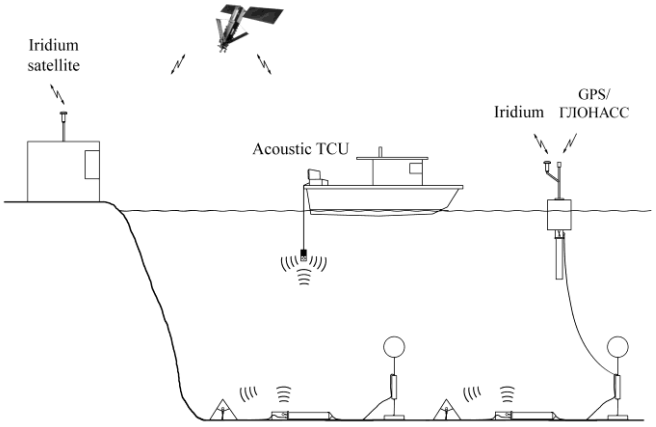


Рис. 1. Варианты постановки и взаимодействие устройств измерительного комплекса «Шельф-2014» в 2019 г.

Еще одна важная модернизация – отказ от использования УКВ ЧМ радиоканала. В 2015 г. расчет параметров сейсмоакустических сигналов производился параллельно в контроллерах телеметрических буев и на компьютерах береговых приемных постов, используя сигнал, переданный с буев по цифровому радиоканалу. Все результаты такого анализа в режиме реального времени поступали на ЦП и отображались синхронно. Совпадение результатов обеих методик между собой, а позднее и с результатами обработки данных, записанных донными станциями на карты памяти, подтвердило их корректность и позволило в будущем отказаться от УКВ ЧМ телеметрии. Несмотря на отказ от прямой передачи по УКВ акустического сигнала на берег, на ЦП возможен визуальный анализ измеренных акустическим комплексом «Шельф-2014» вариаций акустического давления, благодаря применению в поверхностном буе модема Иридиум 9522, который обеспечил возможность передачи огибающей акустического сигнала (1500 точек в минуту). Более гибким стало управление работой буя в режиме, когда он не передает данные на берег. Теперь оператор ЦП может задать период, с которым контроллер буя сообщает координаты и состояние станции и буя на ЦП и проверяет наличие команд от ЦП. Управление этим периодом позволяет экономить как траффик, передаваемый по Иридиум, так и батареи питания буя и станции.

В отличие от поверхностного буя, электроника донной станции существенно не изменилась, однако более тщательная проработка точек корпусирования печатных плат позволила снизить уровни выделяющихся тональных компонент в спектре собственных шумов на 2-6 дБ. Рабочая программа станции доработана более существенно. Проработка режимов считывания данных из АЦП позволила понизить уровни тональных компонент и оптимально распределить их по спектру собственных шумов станции. Развиты сервисные режимы программы. Установка даты и времени донной станции теперь выполняются автоматически, при подключении GPS к диагностическому разъему электронного модуля. При этом ведется лог проделанных со станцией операций, что в долговременной перспективе позволяет повысить точность хода часов станции путем автоматической коррекции в системе реальных даты-времени (RTCC). Существенно снижена вероятность человеческих ошибок при подготовке станции – после полной сборки и включения станции информация о ее состоянии считывается при помощи встроенного акустического модема и телекомандного устройства (ТКУ). При этом проверяется исправность всех цепей донной станции, включая измерительный гидрофон. Для человека визуально отображаются номер станции, доступное время записи, напряжение батарей электропитания и усредненный по частотам и времени уровень сигнала запроса (для контроля исправности измерительного гидрофона станции). При проверке уже установленной в море станции отображается также расстояние до нее. Усовершенствование алгоритмов передачи данных по акустическому каналу [5], реализованных в программах модема и ТКУ, позволило в 2016 г. довести дальность устойчивой связи со станцией до 6 км (в 2015 г. использовались тестовые программы и в условиях Сахалинского шельфа дальность связи составляла 340-2000 м в зависимости от погодных условий). Полностью изменилась концепция интерфейса ТКУ с человеком – если в 2015 г. экспериментальный экземпляр ТКУ рассматривался как самостоятельное устройство,

предоставляющее человеку всю необходимую информацию о донной станции, то в настоящее время ТКУ не имеет средств отображения и управления – они перенесены на ноутбук или смартфон. Взаимодействие с ними производится по WiFi. Такое решение имеет множество достоинств: ТКУ стало компактнее; его корпус, находящийся на палубе, герметичен и не подвержен коррозии; опрос станций ведется из удобного места, например, с мостика судна – и полученная информация быстрее может быть использована для управления судном. Стало возможным дальнейшее развитие программного обеспечения – например, автоматическое сопряжение ТКУ и GPS, автоматическая триангуляция станций с отображением на электронной карте при запросах. Автоматически ведется журнал (лог) всех действий по опросу станций.

Кроме усовершенствования основных устройств комплекса, разработаны и изготовлены дополнительные модули. Например, модуль монитора шины АЦП позволяет передавать по кабельной линии весь цифровой поток с выхода АЦП донной станции в формате кабельных телеметрических систем, применяемых в ТОИ ДВО РАН [6]. В сочетании с устройством ввода стандарта RS-485 (например, последовательным сервером MOXA NPort 5430I или модулем последовательного интерфейса 9871 National Instruments) и программой ввода данных это позволяет в реальном времени вводить в ноутбук акустический сигнал, записываемый станцией (до 15 кГц). Таким образом, станция с установленным модулем монитора шины АЦП может использоваться как измерительное устройство систем кабельной телеметрии, применяемых в ТОИ. Это применяется, например, при кросс-калибровке наших акустических измерительных систем и при отладке программ донных станций. Еще один сервисный модуль – WiFi удлинитель. Этот модуль подключается к диагностическим разъемам станций и буев и позволяет проверять и отлаживать их дистанционно, используя ноутбук, планшетный компьютер или смартфон. Помимо разработки новых аппаратных сервисных модулей, написан ряд тестовых программ для рабочих устройств комплекса, облегчающих проверку и отладку нового рабочего ПО.

Схема передачи данных, по сравнению с 2015 г., заметно упростилась из-за устранения береговых постов, однако в основном осталась без изменений – данные от морских буев поступают на сервер системы Иридиум, далее на специально организованный почтовый сервер, организующий рассылку данных и команд по заданным адресам, и далее на ЦП. В береговой сети основным каналом передачи данных остался интернет, резервным Иридиум.

Обновленное программное обеспечение центрального поста позволяет оператору управлять работой телеметрического буя – в активном режиме выбирать режимы обработки акустических данных и включать-выключать передачу огибающей, а в пассивном – выбирать период, с которым буй проверяет и передает на ЦП слово состояния и проверяет наличие команд от ЦП. ПО визуализации данных позволяет оператору в режиме реального времени выводить на экран приходящие с буев значения SEL и SPLpeak в виде линейных графиков (см. рис. 2.а), значения 1/3 октавного спектра как в виде линейного графика (рис. 2.б), так и в виде текущего спектра (рис. 2.в), детально проанализировать значения огибающей сигнала на любом принятом за последние 24 часа минутном интервале (рис. 2.г).

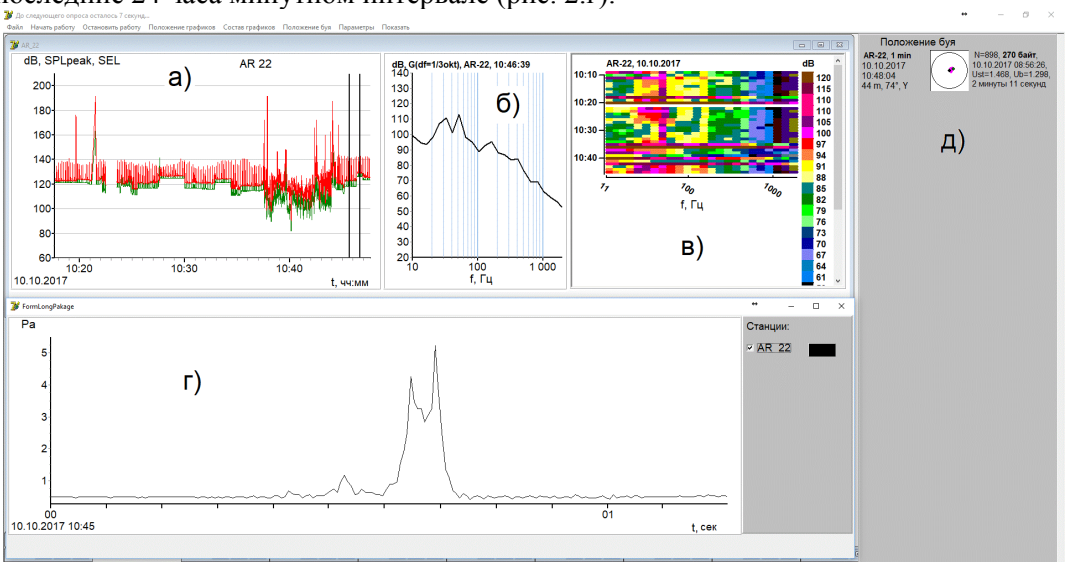


Рис. 2. Данные, отображаемые на экране оператора ЦП.

Подсистема анализа поступающих слов состояния (рис. 2.д) расшифрует и покажет на экране, а также проанализирует принятые от буя значения и визуально проинформирует оператора о: выходе буя из зоны его постановки, ограниченной радиусом безопасности 200 м; о том, что через 14 дней закончится место для записи данных в донной станции; о том, что через 7 дней закончится запас электропитания буя или станции; о том, что буй оторвался (при этом каждые 6 минут буй будет сообщать на ЦП свои координаты, расстояние до буя от точки его постановки и направление его перемещений).

Комплекс «Шельф-2014» не только успешно решает поставленные при его разработке задачи, но и продолжает развиваться, позволяя решать все более широкий круг задач, связанных с акустическими измерениями в море.

Работа выполнена при поддержке компанией «Эксон Нефтегаз Лимитед».

Литература

1. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акустический журнал. 2015. Том 61. №4. С. 500-511.
2. Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. Vol. 134. P. 21-44.
3. Рутенко А.Н. Акустическая станция для мониторинга антропогенных шумов на шельфе // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики, XIII всероссийская конференция, сборник трудов, С. 51-53.
4. Ковзель Д.Г., Гриценко В.А., Медведев И.В., Фершалов М.Ю. Измерительно-регистрационный комплекс для мониторинга в реальном времени акустических параметров сейсморазведочных сигналов на шельфе // доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» / Москва. ГЕОС. 2016. С. 313-316.
5. Патент RU 2 638 760 C1 Способ передачи дискретной информации по каналу связи с многолучевым распространением Опубликовано: 15.12.2017 Бюл. № 35.
6. Гаврилевский А.В., Ковзель Д.Г., Коротченко Р.А. Путов В.Ф. Рутенко А.Н. Соловьев А.А. Мониторинг сейсмоакустических сигналов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // Акустический журнал. 2012, Т. 58. № 2. С. 248-257.

СИНХРОНИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ АВТОНОМНЫХ ДОННЫХ СТАНЦИЙ ПО ИМПУЛЬСНЫМ СИГНАЛАМ УДАЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

В.Г.Ущиповский
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

SYNCHRONIZATION OF ACOUSTIC AUTONOMOUS BOTTOM STATIONS BY PULSE SIGNALS FROM REMOTE SOURCES

V.G.Ushchipovskiy
V.I.Il`ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Представлена методика и результаты синхронизации акустических автономных донных станций, установленных в вершинах треугольника со сторонами около 2 км на шельфе с глубиной моря 10-20 м. Методика основана на сравнении теоретических и экспериментальных разностей времени прихода импульсного сигнала в точки постановки станций от источников с известными координатами и источников с измеренным пеленгом. Обсуждается влияние погрешности определения времени прихода импульса и значения скорости распространения звука, используемых в расчетах, на точность синхронизации.

A technique and results of synchronization of acoustic autonomous bottom stations installed at the vertices of a triangle with sides of about 2 km on the shelf with sea depth of 10-20 m are presented. The technique is based on a comparison of theoretical and experimental differences in the arrival time of a pulse signal to the stations from sources with known coordinates and measured bearing. The influence of the error in determining the arrival time of the pulse and the speed of sound propagation used in the calculations on the synchronization accuracy is discussed.

Необходимость синхронности данных, накопленных акустическими донными станциями, возникает при решении задач определения координат источника акустического сигнала (например, сигналов антропогенного или животного происхождения) и в задачах исследования распространения звука на шельфе там, где требуется определить точное значение разницы во времени прихода сигнала в пространственно разнесенные точки приема [1-3].

Автономные подводные акустические регистраторы (АПАР), используемые ТОИ ДВО РАН для мониторинга антропогенных шумов на северо-восточном шельфе о. Сахалин, асинхронны [4]. Это объясняется как особенностями фиксации времени начала записи в файле протокола накопления данных (с точностью до секунды), так и характеристиками 16 битного АЦП, интегрированного на плате промышленного компьютера PC/104 Prometheus, температурная стабильность которого составляет 5 ppm/^{0}C [5].

В данной работе для синхронизации трех АПАР, установленных на срок 4 дня, были использованы импульсные сигналы, источником которых являлось судно в точке с известными координатами, и импульсы, излучаемые сейсморазведочным судном, работающим на значительном удалении, при этом пеленг на судно определялся с помощью синхронных акустических измерений в двух дополнительных точках, разнесенных на 2 км.

Карта района постановки АПАР показана на рис. 1. Накопление акустических данных в точках Т1-Т3 проводилось АПАР с частотой дискретизации 30 кГц в диапазоне частот 10 Гц – 15 кГц. Для определения направления прихода импульсов от сейсморазведочного судна использовались два дополнительных АПАР, обозначенные на схеме точками Т-10 и Т-20, синхронно передававшие часть акустических данных по цифровому радиоканалу на береговой пост, обозначенный буквой П, с частотой дискретизации 1024 Гц [6]. Расстояния между точками постановки АПАР вычислялись по имеющимся GPS координатам с точностью ±20 м.

Перед постановкой данные АПАР были синхронизированы на борту судна с помощью акустического импульса, поданного на близко расположенные гидрофоны всех станций. Эту синхронизацию будем считать точной, поскольку расстояния и условия распространения акустического сигнала для всех АПАР одинаковы, а ширина синхроимпульса составила менее 0.1 мс. От момента начальной синхронизации отсчитывается бортовое время (БВ) АПАР t, которое определяется количеством накопленных отсчетов N непрерывной цифровой записи с частотой дискретизации $f_S = 30\,\text{кГц}$

$$t = N / f_S \,. \qquad (1)$$

Очевидно, что если реальная аппаратная частота дискретизации АПАР изменяется, например, под воздействием изменений температуры окружающей среды, то рассчитанное по формуле (1) БВ АПАР будет отставать от реального времени, либо опережать его.

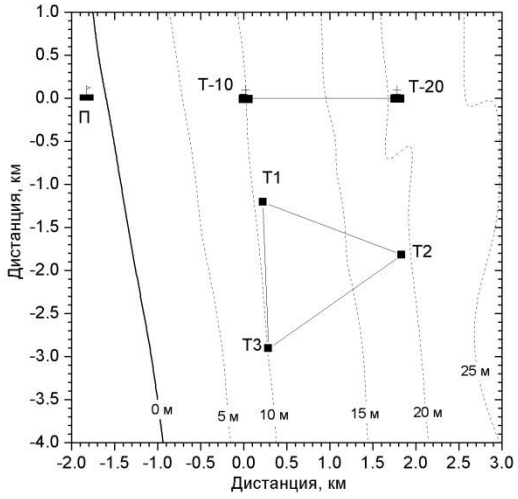


Рис. 1. Карта района постановки АПАР.

Гидрологические условия акустических измерений контролировались с помощью гидрологического зонда фирмы Valeport. За рассматриваемый период времени характер распределения температуры воды с глубиной значительно не изменялся: типичный для летне-осеннего периода термоклин был расположен на глубинах от 5 м до 15 м; вариации температуры воды у дна составляли 1.5-3 градуса на изобате 20 м и 3-6 градуса на изобате 10 м. Среднее значение скорости звука в слое воды от поверхности до глубины 15 м составило $C_0 = 1467 \pm 6$ м/с. В течение всего периода измерений погодные условия оставались устойчивыми: скорость ветра не превышала 3 м/с, волнение – 2 баллов, интенсивные приливные течения и внутренние волны отсутствовали.

Синхронизация АПАР. Синхронизация выполнялась по акустическому событию (импульсу), зафиксированному станциями в точках Т1, Т2, Т3 в моменты БВ t_1, t_2, t_3 через сравнение измеренных разностей времени прихода импульса (РВПИ) $t_{21} = t_2 - t_1$, $t_{31} = t_3 - t_1$, $t_{32} = t_3 - t_2$ и теоретических РВПИ τ_{21}, τ_{31}, τ_{32}, определяемых из разностей хода сигнала от источника до приемников и скорости звука C_0. Расхождения бортовых часов (РБЧ) каждой пары АПАР $\Delta_{21} = t_{21} - \tau_{21}$, $\Delta_{31} = t_{31} - \tau_{31}$, $\Delta_{32} = t_{32} - \tau_{32}$ представаляют результат синхронизации в момент времени, соответствующий событию. Полученные значения Δ_{21}, Δ_{31}, Δ_{32} далее можно использовать для расчета истинных РВПИ $t_{21}^{И} = t_{21} - \Delta_{21}$, $t_{31}^{И} = t_{31} - \Delta_{31}$, $t_{32}^{И} = t_{32} - \Delta_{32}$ других сигналов, пложение источника которых не известно.

Применение в расчетах τ значения скорости звука в воде C_0 приводит к необходимости использования высокочастотных сигналов, которые распространяются только в водном слое, т.к. скорость низкочастотных акустических мод, затрагивающих волновым движением дно, может существенно отличаться от C_0 из-за дисперсионных свойств волновода. Для рассматриваемых глубин – это частоты выше 150 Гц. Также, чтобы исключить влияние отражений, рефракции и интерференции сигнала, необходимо определять время прихода импульса синхронизации по его переднему фронту (ПФ) [1].

РВПИ для импульса от источника с известными координатами. При постановке на якорь обслуживающего АПАР судна на дистанции 7.5 км от треугольника, удар якоря о грунт генерировал широкополосный импульсный сигнал, характеристики которого показаны на рис. 2. Импульс с длительностью 200 мс имеет высокое соотношение сигнал/помеха (рис.2а). Спектр импульса $G(f)$ содержит существенную высокочастотную составляющую 400 Гц – 15000 Гц (рис.2.б). Как можно видеть на графике текущего спектра (рис.2в), ПФ импульса составляют колебания с частотами 700-2000Гц, а колебания с частотой 50-400 Гц приходят с задержкой ~40 мс. Бортовое время прихода ПФ определялось по положению первого максимума огибающей сигнала после фильтрации в полосе 1000-1700 Гц (рис.2г). Погрешность определения времени прихода может быть оценена равной $\delta t = \pm 3$ мс. Теоретические значения РВПИ были рассчитаны с использованием значения скорости звука $C_0 = 1467$ м/с и рассчитанных по GPS координатам расстояний d_1, d_2, d_3 от якоря до точек Т1, Т2, Т3: $\tau_{21} = (d_2 - d_1)/C_0$, $\tau_{31} = (d_3 - d_1)/C_0$, $\tau_{32} = (d_3 - d_2)/C_0$. Погрешность теоретической РВПИ $\delta\tau$ можно оценить из погрешности расчета дистанций $\delta(d_i - d_k) = \pm 40$ м и погрешности значения скорости звука $\delta C_0 = \pm 6$ м/с: $\delta\tau = \delta(d_2 - d_1)/C_0 + (d_2 - d_1) \cdot \delta C_0 / C_0^2$; $\delta\tau = \pm 31$ мс. Таким образом, погрешность определения РБЧ составляет $\delta\Delta = \pm 34$ мс.

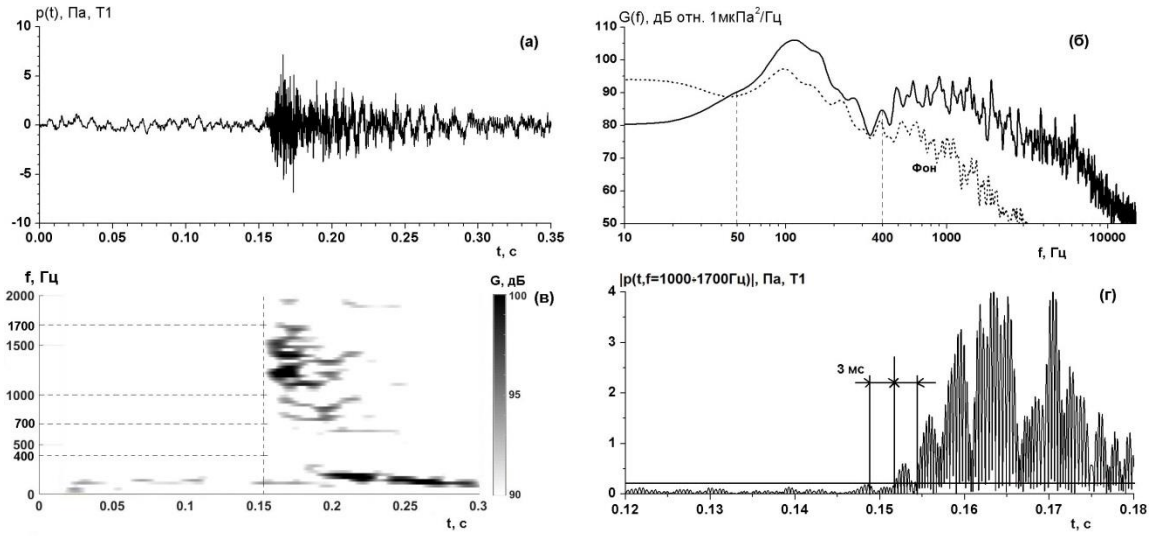


Рис. 2. Импульс от источника с известными координатами (удар якоря о дно моря).

РВПИ для импульса от источника с известным пеленгом. Характеристики импульса удаленной сейсморазведки показаны на рис. 3: длительность импульса составляет 800 мс (рис.3а), а энергия акустических колебаний импульса переносится частотами от 70 Гц до 300 Гц (рис.3б). ПФ импульса состоит из колебаний с частотами превышающими 150 Гц (рис.3в). БВ прихода ПФ импульса определялось по пересечению линии максимума окружающих шумов с первым интерференционным максимумом огибающей сигнала, отфильтрованного в полосе 150-300 Гц (рис.3г). Погрешность определения БВ прихода импульса равна $\delta t = \pm 10$ мс.

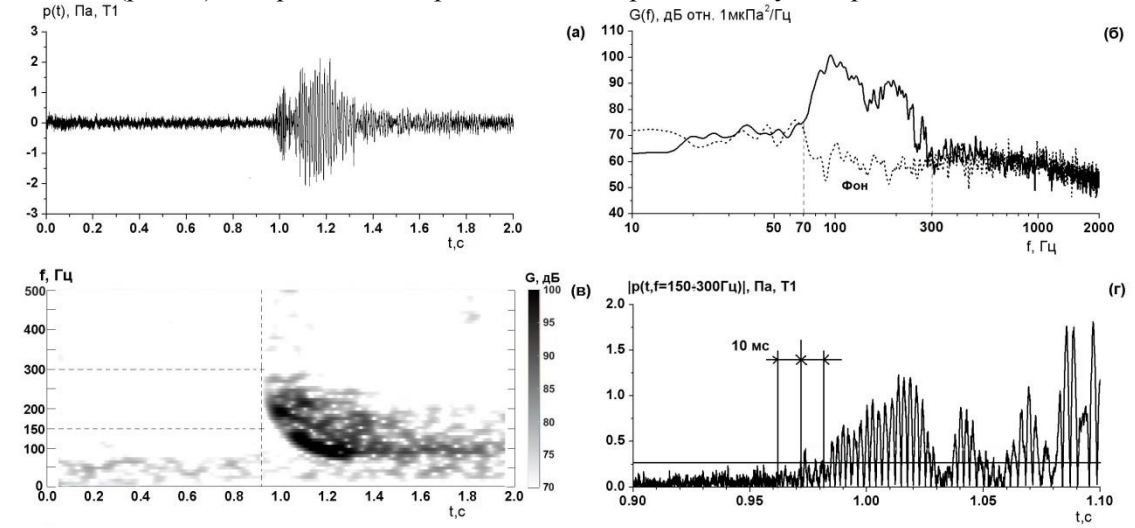


Рис. 3. Импульс от источника с известным пеленгом (сейсморазведочного судна).

Для определения τ используем приближение плоского волнового фронта (ВФ). Такое приближение справедливо, когда источник импульса находится на значительном удалении от АПАР. Углы прихода ВФ $\alpha+\beta$, γ , ϕ на стороны треугольника определяются углом α прихода ВФ на линию Т10-Т-20, углом β , на который развернута линия Т1-Т2 относительно Т10-Т20 и углами Т1 и Т2 (рис. 4). Угол α определяется по РВПИ синхронных измерений в Т10 и Т20. Остальные углы могут быть определены по GPS координатам постановки. Рассчитанные по схеме рис.4 разности хода ВФ $\tau_{21}C_0$, $\tau_{31}C_0$, $\tau_{32}C_0$ дают теоретические значения РВПИ

$$\begin{aligned} \tau_{12} &= D_{21}\cdot\cos(\alpha+\beta)/C_{\text{O}}, \\ \tau_{31} &= -D_{31}\cdot\cos(\alpha+\beta+\angle T1)/C_{\text{O}}, \\ \tau_{32} &= D_{32}\cdot\cos(\alpha+\beta-\angle T2)/C_{\text{O}}. \end{aligned} \qquad (2)$$

Погрешность расчета теоретической РВПИ $\delta\tau$ складывается из погрешности определения угла прихода ВФ $\delta\alpha = \pm 1$ град, погрешности расчета дистанций между АПАР $\delta D = \pm 40$ м и

погрешности скорости звука $\delta C_0 = \pm 6$ м/с и составляет не более $\delta\tau = \pm 39$ мс. Таким образом, погрешность определения РБЧ составляет не более $\delta\Delta = \pm 49$ мс.

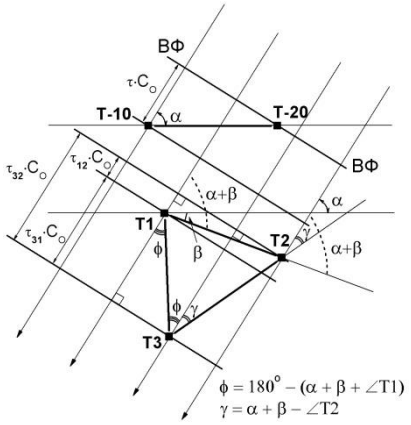


Рис. 4. Схема вычисления теоретических РВПИ.

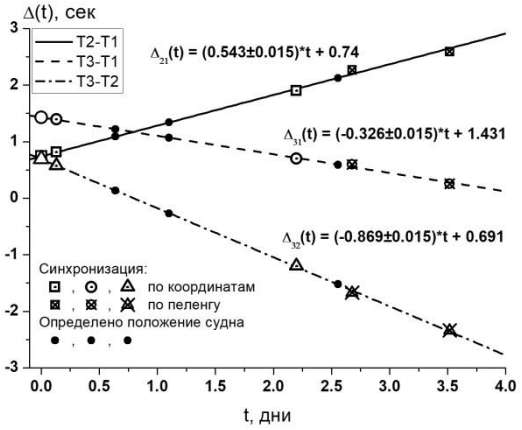


Рис. 5. Результаты синхронизации.

Результаты синхронизации. На рис. 5 показаны РБЧ для четырех моментов времени (незаполненные символы) за период постановки. Зависимость РБЧ от времени можно аппроксимировать линейным законом $\Delta(t) = At + B$. Угловой коэффициент A рассчитан путем минимизации среднеквадратичных отклонений экспериментальных значений от прямой, при этом значения начальной синхронизации ($t = 0$) определяют коэффициенты B. С помощью полученных зависимостей $\Delta(t)$, были определены РБЧ в моменты времени (черные кружки на рис.5), соответствующие шумовым сигналам обслуживающего судна. Коррекция времени начала шумового сигнала на РБЧ для каждой пары АПАР позволила определить координаты судна по разности времени прихода сигнала в точки T1, T2, T3 [7]. Сравнение полученных координат с истинными координатами судна, вычисленными по GPS, показало их совпадение с точностью до 400 м на дистанциях до 4 км от центра треугольника.

Литература

1. Галкин О.П., Микрюков А.В., Попов О.Е., Попов Р.Ю. Особенности пеленгования низкочастотного источника звука в шельфовой зоне океана // Акустический журнал, 1998. Т.44, № 6, С. 764-771.
2. Гриненков А. И., Машошин А. И., Шафранюк Ю. В. Оценка точности пассивного определения дистанции до цели физическими методами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 2. С. 81—87.
3. Warner G.A., Dosso S.E., Hannay D.E. Bowhead whale localization using time-difference-of-arrival data from asynchronous recorders // J. Acoust. Soc. Am. 2017. V.141. N.3. 1921–1935.
4. Борисов С. В., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономная гидроакустическая станция с радиоканалом для акустических измерений на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2008. №5. С.132-137.
5. Diamond Systems PROMETHEUS PR-Z32-EA-ST User Manual (2003).
6. Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н. Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 102-106.
7. Li X., Deng Z. D., Rauchenstein L. T., and Carlson T. J. Contributed review: Source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements // Rev. Sci. Instrum. 2016. V.87. PP.041502-1–041502-12.

РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОВОДКИ БАРЖ С КРУПНОГАБАРИТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ В ЗАЛИВ ПИЛЬТУН

В.Е.Нечаюк, А.Н.Рутенко[1], д-р физ-мат.наук, А.А.Соловьев[1], канд.физ-мат.наук, M.R.Jenkerson, Ph.D.
ExxonMobil, Хьюстон, США
[1]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

ACOUSTIC MONITORING RESULTS OF STEERING BARGES WITH LARGE SIZE EQUIPMENT IN PILTUN BAY

V.E.Nechauk, A.N.Rutenko[1], Dr.Sc., A.A.Soloviev[1], Ph.D., M.R.Jenkerson, Ph.D.
ExxonMobil, Houston, USA
[1]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Компания "Эксон Нефтегаз Лимитед", разрабатывает Одоптинское углеводородное месторождение, расположенное на северо-восточном шельфе о. Сахалин, с помощью наклонного бурения с берега. Для доставки на берег крупногабаритного и тяжелого оборудования было принято решение применить мелководные баржи типа TERASS 333, которые морскими буксирами доставлялись на Сахалинский шельф Охотского моря и в рекомендованной точке встречи баржи передавались мелководным буксирам для транспортировки в залив Пильтун со швартовкой у причала для разгрузки. Поскольку точка встречи расположена на траверзе входа в залив Пильтун и данная область шельфа является важным районом летне-осеннего нагула западной популяции серых китов, занесенной в «Красную книгу» РФ, то компанией было принято решение во время проведения этих работ контролировать уровни антропогенных шумов, генерируемых работающими буксирами в характерных точках шельфа. С помощью модернизированной программы RAMS были проведены предварительные расчеты ореолов значений SPLrms антропогенных шумов на шельфе от типовой операции – передача баржи от морского буксира 4 мелководным буксирам. На основе натурных измерений построены точечные эквивалентные групповому функции источника для типовых операций и проведено численное моделирование результаты, которого близки прогнозу.

The Exxon Neftegaz Ltd. Co. develops the hydrocarbon deposit located on the northeastern shelf of Sakhalin Island near Odoptu Bay by the downhole incline drilling from the shore. To transport the large and heavy equipment to the shore, it was decided to use shallow-water barges such as TERASS 333, which were trailed by ocean tugboats to the Sakhalin shelf, and at the recommended meeting point these barges were handed over to shallow-water tugboats for transporting them to Piltun Bay and unloading their cargo at the berth. Since the meeting point is located on the traverse of the entrance to Piltun Bay and this place is an important summer-autumn feeding area of the western-population of gray whales listed in the Red Book of the Russian Federation, the company decided to control the levels of anthropogenic noise generated by operating tugs in the monitoring points during these works. Prognostic calculations of the halos of SPLrms values of anthropogenic noise from a typical operation (the barge hand-over from the ocean tugboat to 4 shallow-water tugboats) generated by tugboats were carried out using the adapted software RAMS. Source point functions equivalent to the group of the sources for typical operations were constructed on the base of field measurements, and numerical calculations were carried out which are close to the predicted ones.

Мелководная (6-15 м) область шельфа о-ва Сахалин, начинающаяся к югу от входа в *Пильтунский* залив и продолжающаяся в северном направлении вдоль побережья о-ва Сахалин, является наиболее важным районом летне-осеннего нагула *Охотско-Корейской* (*Западной*) популяции серых китов [1]. Акустические исследования в *Пильтунском* районе проводятся с 1999 г., т.е. практически с самого начала работ связанных с освоением запасов нефти и газа в этом районе.

Программа планируемых компанией *Эксон Нефтегаз Лимитед* в 2017 г. специальных акустико-гидрофизических исследований, проводимых ТОИ ДВО РАН на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин в районе устья залива Пильтун, состояла из пяти основных пунктов:

1. Мониторинг акустических шумов на границе и внутри прибрежного *Пильтунского* района кормления серых китов во время проведения компанией *Эксон Нефтегаз Лимитед* передачи барж с оборудованием, приведенных на шельф Охотского моря морскими буксирами, 4-5 мелководным буксирам для их проводки в залив Пильтун и разгрузки на временно организованный причал.
2. Организация и проведение мониторинга в реальном времени фоновых и судовых акустических шумов в 2 точках на 10 м и в двух точках на 20 метровой изобатах, расположенных северней и южней входа в залив Пильтун.
3. Проведение специального анализа акустических сигналов, записанных в характерных точках акустического мониторинга на контролируемой акватории с целью построения точечных функции источника эквивалентных групповому источнику акустических шумов – морской буксир передает или принимает баржу от мелководных буксиров, морской буксир с двумя пустыми баржами уходит из точки встречи, 4-5 мелководных буксира ведут загруженную баржу в залив Пильтун.

4. Построение, с помощью численного моделирования пространственных распределений значений уровня антропогенного акустического поля - $SPL_{rms}(\Delta f, x, y)$, для эквивалентных точечных источников построенных в соответствии с заданием пункта 3.

5. Контроль гидрологических характеристик необходимых для корректного моделирования распространения звука в данном районе шельфа Охотского моря.

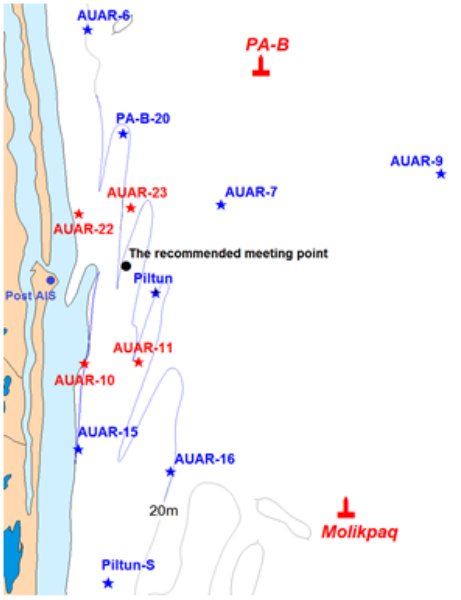


Рис. 1

Поскольку при организации акустического мониторинга в 2017 г. был учтен опыт 2016 г., то в этом докладе мы представим методику и результаты натурных и модельных исследований, проведенных в июне 2017 г. На рис. 1 показаны точки, в которых в период июнь - июль 2017 г. с помощью 13 автономных подводных акустических регистраторов - АПАР, разработанных и изготовленных в ТОИ ДВО РАН [2], проводились измерения у дна вариаций акустического давления - $p(t)$ в частотном диапазоне 2-15000 Гц с динамическим диапазоном 145 дБ. К четырем АПАР были подключены поверхностные буи, со спутниковыми телеметрическими каналами *Иридиум* [2]. Режим работы буя определяется командами с Центрального поста управления - ЦПУ, передаваемыми по сети *Иридиум*. В режиме передачи данных по *Иридиум* каждую минуту контроллер буя формирует посылки данных длиной 150 байт и пересылает их через сеть *Иридиум* на почтовый сервер, где они перенаправляются на заданный электронный адрес либо на модем *Иридиум*, подключенный к компьютеру ЦПУ. Посылка содержит время ее формирования (по времени сети *Иридиум*), номер АПАР, усредненный за 60 сек 1/3-октавный спектр в полосе частот 7-2000 Гц, 60 значений $SPL_{peak}(\Delta t)$, где Δt - временной интервал на котором определяется пиковое значение амплитуды вариаций $p(t)$ и 60 значений $SEL(\Delta f) \equiv SPL_{rms}(\Delta f)$, поскольку Δt =1 s. $SEL(\Delta f)$ - уровень акустического воздействия или уровень энергии акустических шумов в частотном диапазоне Δf на временном интервале Δt в dB re 1 μPa^{2}s, а $SPL_{rms}(\Delta f)$ - уровень среднеквадратичного значения акустических шумов в частотном диапазоне Δf в dB re 1 μPa.

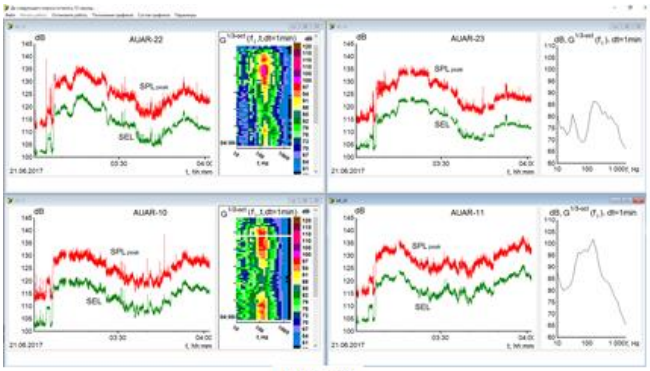


Рис. 2.

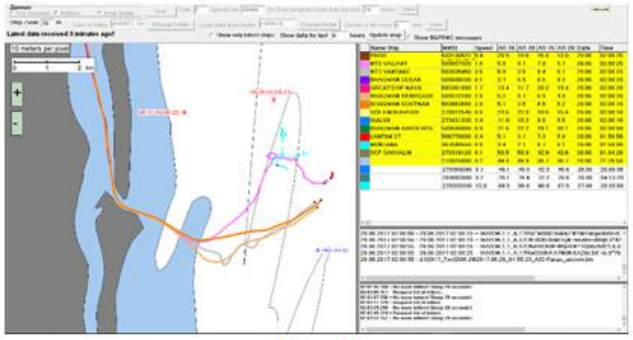


Рис. 3.

ЦПУ для мониторинга проводки барж в режиме реального времени был организован на морской экспедиционной станции «мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН расположенной на мысе Шульца п-ва Гамова в Японском море. Для нормального функционирования ЦПУ необходимо – наличие канала *Интернет* и относительно чистый горизонт, для устойчивого приема через спутниковый модем *Иридиум*. Для обеспечения надежности работы оборудования все электронные приборы работали автономно. На компьютере ЦПУ выполнялись три программы: программа приема акустических данных и отправки команд управления буями, программа

отображения акустических данных (см. рис. 2) и программа отображения местоположения судов по данным AIS (см. рис. 3).

Для моделирования распространения энергии акустических сигналов в сложных неоднородных геоакустических волноводах, характерных для шельфа, мы применяем модернизированную программу RAMS [3], основанную на решении широкоугольных параболических уравнений, полученных из стационарных уравнений Ламе в цилиндрических координатах. Данная программа позволяет произвести расчет потерь в дБ при распространении энергии колебаний, генерируемых тональным точечным источником, расположенным в воде. При вычислениях учитывается, что энергия колебаний переносится в воде только продольными волнами, а в дне еще и поперечными и поверхностными волнами. Главной целью численного моделирования является построение пространственного распределения у дна значений $SPL_{rms}(\Delta f,r)$ антропогенных шумов, формируемых на шельфе о. Сахалин в районе устья залива Пильтун групповым источником [4] – морской буксир с баржей и несколько мелководных буксиров во время проведения ими типовых операций, связанных с передачами груженых и порожних барж между морскими и мелководными буксирами. Для этого были выбраны экспериментальные данные (см. рис. 4), полученные в заданных точках акустического мониторинга в наиболее благоприятных условиях. В этой работе рассмотрены наиболее шумные случаи, согласно натурным измерениям, проведенным в точках акустического мониторинга.

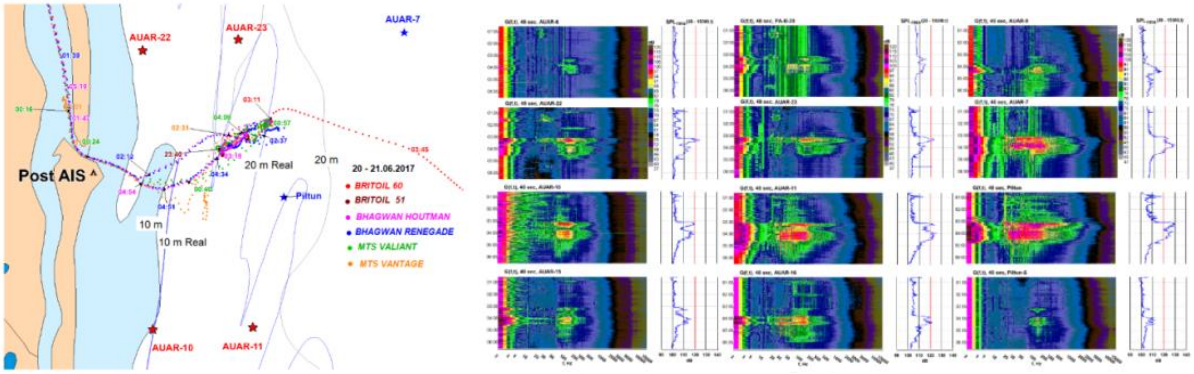


Рис. 4.

На рис. 5 показан модельный геоакустический волновод, в котором нам известен батиметрический профиль и вертикальный профиль скорости звука в водном слое, а на рис. 6 показано построение эквивалентной точечной функции группового источника - $G_s^{1/3-oct}(f_i)$ по методике, представленной в работе [4]. Вертикальное изменение акустических параметров пород, слагающих дно построено на основе предварительных экспериментально теоретических исследований. Акустические параметры дна подбирались с помощью согласования результатов натурных измерений с модельными значениями, полученными с помощью программы RAMs. Для расчета поля пространственного распределения уровня $SPL_{rms}(\Delta f,r)$ в акватории генерируются 72 акустические трассы (волноводы), радиально расходящихся от эквивалентного точечного источника с равномерным угловым шагом 5°. Для интерполяции батиметрических данных на выбранную акустическую трассу, а также для интерполяции значений $SPL_{rms}(\Delta f,r)$ от акустических трасс на всю область используется программа Surfer Golden Software.

При планировании подходов океанских буксиров с баржами, по результатам натурных измерений была построена функция эквивалентного точечного источника, соответствующего шумам, генерируемым одновременно НИС *Профессор Богоров* и НИС *Академик Опарин* находящимися в точке «встречи». С применением последней было построено модельное пространственное распределение у дна значений - $SPL_{rms}(14-2200Hz,r)$, представленное на рис. 7a (см. вклейку). На рис. 7b показано модельное распределение значений - $SPL_{rms}(14-2200Hz,r)$, полученное для точечного источника эквивалентного групповому источнику - морской буксир *Britoil 49* и мелководные баржи. Источник построен по опорным измерениям, проведенным в точке мониторинга Piltun в 2016 г. По результатам измерений, проведенных в этой же точке акустического мониторинга в 03:15 21.06.2017 г. построена точечная функция источника экви-

валентная морскому буксиру *Britoil 60* с мелководными баржами. Для этой функции проведен расчет значений $SPL_{rms}(14-2200Hz,r)$, которое представлено на рис. 7c.

На рис. 7 видно, что пространственные ореолы одинаковых значений - $SPL_{rms}(14-2200Hz,r)$ для прогноза (рис. 7a) и результатов измерений в 2017 г., подобны.

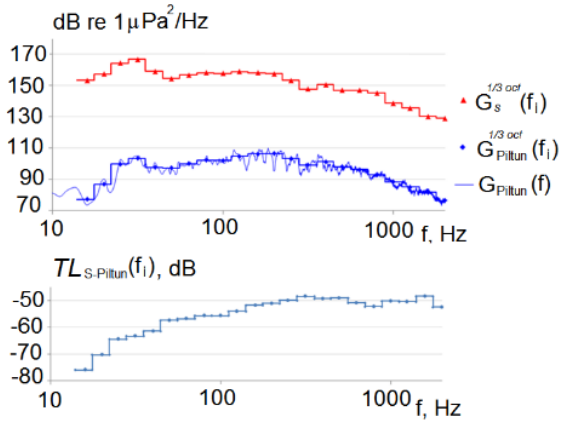


Рис. 6.

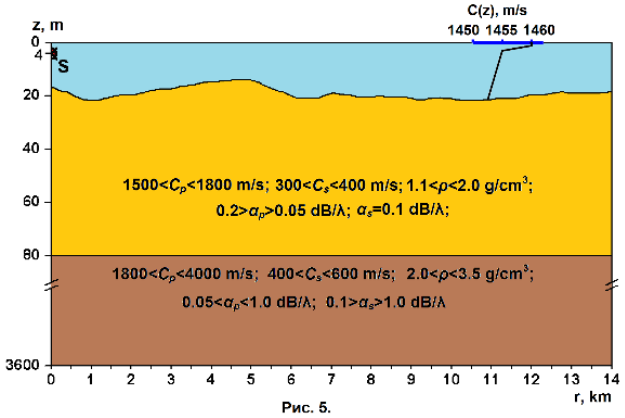


Рис. 5.

Работа выполнена при поддержке компанией Эксон Нефтегаз Лимитед.

Литература

1. Тюрнева О.Ю., Яковлев Ю.М., Томбах Райт К., Мейер С.К. Серые киты охотско-корейской популяции у берегов острова Сахалин. Владивосток: Дальнаука. 2013. 244 с.
2. Рутенко А.Н. и др. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. жур. 2015. №4. С. 500-511.
3. Collins M. D. The adiabatic mode parabolic equation//J.Acoust.Soc.Amer. 1993. V. 94. N. 4. P. 2269-2278.
4. Rutenko A.N. and Ushchipovskii V.G. Estimates of Acoustic Noise Generated by Auxiliary Vessels Working with Oil-Drilling Platforms // Acoustical Physics. 2015. Vol 61. №5. P. 556-563

РАЗРАБОТКА ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОГО КЛИМАТА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

А.А.Куркин, д-р физ-мат.наук, Д.Ю.Тюгин, канд.физ-мат.наук, Д.В.Зезюлин, канд.техн.наук,
В.В.Беляков, д-р техн.наук, П.О.Береснев, В.И.Филатов, В.Д.Кузин, П.И.Пронин
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия

DEVELOPMENT OF MOBILE ROBOTS GROUP FOR COMPREHENSIVE STUDY OF THE WAVE CLIMATE IN THE COASTAL ZONE

A.A.Kurkin, Dr.Sc., D.Yu.Tuygin, Ph.D., D.V.Zeziulin, Ph.D., V.V.Belyakov, Dr.Sc., P.O.Beresnev,
V.I.Filatov, V.D.Kuzin, P.I.Pronin
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia

Рассмотрены новые методы и подходы проведения комплексного измерения волнового климата прибрежной зоны на основе телеметрически связанной группы роботов наземного, надводного и подводного базирования. Представлены конструкции и оборудование разработанных устройств. В 2016 и 2017 годах на о. Сахалин были проведены испытания работоспособности роботов надводного и подводного базирования. В 2018 году будет проведен эксперимент с участием трех роботов и объединения их в локальную сеть для управления и обработки данных в режиме реального времени.

New methods and approaches for conducting a comprehensive measurement of wave climate of the coastal zone on the basis of a telemetically coupled group of ground, surface and underwater robots are considered. The designs and equipment of the developed robots are presented. The performance tests of surface and underwater-based robots were conducted on Sakhalin Island in 2016 and 2017. The experiment involving three robots and their integration into a local network for the management and processing of data in real time will be conducted in 2018.

Использование систем, способных значительно повысить эффективность проведения исследований ледовой обстановки и волнового климата прибрежных зон, актуально в связи с ростом увеличения добычи полезных ископаемых и интенсификацией строительства гидротехнических сооружений в прибрежной зоне. В настоящее время существует несколько способов мониторинга волнового климата в прибрежной зоне [1], в том числе спутниковый мониторинг и аэрофотосъемка с использованием летательных аппаратов. Однако, последние имеют ряд ограничений, таких как сильная облачность в первом случае, или грузоподъемность, безопасность и дальность полета во-втором. В связи с этим широкое распространение получили наземные транспортные средства, используемые для мониторинга волнового климата [2, 3].

Перспективными методами обследования прибрежных зон в настоящее время являются методы дистанционного зондирования. Такие методы базируются на применении датчиков, позволяющих получить информацию о расстоянии до объекта на основе сканирующих устройств радиочастотного [4] или лазерного диапазона волн [5, 6]. Тем не менее, они имеют и ряд недостатков. Размер таких станций, как правило, составляет несколько метров, они требуют мощного источника питания и установки на мачту. Кроме того, по сравнению с лазерными приборами, которые выдают информацию до объекта в метрах, радиолокационные станции выдают только значение интенсивности отраженного сигнала и требуют калибровки на месте. Все эти факторы снижают мобильность при проведении исследований, ограничивают количество экспериментов и требуют значительных человеческих и временных ресурсов. Методы, основанные на применении мобильных роботов, лишены многих из этих недостатков и хорошо зарекомендовали себя в экспериментальных исследованиях [7 – 9].

В данной статье представлен метод и подход к проведению мониторинга волнового климата прибрежной зоны, основанный на применении телеметрически связанной группы роботов наземного, надводного и подводного базирования.

Рассмотрим схему взаимодействия группы и возможную схему проведения эксперимента (рис. 1). Схема проведения эксперимента предполагает использование трех типов роботов: наземного (1), подводного (2) и надводного (3) типа. Роботы являются независимыми и могут управляться дистанционно или в режиме автопилота. Наземный робот содержит радиолокационную станцию (4) для дистанционного измерения волновой активности и приемопередатчик WiFi (5). Данный робот собирает информацию в некоторой области о высоте волн при помощи радара, в условных единицах, соответствующих интенсивности отраженного сигнала. Подводный робот (2) погружается в воду, двигаясь по дну, управляемый посредством кабеля, подключенного к базовой станции (6), содержащей также приемопередатчик WiFi. Базовые станции подводного и наземного роботов соединены в локальную сеть. Задача подводного робота – определение высоты волны в одной точке в абсолютных единицах (метрах) при помощи кон-

тактного датчика. Полученные данные поступают на бортовой компьютер наземного робота в режиме реального времени. Надводный робот (3) также подключается к локальной сети наземного робота (1) посредством приемопередатчика Wi-Fi (7) и передает данные батиметрии исследуемой зоны. Бортовой компьютер наземного робота (1) осуществляет обработку, связывание данных и отправляет полученные данные в командный центр или на ноутбук оператора. Приведем подробности реализации каждого робота и его описание.

Рис. 1. Схема взаимодействия группы.

Наземный робототехнический комплекс (НРК) [10] (рис. 2,*а*) оборудован тремя сменными типам движителей. Колесный движитель предназначен для работы комплекса на твердых опорных основаниях, а также сухих и увлажненных грунтах. Гусеничный тип движителя позволяет повысить эффективность работы комплекса при движении по сложным участкам местности, таким как песчаная местность, влажные грунты, снег и т.д. Роторно-винтовой движитель может быть использован для работ в условиях переувлажненных грунтов, болот, затопленных участков местности. Состав аппаратной части представлен следующими компонентами: судовая радиолокационная станция РЛС Микран «Река» MRS-1000, метеостанция Vaisala WXT520, система светового детектирования LIDAR Sick LMS291Pro, видеокамера AXIS Q6045-E, высокоточный мобильный GPS/Глонасс приемник (ОС-103). Для управления измерительным оборудованием, сбора, накопления и обработки данных на АМРК устанавливается бортовой компьютер Adlink MXE-5400. Для удаленного подключения к бортовому компьютеру АМРК посредством WiFi, для просмотра данных, состояния измерительным оборудованием и посылки команд управления измерительным оборудованием используется ноутбук Panasonic Toughbook CF-31WEUAHM9. Определение параметров волнения с помощью радиолокационной станции РЛС Микран «Река» MRS-1000 основано на связи интенсивности отраженного сигнала с высотой волн. В зависимости от силы и характера морского волнения мощность отраженного эхосигнала от поверхности моря различна.

Следующим разработанным комплексом является амфибийное мобильное транспортное средство (АМТС) (рис. 2,*б*). Робот представляет собой трехопорную систему, состоящую из нескольких основных компонентов: опорная платформа, герметичный контейнер с измерительным оборудованием, регулируемые рычаги, шаговые электродвигатели, ведущие колеса, опорное колесо. Комплекс собирает данные с использованием системы видеоинспектирования и гидростатического волнографа установленным на стационарной опоре корпуса. В первоначальной версии использовался струнный датчик, который имеет ряд недостатков – датчик можно использовать лишь при небольших волнениях и имеется риск налипания растительности на чувствительную проволоку. АМТС имеет возможность регулировки положения центра тяжести для повышения устойчивости при движении по крутым склонам морского дна и при значительном гидродинамическом воздействии. Электроника АМТС состоит из управляющей и силовой частей. Основу управляющей части составляет одноплатный компьютер Raspberry Pi 2, к которому подключаются все остальные датчики: датчик наклона на базе гироскопа MPU-6050, гид-

ростатический волнограф для регистрации высоты волны, видеокамера для съемки Logitech C920, источник питания Energizer PB. Управление осуществляется удаленно через Ethernet кабель с берега либо через Wi-Fi при помощи всплывающего буя с антенной. Силовая часть состоит из двух шаговых двигателей с редукторами (1:10) и драйверов шаговых двигателей OMD-88. Источник питания – литиевый аккумулятор 48V 10Ah.

а)

б)

в)

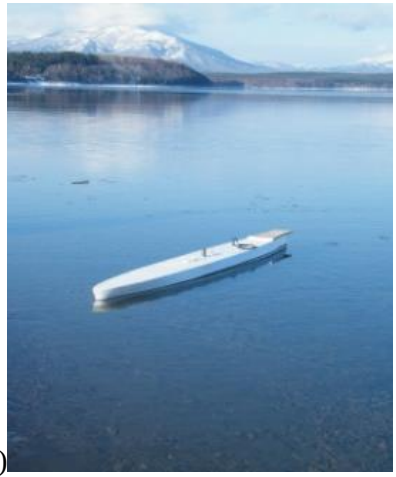


Рис. 2. Общий вид разрабатываемых комплексов: *а* – наземный робототехнический комплекс; *б* – амфибийное мобильное транспортное средство; *в* – автономный телеуправляемый исследовательский катер

Для проведения детального измерения батиметрии исследуемой акватории применялся автономный телеуправляемый исследовательский катер (АТИК). Он позволяет в короткие сроки выполнить построение карты глубин при помощи многолучевого эхолота. Внешний вид катера представлен на рис. 2,*в*. Для позиционирования катера используется GNSS приёмник Trimble SPS461. Параметры наклона катера определяются с помощью кренометра SMC IMU-108-30. Сбор данных батиметрии осуществляется многолучевым эхолотом. Обработка данных и управление катером осуществляется защищенным компьютером ARK2105L, с отдельным источником питания 12V 15Ah. Силовая часть выполнена на базе двух двигателей постоянного тока, драйверов BTS7960 и arduino nano в качестве контроллера управления драйверами. Управление катером осуществляется дистанционно, маневрирование выполняется посредством изменения скорости вращения правого и левого двигателей. Связь с катером устанавливается при помощи Wi-Fi модуля увеличенного радиуса действия на базе точки доступа MikroTik 2SHPN.

В 2016-2017 годах были проведены испытанию работоспособности АМТС и НРК. в различных районах побережья Охотского моря (мыс Свободный, остров Сахалин), характеризующихся небольшой глубиной (2-4 м) на протяжении нескольких сотен метров от берега. АМТС был погружен в воду посредством дистанционного управления на удаление от берега около 50

метров и глубину порядка 2 метров. На основе данных испытаний были сделаны выводы и намечены дальнейшие пути оптимизации системы.

В 2018 году планируется проведение эксперимента с участием всех трех типов роботов и объединения их в локальную сеть для управления и обработки данных в режиме реального времени. В настоящее время ведутся работы по реализации программного обеспечения для совместного управления группой роботов.

Представленные результаты получены в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности (Задание № 5.4568.2017/6.7 и № 2.1433.2017/4.6), а также при финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5.

Литература

1. Kurkin A., Pelinovsky E., Tyugin D., Kurkina O., Belyakov V., Makarov V., Zeziulin D. Unmanned ground vehicles for coastal monitoring // International Journal of Imaging and Robotics. 2017. V. 17. Issue 1. P. 64-75.
2. Surfzone Crawler 1." Florida Institute of Technology: Department of Marine and Environmental Systems. Web. 05 May 2010.
3. "The SPROV'er." Florida Institute of Technology: Department of Marine and Environmental Systems. Web. 05 May 2010.
4. Cheng H., Chien H. Implementation of S-band marine radar for surface wave measurement under precipitation // Remote Sensing of Environment.2017. V. 188. P. 85–94.
5. Park H., Sim J., Yoo J., Lee D. Breaking wave measurement using Terrestrial LIDAR: Validation with field experiment on the Mallipo Beach // Journal of Coastal Research. 2011. V. 64. P. 1718-1721.
6. Martin K., Bonneton P., Frappart F., Detandt G., Bonneton N., Blenkinsopp C. High Frequency Field Measurements of an Undular Bore Using a 2D LiDAR Scanner // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 5. P. 462-2-14.
7. Incoul A., Nuttens T., De Maeyer P., Seube N., Stal C., Touzé T., De Wulf A. Mobile laser scanning of intertidal zones of beaches using an amphibious vehicle // INGEO 2014: 6th international conference on engineering surveying, Prague, Czech Republic. 2014. P. 87-92.
8. Wood S. Modular Amphibious Research Crawler // Sea Technology. 2006. V. 47. No. 2.
9. Wübbold F., Hentschel M., Vousdoukas M., Wagner B. Application of an autonomous robot for the collection of near-shore topographic and hydrodynamic measurements // Coastal Engineering Proceedings. 2012. V. 1(33).
10. Zaytsev A., Belyakov V., Beresnev P., Filatov V., Makarov V., Tyugin D., Zeziulin D., Pelinovsky E., Yalciner A., Yalciner B., Oshmarina O., Kurkin A. Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot // Science of tsunami hazards. 2017. V. 36. Iss. 3. P. 1-12.

СПОСОБ НАТУРНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

А.И.Дмитриева, В.А.Катков, канд.техн.наук, В.В.Надеинский, канд.техн.наук
АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

WAY OF ON-SITE HYDRODYNAMIC INVESTIGATION OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

A.I.Dmitriyeva, V.A.Katkov, Ph.D., V.V.Nadeinsky, Ph.D.
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Оценивается возможность натурного гидродинамического обследования (НГДО) автономного подводного аппарата (АПА) при его маневрировании на любой акватории без обустройства ее внешнетраекторными измерителями. Приводятся результаты численного исследования влияния точности измерения и восстановления полного набора кинематических параметров АПА на достоверность и точность оценки силового воздействия жидкости в виде трех составляющих главного вектора сил и трех составляющих главного момента.

Possibility of on-site hydrodynamic investigation of autonomous underwater vehicle (AUV) at its maneuvering in any water area without installation of external trajectory measuring instruments is estimated. Results of numerical research of influence of accuracy of measurement and restoration of a total set of AUV kinematic parameters on reliability and accuracy of assessment of liquid force action in the form of three components of the main force vector and three components of the resultant moment are given.

Возможность НГДО АПА с оценкой силового воздействия жидкости в виде главного вектора ГД сил и моментов, распределенных по поверхности АПА и его органам стабилизации и управления, следует из шести классических уравнений динамики, разрешенных относительно трех составляющих главного вектора сил Fx, Fy, Fz и моментов Lx, Ly, Lz [1].

Подводное функционирование АПА протекает в основном в условиях обтекания потоком безграничной и невозмущенной жидкости. Однако в процессе применения АПА с носителей неизбежны участки движения в условиях обтекания потоком ограниченной и возмущенной жидкости. К ним относятся выход из ТА ПЛ при движении в гидродинамическом поле ПЛ и приводнение АПА при движении в режиме кавернообразования.

Для НГДО АПА требуется достоверное определение полного набора кинематических параметров движения АПА вцелом и относительного движения его подвижных внешних конструктивных элементов, а также углов натекания на них жидкости при пространственном движении АПА.

Такой набор параметров движения АПА по информативной исследовательской траектории должен обеспечиваться полнотой «статистической наблюдаемости» и точностью прямых измерений и восстановленных недоступных для прямых измерений.

Для этой цели могут быть использованы две схемы проведения НГДО, разработанные на сегодняшний день.

На начальной стадии разработки АПА НГДО проводится в трехмерном информационном подводном пространстве в габаритах 15,5×5,5×1,5 км мобильного «Полигона-М», размерно оборудованном активными гидроакустическими маяками-ответчиками [2]. В завершающей стадии отработки НГДО АПА проводится при выходе из ТА ПЛ или приводнении с надводного носителя на любой акватории с использованием в составе АПА модуля уточненной маршрутной навигации с компенсацией течений, магнитных склонений и не требующей внешнетраекторной привязки.

Рассмотрим пример подготовки и планирования проведения НГДО для завершающей стадии отработки АПА на одном из серийных изделий. Проводится численное исследование при моделировании динамики АПА на математической модели начального приближения с целью решения двух задач:

– выбора информативной траектории движения АПА с изменениями кинематических параметров и углов натекания жидкости в необходимых диапазонах;

– оценки зависимости величин определяемых векторов сил Fx,y,z и моментов Lx,y,z от инструментальных ошибок пилотажных датчиков, от ошибок восстановленных параметров движения, недоступных для прямых измерений, от погрешностей в определении массо-инерциальных характеристик обследуемого АПА.

Численные исследования проводились в режиме вероятностного моделирования в реальном времени на ПЭВМ по «программе-тренажере» - связке динамической и кинематической моделей. Динамическая модель в связке выполняла роль генератора «идеальных» значений и имитации измерений пилотажными датчиками параметров движения АПА. [3]

Для имитации измерений в «идеальные» значения параметров движения вводились несмещенные инструментальные ошибки датчиков с вероятностным описанием, содержащимся в

паспортах датчиков и в протоколах ЛСИ БИНСов. Значения этих ошибок, а также ошибки в определении массо-вывесочных и инерциальных характеристик, принятые при моделировании, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Принятые значения несмещенных ошибок массо-вывесочных и инерциальных характеристик АПА.

$\sigma_{\psi\theta\gamma}$	σaxyz	σωxyz	σ_M	σxc	σyc	σJx	σJy	σJz	$\sigma\lambda_{11}$	$\sigma\lambda_{22}$	$\sigma\lambda_{33}$
0,01°	0,002м/с^2	0,02 о/с	10 кг	0,0005 м	0,0005 м	1 кгм^2	50 кгм^2	50 кгм^2	0,1 кг	10 кг	10 кг

Поиск информативной траектории НГДО проводился при моделировании движения АПА с различными маршрутными заданиями в виде координат последовательных точек «прихода», формирующих коридоры наведения АПА от точки к точке шириной 10 м [3].

На графике рис.1 а) приведена траектория движения АПА в коридорах наведения, образованных заданными координатами точек «прихода», приведенными в таблице 2 вместе с погрешностями их достижения.

Таблица 2. Значения координат точек «прихода» исследовательского маршрутного задания и погрешностей их достижения при маневрировании АПА.

№ точек «прихода»	Xgзад [м]	ΔXg(ti) [м]	Ygзад [м]	ΔYg(ti) [м]	Zgзад [м]	ΔZg(ti) [м]	ti [с]
2	125,0	-0,47	-30,0	0,26	260,0	-1,98	21,01
4	372,0	0,40	-30,0	0,26	500,0	1,31	69,01
6	620,0	1,0	-30,0	0,36	735,0	4,25	116,01
8	870,0	0,82	-30,0	0,27	975,0	3,46	163,01
10	1117,0	0,25	-30,0	0,27	1215,0	0,77	211,01
12	1365	1,06	-30	-0,1	1450	2,27	257,01

Сопоставлением «идеальных» и имитационных значений некоторых параметров движения АПА в промежутках между точками «прихода» иллюстрируется точность восстановления полного набора этих параметров. На рис. 1 б) – для прямых измерений и на рис.1 в) – для параметров, недоступных для прямых измерений.

И, наконец, результаты НГДО в виде оценок значений проекций главных векторов гидродинамических сил Fx,Fy,Fz и моментов Lx,Ly,Lz на оси земной системы, вычисленных по измеренным параметрам движения АПА, приведены на графиках рис. 2 и 3 и в таблице 3 вместе с погрешностями из-за ошибок измерений параметров движения АПА и полученными из сравнения с их «идеальными» значениями.

Таблица 3. Значения оценок (^) и их погрешностей (Δ) величин проекций главных векторов гидродинамических сил $\hat{F}x$, $\hat{F}y$, $\hat{F}z$ и моментов $\hat{L}x$, $\hat{L}y$, $\hat{L}z$ на оси земной системы координат Xg,Yg, Zg , действовавших на АПА в точках «прихода»

№ точек «прихода»	$\hat{F}_x$[Н]	ΔF_x[Н]	$\hat{F}_y$[Н]	ΔF_y[Н]	$\hat{F}_z$[Н]	ΔF_z[Н]	$\hat{L}_x$[Нм]	ΔL_x[Нм]	$\hat{L}_y$[Нм]	ΔL_y[Нм	$\hat{L}_z$[Нм]	ΔL_z[Нм
2	-1398,0	-35,91	1264,17	91,53	627,9	-11,47	-4,613	2,66	680,2	543,9	-2286,7	528,2
4	-1116,0	-46,9	-1504,7	-67,88	1828,3	65,6	4,27	9,18	1731,8	672,74	1725,8	732,4
6	-1464,0	-54,1	-1213,3	-46,45	1342,3	12,31	6,5	4,4	1225,9	580,0	1272,55	574,52
8	-1341,7	-80,25	-1304,6	-43,15	1624,5	26,6	4,0	3,0	1324,6	440,0	1239,1	449,0
10	-1015,7	-25,8	-1484,5	-13,9	1850,6	-0,854	0,293	1,744	1275,4	115,7	1136,42	95,29
12	-1580,0	-87,87	-1125,4	29,1	995,4	-41,86	0,874	-1,73	109,6	-308,7	376,9	-313,1

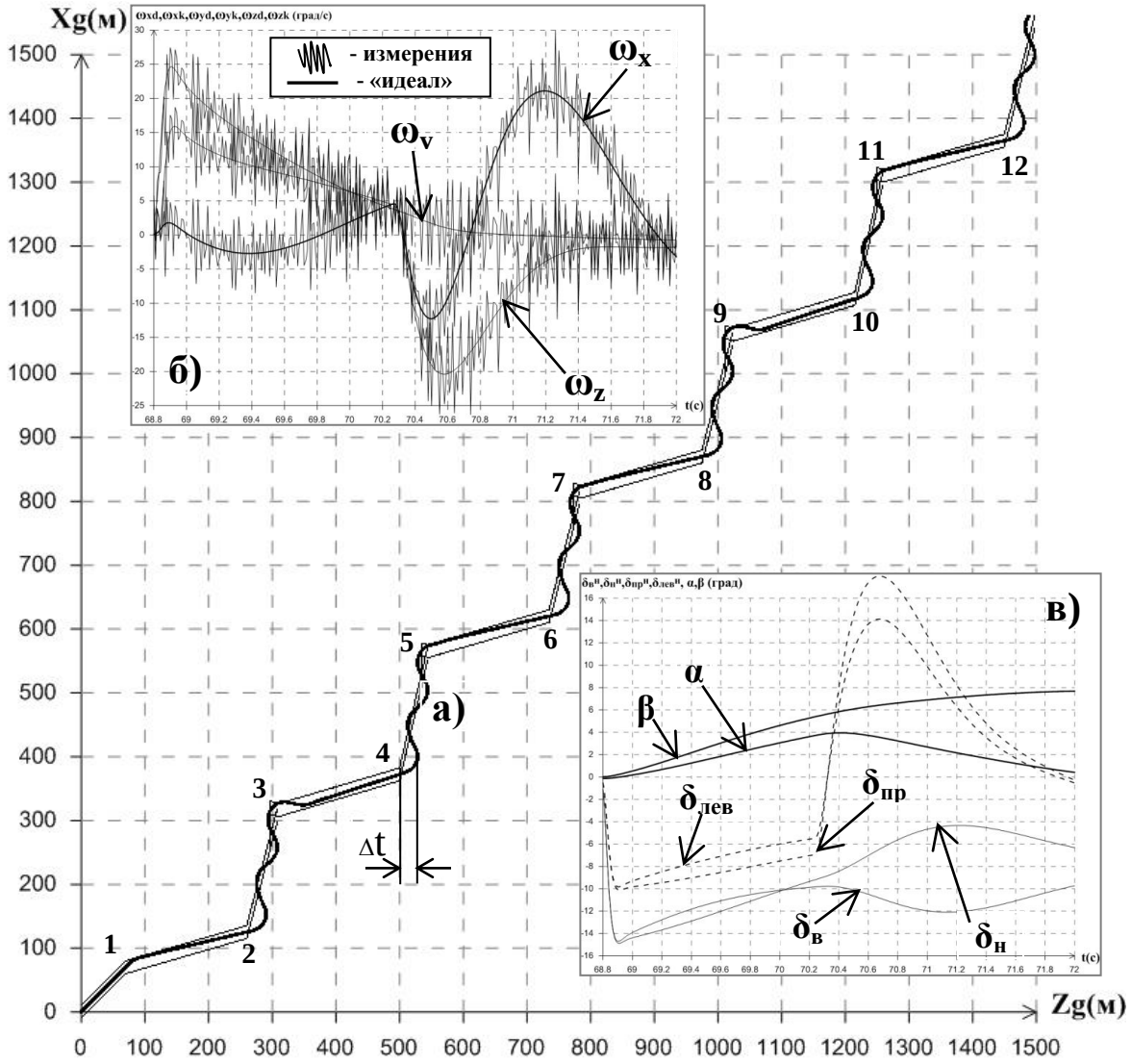


Рис. 1. Пример информативно-исследовательской траектории АПА (а); фрагмент прямых измерений параметров движения в сравнении «идеальных» значений и измеренных на временном участке $\Delta t = 68{,}8 \div 72$ с (б); фрагмент восстановленных значений углов натекания жидкости на АПА в целом и его рули на том же участке Δt (в).

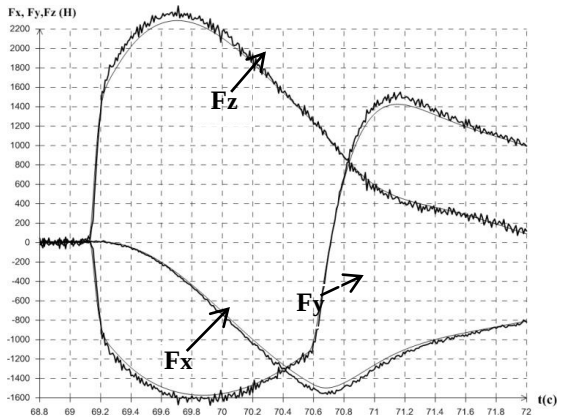


Рис. 2. Графики измеренных значений проекций главного вектора силы на оси координат OXg;OYg;OZg в сравнении с их «идеальными» значениями.

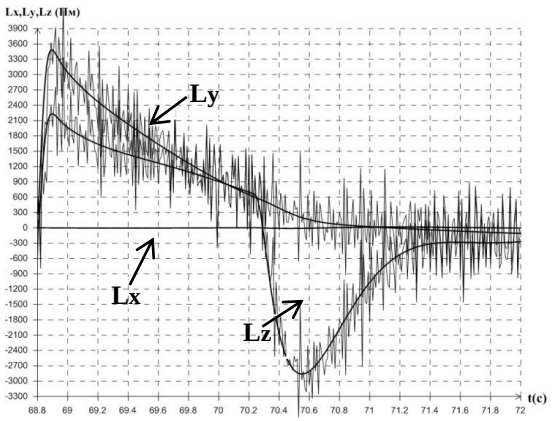


Рис. 3. Графики измеренных значений проекций вектора главного момента на оси координат OXg;OYg;OZg в сравнении с их «идеальными» значениями.

Выводы. Результатами вероятностного моделирования показано:

1. Натурное гидродинамическое обследование (НГДО) самодвижущихся подводных аппаратов возможно как на стадии отработки системы управления с плохо предсказуемым поведением АПА в информационном пространстве ограниченного мобильного полигона с внешнетраекторной поддержкой, так и обследование АПА с отработанной системой управления на любой акватории при наличии в составе АПА модуля уточненной маршрутной навигации.

2. Способ проведения НГДО позволяет получить полный набор кинематических параметров движения АПА и углов натекания жидкости в условиях меняющегося течения, магнитного склонения и с фильтрацией инструментальных ошибок и в условиях обтекания потоком как безграничной и невозмущенной жидкости, так и обтекания с ограничениями и возмущением.

Литература

1. Вощуков Л.В., Катков В.А., Мизгирева С.Ф., Надеинский В.В., Титов С.В., Чалык В.Д. Использование гидроакустических измерений в технологии оценок маневренных качеств и силового воздействия жидкости на подводный аппарат. Труды VIII международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб. Наука, 2006. С.247-251.
2. Казаков С.А., Мизгирева С.Ф., Надеинский В.В. Два способа уточненного глобального подводного позиционирования на основе комплексирования инерциальных и гидроакустических измерений параметров движения объекта: Труды XII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб: Наука, 2014.
3. Дмитриева А.И., Катков В.А., Надеинский В.В. Возможности уточнённой дальней подводной навигации АПА с использованием только бортовых измерителей параметров движения с учётом течения и ошибок измерителей. Тр. XIII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб: Наука, 2016. С. 477-479.

СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БУКСИРУЕМЫХ СЕЙСМОКОС

Е.В.Большаков, С.В.Видихин, С.В.Дунчевская, Д.Е.Лейкин, канд.физ-мат.наук, Д.В.Шелаев[1]
НПП «Форт XXI», Королев, Московская обл., Россия
[1]ООО «Комнаврус», Москва, Россия

A SATELLITE-BASED TOWED STREAMER POSITIONING SYSTEM

E.V.Bolshakov, S.V.Vidikhin, S.V.Dunchevskaya, D.E.Leikin, Ph.D., D.V.Shelaev[1]
Scientific Production Enterprise «Fort XXI», Korolev, Moscow region, Russia
[1]LLC «ComNavRus», Moscow, Russia

Средства спутниковой навигации – необходимый элемент систем позиционирования буксируемых сейсмокос. В докладе сообщается о результатах разработки и испытаний спутниковой системы позиционирования, предназначенной для высокоточного определения положения концевых буев сейсмокос относительно буксирующего судна в RTK-режиме. Особенности системы – объединение роверов в единую сеть по технологии WiFi, использование удаленной подвижной базовой станции для передачи корректирующей информации соседним роверам, большая (до 12 км) дальность действия и высокая (~ 20 см) точность позиционирования при минимальной стоимости оборудования.

Means of space-based navigation is a vital element in towed streamer positioning systems. This paper reports on field tests of a low-cost satellite-based system designed for highly accurate relative RTK-positioning of seismic streamers. The structural features of the system include wireless (WiFi) connection of rovers into a data network and the use of a remote mobile base station transmitting corrections to adjacent rovers, which ensures both the long-range coverage (up to 12 km) and high positioning precision (~20 cm).

Сейсморазведка с использованием буксируемых сеймокос в настоящее время является одним из наиболее эффективных методов поиска месторождений полезных ископаемых на море. Поскольку ошибки восстановления глубинной структуры дна напрямую зависят от неопределенности пространственного положения приемных гидрофонов сейсмокосы, обеспечение приемлемой (порядка 1 метра) точности позиционирования последних является необходимым условием успешного решения задач геологической разведки. Определение пространственной конфигурации сейсмокосы с требуемой точностью на основе использования гидроакустических методов оказывается практически неразрешимой задачей из-за быстрого нарастания ошибок позиционирования с увеличением расстояния от буксирующего судна. В данных условиях возможность повышения точности гидроакустических систем позиционирования до необходимого уровня связано с дополнением этих систем спутниковыми навигационными средствами.

В докладе обсуждаются результаты разработки и испытаний варианта спутниковой системы позиционирования, обеспечивающей в реальном времени высокоточное определение пространственного положения концевых буев сейсмокос относительно буксирующего судна. Функциональная схема системы позиционирования показана на рис.1. В систему входят две подвижные базовые станции, реализованные на основе однотипных двухчастотных приемников сигналов в стандартах GPS L1/L2/L5 и ГЛОНАСС L1/L2. Обеспечиваемая данными приемниками точность позиционирования в RTK-режиме составляет: в плане - 10+1E-6·D, по высоте - 10+1E-6·D, где D – измеряемое расстояние в миллиметрах. Основная базовая станция расположена непосредственно на судне, а вторая – на дальнем конце центральной сейсмокосы. Базовая станция на судне является основным источником корректирующей информации, а также служит точкой привязки референсной системы отсчета к глобальной системе координат WGS-84. В функции второй подвижной базовой станции входит высокоточное определение собственных координат, прием корректирующих данных с бортовой базы с последующей генерацией собственного потока корректирующей информации и его передача роверам на удаленных концах сейсмокос. Таким образом, роверы, находящиеся на передних (ближних к судну) концах сейсмокос корректируют свои координаты с учетом поправок, формируемых бортовой базой, а роверы, находящиеся на задних (наиболее удаленных от судна) концах сейсмокос – с учетом поправок, обеспечиваемых удаленной подвижной базой. (Отметим, что необходимость введения в систему второй подвижной базовой станции обусловлена ограничением возможности вычисления точного положения в режиме реального времени при расстоянии между источником и приемником корректирующей информации более 8 км. Многочастотные же приемники способны обеспечивать точное определения координат в режиме реального времени при пространственном разнесении до 50 км).

Технический результат, достигаемый при описанном способе двухступенчатой коррекции координат заключается в существенном увеличении точности определения пространственного положения дальних концов сейсмокос при одновременном снижении общей стоимости систе-

мы позиционирования благодаря максимальному сокращению необходимого числа многочастотных приемников.

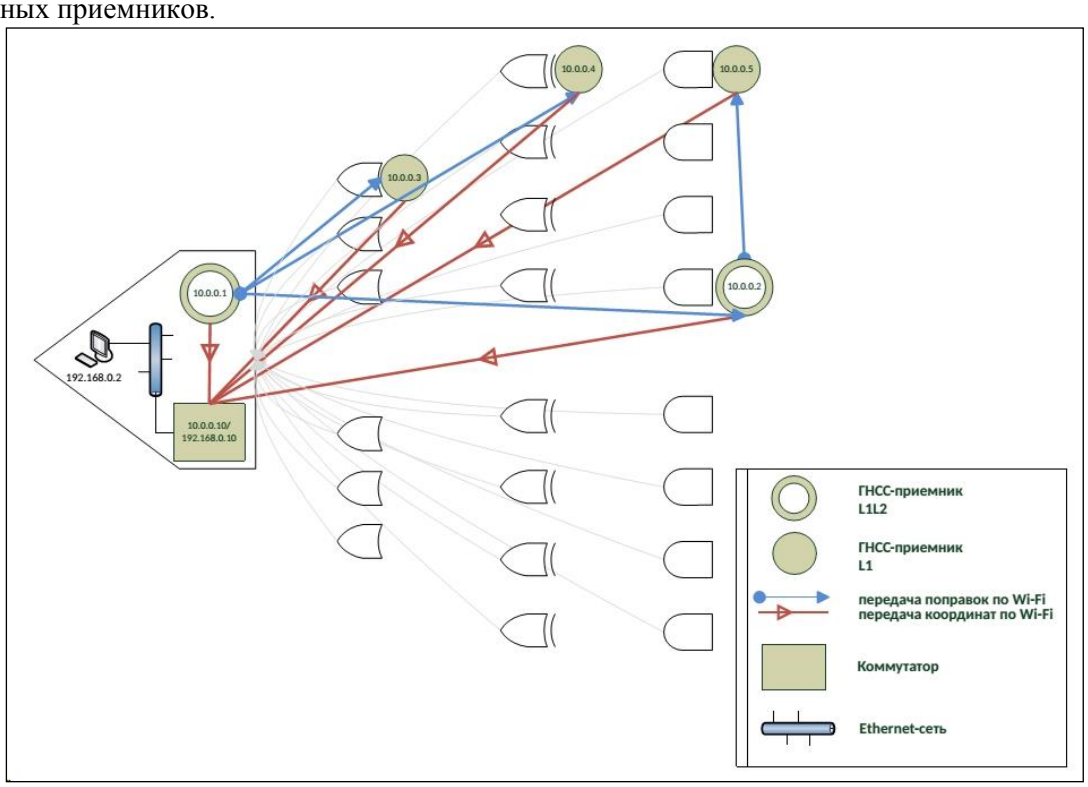


Рис. 1. Функциональная схема системы позиционирования.

Таблица 1. Точность позиционирования в статическом режиме.

Приемник	**Конфигурация**	**СКО координат (см)**		
		σ(N)	**σ(E)**	**σ(U)**
I	1	0.2395	0.2154	0.4588
II	1	0.5709	0.1702	0.3920
	2	0.2020	0.2430	0.3106
	3	0.1663	0.3337	0.4704
	4	0.1866	0.1902	0.5589
III	1	0.2440	0.1618	0.4058
	2	0.1956	0.1202	0.4074
	3	0.1726	0.1917	0.5291
	4	0.2304	0.1843	0.3437
IV	1	0.2802	0.2295	0.5899
	2	0.3076	0.4565	0.7637
	3	0.2123	0.1552	0.4011
	4	0.2396	0.2817	0.3873
V	1	0.3357	0.2205	0.4286
	2	0.2701	0.2692	0.5351
	3	0.2660	0.4249	0.4946
	4	0.3881	0.3452	0.6247

В функции подвижных приемников (роверов) входит определение собственных координат, учет корректирующих поправок, получаемых с соответствующей базовой станции, и автоматическая передача точных координат в бортовой вычислительный блок. Роверы построены на базе одночастотных GNSS-приемников, поддерживающих прием сигналов GPS L1, ГЛОНАСС L1, BeiDou B1 и выдачу GNSS-измерений с частотой 10 Гц. Обеспечиваемая точность позици-

онирования в RTK-режиме составляет: в плане - 10+1E-6·D, по высоте - 20+1E-6·D, где D – измеряемое расстояние в миллиметрах. Базовые станции и роверы объединены в единую беспроводную сеть передачи данных, развернутую по технологии WiFi с использованием сетевых роутеров, встроенных в каждый приемник, а также направленных антенн, способных поддерживать связь на большом расстоянии. Встроенные в базовые станции и роверы WiFi-модули поддерживают передачу координат и передачу/прием корректирующей информации в режиме реального времени на расстояниях до 12 км.

Программное обеспечение системы реализует распределение и идентификацию потоков данных от приемников системы. Потоки данных с приемников, содержащие координатную информацию, поступают на выделенные TCP-порты вычислительного блока. Вычислительный блок осуществляет мультиплексирование потоков координатных данных от роверов, а также реализует интерфейс для подключения внешних устройств – пользовательских терминалов. В функции пользовательского терминала входит демультиплексирование объединенного потока данных и визуализация пространственной конфигурации роверов в реальном масштабе времени.

В состав испытуемого опытного образца системы позиционирования входили: бортовая база (приемник I), подвижная база (приемник II) и три одночастотных ровера (приемники III-V). Испытания проводились в два этапа.

На первом этапе испытаний определялась точность позиционирования в статическом режиме. В качестве индикатора было выбрано среднеквадратическое отклонение (СКО) передаваемых роверами значений координат North-East-Up. Измерения с базовыми станциями и роверами проводились для четырех различных пространственных конфигураций системы. Среднеквадратические ошибки позиционирования по каждой из координат в каждой из конфигураций находились по ансамблю из 60 независимых измерений (табл. 1).

Полученные на первом этапе испытаний результаты показали, что в статическом режиме все приемники обеспечивали измерение координат с субсантиметровой точностью.

На втором этапе испытаний определялись ошибки позиционирования в движении. Максимальное удаление роверов от бортовой базы составляло порядка 10 км. Перемещение подвижной базы и роверов осуществлялось по сложной траектории со средней скоростью в пределах от 5 до 20 узлов. Погрешность позиционирования роверов определялась как расстояние от точки с текущими GPS-координатами до несмещенной оценки траектории движения носителя. Оценки траекторий движения роверов и подвижной базы определялись в результате решения самосогласованной вариационной задачи и удовлетворяли необходимым требованиям гладкости.

На рис.2 показана оценка траектория ровера, который во время испытаний удалялся на наибольшее (~10 км) расстояние от основной базы. Красная линия отвечает решению вариационной задачи, определяющему горизонтальное расстояние (в метрах) до основной базовой станции в функции времени (в секундах). На рис.3 приведена ошибка позиционирования ровера в горизонтальной плоскости в функции номера записи. Причины возникновения аномальных ошибок позиционирования в начале, середине и последней четверти записи обусловлены преднамеренными отключениями питания подвижной базы, а также федингом WiFi сигнала в зонах геометрической тени от объектов береговой инфраструктуры.

Результаты испытаний показали, что опытный образец разработанной спутниковой системы на расстояниях до 10 км от бортовой базовой станции способен обеспечивать субдециметровую точность позиционирования движущихся объектов в режиме реального времени.

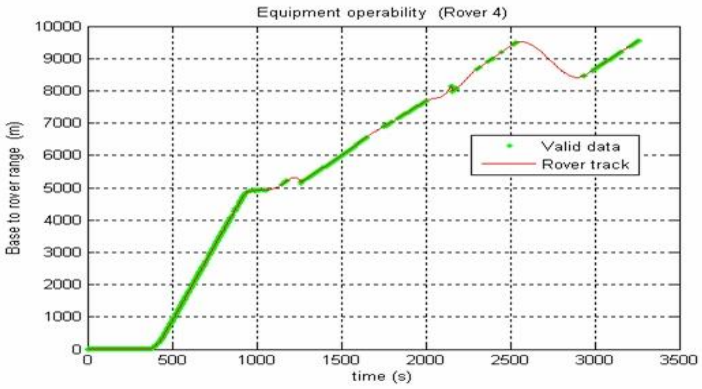


Рис. 2. Удаление ровера от основной базы в функции времени. Красная линия – несмещенная оценка траектории, зеленая линия – GPS данные.

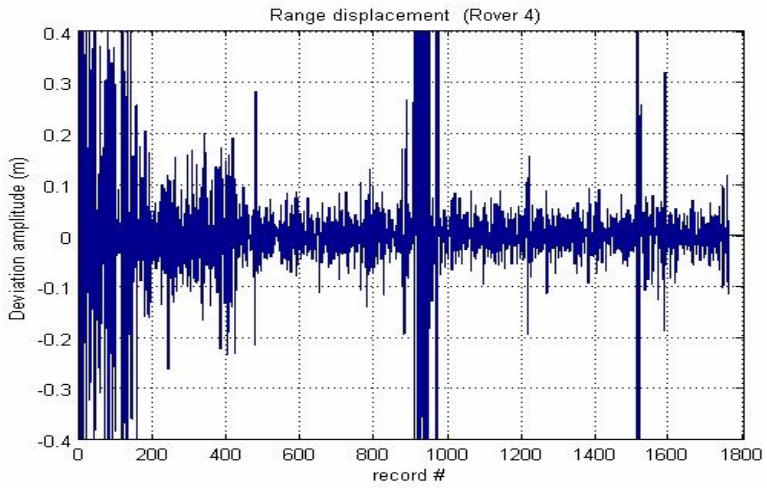


Рис. 3. Ошибки позиционирования в движении для приемника IV. По вертикали – наблюдаемое отклонение ровера от траектории (в метрах), по горизонтали - номер блока данных.

РАЗРАБОТКА ИМИТАТОРОВ ВХОДНЫХ ДАННЫХ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

В.В.Прокопович, А.В.Шафранюк, канд.техн.наук
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

DEVELOPMENT OF INPUT DATA SIMULATORS FOR PRIMARY INFORMATION PROCESSING IN SONAR SYSTEMS

V.V.Prokopovich, A.V.Shafranyuk, Ph.D.
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы построения имитаторов входных воздействий первичной обработки данных в гидроакустических системах широкополосной и узкополосной пеленгации, а также каналов индивидуального сопровождения и обнаружения гидролокационных сигналов. Приводятся сведения об алгоритмах работы и параметрах имитационных моделей, а также способ их сопряжение со штатным программным обеспечением гидроакустических систем. Показаны примеры вырабатываемых данных. В заключении рассматриваются текущие проблемные вопросы.

The questions of construction of input effects imitators of primary data processing in sonar systems of broadband and narrowband direction finding, as well as channels of individual tracking and detection of sonar signals are considered. Information on operation algorithms and parameters of simulation models, as well as the way they are interfaced with the regular software of sonar systems are given. Examples of generated data are shown. In conclusion, current problems are considered.

При разработке штатного программного обеспечения для универсальных вычислителей пассивных гидроакустических систем (ПГАС) возникает задача формирования входных воздействий для задач первичной обработки информации (ПОИ) в целях отработки алгоритмов и программного обеспечения (ПО). При этом существует требование работы в реальном масштабе времени и возможности оперативного внесения изменений в параметры имитации функционирования спецвычислителей, моделей приёмных трактов и собственно антенных решёток ПГАС. Имитаторы данного типа на настоящий момент в открытых источниках не представлены, а основными используемыми точками входа для имитационных воздействий являются входы спецвычислителей (по выходам приёмных каналов) и системы отображения (по выходу универсального вычислителя). Тем не менее, рассматриваемая организация отработки (без использования тракта спецвычислителя) позволяет проводить имитацию в реальном масштабе времени с возможностью изменения параметров функционирования спецвычислителя, средств наблюдения, а также корректировки тактического эпизода «на лету», например, задействование излучающего тракта, совершение манёвров носителем ПГАС и т.п. Кроме того, при наличии подобных имитаторов возможно приступить к отладке ПО универсальных вычислителей на более ранних этапах ОКР. Также возможно их использование для построения тренажёров совместно со штатным ПО ПГАС, что существенно повысит достоверность данных в тренажёре и позволит повысить качественный уровень подготовки операторов ПГАС.

Используемые в имитационном программном обеспечении модели. Имитация функционирование ПГАС рассматривается в описываемом ниже контексте (рис.1). Входными данными для имитации являются источники шумоизлучения объектов и гидролокационные сигналы, которые при распространении через среду претерпевают некоторое преобразование (с учётом многолучёвости, рассеяния, отражения, затухания и фокусирования). Прошедшие через гидроакустическую среду сигналы поступают на приёмные элементы антенной решётки, и претерпевают преобразование, которое описывается моделью функционирования ПГАС в соответствующем режиме работы.

Используются две модели шумов наблюдаемых объектов:

- шумоизлучение объекта, вызванное его движением и работой механизмов;
- гидролокационные сигналы.

Шумоизлучение объекта представляет собой случайный Марковский процесс со спектром, учитывающим сплошную часть спектра шумов объекта, его амплитудную модуляцию (в том числе качки), спектры вально-лопастного звукоряда и шумов механизмов (в качестве дискретной составляющей).

Гидролокационные сигналы описываются в детерминированной форме, при этом используются следующие их виды: тональный и политональный, линейно-частотно модулированный, частотно- и фазоманипулированные. Также в ходе имитации учитываются шумы среды, собственные шумы носителя и гидродинамические шумы обтекателей.

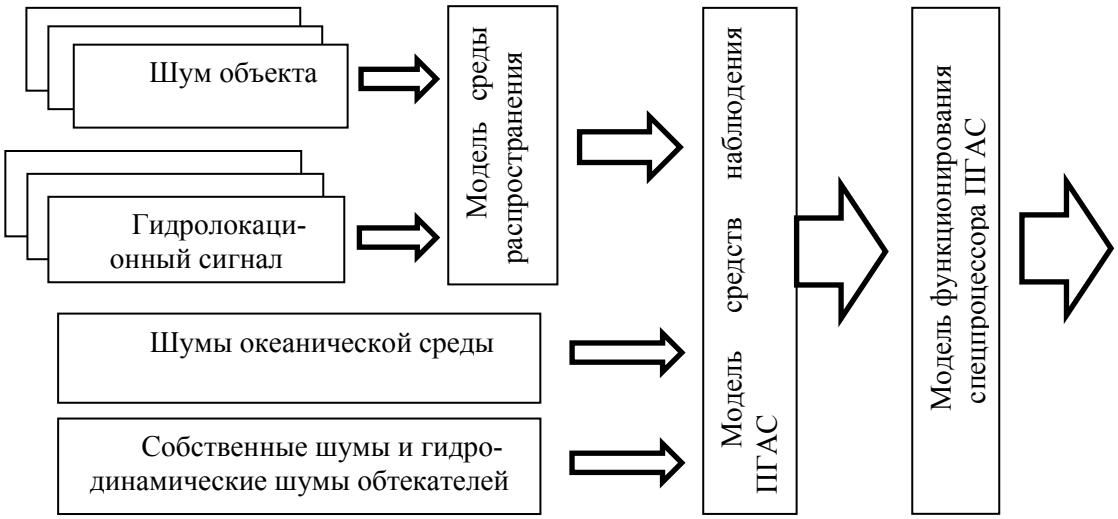


Рис. 1. Имитация функционирования ПГАС.

Модели средств наблюдения формируют исходные данные для моделей функционирования ПГАС в части формирования отметок, корреляции шумовой составляющей, уровня сигнала в пространственном канале и т.п. Средством наблюдения при этом является антенная решётка, задаваемая расположением датчиков в системе координат антенны, амплитудно-частотной характеристикой приёмных трактов, ориентаций и положением системы координат антенны в системе координат носителя ПГАС. Модель средства наблюдения обеспечивает модель функционирования основными характеристиками: коэффициентами концентрации и ширинами характеристик направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Данные на выходе модели функционирования ПГАС представляются в обобщённом виде и преобразуются к формату отрабатываемого ПО ПГАС специально разрабатываемым шлюзом.

Описание моделей функционирования ПГАС и их взаимодействия со штатным программным обеспечением. Перечень моделей функционирования соответствует основным режимам работы ПГАС:

- развёртки мощности и индикаторного ОСП в каналах широкополосного (ШПП) и узкополосного (УПП) шумопеленгования;
- временные реализации по выходу сформированного пространственного канала.

Модель алгоритма функционирования в интересах имитации входных данных в режиме широкополосного шумопеленгования. В режиме широкополосного шумопеленгования ПОИ ПГАС осуществляет выделение откликов шумящих объектов на фоне шумов моря в широкой полосе частот. При этом область пространства разбивается на сетку пространственных каналов (далее – ПК), определяемых направлением в пространстве в системе координат носителя ПГАС. Шаг по углу между ПК задается исходя из характеристик направленности антенны, обеспечивая необходимую пространственную плотность сетки. Выходными данными рассматриваемой модели являются значения мощности шумового сигнала в каждом ПК, либо отношение сигнал-помеха прединдикаторной развертки в заданном диапазоне (-ах) частот и соответствующих времён накопления.

Разработанная модель формирует отклики шумового сигнала по основным энергонесущим лучам, достигшим приемника, с учетом лучевой структуры рефракционного распространения звука. Для имитации корректной формы отклика и учета взаимной корреляции между ПК, с учётом ширины главного лепестка характеристики направленности антенны, проводится её аппроксимация с использованием функции Гаусса [6]. Для расчёта мощности (либо отношения сигнал-помеха) отклика шумового сигнала в пеленгационном рельефе, учитывается модель шумоизлучения, содержащая в частности параметры сплошной части спектра шумового сигнала в точке излучения, а также коэффициент концентрации антенны в направлении прихода лучей.

Модель алгоритма функционирования в интересах имитации входных данных в режиме узкополосного шумопеленгования. В режиме узкополосного шумопеленгования ПОИ ПГАС осуществляет выделение отметок шумящих объектов на фоне шумов моря в узкой полосе частот, определяемой, как правило, частотным разрешением аппаратуры ПГАС. При этом в пространстве задаётся сетка ПК, а в частотной области определяется сетка спектральных отсчётов.

Выходными данными являются мощность или отношение сигнал-помеха в каждом пространственно-частотном канале.

Моделирование проводится аналогично ШПП с некоторыми отличиями. Форма характеристики направленности антенны в узкой полосе частот приближается функцией sinc, для учета боковых лепестков. Для полной и адекватной имитации отклика шумового сигнала используются модель шумоизлучения, дополненная параметрами дискретной составляющей шумового сигнала и его амплитудной модуляции (вальнолопастной и модуляции качкой).

Модель алгоритма функционирования в интересах имитации входных данных в режиме спектрального анализа и обнаружения гидролокационных сигналов. ПОИ ПГАС в этих режимах осуществляет анализ временных последовательностей в заданном наборе ПК. Выходными данными модели алгоритма функционирования являются временные выборки в пространственных каналах антенны ПГАС. Реализация шумов наблюдаемого объекта моделируется в дополнение к указанным моделям шумоизлучения с учетом рефракции и отражений в канале распространения, а также моделей гидролокационных сигналов основных типов (тональных, частотно- и фазомодулированных и т.п.), а также реверберационных шумов излучателя.

Взаимодействие со штатным ПО. Взаимодействие описанных выше моделей со штатным ПО осуществляется посредством шлюзов формирования данных (рис.2).

Каждый шлюз осуществляет прием данных от модели функционирования, формирование на их основе выходных данных согласно штатному протоколу обмена и их своевременную выдачу с требуемой временной диаграммой. Также рассматриваемые шлюзы выполняют обработку управляющих команд от штатного ПО (например, параметры углов наведения КСА) с последующей передачей команды в соответствующую модель функционирования и осуществляет объединение данных от различных моделей функционирования (в случае необходимости).

Подобная организация позволяет использовать модели функционирования без изменения интерфейса для различного штатного ПО, а также распределять вычислительную нагрузку имитации между различными вычислителями (входящими в имитационный комплекс).

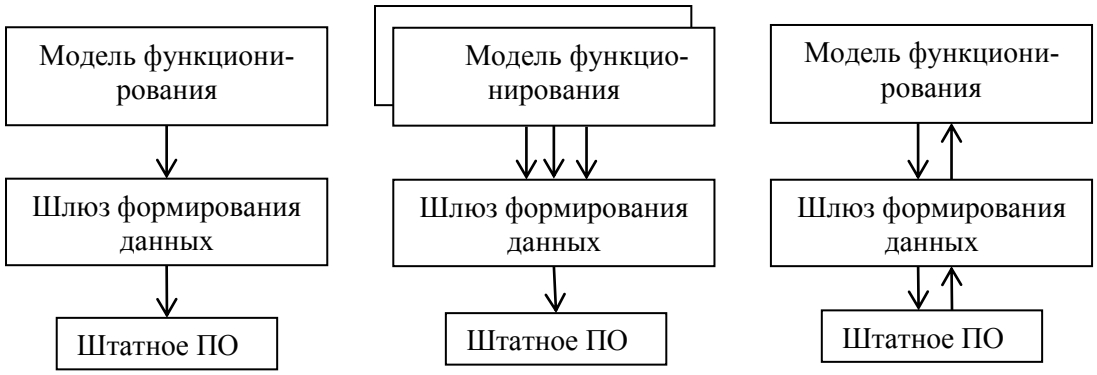


Рис. 2. Примеры взаимодействия моделей функционирования со штатным ПО.

Примеры вырабатываемых данных. В качестве примеров вырабатываемых данных представлены входные данные (пеленгационные рельефы) для ПОИ ПГАС режимов ШПП (рис.3) и УПП (рис.4).

Выводы. Опыт использования имитационного ПО показал удовлетворительные результаты в процессе отладки. Гибкость системы позволила проводить необходимые корректировки в соответствии с изменениями вносимыми в штатное ПО ПГАС. При этом удалось достигнуть существенного сокращения времени отладки и провести её без использования спецпроцессоров.

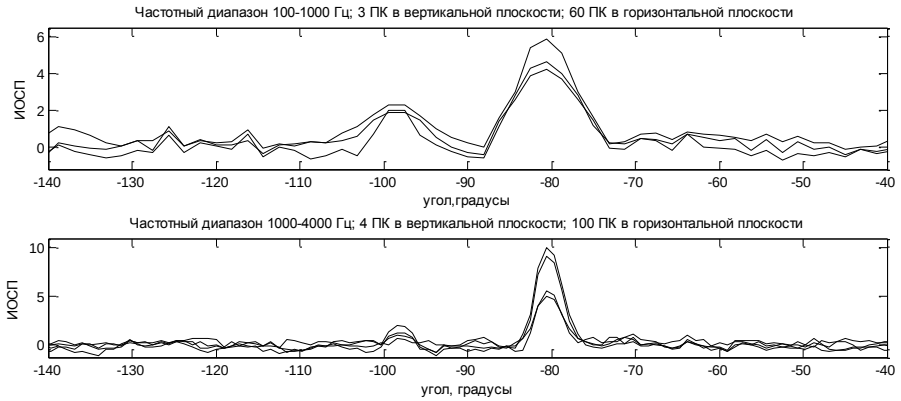


Рис. 3. Результаты имитации ПОИ ПГАС в режиме широкополосного шумопеленгования.

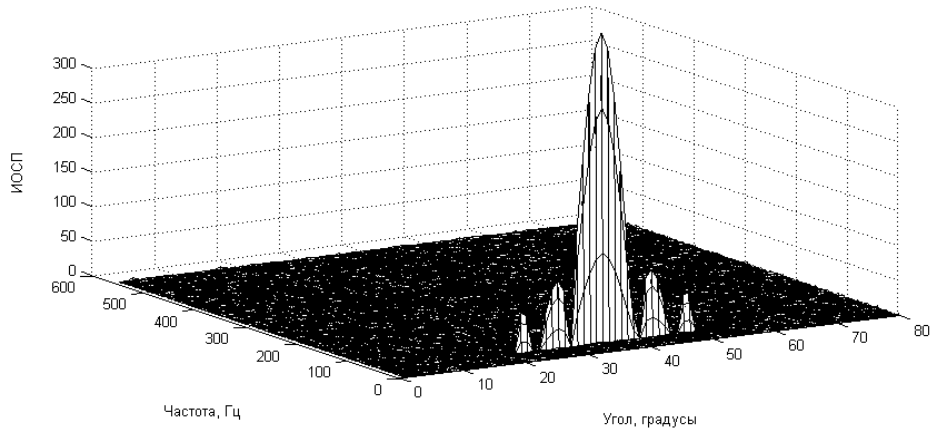


Рис. 4. Результаты имитации входа ПОИ ПГАС в режиме узкополосного шумопеленгования.

Литература

1. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания – СПБ.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ « Электроприбор», 2010. –509с.
2. Трусов Г.В. Введение в математическое моделирование – М.: Университетская книга, Логос, 2007г.
3. Шафранюк А.В. Подход к построению универсального имитационного программного обеспечения в интересах отработки технических и алгоритмических решений в гидроакустике // А.В. Шафранюк, В.В. Прокопович //Материалы конференции «УМАС-2016». – 2016. – С. 257-266.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА В ГИДРОАКУСТИКЕ

А.В.Шафранюк, канд.техн.наук, В.В.Прокопович
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

THE EXPERIENCE OF CREATING AN IMITATION-MODELING COMPLEX

A.V. Shafranyuk, Ph.D., V.V. Prokopovich
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы построения имитационно-моделирующего комплекса в целом и используемых в нём моделей в частности. Освещаются вопросы построения системы моделей и используемые подходы к моделированию, а также использования имитационных комплексов в процессе разработки и сопровождения гидроакустических изделий. Приводятся результаты использования такого комплекса в процессе проектирования. Даётся прогноз возможных путей развития подобных систем с учётом наращивания числа киберфизических систем в рамках четвёртой промышленной революции.

The problems of constructing an imitation-modeling complex as a whole and models used in it in particular are considered. The issues of constructing a system of models and approaches to modeling, as well as the use of imitation complexes in the development and maintenance of hydroacoustic products are discussed. The results of using such a complex in the design process are given. The forecast of possible ways of development of such systems is given, taking into account the increase in the number of cyberphysical systems within the framework of the fourth industrial revolution.

Разработка таких сложных систем как гидроакустические комплексы (ГАК) и системы требует значительных средств и времени на отработку алгоритмов и программного обеспечения. Одним из путей снижения подобных издержек является использование имитационно-моделирующих стендов (ИМС) на всех этапах разработки и сопровождения. Использование таких стендов на этапах жизненного цикла изделия отображено в таблице 1.

Таблица 1. Сопровождение изделия на этапах жизненного цикла.

Наименование этапа	**Решаемые задачи**	**Чем обеспечивается**
НИР, аванпроект	1) моделирование в интересах разработки концепции ГАК, формирования ТЗ, 2) 2) иные научные исследования	1) свободной конфигурацией средств освещения подводной обстановки, параметров объектов в базе данных(БД) в тактических эпизодах и т.п. 2) имитацией произвольных районов с использованием системы гидроакустических расчётов
технический проект	1) проектирование антенн 2) разработка алгоритмов и идентификация их параметров	-//-
этап рабочего проекта	отработка и моделирование программного обеспечения	1) свободной конфигурацией средств освещения подводной обстановки, параметров объектов в БД в тактических эпизодах и т.п. 2) возможностью формирования входной информации для различных уровней обработки информации в ГАК
испытания и присвоение литер	проведение стендовых испытаний	1) свободной конфигурацией средств (ГАК), параметров объектов в БД 2) имитацией произвольных районов в имитаторе тактической обстановки и с использованием системы гидроакустических расчётов 3) возможность формирования входа различных уровней обработки информации в ГАК
сопровождение серийного изделия	отработка возникших внештатных ситуаций корректировка программного обеспечения и алгоритмов	-//-

Таким образом, выделяется несколько ключевых требований, выдвигаемых к ИМС:
1) использование единых детализированных моделей при имитации данных;

2) формирование входных данных для основных уровней обработки информации в ГАК: первичной, вторичной, комплексной и выходных данных комплексной обработки;

3) работа ИМС в реальном масштабе времени (за исключением имитации приёмных каналов).

В соответствии с такой постановкой задачи была предложена концепция и разработан имитационно-моделирующий комплекс, рассматриваемый ниже.

Обзор существующих имитационных систем. Существующие на текущий момент имитационные системы можно разделить на две большие группы:

1) узкоспециализированное имитационное программное обеспечение (ПО), разрабатываемое для отладки конкретных ГАК и формирующее, как правило, данные по выходам приёмных каналов;

2) имитационное ПО общего назначения, предназначенное для моделирование широкого спектра гидроакустических устройств.

Рассматриваемое в докладе ПО относится ко второй группе, которая имеет ряд явных преимуществ перед первой, а именно:

1) единство имитационных моделей, позволяющее осуществлять сравнение различных ГАК, формирование входов различных уровней обработки в ГАК согласованных между собой;

2) масштабируемость, позволяющая проводить доработку и совершенствование такого ПО во времени с наращиванием необходимых имитационных моделей;

3) ускорение времени разработки ИМС для конкретного ГАК.

Разработка имитационного ПО второго типа ведётся в основном за рубежом. К отечественным разработкам аналогичного типа можно отнести «Онтомап-В2» [1]. Однако формируемые в нём модельные данные являются, по сути выходными данными уровня вторичной обработки информации.

За рубежом, данное ПО развивается в последнее время особенно активно. К наиболее известному подобному открытому ПО можно отнести:

1) WOSS - World Ocean Simulation System, разработки Федерико Гуерра в сотрудничестве Центром морских исследований НАТО [2];

2) Under Sea Modeling Library (USML), разработки Шона Рейли факультета морской инженерии университета Род-Айленда [3].

Представление моделей. Для представления моделей был выбран онтологический подход [4], который лежит также в основе реляционных баз данных. При этом параметры сущностей в онтологической модели представляют собой контекст в котором выполняется моделирование функционирования уровней обработки в ГАК.

Например, при формировании входа вторичной обработки информации потребуется имитировать работу формирования пространственных каналов и первичной обработки информации (обнаружения) отметок. В таком случае контекстом модели функционирования этих уровней обработки в ГАК будет являться антенная решётка с приёмными каналами, параметры обработки данных на первичном уровне (вероятность ложной тревоги, время накопления, частотные диапазоны и т.п.).

В основе модельного ПО лежат алгоритмы имитации работы уровней обработки информации в ГАК в следующем наборе:

1) формирование пеленгационных рельефов: мощностных развёрток и индикаторного ОСП в широко- и узкополосной пеленгации;

2) формирование откликов согласованного фильтра в активных режимах;

3) формирование выходов пространственных каналов во временной и спектральной областях;

4) формирование обнаруженных сигнальных отметок (в т.ч. и ложных) для активных (моно- и бистатических) и пассивных режимов;

5) формирование трасс объектов, имитация их классификации и комплексирования данных различных режимов ГАК.

Каждый такой алгоритм функционирует в контексте «устройства» (онтологической сущности), которое можно условно связать с уровнем обработки, либо режимом функционирования ГАК. Сущность «устройство» содержит параметры обработки сигнала на всех уровнях от первичной то третичной включительно и включает в себя сущности установленных на носителе антенн и излучателей, которые характеризуются геометрическими параметрами их установки и

характеристиками приёмных/излучающих трактов. В свою очередь антенные решётки включают сущности, описывающие датчики первичной информации.

При этом используемые «устройством» антенны характеризуются секторами обзора характерными для моделируемого режима и частотными диапазона (с учётом частотных характеристик приёмных тактов антенны).

Всё это вместе определяет контекст выполнения алгоритма имитации функционирования. Такая организация представления моделируемой сущности позволяет изменять контекст работы имитационного алгоритма и моделировать различные режимы ГАС путём простого изменения параметров.

Другим важным решением принятым при построении ИМС является использование декларативного подхода в противовес императивному. Т.е. моделирование ведётся не путём прогона входных данных через аналог штатного ПО, а путём прямого расчёта интересующих нас величин. Так для развёртки широкополосного пеленгования нас будет интересовать ширина характеристики направленности и коэффициент концентрации антенной решётки на среднегеометичекой частоте моделируемого частотного диапазона. Тогда в случае большинства используемых антенн отклик сигнала будет представим в форме гауссиана.

Декларативный подход в нашем случае будет обладать следующими преимуществами:

1) универсализм моделей, не завязанный на конкретное штатное ПО ГАК;

2) меньшие требования к вычислительным ресурсам, что позволяет обеспечить быстродействие моделей на уровне реального времени.

Взамен преимуществ жертвуется в некоторой степени адекватность данных, и её поддержание на требуемом уровне является одной из наиболее сложных научных задач при таком подходе.

Концепция построения имитационно-моделирующего ПО. Программное обеспечение ИМС выполнено в виде набора библиотек, которые описывают модели сущностей, гидроакустического такта, а также алгоритмов имитации функционирования. Работа каждого из алгоритмов имитации функционирования может выполняться независимо от остальных в отдельном исполняемом файле, что определяется ответствующими настройками конфигурации. Это позволяет существенно распараллелить процесс имитационных вычислений простым увеличением количества исполняемых файлов и обменом данными по системе сокетов.

При этом каждый из алгоритмов имитации функционирования выдаёт модельные данные во внутреннем формате ИМС, что позволяет обеспечить их общность. Задача сопряжения форматов выходных модельных данных и входных данных соответствующего уровня обработки в ГАК решается использованием простейших программ-шлюзов, написание которых под штатное ПО конкретного разрабатываемого ГАК требует незначительных ресурсов.

Дальнейшие пути развития моделирующего ПО. Рассмотренное в докладе ПО ИМС предполагается развивать в двух основных направления.

В первую очередь планируется расширение функционала как в части алгоритмов имитации функционирования ГАК (например, на область эхолотов, лагов и т.п.), так и в смежные области радиолокации, навигации и т.п. Также возможно расширение области применения ИМС в качестве ПО для тренажёров ГАК.

С другой стороны данная модель позволяет производить прогнозные расчёты и использоваться в системах поддержки решений и обеспечивать исходными данными задачи оптимизации поведения носителя ГАК в различных тактических ситуациях.

Литература

11. http://oogis.ru/downloads/ontomap-V2_rus.pdf.
12. http://telecom.dei.unipd.it/ns/woss/
13. http://oalib.hlsresearch.com/Rays/USML/usml_frontpage
14. Когаловский М., Калиниченко Л. Концептуальное моделирование и онтологические модели // Онтологическое моделирование. Труды симпозиума в г. Звенигороде, 19-20 мая, 2008

КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И АНТЕНН В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

С.Н.Карпачев, канд.физ-мат.наук, А.Е.Карпенко, С.Ю.Макаров, Т.С.Никулина, А.А.Селищев
АО «Научно-исследовательский инженерный институт», Балашиха, Московская обл., Россия

COMPLEX OF THE AUTOMATED TEST BENCHES FOR CONTROL OF SONAR TRANSDUCERS AND ANTENNAS PARAMETERS IN THE PRODUCTION PROCESS

S.N.Karpachev, Ph.D., A.E.Karpenko, S.Yu.Makarov, T.S.Nikulina, A.A.Selischev
JSC «Scientific-Research Engineering Institute», Balashikha, Moscow Region, Russia

Рассматривается комплекс автоматизированных стендов для контроля пьезоэлементов, пьезопакетов и пьезоэлектрических преобразователей, в том числе и в составе антенн. Стенды позволяют получить данные об активной составляющей проводимости и емкости в заданной полосе частот, сравнить их с требованиями конструкторской документации и сделать вывод о годности изделий. Комплекс также включает в себя автоматизированный стенд измерения параметров гидроакустических антенн, позволяющий получить данные о чувствительности, АЧХ и диаграммах направленности готовых изделий в режиме приема и излучения.

A computer-aided system of facilities for testing piezolectric elements, piezo packages and piezolectric transducers (also included in antennas) is presented. The system allows one to obtain information about the active component of conductivity and capacitance in a given frequency band, to compare those with the engineering documentation requirements and to make a conclusion about the product workability. The system also includes the computer-aided sonar antenna parameters measuring equipment, allowing to obtain data on sensitivity, frequency response and beam pattern of the finished products both in the receiving and transmiting modes.

Для систем подводной связи и обнаружения целей в составе как передающих, так и излучающих гидроакустических антенн (в дальнейшем - ГАА) широко применяются пьезоэлектрические материалы. При этом вопрос контроля качества составляющих этих ГАА, к которым относятся пьезоэлементы, пьезопакеты и, наконец, отдельные пьезоэлектрические преобразователи, является весьма актуальным на соответствующих стадиях производства. На первоначальных стадиях превалирующим являются электрические параметры изделий – составляющие импеданса: активная проводимость, емкость и тангенс угла потерь.

Обзор приборов и устройств для измерения электрофизических параметров пьезокерамических преобразователей, а также их классификация приведены, например, в [1]. С тех пор появилось множество универсальных устройств измерения комплексной проводимости в широком диапазоне частот. Для повышения точности и уменьшения времени измерения, а также исключения влияния ошибок оператора на обрабатываемые результаты используется автоматизированный метод измерения, основанный на управлении такими устройствами с помощью компьютера.

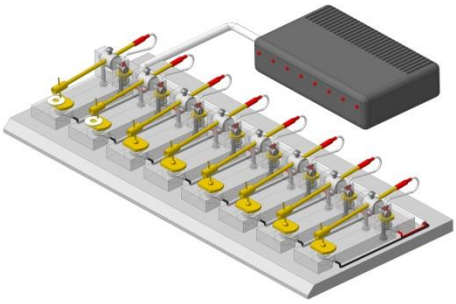
Наш комплекс автоматизированных стендов берет начало с применения в 2005-2007 г.г. в ОКР измерителя иммитанса Е7-20. Диапазон рабочих частот этого прибора составляет от нескольких Гц до 1 МГц, что практически перекрывает нужды всех гидроакустических систем от векторных приемников до неконтактных датчиков цели. К недостаткам этого прибора относится фиксированный шаг по частоте, равный 1 кГц в области высоких частот, а также достаточно большое время, необходимое для проведения измерений. К достоинствам можно отнести невысокую стоимость и доступность российскому потребителю. Именно на применении этого измерителя основаны, в основном, стенды, входящие в наш комплекс.

Первый из таких стендов предназначен для контроля параметров пьезоэлектрических колец: частоты резонанса и антирезонанса, емкости и тангенса угла потерь.

Конструктивно стенд выполнен в виде комплекта стандартных измерительных приборов, подключаемых к изделию через коммутационный модуль.

Комплект измерительных приборов включает в себя измеритель иммитанса Е7-20, функциональный генератор АКИП-3413/1 и АЦП Е20-10. Коммутационный модуль представляет собой набор слаботочных реле, управляемых с помощью модуля ввода-вывода Ke-USB24A, подключенного к компьютеру, и четыре высокочастотных развязывающих трансформатора. Процесс измерения параметров колец происходит в следующей последовательности – в комплект контактно-коммутационных устройств устанавливаются восемь пьезоэлектрических колец. Измерения резонансных свойств в полосе частот от 100 до 400 кГц проводятся с помощью генератора АКИП-3413/1 и АЦП Е20-10. Сначала специальная программа управления стендом одновременно измеряет резонансные свойства четырех колец, а затем с помощью коммутационного модуля происходит переключение на следующие четыре кольца. Измерения емкости и

тангенса угла потерь проводятся последовательно для каждого кольца. Для этого коммутационный модуль с помощью программного обеспечения отключает кольца от генератора и АЦП и последовательно подключает каждое из них к измерителю иммитанса Е7-20. На рис. 1 приведен схематический вид контактных устройств и реальный вид экрана при измерении антирезонанса четырех колец.



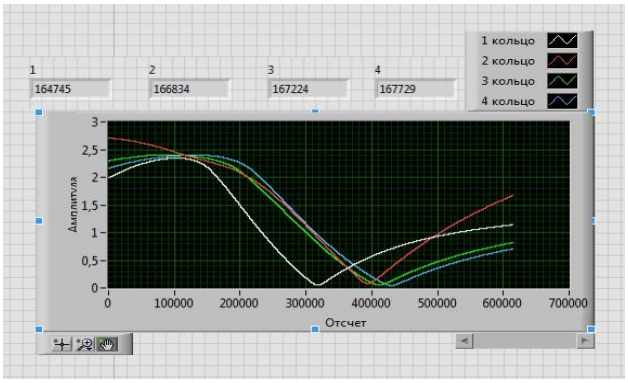


Рис. 1. Внешний вид контактно-коммутационных устройств и рабочего экрана программы.

По завершении измерения формируется протокол в формате Excel со всеми необходимыми параметрами.

Второй стенд является наиболее универсальным и позволяет получить частотные зависимости активной проводимости и емкости пьезосборки на любой стадии ее изготовления. С помощью программы «Test_param_antenna», управляющей измерителем Е7-20, проводится контроль практически всех изготавливаемых в институте пьезопреобразователей в пределах его рабочего частотного диапазона. Пример получаемых зависимостей приведен на рис. 2:

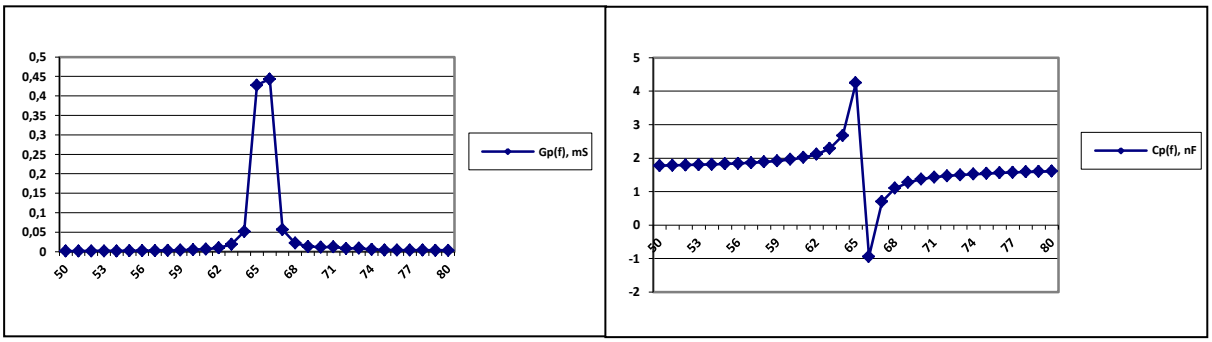


Рис. 2. Активная проводимость G_p и емкость C_p реальной пьезосборки.

Универсальность методики измерения данных параметров применительно к пьезосборке как находящейся в воздухе, так и погруженной рабочей частью (без электрических соединителей) в воду позволяет предварительно (до установки в корпус и заливки) оценить ее практическую работоспособность и рассчитать чувствительность в режимах излучения и приема с использованием данных по величине входной проводимости [2].

Для проведения измерения параметров преобразователей, входящих в состав многоэлементных антенных блоков и ГАА используется Автоматизированный стенд контроля параметров преобразователей изделия (АС КППИ). При этом измерения параметров проводятся с погружением антенных блоков и ГАА в малый гидроакустический бассейн. Конструктивно стенд выполнен в виде комплекта стандартных измерительных приборов, подключаемых к изделию через устройство коммутации УК. При этом для непосредственного измерения параметров используются измеритель иммитанса Е7-20 и измеритель сопротивления изоляции MI3121H фирмы Metrel.

Устройство коммутации обеспечивает последовательное подключение отдельных преобразователей в составе ГАА к стандартным измерительным приборам. УК выполнено в виде единого блока, в состав которого входит набор коммутационных реле, число которых соответствует числу преобразователей, входящих в состав ГАА; реле, обеспечивающих переключение измерительных приборов, а также модуль ввода-вывода Ke-USB24A. Последний подключается к компьютеру, который с помощью программы Test_antenna_03, управляет процессом последова-

тельного переключения преобразователей. После этого происходит передача результатов измерения на компьютер для их последующей обработки и составления протокола.

Внешний вид устройства АС КППИ УК показан на рис.3

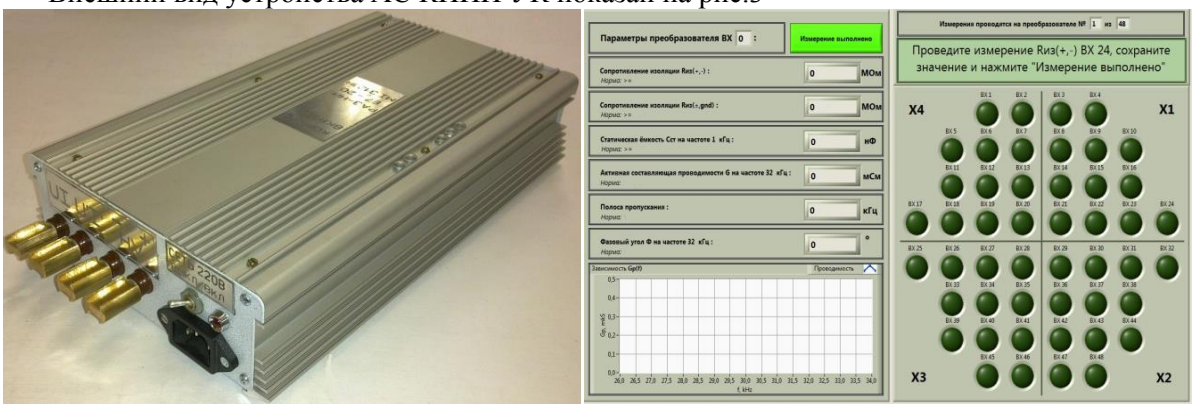


Рис. 3. Внешний вид УК АС КППИ и экрана программы Test_antenna_03.

Входящий в состав комплекса автоматизированный стенд измерения параметров приемопередающих ГАА [2] применяется на заключительной стадии производства и позволяет контролировать параметры готовых ГАА (амплитудно-частотная характеристика – АЧХ и диаграмма направленности – ДН) в диапазоне частот 10-200 кГц в режимах приема и излучения с относительной ошибкой измерения до 20%. В отличие от всех рассмотренных выше стендов, измерения проводятся стандартным импульсным методом в большом бассейне АО «НИИИ» (6*6*30 м^3) с помощью гидрофона, в качестве которого используется в зависимости от поставленных целей один из измерительных преобразователей: тип 8104 фирмы «Брюль и Къер», ТС4033-1 фирмы «Teledyne» или ВС-311 производства компании Zetlab. Снятие ДН ГАА производится с использованием поворотного устройства «Радант AZ1000-1T», которое в соответствии с алгоритмом программы «Стенд ГАА» обеспечивает автоматизированный режим поворота ГАА на необходимый угол. Излучающий радиотракт включает в себя генератор АКИП-3414/1 и амплитудный усилитель AVA-1420; приемный – селективный усилитель У2-11 и АЦП Е20-10. Переключение тестируемой ГАА и измерительного преобразователя между входным и выходным трактом стенда для обеспечения снятия характеристик излучения и приема ГАА, а также проведения калибровки приемного и выходного трактов обеспечивается устройством коммутации, собранным на основе управляемого компьютером модуля Ke-USB24R.

Особенностью стенда является алгоритм измерения параметров ГАА, основанный на предварительном вычислении коэффициентов усиления приемного и излучающего трактов при каждом запуске программы «Стенд ГАА». Для расчета чувствительности программа использует индивидуальную калибровочную характеристику каждого измерительного преобразователя.

По окончании процесса измерений на экране выводятся графики ДН или АЧХ ГАА с указанием максимального значения чувствительности ГАА и соответствующего ему угла поворота. Результаты всех измерений записываются в специальные файлы в формате txt, которые затем преобразуются дополнительной программой в соответствующие формы отчета по каждому изделию. На рис. 4 приведен типовой вид экрана программы при измерении ДН антенны в режиме приема.

Отметим в заключение, что применение вышеописанных стендов позволило существенно повысить точность измерения параметров как отдельных пьезоэлементов и пьезопакетов, так и готовых гидроакустических антенн, и значительно сократить время выполнения измерений.

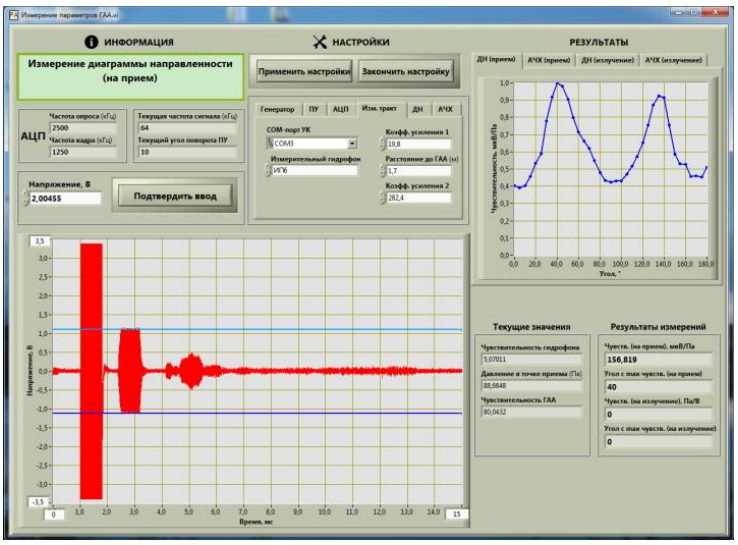


Рис. 4. Вид экрана программы «Стенд АП» при выполнении измерений.

Литература

1. Ганопольский В.В., Касаткин Б.А. и др. Пьезокерамические преобразователи: Справочник. - Л.: Судостроение, 1984.
2. Селищев А.А. Пьезокерамические цилиндрические преобразователи для систем подводной связи//Труды ВНТК «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана». – Новосибирск, 2010. - С. 97-100.
3. Карпачев С.Н., Карпенко А.Е. Автоматизированный стенд измерения параметров гидроакустических антенн// Боеприпасы. - 2016. - №2. - С.96-99.

ПРИБОРЫ ДЛЯ БЫСТРОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТОРОНЫ

Н.М.Иванов, Е.В.Кондаков
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, НКТБ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия

INSTRUMENTS FOR QUICK MEASUREMENTS OF PIEZOELECTRIC CELLS AND SONAR TRANSDUCERS FROM THE ELECTRIC SIDE

N.M.Ivanov, E.V.Kondakov
Institute of High Technologies and Piezotechniks SFedU, R&D Design Office «Piezopribor», Rostov-on-Don, Russia

Описаны принцип действия и реализации приборов для измерений характеристик пьезоэлементов и основанных на них гидроакустических преобразователей. Использованный импульсный метод измерения комплексного спектра проводимости (импеданса) и его последующая интерпретация соответствующей моделью обеспечивают более полное определение характеристик испытуемого образца по сравнению с традиционными методами измерения.

Operation principle and implementation of piezoelectric cell and piezoelectric sonar transducer measuring instrument are described. Admittance spectra is measured by pulse method and processed by fitting procedure for DUT parameters determination, more accurate in comparison with conventional technique.

Измерение параметров пьезоэлементов и гидроакустических преобразователей на их основе, которые для краткости, хотя и не совсем точно, будем далее называть пьезорезонаторами, с электрической стороны широко используется при разработке, конструировании и производстве изделий пьезотехники. Для этого чаще всего используется метод «резонанса-антирезонанса» («Р-А») [1], который по характеристическим точкам амплитудного спектра позволяет определить механическую добротность, сопротивление на частоте резонанса и полосу пропускания. Для свободного пьезоэлемента этим методом определяются эффективный коэффициент электромеханической связи [2], упругие, электрические и пьезоэлектрические константы материала [3]. Благодаря удовлетворительной точности и простоте выполнения амплитудных измерений, что было существенно на уровне развития измерительных средств тридцатилетней давности, метод «Р-А» получил широкое распространение и был закреплён в упомянутых выше руководящих документах [2, 3].

В то же время этому методу присущи такие недостатки и ограничения, как неудовлетворительная точность измерения при низкой добротности и коэффициенте электромеханической связи, малая устойчивость к погрешностям определения координат характеристических точек, невозможность выявления несоответствия принятой модели. Это связано с тем, что метод «Р-А» основан на пренебрежении потерями, и только при малой их величине допустимо отождествлять характеристические частоты с частотами экстремумов амплитудного спектра проводимости. В общем же случае характеристические частоты не совпадают ни с частотами этих экстремумов, ни с частотами перехода фазы через ноль, что порождает систематические ошибки как в определении самих характеристических частот, так и значений амплитудного спектра на этих частотах, которые используются в дальнейших расчётах. Использование всего двух частот из всего их множества может быть приемлемо только при больших затратах на измерение в каждой частотной позиции. На практике при отыскании частот экстремумов для их локализации и уточнения требуется выполнять множество измерений. Было бы полезно привлечь результаты этих дополнительных измерений для уменьшения случайной погрешности и повышения достоверности результатов. Кроме того, комплексный спектр проводимости в достаточно широкой полосе частот содержит дополнительную информацию о свойствах образца, которая в методе «Р-А» не используется. Наконец, в том случае, когда измеряемый образец не соответствует модели единственного локализованного резонанса, использование всего двух точек спектра не позволяет выявить это несоответствие, что приводит к несостоятельности результатов измерений.

От указанных недостатков свободны методы, основанные на анализе комплексного спектра проводимости в широком диапазоне частот, включающем характеристические точки этого спектра. Они заключаются либо в решении относительно искомых параметров систем уравнений (в том числе нелинейных) [1,4], либо в аппроксимации измеренного спектра проводимости модельной функцией частоты [5,6]. Непопулярность в своё время таких методов была обусловлена как трудностями измерения комплексной проводимости на множестве частот, так и вычислительной сложностью алгоритмов обработки спектров относительно существовавших в то время вычисли-

тельных средств. Благодаря прогрессу в элементной базе цифрового синтеза и регистрации сигналов, а также средств вычислений, эти препятствия на текущий момент отсутствуют.

Современный прибор для измерения характеристик пьезорезонаторов с электрической стороны должен содержать быстрый измеритель комплексного спектра проводимости в полосе частот и вычислитель, производящий обработку этого спектра с целью получения оценок искомых параметров измеряемого образца. В настоящей работе приводится пример реализации такого прибора.

Для измерения комплексной проводимости (импеданса) используется оригинальная схема (рис. 1), реализующая возбуждение образца широкополосным импульсным сигналом и полностью цифровую обработку получаемого отклика.

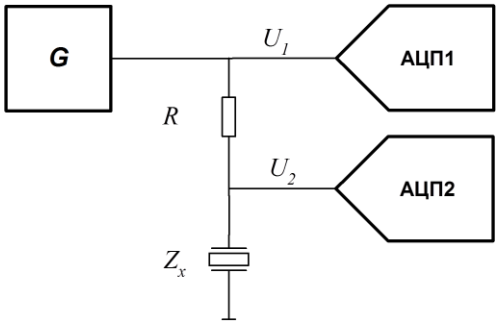


Рис. 1. Схема быстрого измерителя спектра проводимости.

Измеряемый образец совместно с переключаемым измерительным резистором R образуют делитель возбуждающего напряжения, поступающего с цифрового синтезатора G. Реализации сигналов на входе U_1 и выходе U_2 делителя, зарегистрированные с помощью когерентных аналого-цифровых преобразователей АЦП1 и АЦП2, после дискретного преобразования Фурье используются для расчёта спектра проводимости по формуле

$$Y(f) = \frac{1}{R}\frac{U_1(f) - U_2(f)}{U_2(f)}$$

Амплитуда возбуждающего напряжения U_1 не превосходит 1 В, что сохраняет линейность образца и позволяет отказаться от поддержания постоянной амплитуды напряжения U_2. Величина измерительного резистора R подбирается таким образом, чтобы при переходе от частоты резонанса к частоте антирезонанса амплитуды напряжений U_2 и $U_1 - U_2$ изменялись примерно в одинаковой степени. По сравнению с режимом стабилизации напряжения или тока это позволяет удвоить (в логарифмических единицах) динамический диапазон измерительной схемы, отказаться от переключения измерительного резистора при переходе от резонанса к антирезонансу и измерять спектр проводимости во всём резонансном промежутке одним импульсом возбуждения. Его длительность определяет частотное разрешение спектрального анализа и должна быть согласована с длительностью переходного процесса в образце. При этом независимо от полосы анализа спектр измеряется за фиксированное время.

Алгоритм обработки измеренного спектра проводимости строится так, чтобы, с одной стороны, максимально полно использовать результаты измерений, а с другой стороны, чтобы обеспечить совместимость результатов с методом «P-A». Наилучшим образом этому критерию соответствуют методы, реализующие аппроксимацию экспериментальных данных. Канонической моделью пьезорезонатора с электрической стороны является схема (рис. 2), содержащая $N \geq 1$ последовательных RLC – контуров, одноконтурный вариант которой используется в методе «P-A» [1].

В случае одноконтурной эквивалентной схемы выражение для проводимости можно представить в виде [5]:

$$Y(f) = 2\pi i f\, C_0 \frac{f^2 - if\Delta f - f_p^2}{f^2 - if\Delta f - f_s^2}, \qquad (1)$$

где $f_s = 1/\left(2\pi\sqrt{L_1 C_1}\right)$ – частота последовательного резонанса, $f_p = f_s\sqrt{1 + C_1/C_0}$ – частота параллельного резонанса (антирезонанса), $\Delta f = f_s/Q$. В этом случае определению подлежат

значения параметров C_0, f_s, f_p и Q. Параллельная ёмкость C_0 имеет смысл ёмкости пьезорезонатора, зажатого относительно колебаний данного резонанса. Она может быть измерена отдельно на высокой частоте. На низкой частоте f_0, равной обычно 1 кГц или 100 Гц, измеряется ёмкость свободного пьезорезонатора $C^T = \mathrm{Im}Y(f_0)/(2\pi f_0)$. Для эквивалентной схемы, содержащей N контуров, формула (1) записывается в виде

$$Y(f) = 2\pi i f C_0 \left(1 - \sum_{n=1}^{N} \frac{f_{pn}^2 - f_{sn}^2}{f^2 - if\,\Delta f_n - f_{sn}^2}\right),$$

или, после выделения из суммы контура с произвольным номером m, в виде

$$Y(f) = 2\pi i f C_0 \left(\frac{f^2 - if\,\Delta f_m - f_{pm}^2}{f^2 - if\,\Delta f_m - f_{sm}^2} - \sum_{n=1, n\neq m}^{N} \frac{f_{pn}^2 - f_{sn}^2}{f^2 - if\,\Delta f_n - f_{sn}^2}\right). \qquad (2)$$

при $N = 1$ выражение (2) переходит в (1).

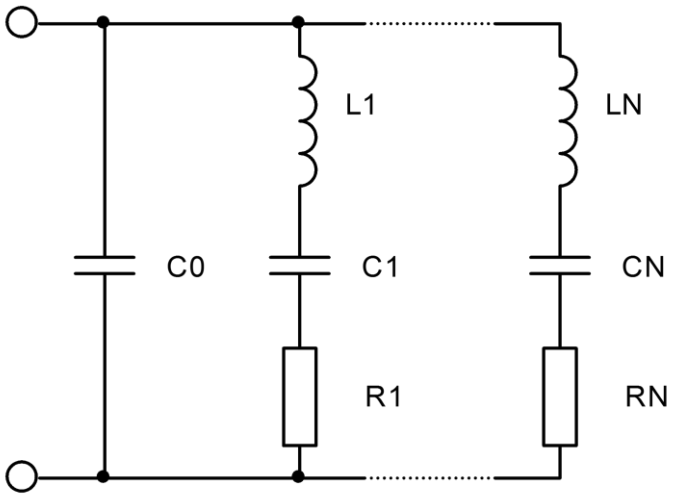


Рис. 2. Эквивалентная схема пьезорезонатора.

Одноконтурная модель в виде (1) наиболее полно использует результаты измерения, максимально снижая случайную компоненту выходных результатов. Это особенно важно при определении частоты антирезонанса пьезоэлементов f_p, обладающих малой ёмкостью C^T, а, следовательно, большим электрическим импедансом, при измерении которого высока восприимчивость к наводкам и шумам. Резонансные характеристики образца (f_s, f_p, R), полученные в результате аппроксимации, свободны от систематических погрешностей амплитудного метода, имеют меньшую случайную составляющую и могут быть использованы для более точного расчёта констант пьезоматериалов аналогично методу «P-A» [1,3].

В многоконтурном случае $(N > 1)$ целесообразно выполнять аппроксимацию действительной части спектра проводимости [6]:

$$G(f) = \sum_{n=1}^{N} g_n(f),\ g_n(f) = R_n^{-1}\left(1 + Q_n^2 \nu_n^2(f)\right),$$

где $g_n(f)-$ проводимость $n-$ го контура, R_n- его активное сопротивление, $Q_n = R_n^{-1}\sqrt{L_n/C_n}$ – добротность, L_n, C_n –соответственно динамическая индуктивность и емкость, $\nu_n(f) = f/f_{sn} - f_{sn}/f$, $f_{sn} = 1/\left(2\pi\sqrt{L_n C_n}\right)$ –частота последовательного резонанса n – го контура. Целью аппроксимации является определение параметров R_n, Q_n и f_{sn}, по значениям которых легко найти L_n и C_n.

Многоконтурная модель удобна для оценки параметров близких (частично перекрывающихся) резонансов. В частности, она позволяет автоматически обнаруживать и оценивать уровень нежелательных резонансов, если это требуется при проведении контроля резонаторов.

Описанные методы, основанные на аппроксимации, пригодны для измерения низкодобротных образцов и устойчивы к случайным ошибкам измерения отдельных значений спектра проводимости. Их дополнительным преимуществом является автоматический контроль степени соответствия выбранной модели результатам измерений, благодаря которому существенно увеличивается достоверность результатов расчётов. Возможно расширение перечня измеряемых характеристик за счёт разработки специализированных моделей и вычислительно эффективных алгоритмов аппроксимации экспериментальных данных.

Рассмотренный подход реализован в серии измерительных приборов «Цензурка», которая выпускается в нескольких модификациях для использования на всех этапах жизненного цикла (разработка, производство и эксплуатация) пьезоматериалов, пьезоэлементов, пьезопреобразователей, а также гидроакустических антенн.

Литература

1. Пьезокерамические преобразователи. Справочник. Под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984.
2. РД 5Р.9122-73. Блоки и преобразователи пьезокерамические. Методы измерения электромехани-ческих параметров.
3. ОСТ II 0444–87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987.
4. C.Alemany at all. Automatic Iterative Evaluation of Complex Material Constants in Piezoelectric Ceramics // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 148–155.
5. Пат. 2584719 РФ. Е.В. Кондаков, Н.М.Иванов, Ю.К. Милославский. Цифровой способ измерения параметров пьезоэлектрических элементов. // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 14.
6. Н. М. Иванов, Е. В. Кондаков, Ю. К. Милославский. Цифровая аппаратура и алгоритмы оперативного измерения параметров изделий пьезотехники // Известия ТРТУ. 2005. Т. 46. № 2. С. 78-83.

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ, ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Ю.К.Милославский, канд.техн.наук, А.Е.Панич, д-р техн.наук
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, НКТБ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия

EQUIPMENT TO STUDY AND CONTROL PIEZOELECTRIC ELEMENTS, PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS AND HYDRO-ACOUSTIC ARRAYS

Yu.K.Miloslavskiy, Ph.D., A.E.Panich, Dr.Sc.
Institute of High Technologies and Piezotechniks SFedU, R&D Design Office «Piezopribor», Rostov-on-Don, Russia

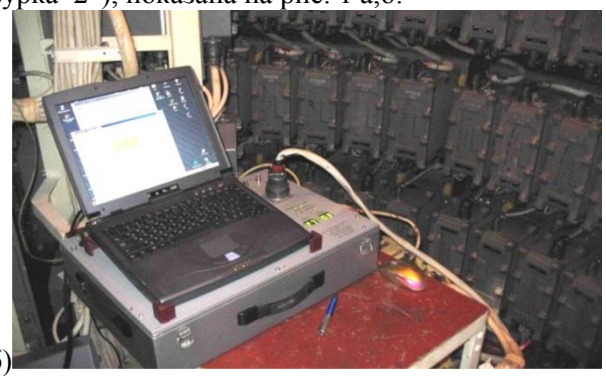
Рассматривается проблема исследования и контроля работоспособности с электрической стороны пьезоэлементов, пьезопреобразователей и гидроакустических антенных решёток, в том числе установленных на действующих объектах (кораблях). Для её решения разработан и выпускается ряд приборов под общим названием "Цензурка". Аппаратура "Цензурка–МА2" предназначена для исследования и контроля пьезоэлементов, аппаратура "Цензурка–М" –пьезопреобразователей, аппаратура "Цензурка–2", "Цензурка–Э" (экспортный вариант) – полного контроля всех преобразователей и серийно выпускаемых антенных решёток в целом. Универсальная аппаратура "Цензурка–УМ" предназначена для контроля преобразователей и антенных решёток в процессе разработки и макетирования на полигонах и в лабораторных условиях. В докладе дается описание, преимущества и результаты внедрения перечисленных изделий.

The paper considers the problem of serviceability of piezoelectric elements, piezoelectric transducers and hydro-acoustic arrays, including those installed on the facilities in operation (ships). The focus is on the ways to control their serviceability by measuring electrical and physical parameters. To address the problem of serviceability a series of equipment sets collectively known as "Cenzurka" have been developed and manufactured. "Cenzurka-MA2" apparatus is designed to study and monitor piezoelectric elements; "Cenzurka-M" apparatus controls the parameters of piezoelectric transducers; "Cenzurka-2", "Cenzurka-Э" (export modification) are intended to conduct an exhaustive testing of all types of transducers and off-the-shelf arrays. Versatile "Cenzurka-УМ" apparatus is intended to monitor transducers and arrays under development and prototyping both at a test range and in a laboratory. The paper provides a description of the equipment sets, their benefits and implementation results.

При эксплуатации гидроакустических антенных решеток (ГААР), установленных на действующих объектах, важнейшую роль играет определение работоспособности всех элементов (преобразователей) и антенн в целом по измерениям как с электрической, так и с акустической стороны.

Рассмотрим решение задачи контроля работосопособности ГААР с электрической стороны. Эта задача после многолетних исследований была решена в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ путем разработки, испытаний и в дальнейшем серийного выпуска аппаратуры "Цензурка–2". Аппаратура для контроля параметров пьезопреобразователей и ГААР в целом непосредственно на кораблях (аппаратура "Цензурка–2"), показана на рис. 1 а,б.

а)



б)

Рис. 1. Аппаратура «Цензурка-2» (а) внешний вид; (б) рабочее положение.

Она размещается в носимом аллюминиевом чемодане, который доставляется в гидроакустическую капсулу или иное место для выполнения измерений. Рабочее положение аппаратуры показано на рисунке 1б. В аппаратуре "Цензурка–2" реализован цифровой способ измерений [1], позволяющий возбуждать пьезопреобразователь широкополосным сигналом, спектр которого охватывает заданную область частот. Верхняя граница диапазона рабочих частот ограничена частотой дискретизации и крутизной скатов фильтра нижних частот. Во всех изделиях серии "Цензурка" она составляет 500 кГц. В качестве широкополосного сигнала выбран сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Сигнал с ЛЧМ формируют в ЭВМ програмно в виде массива длиной N отсчётов. Напряжения $U_{вх}$, $U_{вых}$, регистрируемые на

входе и выходе измерительного четырёхполюсника [2] (рис. 2а), образованного нагрузочным резистором R_0 и преобразователем Z, поступают на вход двухканального 12–ти разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и далее через буферное запоминающее устройство в управляющую ЭВМ, где подвергаются дискретному преобразованию Фурье с помощью алгоритма быстрого преобразвоания Фурье. По найденным спектрам напряжений $U_{вх}(f)$, $U_{вых}(f)$ вычисляется проводимость преобразователя $Y(f)=(U_{вх}(f)/U_{вых}(f)-1)/R_0$. Для расчета требуемых параметров пьезопреобразователя используется многоконтурная эквивалентная схема, динамическая часть которой состоит из нескольких соединенных параллельно RLC–цепочек. Количество контуров эквивалентной схемы определяется числом максимумов активной составляющей проводимости в заданной полосе частот.

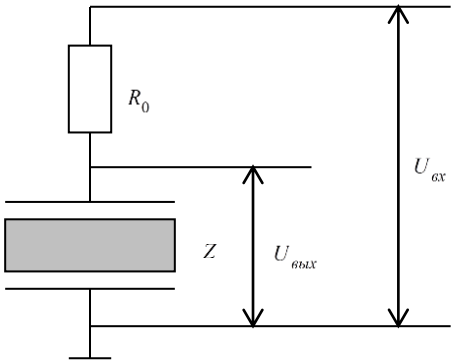


Рис. 2. Измерительный четырёхполюсник.

Параметры	Диапазон значений	Пределы допускаемой относительной погрешности
Электрическая ёмкость на низ. част.	(5*10^{-10}- 5*10^{-4})Ф	± 5%
Сопротивление постоянному току и сопротивление изоляции при 100В	(10^3 - 10^6)Ом (10^6 - 10^{10})Ом	± 10% ± 30%
Тангенс угла диэлектрических потерь	(1 - 6)% (6 - 100)%	± 20% ± 10%
Активная составляющая полного электрического сопротивления в резонансной области	(5 - 10)Ом (10 - 10000)Ом	± 25% ± 10%
Динамическая емкость	(1 - 50)*10^{-9}Ф	± 10%
Динамическая индуктивность	(0.5 - 20)мГн	± 10%
Добротность	2 - 300	± 20%
Диапазон рабочих частот	(0.3 - 500)кГц	± 0.5%

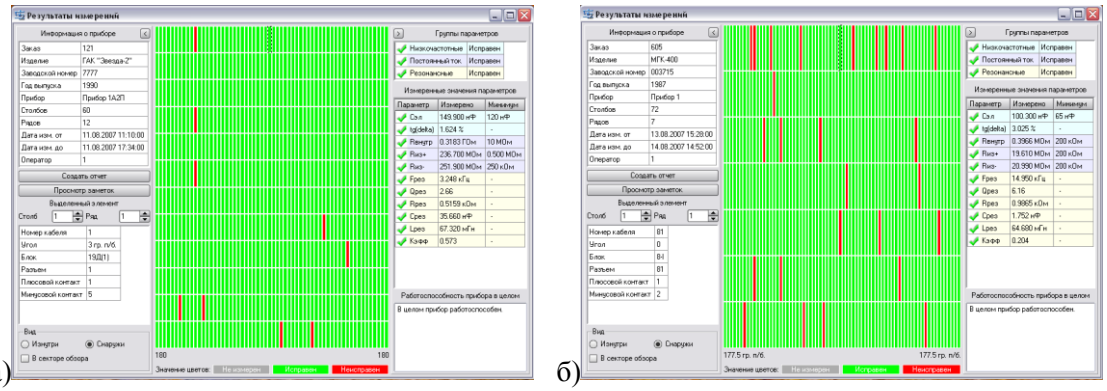
ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ

1. Измерения на постоянной низкой частоте (1 кГц, 100 Гц)	- Ёмкость и сопротивление на низкой частоте; - Тангенс угла диэлектрических потерь;
2. Измерение на постоянном токе при напряжении 100 В.	- Сопротивление постоянному току; - Сопротивление изоляции;

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

3. Измерение в резонансной области	- Частоты резонансов и антирезонансов; - Динамические емкость и сопротивление; - Добротность; - Коэффициент электромех. связи.

Рис. 3. Основные технические характеристики аппаратуры «Цензурка–2».



а) б)

Рис. 4. Результаты контроля некоторых антенн: а) прибор 1А2П ГАК Звезда-2; б) прибор 1 МГК–400.

Принцип измерения ёмкости пьезопреобразователя аппаратурой “Цензурка–2” на постоянной низкой частоте 1000 или 100 Гц аналогичен, но используется двухканальный 16-ти разрядный АЦП. Основные технические характеристики аппаратуры приведены на рис. 3. Результаты измерений для антенны в целом на разных станциях приведены на рис. 4. Здесь неработающие элементы выделены. Приводятся также критерии неработосопобности каждого выделенного элемента. Аппаратура “Цензурка–2” внедрена и активно используется для контроля ГААР на действующих станциях.

В 2009 г. разработана и изготовлена аппаратура “Цензурка–Э” – экспортный вариант аппаратуры “Цензурка–2”. Для неё получены все разрешительные документы на рекламу, демонстрации и поставки аппаратуры на экспорт.

Для нужд промышленности разработана и сертифицирована аппаратура “Цензурка–УМ”. Её отличительная особенность заключается в наличии специального переходного разъёма, позволяющего выполнять полный комплекс автоматизированных измерений ГААР станций любых типов, установленных на объектах. Внешний вид аппаратуры “Цензурка–УМ” показан на рис. 5.

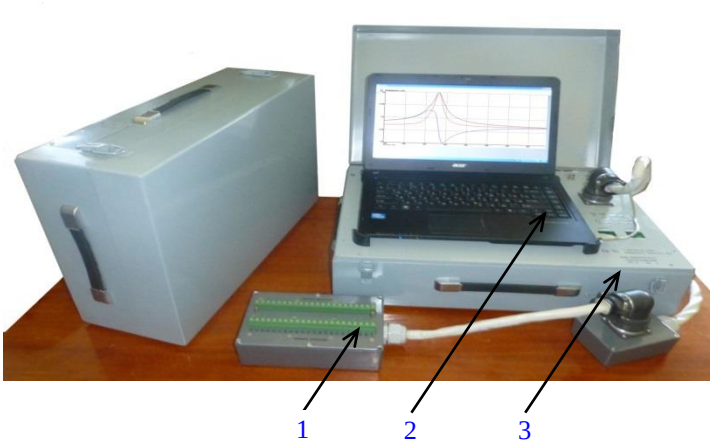


Рис. 5. Аппаратура “Цензурка–УМ”. 1 – устройство соединительное;
2 – управляющая ЭВМ; 3 – блок измерительно–коммутационный

По результатам выпуска и эксплуатации аппаратуры “Цензурка–2” и по предложениям ряда предприятий и организаций, работающих в области пьезотехники, были выполнены разработка, а затем изготовление и выпуск лабораторно–производственной аппаратуры “Цензурка–М”, позволившей оперативно измерять и контролировать параметры как пьезопреобразователей, так и пьзоэлементов различных типов. Аппаратура “Цензурка–М” включена в реестр средств измерений. Её внешний вид показан на рис. 6а.

В аппаратуре “Цензурка–2”, “Цензурка–М”, “Цензурка–УМ” имеется режим измерения внутреннего сопротивления и сопротивления изоляции пьезопреобразователей при подаче на них постоянного наряжения 100 В.

Рис. 6. Внешний вид аппаратуры. 1 – блок измерительный;
2 –пьезопреобразователь или пьезоэлемент; 3 – управляющая ЭВМ.
а) аппаратура “Цензурка–М” б) аппаратура “Цензурка–МА2”

Для предприятий, выпускающих большие объёмы пьезоэлементов, а также использующих пьезоматериалы и пьезоэлементы различных типов, разработана, выпускается и поставляется аппаратура “Цензурка–МА2”, включённая в государственный реестр средств измерений. Эта аппаратура определяет электрофизические параметры пьезоматериалов с точностью и производительностью более высокой, нежели аппаратура “Цензурка–М”, и позволяет формировать партии и комплекты пьезоэлементов по заданным критериям. Аппаратура “Цензурка–МА2” ориентирована на эксплуатацию в условиях производства, но может с успехом использоваться в лаборатории для исследовательских целей. Её внешний вид показан на рис. 6б.

К параметрам, непосредственно измеряемым аппаратурой “Цензурка–М”, “Цензурка–МА2”, относятся электрическая емкость и тангенс угла диэлектрических потерь на фиксированной частоте, спектр комплексной проводимости преобразователя (пьзоэлемента), частоты резонанса и антирезонанса, сопротивление на частоте резонанса. По значениям измеренных параметров согласно [3] рассчитываются механическая добротность, коэффициент электромеханической связи, полоса пропускания преобразователя, относительный резонансный промежуток. Для пьзоэлемента заданных формы и размеров рассчитываются диэлектрическая проницаемость, пьезомодуль в динамическом режиме и скорость звука. При рассчёте параметров различных пьезоматериалов используются специальные константы, характерные для конкретного материала. Технические характеристики аппаратуры “Цензурка–МА2” аналогичны характеристикам аппаратуры “Цензурка–М”, но точность измерений повышена путём введения процедуры калибровки аппаратуры. Производительность аппаратуры “Цензурка–МА2” составдяет 4–5 образцов в минуту.

В заключение отметим, что в развитие аппаратуры “Цензурка–МА2” разработана аппаратура “Цензурка–ВЧ”, рабочий диапазон которой расширен до 2 МГц.

Литература

1. Пат. 2584719 РФ. Е.В. Кондаков, Н.М.Иванов, Ю.К. Милославский. Цифровой способ измерения параметров пьезоэлектрических элементов. // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 14.
2. Пьезокерамические преобразователи. Справочник. Под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984.
3. ОСТ II 0444–87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987.

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ИСПОЛЬЗАВАНИЕМ ТНПА

Ю.К.Милославский, канд.техн.наук, А.Е.Панич, д-р техн.наук
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, НКТБ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия

ACOUSTIC MONITORING OF HYDROPHONE ARRAYS SERVICEABILITY WITH A REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLE

Yu.K.Miloslavskiy, Ph.D., A.E.Panich, Dr.Sc.
Institute of High Technologies and Piezotechniks SFedU, R&D Design Office «Piezopribor», Rostov-on-Don, Russia

Рассматриваются проблемы акустического контроля работоспособности гидроакустических антенных решёток, установленных на действующих объектах (кораблях). Для их решения предлагается разработка аппаратуры, использующей малогабаритный телеуправляемый подводный аппарат, что позволит контролировать акустические характеристики, тракты передачи для всех гидроакустических станций, установленных на объекте (корабле), а также основные физические поля носителя. Описаны структура аппаратуры и методы контроля работоспособности гидроакустических антенных решеток на объектах.

The paper considers the problems of acoustic monitoring of serviceability of hydrophone arrays installed on facilities in operation (ships). To address the problem of serviceability it is suggested to develop an apparatus employing a portable remotely operated underwater vehicle. This apparatus will allow monitoring acoustic characteristics, transmission subsystems for all sonar detection equipment on a ship as well as main physical fields of a vehicle. The structure of the proposed apparatus and the ways to monitor serviceability of hydrophone arrays installed on ships are described.

Проблема контроля работоспособности гидроакустических антенн на объектах разделяется на две задачи. Первая – это задача контроля электрофизических характеристик каждого пъезопреобразователя в составе антенной решетки с последующим определением работоспособности как элементов, так и антенны в целом. Эта задача практически полностью решена нашим коллективом при разработке, изготовлении, серийном выпуске и поставке на флот аппаратуры автоматизированного контроля «Цензурка-2». Вторая – это задача контроля реальных характеристик направленности (ХН) многоэлементных гидроакустических антенн МГК, расположенных на объектах.

Проблема имеет большую историю. На этапе изготовления и сборки антенн активно использовались и используются по сию пору гидроакустические бассейны или полигоны. Но это не решает задачу в полном объёме, поскольку на носителе гидроакустическая антенна находится в обтекателе и имеет различные конструктивные элементы, размещение которых в бассейне проблематично. Поэтому контроль характеристик направленности антенн, находящихся на объектах, является обязательным, так как в значительной степени определяет ТТХ всей МГК.

Предлагались самые различные методы контроля характеристик направленности гидроакустических антенн на объектах – от решеток Тротта, позволявших в ближнем поле создавать плоский волновой фронт, до измерений при обнесении излучающих гидрофонов вокруг антенны с помощью шлюпок.

Весьма эффективный способ разработан и внедрён концерном «Океанприбор». Было создано устройство ИКУ (измерительное координатное устройство). В состав ИКУ входит поворотное устройство со стрелой, устанавливаемое на носителе и позволяющее позиционировать измерительный гидрофон точно в заданное положение на расстоянии от 10 до 50 метров от поверхности носителя.

Однако ИКУ имеет значительные массогабаритные характеристики и на конкретном носителе может измерить в большинстве случаев характеристики направленности только одной антенны (антенны режима ШП). Вместе с тем на современных носителях имеется большое число антенн, ХН которых подлежат контролю. С этой задачей ИКУ справиться не может.

В настоящей работе предлагается метод контроля характеристик направленности гидроакустических антенн на объектах с помощью компактной переносной аппаратуры, излучатель которой располагается на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате (ТНПА). Телеуправляемый подводный аппарат [1] позиционируется в необходимых для измерений положениях. Для перемещения и позиционирования гидрофона (излучателя) предлагается использовать ТНПА «Марлин-350», выпускаемый промышленностью серийно.

Структурная схема аппаратуры приведена на рис. l. Аппаратура состоит из излучающей части, расположенной в погружаемом блоке (рис. 2), ТНПА «Марлин-350», блока управления ТНПА, приемной части и блока управления и отображения (микро-ЭВМ), размещаемых в

рубке корабля, специального программного обеспечения и устройств, обеспечивающих информационный обмен и синхронизацию состаных частей аппаратуры. Запись измерительных сигналов в режиме приёма осуществляется с выходов документирования контролируемых станций.

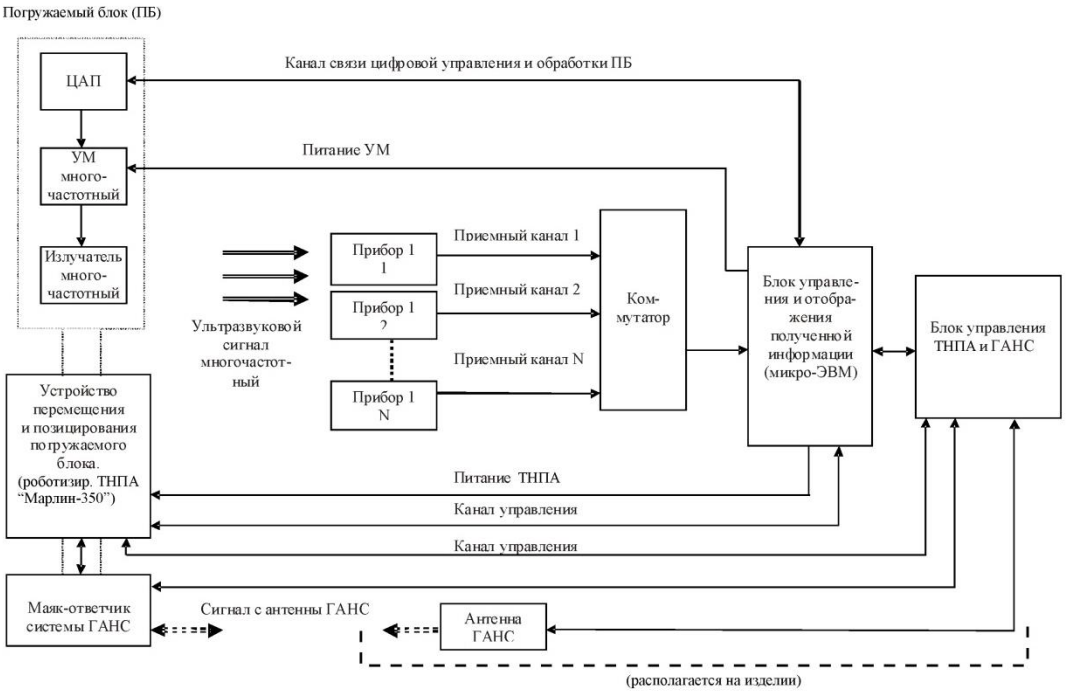


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры.

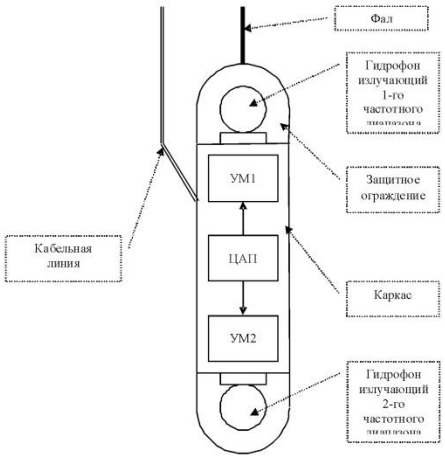


Рис. 2. Погружаемый блок.

Погружаемый блок и подводный аппарат связаны с блоком управления кабелем питания и оптоволоконным кабелем связи. Максимальная длина кабелей составляет 400 м, они наматываются на специальную катушку с герметичным скользящим контактом. Погружаемый блок является сменным и располагается на аппарате «Марлин-350», показанном на рис. 3.

В погружаемом блоке располагаются усилители мощности и излучатели, которые позволят осуществлять излучение на частотах от 0,3 кГц до 50 кГц и выше в заданных диапазонах. Это обстоятельство позволит практически одновременно измерять характеристики направленности антенн различных МГК, установленных на носителе, в требуемых угловых положениях. Фактическое местоположение подводного аппарата контролируется с помощью компактной гидроакустической навигационной системы (ГАНС), поставляемой вместе с ТНПА.

Рис. 3. ТНПА «Марлин-350».

ГАНС состоит из группы приёмно–излучающих антенн с ультракороткой базой, устанавливаемых на корпусе носителя, и маяка-ответчика, располагаемого на аппарате «Марлин-350». ГАНС позволяет контролировать угловое перемещение аппарата «Марлин-350» с погрешностью не более 0,25°, а положение по дальности и по глубине с погрешностью ±5см. При измерениях на расстояниях 50–100 м от поверхности антенны и возможном сносе аппарата течением до 2 узлов, угловое смещение составит 0,14°, что является приемлемой погрешномтью при измерении ХН с шириной главного лепестка ≈ 1° и менее.

Продолжительность измерения одной точки ХН составит ≈ 200 мс, что позволяет перемещать аппарат «Марлин-350» либо по прямой, либо по дуге без остановки аппарата со скоростью 15-20 см в сек.

Возможны два режима перемещения аппарата с обязательной регистрацией его координат: либо постоянное перемещение по заданной траектории с фиксацией значений ХН. через каждые 200 мс, либо перемещение с остановками в режиме «реверса» в заданных точках. В любом случае для каждого носителя составляется и моделируется специальная виртуальная сетка, в узлах которой должен последовательно находиться аппарат «Марлин-350».

Весь процесс измерений проводится под управлением оператора, который руководит перемещением ТНПА и процессом измерений. Полученные результаты при наличии измеренных амплитудных значений ХН и знания соответствующего местоположения излучателя позволяют построить ХН для каждой антенны всех станций, размещённах на борту носителя. Размещение на ТНПА датчиков физических полей обеспечит построение картины этих полей, создаваемых носителем.

Таким образом, в настоящей работе предложен метод контроля работоспособности гидроакустических антеннах решёток с использованием ТНПА. Внедрение настоящего метода позволит решить проблему контроля антенн практически всей номенклатуры гидроакустических станций, размещённых на носителе, а так же определять картину его физических полей. Такие измерения могут быть выполнены как при сдаче корабля в эксплуатацию, так и при выполнении ремонтно–профилактических работ.

Литература

1. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. М.: Моркнига, 2012.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА НА ИХ ЧАСТОТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

И.С.Пестерев, Б.Г.Степанов, канд.техн.наук
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF WAVEGUIDE TYPE TRANSDUCERS PARAMETERS ON THEIR FREQUENCY AND PULSE CHARACTERISTICS

I.S.Pesterev, B.G.Stepanov, Ph.D.
Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Russia

Приводятся результаты экспериментальных и расчетных данных по влиянию структурных параметров и характера возбуждения преобразователей волноводного типа, образованных соосным набором водозаполненных пьезоцилиндров с фазированным возбуждением по типу бегущей волны, на частотные и импульсные характеристики излучения этих преобразователей.

The results of experimental and calculated data on the influence of structural parameters and the excitation nature of waveguide type transducers formed by a coaxial set of water-filled piezocylinders with phased excitation as a traveling wave on these transducers radiation frequency and pulse characteristics are presented.

Исследуемые гидроакустические преобразователи волноводного типа (ПВТ) представляют собой соосный набор N идентичных водозаполненных пьезоцилиндров 1 с внутренним радиусом a и межцентровым расстоянием d, разделенных по торцам акустически гибкими прокладками 2 (рис. 1). Внешняя цилиндрическая поверхность ПВТ контактирует с воздухом или экраном 6, а внутренняя полость 7 заполняется водой. Возбуждение ПВТ осуществляется комплексными электрическими напряжениями $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\omega\tau_0(i-1)}$ по принципу формирования во внутренней полости 7 бегущей волны (направление фронтального излучения показано стрелками), где $U_{im}(\omega)$ – амплитуды напряжений; $\tau_0 = d/c_0$; c_0 – скорость звука в воде; $i = 1, 2, \ldots N$ – номер пьезоцилиндра. В работах [1–3] были рассмотрены основные принципы построения и возбуждения эффективных сверхширокополосных ПВТ, а также – некоторые их расчетные и экспериментальные частотные и импульсные характеристики. Формирование электрических сигналов возбуждения ПВТ экспериментально осуществлялось с помощью персонального компьютера 3, цифрового блока формирования сигналов 4 и усилителей мощности 5 [4]. Такая система возбуждения позволяет реализовать частотные зависимости $U_i(\omega)$, получающиеся в результате решения задачи синтеза [1].

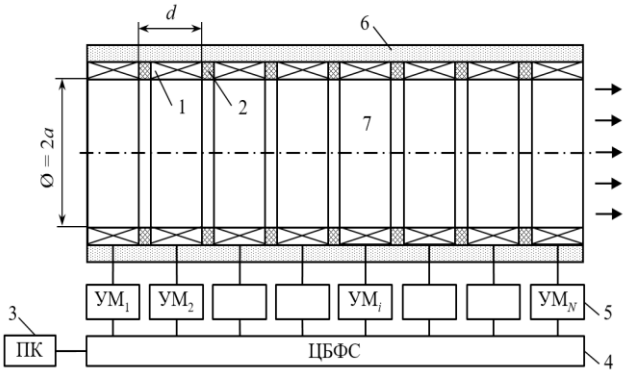


Рис. 1. Схема построения и возбуждения ПВТ.

С позиции уменьшения массогабаритных параметров ПВТ и макетов антенн, составленных из них (далее – макетов), определенный интерес представляет изучение возможности сохранения широкополосного излучения при уменьшении числа пьезоцилиндров N в составе ПВТ. Это возможно при использовании возбуждения в соответствии с решением задачи синтеза. В качестве примера, на рис. 2 показаны нормированные расчетные (а) амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) звукового давления ПВТ $p_{\text{норм}}^{(\text{ф,т})}$, а также экспериментально полученные (б) АЧХ чувствительности $\gamma_{\text{В}}$ (Па·м/В) макета из 12 ПВТ (a = 9.3 мм; частота радиального резонанса пьезоцилиндров $f_{\text{р}} \approx 44$ кГц), для значений $N = 10$, 6 и 2 (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Пунктиром здесь и далее показаны соответствующие графики АЧХ излучения в тыльном направлении. Звуковое давление $p_{\text{норм}}^{(\text{ф,т})}$ нормировано к величине $N = d_{31}/aS_{11}^{(E)}$, где d_{31} и $S_{11}^{(E)}$ – пьезомодуль и упругая податливость. Результаты расчетов и измерений качественно подобны и показывают возможность сохранения ширины полосы пропускания порядка 3 октав при уменьшении числа пьезоцилиндров N, однако в этом случае снижается уровень излучения во фронтальном направлении, относительно которого увеличивается уровень тыльного излучения.

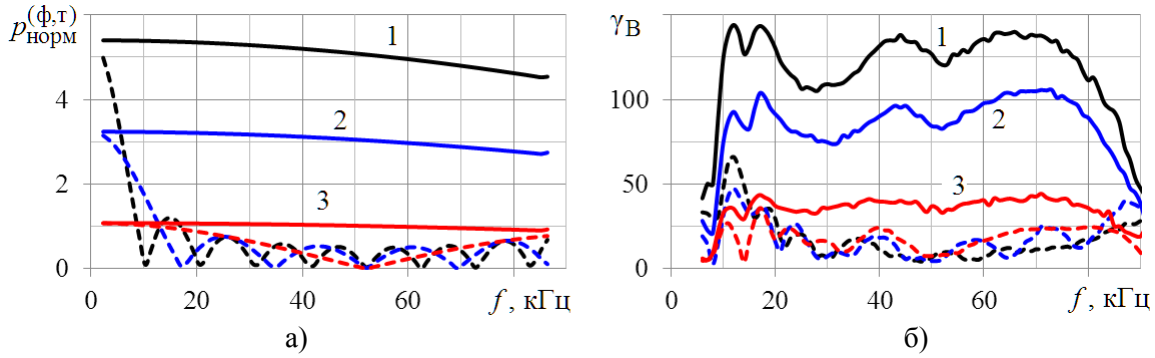


Рис. 2. Влияние числа пьезоцилиндров N ПВТ на расчетные (а) и экспериментальные (б) АЧХ излучения макета. 1 – N = 10; 2 – N = 6; 3 – N = 2.

Частотные зависимости амплитуд возбуждающих напряжений U_{im} (рис. 3), которые получаются в результате решения задачи синтеза и необходимы для реализации приведенных АЧХ излучения, имеют характерную особенность – резкий рост амплитуд в области низких частот. Это обстоятельство, вместе с ограничением по максимальному значению амплитуды напряжения возбуждения $U_{\max}$, которое обеспечивается имеющейся аппаратурой (в данном случае $U_{\max} \approx 150$ В [4]), ограничивает полосу пропускания в области низких частот (см. рис. 2б). Для соблюдения характера изменения U_{im} с уменьшением N при измерениях АЧХ излучения макетов антенн вводился коэффициент нормировки $KN = U_{\max}/U_{Nm}$ [2, 3], где U_{Nm} – амплитуда напряжения возбуждения пьезоцилиндра с номером $i = N$, выбранная в данном случае на частоте радиального резонанса f_p пьезоцилиндра. Значения KN для разных N указаны на рис. 3. Практическая реализация KN осуществлялась путем нормирования во всем рабочем диапазоне частот ПВТ амплитуд сигналов возбуждения $u_i(t)$, подаваемых на соответствующие по номеру пьезоцилиндры, к амплитуде сигнала $u_N(t) = U_{\max}$ на нижней границе рабочего диапазона ПВТ.

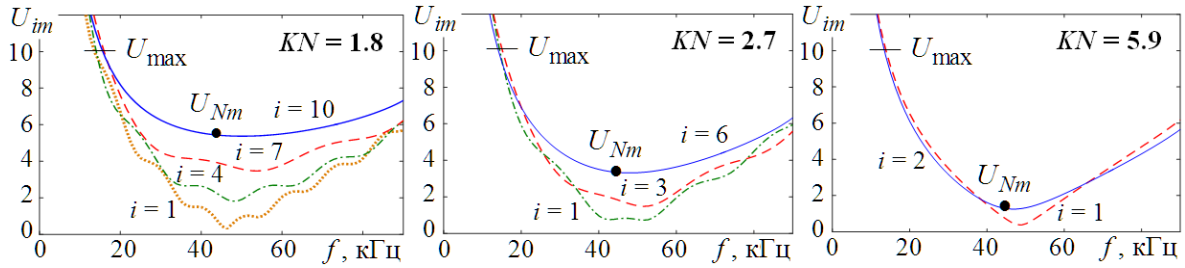


Рис. 3. Влияние числа пьезоцилиндров N ПВТ на частотные зависимости относительных амплитуд возбуждающих напряжений. а) N = 10; б) N = 6; в) N = 2.

При формировании с помощью макетов коротких (1–1.5 периода колебаний) акустических импульсов учет характера частотных зависимостей U_{im} (рис. 3), как отмечалось в [2], выполняется на этапе расчета сигналов возбуждения $u_i(t)$ по задаче синтеза. Это позволяет при сокращении числа пьезоцилиндров N поддерживать амплитуды акустических импульсов в широком диапазоне частот практически без их уменьшения. При этом для разных N задаются одинаковые значения максимальной амплитуды сигналов возбуждения $u_N(t)$. Указанное обстоятельство иллюстрируется (для рассмотренного выше макета) на рис. 4, при возбуждении ПВТ по задаче синтеза однопериодным импульсом, когда задействовано разное число пьезоцилиндров N. Фиксация импульсов выполнена путем их записи с осциллографа на USB флеш-накопитель.

ПВТ с малым числом пьезоцилиндров (и усилителей мощности) или антенны, собранные из них, могут быть полезны при проведении акустических измерений, когда не требуются большие мощности излучения.

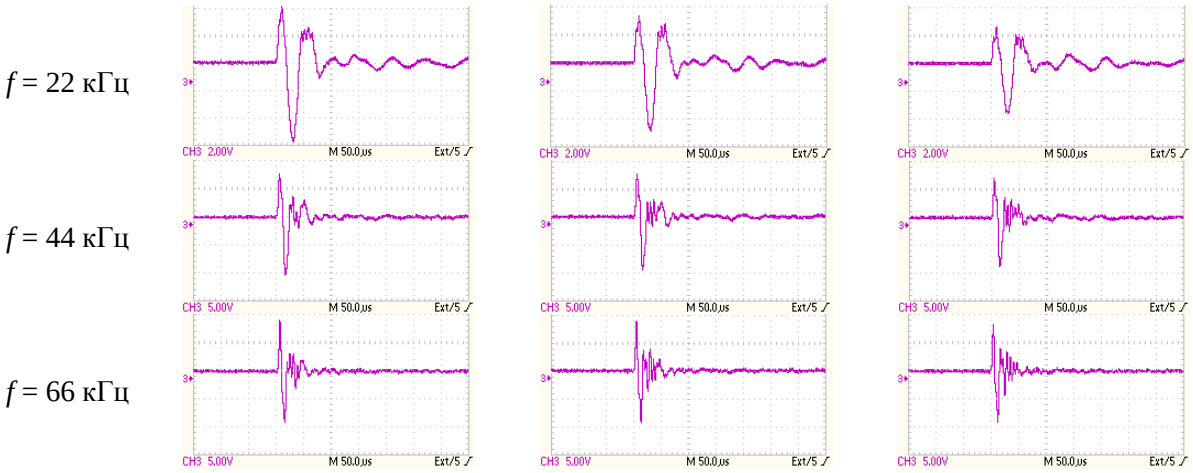


Рис. 4. Влияние числа пьезоцилиндров N ПВТ при формировании коротких акустических импульсов в полосе частот 22…66 кГц (0,5…1,5 $f_{\text{р}}$). а) $N = 10$; б) $N = 6$; в) $N = 2$.

Определенный интерес в части управления характеристиками излучения ПВТ представляет изменение в небольших пределах фазового сдвига $\omega\tau$ или времени задержки τ относительно значения $\tau_0 = d/c_0$. Наиболее наглядно это проявляется для базового варианта возбуждения [2] с использованием во всем диапазоне частот работы ПВТ дискретно нарастающего закона изменения амплитуд возбуждающих напряжений $U_{im}(\omega) = U_{Nm}\left[p + (1-p)(i-1)/(N-1)\right]$ с ростом порядкового номера i пьезоцилиндра [5], где $p = U_{1m}/U_{Nm}$. В качестве примера на рис. 5 приведены расчетные (а) и экспериментально полученные (б) АЧХ излучения для макета из 12 ПВТ ($N = 10$; $a = 14$ мм; $f_{\text{р}} \approx 30$ кГц). Здесь выбрано $p = 0.2$. Сравнение результатов расчета и эксперимента показывает их вполне удовлетворительное качественное соответствие.

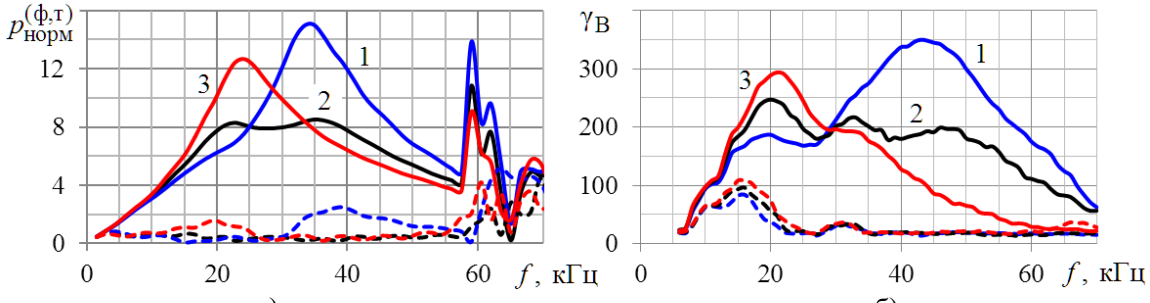


Рис. 5. Расчетные (а) и экспериментально полученные (б) АЧХ излучения макета при возбуждении ПВТ с дискретно-ступенчатым ростом U_{im}: 1 – $\tau = 0.9\tau_0$; 2 – $\tau = \tau_0$; 3 – $\tau = 1.1\tau_0$.

Уменьшение τ относительно базового значения τ_0 (рис. 5, кривые 1) приводит к увеличению максимума на АЧХ излучения в области более высоких частот, а увеличение τ – к увеличению максимума в области более низких частот (рис. 5, кривые 3). Это позволяет без амплитудной коррекции управлять и при необходимости выравнивать АЧХ излучения. Похожий эффект можно получить, например, для АЧХ пьезоэлектрического стержневого преобразователя с согласующей накладкой при изменении ее толщины в небольших пределах относительно четвертьволновой длины, однако в случае с ПВТ это решается электронным путем.

При возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза наблюдается несколько иная картина. В этом случае, как для расчетных, так и для экспериментально полученных АЧХ излучения макета (рис. 6) изменение τ относительно τ_0 приводит к уменьшению уровня излучения в высокочастотной части рабочего диапазона частот ПВТ и, тем самым, к уменьшению полосы пропускания. Такая расфазировка (используется множитель $e^{j\omega\tau(i-1)}$) отражается также на виде частотных зависимостей амплитуд возбуждающих напряжений $U_{im}(\omega)$ (рис. 7), которые необхо-

димы для реализации приведенных АЧХ излучения. Наиболее сильно изменение τ влияет на частотные зависимости $U_{im}(\omega)$ для последних по номеру пьезоцилиндров (см., например, $i=10$), которые вносят наибольший вклад в формирование излучаемого ПВТ сигнала.

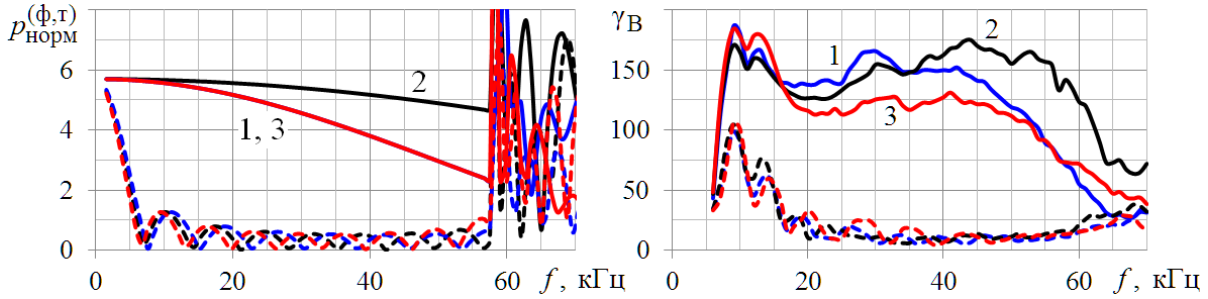


Рис. 6. Влияние изменения времени задержки τ на расчетные (а) и экспериментальные (б) АЧХ излучения макета. 1 – $\tau=0.9\tau_0$; 2 – $\tau=\tau_0$; 3 – $\tau=1.1\tau_0$.

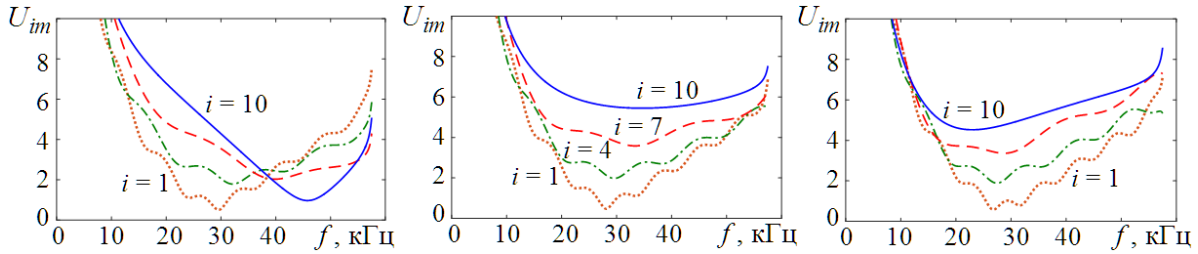


Рис. 7. Влияние изменения τ на частотные зависимости амплитуд, возбуждающих напряжений а) $\tau=0.9\tau_0$; б) $\tau=\tau_0$; в) $\tau=1.1\tau_0$.

В качестве примера на рис. 8 показан вид коротких акустических импульсов, формируемых при возбуждении ПВТ одноперидным импульсом в соответствии с решением задачи синтеза. Как видно, величина амплитуд акустических импульсов в целом следует изменению значения U_{Nm} на соответствующих частотах (см. рис. 7, $i=10$).

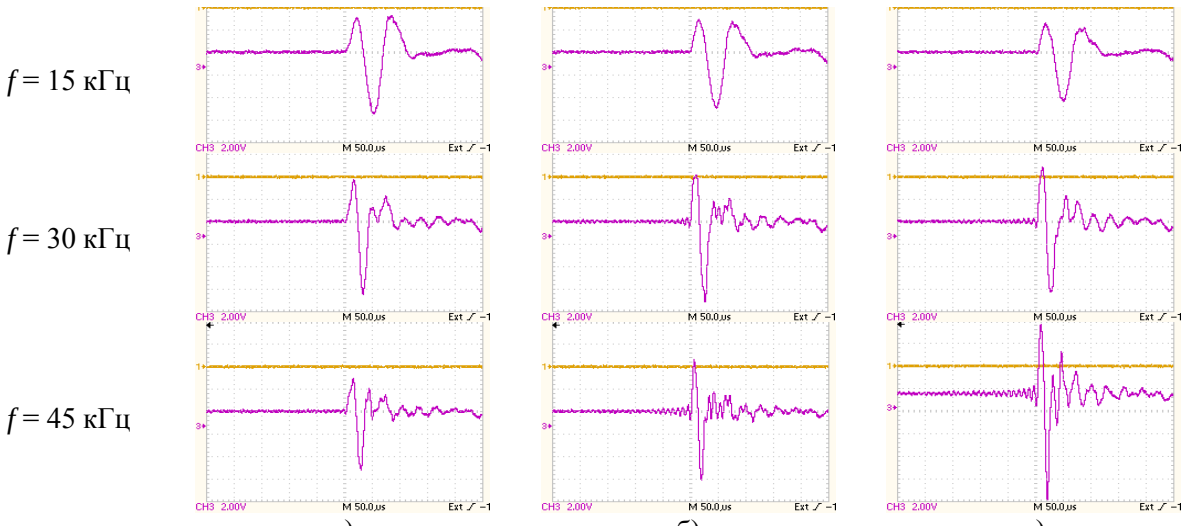


Рис. 8. Влияние времени задержки τ при формировании коротких акустических импульсов в полосе частот 15…45 кГц (0,5…1,5 f_p). а) $\tau=0.9\tau_0$; б) $\tau=\tau_0$; в) $\tau=1.1\tau_0$.

При небольшом изменении τ относительно τ_0 форма акустических импульсов в целом сохраняется, а в некоторых случаях изменение τ способствует приближению формы акустического импульса к заданной (см., например, рис. 8в для f = 30 кГц). Возможность управления

формой акустического импульса при небольшом изменении τ относительно τ_0 сохраняется и в случае дискретно нарастающего закона изменения амплитуд возбуждающих напряжений.

В докладе также рассмотрено влияние на частотные и импульсные характеристики излучения ПВТ (макетов, составленных из них) отказа пьезоцилиндра с номером i (i-го «слоя» для макетов). Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при увеличении порядкового номера i отказавшего пьезоцилиндра (i-го «слоя») усиливается его влияние на АЧХ излучения ПВТ, проявляющееся в виде углубляющегося минимума в области радиального резонанса пьезоцилиндра. Импульсные характеристики менее чувствительны к отказу пьезоцилиндров.

Литература

1. Степанов Б.Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 3, с. 87–96.
2. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Экспериментальные исследования сверхширокополосных преобразователей волноводного типа // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург, 2016, с. 418–421.
3. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследования широкополосной гидроакустической системы, способной имитировать сигналы китообразных // Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 2017, с. 449–454.
4. Пестерев И.С. Система формирования импульсных сигналов для возбуждения сверхширокополосных гидроакустических преобразователей // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. № 8, с. 55–62.
5. Патент № 1723972 Гидроакустический преобразователь / Дианов Д.Б., Малахов В.Б., Степанов Б.Г. и др., 1991, Б.И. № 45.

К ВОПРОСУ О КПД СТЕРЖНЕВЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В МАЛОРАЗМЕРНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКЕ

И.И.Стырикович канд.техн.наук, О.В.Андриянова
АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

ON THE ISSUE OF THE EFFICIENCY FACTOR OF ROD-TYPE PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS IN SMALL-SIZED ANTENNA ARRAYS

I.I.Styrikovitch, Ph.D., O.V.Andriyanova
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon - Gidropribor», St. Petersburg, Russia

Расчётным путём показано влияние потерь в элементах конструкции на КПД преобразователей в составе антенны. Экспериментально подтверждена зависимость КПД от волновых размеров антенной решётки.

The calculations demonstrate the influence of loss in structural elements on the efficiency of antenna transducers. The array wave length dependence of the efficiency factor has been borne out by experiments.

При проектировании гидроакустических антенн малогабаритных подводных аппаратов вопрос обеспечения эффективного излучения и соответственно высоких значений КПД пьезокерамических преобразователей (П) в составе антенн уделяется значительное внимание, и в особенности при использовании новых перспективных материалов.

Для решения этой задачи необходимо учитывать влияние потерь в элементах конструкции на КПД пьезокерамических П в составе антенного устройства (АУ).

При традиционном варианте построения АУ пьезокерамические П в составе эквидистантной антенной решетки расположены с малыми зазорами на расстоянии между центрами смежных преобразователей, не превышающем значений (0,3-0,5) длины волны (λ) в рабочей среде, когда акустическим взаимодействием можно пренебречь.[1]

В рамках одномерного приближения каждый пьезокерамический П рассматривается как стержневой секционированный активный элемент, нагруженный с двух сторон на слоистые среды. Схематическое изображение такого блока пьезокерамических П показано на рис. 1.

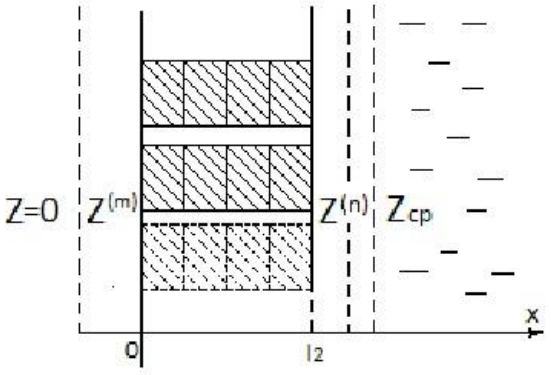


Рис. 1. Схематическое изображение блока пьезокерамических П.

С одной стороны активный пьезокерамический элемент (ПКЭ) контактирует с водной безграничной средой Zcp через (n) плоских пассивных переходных слоев, а с другой через (m) слоев контактирует со средой, имеющей акустическое сопротивление Z=0. Слои могут быть как в виде плоских пластин, так и в виде индивидуальных накладок. Электрически ПКЭ все соединены параллельно и возбуждаются синфазно, соединения на рисунке не показаны.

Основываясь на понятии входного импеданса и решая граничную задачу аналогично изложенному в основополагающей работе Д.Б. Дианова [2], были получены выражения для определения акустической мощности, излучаемой в рабочую среду, и потребляемой активной электрической мощности:

$$P_a = \frac{d_{33}^2 S_2^2 U_m^2 R^{(n)}}{2(S_{33}^E d_{эл})^2 Z_{ср}^2} \cdot \frac{(\Phi_2 - \cos x_1)^2 + \frac{X_2^2}{4Q_2^2}\Phi_1}{\theta_1^2 + \theta_2^2}, \quad (1)$$

$$P_э = \frac{\omega c_0 tg\delta \cdot U_m^2}{2} - \frac{d_{33}^2 S_2 U_m^2}{(S_{33}^E d_{эл})^2 \rho_2 c_2} \cdot \frac{\Omega_1\theta_1 - \Omega_2\theta_2}{\theta_1^2 + \theta_2^2}, \quad (2)$$

здесь

$$\Phi_1 = cosx_1 sinx_2 + \alpha_{12} cosx_2 sinx_1; \quad \Phi_2 = cosx_1 cosx_2 + \alpha_{12} sinx_1 sinx_2;$$

$$\Omega_1 = \frac{Z_2}{Z_{cp}} cosx_1(2 - cosx_2) - \frac{Z_2}{Z_{cp}}\Phi_2 - \frac{X^{(n)}}{Z_{cp}} cosx_1 cosx_2 - \frac{R^{(n)}}{Z_{cp}} \frac{X_2}{2Q_2} cosx_1 cosx_2;$$

$$\Omega_2 = \frac{R^{(n)}}{Z_{cp}} cosx_1 sinx_2 + \frac{Z_2}{Z_{cp}} \frac{X_2}{2Q_2}(cosx_1 sinx_2 + \Phi_1) - \frac{X^{(n)}}{Z_{cp}} \frac{X_2}{2Q_2} cosx_1 cosx_2;$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon^u_{33} S_2 N}{d_{эл}}; \quad Z_K = (\rho c)_к \cdot S_к; \quad \alpha_{ik} = Z_i / Z_k; \quad X_к = \omega l_к / c_к,$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; $(\rho c)_к$; $S_к$; $X_к$ – удельное акустическое сопротивление, площадь поперечного сечения и волновая длина k слоя; Q_2 – механическая добротность; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; S^E_{33} – постоянная гибкости при постоянном электрическом поле; ε^u_{33} – диэлектрическая проницаемость зажатого пьезоэлемента; d_{33} – пьезоэлектрический модуль; U_m – амплитуда электрического напряжения, приложенного к электродам преобразователя; $d_{эл}$ – толщина каждого элемента пьезокерамического стержня; $E_ю$ – модуль Юнга; $Z^{(n)} = R^{(n)} + iX^{(n)}$ – входной механический импеданс слоистой среды [2].

Потери в ПКЭ и материале переходного слоя учитывались введением комплексных упругих и электрических постоянных (3),

$$\overline{\left(\frac{1}{S^E_{33}}\right)} = \frac{1}{S^E_{33}}\left(1 + i\frac{1}{Q_2}\right); \qquad \overline{\varepsilon^u_{33}} = \varepsilon^u_{33}(1 + itg\delta); \qquad \overline{E_ю} = E_ю\left(1 + \frac{1}{Q_{сл}}\right) \tag{3}$$

а электроакустический КПД определялся как $\eta_{э/а} = P_a/P_э$

Расчеты производились для конструкции пьезокерамического П гантельного типа, излучающая накладка которого выполненная из алюминиевого сплава контактирует с водной средой через герметизирующий слой. При расчетах не учитывались потери в металлических элементах конструкции (накладках), а также в элементах механической развязки, обусловленные типом крепления, которые соответствующим выбором способов закрепления, например, симметрично-узловых [3], могут быть сведены к минимуму.

Предварительно рассматривались зависимости КПД пьезокерамического П, непосредственно нагруженного на воду, при различных геометрических соотношениях: асимметрии колебательной системы и коэффициента механической трансформации площадей поперечного сечения ПКЭ и накладок

Расчеты показали, что для пьезокерамического преобразователя с накладками при небольших соотношениях площадей S_3/S_2=1-2 нагрузка на воду не является оптимальной. Однако зависимости КПД имеют сглаженный характер и расчётные максимальные значения достигают ~90%.

Как отмечено в работе [2], пьезокерамический преобразователь без накладок, излучающий в воду без переходных слоев имеет расчетное значение КПД~67% и только при наличии оптимального четверть-волнового слоя КПД может достигать ~80%.

Для пьезокерамического преобразователя с накладками при увеличении соотношения площадей S_3/S_2=5-7 максимальные значения КПД при нагрузке на воду достигаются для широкого диапазона асимметрии колебательной системы преобразователя. Причем, для ПКЭ состава ЦТБС-3 при величине механической добротности Q_2=100 и значениях $tg\delta$=0,02 расчетные значения КПД преобразователя составляют не менее 90%.

Расчеты преобразователя с накладками, нагруженного на водную среду через переходной слой с учетом потерь в материале слоя показали существенную зависимость КПД от волновой толщины слоя. Так, для слоя с реальными параметрами герметизирующего обтекателя при величине добротности материала равной Q=8, частотные зависимости КПД, для случая, соответствующего параметрам преобразователя S_3/S_2=5 и коэффициенту асимметрии ~0,7, при волновых толщинах герметизирующего слоя равных 0,25, 0,5 и 1,0, представлены на рис. 2.

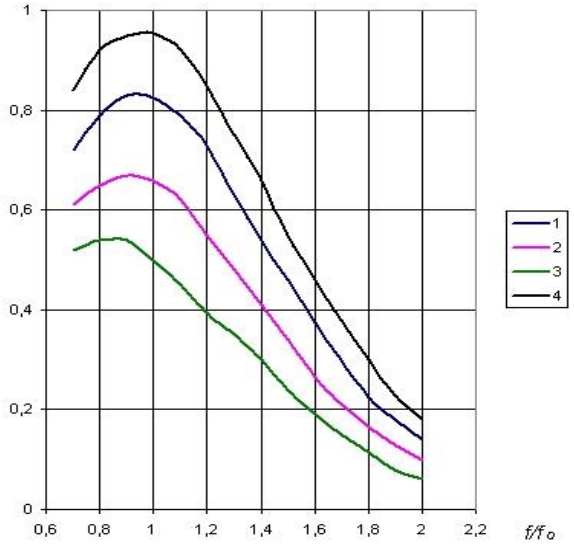


Рис. 2. Частотные характеристики к.п.д. преобразователя для волновых толщин слоя:
1 – $l_{сл.}/\lambda_{сл}$ = 0,25; 2 – $l_{сл.}/\lambda_{сл}$ =0,5; 3 – $l_{сл.}/\lambda_{сл}$ =1 при $Q_{сл}$ = 8; 4 – $l_{сл.}/\lambda_{сл}$ = 0,25 при $Q_{сл.}$ = 100.

Видно, что величина КПД заметно снижается с 80% (при волновых толщинах = 0,25) до ~55% (при = 1). В случае малых потерь в материале слоя $Q_{сл.}$ = 100 величина КПД составляет не менее 90% (кривая 4).

Полученные расчётным путём оценки КПД хорошо подтверждаются результатами целого ряда разработок АО «Концерн МПО «Гидроприбор». Конструктивные особенности разработанных пьезокерамических П с использованием металлических элементов крепления, обеспечивающих в симметрично-узловых вариантах механической развязки минимизацию механических потерь, подробно рассмотрены в многочисленных работах, авторских свидетельствах и патентах [3, 4]. Значения КПД разработанных конструкций П, непосредственно нагруженных на воду (измеренные ватт-метровым способом), составляют величины порядка 90%.

КПД нагруженных через герметизирующий слой (обтекатель) на воду П в составе антенной решётки при синфазном возбуждении определялся по данным измерений акустического давления. Очевидно, что эффективность излучения зависит от формы и размеров рабочей накладки П, а также условий его работы в составе АУ. Для стержневых П работающих в АУ систем МПО характерна в основном квадратная форма рабочей накладки с поперечным размером, как уже отмечалось, не менее (0,3-0,5) λ на нижней частоте рабочего диапазона. Общие размеры излучающей поверхности АУ обычно ограничены калибром изделия, и для решёток размером (5х5) составляют ~2,5 λ.

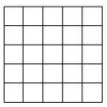
В табл. 1 приведены средние значения КПД, полученные в ходе испытаний разработанных АУ различных модификаций. Расчёт акустической мощности и КПД производился по данным измерений акустического давления исходя из средних значений коэффициента концентрации по измеренным ХН в ГП, ВП и косых плоскостях (для симметричных апертур).

Первые две строки таблицы 1 демонстрируют зависимость величины КПД от волновых размеров АУ. Одна и та же конструкция П симметричной колебательной системы с небольшим отношением площадей S_3/S_2=2 и соответственно ограниченной полосой пропускания (10-12)%, в АУ с малым волновым размером (2х1,5)λ обеспечивает КПД ~40%, а в составе АУ с б**о**льшим волновым размером (4х2)λ КПД возрастает до ~(60-85)% в зависимости от материала обтекателя.

При использовании конструкций П с большим отношением площадей S_3/S_2=5-10 и полосой пропускания (15-25)% КПД в составе АУ с волновыми размерами (2,5х2,5)λ может достигать величин ~ (75-85)% при волновых толщинах обтекателя порядка (0,25-0,5)) $l_{сл.}/\lambda_{сл}$.

Видно, что при волновых толщинах обтекателя более (0,5-1,0) $l_{сл.}/\lambda_{сл}$ величины КПД заметно снижаются до 60%, что показывает хорошее соответствие экспериментальных результатов расчётным. Для более эффективного согласования со средой излучающая поверхность АУ должна иметь размеры не менее (2,5-3)λ.

Таблица 1. Параметры антенных устройств различной модификации

Число элементов	Вид апертуры, D/λ	Материал обтекателя	Волновая толщина	Мех. трансф., S_3/S_2	Коэф. асимметрии	Тип развязки	КПД %
10	2 x 1,5	Резина С-572	~0,25 $\lambda_{сл}$	2	0,5	Симметричный (за две накл)	40
38	4 x 2	Полиуретан ХП-80	~0,7 $\lambda_{сл}$	2	0,5	Симметричный (за две накл)	60
		Резина С-572	~0,7 $\lambda_{сл}$				85
19	2,5 x 2,2	Резина С-572	~$\lambda_{сл}$	5	0,75	Узловой (в элементе армирования)	60
			~0,5 $\lambda_{сл}$				75
25	2,5 x 2,5 	Полиуретан СКУ ПФЛ-74	~0,25 $\lambda_{сл}$	10	0,5	Узловой (в элементе армирования)	85

Полученные данные позволили сформулировать требования для обеспечения проектирования антенн с КПД не менее 70%.

Литература

1. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник, Л. Судостроение, 1984.
2. Дианов Д.Б. О влиянии переходных слоев на коэффициент полезного действия пьезопреобразователя. Акуст. журнал.- 1967, т.13, №4, с.567-574.
3. Стырикович И.И. Стержневые армированные пьезопреобразователи гидроакустических комплексов и систем МПО. Тр. IX всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики – ГА – 2008».СПб. 2008.
4. Стырикович И.И., Груздев П.Д., Шавель Ю.Б. Гидроакустический преобразователь. Патент РФ на изобретение №2583131, бюлл.№13, 2016.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ПОЛИФАЗНЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

М.А.Мараховский, канд.техн.наук, В.А.Мараховский, Э.А.Мирющенко, Е.А.Панич
Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

STUDY OF POSSIBILITY OF CREATING A NEW POLYPHASE PIEZOMATERIALS FOR UNDERWATER TRANSDUCERS

M.A.Marakhovskiy, Ph.D., V.A.Marakhovskiy, E.A.Miryushchenko, E.A.Panich
R&D Design Office «Piezopribor» SFedU, Rostov-on-Don, Russia

Исследована возможность создания новых высокоэффективных полифазных пьезоматериалов композиционного типа для применения в гидроакустических преобразователях. На основе двух сегнетофаз получен ряд пьезоматериалов композиционного типа с различной совокупностью свойств. Опробовано спекание полученных пьезоматериалов методами горячего прессования и искрового плазменного спекания.

Possibility of creating new highly polyphasec piezomaterials of composite type for use in sonar transducers is investigated. On the basis of two signatures a number of piezomaterials of composite type with a different set of properties are received. Sintering of the obtained piezomaterials by hot pressing and spark plasma sintering has been tested.

Перспективным направлением изготовления эффективных пьезокерамических материалов для гидроакустики является создание новых типов полифазных материалов композиционного типа, представляющих собой совокупность двух или более сегнетофаз. Такого рода полифазные материалы принадлежат к гетерогенной морфотропной области, характеризующейся повышенной внутренней энергией вызванной физико-химическим взаимодействием исходных фаз [1].

В данном исследовании для создания полифазных материалов использовались две, предварительно синтезированные сегнетофазы: $Pb_{0,95}Sr_{0,05}Ti_{0,45}Zr_{0,53}Cd_{0,01}W_{0,01}O_3$ и фаза системы $PbTi_xZr_{1-x}O_3$ - $PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ - $PbNi_{1/3}Nb_{2/3}O_3$, имеющие структуру типа перовскита. Синтез обеих фаз проводился в рамках метода твердофазных реакций. Режимы помола частиц в планетарной мельнице каждой из сегнетофаз подбирались с учётом требований их близкого гранулометрического состава, во избежание различных скоростей рекристаллизации частиц разного радиуса кривизны [2].

В ходе работы исследовались 7 вариантов составов композиционных пьезокерамических материалов, отличающихся массовыми долями входящих в их состав пьезофаз (таблица 1).

Таблица 1. Состав исследованных полифазных пьезоматериалов композиционного типа (* и ** - исходные фазы) – массовые доли.

Состав материала (в мас. долях пьезофаз) и его №													
№1		№2		№3		№4		№5		№6		№7	
$пф^1$	$пф^2$	$пф^1$	$пф^2$	$пф^1$	$пф^2$	$пф^1$	$пф^2$	$пф^1$	$пф^2$	$пф^1$	$пф^2$	$пф^1$	$пф^2$
0,2	0,8	0,3	0,7	0,4	0,6	0,5	0,5	0,6	0,4	0,7	0,3	0,8	0,2

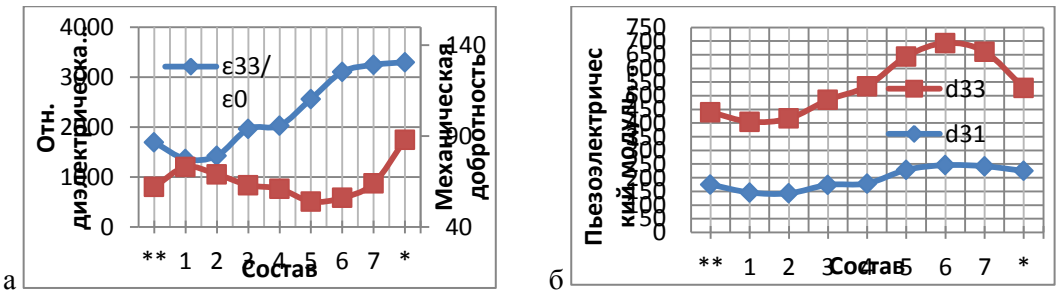
$ПФ^1$ – пьезофаза - * $PbTi_{0,35}Zr_{0,21}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0,14}(Ni_{1/3}Nb_{2/3})_{0,13}O_3$

$ПФ^2$ – пьезофаза - ** $Pb_{0,95}Sr_{0,05}Ti_{0,45}Zr_{0,53}Cd_{0,01}W_{0,01}O_3$

Полученные в результате исследования значения электрофизических (ЭФП) и механических параметров (МП) указывают на эффективность предлагаемого приёма в части возможности управления совокупностью свойств пьезоматериала (рис. 1).

Снимки микроструктуры пьезоматериала (рис. 2) подтверждают многофазность изготовленной керамики. Изменение температуры спекания практически не влияет на размер зёрен материала, что объясняется низкой скоростью вторичной рекристаллизации прессзаготовок. Такое явление широко распространено в смесях, на основе кристаллических фаз ограниченно растворимых друг в друге [3]. Также на композиционное происхождение материала указывает снижение температуры спекания прессзаготовок в среднем на 200 °С по сравнению с прессзаготовками на основе исходных фаз. Спекание пьезокерамических образцов проводилось в камерной печи при атмосферном давлении в интервале температур 950 – 1150 °С.

Композиционные материалы помимо комбинационных свойств обладают также аддитивными свойствами, что подтверждается изменением температуры Кюри материалов по мере изменения массового соотношения компонентов в системе (рис. 3) [4].



а б

Рис. 1. Зависимость значений ЭФП и МП от состава полифазного материала, спечённых при 980 °С ** и * исходные фазы полифазного материала (табл. 1).

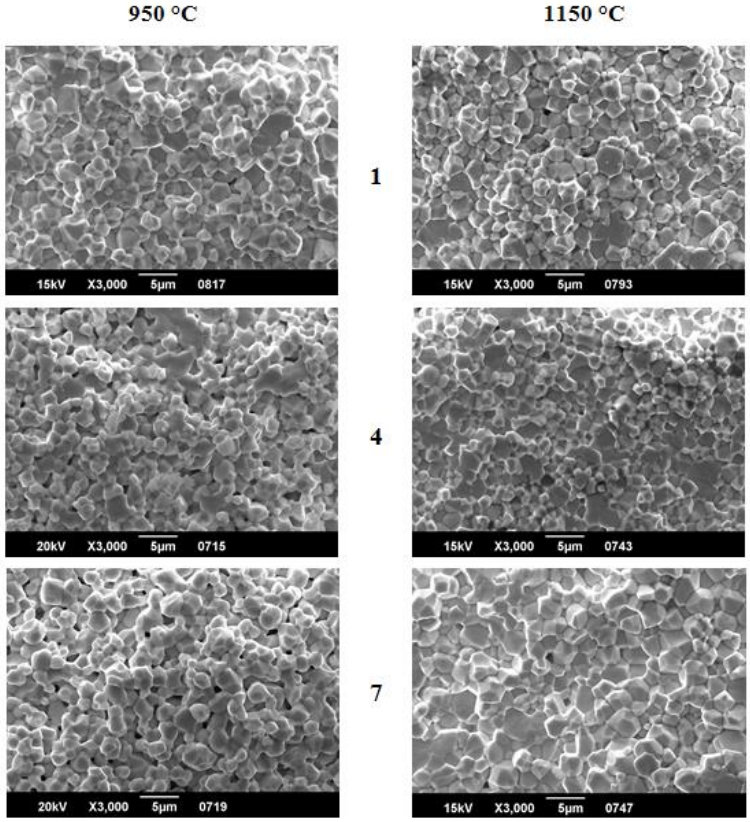


Рис. 2. Микроструктура полифазных керамических образцов композиционного типа составов 1, 4, 7.

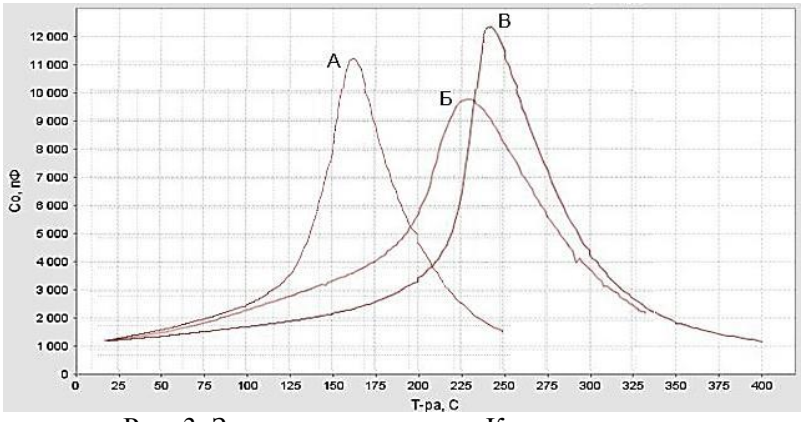


Рис. 3. Значения температур Кюри составов:
А) фаза - * ($T_{спек}$ = 1150 °С); **Б**) фаза - ** ($T_{спек}$ = 980 °С);
В) полифазный пьезокерамический материал состав 6 ($T_{спек}$ = 980 °С).

На основе данных рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа установлено, что в рамках области изменения составов материалов не происходит изменения их характера – мате-

риалы остаются гетерогенными, т.е. принадлежат к полифазным материалам композиционного типа. Существенного изменения микроструктуры керамики также не обнаружено.

Анализ представленных данных позволяет утверждать, что оптимальной совокупностью ЭФП обладает состав номер 6, соответствующий так называемому центру гетерогенной морфотропной области. Керамические образцы, указанного состава имеют максимальные значения плотности, коэффициентов электромеханической связи, продольного и поперечного пьезомодуля и диэлектрической проницаемости при минимальных величинах tgδ и Q_m, что говорит об их возможном применении для повышения эффективности гидроакустических пьезопреобразователей, работающих в режиме приёма.

С целью дальнейшего повышения технологичности, а также снижения температуры спекания полученных полифазных материалов, образцы состава номер 6 были спечены методом одноосного «горячего прессования» (ГП) и его модификацией – методом искрового плазменного спекания (Spark Plasma Sintering - SPS) в диапазоне температур 850 – 1000 °С. Метод ГП был реализован при помощи лабораторной установки горячего прессования «ЛУГП-10» (разработка НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ) (рис. 4.а), позволяющей осуществлять спекание керамических заготовок в широком диапазоне значений температур, скоростей нагрева и одноосного давления.

Спекание методом SPS проводилось на прессе искрового плазменного спекания «SPS515S» (DR.Sinter-LABTM Fuji electronic industrial) (Япония) (рис. 4.б). Метод SPS примечателен сверхвысокой скоростью процесса спекания (десятки минут) при сниженных температурах (по сравнению с традиционным спеканием при атмосферном давлении на 100-300°С), что подавляет рост зёрен керамики и способствует формированию однородной, близкой к монофазной, микроструктуры, положительно влияющей на механические характеристики получаемых изделий. Снимки микроструктуры керамических образцов полученных методами ГП и SPS подтверждают возможность управления процессом формирования мелкозернистой структуры керамики (рис. 5). Плотная керамическая структура формируется уже при температуре спекания 850 °С. С повышением температуры спекания наблюдается рост плотности керамики, при практически неизменных размерах зерен, что объясняется подавлением процесса вторичной рекристаллизации (при 1000 °С). Плотности полифазного материала состава 6 полученного методом ГП и SPS представлены в таблице 2. Использование метода ГП при изготовлении керамических образцов позволяет снизить температуру спекания до 900 °С, а керамические образцы изготовленные методом SPS обладают высокими значениями плотности уже при температуре спекания 850 °С. В настоящий момент ЭФП керамических образцов, полученных методом SPS исследуются.

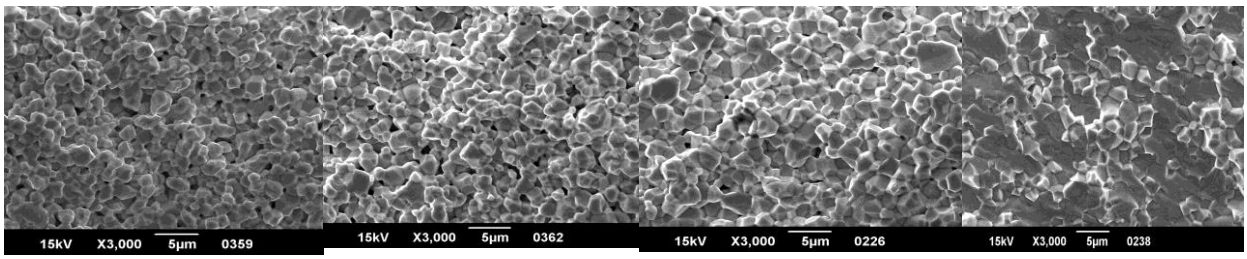
а

б

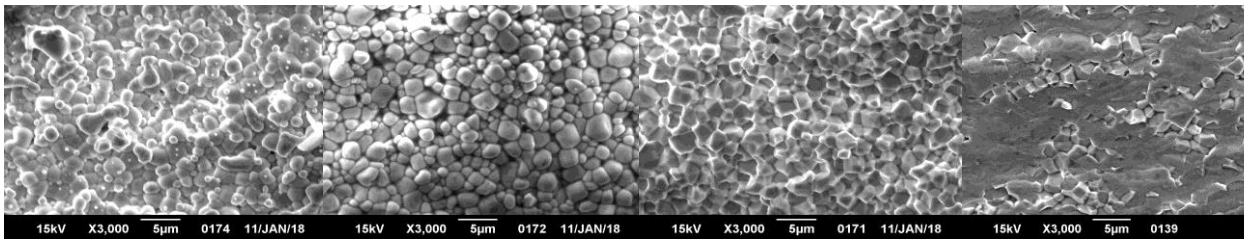
Рис. 4. Внешний вид установок Горячего прессования (а)
и Искрового плазменного спекания (SPS) (б).

Таблица 2. Плотности и ЭФП полифазных материалов полученных методом ГП и SPS.

Метод спекания	ГП			SPS		
Темп. спекания, °С	850	900	950	850	900	950
Плотность, г/см^3	7,51	7,75	7,76	7,79	7,87	8,04
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2910	3461	3413	-	-	-
d_{33}, пКл/Н	564	686	681	-	-	-



ГП 850 °С ГП 900 °С ГП 950 °С ГП 1000 °С



SPS 850 °С SPS 900 °С SPS 950 °С SPS 1000 °С

Рис. 5. Микроструктура полифазных керамических образцов композиционного типа состава 6, полученных методами ГП и SPS.

Литература

1. Третьяков Ю. Д. Твердофазные реакции / Ю. Д. Третьяков. - М.: Химия, 1978. - 360 с.
2. Кингери У.Д. Введение в керамику / У.Д. Кингери. - М.: Изд. лит. по строительству, 1967. - 500 с.
3. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций / Б. Дельмон. - М., «Мир», 1972, - 554 с.
4. Мараховский М.А., Свирская С.Н., Нестеров А.А., Мараховский В.А., Панич А.Е. / Макролегирование пьезофаз системы ЦТС с низкой температурой спекания // Сборник трудов Международной молодёжной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Анапа. 23-27 сентября 2013. - С. 85-87.
5. Мараховский М.А., Панич А.А. / Получение пьезокерамики системы PMN-PT методом искрового плазменного спекания // Сборник трудов XXI ежегодной Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2017» - Таганрог. 7 июня 2017. – С. 242-249.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГИДРОФОН НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

С.Н.Галий, В.К.Доля, канд.техн.наук, А.П.Ламека[1], канд.техн.наук, Д.А.Матешов
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия
[1]ПАО «Дальприбор», Владивосток, Россия

BROADBAND HYDROPHONE BASED ON MODERN PIEZOELECTRIC COMPOSITE MATERIAL

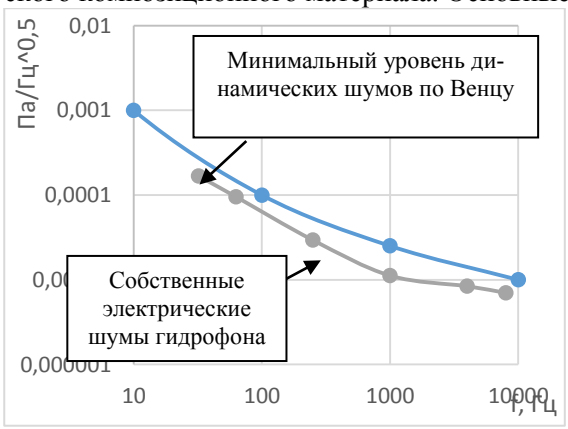
S.N.Galiy, V.K.Dolya, Ph.D., A.P.Lameka[1], Ph.D., D.A.Mateshov
Institute of High Technologies and Piezotechniks SFedU, Rostov-on-Don, Russia
[1]PJSC «Dalpribor», Vladivostok, Russia

В настоящем докладе представлены результаты разработки гидрофона на основе высокоэффектив-ного объемно-чувствительного двухфазного пьезоэлектрического композиционного (типа 3-0, 3-3) материала.

This report presents the results of the development of a hydrophone based on a highly efficient volumetric two-phase piezoelectric compositional (type 3-0, 3-3) material.

Современные гидроакустические приемники (гидрофоны) используют в качестве чувствительного элемента, преобразующего акустический сигнал в электрический, пьезоэлектрический элемент. При этом в различных случаях могут применяться пьезоэлементы различной формы (цилиндры, сферы, кольца, диски и т.д.). Однако в любом случае для обеспечения максимальной чувствительности в конструкцию гидрофона вводят элементы акустического экранирования.

Авторами настоящей работы на основе математического моделирования и проведенных экспериментальных исследований показано, что конструкция гидрофона без потерь его эффективности может быть значительно упрощена и сведена к использованию в качестве гидрофона непосредственно чувствительного элемента, практически выполненного на основе пьезоэлектрического композиционного материала. Основные параметры такого гидрофона представлены ниже.



а)

б)

Рис. 1. а - спектральная плотность шумов, б - внешний вид гидрофона.

Гидрофон имеет следующие основные характеристики:

1. Геометрические размеры, мм (без кабеля) …… 16x36x50;
2. Чувствительность, В/Па 10^{-3}, …….. 50;
3. Встроенный малошумящий усилитель:
4. Рабочая глубина погружения, …… до 600 м
6. Рабочий диапазон частот по уровню минус 6 дБ, Гц …….. 3…10000

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННОГО ГИДРОФОНА

С.Ю.Авдюхина, В.М.Агафонов, канд.физ-мат.наук, Е.В.Егоров, канд.физ-мат.наук,
Д.Л.Зайцев, канд.физ-мат.наук, М.А.Рыжков
Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

DESIGN AND PRINCIPLES OF OPERATION FOR MOLECULAR ELECTRONIC HYDROPHONE

S.Yu.Avdyukhina, V.M.Agafonov, Ph.D., E.V.Egorov, Ph.D., D.L.Zaitsev, Ph.D., M.A.Ryzhkov
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia

В работе представлены теоретические и экспериментальные данные о принципах работы низкочастотного электрохимического гидрофона, построенного на основе технологии молекулярно-электронного переноса. Приведены результаты исследования амплитудно-частотных и шумовых характеристики молекулярно-электродных гидрофонов. Продемонстрирована работа прототипа гидрофона с полосой пропускания 0.02-200 Гц и чувствительностью 1.5 мВ/Па. Показано, что собственный шум датчика может быть существенно ниже стандартной модели шумов Венца особенно в области сверхнизких частот.

The work presents theoretical and experimental analysis of the operation principles of a low-frequency electrochemical hydrophone constructed on the basis of molecular-electron transfer technology. The results of measurements of amplitude-frequency and noise characteristics of molecular-electrode hydrophones are presented. The prototype of a MET hydrophone with a frequency bandwidth of 0.02-200 Hz and sensitivity of 1.5 mV / Pa is demonstrated. It is shown that the intrinsic noise of the sensor can be substantially lower than the standard Wenz noise model, especially in the region of infra-low frequencies.

В условиях истощения залежей легкодоступных углеводородов перспективными направлениями поиска и добычи нефти является Арктический шельф и переходные от суши к морю зоны на всем побережье и в зонах широких рек. Для поиска нефти в таких условиях используются специальные датчики: гидрофоны, двойные датчики типа гидрофон/геофон, а также векторные акустические приемники. Известен целый ряд технологий для изготовления современных датчиков измеряющих вариации акустического давления, например, пьезоэлектрические, электрострикционные, магнитострикционные, электростатические и др., тем не менее все эти типы чувствительных элементов оказываются неэффективными и не всегда дают возможность добиваться желаемых результатов в полосе низких частот от долей герца до нескольких сотен герц. Независимо от технологии, использованной при создании гидрофонов, возможности измерения слабых сигналов с помощью гидрофонов ограничены уровнем регистрируемых помех, не относящихся к полезному сигналу и представляющих с точки зрения процессов измерения шум. В указанных обстоятельствах встает вопрос разработки датчиков давления на иных технологических принципах, способных удовлетворить возрастающим требованиям инженерных и научных задач.

Настоящая работа представляет результаты исследования двумя основными частями. В первой части описываются физические принципы работы и экспериментальная конструкция разрабатываемого устройства. Во второй приводятся данные экспериментальных исследований мелководных (до 15 метров) прототипов устройства.

Принципы работы гидрофона на основе МЭП. Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП достаточно подробно изложены в следующих учебных [1], научно-популярных [2] и периодических [3] изданиях. Основу любого устройства, работающего по технологии МЭП составляет электрохимическая преобразующая ячейка.

В гидрофоне одна из мембран, ограничивающих канал ячейки, открыта во внешнюю среду. Вторая мембрана герметично накрывается твердым колпаком, запирающим небольшой объем воздуха под крышкой. Последнее позволяет измерять вариации давления, так как в сосуде с воздухом при деформации второй мембраны меняется давление. Из уравнения состояния идеального газа при постоянной температуре получим:

$$p_0 V_0 = p(V_0 - s_м x) = const \qquad (1)$$

где $s_м$ – площадь мембран, x – смещение мембран. Рассмотрим поведение системы при подаче на первую мембрану гармонически изменяющегося давления малой амплитуды. Запишем уравнение для расхода жидкости через МЭП из закона Пуазейля:

$$q = s_м \dot{x} = \frac{p_1 - p_2 - \frac{M\ddot{x}}{s_{эф}}}{R_h} = \frac{p_0(1+me^{i\omega t}) - \frac{p_0 V_0}{V_0 - s_м x} - \frac{M\ddot{x}}{s_{эф}}}{R_h} \qquad (2)$$

где $\frac{M\ddot{x}}{s_{эф}}$ учитывает инерционность жидкости в сосуде и представляет собой среднюю силу, действующую на единицу площади поперечного сечения жидкости в сосуде. q – объемный расход жидкости через МЭП, x – смещение мембран, p_1 – внешнее давление, p_2 – давление в сосуде с воздухом, $s_м$ – площадь поверхности мембран, $s_{эф}$ – эффективная площадь сечения сосуда с электролитом, принятая равной средней площади сечения сосуда, p_0 – внешнее давление в отсутствии возмущения, m – коэффициент модуляции давления, V_0 – объем воздушного пузыря в отсутствии возмущения, M – масса электролита в сосуде, R_h – коэффициент сопротивления течению жидкости через МЭП, ω – циклическая частота колебания внешнего давления. Считая $s_м x \ll V_0$, решим уравнение движения (2) и найдем коэффициент передачи W_{mech} между амплитудой расхода и амплитудой внешнего давления:

$$W_{mech} = \frac{Q}{p} = \frac{Q}{mp_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(\omega^2 - \frac{p_0 s_{эф} s_м}{V_0 M}\right)^2 + \left(\omega \frac{s_{эф} s_м R_h}{M}\right)^2}} \frac{\omega s_{эф} s_м}{M} \quad (3)$$

Семейство зависимостей $W_{mech}(f)$ в 10^{-12} м³/(с·Па) от частоты колебания давления для датчиков с размерами электродного узла 3x3 (сплошные линии) мм и 6x6 мм (пунктирные линии) при различных внешнем давлении и параметре сосуда с воздухом ($pV = 1$ атм · см^3, $p = 1$ атм – синяя линия; $pV = 1$ атм · см^3, $p = 3$ атм – зеленая линия; $pV = 4$ атм · см^3, $p = 1$ атм – красная линия; $pV = 4$ атм · см^3, $p = 3$ атм – желтая линия) представлены на рис.1а.

Произведем теоретическую оценку собственных шумов гидрофона, основываясь на известных физических механизмах шумов в МЭП описанных в [4,5 и 6] и найденном характере амплитудно-частотной зависимости коэффициента преобразования гидрофона. На рис.1б черным представлена шумовая характеристика окружающей среды при нулевом уровне моря, фиолетовым представлен шум моря в стандартной модели Венца [7].

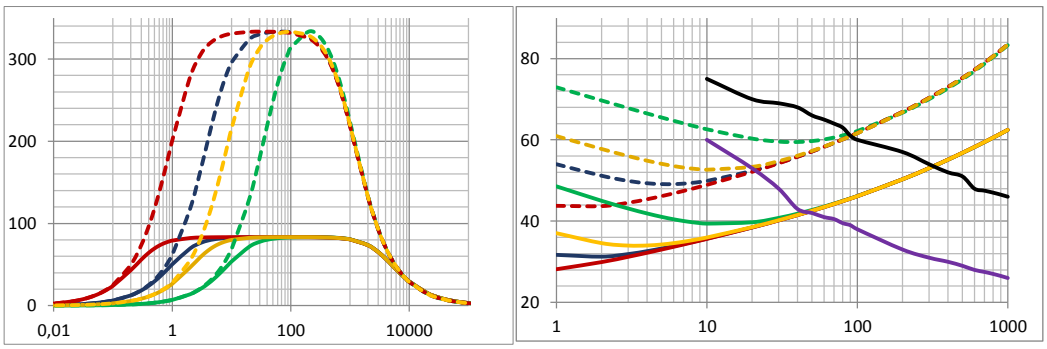


Рис. 1. График зависимости коэффициента передачи W_{mech} от частоты колебания давления (слева); семейство смоделированных кривых собственного шума МЭП гидрофона в терминах спектральной плотности мощности в единицах давления по отношению к 1 мкПа/√Гц (справа).

Экспериментальные результаты. Для проверки теоретических результатов было собрано несколько прототипов молекулярно-электронных гидрофонов. В конструкцию экспериментального макета вошли элементы силовой отрицательной обратной связи, введенной для стабилизации параметров и расширения динамического диапазона. В замкнутом герметичном объеме с воздухом располагалась электромагнитная катушка и магнит, приклеенный к мембране гидрофона. В катушку подавался регистрируемый датчиком сигнальный ток, приводящий к возникновению электромагнитного поля, и соответствующей силы Лоренца, втягивающей или выталкивающей магнит из катушки. При разомкнутой обратной связи на катушку можно было подавать периодические сигналы, и искусственно вызывать поток жидкости через ячейку имитируя вариации внешнего давления. При известной передаточной характеристике каскада обратной связи указанный способ может быть использован для самокалибровки гидрофона в любых условиях, в том числе полевых. Для практической реализации макета была подобрана частотно независимая передаточная функция каскада, обеспечивающего передачу калибровочного электрического сигнала в движение магнита, прикрепленного к мембране гидрофона. При таком способе снятия отклика системы на внешнее воздействие после калибровки получается безразмерная передаточная характеристика. Для того чтобы найти значение АЧХ в единицах

давления, проводилась контрольная сверочная калибровка на стенде с референсным гидрофоном известной чувствительности. Кроме того, экспериментально было показано, что частотная зависимость коэффициента преобразования гидрофона, снятая с помощью самокалибровки катушкой обратной связи, полностью соответствует стандартной калибровке давлением, рис.2а. Была проведена целая серия измерений АЧХ при различных глубинах погружения, соответствующих разному статическому давлению в системе. На рис.2а показано семейство соответствующих характеристик. Из представленных характеристик можно сделать вывод, что изменение внешнего статического давления влияет на чувствительность макета молекулярно-электронного гидрофона. Изменение чувствительности происходит главным образом благодаря увеличению жесткости системы из-за постепенного сжатия воздушного пузыря. Увеличение жесткости сдвигает максимум характеристики в сторону низких частот. Изменение чувствительности без специальной компенсации статического давления при изменении на 1 атмосферу составляет около двух раз, что может быть компенсировано за счёт изменения глубины обратной связи. На рис.2б увеличение давления над атмосферным выполнено с шагом 0,2 атм (синяя кривая) до 1,2 атм – серая кривая. Экспериментальные кривые в исследованной области частот соответствуют теоретической модели.

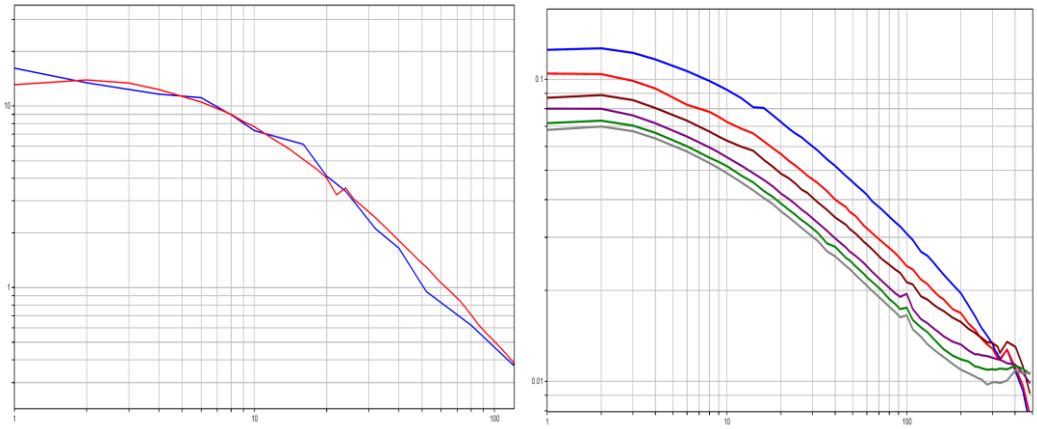


Рис.2. Сравнение АЧХ МЭП гидрофона при самокалибровке катушкой (красная кривая) и калибровке на стенде изменения давления (синяя кривая). По оси ординат относительные единицы (слева); амплитудно-частотные характеристики макета молекулярно-электронного гидрофона при разных статических давлениях (справа).

Экспериментальное исследование собственных шумов было выполнено методом корреляционного анализа в соответствии с методикой, подробно описанной в [8]. Два МЭП гидрофона, имеющих плоскую АЧХ в полосе 0.02-200 Гц (неравномерность 0.5 дБ со спадом 3 дБ на краях полосы) с коэффициентом преобразования 1.5 мВ/Па (процедура подстроки аналогична подробно описанной методике из [8]), были помещены в специальную толстостенную металлическую емкость, заполненную водой. Контейнер накрывался специальным поролоновым куполом, чтобы избежать резких перепадов температуры. Сигнал был записан ночью, для снижения техногенного шума с помощью высокоразрядого АЦП NDAS-8226 (http://www.r-sensors.ru/11_digitizers.shtml). На рис.3 представлены спектральные плотности мощности участка ночной записи двух близкорасположенных молекулярно-электронных гидрофонов (красный и синий). Зеленый - собственный шум АЦП, фиолетовый некоррелированная часть спектральной плотности, имеющая смысл уровня собственного шума гидрофона. Полученные результаты качественно соответствуют теоретическим моделям.

Таким образом, результаты, представленные в настоящем исследовании, описывают теоретические основы и принцип действия МЭП гидрофона. Собран прототип широкополосного устройства с чувствительностью 1.5 мВ/Па в полосе не менее 0.02 – 200 Гц. Продемонстрировано изменение чувствительности МЭП гидрофона в зависимости от внешнего статического давления, обусловленное изменением жесткости системы. Показано, что собственный шум датчика может быть существенно ниже стандартной модели шумов Венца особенно в области сверхнизких частот.

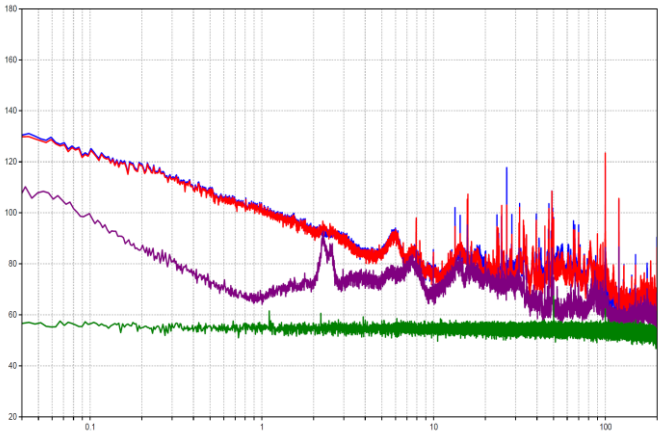


Рис. 3. Экспериментальный собственный шум МЭП гидрофона в дБ относительно 1 мкПа/√Гц.

Литература

1. Lidorenko N. S., Ilin B. I., Zaidenman I. A., Sobol V. V., Shchigorev I. G. An Introduction to Molecular Electronics, Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1984, p. 320.
2. Agafonov V. M., Neeshpapa A. N., and Shabalina A. S. Electrochemical seismometers of linear and angular motion // in Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 944–961, 2015.
3. Shabalina A. S. et al. Modern measuring instruments based on molecular electronic transducers // Achievements Modern Radioelectron., vol. 9, pp. 4–33, Sep. 2014. [Online]. Available: http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=15249
4. Kozlov V. A. and Safonov M. V. Self-noise of molecular electronic transducers // Experim. Instrum. Techn., vol. 73, no. 12, pp. 81–84, 2003.
5. Agafonov V., Zaitsev D. Convective noise in molecular electronic transducers of diffusion type // Tech. Phys. 2010, 55, 130–136.
6. Zaitsev D. L., Agafonov V., Egorov E., Antonov A., and Shabalina A. Molecular electronic angular motion transducer broad band self-noise // Sensors, vol. 15, no. 11, pp. 29378–29392, 2015.
7. WENZ G. M. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources, THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, V. 34, N. 12, 1962, 1936-19556
8. Egorov I. V., Shabalina A. S., Agafonov V. M. Design and Self-Noise of MET Closed-Loop Seismic Accelerometers // IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 17, NO. 7, APRIL 1, 2017.

ШУМЫ ФОРСИРОВАННОГО ВЫДОХА ЧЕЛОВЕКА И ИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

В.И.Коренбаум, д-р техн.наук, И.А.Почекутова, д-р мед.наук, В.В.Малаева, канд.мед.наук,
А.Е.Костив, канд.техн.наук, М.А.Сафронова, канд.физ-мат.наук, С.Н.Шин
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

NOISES OF HUMAN FORCED EXHALATION AND THEIR DIAGNOSTIC APPLICATIONS

V.I.Korenbaum, Dr.Sc., I.A.Pochekutova, Dr.Sc., V.V.Malaeva, Ph.D., A.E.Kostiv, Ph.D.,
M.A.Safronova, Ph.D., S.N.Shin
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Форсированный выдох (ФВ) человека сопровождается характерными дыхательными шумами, содержащими широкополосные и узкополосные составляющие. Обобщены акустические представления о происхождении и характеристиках шумов ФВ. Анализируются акустико-биомеханические взаимосвязи ФВ, преимущественные механизмы и зоны формирования шумов. Разработанные акустические модели и эмпирически установленные феномены позволили предложить набор акустических параметров для функциональной диагностики вентиляционной функции легких. Полученные результаты нашли применение в медицинской диагностике и при мониторинге состояния лиц, находящихся в экстремальных условиях.

The human forced exhalation (FE) is accompanied by characteristic respiratory noises containing broadband and narrowband components. The acoustic representations about the origin and characteristics of the FE noise are generalized. The acoustic-biomechanical interrelations of the FE, the primary mechanisms and the noise generation zones are analyzed. The developed acoustic models and empirically found phenomena allowed to offer a set of acoustic parameters for the functional diagnosis of pulmonary ventilation function. The results obtained were used in medical diagnostics and in monitoring the health status of subjects in extreme conditions.

Форсированный выдох (ФВ) – дыхательный маневр, который нашел широкое применение в спирометрической диагностике дыхательной функции. Шумы ФВ – мощный биоакустический сигнал, несущий в себе биомеханическую и физиологическую информацию – характеризуется высокими значениями интенсивности и значительно ‘большим соотношением сигнал/помеха, чем шумы спокойного дыхания, обычно используемые в медицине при аускультации легких. По этим причинам шумы ФВ активно исследуются в диагностических целях. Тем не менее, механизмы формирования шумов ФВ и уровни бронхиального дерева, ответственные за их происхождение, как и возможности применения параметров шумов ФВ для диагностики и мониторинга состояния дыхательной системы человека продолжают дискутироваться.

Целью работы является обобщение акустических представлений о происхождении и характеристиках шумов ФВ, регистрируемых над трахеей, и создание на их основе оригинальных методов акустической диагностики и мониторинга вентиляционной функции легких.

Происхождение шумов форсированного выдоха. Шумы ФВ отличаются от шумов спокойного дыхания увеличением мощности широкополосной составляющей и появлением дополнительных узкополосных компонент – мощных свистов, называемых свистами форсированного выдоха (СФВ) [1]. При регистрации дыхательных шумов ФВ на поверхности шеи над трахеей имеют место два механизма формирования регистрируемого сигнала [2]. Первый из них определяется суперпозицией собственно акустических шумов, излучаемых по просвету проводящих дыхательных путей. Этот механизм предполагает распространение акустического сигнала к датчику от удаленных источников в бронхиальном дереве по воздушному просвету и создание внутри трахеи акустического давления. Вторым механизмом является гидродинамическое или так называемое псевдозвуковое воздействие турбулентных пульсаций давления вихревого потока на внутреннюю стенку трахеи, создающее в области установки акустического датчика усредненное гидродинамическое давление. В отличие от первого (акустического) механизма в этом случае не требуется сжимаемости воздушной среды, а регистрируемые сигналы пропорциональны гидродинамическому давлению в вихревом потоке, усредненному по проекции поверхности восприятия акустического датчика.

СФВ могут быть разбиты на звуки, генерируемые зависимыми от потока механизмами (срыв вихрей, вынужденный динамический флаттер) и автоколебательными (автоколебательный флаттер, колебания смыканий слизистой ткани). Происхождение наиболее мощных среднечастотных СВФ (400-600 Гц) связано с 0 – 3 уровнями ветвления бронхиального дерева, тогда как высокочастотных СФВ (выше 600-700 Гц) – с 2 – 6 уровнями ветвления [3].

Акустико-биомеханические взаимосвязи форсированного выдоха. Основной метод исследования – сопоставление параметров трахеальных шумов ФВ с результатами оценки биомеханических характеристик функции внешнего дыхания, впервые полученными не только с по-

мощью спирометрии, но и бодиплетизмографии (MasterScreen Body, Jager). Трахеальные шумы ФВ регистрировались с помощью разработанного нами портативного аппаратно-программного комплекса [4]. В качестве акустических параметров предложено вычислять общую продолжительность шумов ФВ в полосе частот 200-2000 Гц, продолжительности и энергии шумов в отдельных 200-х Гц полосах этого диапазона. Исследования проведены на выборке из 230 человек обоего пола, включавшей здоровых испытуемых, лиц с факторами риска развития хронических заболеваний органов дыхания, больных, страдающих бронхиальной астмой (БА) и хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ).

С помощью непараметрического дисперсионного анализа выявлено статистически значимое разнонаправленное влияние фактора встречаемости и выраженности бронхиальной обструкции на акустические параметры ФВ и биомеханические показатели вентиляционной функции легких. На статистической модели, характеризуемой значимым постепенным ростом бронхиального сопротивления и остаточного объема легких, акустические продолжительности и энергии трахеальных шумов ФВ координируют как с сопротивлением спокойного выдоха, так и с остаточным объемом легких, что подтверждает развитые модельные представления о шумообразовании при форсированном выдохе у здоровых и лиц с бронхиальной обструкций [5]. Установлена частотная избирательность зависимости акустических продолжительностей и энергий от фактора встречаемости и выраженности бронхиальной обструкции.

При корреляционном анализе выборки обследуемых впервые выявлены взаимосвязи между продолжительностями и энергиями трахеальных шумов ФВ и биомеханическими показателями вентиляционной функции легких. Причем наиболее сильные корреляционные связи отмечены между временными акустическими параметрами и сопротивлениями, отражающими преимущественно функционирование крупных дыхательных путей, а также остаточным объемом легких и его отношением к общей емкости легких, которые характеризуют состояние мелких дыхательных путей. Впервые установлена разнонаправленность корреляционных связей между акустическими параметрами трахеальных шумов ФВ и биомеханическими показателями в отдельных группах здоровых лиц, больных БА со спирометрически подтвержденной и неподтвержденной обструкцией, больных ХОБЛ [6]

Акустические параметры ФВ в диагностике вентиляционной функции легких. Продемонстрированы не только достаточно эффективная акустическая диагностика бронхиальной обструкции у больных БА с помощью предложенного параметра – продолжительность трахеальных шумов ФВ в полосе частот 200 – 2000 Гц, (чувствительность и специфичность – около 90%), но и возможность раннего обнаружения скрытой бронхиальной обструкции, не выявляемой традиционной спирометрией [7].

В 2-мерном признаковом пространстве продолжительности трахеальных шумов ФВ в полосе частот 200 – 2000 Гц и энергии шумов в полосе частот 400 – 600 Гц, нормированной на суммарную энергию в полосе частот 200 – 2000 Гц, выявлено разделение больных с обструктивными заболеваниями легких (БА и ХОБЛ) на два кластера. Достоверность разделения больных подтверждается наличием статистически значимых различий в степени выраженности бодиплетизмографических/спирометрических нарушений, которые с акустических и клинико-физиологических позиций могут быть связаны с влиянием тяжести бронхиальной обструкции, обусловленной для кластера с меньшими значениями ограничением воздушного потока в более дистально расположенных бронхах [8].

При наземном моделировании космической невесомости в положении лежа с отрицательным наклоном тела -6^{o} (антиортостатическая гипокинезия) по группе из 12 испытателей в целом выявлено статистически значимое удлинение акустической продолжительности трахеальных шумов ФВ по сравнению с исходными значениями [9]. Для подгруппы из 6 испытателей, остававшейся в антиортостатическом положении (модель невесомости) до конца эксперимента, установлен дальнейший значимый рост акустического показателя. Преобладающей индивидуальной реакцией в подгруппе из 6 испытателей, переведенной из антиортостатического (-6^{o}) в ортостатическое ($+9{,}6^{o}$) положение (модель лунной гравитации), являлось укорочение продолжительности трахеальных шумов форсированного выдоха. С помощью 2-мерного дисперсионного анализа установлена и значимо большая групповая продолжительность трахеальных шумов ФВ на модели невесомости, чем на модели лунной гравитации. Спирометрические показатели разницы между этими вариантами гипокинезии не выявили. После прекращения эксперимента общегрупповые показатели продолжительности трахеальных шумов ФВ вернулись к исходным значениям. Из акустико-физиологических соображений удлинение продолжительности

трахеальных шумов форсированного выдоха на модели невесомости (антиортостатическая гипокинезия) может быть объяснено дополнительным по отношению к чисто постуральному (ортостатическая гипокинезия) ростом аэродинамического сопротивления дыхательных путей.

Для группы из 6 водолазов, совершавших подводные погружения в современных дыхательных аппаратах замкнутого цикла типа Amphora (AquaLung) в прибрежной зоне Японского моря, показано статистически значимое групповое увеличение продолжительности трахеальных шумов ФВ, свидетельствующее о неблагоприятном влиянии даже непродолжительной гипербарической гипероксии на бронхиальное сопротивление [10]. Этот эффект согласуется с данными, полученными для дыхательных аппаратов замкнутого цикла предыдущего поколения ИДА-71 [11]. В то же время оценка индивидуальной реакции акустического параметра на погружение в сопоставлении с естественным внутрииндивидуальным разбросом позволила проследить особенности динамики вентиляционной функции легких каждого из водолазов, не выявляемые спирометрическими показателями.

Заключение. Обобщены модельные представления о шумообразовании при форсированном выдохе человека. Выявлены связи акустических характеристик форсированного выдоха с биомеханикой дыхательной системы. Выделены информативные акустические параметры шумов форсированного выдоха, пригодные для диагностики вентиляционной функции легких. Разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий регистрацию шумов и оценку предложенных параметров. Продемонстрировано, что контроль продолжительности трахеальных шумов ФВ в полосе частот 200 – 2000 Гц может быть использован в качестве простого, доступного и высокочувствительного инструментального средства для оценки вентиляционной функции легких и мониторинга воздействия экстремальных факторов, в том числе моделирования невесомости и водолазных погружений, на дыхательную систему человека.

Исследование выполнено при частичной поддержке НИР № гос. рег. АААА-А17-117030110041-5 по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг.

Литература

1. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Kulakov J.V., Kilin A.S., Avdeeva H.V., Pochekutova I.A. An acoustic model of noise production in the human bronchial tree under forced expiration // J. Sound Vibr. 1998. 213. No. 2. P. 377-382.
2. Коренбаум В.И., Дьяченко А.И., Почекутова И.А., Кирьянова Е.В., Шулагин Ю.А., Осипова А.А., Михайловская А.Н., Попова Ю.А., Костив А.Е., Шин С.Н. Анализ физических факторов, влияющих на продолжительность шумов форсированного выдоха, регистрируемых над трахеей // Труды ИОФАН. 2012. т. 68. С. 182-199.
3. Коренбаум В.И., Сафронова М.А., Маркина В.В., Почекутова И.А., Дьяченко А.И. Исследование механизмов формирования свистящих звуков форсированного выдоха здорового человека при дыхании газовыми смесями с раз-ной плотностью // Акустический журнал. 2013. т. 59. №. 2. С. 268–278.
4. Korenbaum V.I., Pochekutova I.A., Kostiv A.E., Tagiltsev A.A., Shubin S.B. Technology of human pulmonary function testing by means of tracheal forced expiratory noises analysis // IFMBE Proceedings. 2013. V. 39. P. 2192-2195.
5. Почекутова И.А., Коренбаум В.И. Продолжительность трахеального шума форсированного выдоха: от модели к нормированию // Физиология человека. 2007. т. 33. № 1. С. 70-77.
6. Малаева В.В., Почекутова И.А., Костив А.Е., Шин С.Н., Коренбаум В.И. Корреляция акустических характеристик трахеальных шумов форсированного выдоха и бодиплетизмографических/спирографических показателей вентиляционной функции у здоровых и больных с обструктивными заболеваниями легких // Физиология человека. 2017. т. 43. № 6. С. 63-70.
7. Pochekutova I.A., Korenbaum V.I. Hidden bronchial obstruction diagnostics by means of computer assessed tracheal forced expiratory noise time // Respirology. 2013. V.18. No. 3. C. 501-506.
8. Почекутова И.А., Коренбаум В.И., Малаева В.В. Дыхательные шумы форсированного выдоха человека в контексте функциональной диагностики дыхания // Ульяновский медико-биологический журнал. 2016. № S4, С. 61-62.
9. Малаева В.В., Коренбаум В.И., Почекутова И.А., Костив А.Е., Шин С.Н., Катунцев В.П., Баранов В.М. Акустическая оценка вентиляционной функции легких у человека при моделировании физиологических эффектов невесомости и лунной гравитации // Медицина экстремальных ситуаций. 2016. т. 55. № 1. С. 40-49.
10. Малаева В.В., Коренбаум В.И., Почекутова И.А., Катунцев В.П., Баранов В.М., Костив А.Е., Лисеенко М.В., Шин С.Н. Использование продолжительности трахеальных шумов форсированного выдоха для контроля вентиляционной функции легких человека в задачах специальной физиологии // Ульяновский медико-биологический журнал. 2016. № S4. С.42-43.
11. Почекутова И.А., Коренбаум В.И. Акустическая оценка влияния одиночного погружения в водолазном снаряжении закрытого типа на вентиляционную функцию легких // Физиология человека. 2011. т. 37. № 3. С. 76-82.

НОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА, ВЫЯВЛЯЕМЫЕ МЕТОДОМ СЖАТИЯ ИМПУЛЬСА

А.Д.Ширяев, канд.физ-мат.наук, В.И.Коренбаум, д-р техн.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

NEW FEATURES OF SOUND PROPAGATION IN HUMAN LUNGS, FOUND WITH SIGNAL COMPRESSION TECHNIQUE

A.D.Shiryaev, Ph.D., V.I.Korenbaum, Dr.Sc.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Распространение звуковых волн в столь сложной акустической среде как дыхательная система человека до сих пор недостаточно изучено. Применение с этой целью гидроакустической техники просветного зондирования сложными сигналами со сверткой излученного и принятого откликов позволило выявить неизвестные ранее акустические феномены, перспективные для создания альтернативной технологии высокоразрешающей визуализации легких.

The propagation of sound waves in such complex acoustic environment as a human respiratory system has not been sufficiently studied yet. Using for this purpose hydroacoustic techniques of transmission sounding by complex signals with convolution of the emitted and received responses makes it possible to identify previously unknown acoustic phenomena that are promising for the development of an alternative technology of high-resolution visualization of lungs.

В 1816 г. Рене Лаэннек изобрел метод аускультации легких с помощью стетоскопа, устанавливаемого на поверхности грудной клетки. Эта неинвазивная методика широко применяется во врачебной практике в течение почти 2 столетий. Однако технология носит субъективный характер и не соответствует требованиям современной доказательной медицины.

Интенсивные исследования по объективизации акустических феноменов дыхания ведутся с 70-х годов прошлого века [1]. Однако надежные диагностические методики все еще не созданы. В частности, до сих пор не достигнуты успехи в создании низкочастотной акустической визуализации или томографии легких [2]. Одна из основных проблем – слабая изученность распространения звуков в дыхательной системе человека [3].

Нами предложен оригинальный метод [4] зондирования легких человека путем подачи сложных сигналов в рот и с поверхности грудной клетки и вычисления взаимно-ковариационной функции излученного и принятого на поверхности грудной клетки сигнала, известный в радио- и гидролокации как метод сжатия импульса. Исследования, выполненные данным методом для полос частот 80-1000 Гц [5, 6] и 10-19 кГц [7], позволили экспериментально выявить наличие нескольких путей проведения звуковых колебаний на поверхность грудной клетки, отличающихся скоростью распространения.

Целью работы является более углубленное изучение характеристик распространения звука через легкие человека *in vivo* в диапазонах частот 80-1000 Гц и 10-19 кГц при трансмиссионном зондировании с помощью метода сжатия импульса.

Установка для трансмиссионного зондирования легких человека оснащена комплектом устанавливаемых на поверхности грудной клетки однокомпонентных акселерометрических датчиков, способных работать сразу в обоих исследуемых частотных диапазонах, и 3-х компонентным акселерометрическим датчиком для диапазона частот 80-1000 Гц. Регистрация сигналов от датчиков осуществлялась 16-канальным самописцем Powerlab (ADInstruments). Линейно частотно-модулированные (ЛЧМ) и фазоманипулированные сложные сигналы излучались в дыхательную систему человека динамиком, оснащенным трубкой с сменным одноразовым фильтром или компактным вибростендом (Brüel & Kjær).

По принятым сигналам рассчитываются огибающие Гильберта взвешенной ковариационной функции Тху, обычно называемые свертками зондирующего и принятого сигналов. Примеры сверток показаны на рис. 1, 2. Каждый пик свертки в соответствие с радио- и гидролокационными и соображениями и нашим опытом [4-7] трактуется как отдельный приход сигнала, имеющий свою определенную временную задержку. Каждый приход сигнала помечен красной меткой (рис. 1, 2). Скорость звука для каждого прихода рассчитана по прямо измеренному пелвиметром расстоянию между позицией вибростенда (или 2-го трахеального акселерометрического датчика при зондирования через рот) и позицией конкретного приемного датчика, отнесенному к временной задержке. Рассчитанные значения скорости звука проставлены черными цифрами над пиками диаграмм (рис 1, 2).

Модельные представления о распространении звука диапазона частот 80-1000 Гц. Исследуемый акустический тракт ограничен поверхностью грудной клетки (около 30 см в диаметре). Внутренняя часть грудной клетки заполнена легочной паренхимой, представляющей из себя смесь микро пузырьков воздуха и водоподобной ткани. Скорость звука для продольной

волны частотой ниже 1 кГц в такой среде определяется сжимаемостью воздуха в пузырьках и плотностью тканей (близкой к воде). В результате, скорость звука в паренхиме легких имеет низкое значение около 30 м/с, что на частотах 100-300 Гц (диапазон наиболее интенсивной проведения) дает длину продольной звуковой волны 30-10 см, при этом волновой размер исследуемой области составляет (1-3)λ.

Паренхима легких отделена от внешней среды стенкой грудной клетки, образованной мягкими тканями с низким модулем сдвига. Скорость продольных звуковых волн в стенке грудной клетки близка к скорости звука в воде. Так как толщина стенки грудной клетки составляет 2-3 см (волновой размер λ/1000), в волновом смысле она может быть представлена тонким слоем, лежащим на акустически мягкой границе. Основными акустическими особенностями паренхимы легких являются высокое затухание, которое позволяет пренебречь отраженными и переотраженными звуковыми волнами, и очень низкий модуль сдвига, который не допускает существования поперечных и сдвиговых волн.

Таким образом, мы приходим к приближенной акустической модели, представляющей источник (чаще точечный), который излучает в неограниченную среду. Однако измерения акустических характеристик источника обычно приходится выполнять в его ближней волновой зоне. При этом акустические датчики имеют, по крайней мере, в диапазоне частот ниже 1 кГц небольшие волновые размеры, что позволяет предположить, что падающая на них звуковая волна представляет из себя локально плоскую.

Исследование проведения звука в диапазоне частот 80-1000 Гц 3-х компонентным акселерометрическим датчиком. При зондировании с использованием 3-компонентного акселерометрического датчика установлено преимущественное проведение к поверхности грудной клетки через паренхиму легких продольных, а не сдвиговых волн со скоростями от 100 (рот) до 15 м/с (рис. 1, см. вклейку).

При зондировании через рот (рис. 1) для первых 2-3 приходов зондирующего сигнала выявлена значимая разница эффективных углов падения фронта продольной волны зондирующего сигнала на поверхность грудной клетки, подтверждающая ранее сформулированные представления о разных механизмах проведения звука из просвета бронхиального дерева на стенку грудной клетки [4-6]. При зондировании вибростендом из надключичной области наблюдаются 1-2 более низкоскоростных прихода (от 50 м/с), а угловая разница между ними, как правило, меньше. Это наблюдение может быть интерпретировано как присутствие одного точечного источника излучения, в контрасте со случаем зондирования через рот.

Иногда наблюдаются слабые по амплитуде особо низкоскоростные приходы (менее 5 м/с), которые можно трактовать как сдвиговые волны, распространяющиеся по поверхности грудной клетки.

Исследование проведения звука в диапазоне частот 10-19 кГц. Не так давно был выявлен неожиданный феномен распространения звука в частотном диапазоне 10-40 кГц через легкие человека со скоростью около 1000 м/с [8]. В дальнейшем в пилотном эксперименте, с использованием техники сжатия импульса, нами обнаружены низко- и высоко-скоростные компоненты распространения звука в диапазоне частот 10-19 кГц [7]. В данной работе представлены результаты более детального исследование характеристик распространения звука в легких человека в диапазоне частот 10-19 кГц на оппозитных трассах.

Зондирование грудной клетки осуществлялось при двух дыхательных маневрах: задержках дыхания при максимально глубоком вдохе (HF2) и максимально полном выдохе (HF3) на выборке из 4 добровольцев, давших информированное согласие на участие в эксперименте.

Огибающие Гилберта от взвешенной ковариационной функции T_{xy} (свертки зондирующего и принятого сигналов) показаны на диаграмме (рис. 2, см. вклейку), которая выполнена в логарифмическом масштабе, чтобы отобразить результаты, полученные и для глубокого вдоха (HF2) и полного выдоха (HF3).

Возможность разложения полученных сигналов на высокоскоростные и низкоскоростные приходы, выявленная ранее [7], подтверждена на этой независимой выборке обследуемых.

На оппозитных трассах излучатель – датчик установлено существование низкоскоростных приходов со скоростями распространения 50 – 150 м/с, амплитуда и/или скорость которых обратно зависят от степени воздухонаполнения легких при задержке дыхания на вдохе и выдохе, что позволяет трактовать эти приходы как результат распространения продольной звуковой волны преимущественно по паренхиме легких.

Напротив, амплитуды высокоскоростных приходов со скоростями 150 – 1000 м/с усиливаются при уменьшении воздухонаполнения легких при задержках дыхания на выдохе и потому могут быть связаны с распространением продольной волны в плотных тканях грудной клетки.

Выявлено 4 варианта соотношения амплитуд высокоскоростных и низкоскоростных приходов и их изменения в зависимости от степени воздухонаполнения легких.

Тип 1 – появление высокоскоростных приходов в выдохе (HF3) по сравнению с вдохом (HF2) без существенных изменений основных низкоскоростных приходов.

Тип 2 (рис. 2) – существенное увеличение амплитуд высокоскоростных приходов при выдохе (HF3) по сравнению с вдохом (HF2).

Тип 3 – резкое увеличение амплитуд высокоскоростных и низкоскоростных приходов при выдохе (HF3) по сравнению с вдохом (HF2).

Тип 4 – отсутствие какой-либо динамики амплитуды или скорости высокоскоростных и низкоскоростных приходов между выдохом (HF3) и вдохом (HF2).

Один из этих типов (тип 4), характеризующийся преобладанием амплитуд высокоскоростных приходов и на вдохе, и на выдохе, может быть акустически интерпретирован как снижение воздухонаполнения и вентиляции легочной ткани, и встречается только у одного немолодого больного с длительным течением гормонозависимой бронхиальной астмы, а не у 3-х других молодых здоровых лиц. Обнаруженные низкоскоростные приходы имеют скорость звука в пределах 50 – 150 м / с, что для средней частоты 15 кГц исследуемого диапазона дает длины волн от 0,33 до 1 см. Столь небольшие длины волн могут обеспечить пространственное разрешение в паренхиме легких порядка первых единиц сантиметров! Таким образом, выявленный феномен низкоскоростного распространения звука в легких в диапазоне 10-19 кГц представляется очень перспективным для обеспечения акустической визуализации с высоким разрешением или даже томографии легочной паренхимы.

Модельные обобщения. Возникает вопрос, какой механизм может быть рассмотрен для теоретической модели распространения продольных звуковых волн в диапазонах частот 80-1000 Гц и 10-19 кГц? Если применить известную формулу Минаерта (1933) для водоподобной среды с пузырьками, то резонансная частота пузырьков воздуха в воде $f = 3{,}26 / r$. При радиусе альвеол r = 0,1 - 0,15 мм, получаем резонансную частоту f = 22-33 кГц. Таким образом, и низкочастотный 80-1000 Гц, и высокочастотный 10-19 кГц диапазоны проведения звука в легких лежат ниже фундаментального резонанса альвеол. Следовательно, в обоих частотных диапазонах скорость звука должна определяться податливостью воздуха в альвеолах и плотностью тканей стенки альвеол. Таким образом, в обоих частотных диапазонах скорости звука через нормально заполненную воздухом паренхиму легких должны быть достаточно близки. Последнее, действительно, наблюдается по результатам приведенных измерений для низкоскоростных приходов со скоростями 50 – 150 м/с в частотном диапазоне 10-19 кГц, а также для низкоскоростных приходов со скоростями 20 – 50 м/с в диапазоне частот 80-1000 Гц. Последние значения, кстати, хорошо согласуются с независимыми результатами [4-6].

Однако в этом случае возникает вопрос, почему в паренхиме легких не распространяется звук в полосе частот 1-10 кГц [8], находящейся между диапазонами 80-1000 Гц и 10-19 кГц, где распространение звука доказано?

Полученные результаты существенно дополняют феноменологию распространения звука в легких человека и кажутся многообещающими в плане достижения высокоразрешающей акустической визуализации легочной паренхимы.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 16-08-00075-а.

Литература

1. Дьяченко А.И., Михайловская А.Н. Респираторная акустика (обзор) // Труды ИОФАН. 2012. Т.68, С.136-181.
2. Peng Y., Dai Z., Mansy H., Sandler R., Balk A., Royston T. Sound transmission in the chest under surface excitation: an experimental and computational study with diagnostic applications // Medical & biological engineering & computing. 2014. V.52, No.8. P.695-706.
3. Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A., Kulakov Ju.V. Conduction of human vocal sounds to the chest wall // Acoustical Physics. 1998. V.44, No.3. P.322-331.
4. Korenbaum V., Nuzhdenko A., Tagiltsev A., Kostiv A. Investigation into transmission of complex sound signals in the human respiratory system // Acoustical physics. 2010. V.56, No. 4. P.568–575.
5. Korenbaum V.I., D'yachenko A.I., Nuzhdenko A.V., Lopatkin N.S., Tagiltsev A.A., Kostiv A.E. Transmission of complex sound signals in the human respiratory system as a function of sound velocity in the utilized gas mixture // Acoustical Physics. 2011. V.57, No.6. P.872-879.
6. Korenbaum V., Shiriaev A. Sound propagation through human lungs, under transmission sounding with acoustic signal of 80-1000 Hz frequency band // Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA). 2015. V.23, No.1. 020002.
7. Korenbaum V., Shiryaev A., Tagiltsev A., Kamenev S. Features of 10-19 kHz sound propagation through human lungs // In 26-th Congress of the European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology. 2014. P.66.
8. Rueter D., Hauber H., Droeman D., Zabel P., Uhlig S. Low-frequency ultrasound permeates the human thorax and lung: a novel approach to non-invasive monitoring // Ultraschall in der Medizin-European Journal of Ultrasound. 2010. V.31, No.1. P.53–62.

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЛЕГКОВОДОЛАЗНОГО ДЫХАТЕЛЬНОГО СНАРЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

А.Е.Костив, канд.техн.наук, В.И.Коренбаум, д-р техн.наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

ACOUSTIC EFFECTS OF DIVING EQUIPMENT OF VARIOUS TYPES

A.E.Kostiv, Ph.D, V.I.Korenbaum, Dr.Sc.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Контроль состояния легководолазов необходим для обеспечения их безопасности. С этой целью могут быть использованы собственные дыхательные шумы, регистрируемые под водолазным костюмом. Легководолазные дыхательные аппараты известных типов характеризуются различными акустическими эффектами. Шумы водолазов в дыхательных аппаратах открытого цикла (аквалангах) отличаются мощными широкополосными сигналами на выдохе и высокочастотными узкополосными сигналами на вдохе. Исследованные образцы дыхательных аппаратов замкнутого цикла, помимо широкополосных шумов, излучают щелчки и/или узкополосные свистящие звуки.

Monitoring health status of divers is necessary to ensure their safety. For this purpose, one can use their own breathing noises, registered under a suit. Diving apparatus are characterized by various acoustic effects. Noises of divers in open-circuit breathing apparatus are distinguished by powerful broadband signals on exhalation and high-frequency narrow-band signals on inspiration. The investigated samples of closed-circuit breathing apparatus, in addition to broadband noise, radiate clicks and/or narrow-band sounds.

Для косвенной оценки физиологического состояния пловца и обеспечения безопасности погружений водолазное снаряжение оснащается измерительными приборами: часами и глубиномером для определения времени нахождения на глубине, манометром для измерения давления в баллоне с целью оценки запасов дыхательной смеси. Все данные с измерительных приборов пловец может оценивать, руководствуясь своими знаниями и опытом. Альтернативой, является использование аналитического прибора – декомпрессионного компьютера. Он обрабатывает данные и позволяет контролировать состояние пловца (например, такой параметр как уровень насыщения организма азотом), а также помогает пловцу принять решение о необходимости декомпрессии, изменении периода между погружениями, прекращении погружения. В настоящей работе оценивается возможность анализа акустических шумов легководолазных дыхательных аппаратов для выделения из них параметров характеризующих физиологическое состояние пловца под водой.

Существует две основные схемы дыхания у водолазов. Открытая схема, когда воздух или газовая смесь находится в большом баллоне под давлением, и каждый вдох через регулятор давления подается пловцу, при этом выдох производится в воду (акваланг). Закрытая – когда выдох производится в дыхательный мешок через химический поглотитель углекислого газа, а вдох – из мешка (ребризер). По мере обеднения дыхательной смеси в мешке в него подается кислород из баллона. Водолазные дыхательные аппараты характеризуются различными акустическими эффектами.

При открытой схеме дыхания (акваланг) шумят всплывающие пузыри воздуха и регулятор давления. На рис. 1 (см. вклейку) представлена спектрограмма (верхний рисунок) и осциллограмма (нижний рисунок) шумов аппарата с открытой схемой дыхания (АВМ, АО «КАМПО»), записанных с помощью герметизированного диктофона, размещаемого под «мокрым» водолазным костюмом [1]. Высокоамплитудные низкочастотные (до 600 Гц) участки спектрограммы соответствуют выдохам в воду, узкополосные шумы на частотах свыше 1 кГц – работе регулятора давления на вдохе. Наличие выраженной периодичности шумов позволяет оценивать ритм дыхания водолаза в подводном положении. Выделяя разные частотные полосы для вдоха и для выдоха, можно определить продолжительность фаз вдоха и выдоха в дыхательном цикле [2].

По аналогии с дыхательным снаряжением открытой схемы выполнены записи и построены спектрограмма и осциллограмма дыхательных шумов водолаза с аппаратами закрытой схемы дыхания (ребризерами), приведенные на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 2 (см. вклейку) представлены шумы аппарата фирмы AquaLung. Синим прямоугольником выделены шумы вдоха, красным – выдоха.

Широкополосный шум вдоха и выдоха для этого аппарата лежит в полосе до 1 кГц. Шумы вдоха и выдоха можно различить на слух. После паузы вдоха в начале выдоха на осциллограмме виден импульсный сигнал, на слух идентифицируемый как хлопок. Этот высокоамплитудный, кратковременный сигнал в полосе 6 – 2000 Гц на спектрограмме «размывается» по времени. Белым кругом выделен узкополосный шум (свистящий звук) подачи кислорода из баллона в

конце вдоха. Для данного сигнала заметны гармоники на частотах 1400, 2800, 4200 Гц, продолжительностью 0,4 с. Продолжительности вдоха и выдоха у данного водолаза составляют порядка одной секунды.

Дыхательный мешок аппарата этого типа выполнен в виде гофрированного «меха». Патрон с химическим поглотителем углекислого газа находится рядом с мешком и при полном опорожнении мешка резиновая поверхность мешка прилегает к патрону, образуя диафрагму. Именно, ударные колебания (хлопки) этой диафрагмы предположительно являются основным источником щелчков [3].

На рис. 3 (см. вклейку) представлены шумы дыхательного аппарата фирмы Drager. Наиболее мощные шумы видны на выдохе и лежат в полосе частот 20 – 300 Гц. При этом наблюдаются устойчивые узкополосные сигналы (свисты) на частоте около 170 Гц. На вдохе фиксируется появление более высокочастотных компонент, выделенных белым кругом. Щелчков у дыхательного аппарата этого типа не наблюдается. Вероятно, это связано с тем, что патрон с химическим поглотителем углекислого газа и дыхательный мешок в этом аппарате разнесены конструктивно и соединяются между собой только воздуховодами.

Путем калибровки и пересчета установок усиления диктофона достигнута возможность сравнения шумов дыхательного снаряжения различных типов и одного и того же снаряжения в различных попытках.

В зависимости от режима работы и настройки дыхательного аппарата одного и того же типа разница в уровнях излучаемых им шумов может достигать примерно 20 дБ.

Измерены относительные уровни шумоизлучения аппаратов различного типа по наилучшим попыткам. При всей условности такого сравнения (дыхательными аппаратами пользуются разные пловцы, отличающиеся по опыту и физиологическим данным) межаппаратный разброс уровней шумов составил 5 – 15 дБ, причем знак разницы уровней шумов между аппаратами меняется в полосах частот 50 – 400 Гц и 400 – 1000 Гц.

Итак, суммируя полученные результаты, можно заключить, что в штатных режимах эксплуатации легководолазные дыхательные аппараты известных типов характеризуются различными акустическими эффектами. Шумы водолазов в дыхательных аппаратах открытого цикла (аквалангах) отличаются мощными широкополосными сигналами на выдохе и высокочастотными узкополосными сигналами на вдохе. Исследованные образцы дыхательных аппаратов замкнутого цикла (ребризеров), помимо широкополосных шумов, излучают щелчки и/или узкополосные свистящие звуки.

Таким образом, шумы легководолазных дыхательных аппаратов различных типов при регистрации под водолазным костюмом представляют ценный материал для выделения параметров, характеризующих физиологическое состояние пловца под водой.

Литература

1. Костив А.Е., Коренбаум В.И., Горовой С.В., Ширяев А.Д. Возможности контроля состояния водолазов под водой по дыхательным шумам // XV-я школа-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенная с XXIX сессией Российского акустического общества. Институт океанологии им. Ширшова РАН. 7-10 июня 2016 г. Москва. Изд-во «Геос». 2016. С. 321-324.
2. Костив А.Е., Коренбаум В.И. Способ контроля физиологических параметров дыхательной системы водолазов // Патент РФ 2625274. Заявл.: 19.09.2016. Опубл.: 12.07.2017, Бюл. № 20.
3. Gorovoy S., Korenbaum V., Borodin A., Tagiltcev A., Kostiv A., Shiryaev A., Pochekutova I. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water // Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA). 2016. 24, 070020.

НАНОДИСПЕРСНЫЙ ИНДИКАТОР СТОЛКНОВЕНИЯ МАССИВНОГО ТЕЛА С ПРЕПЯТСТВИЕМ

В.М.Полунин, д-р физ-мат.наук, П.А.Ряполов, канд.физ-мат.наук, Ю.В.Кобелев, Е.А.Соколов, Н.Э.Карпов
Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

NANODISPERSED INDICATOR OF COLLISION OF A MASSIVE BODY WITH OBSTACLE

V.M.Polunin, Dr.Sc., P.A.Ryapolov, Ph.D., Yu.V.Kobelev, E.A.Sokolov, N.E.Karpov
Southwestern State University, Kursk, Russia

В статье обсуждаются принцип работы установки по измерению силы удара на основе ферромагнитной жидкости, которая была создана на базе ЮЗГУ в лаборатории «Наномасштабной акустики».

The article discusses the principle of operation of the apparatus for measuring the impact force based on a ferromagnetic liquid, which was created on the basis of SWSU in the laboratory of "Nanoscale acoustics".

Довольно часто разнообразные индикаторы столкновения используются в технике для измерения силы или энергии. Например, они используются в строительной технике, сигнализации автомобилей или в военном вооружении.

На базе ЮЗГУ в лаборатории «Наномасштабной акустики» был создан нанодисперсный индикатор столкновения массивного тела с препятствием предназначен для дистанционного фиксирования факта столкновения, его амплитудно-временной зависимости, скорости относительного движения, демпфирования удара. Принципиальное устройство нанодисперсного индикатора изображено на рис.1.

Схема установки изображена на рис. 2. Она состоит из: 1 – мгнитная жидкость; 2 – трубка с донышком; 3 – катушка индуктивности; 4 – кольцевой магнит; 5 – пьезоэлемент; 6 – уплотнитель резиновый; 7 – пробка; 8 – уплотнительный винт; 9 – держатель магнита; 10, 11 – коаксиальные кабели для передачи сигналов с пьезо элемента и катушки индуктивности на осциллограф; 12 – опора кольцевого магнита; 13 – опора трубки; 14 – плита-основание.

Рис. 1. Внешний вид установки по измерению силы удара на основе ферромагнитной жидкости.

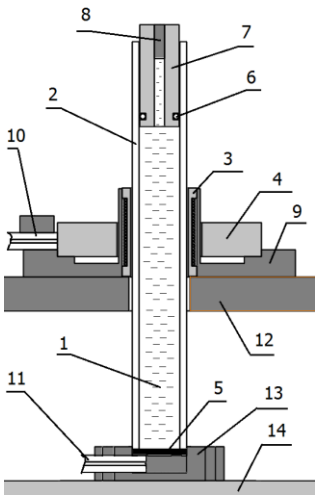


Рис. 2. Схема установки по измерению силы удара на основе ферромагнитной жидкости.

Принцип работы данной установки состоит в том, что в момент сообщения удара по пробке (7), происходит сжатие магнитной жидкости (1) в трубке с донышком (2), которое фиксируется при помощи катушки индуктивности (3) и пьезоэлементом (5). Все эти данные фиксируются осциллографом. Данные с осциллографа передаются на персональный компьютер для обработки результатов.

Получим выражение для оценки амплитуды АМЭ в поперечном к направлению распространения плоской звуковой волны в МЖ магнитном поле, содержащее зависимость от угла ϕ, образованного направлениями магнитного поля $\vec{H}$ и нормали $\vec{n}$ к поверхности проводящего контура. На рис. 3 показана схема задачи.

За основу возьмем модель, в которой рамка округлой формы вплотную прилегает к поверхности трубки. При статической деформации (трубка абсолютно жесткая) жидкостного столбика:

$$\delta B = \mu_0(\delta M - N\delta M) = \mu_0(1-N)\delta M \,, \tag{1}$$

где $\vec{B}$ - вектор магнитной индукции; μ_0 – магнитная постоянная; M - намагниченность; $N = 0,5$ - размагничивающий фактор. В силу постоянства нормальной составляющей индукции на границе магнетиков имеем:

$$\delta B_n^{(i)} = \delta B_n^{(e)} \,, \tag{2}$$

где $\delta B_n^{(e)}$ – нормальная составляющая приращения индукции на поверхности рамки.

$$\delta B_n^{(e)} = \delta B \cdot \cos\theta = \mu_0(1-N)\cdot\delta M\cdot\cos\theta \,, \tag{3}$$

где θ – угол между направлениями магнитного поля и луча, ограничивающего рамку.

Рис. 3. Схема задачи.

Приращение магнитного потока через полоску шириной dL:

$$\delta\Phi = N_B \cdot h \cdot dL \cdot \delta B_n^{(e)} = N_B \cdot h \cdot dL \cdot \mu_0 \cdot (1-N)\cdot\delta M\cdot\cos\theta \,, \tag{4}$$

где L - длина рамки, h - ее высота ($h << \lambda$), N_B - число витков.

С другой стороны,

$$d\theta = \frac{2dL}{D} \,, \tag{5}$$

где D - диаметр трубки.

Тогда:

$$\delta\Phi = \mu_0(1-N)N_B\frac{D}{2}h\cdot\delta M\cdot\cos\theta\cdot d\theta \,. \tag{6}$$

Магнитный поток, пронизывающий контур рамки:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = \mu_0(1-N)N_B\frac{D}{2}h\cdot\delta M\left[\int_0^{\theta_1}\cos\theta\cdot d\theta + \int_0^{\theta_2}\cos\theta\cdot d\theta\right]. \tag{7}$$

В данном случае $\phi = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}$, поэтому

$$\Delta\Phi = \mu_0(1-N)N_B\cdot\frac{D}{2}h\cdot\delta M\left[\int_0^{\frac{L}{D}-\phi}\cos\theta\cdot d\theta + \int_0^{\frac{L}{D}+\phi}\cos\theta\cdot d\theta\right], \tag{8}$$

$$\Delta\Phi = \mu_0(1-N)N_B\cdot D\cdot h\cdot\delta M\cdot\sin\frac{L}{D}\cdot\cos\phi \tag{9}$$

Амплитуда ЭДС, индуцируемая в контуре:

$$\varepsilon = -\frac{d(\Delta\Phi)}{dt} = -\mu_0(1-N)N_B\cdot D\cdot h\cdot\delta\dot{M}\cdot\sin\frac{L}{D}\cdot\cos\phi \,. \tag{10}$$

При $L < D$ получим:

$$\varepsilon = -\mu_0(1-N)N_B L\cdot h\cdot\delta\dot{M}\cdot\cos\phi \,. \tag{11}$$

Если $\lambda < D$, то необходимо заменить N на N_∂ - динамический размагничивающий фактор.

Если возмущение размагничивающего поля отсутствует, то равновесное значение намагниченности жидкости можно выразить с помощью формулы

$$M_e = M_0 + M_n \cdot \delta n + M_T \cdot \delta T \,. \tag{12}$$

Уравнения сохранения энергии и непрерывности позволяют записать:

$$\delta T = qTc^2 C_p^{-1} \rho^{-1} \cdot \delta\rho \,; \tag{13}$$

$$\frac{\delta n}{n} = -\frac{\partial u}{\partial x} \,, \tag{14}$$

где $q \equiv -\rho^{-1}\frac{\partial \rho}{\partial T}$ – температурный коэффициент расширения; ρ – плотность жидкости; c – скорость распространения звука в МЖ в отсутствие магнитного поля; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении и постоянной напряженности магнитного поля; u – смещение частиц из положения равновесия.

Решая систему уравнений (1.26), (2.1)–(2.3) и обозначая $\gamma_* \equiv qTc^2 C_p^{-1}$, получим следующее выражение:

$$\frac{\delta M}{M_0} = -\left[\left(n\frac{M_n}{M_0} + \gamma_*\frac{M_T}{M_0} + \omega^2\tau^2\right)\left(1+\omega^2\tau^2\right)^{-1} + i\omega\tau\left(1 - n\frac{M_n}{M_0} - \gamma_*\frac{M_T}{M_0}\right)\times\left(1+\omega^2\tau^2\right)^{-1}\right]\frac{\partial u}{\partial x} \,. \tag{15}$$

При условии линейности зависимости $M(n)$, т.е. при $M = C \cdot n$, где $C = const$, реальную часть δM можно представить в виде

$$\delta M = -[M_0 + \gamma_* M_T\left(1+\omega^2\tau^2\right)^{-1}]\frac{\partial u}{\partial x} \,. \tag{16}$$

Второй член в квадратных скобках этого выражения вследствие колебаний температуры в адиабатной звуковой волне носит релаксационный характер.

В области высоких частот ($\omega\tau >> 1$) из (16) находим

$$\left(\frac{\Delta M}{M_0}\right)_\infty = -\frac{\partial u}{\partial x} \,, \tag{17}$$

При $\omega\tau << 1$

$$\left(\frac{\Delta M}{M_0}\right)_0 = -\left(n\frac{M_n}{M_0} + \gamma_*\frac{M_T}{M_0}\right)\frac{\partial u}{\partial x} \,. \tag{18}$$

$$\frac{2\pi}{T}\cdot\frac{2h}{c} = \frac{4\pi h}{cT} = \frac{\tau^*}{T} \,;\ \tau^* \equiv 4\pi h / c \approx 10^{-3} c \,; \tag{19}$$

$$\tau^*/T << 1 \,;\ \ \tau^*/T >> 1 \,, \tag{20}$$

где h- длина столбика магнитной жидкости; Т-длительность столкновения.

Нелинейные свойства среды характеризуются параметром нелинейности Γ_n. Для вычисления параметра нелинейности Γ_n могут быть использованы данные по зависимости скорости звука от давления :

$$\Gamma_n = \left(\rho^2\frac{\partial^2 p}{\partial\rho^2}\right)_0 \Big/ \left(\rho\frac{\partial p}{\partial\rho}\right)_0 = \rho_0\left(\frac{\partial^2 p}{\partial\rho^2}\right)_0 \Big/ \left(\frac{\partial p}{\partial\rho}\right)_0 \,. \tag{21}$$

При T=const следует:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial P}\right)_T = \frac{c}{c_1}\left(\frac{\partial c_1}{\partial p}\right)_T + \frac{c^3}{\rho_1 c_1^4}\left\{\left[1 - \frac{\rho_2}{2\rho_1} + \frac{\alpha}{2} - \varphi - \alpha\varphi + \frac{\rho_2}{\rho_1}\varphi(1+\alpha)\right](1-\varphi) + \frac{\rho_2}{\rho_1}[1 - \varphi - \alpha\varphi]\right\}\varphi \,. \tag{22}$$

Воспользовавшись численными значениями c_1=1318 м/с, ρ_1=791 кг/м^3, ρ_2=5210 кг/м^3, α=1,75, получаем:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial p}\right)_T = \frac{c}{1318}\left(\frac{\partial c_1}{\partial p}\right)_T + 42\cdot 10^{-17} c^3\left(1,37\varphi + 5,95\varphi^2 - 9,79\varphi^3\right). \quad (23)$$

Вклад 2-го члена в правой части выражения (23) составляет 0,2% при φ=0,72% и монотонно возрастает, достигая ~ 5% при φ=16,6%, $\frac{\partial c_1}{\partial p}$=0,5·10^{-5} м/(с·Па).

Таким образом, данный метод измерения силы удара позволит производить измерения в большом диапазоне, так как свойства магнитной жидкости позволяют ей сжиматься как при малых, так и при больших нагрузках.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ. Код проекта 3.2751.2017/ПЧ.

Литература

1. Polunin V.M.,Boev M.L., Myo Min Than, Ryapolov P.A. Experimental study of an air cavity held by levitation forces // Magnetohydrodynamics. 2012. V. 48, № 3, pp. 557-566.
2. PoluninV.M., BoevM.L., KarpovaG.V., MyoMinThan. Elastic Properties of a Magnetic Fluid with an Air Cavity Retained by Levitation Forces // Acoustical Physics. 2013. Vol. 59.№1. P.56–61.
3. Емельянов С.Г., Полунин В.М., Кобелев Н.С., Ряполов П.А., Шабанова И.А. Пат. 101818 Российская Федерация, МПК G01 F 11/00. Дозатор газа [Текст] /; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. № 2010119759/28; заявл. 17.05.2010. опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3. 6 с. ил.
4. Boev M.L., Polunin V.M., Ryapolov P.A., Karpova G.V., Prokhorov P.A. Oscillations of a Bubble Separated from an Air Cavity under Compression Caused byMagnetic Field in a Magnetic Fluid // Acoustical Physics. 2014, Vol. 60, №. 1, pp. 29–33.
5. PoluninV. M., StorozhenkoA.M., ShabanovaI.A.,[etal.] Effect of magnetic field perturbation in Magnetic Fluid with Pulsating Bubbles //Magnetohdrodynamics. 2014. V. 50. №4, pp. 431-441.

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ С НАКЛАДКОЙ

Э.В.Ермолаев, В.И.Махов[1], канд.техн.наук
АО «Концерн» Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

VIBRATION ANALYSIS OF THE PIEZOCERAMIC ROD WITH COVER

E.V.Ermolaev, V.I.Machov[1], Ph.D.
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia
[1]Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia

В работе с использованием компьютерного моделирования анализируется форма колебаний системы в виде двухсекционного стержня. Сопоставлены результаты аналитического расчёта и моделирования.

In the work mode shape of a two-piece rod is analyzed with the use of computer simulation. Results of analytical calculation and simulation are compared.

Для расчёта механических колебательных систем в виде пьезоэлементов (или пьезоэлементов, скреплённых с материалами, не обладающими пьезоэффектом) простых геометрических форм можно использовать аналитические выражения, полученные в одномерном приближении [1-3]. Но это возможно, если один из размеров колебательной системы значительно превышает другие размеры. Тогда находится резонансная частота, соответствующая этому наибольшему размеру, определяется добротность и строится частотная характеристика колебательной системы. Однако, если размеры колебательной системы близки между собой, то формулы одномерного приближения не справедливы.

Кроме того, механические колебательные системы гидроакустических преобразователей могут иметь элементы армирования для увеличения динамической прочности, элементы крепления к корпусу, внутренняя полость может быть заполнена кремнийорганической жидкостью для компенсации внешнего гидростатического давления, часть поверхности экранирована. Все эти факторы влияют на частотную характеристику, но учесть их с помощью аналитических выражений затруднительно. В таких случаях применимы приближённые численные методы, например, метод конечных элементов и реализующие их компьютерные программы (ABAQUS, ANSYS, COSMOS и др.).

В работе сопоставлены результаты расчётов колебательной системы в виде используемого в гидролокационных системах двухсекционного стержня с применением известных математических формул и компьютерного моделирования с применением программы ANSYS.

В качестве модели колебательной системы взят пьезокерамический стержень, круглого поперечного сечения, один торец которого свободен, а другой жёстко скреплён с круглой титановой пластинкой (рис.1).

При расчёте частоты продольного резонанса колебательной системы использовалось резонансное уравнение:

$$(\rho cS)_2 tgk_2 l_2 + (\rho cS)_1 tgk_1 l_1 = 0,$$

где индекс 1 относится к пьезокерамике, 2 – к титановой пластине.
Задаваемые параметры материалов: $\rho_1 = 7000$ кг/м^3, $\rho_2 = 4500$ кг/м^3 - плотность, $C_1 = 3000$ м/с, $C_2 = 5250$м/с - скорость звука, S_1 и S_2 - площади поперечного сечения пьезокерамической части и накладки, соответственно.

Диаметр пьезостержня d = 50 мм, диаметр накладки D принимался равным 60 мм и 70 мм, толщина накладки $\ell_2 = 14, 20, 26$ мм. При расчётах и моделировании изменялась длина пьезокерамической части ℓ_1 от 50 до 90 мм, то есть продольный и радиальный размеры колебательной системы существенной разницы не имели.

На рис. 2 приведен график зависимости рассчитанной резонансной частоты стержня от длины пьезокерамической части ℓ_1 для случая D = 60 мм, ℓ_2 = 14 мм (сплошная линия) и $\ell_2 = 20$ *мм* (пунктирная линия).

Крестиками приведены результаты, полученные при моделировании (для ℓ_2=14 мм, ℓ_1 = 50, 60, 70, 80 мм). При ℓ_1=50 мм различие результата аналитического расчёта частоты от полученного путём моделирования составляет 660 Гц (менее 3%), в остальных случаях результаты расчёта и моделирования практически совпадают.

Частотная характеристика электрической проводимости пьезостержня при ℓ_1=50 мм, ℓ_2=14 мм, D = 60 мм приведена на рис.3.

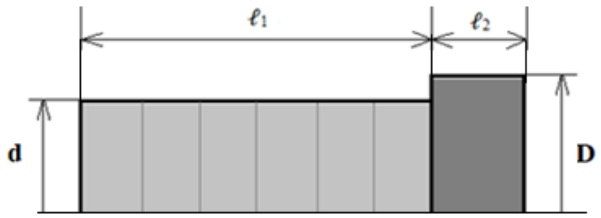


Рис. 1. Модель колебательной системы.

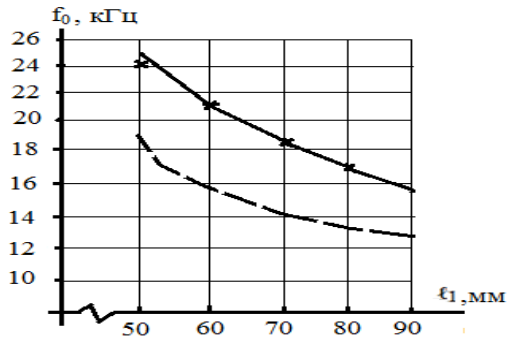


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты f_0 колебательной системы от длины пьезокерамической части ℓ_1.

В области частот 20 – 40 кГц имеется один резонанс на частоте $f_0 = 24200$Гц, соответствующий продольным колебаниям стержня.

Распределение амплитуд колебаний участков стержня на частоте резонанса приведено на рис. 4а,б (см. вклейку), где различные оттенки участков стержня соответствуют амплитудам их смещения в осевом направлении. При возбуждающем напряжении пьезокерамической секции 1В максимальная амплитуда участков стежня мала и не превышает 1 микрона (1000 нанометров). Значения амплитуд смещений приведены на рисунках в нанометрах.

Минимальная амплитуда создаётся в области узлового сечения, причём эта область занимает около 10 % от всей пьезокерамической части. Наибольшые амплитуды смещений создаются на торцах стержня. Всё это близко к теории колебаний стержней.

Из рис. 4 а, б видно, что полосы равной амплитуды смещений не параллельны, то есть фронт волны, распространяющейся вдоль оси стержня, отличается от плоского. Это особенно заметно в области торца пьезокерамической части и связано, по-видимому, с наличием не только продольных, но и радиальных колебаний.

Распределение амплитуд колебаний практически сохраняется при толщинах накладки 20 и 26 мм. Изгиба накладки нет, однако при толщине накладки 14 мм амплитуда колебаний центральной части накладки вблизи торца на 15% больше, чем в остальном объёме.

Известно, что изгиб накладки, то есть колебания её, отличающиеся от колебаний поршня, приводит к уменьшению активной составляющей сопротивления излучения и, соответственно, уменьшению эффективности излучения. Однако, для увеличения широкополосности иногда специально используют изгибные колебания накладки, включая собственную частоту $f_н$ колебаний накладки в рабочий диапазон. Это приводит к возрастанию активной составляющей сопротивления излучения на частоте $f_н$ и наличию двух резонансов в частотной характеристике: основного резонанса продольных колебаний стержня и резонанса изгибных колебаний накладки [4], которые при их сближении обеспечивают широкополосность.

Наличие или отсутствие изгиба круглой накладки зависит от волнового размера её толщины и соотношения диаметров пьезокерамической части и накладки, причём второй фактор влияет сильнее. Критерием появления изгиба накладки может быть соотношение $(\ell/\lambda)_н \cdot (d^2/D^2) < c$, где c – некоторая константа.

В данной моделе изгибная форма колебаний накладки появляется при увеличении её диаметра до 70 мм. Частотная характеристика проводимости в этом случае имеет два максимума (рис. 5).

Распределение амплитуд колебаний участков стержня на частотах f_1 и f_2 приведено на рис. 6а,б (см. вклейку).

Из рис. 6 видно, что колебания стержня имеют сложный характер: накладка изогнута, причём на частоте резонанса накладки f_2 её края колеблются в противофазе с центральной частью, на поверхности накладки имеется узловая окружность. На частоте f_1 основного резонанса стержня область узлового сечения (с амплитудой колебаний 0,14 мкм) находится примерно в середине стержня, а на частоте f_2 резонанса накладки эта область (с амплитудой 0,23 мкм) несколько расширяется и смещается к свободному торцу пьезокерамической части стержня.

На рис. 7 (см. вклейку) приведены распределения амплитуд колебаний по объёму стержня для случая, когда толщина накладки равна 14 мм, диаметр накладки 70 мм, при колебаниях на частоте 21400 Гц (а) и на частоте 28000 Гц (б).

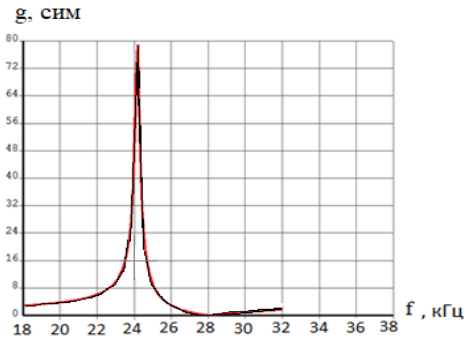


Рис. 3. Частотная характеристика электрической проводимости пьезостержня при ℓ_1 = 50мм, ℓ_2 = 14мм, D = 60 мм.

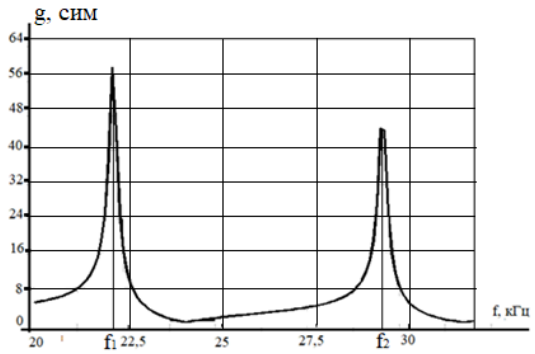


Рис. 5. Частотная характеристика проводимости колебательной системы при толщине накладки 14 мм, диаметре накладки 70 мм. Частоты резонанса f_1=22200 Гц и f_2=29500 Гц.

Из рис. 7 видно, что имеются радиальные смещения, увеличивающиеся на торцах стержня, имеется изгиб накладки наиболее заметный на частоте резонанса накладки.

Таким образом, моделирование колебательной системы позволяет более полно представить сложный характер колебаний, сочетающий продольную и радиальную форму колебаний стержня, изгиб накладки. Это возможно благодаря визуализации амплитуд смещений участков колебательной системы.

Литература

1. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л. Судостроение, 1988.
2. Орлов Л.В., Шабров А.А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота, Л. Судостроение, 1987.
3. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник. Под редакцией В.В.Богородского. 1983.
4. Стырикович И.И., Огрызко Я.А. Стержневые широкополосные преобразователи гидроакустических комплексов и систем морского подводного оружия. Подводное морское оружие, № 14, 2009.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ ОБСТАНОВКИ

П.Н.Волгин, д-р воен.наук, В.В. Попович, д-р техн.наук
АО «СПИИРАН-Научно-техническое бюро высоких технологий», г. Санкт-Петербург, Россия

SIMULATION MODELLING OF MARINE ENVIRONMENT MONITORING PROCESS

Volgin P, Prof., Popovich V, Prof.
SPIIRAS Hi Tech Research and Development Office Ltd., St.Petersburg, Russia

Эффективное управление различными видами деятельности на море неразрывно связано с необходимостью реализации процесса мониторинга морской обстановки для чего создаются, совершенствуются и функционируют соответствующие системы мониторинга морской обстановки. При этом возникает проблема принятия обоснованных решений как на этапах создания и совершенствования систем мониторинга морской обстановки, так и в ходе их функционирования. Важную роль для повышения обоснованности, эффективности принимаемых решений при организации и функционировании систем мониторинга и контроля морской деятельности играют методы имитационного моделирования, использующие возможности современных информационных технологий.

Effective management of different kinds of sea activities is inseparably connected to necessity of realization of maritime monitoring process. To accomplish that, the corresponding maritime monitoring systems are created, improved and utilized. The problem of informed decision making appear both on stages of maritime monitoring systems creation and improvement and during their functioning. Simulation modelling methods, which use advantages of morden IT-technologies, play important role in improvement of validity and efficiency of decision-making during organization and functioning of monitoring systems and maritime activities control.

Объективный рост и глобализация различных видов деятельности на море, управление различными видами морской деятельности, например, такими как безопасность судоходства, рыбный промысел, добыча полезных ископаемых, контроля транспортных потоков, изучение гидрофизических явлений, предотвращение и ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций; военно-морская деятельность требует соответствующего информационного обеспечения.

Важную роль в реализации и управлении процессами мониторинга морской обстановки играют соответствующие системы мониторинга морской обстановки. Процессы, реализуемые сложными пространственно-распределенными динамическими системами, к которым относятся системы мониторинга и контроля морской обстановки и морской деятельности, носят сложный, динамичный, как правило, случайный и масштабный характер. При этом важнейшими особенностями характерными для условий принятия решений в сфере управления морской деятельностью является острый дефицит времени, необходимость тесного взаимодействия с другими информационными системами, а, зачастую, и наличие активной противоборствующей (конкурирующей) стороны[1]. Это требует использования при решении задач управления, в ходе различных этапов жизненного цикла системы мониторинга морской обстановки, объективных методов обоснования принимаемых решений.

Объективные методы обоснования принимаемых решений. Применение существующих методов объективной оценки для обоснования решений, планов и управления процессом их реализации способно значительно повысить эффективность и качество функционирования организационно-технических систем[2]. В современных условиях в качестве одного из основных методов исследования закономерностей процессов морской деятельности и управления ими широкое распространение получило математическое моделирование.

Математическая модель есть некоторый объект, с помощью которого можно производить эксперименты для выявления необходимых закономерностей исследуемых процессов или функционирования систем, реализующих какой-либо процесс. Модель никогда не является копией исследуемой системы. Модель создается тогда, когда процесс, систему по каким-либо причинам невозможно исследовать непосредственно. Поэтому моделям должны быть присущи два свойства: они должны отличаться от исследуемых процессов, систем в такой степени, при которой возможно их изучение и должны быть сходны с исследуемыми процессами, системами в такой степени, чтобы не искажались исследуемые закономерности[2]. Применение математического моделирования, в качестве методов объективной оценки для обоснования принимаемых решений, в сочетании со стремительно развивающимися информационными технологиями, открывает новые возможности в исследовании сложных, высоко динамичных, пространственно распределенных систем. Одной из них является возможность по оперативному принятию решений на основе пространственного анализа данных с использованием геоинформационной системы (ГИС) и интеграции результатов математического моделирования процессов мониторинга в подводной, надводной и воздушной среде [3].

Реальные процессы и системы, как правило, исследуют с помощью двух типов математических моделей: аналитических и имитационных. В аналитических моделях поведение реальных процессов и систем задается в виде явных функциональных зависимостей. Однако получить эти зависимости удается только для сравнительно простых реальных процессов и систем. Когда явления сложны, многообразны, динамичны, исследователю приходится идти на их упрощенные представления. Именно поэтому для исследования и выявления закономерностей присущих процессу мониторинга и контроля обстановки и деятельности на море прибегают к использованию имитационного моделирования.

Особенности применение метода имитационного моделирования процесса мониторинга морской обстановки

Системы мониторинга морской обстановки относятся к сложным пространственно-распределенным динамическим системам. Важнейшими особенностями, характерными для условий принятия решения, и, прежде всего, в сфере мониторинга морской обстановки, являются: острый дефицит времени, необходимость обработки значительных объемов разнородной информации, значительный пространственный характер, тесное взаимодействия с другими информационными системами, наличие активной конкурирующей стороны, изменение условий для реализации процесса мониторинга морской обстановки.

Применение для описания подобных процессов и систем только аналитических методов не позволяет обеспечить достижение требуемых целей моделирования. Методы имитационного моделирования обладают в этом случае рядом неоспоримых достоинств:

– возможностью описания поведения компонентов (элементов) сложных процессов или систем на высоком уровне детализации;

– отсутствием ограничений между параметрами имитационной модели и состоянием внешней среды реальных процессов и систем;

– простотой реализации функции пространственно-временной интерпретации реального процесса;

– возможностью адаптации имитационных моделей к новым целям, задачам и содержанию деятельности систем мониторинга морской обстановки;

– обеспечением необходимого уровня визуализации имитируемого процесса на основе использования геоинформационных систем, 2D и 3D форматов карт;

– возможностью исследования динамики взаимодействия параметров и компонентов исследуемых процесса, системы во времени и пространстве их функционирования;

– целесообразностью и эффективностью использования методов имитационного моделирования как на этапе создания и совершенствования системы мониторинга морской обстановки, так и при её функционировании, в составе специального программного обеспечения этой системы.

Эти достоинства обеспечивают имитационному методу моделирования широкое применение в интересах управления созданием, развитием и функционированием систем мониторинга морской обстановки, на различных этапах их жизненного цикла. Указывая, что данная модель имитационная, обычно подчеркивается, что в отличие от других типов абстрактных моделей, в этой модели сохранены и легко узнаваемы такие черты моделируемого процесса (системы), как структура, связи между компонентами, способ передачи информации, пространство, время. С имитационными моделями также обычно связывают и требование иллюстрации их поведения с помощью принятых в данной прикладной области, графических образов, включая использование геоинформационных технологий.

Цели применение метода имитационного моделирования могут быть самыми различными – от выявления свойств и закономерностей исследуемого процесса, системы, до решения конкретных практических задач создания, совершенствования и функционирования системы мониторинга морской обстановки. Важной составляющей методов имитационного моделирования, усиливающей их значимость в качестве системы поддержки принятия решений при управлении системами мониторинга морской обстановки, является использование в составе имитационной модели широкого спектра современных информационных технологий.

Информационные технологии, используемые при применении метода имитационного моделирования процесса мониторинга морской обстановки. Рассмотренные особенности и достоинства методов имитационного моделирования обеспечиваются применением широкого спектра современных информационных технологий, существенно расширяющих их возможно-

сти в качестве аппарата поддержки принятия решений[3]. К их числу таких технологий, прежде всего, можно отнести:

– объектно-ориентированный подход при разработке и программной реализации имитационной модели;

– ориентация на систему онтологии единую с системой онтологии описываемой предметной области;

– геоинформационные технологии, ориентированные на использование разнообразных форматов цифровых карт;

– интеллектуальные геоинформационные системы, используемые для поддержки принятия решений пользователями имитационных моделей и реальных систем мониторинга.

При объектно-ориентированном подходе разработка и программная реализация имитационной модели представляют собой описание объектов, их свойств (или атрибутов), совокупностей (или классов), отношений между ними, способов их взаимодействия и операций над объектами (или методов). Преимуществом данного подхода является концептуальная близость к предметной области произвольной структуры и назначения. Еще одним практически важным свойством объектно-ориентированного подхода является поддержка механизма обработки событий, которые изменяют атрибуты объектов и моделируют их взаимодействие в предметной области. Использование ранее разработанных библиотек объектов и методов позволяет значительно сэкономить трудозатраты при совершенствовании имитационной модели. Идеологически объектно-ориентированный подход к программированию, как к моделированию информационных объектов, решающий на новом уровне основную задачу структурного программирования - структурирование информации с точки зрения управляемости[4], что позволяет существенно улучшить управляемость самим процессом моделирования.

Применение в ходе разработки имитационной модели на этапах постановки задачи и её математического описания объектно-ориентированной методики моделирования предметной области обеспечивает непрерывный переход к проектированию программной реализации имитационной модели. Однако это часто приводит к сужению возможности использования программной реализации модели для иных (новых) целей, т.к. её разработка ведется с учетом системных требований, и подчинена решению конкретной задачи.

Чтобы избежать сужения области применения программного продукта в процессе программирования используется онтологический подход. Использование онтологий особенно необходимо в приложениях-агентах, осуществляющих поиск и объединение информации из различных источников и из разных сред, в которых один и тот же термин может означать разные вещи, что особенно важно в программных комплексах моделирующих процесс мониторинга морской обстановки.

Под онтологией понимается система понятий предметной области морской деятельности и процессов мониторинга морской деятельности, которая представляется как набор сущностей, соединенных различными отношениями. Онтологии используются для формальной спецификации понятий и отношений, которые характеризуют область знаний о морской деятельности. Преимуществом онтологий в качестве способа представления знаний является их формальная структура, которая упрощает их компьютерную обработку. Онтология вместе с набором индивидуальных экземпляров классов образует информационную базу предметной области и имитационной модели.

На практике разработка онтологии включает:

– определение классов в онтологии;

– расположение классов в таксономическую иерархию (подкласс – надкласс);

– определение слотов и описание допускаемых значений этих слотов;

– заполнение значений слотов экземпляров.

После этого, определив отдельные экземпляры этих классов, имеется описанная, заполненная онтология (рис. 1), которая используется другими компонентами и сопровождается пользователем имитационного программного комплекса.

Компонент онтология процесса мониторинга является основной информационной базой при разработке и функционировании других компонентов программного комплекса имитационной модели.

Геоинформационные технологии можно определить как совокупность программно-технологических средств получения новых видов информации об окружающем мире. Неразрывно с геоинформационными технологиями связано понятие геоинформационная

система (ГИС), которая представляет взаимосвязанную, целеориентированную совокупность геоинформационных технологий, реализованных в интересах управления, хранения и представления пространственной и временной информации, обработки и поддержки принятия решений для конкретной области деятельности людей. Именно поэтому, создание в современных условиях имитационных моделей процесса мониторинга морской обстановки невозможно без применения геоинформационных систем, в основе которых лежит широкое использование разнообразных источников картографических данных (рис. 3).

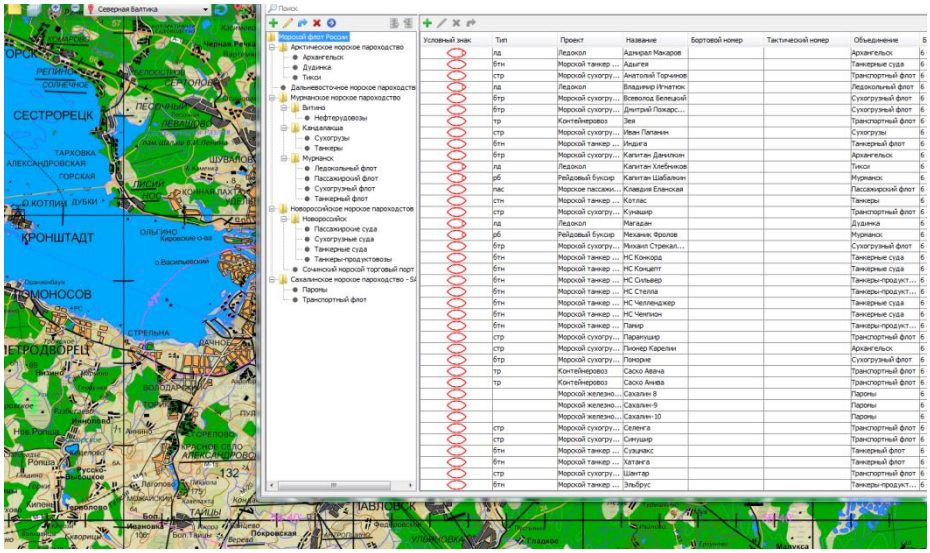


Рис. 1. Онтология иерархии структуры Морской флот России (вариант).

Геоинформационная система, обладая функциями интеграции информации, используется в качестве источника исходной информации о среде, для реализации пространственно-временной интеграции данных, описывающих поведение объектов и субъектов морской деятельности, функционирование установленных на объектах технических средств. Важной функцией ГИС является визуализация, как результатов контроля морской обстановки, так и результатов работы системы поддержки принимаемых в интересах управления морской деятельностью решений. Кроме того, ГИС является главной основой единого интерфейса для всех программных компонентов, включая и имитационные модели, входящих в состав системы мониторинга морской обстановки. Такой единый интерфейс принято называть геоинформационный интерфейс. Главными возможностями, предоставляемыми ГИС, входящей в состав системы мониторинга морской обстановки, являются пространственная и временная интеграция используемых данных, а также необходимый уровень визуализации реализуемого процесса.

Расширение функций традиционных ГИС позволяет рассматривать созданную ГИС как интеллектуальную ГИС (ИГИС). Для этого ГИС должна обладать возможностями:

– визуальной разработки онтологии для имитационных моделей системы;

– открытой технологии для представления знаний;

– визуальной разработки сценариев действий объектов в геопространственной среде;

– системной интеграции данных из различных источников и их визуализации автоматически и по запросу оператора;

– выполнения сценариев действий объектов в реальном или произвольном масштабе времени с визуальным отображением в пространстве и во времени на фоне электронной карты;

– применения математических методов для выработки рекомендаций лицами, принимающими решения на основе формирования и выполнения сценария;

– масштабирования (генерализации) электронной карты в процессе визуализации различных видов обстановки;

– высокой степени независимости от используемой аппаратной части (локальный компьютер, локальные и глобальные вычислительные сети).

На основе технологий, которые свойственны ИГИС, возможна формулировка и успешное решение в интересах управления процессом мониторинга морской обстановки ряда новых прикладных задач поддержки принятия управленческих решений:

– автоматизированного интеллектуального контроля за развитием сложных геопространственных процессов, осуществляемого в автоматическом режиме и дополняемого визуальным контролем оператора (рис. 4);

– аспектной интерпретации и анализа последствий геопространственных действий объектов, осуществляемой на основе сохранения данных обстановки с последующей визуализацией динамики её изменения (рис. 5);

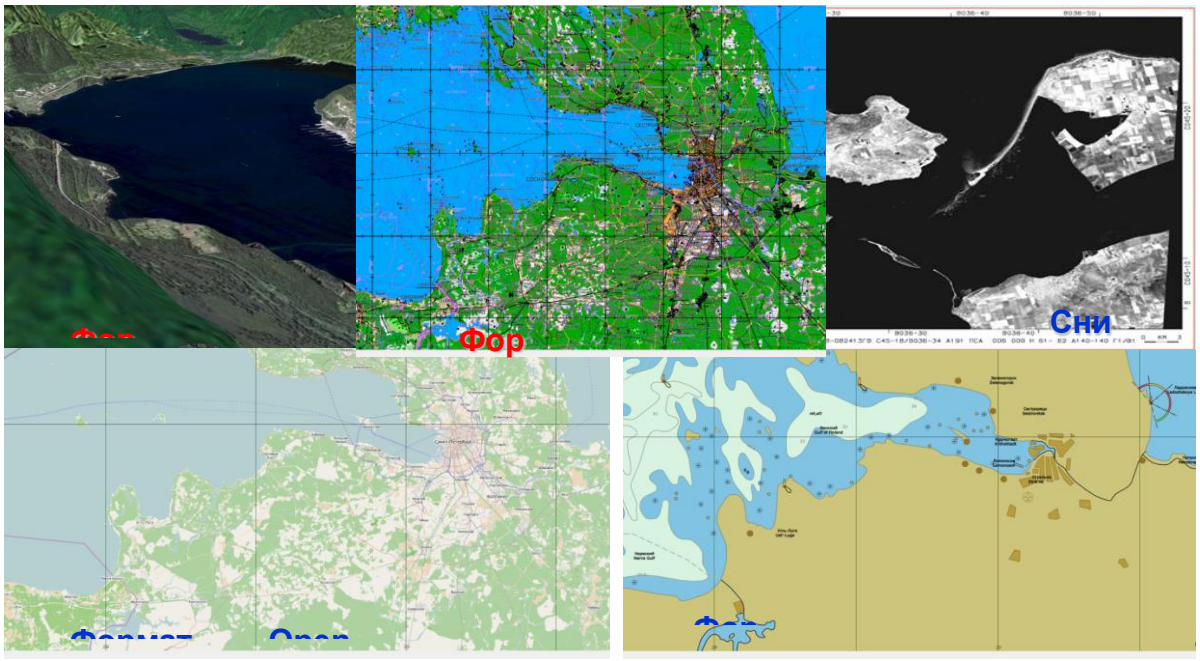


Рис. 3. Варианты используемых форматов цифровых карт.

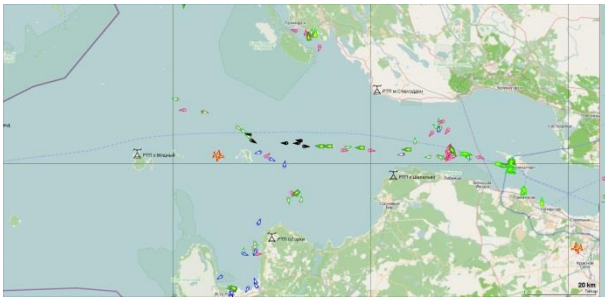


Рис. 4. Мониторинг морской и воздушной обстановки на основе интеграции информации от различных источников.

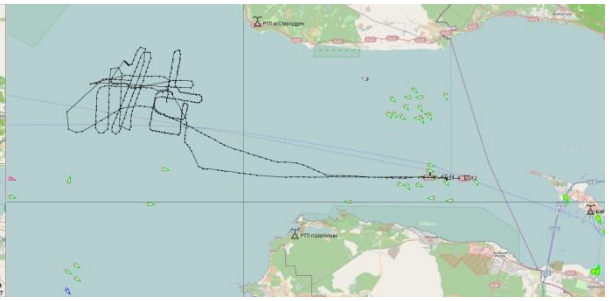


Рис. 5. Интерпретация результатов маневрирования морских объектов для последующего анализа.

– моделирования развития геопространственных процессов в водной среде в интересах оценки возможностей гидроакустических средств в различных районах их применения (рис. 6);

– имитационного моделирование морской обстановки с расчетом зон обнаружения ГАК (активные режимы) надводного корабля (рис. 7).

Заключение. С развитием информационных технологий возможность применения метода имитационного моделирования в интересах управления и контроля за морской деятельностью существенно расширились. Во многих случаях метод имитационного моделирования является единственным эффективным инструментом объективного обоснования решений, когда осуществляется управление некоторой системой, способной изменять свои состояния во времени и на всех этапах её жизненного цикла. Термин “система” здесь употреблен в широком смысле. Такими системами могут быть системы мониторинга, реализующие процесс контроля морской обстановки и управления морской деятельностью.

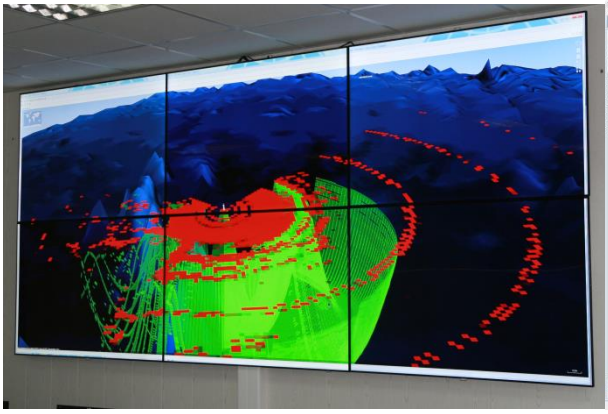


Рис. 6. Прогноз зон обнаружения гидроакустического средства

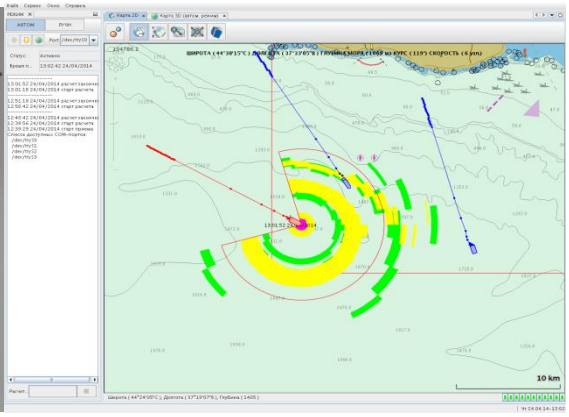


Рис. 7. Отображение текущих результатов имитационного моделирования морской обстановки

Литература

1. Волгин П.Н., Гучек В.И., Ермолаев В.И., Попович В.В. Системы мониторинга на основе ИГИС // Оборонный заказ, № 2 (21) 2012. С.58-61.
2. Волгин, Н.С. Исследование операций // Часть 1, СПб.: ВМА, 1999. - 367 с.
3. Volgin P., Deveterikov V. Simulation Modeling of Maritime Monitoring Systems with the Application of an Information-Technology Complex, // China, Shanghai Maritime University, May 10-12, International Symposium “Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems 2017” (IF&ICIS’2017), pages 187-194, 2017. - 268pp.
4. Якобсон А., Буч Г., Рамбо Дж. Унифицированный процесс разработки программного обеспечения // СПб.: «Питер», 2002. – 496с.

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ЗОН ОБНАРУЖЕНИЯ БИСТАТИЧЕСКИХ И МУЛЬТИСТАТИЧЕСКИХ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ДВУХМЕРНО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В.В.Малый[1], д-р техн. наук, Н.Г.Ковалевский[1], д-р техн. наук, А.А.Морозов[2], А.В.Юницкий[2]
[1]АО «СПИИРАН-Научно-техническое бюро высоких технологий», г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н.Г.Кузнецова», г. Санкт-Петербург, Россия

CALCULATION OF DETECTION ZONES FOR BISTATIC AND MULTISTATIC ACTIVE SONARS WITH USE OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

V.V.Malyj[1], Dr.Sc., N.G.Kovalevskij[1], Dr.Sc., A.A.Morozov[2], A.V.Yunitskij[2]
[1] SPIIRAS-HTR&DO Ltd, St.-Petersburg, Russia
[2]Military Educational-and-Research Centre «N.G.Kuznetsov Naval Academy», St.-Petersburg, Russia

Рассмотрены основные особенности оценки эффективности бистатических и мультистатических гидролокационных систем на основе расчета и визуализации ожидаемых зон обнаружения, проведена оценка влияния качества информационного обеспечения геоинформационных систем на точность расчетов ожидаемых зон обнаружения бистатических и мультистатических гидролокаторов в различных гидролого-акустических условиях для различных моделей неоднородной морской среды.

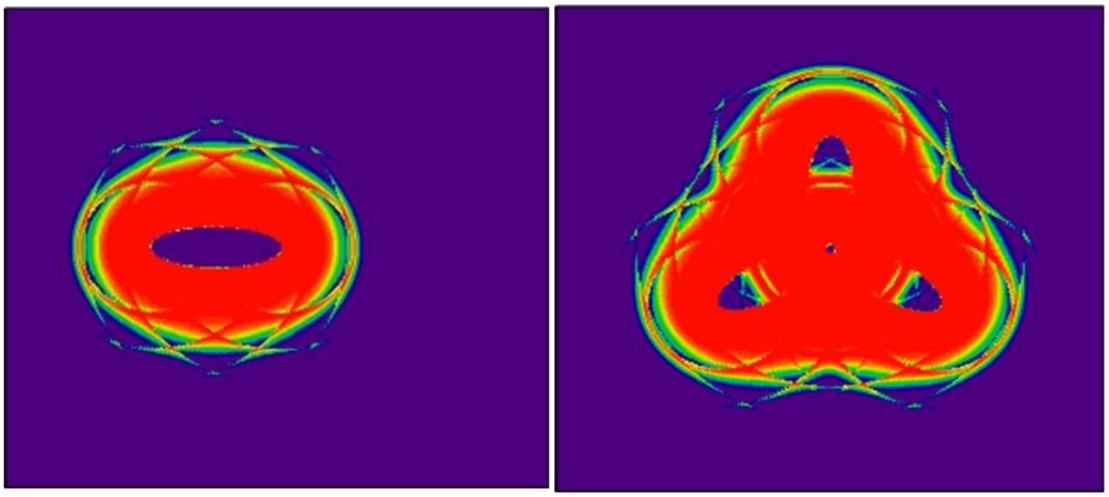
In paper the features of an efficiency evaluation for bistatic and multistatic active sonars on the basis of calculation and visualization of the expected surveillance zones are considered. The impact assessment of quality of information support of geographic information systems on the accuracy of calculation of the expected surveillance zones of bistatic and multistatic active sonars in various hydrological and acoustic conditions for various models of the inhomogeneous marine medium is carried out.

Геоинформационные системы (ГИС) [1] являются важнейшей составной частью современных систем мониторинга подводной обстановки (СМПО). При этом одним из наиболее перспективных видов гидроакустических средств (ГАС) в составе подсистем добывания информации СМПО в настоящее время являются бистатические и мультистатические гидролокационные системы (ГЛС) [2-5]. Методики оценки эффективности ГЛС данного типа имеют существенные особенности и отличия по сравнению с методиками оценки эффективности традиционных моностатических ГЛС (МнГЛС).

В работе рассмотрены направления дальнейшего развития методик оценки эффективности бистатических ГЛС (БГЛС) и мультистатических ГЛС (МлГЛС) в условиях двумерно-неоднородной модели морской среды с произвольным рельефом дна на основе моделирования и визуализации ожидаемых зон наблюдения (ЗН), а также дана оценка влияния качества информационного обеспечения ГИС на точность результатов расчета ожидаемых ЗН в различных гидролого-акустических условиях (ГАУ).

Использование модели слоисто-неоднородной среды. Использование при оценке эффективности ГАС традиционной упрощенной модели слоисто-неоднородной среды с фиксированным вертикальным распределением скорости звука (ВРСЗ) и плоским дном дает в результате идеализированную центрально-симметричную ЗН для БГЛС или композицию центрально-симметричных ЗН для МлГЛС [3,4]. На рис.1 приведен пример результатов моделирования и расчета ожидаемых ЗН низкочастотных БГЛС (рис.1, а) и МлГЛС (рис.1, б) для ГАУ, соответствующих району Баренцева моря (глубина моря 200 м) в зимний период (январь, положительная рефракция от поверхности до дна (ПРПД)), приемные антенны удалены от излучателя на расстояние b=60 км и расположены на глубине 60 м. Ожидаемые ЗН (для фиксированной глубины цели h=80 м) представлены в виде зависимости вероятности правильного обнаружения (ВПО) от пространственных координат $P_{\text{по}}(r,\alpha)=P_{\text{по}}(q(r,\alpha))$, рассчитываемой в соответствии с рабочей характеристикой обнаружения приемника эхо-сигналов $P_{\text{по}}(q)$ путем подстановки соответствующей зависимости входного отношения сигнал/помеха $q(r,\alpha)$. Для визуализации ЗН $P_{\text{по}}(r,\alpha)$ применена цветовая шкала с плавным переходом от фиолетового цвета ($P_{\text{по}}$=0) до красного цвета ($P_{\text{по}}$=1), удобная для представления трехмерных графиков в виде плоских проекций.

Очевидно, что в реальных районах наблюдения со сложным рельефом дна и изменяющимся профилем ВРСЗ по трассе распространения сигнала, традиционный подход приводит к значительным ошибкам. Особенно ярко это проявляется для низкочастотных БГЛС и МлГЛС дальнего действия с разнесением излучателя и приемника на значительные расстояния.



а) б)

Рис. 1. Вид ожидаемых ЗН БГЛС (а) и МлГЛС (б) в условиях ПРПД.

Использование модели двумерно-неоднородной среды. Для точной оценки эффективности ГЛС данного типа необходима строгая привязка рассчитываемых ожидаемых ЗН и координат установки излучателя и приемных антенн к карте района наблюдения с реальным рельефом дна (в том числе, в прибрежных районах - с учетом границ береговой черты) и гидрологией. Очевидно, что данный подход может быть реализован только с помощью специализированных ГИС [1,6-8] с соответствующими базами данных рельефа дна и гидрологии либо путем получения результатов измерения гидрологических данных, поступающих в ГИС от систем оперативной океанологии (СОО).

В АО «СПИИРАН-НТБВТ» данный подход к оценке эффективности ГАС реализован в рамках программного комплекса (ПК) *SonarZone* на основе лучевых и волновых методов расчета поля для условий детерминированной модели двумерно-неоднородной среды, характеризующейся изменчивостью ВРСЗ по глубине и дистанции, с переменным рельефом дна и его геоакустических характеристик. Уместно заметить, что по сути, это модель трехмерно-неоднородной среды, но обычно в данном контексте употребляется устоявшийся термин «двумерно-неоднородная среда», доставшийся в наследство от программ расчета поля (предыдущего поколения) для одной трассы - от источника звука до приемной антенны.

Основным отличием и трудностью применения данной модели среды для БГЛС является необходимость расчета поля отдельно для каждой из трасс от излучателя до возможного положения цели и от цели до приемника (для заданного количества направлений).

На рис. 2 приведен пример результатов расчета и построения ожидаемой ЗН низкочастотной БГЛС (b=120 км) в условиях глубоководного района Норвежского моря (глубина моря до 3750 м) в зимний период (январь, ось подводного звукового канала расположена на глубине 600 м, горизонт слоя скачка - на глубине 95 м) с использованием модели двумерно-неоднородной среды с переменным по трассе ВРСЗ и рельефом дна (ПК *SonarZone*, 180 направлений расчета относительно излучателя и относительно приемника): рельеф дна и переменные по трассе ВРСЗ для направления 0º от приемника из базы данных ГИС (рис.2, а); вертикальный разрез ЗН по направлению 0º от приемника для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{по}}(r,h) \le 1$ (рис.2, б); горизонтальный разрез ожидаемой ЗН на горизонте h=80 м (с нанесением на карту) для фиксированного значения порога ВПО $0.9 \le P_{\text{по}}(r,\alpha) \le 1$ (рис.2, в); тот же горизонтальный разрез ожидаемой ЗН в полярных координатах на горизонте h=80 м, для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{по}}(r,\alpha) \le 1$ (рис.2, г).

В случае МлГЛС, включающей в свой состав более одного (N>1) приемника, после расчетов ЗН каждой отдельной бистатической пары $P_{\text{по}_n}(r,h,\alpha)$, на основе формулы вероятности обнаружения многоканального приемника пересчитывается общая ВПО

$$P_{\text{по}\,\Sigma}(r,h,\alpha) = 1 - \prod_{n=1}^{N}\left(1 - P_{\text{по}_n}(r,h,\alpha)\right) \qquad (1)$$

и строится итоговая ЗН МлГЛС.

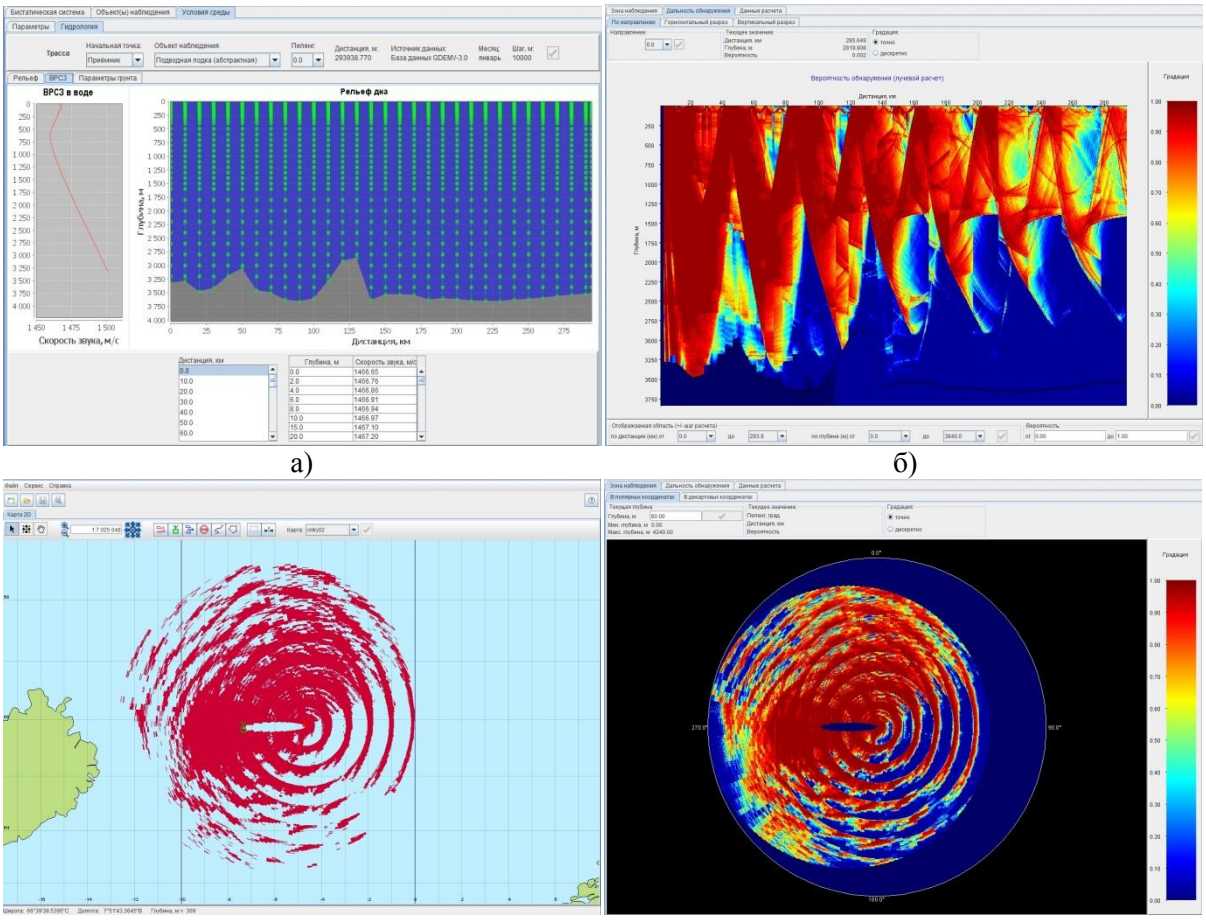


Рис. 2. Результаты расчета ожидаемой ЗН БГЛС с использованием данных от ГИС.

На рис. 3 приведен пример результатов расчета и построения ожидаемой ЗН для низкочастотной МлГЛС с тремя приемниками (b=60 км), в условиях Баренцева моря (глубина моря в районе - до 275 м) в зимний период (январь, ПРПД), при размещении антенн на глубине h=60 м, с использованием модели двумерно-неоднородной морской среды (ПК *SonarZone,* 180 направлений расчета относительно излучателя и относительно каждого из приемников): рельеф дна и переменные по трассе ВРСЗ для направления 39º от излучателя (рис.3, а); вертикальный разрез ЗН по направлению 39º от излучателя, для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{по}}(r,h) \le 1$ (рис.3, б); вид ожидаемой ЗН на горизонте h=80 м (с нанесением на карту), для фиксированного значения порога ВПО $0.9 \le P_{\text{по}}(r,\alpha) \le 1$ (рис.3, в); вид ожидаемой ЗН в полярных координатах на горизонте h=80 м, для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{по}}(r,\alpha) \le 1$ (рис.3, г).

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что для точной оценки эффективности БГЛС и МлГЛС и особенно - низкочастотных ГЛС дальнего действия (с разнесением излучателя и приемников на значительные расстояния) необходима строгая привязка рассчитываемых ожидаемых ЗН к карте района с учетом точных координат установки излучателя и приемных антенн, реального рельефа дна и переменных в пространстве ВРСЗ с заданной сеткой по географическим координатам.

Данный подход может быть реализован только с помощью специализированных ГИС с соответствующими базами данных рельефа дна и гидрологии либо с помощью оперативных гидрологических данных, поступающих в ГИС от СОО.

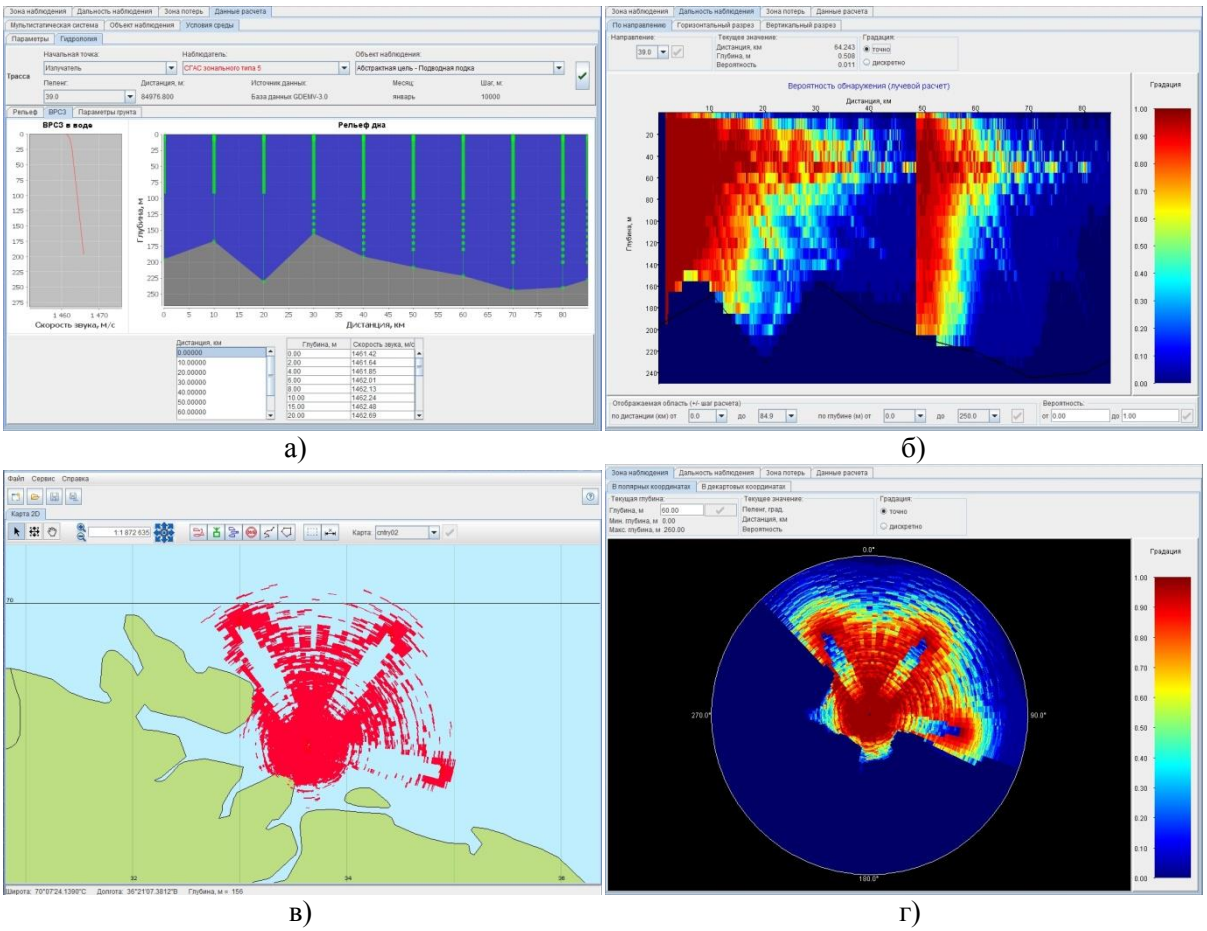


Рис. 3. Результаты расчета ожидаемой ЗН МлГЛС с использованием данных от ГИС.

Литература

1. Гучек В.И., Ермолаев В.И., Попович В.В. Системы мониторинга на основе интеллектуальных ГИС. Оборонный заказ. 2012, № 2 (21), с.58-61.
2. Cox H. Fundamentals of Bistatic Active Sonar // In: Underwater Acoustic Data Processing, edited by Y.T.Chan. - Kluwer Academic Publishers. NATO ASI Series. 1989. V. 161. P.3-24.
3. Белоус Ю.В., Козловский С.В., Сергеев В.А. Полистатический метод локации применительно к подвижным носителям // Тр. VIII Межд. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб: Наука, 2006. С.81-84.
4. Машошин А.И. Алгоритм оптимального позиционирования мультистатической системы гидролокации. // Морская радиоэлектроника. 2013, №4 (46). С.14-18.
5. Малый В.В., Леонтьев Ю.Б. Особенности оценки зоны наблюдения бистатической гидролокационной системы для условий безграничной однородной среды. // Межд. Научный Институт «Educatio». 2016. №1 (19), часть 2. С.38-44.
6. Малый В.В. Моделирование ожидаемых зон наблюдения бистатических и мультистатических гидролокационных средств освещения подводной обстановки с использованием геоинформационной системы и системы оперативной океанологии. // Материалы 9-й конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2016). СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С.420-430.
7. Малый В.В., Морозов А.А., Юницкий А.В. Расчет ожидаемых зон обнаружения бистатических и мультистатических гидролокаторов освещения подводной обстановки с использованием геоинформационной системы. // Материалы XV Санкт-Петербургской межд. конф. «Региональная информатика» (РИ-2016). СПб: СПИИРАН. 2016. С.120-124.
8. Malyj V. Modeling of Surveillance Zones for Bi-static and Multi-static Active Sonars with the Use of Geographic Information Systems // Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17) Springer. 2017. P.139-152.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ: ОТ ФЛЮКТОМЕТРА АДМИРАЛА С.О.МАКАРОВА ДО ЦИФРОВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ (1881-1985 гг.)
В.А.Попов, Р.Н.Беркутов, И.А.Селезнев 5

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ
В.Б.Жуков, А.Катунин, И.А.Селезнев 11

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМОВЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОКЕАНИЧЕСКОЙ СРЕДЕ
Д.Г.Левченко, С.И.Бадулин 17

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОРСКИХ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Л.С.Долин, О.В.Копелевич, А.Г.Лучинин 21

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЦУНАМИ НА БЕРЕГА И СООРУЖЕНИЯ
А.И.Зайцев, М.А.Клячко, А.А.Куркин, Е.Н.Пелиновский, А.С.Ялчинер 27

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРИЛИВНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ
А.В.Зимин, А.А.Родионов, Д.А.Романенков, О.А.Ататджанова, Е.И.Свергун, А.А.Коник. 32

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ БИОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗУБАТЫХ КИТОВ
М.П.Иванов, А.А.Родионов, В.Е.Стефанов, Ю.А.Толмачев 36

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ПАССИВНАЯ ГИДРОЛОКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМ
Л.Е.Гампер 40

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ
М.А.Иванов, А.М.Иванов, И.А.Селезнев 43

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИХ И БЫСТРЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ
Г.С.Малышкин 47

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ В АКТИВНОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ
Б.П.Белов, Н.Н.Семенов, Е.С.Шилина, М.М.Шилин 51

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГИДРОЛОКАТОРОВ ОСВЕЩЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ОБСТАНОВКИ
А.А.Войтов, А.Ю.Корнеев, Ю.А.Корнеев, Р.К.Хаметов 55

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОЛОКАТОРАХ ОСВЕЩЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ОБСТАНОВКИ
А.А.Войтов, А.Ю.Корнеев, Ю.А.Корнеев, Р.К.Хаметов 59

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГИДРОЛОКАТОРАХ БОКОВОГО ОБЗОРА
А.А.Войтов, А.Ю.Корнеев, Ю.А.Корнеев, А.Ю.Зилинберг 63

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ СИГНАЛОВ ПО ВРЕМЕНИ В АКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОСТОГО СИГНАЛА
Б.П.Белов, Н.Н.Семенов, М.М.Шилин, Е.С.Шилина 67

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОКУСИРОВКИ ПОЛЯ В МУЛЬТИСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ВИДЕНИЯ В МОРСКОЙ СРЕДЕ
А.И.Хилько, И.П.Смирнов, К.А.Сидоров 71

ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕГКОВОДОЛАЗОВ ПО ИЗЛУЧАЕМЫМ ИМИ ПОДВОДНЫМ ШУМАМ
С.В.Горовой, В.И.Коренбаум, А.Е.Костив, А.Д.Ширяев, А.Е.Бородин, А.А.Тагильцев, В.М.Дорожко, А.Ю.Фершалов 75

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ ПОМЕХ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «БРОКЕР-ИПФ»
А.С.Иваненков, А.А.Родионов 78

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОКАТОРА СЕКТОРНОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ ДО МОРСКОГО ДНА
М.А.Бородин, Р.К.Хаметов 82

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ НАУЧНЫМИ ЭХОЛОТАМИ «СЕКТОР» (КБМЭ «ВЕКТОР») И EY500 (SIMRAD)
А.Н.Долгов, А.Н.Куценко, М.А.Раскита 85

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО ПОРТАТИВНОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОДНОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТА С РАСЩЕПЛЁННЫМ ЛУЧОМ
А.Н.Долгов, А.Н.Куценко, М.А.Раскита 89

ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ЛЕДОВОГО КЛАССА
В.М.Агафонов, А.Н.Антонов, П.Д.Груздев, Д.А. Зайцев, Д.А.Преснов, А.Л.Собисевич, Л.Е.Собисевич 93

ОЦЕНКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ НОСИТЕЛЯ ПОДВОДНОЙ АППАРАТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
П.Л.Гапоненко, В.О.Орлов, Г.В.Теверовский, С.Г.Цыганков, В.П.Щеголихин 97

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ БЕССТРОБОВОГО СПОСОБА ДЛЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
А.А.Светличная 101

ЛАБОРАТОРНАЯ ГИДРОЛОКАЦИОННАЯ УСТАНОВКА С ЗОНДИРУЮЩИМИ СИГНАЛАМИ ТИПА ЧАСТОТНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
В.Н.Трофимов 104

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СИГНАЛЫ С НУЛЕВОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИЕЙ
Д.Е.Лейкин 108

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦВК ГАК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕДИНЫХ И РАЗЛИЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ
Р.О.Лунин, Н.В.Мальцева, Г.Ц.Селеджи 111

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
В.А.Александров, В.А.Майоров, В.В.Басов 114

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ
К.В.Игнатьев, С.А.Калашников 117

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ КЛЮЧЕВОЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
Ю.В.Казаков, С.А.Калашников, Л.В.Маркова 121

КЛЮЧЕВЫЕ НОРМАЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ
В.А.Александров, К.В.Игнатьев, С.А.Калашников 125

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ТРАКТАХ
Е.Ю.Ермолаева, С.А.Калашников, П.А.Киселев 128

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
К.В.Игнатьев, Ю.В.Казаков, Л.В.Маркова 131

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК
А.К.Батанов, Б.М.Бродский, А.И.Машошин 134

ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК
А.К.Батанов, Б.М.Бродский, А.А.Кузьмин 136

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В АНТЕННЫХ РЕШЁТКАХ
Н.М.Иванов, Е.В.Кондаков 138

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ
С.Н.Галий, В.К.Доля, В.Н. Митько, Э.Г.Шмидт 142

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ В СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБТЕКАТЕЛЯХ
В.З.Голдовский, К.А.Румянцев 146

ХОДОВОЙ ШУМ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ МАЛОГАБАРИТНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЙ НА ЕГО КВАЗИКОНФОРМНУЮ АНТЕННУ
В.Р.Гессен, В.П.Дмитриченко 149

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

О ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТАЦИИ К РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ ПОМЕХЕ В АБСОЛЮТНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛАГАХ
К.П.Львов 153

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ГИДРОАКУСТИКИ ПРИ ОСВЕЩЕНИИ БЛИЖНЕЙ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ
Ю.В.Белоус 155

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ В МЕЛКОМ МОРЕ
А.В.Гринюк, В.Н.Кравченко, Ю.В.Махнев, О.И.Пискунова, А.Т.Трофимов 158

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГИДРОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО РАДИОУПРАВЛЯЕМОГО КАТЕРА
В.И.Каевицер, А.П.Кривцов, И.В.Смольянинов, А.В.Элбакидзе 161

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ НА ВХОДЕ ГИДРОЛОКАТОРА ПО ЭЛЕМЕНТАМ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ, РЕАЛИЗОВАННОЕ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ
Б.П.Белов, Н.Н.Семенов, М.М.Шилин, Е.С.Шилина 163

ВИБРОУСТОЙЧИВЫЕ ПРИЁМНИКИ ДЛЯ БОРТОВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН
А.К.Батанов, Б.М.Бродский, А.В.Цветков, А.А.Кузьмин, В.С.Жуменков. 166

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ
Б.М.Бродский, А.А.Кузьмин, А.В.Семенова 168

МОЩНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
А.К.Британенков, Б.Н.Боголюбов, В.А.Фарфель, С.А.Смирнов, В.А.Перфилов 170

РАСЧЁТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОЩНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
А.К.Британенков, Б.Н.Боголюбов, В.А.Фарфель, С.Ю.Смирнов, Н.Ю.Круглов, Д.Н.Кушнерев, Л.Е.Фрид 173

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭКРАНА ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН
К.А.Батанов, Д.М.Чайка, А.В.Гаринков 176

ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОФИЗИКИ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ ВОЕННО-МОРСКИХ СИЛ США
В.П.Говорухин, В.А.Родионов, В.В.Рыков 179

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ГИДРОФИЗИКИ
К.Н.Волков, В.Н.Емельянов, И.В.Тетерина 183

ЛАГРАНЖЕВЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ИХ РОЛЬ В ПЕРЕНОСЕ ЧАСТИЦ ПАССИВНОЙ И ИНЕРТНОЙ ПРИМЕСИ
К.Н.Волков, В.Н.Емельянов, И.В.Тетерина, И.Е.Капранов 187

ДАЛЬНИЕ ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ГЕНЕРАЦИИ
В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров 191

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ВОЛНЫ В БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ
Т.Г.Талипова, А.А.Куркин 194

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРАЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ
О.Д.Шишкина 198

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ВЫСОТ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РОССИЙСКИХ МОРЯХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
А.В.Зимин, А.А.Родионов, Е.И.Свергун 202

НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ РОССИИ
А.А.Куркин, О.Е.Куркина, Е.А.Рувинская, А.И.Зайцев, П.В.Лобовиков, А.А.Король, А.Р.Гиниятуллин 204

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РЕАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ
А.А.Родионов, А.В.Зимин, Д.А.Никитин, К.Б.Филин 208

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОЛНЫ КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ
С.И.Перегудин, Э.С.Перегудина, С.Е.Холодова 211

КОМПОНЕНТЫ МОРСКИХ ЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ
Ю.А.Копытенко, А.А.Петрова 213

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОРСКИХ ВОЛН
С ПРЕГРАДОЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ С КАМЕННОЙ БЕРМОЙ
В.В.Максимов, И.С.Нуднер, К.К.Семенов, Е.А.Крылатых 217

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛН
В ГИДРОВОЛНОВОМ ЛОТКЕ С ПРЕПЯТСТВИЕМ
А.И.Зимин 220

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИ ВЛОЖЕННЫХ СЕТОК В РАСЧЁТАХ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ
О.И.Гусев, Л.Б.Чубаров 224

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЛОКАЛЬНЫХ ЦУНАМИ
НА КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ
Ю.П.Королёв 227

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА ЦУНАМИ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА R-РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИЛЬЯПЕЛЬ ЦУНАМИ
16 СЕНТЯБРЯ 2015
Т.А.Воронина 231

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В.А.Кихтенко 234

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ:
РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
Д.С.Гладских, Д.А.Сергеев, Г.А.Байдаков, И.А.Соустова, Ю.И.Троицкая 238

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОДВОДНЫХ ЛИДАРОВ
С МОДУЛИРОВАННЫМИ ПУЧКАМИ ПОДСВЕТКИ
А.Г.Лучинин, Л.С.Долин, М.Ю.Кириллин 242

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИДАРНОГО ЭХО-СИГНАЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА СИЛЬНО ЭВТРОФИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ
Л.С.Долин 246

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ МОРЯ НА ОСНОВЕ
ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЗВУКА
В.А.Буланов, А.В.Стороженко 250

ОБ ЭФФЕКТИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ВЕРХНЕГО СЛОЯ
МЕЛКОГО МОРЯ, НАСЫЩЕННОГО ПУЗЫРЬКАМИ
В.А.Буланов 254

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРЫ ПУЗЫРЬКОВ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ
А.О.Максимов, Ю.А.Половинка 257

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ, ГРАВИТАЦИОННЫЕ И ГРАВИТОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ,
НАБЛЮДЕННЫЕ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ И В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ПОДВОДНЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
Л.Е.Собисевич, А.Л.Собисевич, К.Х.Канониди, Д.В.Лиходеев 261

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН
ВДОЛЬ МОРСКОГО ДНА, ОБЛАДАЮЩЕГО РЕЛЬЕФОМ
Р.А.Жостков 265

ЭКЗАРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ АРКТИЧЕСКОГО
РОССИЙСКОГО ШЕЛЬФА
Н.В.Либина, С.Л.Никифоров 268

ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ УПРУГОЙ БИМОДУЛЬНОЙ СРЕДЫ
В.А.Гусев 271

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМОЙ ОРИЕНТАЦИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ
Г.А.Федотов 275

ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ
Ю.А.Ломовацкий 278

ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН ИО РАН НА ЧЕРНОМ МОРЕ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОКЕАНОЛОГИИ
А.Г.Зацепин, Е.Г.Арашкевич, В.И.Баранов, О.Ю.Кочетов, С.Б.Куклев, А.Г.Островский, О.И.Подымов 281

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОРСКОГО ПОЛИГОНА ИНСТИТУТА ЭКОЛОГИИ
Р.С.Дбар, В.П.Елистратов, Г.В.Кенигсбергер, А.И.Марколия, В.В.Медведовский, И.И.Сизов, Т.П.Строчан 283

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ
А.Л.Собисевич, Д.А.Преснов, Р.А.Жостков, А.С.Шуруп, П.Д.Груздев, А.Ю.Мореев, Ф.В.Передерин 287

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МИКРОМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОДА-ВОЗДУХ
С.С.Зенченко 291

ЛОКАТОР – ИЗМЕРИТЕЛЬ ГРАДИЕНТОВ ПОЛЯ
С.Н.Гузевич 295

ПОСТРОЕНИЕ И АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА
О.П.Ткаченко 280

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ МОРСКОЙ АКВАТОРИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВОЛНОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНВЕРТОРОВ
В.Н.Аносов, В.В.Горбацкий, Д.И.Дудко, В.Э.Егурнов, Н.Н.Шпилёв 303

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ О КОЛЕБАНИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В МОДЕЛЬНОЙ АКВАТОРИИ
Н.А.Мацкевич, Л.Б.Чубаров 306

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ
А.С.Голосной, В.Л.Мартынов, А.А.Фатеев 310

СПОСОБ МОНИТОРИНГА АНОМАЛИЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ В УДАЛЕННОМ РАЙОНЕ МОРЯ
В.Л.Мартынов, А.А.Фатеев 313

ОБЗОР ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И АППАРАТУРНЫХ СРЕДСТВ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АРКТИКИ
Д.В.Лиходеев, Л.Е.Собисевич, А.С.Шуруп 315

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ИНТЕРЕСАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
М.И.Калинов, В.А.Родионов 319

МЕТОДЫ ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

ВЫЧИСЛЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕХМЕРНО НЕОДНОРОДНЫХ МОДЕЛЯХ СРЕДЫ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ВОДУ, ВОЗДУХ И ГРУНТ
К.В.Авилов, О.Е.Попов 323

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШУМОВ ГЛУБОКОГО ОКЕАНА
П.Н.Кравчун 327

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ - ШОЛТЕ В ПРОБЛЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ОБЪЕКТОВ В МЕЛКОМ МОРЕ
Б.А.Касаткин, С.Б.Касаткин 331

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ
И.В.Матвеева, Е.Л.Шейнман 334

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НЕГАУССОВОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ШУМОПЕЛЕНГАЦИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ
О.А.Андреев, А.Т.Трофимов 338

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПЕЛЕНГОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА
И.В.Казначеев, Г.Н.Кузнецов, В.М.Кузькин, С.А.Пересёлков 342

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ
И.В.Казначеев, Г.Н.Кузнецов, В.М.Кузькин, С.А.Пересёлков 346

АКУСТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА РАЙОНОВ УСТАНОВКИ ИЛИ БУКСИРОВКИ ПРОТЯЖЕННЫХ АНТЕНН ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
Г.Н.Кузнецов 350

ПЕЛЕНГОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ С УЧЁТОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ
А.К.Зиновьев, Г.Н.Кузнецов, А.А.Луньков 354

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ШУМОВ В МЕЛКОМ МОРЕ
Н.А.Завольский, М.А.Раевский 358

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ
М.С.Лабутина, А.И.Малеханов, А.В.Смирнов 361

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ МОРСКОГО ДНА
В.И.Калинина, И.П.Смирнов, А.И.Хилько 365

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ СИГНАЛОВ НА ШЕЛЬФЕ
А.Н.Рутенко, Д.С.Манульчев, М.Р.Джеркенсон 369

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ИЗ МОРЯ НА СУШУ
А.Н.Рутенко 373

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ЗВУКА В МОРСКОМ ДНЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ЗАТУХАНИЯ ЗВУКА НА ОКЕАНСКОМ ШЕЛЬФЕ
В.А.Григорьев, В.Г.Петников, А.Г.Росляков, Я.Е.Терёхина 297

ПОИСК И АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ, ЗАПИСАННЫХ НА ШЕЛЬФЕ о. САХАЛИН ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
М.Ю.Фершалов, В.А.Гриценко 381

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ КИТОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ШУМАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ШЕЛЬФЕ О. САХАЛИН
М.М.Зыков, В.Е.Нечаюк, R.Racca, M.R.Jenkerson 385

ВЛИЯНИЕ БЕНТОСНЫХ БИОШУМОВ НА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ
Н.Г.Бибиков, О.Б.Овчинников, А.Н.Серебряный 389

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМОВОГО ПОЛЯ СУДНА НА ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАПАСОВ ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ
М.Ю.Кузнецов, В.И.Поляничко, В.И.Шевцов 392

БИБЛИОТЕКА ТИПОВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАССОВЫХ ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ РЫБ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА
М.Ю.Кузнецов, И.А.Убарчук, В.И.Поляничко 396

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО НА ШЕЛЬФЕ ЗАБИВКОЙ ФУНДАМЕНТНЫХ СВАЙ НА БЕРЕГУ
Д.С.Манульчев, В.Е.Нечаюк, А.Н.Рутенко, M.R.Jenkerson 400

ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПОДВОДНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА
Д.А.Преснов, В.А.Гусев, Р.А.Жостков, А.В.Разин 404

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ
Д.А.Преснов, А.Н.Антонов, Д.Е.Белобородов, Р.А.Жостков, Д.В.Лиходеев, А.С.Шабалина 408

АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ИНФОРМАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
Ю.А.Брага, А.И.Машошин 412

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ШУМЯЩЕЙ ЦЕЛИ
А.В.Гриненков, А.И.Машошин 417

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ В ПОЛЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ПОМЕХ
Г.С.Малышкин, П.А.Косолапов 421

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ УРОВНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ
И.Р.Бирюков, Д.Б.Островский, М.Н.Петухова, А.О.Смирнов 424

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФЛУКТУАЦИЙ ПОДВОДНОГО ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ СУДОВ
А.А.Волкова, А.Д.Консон 427

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ РАБОТЕ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ
Г.Ю.Пуеров, Е.И.Сергеева 430

АДАПТИВНАЯ КОГЕРЕНТНО-СОГЛАСОВАННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СЛУЧАЙНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ
М.О.Пономарев, К.П.Бойко, Р.В.Викторов, В.С.Колмогоров, А.В.Крупеньков, С.А.Шпак 433

ПРИЗНАКИ ОТЛИЧИЯ АНОМАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА РЕВЕРБЕРАЦИИ НАКАЧКИ ОТ ОБЫЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ РЕВЕРБЕРАЦИИ НАКАЧКИ
В.Б.Железный 437

О ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН
В.Б.Железный 441

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛУЧЕВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ
А.С.Корецкая, В.С.Мельканович 445

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОГО КАНАЛА ГИДРОЛОКАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
А.Е.Карпенко, Е.В.Курдюмов 449

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИСТАТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ
М.Б.Салин, О.А.Потапов, А.В.Студенков, Д.Д.Разумов 452

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОМЕХ К ЗАДАЧЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В ПРИСУТСТВИИ ДИСКРЕТНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА
П.Д.Колбин, В.С.Мельканович 453

АДАПТИВНОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОМЕХ ПО ВЫХОДУ КАНАЛОВ ОБЗОРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
В.С.Мельканович 456

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРЕЖЕННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ШУМОПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА
В.И.Турчин, А.А.Родионов 460

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЛОКАТОРА С РАЗНЕСЕННЫМ ПО ГЛУБИНЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ПРИЕМОМ ЗВУКА
А.А.Илларионов, С.В.Козловский, В.А.Сергеев 463

ОЦЕНКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ И ИСТОЧНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМ
В.Н.Некрасов 466

ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АКУСТИКЕ И ГИДРОАКУСТИКЕ
А.А.Панич, А.В.Скрылёв, В.К.Доля, С.Н.Свирская, Л.А.Дыкина, Е.В.Карюков, А.В.Нагаенко 470

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛА С ОПТИМАЛЬНЫМИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ АКУСТИЧЕСКОГО РЕПЕРА, НАБЛЮДАЕМОГО НА ФОНЕ ПОМЕХ
Д.А.Солодкий, Г.В.Теверовский 474

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

О РАЗЛИЧИИ В ПРОГНОЗАХ УРОВНЕЙ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В МЕЛКОМ МОРЕ ВОЛНОВЫМ И ЛУЧЕВЫМ МЕТОДАМИ
К.В.Авилов, Ю.Е.Глазов, О.И.Косарев, В.И.Ксенофонтов, И.С.Ракитина 478

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СОГЛАСОВАННОЙ СО СРЕДОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА
Ю.В.Махнев, А.Т.Трофимов 480

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ
Н.А.Завольский, А.И.Малеханов, М.А.Раевский 482

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО-
И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ СУДНОМ
Ю.М.Заславский, В.Ю.Заславский 486

ПЕРВИЧНОЕ ДАЛЬНЕЕ ПОЛЕ КОНЕЧНОЙ СВОБОДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ
О.И.Косарев, Н.А.Остапишин, А.К.Пузакина 490

ВОЗМОЖНОСТЬ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
В ВОДНЫХ СРЕДАХ
Л.С.Калина, В.П.Лигута 493

ИНЖЕНЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИДРОФИЗИКИ И ГИДРОАКУСТИКИ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОМПЛЕКСНОГО ВЗВЕШЕННОГО УСРЕДНЕНИЯ
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ
А.Е.Исаев, А.Н.Матвеев, А.С.Николаенко 497

КАЛИБРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
СКОЛЬЗЯЩЕГО КОМПЛЕКСНОГО ВЗВЕШЕННОГО УСРЕДНЕНИЯ
А.Е.Исаев, А.Н.Матвеев, А.С.Николаенко 501

РАБОЧИЙ ЭТАЛОН ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГИДРОФОНОВ И ПРИЕМНИКОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ
СКОРОСТИ ЧАСТИЦ ВОДНОЙ СРЕДЫ
Г.С.Некрич 504

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ
ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 0,5 ДО 2000 ГЦ
А.И.Щелкунов 508

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ
ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ЦЕЛЯХ
РАСШИРЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ
С.В.Сильвестров, Н.Г.Щерблюк 511

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГИДРОФОНОВ
ПО СВОБОДНОМУ ПОЛЮ В УСЛОВИЯХ НЕЗАГЛУШЕННОГО БАССЕЙНА
Н.Г.Щерблюк 515

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ
И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ АНТЕНН
Г.Н.Кузнецов 519

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ
Ф.Ф.Легуша, С.И.Пугачёв, К.В.Разрезова, И.М.Старобинец 523

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПРИЕМНИКИ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННОГО
И СИЛОВОГО ТИПОВ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА
В.И.Коренбаум, А.Е.Бородин, А.А.Тагильцев, С.В.Горовой, А.Е.Костив, А.Д.Ширяев, В.М.Дорожко 527

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СКВАЖИННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ
В.Б.Жуков, Д.Б.Островский 531

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ЧЕРЕЗ ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫЙ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СЛОЙ
А.В.Клячкин 534

МЕХАНИЗМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ПОВЕРХНОСТЬЮ
ЖИДКОСТИ, КОНТАКТИРУЮЩЕЙ С ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДОЙ
Ф.Ф.Легуша, К.А.Клюбина, Д.В.Никущенко, Е.Ю.Рытов 537

ОСОБЕННОСТИ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТОЯЧЕЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА
Ф.Ф.Легуша, М.А.Мусакаев, Д.В.Никущенко, Г.В.Чижов 541

ДИССИПАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ВЗВЕШЕННОЙ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ
Ф.Ф.Легуша, Н.М.Лисенков, П.В.Наливкин, М.М.Олейник 438

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ В ОБТЕКАТЕЛЯХ АНТЕНН ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
А.В.Виноградов, В.З.Голдовский 549

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ И ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МЯГКО-ТВЕРДЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВСПЛЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЯ
А.Г.Антонова, А.А.Горелов, В.А.Колышницын, В.П.Маршов, А.М.Цветков, Ю.Ф.Шлемов 552

АКТУАЛЬНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЖИВУЧЕСТИ В АКТИВНО-ПАССИВНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ
А.В.Приходько, Д.О.Кривошея 556

АНАЛИЗ АКВАТОРИЙ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНЫМ СИЛАМ И СРЕДСТВАМ
Д.О.Кривошея, В.Г.Сосунов 559

РАЗВИТИЕ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «ШЕЛЬФ-2014»
Д.Г.Ковзель, В.А.Гриценко, И.В.Медведев 561

СИНХРОНИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ АВТОНОМНЫХ ДОННЫХ СТАНЦИЙ ПО ИМПУЛЬСНЫМ СИГНАЛАМ УДАЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ
В.Г.Ущиповский 565

РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОВОДКИ БАРЖ С КРУПНОГАБАРИТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ В ЗАЛИВ ПИЛЬТУН
В.Е.Нечаюк, А.Н.Рутенко, А.А.Соловьев, M.R.Jenkerson 569

РАЗРАБОТКА ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОГО КЛИМАТА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ
А.А.Куркин, Д.Ю.Тюгин, Д.В.Зезюлин, В.В.Беляков, П.О.Береснев, В.И.Филатов, В.Д.Кузин, П.И.Пронин 573

СПОСОБ НАТУРНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА
А.И.Дмитриева, В.А.Катков, В.В.Надеинский 577

СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БУКСИРУЕМЫХ СЕЙСМОКОС
Е.В.Большаков, С.В.Видихин, С.В.Дунчевская, Д.Е.Лейкин, Д.В.Шелаев 581

РАЗРАБОТКА ИМИТАТОРОВ ВХОДНЫХ ДАННЫХ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
В.В.Прокопович, А.В.Шафранюк 585

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА В ГИДРОАКУСТИКЕ
А.В.Шафранюк, В.В.Прокопович 589

КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И АНТЕНН В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА
С.Н.Карпачев, А.Е.Карпенко, С.Ю.Макаров, Т.С.Никулина, А.А.Селищев 592

ПРИБОРЫ ДЛЯ БЫСТРОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТОРОНЫ
Н.М.Иванов, Е.В.Кондаков 596

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ, ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
Ю.К.Милославский, А.Е.Панич 600

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ИСПОЛЬЗАВАНИЕМ ТНПА
Ю.К.Милославский, А.Е.Панич 604

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА НА ИХ ЧАСТОТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
И.С.Пестерев, Б.Г.Степанов 607

К ВОПРОСУ О КПД СТЕРЖНЕВЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В МАЛОРАЗМЕРНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКЕ
И.И.Стырикович, О.В.Андриянова 612

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ПОЛИФАЗНЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
М.А.Мараховский, В.А.Мараховский, Э.А.Мирющенко, Е.А.Панич 616

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГИДРОФОН НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
С.Н.Галий, В.К.Доля, А.П.Ламека, Д.А.Матешов 620

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННОГО ГИДРОФОНА
С.Ю.Авдюхина, В.М.Агафонов, Е.В.Егоров, Д.Л.Зайцев, М.А.Рыжков 621

ШУМЫ ФОРСИРОВАННОГО ВЫДОХА ЧЕЛОВЕКА И ИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ
В.И.Коренбаум, И.А.Почекутова, В.В.Малаева, А.Е.Костив, М.А.Сафронова, С.Н.Шин 625

НОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА, ВЫЯВЛЯЕМЫЕ МЕТОДОМ СЖАТИЯ ИМПУЛЬСА
А.Д.Ширяев, В.И.Коренбаум 628

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЛЕГКОВОДОЛАЗНОГО ДЫХАТЕЛЬНОГО СНАРЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ
А.Е.Костив, В.И.Коренбаум 631

НАНОДИСПЕРСНЫЙ ИНДИКАТОР СТОЛКНОВЕНИЯ МАССИВНОГО ТЕЛА С ПРЕПЯТСТВИЕМ
В.М.Полунин, П.А.Ряполов, Ю.В.Кобелев, Е.А.Соколов, Н.Э.Карпов 633

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ С НАКЛАДКОЙ
Э.В.Ермолаев, В.И.Махов 637

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ ОБСТАНОВКИ
П.Н.Волгин, В.В. Попович 642

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ЗОН ОБНАРУЖЕНИЯ БИСТАТИЧЕСКИХ И МУЛЬТИСТАТИЧЕСКИХ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ДВУХМЕРНО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
В.В.Малый, Н.Г.Ковалевский, А.А.Морозов, А.В.Юницкий 648

Научное издание

Труды XIV Всероссийской конференции
«Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»

Печатается в редакции авторов с оригинал-макета,
подготовленного СПбФ ИО РАН
Покровской Н.Е.

Подписано к печати 07.05.2018. Формат 70×100 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Уч.изд.л. 39,9. Тираж 150 экз.
Заказ №

Отпечатано в ООО «Переплётный Центр»
190020, Санкт-Петербург, Рижский пр., д.23А
тел./факс: (812) 622-01-23
email: 6220123@mail.ru