

На правах рукописи

ХИЛЬКО Антон Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ
ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В
ОКЕАНИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

специальность
01.04.06 - акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2009 г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
Высшего профессионального образования «Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико - математических наук,
профессор С.Н. Гурбатов

Официальные оппоненты: доктор физико - математических наук,
профессор, В. Г. Петников

кандидат физико - математических наук,
А.И. Малеханов

Ведущая организация: Институт океанологии РАН

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 20 ____ г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.212.166.07 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, корпус 1, радиофизический факультет, аудит. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф. - м.н., доцент



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Методы и средства высокочастотной (ВЧ) акустической дистанционной диагностики и наблюдения малоразмерных неоднородностей океана являются практически важной и актуальной наукоемкой технологией, направленной на освоение ресурсов морского шельфа и окраинных морей. Подобного рода системы наблюдения могут использоваться для подводной навигации и наблюдения при проведении подводных инженерных работ, при контроле несанкционированного присутствия и деятельности в районах расположения нефтегазодобывающих платформ морских газопроводов, а также прибрежных морских сооружений. Кроме того, ВЧ акустическое наблюдение и диагностика могут играть существенную роль при поиске и исследовании полезных ископаемых морского дна, при разведке и контроле биоресурсов, а также при сборе океанической и синоптической информации.

Анализ предыдущих исследований по теме диссертации. Проблема зонального ВЧ гидроакустического (ГА) наблюдения в морских шельфовых зонах сводящаяся к решению обратной задачи построения изображений в плоскостных волноводах в присутствии различного рода шумов и помех, вызывает большой научный и практический интерес.

К настоящему времени при гидроакустическом (ГА) наблюдении в океане используются разработанные в радиолокации методы, основанные на оценках времени запаздывания и доплеровского смещения частоты отраженного от наблюдаемого объекта импульсного сигнала для заданного угла наблюдения, что позволяет определить его положение скорость [1, 2]. Так при гидроакустической подводной навигации на относительно небольших (1÷2 км) дистанциях используют располагаемые на кораблях ВЧ ГА системы, моностатического типа [3]. Однако использование такого рода схем гидроакустической локации не позволяет обеспечить наблюдение объектов в пределах более протяженных (порядка 25 и более кв. км) зон в прибрежных акваториях. Имеющиеся при этом ограничения являются следствием существенного поглощения сигналов, сложности структуры волновых полей, а также флуктуаций сигналов, возникающих за счет случайных вариаций положения приемно-излучающих гидроакустических систем и шумов обтекания при движении корабля. Для решения указанных задач можно попытаться использовать томографические (мультистатические) схемы наблюдения, которые разрабатываются для низкочастотного (НЧ) ГА зонального наблюдения в океане [4-8]. При томографическом НЧ ГА наблюдении в океане используют согласованные с волноводом хорошо распространяющиеся маломодовые импульсные сигналы, что позволяет ослабить влияние реверберационных помех, и уменьшить возникающие из-за поглощения звука в дне потери при распространении [9].

По аналогии с НЧ акустической маломодовой томографией океана для решения зонального ВЧ ГА наблюдения в пределах океанического шельфа можно использовать томографическую (мультистатическую) схему ГА импульсного наблюдения, используя согласованные с волноводом хорошо распространяющиеся волноводные (лучевые) структуры. В диссертации делается попытка развить указанный подход для решения задачи ВЧ ГА наблюдения в шельфовых зонах океана.

Цель работы. Целью диссертации является разработка физических основ, а также методики томографического наблюдения пространственно-локализованных неоднородностей в рефракционных плоскостных случайно-неоднородных волноводах океанического типа с помощью высокочастотных гидроакустических полей, в частности:

1. Разработка моделей возбуждения, распространения и рассеяния, согласованных с океаническим волноводом направленных высокочастотных акустических импульсных сигналов;
2. Построение физической и численной моделей томографического наблюдения неоднородностей;
3. Анализ возможностей наблюдения с помощью высокочастотной акустической томографии в океане путем численных расчетов, а также с помощью натуральных экспериментов в мелком море.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы и подходы, получившие развитие в акустике и радиофизике. В частности для анализа исследования распространения и дифракции высокочастотных импульсных сигналов использовалось лучевое представление полей в волноводах, теория возмущений, в частности, приближение однократного рассеяния и др. Исследование статистической структуры согласованных с волноводом импульсных сигналов осуществлялось также методами численного моделирования. Имитационные компьютерные модели выполнялись с использованием алгоритмических языков Фортран, С++, а также других вычислительных средств. При проведении экспериментальных исследований применялись специально разработанные излучающие и приемные системы, а также методы экспериментальной гидроакустики.

Научная новизна. В работе развит новый метод – высокочастотная акустическая томография океанических волноводов. Метод основан на возбуждении и приеме согласованных с волноводом направленных импульсных сигналов. В работе впервые:

1. Показано, что использование согласованных с волноводом направленных импульсных сигналов приводит к увеличению пространственного разрешения и чувствительности системы томографического наблюдения.
2. Сформулированы условия оптимального возбуждения и приема согласованных с волноводом направленных импульсных сигналов в мелководных океанических волноводах.

3. Исследована структура направленных импульсных сигналов при дифракции на импедансных телах, а также на поверхностных неоднородностях в плоскостных волноводах.
4. Предложен метод высокочастотной акустической томографии мелкого моря, основанный на использовании направленных согласованных с океаническим волноводом импульсных сигналов. Разработана численная модель такого метода наблюдения применительно к шельфовым зонам мелкого моря.
5. Путем численного моделирования и экспериментально в условиях мелкого моря показана возможность томографического наблюдения пространственно-локализованных неоднородностей с помощью высокочастотных импульсных акустических сигналов.

Практическая значимость работы. Материалы диссертации могут быть использованы в осуществляемых в ИПФ РАН, НИЦ РЭВ, ФГУП НИИ «Атолл» и другими организациями исследованиях, направленных на решение практических задач, таких как:

1. Построение высокочастотных акустических систем зонального томографического наблюдения в пределах океанического шельфа;
2. Разработка систем подводной навигации и контроля несанкционированного присутствия в районах расположения морских сооружений;
3. Мониторинг биоресурсов и сбор океанологической информации;
4. Разработка систем звуковидения в морских средах, используемых при проведении подводных инженерных работ.

Апробация результатов работы. Результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных совещаниях конференциях и симпозиумах. Были сделаны доклады на: конференциях по Радиофизике (Нижний Новгород, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008 и 2009 гг.), Нижегородской сессии Российского акустического общества (Нижний Новгород, 2002 г.), X и XI школах-семинарах Л.М. Бреховских по акустике океана (Москва, 2004 и 2006 г.), XIV, XVI и XVII сессиях Российского акустического общества (Москва, 2004, 2005, 2006 гг.), 10-ой Нижегородской сессии молодых ученых (Голубая Ока, 2005 г.), а также Международной конференции «Подводные акустические измерения: технологические результаты» (Герраклион, Греция, 2005 г.). В 2005 г. во время обучения в аспирантуре автор диссертации А.А. Хилько был удостоен стипендии имени академика Г.А.Разуваева. На Сессии РАО в 2005 г. доклад Хилько А.А., включающий результаты диссертационной работы, отмечен грамотой РАО как один из лучших докладов молодых ученых. Результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПФ РАН и кафедры акустики Радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Работы, результаты которых частично вошли в диссертацию, были поддержаны инициативными проектами РФФИ (гранты 03-05-64465, 04-02-16562, 06-02-16589), Программой поддержки научно-исследовательской работы аспирантов государственных образовательных учреждений высшего профессионального образования, находящихся в ведении Федерального агентства по образованию за 2004 г. грант № А04-2.9-1167 «Исследование особенностей рассеяния высокочастотных гидроакустических полей телами и случайно-распределенными неоднородностями в океанической среде»; Программой «Развитие научного потенциала высшей школы» в 2005 году, грант «Разработка методов и алгоритмов адаптивного построения изображений с помощью гидроакустической системы при изменении условий наблюдения» (код проекта 4618), Программой «Ведущие научные школы» (НШ-838.2003.3).

Цикл работ автора по развитию высокочастотных акустических систем наблюдения в океане в 2007 г. получил грант по Программе Американского акустического общества «Поддержка лучших научных работ молодых ученых».

Личный вклад автора. Основные идеи использования высокочастотных акустических направленных импульсных сигналов для диагностики неоднородностей в мелком море сформулированы автором совместно с С.Н. Гурбатовым, И.П. Смирновым и Ю.В. Петуховым. При развитии этих идей автор лично провел исследования возбуждения таких сигналов и их дифракции на телах. Разработка методики расчета рассеяния лучевых структур на телах с криволинейными границами осуществлялась совместно с И.П. Смирновым. В этих работах автор диссертации участвовал в получении основных выражений, разработке численных алгоритмов и анализе с их помощью структуры рассеянных полей в рефракционных океанических волноводах. Исследования по оптимальному возбуждению и приему согласованных с волноводом сфокусированных высокочастотных импульсных сигналов в океанических волноводах осуществлялись совместно с И.П. Смирновым, С.Н. Гурбатовым и Ю.В. Петуховым. При этом автор участвовал в постановке задач, выводе основных соотношений и анализе и формулировке результатов. Он проанализировал возможности наблюдения тел в случайно-неоднородных плоскостных волноводах, а также разработал методики проведения соответствующих экспериментов. Компьютерные эксперименты по исследованию работы систем высокочастотной импульсной томографии были выполнены совместно с И.П. Смирновым. В этих исследованиях автор участвовал в постановке задачи, в разработке методов и алгоритмов, в проведении численных экспериментов и интерпретации полученных результатов. Эксперименты в мелком море были выполнены совместно с В.А. Лазаревым, А.А. Мазаниковым, и А.Н. Нероновым. В этих экспериментах автор участвовал в модернизации узлов экспериментальной системы, проведении измерений, а также в обработке и интерпретации результатов.

Публикации. Всего по теме диссертации автором сделаны 25 публикации: 8 статей в рецензированных журналах, 2 препринта, и 15 докладов в трудах научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы – 177 страницы, включая 166 страниц основного текста, 46 рисунков, трех таблиц и списка литературы из 179 наименований на 10 страницах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование согласованных с волноводом направленных акустических импульсных сигналов при высокочастотной томографии позволяет наблюдать пространственно ограниченные неоднородности в мелком море на дистанциях до 1-5 км. Необходимые для этого сигналы должны возбуждаться и приниматься вертикально развитыми решетками, оптимальные апертурные множители которых определяются с помощью модели волновода;
2. Использование рассчитанных с применением Кирхгофского приближения матриц рассеяния лучевых волноводных структур акустического поля в океане позволяет оценить уровни дифрагированных на импедансных телах ВЧ гидроакустических полей в зависимости от формы и положения тел, а также от характеристик океанических волноводов;
3. Уровни и структура реверберационных помех от ветрового волнения при томографическом наблюдении с помощью направленных высокочастотных акустических импульсов в мелком море определяются локальным пространственным спектром ветрового волнения и характеристиками плоскостойкого волновода;
4. Для конкретных условий в мелком море облик системы акустического наблюдения пространственно-локализованных неоднородностей с помощью направленных высокочастотных импульсов может быть построен с помощью имитационной модели наблюдения, описывающей возбуждение, распространение и дифракцию таких сигналов в плоскостойком волновом;
5. Численные и натурные эксперименты демонстрируют возможности наблюдения пространственно локализованных неоднородностей в мелком море с помощью высокочастотных акустических импульсов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении анализируется современное состояние исследований по теме диссертации и обосновывается её актуальность, формулируются цели работы её научная новизна и прикладная значимость, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются особенности решения задачи высокочастотного (ВЧ) акустического наблюдения пространственно локализованных неоднородностей в плоскостойких океанических волноводах.

Раздел 1.1. посвящен анализу используемых в радиофизике и акустике понятий и принципов, которые используются при решении обратной задачи акустического наблюдения. Кроме того, на основе известных в литературе данных осуществлен анализ типичных океанологических условий при акустическом наблюдении пространственно локализованных неоднородностей в мелководных плоскостойких океанических волноводах. Рассмотрены известные модели, используемые для описания океанических неоднородностей (разделы 1.2 и 1.3). Раздел 1.4 посвящен формулировке обратной задачи ВЧ акустического наблюдения в океаническом волновом в виде интегрального уравнения наблюдения и анализу такого уравнения.

Трудности решения обратной задачи ВЧ акустического наблюдения в океаническом волновом (см. схемы на рис. 1а) связаны, прежде всего, с тем, что ядро соответствующего интегрального уравнения наблюдения имеет

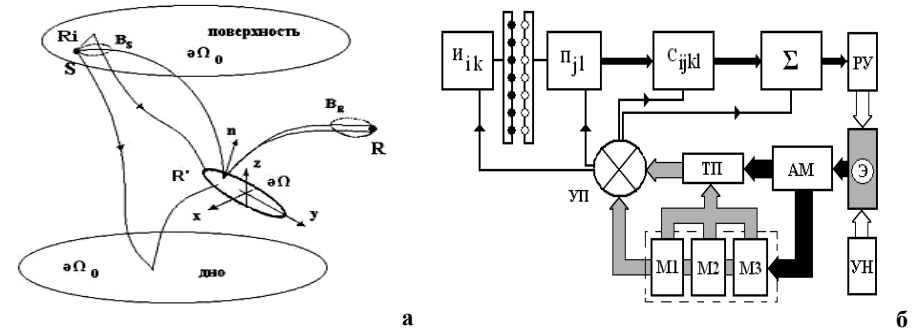


Рис. 1. Расположение основных элементов одной из томографических проекций (а), и блок-схема алгоритма (б) томографического метода ВЧ акустического наблюдения в океаническом волновом. (И и П – блоки формирования согласованных со средой лучевых томографических проекций (i, j, k, l), С – блок сравнения гипотезы о значениях параметров наблюдаемого объекта с измеренными данными, М - модели волновода, шумов и реверберационных помех, Σ и PY – блоки соответственно суммирования и принятия результирующего решения, УП - управления поиском решений, ТП - формирование траектории наискорейшего поиска решения, АМ - адаптация параметров моделей к условиям наблюдения, УН – база данных условий наблюдения, Э – экспертное управление режимами наблюдения).

интерференционную структуру, вследствие чего, его значения часто становятся малыми по величине, что делает решение обратной задачи некорректным. Снижают эффективность акустического наблюдения пространственно локализованных объектов в океаническом волновом и помехи, источниками которых являются случайно распределенные неоднородности среды, а также шумы океана. Для устойчивости решений

задачи акустического наблюдения в таких интервалах параметров, а также ослабления влияния помех необходимо осуществлять операцию регуляризации.

В разделе 1.5. диссертации представлены результаты разработки методов ВЧ акустического наблюдения при использовании томографической (многопозиционной) схемы и доплеровской фильтрации направленных импульсов (блок-схема метода показана на рис. 1б). Предложенный метод основан на подавлении мешающих эффектов деструктивной интерференцией путем формирования томографических проекций, соответствующих согласованных с волноводом лучевых структур с последующим их накоплением.

Для формирования таких лучевых проекций используется согласованная с волноводом когерентная фокусировка излучаемых и принимаемых акустических импульсов в каждую из точек наблюдения (рис. 2). В этом случае реализуется частично-когерентное накопление томографических проекций, что повышает устойчивость решений обратной задачи ВЧ акустического наблюдения в океанических волноводах. Для формирования лучевых томографических проекций предложено использование вертикально

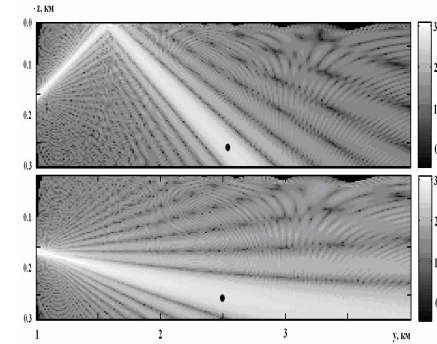


Рис. 2 Распределение интенсивности (в дБ) поля частотой 3 кГц от фазированной антенной решетке из 64 излучателей одинаковой мощности, при формировании поверхностной и водной лучевых томографических проекций для точки наблюдения $y_f = 25, z_f = -0.25$ (км).

метода определение параметров наблюдаемого объекта осуществляется путем статистической проверки формируемых имитационной системой многопараметрических гипотез, в виде согласованные с волноводом импульсных лучевых структур, формируемых с учетом характеристик среды и условий наблюдения.

распределенных решеток с оптимально подобранными согласованными с волноводом положением, размерами и апертурными множителями. Определения указанных характеристик осуществляется с помощью априорной информации о строении акустического волновода в районе наблюдений.

Развитый в разделе метод ВЧ акустической томографии океанических волноводов, основан также на использовании априорной информации в виде моделей объектов наблюдения, помех, среды и структуры системы наблюдения, которые объединяется в имитационную модель наблюдения (рис. 1б). В рамках развиваемого

В разделе 1.6. сформулированы полученные в первой главе результаты по разработке методов решения задачи ВЧ акустического наблюдения пространственно локализованных неоднородностей в мелком море.

Вторая глава посвящена разработке модели дифракции направленных ВЧ акустических импульсов телами в океанических волноводах, которая в дальнейшем используется в составе имитационной модели для решения обратной задачи наблюдения.

В частности, в разделах 2.1- 2.3. в рамках лучевого приближения исследована структура акустических сигналов, рассеянных телами в рефракционных океанического типа волноводах с неровным дном. Для оценки параметров рассеянных сигналов с помощью матрицы рассеяния лучевых волноводных структур использовано кирхгофовское приближение. Это позволило проанализировать пространственно-временную структуру дифрагированных гидроакустических полей в зависимости от формы и положения тел, а также от характеристик океанического волновода. Согласно развитой в разделе модели, результирующее дифрагированное поле

$\varphi_s(\mathbf{R}, \omega_n)$ определяются кроме значений локального импеданса, соотношениями кривизны падающей и наблюдаемой волн, а также значениями гауссовской кривизны поверхности в точках формирования бликов. С учетом лучевого представления поля и функции Грина невозмущенного плоскостойкого гидроакустического волновода на выходе согласованного фильтра $F_0^+(\omega_n)$ дифрагированное поле определяется выражением:

$$\varphi_s(\mathbf{R}, \omega_n) = \sqrt{W\rho_0 c_0} |F_0(\omega_n)|^2 \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^{K'} A_k(\mathbf{R}_i, \mathbf{R}') A_k(\mathbf{R}', \mathbf{R}) B^l(\omega_n, \mathbf{e}_k^l) \times \\ \times B^R(\omega_n, -\mathbf{e}_k^R) \frac{1}{2} R_S(\mathbf{e}_k^S, \mathbf{e}_k^S, \omega_n) \exp(-i\omega(t_k(\mathbf{R}_i, \mathbf{R}') + t_k(\mathbf{R}', \mathbf{R}))),$$

где K и K' - числа лучей, соединяющих фазовые центры источника и приемника с точкой \mathbf{R}_S на поверхности тела, $R_S(\mathbf{e}_k^S, \mathbf{e}_k^S, \omega)$ является эквивалентным радиусом цели (радиусом абсолютно отражающей сферы, создающей в зоне Фраунгофера сигнал того же уровня), $\mathbf{e}_k^S, \mathbf{e}_k^S$ - направления лучей от источника и приемника в точке $S=T$ поверхности тела (см. рис. 1). Для эквивалентного радиуса цели (ЭРЦ) с использованием формул, полученных в случае рассеяния на криволинейных поверхностях в свободном пространстве можно получить:

$$R_S(\mathbf{e}_k^S, \mathbf{e}_k^S, \omega_n) = 0.5 |\Gamma| \cdot |K(n_{kk'})|^{-1/2}, n_{kk'} = -(\mathbf{e}_k^S + \mathbf{e}_k^S) \left\| \mathbf{e}_k^S + \mathbf{e}_k^S \right\|^{-1},$$

где $K(n)$ - полная (гауссова) кривизна поверхности тела в той её точке (блика), где внешняя нормаль к поверхности равна \mathbf{n} , $\Gamma = \Gamma(\langle \mathbf{n}, \mathbf{e}_k^s \rangle)$ - коэффициент отражения от элемента поверхности тела в точке S , который зависит от угла отражения луча от элементарной площадки с заданной нормалью. Условия применимости данной модели определяются неравенствами: $|\lambda| \ll L \cong R_1 \cong R_2$, где L - линейный размер тела, $R_{1,2}$ - главные радиусы кривизны поверхности в точке отражения.

Для анализа особенностей формирования дифрагированных ВЧ акустических сигналов в океанических волноводах были осуществлены численные расчеты для конкретных условий наблюдения, в которых, в качестве дифрактора рассматривалось тело в виде абсолютно жесткого эллипсоида вращения. При вычислениях рассеянных наблюдаемым телом высокочастотных акустических сигналов выделялись лучи, падающие на поверхность тела от источника и приемника в точках бликов. Амплитуда рассеянных волн определялась через кривизну рассеивающей поверхности в таких точках. Трехмерная структура рассеянных сигналов исследовалась путем анализа расчетов, выполненных для плоских сечений (рис. 3) в зависимости от характеристик плоскослоистого волновода с кривым дном, а так же параметров эллипсоида. При этом показано, что при перемещении эллипсоида вдоль прямолинейных расположенных под углом к линии источник - приемник траекторий, формируется не симметричное пространственное распределение областей, в которых эхосигнал имеет большие значения. Показано также, что важным параметром при измерении эхосигналов являются углы компенсации диаграмм направленности источника и приемника в вертикальной плоскости. Их изменение приводит к различной эффективности засветки области расположения эллипсоида в фиксированных интервалах глубин. Установлено, что оптимальные углы компенсации определяются распределением скорости звука по глубине и геометрией задачи. При рассмотренных в работе параметрах задачи, соответствующих часто встречающимся в реальных условиях приповерхностным океаническим волноводам небольшой глубины соответствующее значение углов компенсации оказалось равным девяти градусам. Показано, что структура

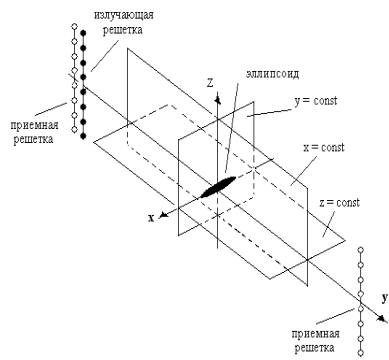


Рис. 3 Схема сечений при построении трехмерного изображения эллипсоида.

эллипсоида вращения. При этом показано, что при перемещении эллипсоида вдоль прямолинейных расположенных под углом к линии источник - приемник траекторий, формируется не симметричное пространственное распределение областей, в которых эхосигнал имеет большие значения. Показано также, что важным параметром при измерении эхосигналов являются углы компенсации диаграмм направленности источника и приемника в вертикальной плоскости. Их изменение приводит к различной эффективности засветки области расположения эллипсоида в фиксированных интервалах глубин. Установлено, что оптимальные углы компенсации определяются распределением скорости звука по глубине и геометрией задачи. При рассмотренных в работе параметрах задачи, соответствующих часто встречающимся в реальных условиях приповерхностным океаническим волноводам небольшой глубины соответствующее значение углов компенсации оказалось равным девяти градусам. Показано, что структура

областей больших значений дифрагированного поля в волноводе для тел анизотропной формы существенно зависит как от его положения, так и от ориентации относительно точек расположения источника и приемной системы. На рис. 4 показан пространственное распределение областей повышенного уровня эхо-сигнала, при перемещении эллипсоида вдоль различных траекторий относительно источника и приемника в горизонтальной плоскости $z = 10$ м, рассчитанные для условий наблюдения в океаническом волноводе с приповерхностным гидроакустическим волноводом.

Раздел 2.4. посвящен обсуждению полученных во второй главе результаты построения модели дифракции ВЧ акустических сигналов на телах, а также анализу структуры акустических сигналов, дифрагированных пространственно локализованных неоднородностей в мелком море.

Построение модели реверберационных помех и шумов при ВЧ акустическом наблюдении в океаническом волноводе в присутствие случайно распределенных неоднородностей океана проанализированы в главе 3. в этом разделе исследовалась структура объемной, донной реверберации, а также поверхностной реверберации, возникающей при рассеянии высокочастотных

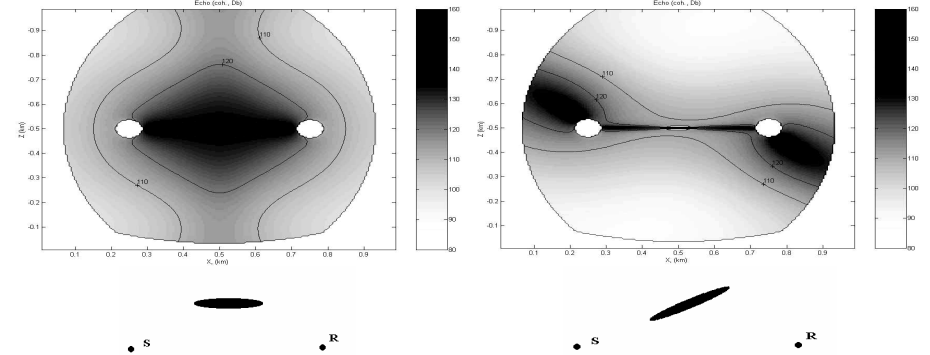


Рис. 4. Пространственное распределение областей повышенного уровня эхосигнала (в дБ) при перемещении эллипсоида вдоль набора траекторий относительно источника и приемника в горизонтальной плоскости $z = 10$ м, в мелком море с летней гидрологией. (Слева – траектории вдоль линии SR, справа – под углом к ней, частота $f = 6$ кГц, абсолютно жесткий эллипсоид вращения с размерами: $a = 1$ м, $b = c = 0.25$ м).

импульсных акустических сигналов на ветровом волнении в океане. В частности, в разделе 3.1. рассматривались особенности формирования реверберации в случае, когда система наблюдения представляла собою источник и приемник в виде вертикальных излучающих и принимающих решеток. При приеме осуществлялась согласованная фильтрация направленных импульсов. Согласно используемой модели, реверберационные сигналы для определенных задержек и доплеровских смещений частот

формировались в виде суммы импульсов рассеянных элементарными площадками, расположенными в пределах соответствующих импульсных объемов, которые попадают в области пересечения диаграмм направленности излучающей и приемной решеток (рис. 5а). Для нахождения суммарного реверберационного сигнала, осуществлялось суммирование по числу лучей, соединяющих источник, точку рассеяния и приемную решетку.

При рассмотрении структуры поверхностной реверберации использовались известные модели определения коэффициентов рассеяния, в частности, модель касательной плоскости, задающая коэффициенты поверхностного рассеяния через распределение наклонов взволнованной поверхности океана. В качестве моделей спектров поверхностного волнения использовались известные эмпирические спектры, в частности, спектр Пирсона-Неймана, спектр JONSWAP, а также гауссов спектр (раздел 3.1.1).

В результате проведенного в разделе 3.2. анализа показано, что после усреднения, реверберационный сигнал с согласованного фильтра будет определяться интегралом по всем телесным углам, в котором область эффективного формирования поверхностной реверберации зависит от трех факторов. Первый из них определяется диаграммами направленности

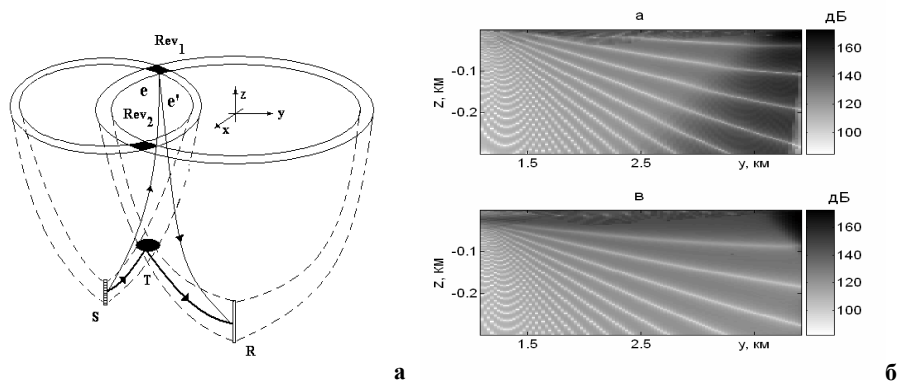


Рис. 5. Особенности формирования поверхностной реверберации (а) и ее распределение (уровень в дБ) при бистатической схеме наблюдения (б): в сечении $x = 3$ км для томографических отраженных от поверхности проекций SS (верхний рисунок) и проекций водных лучей WW (нижний рисунок).

источника и приемника, второй, - амплитудами лучей подсветки, структурой коэффициента рассеяния и затуханием рассеянных лучей, а третий, отражает степень влияния фактора фильтрации согласованного фильтра, согласно которому сигналу с заданными задержками и доплеровскими смещениями частоты будут соответствовать определенные области пространства. На основе численных расчетов показано, что в типичных океанических волноводах, в частности, с положительным и отрицательным градиентом распределения скорости звука по глубине, как при моностатической, так и бистатической

схемах наблюдения можно выделить кольцеобразные области, в которых формируются основная энергонесущая компонента поверхностной реверберации. Формирование таких областей обуславливается, в частности, искривлением энергонесущих лучей, а также их касанием дна. Для конкретных схем наблюдения исследована зависимость размеров таких областей формирования реверберации от параметров задачи, а также структура распределения реверберации по глубине (рис. 5). В частности, показано, что при отрицательном градиенте скорости звука в рефракционном волноводе область формирования реверберации существенно зависит от рельефа дна.

В частности, установлено, что при разнесении источника и приемника (бистатическая схема наблюдения) область формирования основной компоненты поверхностной реверберации располагается между источником и приемником. При этом уровень бистатической реверберации в целом существенно выше уровня, наблюдаемого при моностатической схеме наблюдения.

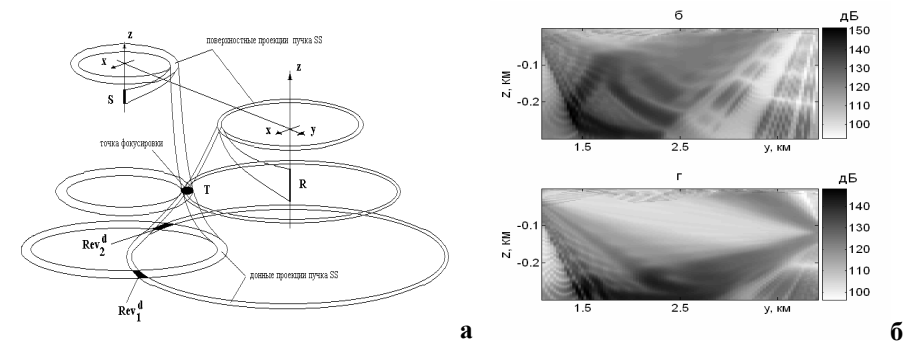


Рис. 6. Формирование донной реверберации при наблюдении эллипсоида в точке $S = T$ вертикально ориентированными излучающей S и приемной R решетками при использовании поверхностных томографической проекции SS (а). Серым цветом обозначены области $(Rev_{1,2}^d)$ формирования донной реверберации. Такие зоны образуются при пересечении донных проекций отраженных от поверхности пучка подсветки и основного лепестка диаграммы направленности приемной решетки. Распределение донной реверберации при бистатической схеме наблюдения в приповерхностном волноводе в сечении $x = 3$ км (б), для поверхностных SS (верхний рисунок) и водных WW (нижний рисунок) томографических проекций.

В разделе 3.3. рассматривались объемная и донная реверберация. Показано, что объемная реверберация возникает вследствие рассеяния зондирующего сигнала на объемных неоднородностях различной природы. Она формируется при суммировании рассеянных в данной точке мощностей рассеянных компонент всех лучей, которые определяются коэффициентами объемного рассеяния, зависящими от пространственного спектра объемных неоднородностей. Такая реверберация относительно слаба.

Для углового спектра донной реверберации будем использовать модель, аналогичную модели, используемой при анализе поверхностной и объемной реверберации (рис. 6). Для определения коэффициента рассеяния на дне использовалась модель рассеяния высокочастотного поля (формула Ламберта). В отличие от случая поверхностного рассеяния от движущегося ветрового волнения, при рассеянии от дна спектр падающих акустических ВЧ сигналов не испытывает доплеровского смещения.

В качестве модели шумов в океанических волноводах (раздел 3.4) рассматривались в основном шумы, создаваемые в пределах малого приповерхностного шумящего слоя связанного, главным образом, с ветровым волнением. В используемой модели полагалось, что мощность, излучаемая заполняющими площадку элементарными источниками в малый телесный угол в направлении точки наблюдения, не зависит от положения точки на поверхности. В приближении геометрической акустики эта мощность распространяется без потерь по бесконечно узкой лучевой трубке.

Суммарная интенсивность шумов на входе гидрофонов приемной антенны определяется интегралом по всей поверхности моря, где с помощью интегрального комплексного коэффициента учитываются потери мощности при распространении в толще жидкости и отражениях от донной поверхности. При этом угловой спектр аддитивных шумов определяется частотно-угловым спектром поверхностных шумов, который в рамках используемой модели определяется эмпирическим законом Крона-Шермана. Согласно используемой модели, уровни шумов в мелком море отличаются большой изменчивостью, что согласуется с экспериментальными данными. В частности, при вариациях скорости ветра от 3 до 20 м/с, величина спектрального уровня шума изменяется в диапазоне 50-70 дБ.

В разделе 3.5. обсуждаются полученные в третьей главе результаты по исследованию структуры помех и шумов при ВЧ акустическом наблюдении пространственно локализованных неоднородностей в мелком море.

Глава 4 посвящена анализу возможностей ВЧ акустического наблюдения пространственно локализованных малоразмерных неоднородностей (тел) в мелководных океанических волноводах методом лучевой импульсной томографии (ЛИТ), основанной на использовании согласованных с волноводом направленных акустических импульсных сигналов. Для оценки эффективности такого метода использовалась имитационная модель акустического наблюдения в океаническом волноводе, включающая в себя совокупность развитых в разделах 2 и 3 моделей возбуждения, распространения, дифракции, а также моделей волновода, условий наблюдения и облика системы наблюдения. Исследуемый метод наблюдения основывается на совместном использовании совокупности пространственно распределенных вертикальных излучающих и приемных антенных решеток.

В результате исследований показано, что в отличие от низкочастотного акустического метода маломодовой томографии океана, при использовании

высокочастотных гидроакустических полей, с помощью вертикально развитых решеток формируются пучки, пространственно локализованные вдоль лучевых траекторий (раздел 4.1). Как следует из анализа и расчетов, для минимизации потерь при излучении и распространении сигналов, ослабления реверберационных помех, а также максимизации отношения сигнала к шуму, приемные и излучающие решетки должны быть согласованно с волноводом сфокусированы в точку расположения наблюдаемой локализованной неоднородности. Поскольку рефракционная среда в океанических волноводах может сама по себе вызывать как фокусировку, так и расфокусировку акустического поля, для его эффективной концентрации в область наблюдения, распределения апертурных множителей решеток адаптируются к строению волновода, таким образом, чтобы скомпенсировать фокусирующее влияние рефракционной среды. При этом апертурные множители для излучающих и приемных решеток для каждой точки фокусировки имеют уникальную структуру.

Помимо фокусировки необходимо также осуществить регуляризацию обратной задачи, выполняемую путем исключения из процесса наблюдения областей параметров (в том числе пространственных областей), для которых измеряемые данные являются недостоверными. Из результатов анализа, представленных в разделе 4.2. следует, что для решения указанной задачи необходимо использовать априорную информацию о шумах реверберационных помех и уровнях рассеянных наблюдаемой неоднородностью зондирующих сигналов. Указанная информация определяется с помощью моделей рассеяния акустических сигналов случайно распределенными и пространственно локализованными неоднородностями в океанических волноводах и данных о параметрах ветра, входящих в состав численной имитационной модели наблюдения. Такая имитационная модель позволяет не только решать задачу акустического проектирования системы ВЧ акустического наблюдения, но и может применяться для выполнения процессорных функций при обработке измеренных данных.

В разделе 4.3 с помощью развитой в предыдущих разделах имитационной модели ВЧ наблюдения в океане исследовалась система томографического наблюдения, состоящая из двух пространственных (моностатической и бистатической) и четырех лучевых проекций, которые формировались при использовании водных и отраженных от поверхности пучков. Для каждой из проекций решающее правило о наличии и параметрах наблюдаемого объекта представляло собой проверку простой гипотезы (объект наблюдения отсутствует) против простой альтернативы (объект наблюдения присутствует). Распределение решающей статистики считалось нормальным. В рамках имитационной модели использовался разработанный И.П. Смирновым эффективный метод расчета ВЧ акустического поля в рефракционных волноводах, при котором траектории лучей представляются C^1 -

непрерывными полиномиальными сплайнами, что позволяет использовать быстрый параметрический способ расчета лучей. Такой подход оказался особенно важным при оценке реверберационных помех, расчет которых связан с обработкой больших массивов лучей.

На основании проведенного в разделе 4.3 численного анализа показано, что эффективным методом томографического наблюдения является поиск наблюдаемого объекта путем оптимального перебора гипотез. Такие гипотезы формируются при нацеливании обеих антенн одновременно в различные точки области наблюдения. В случае нахождения решения задачи, когда положение наблюдаемого объекта соответствует точке нацеливания, уровень принимаемого сигнала заметно превышает средний уровень. Это позволяет оценить параметры наблюдаемой неоднородности, если отношение сигнала к шуму соответствует требованиям необходимым для оценки параметров неоднородности с заданной достоверностью.

С помощью разработанной имитационной модели высокочастотного наблюдения исследована структура парциальных изображений объекта наблюдения, которые формируются при использовании различных томографических проекций системы наблюдения в зависимости от условий в мелком море. Показано, что на основе имитационной модели могут быть решены задачи акустического проектирования системы наблюдения в конкретных морских районах при требуемой эффективности наблюдения (чувствительности и пространственном разрешении).

В частности, такого рода анализ был осуществлен для модели океанического волновода с часто встречающимся в реальных условиях приповерхностным гидроакустическим каналом. В качестве излучающей решетки рассматривалась вертикальная решетка с заполненной апертурой, возбуждающая гармонические сигналы частотой 3 кГц. В качестве приемных решеток рассматривались аналогичные вертикальные решетки из 64 либо 128 гидрофонов, реализующих бистатистическую и моностатическую, а также четыре лучевых томографических проекции, которые формировались отраженными от поверхности SS , водными WW , поверхностно-водными SW и водно-поверхностными WS пучками. Показано, что, для принятых при исследовании условиях наблюдения, при использовании водных пучков, изображение тела (эллипсоида) вытянуто по горизонтали. При использовании поверхностных проекций, формируемое пересекающимися под большими углами пучками изображение эллипсоида в большей степени локализовано в пространстве. Наилучшее пространственное разрешение достигается при совместном использовании всех перечисленных выше томографических проекций. Установлено, что распределение шумов на выходе приемной решетки зависит от характера фокусировки приемной решетки. Так, при фокусировке приемной решетки в точки, расположенные в вертикальном сечении волновода уровень аддитивного шума, при использовании поверхностного канала, нарастает, а

для водного канала ослабляется с глубиной. Указанные отличия особенно существенны при наблюдении объектов на больших глубинах.

В разделе показано, что за счет фокусировки удается в целом значительно подавить уровень поверхностной реверберации. Особенно существенное ослабление реверберационных помех имеет место для областей, расположенных на достаточном удалении от свободной поверхности. При фокусировке антенных решеток в области, расположенные вблизи поверхности у приемной антенной решетки, наблюдается повышенный уровень реверберации, величина которого зависит от выбранных каналов фокусировок антенн. Показано, что для всех томографических проекций, в которых участвуют водные пучки, начиная с глубин расположения средних точек решеток, уровень поверхностной реверберации существенно уменьшается. В отличие от метода наблюдения пространственно локализованных неоднородностей с помощью низкочастотных маломодовых акустических полей в мелком море, где наиболее существенный вклад в помехи вносит донная реверберация, в случае использования направленных высокочастотных полей донная реверберация на 2-3 порядка меньше поверхностной реверберации. Это, прежде всего, обуславливается существенным ослаблением поля при его отражении от дна под различными углами. При расположении излучающей и приемной решеток на различных глубинах формируется асимметрия распределения уровней донной реверберации по горизонтали.

В разделе 4.3. показано, что положение эллипсоида в океанических волноводах можно оценить с помощью вертикально ориентированных антенных излучающих и приемных решеток. В случае гармонических сигналов это оказывается возможным благодаря формированию пространственно направленных пучков. Пространственное разрешение при таком способе наблюдения определяется зонами пересечения проекции зондирующего пучка и диаграммы направленности приемной решетки. При этом пространственное разрешение будет зависеть от положения объекта наблюдения в поле зрения. Наихудшим оно будет для случаев, когда объект располагается на линии источник-приемник. Поскольку при использовании набора лучевых и пространственных томографических проекций наблюдение объекта осуществляется под разными углами, суммарное по проекциям изображение будет иметь достаточно высокое пространственное разрешение.

Существенная пространственная размытость изображения эллипсоида при наблюдении с помощью вертикальных излучающей и приемной решеток затрудняет оценку положения эллипсоида в горизонтальной плоскости (рис. 7). В общем случае для повышения пространственного разрешения при наблюдении следует в качестве зондирующих импульсов использовать сложные импульсные сигналы. Пространственное разрешение в этом случае будет определяться длиной импульсных объемов сжатых при согласованной фильтрации. При этом пространственные области, пересечения излучаемых

пучков и диаграмм направленности приемных решеток, будут дополнительно разбиты на элементы толщиной, определяемой длиной сжатых импульсов. Уточнение положения эллипсоида достигается селекцией сигналов при временном стробировании задержек, соответствующих отдельным импульсным объемам.

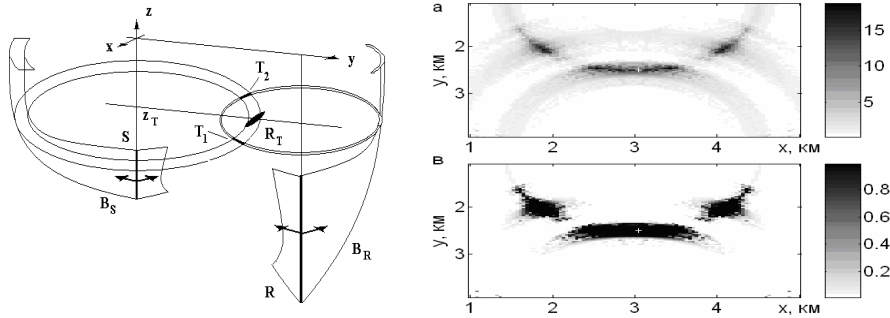


Рис. 7. Формирование горизонтального сечения бистатического изображения расположенного в точке R_T эллипсоида вертикально ориентированными излучающей S и приемной R решетками при использовании томографической проекции WW (левый рисунок, на котором серым цветом обозначены сечения фокусированного в плоскость $z = z_T$ зондирующего акустического пучка B_S и направленной в ту же точку диаграммы направленности приемной решетки B_R , когда зоны наблюдения T_1 и T_2 образуются при пересечении проекций пучка подсветки и основного лепестка диаграммы направленности приемной решетки в плоскости $z = z_T$). Горизонтальные распределения отношения сигнала к шуму на выходе приемной решетки (а) и изображения эллипсоида (в) в сечении $z = -0.02$ км, рассчитанные при бистатической схеме наблюдения для томографических проекций SS , когда эллипсоид был расположен на глубине $z_T = -0.02$ км, в обозначенной крестиком точке $x_T = 3$, $y_T = 2.5$ (км).

Использование набора пространственных томографических проекций и накопление соответствующих парциальных изображений приводит к дополнительному повышению точности оценки положения эллипсоида. Пространственное разрешение в этом случае определяется общей зоной пересечения всех лучевых и пространственных томографических проекций (рис. 8). Чувствительность при таком томографическом наблюдении определяется числом проекций и способом их накопления. Накопление парциальных изображений в зависимости от взаимного расположения источников и приемных систем, шумов и помех, может состоять в когерентном либо некогерентном их суммировании, а также в логическом накоплении вероятностей. Предварительные расчеты характеристики поля зрения с помощью имитационной модели позволяют осуществлять регуляризацию обратной задачи наблюдения, заключающуюся в исключении из наблюдения областей параметров, при которых измеряемые данные могут быть заведомо не достоверными. С учетом этого можно сформировать

оптимальную траекторию перебора гипотез, соответствующую скорейшему поиску решения задачи в виде значений параметров наблюдаемого объекта (в рассмотренном простейшем случае, определения положения тела).

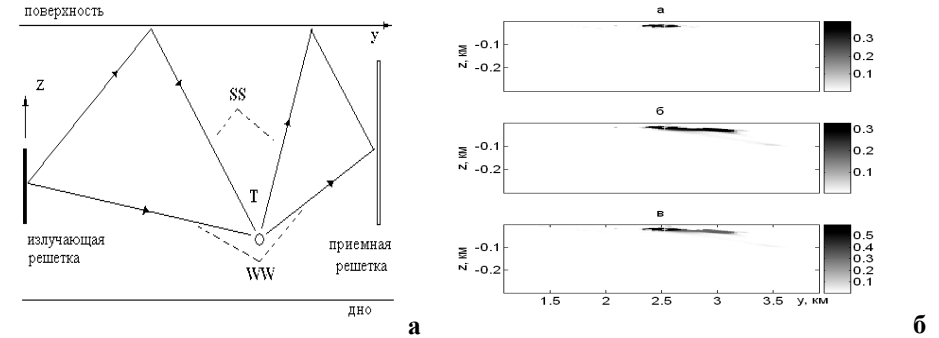


Рис. 8. Схема формирования томографических лучевых проекций SS , SW , WS , WW (слева) и вероятности правильного обнаружения для бистатической проекции: а — лучевая проекция SS , б — проекция SW , в — сложение вероятностей для лучевых проекций SS , SW , WS , WW (справа).

Раздел 4.4. посвящен обсуждению полученных в четвертой главе результатов анализа эффективности ВЧ акустического наблюдения пространственно локализованных неоднородностей в мелком море.

В разделе 5 описаны условия и результаты натурных экспериментов, подтверждающих эффективность метода томографического наблюдения подводных объектов с помощью высокочастотного звука. Экспериментально исследованы возможности томографического наблюдения малоразмерных пространственно локализованных неоднородностей в условиях мелкого моря, в случае, когда в качестве сигналов акустической подсветки использовались высокочастотные частотно-модулированные импульсы. В экспериментах реализовывалась пространственная схема наблюдения, включающая в себя совокупность угловых и частотных томографических проекций. При измерениях (рис. 9) использовался широкополосный излучатель и удаленный на некоторое расстояние приемный гидрофон. Основная идея апробирования томографического метода акустического наблюдения в морских условиях заключалась в использовании совместной обработки набора томографических проекций, которые возникали при перемещении наблюдаемого объекта — рассеивающей сферы, относительно точечного широкополосного излучателя и отнесенного на некоторое расстояние приемного гидрофона. Совместная обработка совокупности частотных и пространственных томографических проекций позволила получить устойчивую оценку параметров наблюдаемой неоднородности. Для этого осуществлялась регуляризация обратной задачи наблюдения, заключающаяся в отбрасывании недостоверно измеренных данных. Для выполнения указанной процедуры наблюдения использовалась

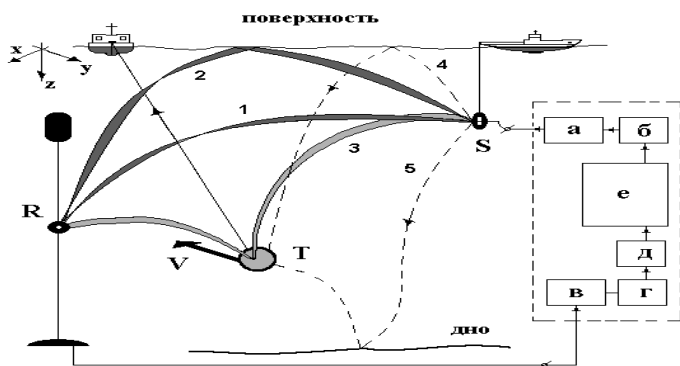


Рис. 9. Расположение основных элементов при акустическом наблюдении объекта в мелком море и схема возбуждения и обработки измеряемых сигналов: R – приемный гидрофон, S – источник акустических импульсных сигналов, T – рассеивающий объект (сфера), V – направление и скорость перемещения сферы. Цифрами показаны: 1, 3 – водные лучи, и лучи, отраженные от поверхности (2, 4) и от дна (5). Схема управления и обработки сигналов включает в себя: усилитель мощности (а), формирователь импульсных сигналов (б), усилитель (в), АЦП (г), архиватор и накопитель (д), систему управления и обработки данных (е).

априорная информация в виде предварительных данных об условиях проведения эксперимента, в том числе, в виде модели формирования сигнала и помех. При изменении положения наблюдаемого объекта, в качестве которого использовалась металлическая сфера, за счет изменения пространственных задержек между прямым импульсным сигналом и сигналом, рассеянным сферой менялись параметры интерференционной структуры результирующих сигналов. Для формирования гипотез использовалась априорная информация в виде модели изменения интерференционной структуры наблюдаемых сигналов представленной совокупностью значений вектора параметров, описывающих траекторию смещения сферы. Для проверки гипотез использовались решающая статистика в виде невязки измеряемых данных и гипотез. Параметры решающего правила оптимизировались в соответствие со статистической структурой шумов и помех. При таком методе решения обратной задачи, полученные после оценивания значения параметров, являются изображением объекта, отличия которого от объекта можно характеризовать, например, смещением и дисперсией. Для нахождения решения обратной задачи в используемом методе осуществлялся поиск глобального экстремума критерия в интервале возможных значений параметров изображения. Для определения интервала возможных вариаций параметров использовалась априорная информация о характеристиках экспериментальной системы наблюдения. Они определялись следующими значениями: диапазон скоростей перемещений сферы изменялась в интервале

(0.2÷0.5) м/сек; глубина источника составляла 7.5 м; глубина приемника 12.1 м; скорость звука в волноводе 1470 м/сек; расстояние между источником и приемным гидрофоном в горизонтальной плоскости 111 м; определяемая условиями буксировки глубина перемещения сферы составляла ориентировочно 8 м. Прицельное расстояние приблизительно равнялось половине расстояния между источником и приемником.

Измерения рассеянного сигнала производились в мелководном районе. Рассеиватель представлял собой сферу, что позволило ослабить зависимость величины дифрагированного сигнала от углов подсветки и наблюдения. Для выделения рассеянных сигналов на фоне помех, а также разделения водных и поверхностных волн были использованы основанные на априорной информации об излучаемых акустических сигналах методы фильтрации принятого излучения. Измерения выполнялись в морской губе шириной около 500 м и глубиной места в среднем 25 м. Монопольный акустический источник (сфера диаметром 75 мм) зафиксированный с помощью якоря на глубине 7,5 м, работал в полосе частот $\Delta\Omega=4\div 13$ кГц. Длительность каждого линейно частотно модулированного импульсного сигнала составляла одну секунду.

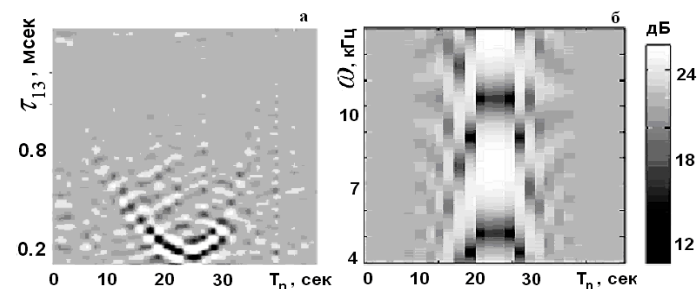


Рис. 10. Вид коррелограммы после подавления волны, отраженной от поверхности воды (а) и соответствующий ей динамический спектр (б).

Период импульсов составлял $\Delta T=1.5$ секунды. Излучение источника принималось сферическим гидрофоном диаметром 50 мм. Рассеивающая сфера диаметром 0.4 м из металла покрытого пенопластом с грузом перемещалась по траектории нормальной к акустической трассе между источником и приемником пересекающей её в точке 55 м, равноудаленной от источника и приемника. Траектория перемещения находилась на глубине около 8 м, со скоростью около 0.3 м/сек. Волнение моря во время измерений не превышало 0,5 балла. Согласно условиям проведения измерений, интегрирование по времени осуществлялось в интервале, равном 1.5 сек, а частота дискретизаций составляла 30 кГц. При этом двумерный сигнал имел 45 независимых отсчетов вдоль оси времени и 60 - вдоль оси задержек. Для решения задачи наблюдения использовались экспериментально измеренные

значения решающей статистики $\Delta(\tilde{\mathbf{p}}) = \left\langle [s(t) - m(t, \tilde{\mathbf{p}})]^p \right\rangle_{T\Omega} = Extr$, при значениях $T = \Delta T n$, $p = 2$. В качестве оценки принимались значения решающей статистики $\Delta(\tilde{z}_T, \tilde{V}_T)$, удовлетворяющие требованиям достоверности, в которых величины \tilde{z}_T и \tilde{V}_T являлись оценками параметров траектории сферы, в частности, её глубиной и скоростью перемещения сферы вдоль траектории.

В процессе обработки измеренных сигналов осуществлялась фильтрация шумов и помех с использованием эмпирических моделей, полученных измерением сигналов в отсутствие сигналов акустической подсветки. На втором этапе обработки принятых сигналов каждый ЛЧМ импульс стробировался по времени интервалом, равным длительности импульса, и формировалась двумерная структура распределения в виде динамической спектрограммы импульсов при перемещении сферы. На рис. 10. показана полученная таким образом динамическая автокорреляционная функция, соответствующая интерференции водного сигнала акустической подсветки и сигналов, рассеянных перемещающейся сферой.

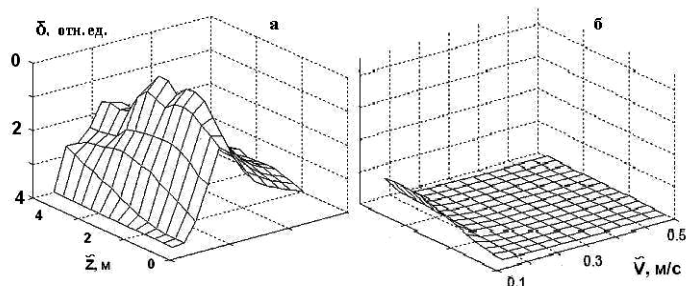


Рис. 11. Результаты оценки компонент вектора наблюдаемых параметров траектории перемещающейся сферы $\Delta(\tilde{z}_T, \tilde{V}_T)$ в присутствии (а) и отсутствии (б) сферы и сечения $\Delta(\tilde{z}_T, \tilde{V}_T)$ при $\tilde{z}_T = 1.6$ м (в) и $\tilde{V}_T = 0.3$ м/с (г), цифрами показаны значения невязки в присутствии (1) и отсутствии (2) сферы.

На рис. 11. показаны результаты оценки параметров траектории смещения сферы на основании анализа значений решающей статистики. Как следует из результатов обработки, структура решающей статистики позволила достаточно точно оценить скорость смещения сферы, которая, исходя из измеренных данных, составила $\tilde{V}_T^0 = (0.29 \pm 0.08)$ м/сек. Полученная оценка такого параметр является достаточно устойчивой к влиянию шумов. Как и при моделировании, в зависимости от глубины траектории измеренная невязка имеет двухэкстремальную структуру, что может объясняться влиянием шумов. При принятии решения на основе экспериментальных данных в качестве оценки

для значения глубины протяжки сферы следует принять соответствующую глобальному экстремуму величину $\tilde{z}_T^0 = (1.6 \pm 0.15)$ м. Как показывают результаты экспериментов по ВЧ акустическому наблюдению в морской среде, точность полученных оценок наблюдаемых параметров перемещающейся сферы ограничивается несколькими факторами, связанными с условиями проведения эксперимента. В частности, мощность используемого в измерениях акустического излучателя была не достаточной, что не позволило провести достоверные измерения полезных сигналов в присутствии шумов, в частности, для больших удалений сферы от источника и приемника. Другое ограничение связано с особенностью протяжки сферы и недостаточной точностью определения её истинной траектории перемещения. При перемещении имело место подвсплытие сферы, при этом используемые при наблюдении модели описывали истинный вид траектории сферы не достаточно точно. Наконец, для получения более достоверных данных необходимо провести в одних и тех же условиях набор экспериментов, что позволило бы получить оценку статистического распределения сигналов и реверберационных помех и точнее оценить параметры траектории перемещения сферы.

В разделе 5.3. обсуждаются полученные в пятой главе результаты экспериментальной проверки эффективности ВЧ акустического наблюдения пространственно локализованных неоднородностей в мелком море. В частности, сформулирован вывод о том, что описанные в настоящем разделе результаты экспериментов, несмотря на ограничения, связанные с условиями проведения экспериментов и использованным оборудованием, в целом подтверждают эффективность метода томографического наблюдения подводных объектов с помощью высокочастотного звука в океанических волноводах.

В Заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана модель рассеяния высокочастотных акустических полей телами с криволинейной поверхностью в плоскослоистых рефракционных волноводах, согласно которой рассеянное поле является суммой лучевых компонент, каждая из которых определяется значениями локального импеданса, соотношением кривизны фронта падающей и наблюдаемой лучевых структур, а также значениями гауссовской кривизны поверхности в соответствующих лучам точках формирования бликов. С помощью модели оценены параметры рассеянных эллипсоидом вращения узкополосных гидроакустических (ГА) сложно модулированных импульсов, возбуждаемых и принимаемых вертикальными решетками в зависимости от характеристик излучаемых импульсов, формы и положения эллипсоида, а также характеристик волновода для типичных условий мелкого моря.
2. В борновском приближении развита модель формирования высокочастотной поверхностной и донной реверберации в мелком море при

- возбуждении и приеме узкополосных гидроакустических сложно модулированных импульсов с помощью вертикальных пространственно-разнесенных решеток. С использованием этой модели проанализирована зависимость пространственно-временной структуры гидроакустической реверберации от характеристик ветрового волнения. Получены оценки величины реверберационных помех при наблюдении рассеянных телом импульсных сигналов в зависимости от положения тела, параметров гидроакустического волновода и формы излучаемых импульсов.
3. Согласованная с волноводом акустическая импульсная томография океана развита применительно к оценке положения малоразмерных тел в мелком море с помощью высокочастотного поля. Метод решения такой задачи основан на совместной обработке совокупности мультистатистических проекций наблюдения, которые формируются путем возбуждения и приема вертикальными излучающими и приемными решетками сложно модулированных импульсов, соответствующих хорошо распространяющимся в волноводе лучевым структурам (водным и поверхностным пучкам). Такие пучки фокусируются в предполагаемые точки расположения наблюдаемых тел на основе использования модели океанического волновода.
 4. С помощью численной модели лучевой импульсной томографии для конкретных районов мелкого моря получены оценки структуры поля зрения и пространственного разрешения при наблюдении тела в форме вытянутого эллипсоида вращения. Оценки приведены для близких к реальным данным по гидрологии и батиметрии в районе наблюдения, типичных значений скорости и направления ветра, наблюдаемых в реальных условиях структуры и интенсивности шумов океана. Анализ проведен для используемых в практике схем наблюдения.
 5. Возможность оценки параметров движения малоразмерных тел была подтверждена в ходе натурных морских экспериментов в мелком море при движении заглубленной металлической сферы. Наблюдение осуществлялось с использованием томографических проекций, формируемых при излучении высокочастотных акустических широкополосных сложно модулированных импульсов и перемещения сферы, относительно пространственно разнесенных излучателя и приемного гидрофона.

Цитируемая литература

1. *Финкельштейн М.И.* Основы радиолокации. М.: Радио и связь. 1983. – 536 с.
2. «Барьер-Е» - комплекс обнаружения низколетящих малозаметных целей методом локации «на просвет» / Официальный сайт ФГУП «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники» (ННИИРТ, г. Нижний Новгород) // <http://www.nniirt.ru/>.
3. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение. 1978. 444 с.

4. *Munk W., Worcester P., and Wunsch C.* Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press. 1995. 433p.
5. *Munk W., Wunsch C.* Ocean Acoustic Tomography a Scheme for Large Scale Monitoring. // Deep Sea Research. 1979. V. 26A. P. 123 – 161.
6. *Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртенов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН. 1997. 254с.
7. *Зайцев В.Ю., Нечаев А.Г., Островский Л.А.* Об алгоритме трехмерной модовой томографии океана // Акустический журнал. 1987. Т. 33, № 6. С. 456-462.
8. *Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Акустическая дифракционная томография океана // Известия Вузов. Радиофизика. 1993, Т.36, N 8, С. 738-751.
9. *Бурдуковская В.Г., Лучинин А.Г., Хилько А.И.* Маломодовая импульсная томография неоднородностей в океанических волноводах / Методы акустической диагностики неоднородных сред / Ред. В.А. Зверев. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2002 г. СС. 9 -30.

Список работ по теме диссертации

1. *Смирнов А.И., Хилько А.А.* Об одном алгоритме расчета лучей в рефракционной среде в присутствии криволинейных поверхностей. Труды (пятой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А. Андропова. 7 мая 2001 г. /Ред. А.В. Якимова - Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2001. С. 213-214.
2. *Смирнов И.П., Хилько А.А., Смирнова И.Р.* Исследование структуры высокочастотных акустических полей, дифрагированных на эллипсоиде в мелком море. Труды Нижегородской акустической научной сессии. ТАЛАМ, 2002. С. 88-90.
3. *Смирнов И.П., Хилько А.А., Хилько А.И.* Моделирование высокочастотных акустических полей, рассеянных на телах сложной формы в океанических волноводах. Н. Новгород: ИПФРАН. 2003. Препринт № 619. 27с.
4. *Смирнов И.П., Хилько А.И., Хилько А.А.* О формировании высокочастотной поверхностной реверберации в мелком море при импульсном зондировании вертикально развитой решеткой Сб. докладов Седьмой Научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2003г., С. 253-254.
5. *Смирнов И.П., Хилько А.И., Хилько А.А.* Стохастические модели рассеяния высокочастотных акустических импульсов на ветровом волнении в океанических волноводах. Нижний Новгород, Препринт № 634 ИПФ РАН, 2003 г. 43 с.
6. *Смирнов И.П., Хилько А.А., Хилько А.И.* Моделирование высокочастотных акустических полей, рассеянных на телах в рефракционных волноводах // Известия Вуз. Радиофизика. 2004. Т. 47. №2. С. 111-128.
7. *Смирнова И.Р., Хилько А.А.* Особенности формирования поверхностной реверберации высокочастотных направленных импульсных сигналов в

- мелком море. Сб. X научной школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» и XIV сессии РАО. Москва: ГЕОС. 2004. СС 304-308.
8. *Ivan P. Smirnov, Sergey N. Gurbatov and Anton A. Khil'ko.* Scattering of the high-frequency acoustic field by impedance ellipsoid in shallow water oceanic waveguides / Proceedings of the International Conference "Underwater Acoustic Measurements: Technologies Results", Heraklion, Crete, Greece, 28th June – 1st, July, 2005. PP. 124-130.
 9. *Смирнов И.П., Смирнова И.Р., Хилько А.А.* Возможности использования лучевого хаоса для томографии океана I. Анализ статистики времен распространения. Препринт ИПФ РАН № 680. 2005 г. 21 с.
 10. *Смирнов И.П., Гурбатов С.Н., Хилько А.А.* О структуре высокочастотных акустических полей рассеянных импедансным телом в горизонтально неоднородном плоскостойком волноводе океанического типа / Сб. трудов XVI сессии Российского акустического общества. Москва, 14 -18 ноября 2005 г.
 11. *Смирнов И.П., Гурбатов С.Н., Хилько А.А.* Формирование высокочастотной поверхностной реверберации при возбуждении направленных акустических импульсов в океанических волноводах // Известия Вуз. Радиофизика. 2006. Т.49. № 5. СС. 369-380.
 12. *Гурбатов С.Н., Смирнов И.П., Хилько А.А.* Рассеяние высокочастотных акустических полей дифрагированных на эллипсоиде в мелком море / Сборник докладов X Нижегородской сессии молодых ученых, Голубая Ока, 2005. С.38-42.
 13. *Петухов Ю.В., Хилько А.А.* Формирование многомодовых акустических пучков с минимальным расхождением волнового фронта в океанических волноводах / Сб. трудов XI научной школы-семинара памяти акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» и XV сессии РАО. Москва: ГЕОС. 2006. СС 304-308.
 14. *Смирнов И.П., Хилько А.А.* Томография океана в условиях лучевого хаоса. I. Статистика времен распространения // Известия Вуз. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 3. С.126-132.
 15. *Петухов Ю.В., Хилько А.А.* Формирование, распространение и фокусировка акустических пучков в океанических волноводах. I. Квазиоптическое приближение // Акустический журнал. 2008. Т. 54. №5. С. 796-806.
 16. *Петухов Ю.В., Хилько А.А.* Формирование, распространение и фокусировка акустических пучков в океанических волноводах. II. Численное моделирование // Акустический журнал. 2008. Т. 54. №6. С. 981-989..
 17. *Мазанников А.А., Неронов А.Н., Журавлев В.А., Лазарев В.А., Башев Д.В., Хилько А.А.* Экспериментальное исследование малоугловой дифракции высокочастотных звуковых ЛЧМ импульсов на сфере в мелком море / Сб.

- докладов Девятой Научной конференции по радиофизике. / Ред. А.В. Якимова - Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005г., С. 201-202.
18. *Абросимов Д.И., Петухов Ю.В., Хилько А.А.* Формирование и фокусировка акустических пучков в стратифицированных океанических волноводах / Сб. докладов Девятой Научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005 г., С. 112-118.
 19. *Смирнов И.П., Хилько А.А.* Исследование возможностей наблюдения тел в рефракционных плоскостойких волноводах приемными решетками при подсветке фокусированным акустическим полем / Сб. докладов Десятой Научной конференции по радиофизике / Ред. А.В. Якимова - Нижний Новгород - ТАЛАМ, 2006 г., С. 224-226.
 20. *Лазарев В.А., Мазанников А.А., Неронов А.Н., Хилько А.А.* Экспериментальная оценка параметров сферы, с помощью высокочастотно модулированных гидроакустических импульсов // Акустический журнал. 2009. Т.55, № 2. С.198-207
 21. *Смирнов И.П., Хилько А.И., Хилько А.А.* Томографическое наблюдение пространственно локализованных неоднородностей мелкого моря вертикальными приёмными решётками при зондировании фокусированным высокочастотным акустическим полем. I. Структура имитационной модели // Известия Вуз. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 2. С.134-148.
 22. *Смирнов И.П., Хилько А.И., Хилько А.А.* Томографическое наблюдение пространственно локализованных неоднородностей мелкого моря вертикальными приёмными решётками при зондировании фокусированным высокочастотным акустическим полем. II. Исследование эффективности наблюдения // Известия Вуз. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 3. С. 192-207.
 23. *Смирнов И.П., Хилько А.А.* Томография неоднородностей мелкого моря при зондировании фокусированным высокочастотным акустическим полем / Труды Нижегородской акустической научной сессии. ТАЛАМ, 2007. С. 160-162.
 24. *Смирнов И.П., Хилько А.А.* «Наблюдение перемещающихся локализованных неоднородностей в мелком море с помощью ВЧ акустической томографии / Труды Нижегородской акустической научной сессии / Ред. А.В. Якимова - Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2008.
 25. *Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Трофимов А.Т., Трусова О.И., Хилько А.И., Хилько А.А.* Экспериментальное исследование особенностей наблюдения локализованных неоднородностей с помощью сложных высокочастотных акустических импульсов в мелком море / Труды Нижегородской акустической научной сессии / Ред. А.В. Якимова - Нижний Новгород: ТАЛАМ. 2009.

Оглавление диссертации

Содержание	2
Введение	5
1. Построение томографического изображения пространственно локализованной неоднородности с помощью высокочастотных гидроакустических полей в океанической среде	13
1.1. Анализ основных понятий высокочастотного акустического наблюдения в океане	13
1.2. Типичные условия и модели океана при высокочастотном акустическом наблюдении	15
1.3. Характеристики наблюдаемых неоднородностей	17
1.4. Формулировка задачи высокочастотного акустического наблюдения в океанических волноводах	19
1.4.1. Модели океанических неоднородностей	21
1.4.2. Анализ особенностей уравнения высокочастотного акустического наблюдения в океане	26
1.4.3. Структура ядра уравнения наблюдения при разложении поля по парциальным волнам океанического волновода	28
1.5. Решение задачи высокочастотного акустического наблюдения в океане методом согласованной со средой томографии	31
1.5.1. Формирование согласованных с океаническим волноводом томографических проекций	32
1.5.2. Использование параметрических моделей при осуществлении высокочастотного томографического наблюдения	37
1.6. Выводы к разделу 1.	51
2. Исследование особенностей рассеяния высокочастотных импульсов на телах в океанических волноводах	53
2.1. Структура высокочастотного акустического поля в рефракционной плоскостройной среде в присутствии тел и криволинейных поверхностей	53
2.2. Анализ структуры поля рассеянного телом в океанических волноводах	59
2.3. Рассеяние высокочастотных звуковых импульсов телом в океаническом волноводе	74
2.4. Выводы к разделу 2.	76
3. Структура реверберационных помех и шумов при высокочастотной импульсной акустической томографии в океане	78
3.1. Формирование высокочастотной поверхностной реверберации в рефракционном плоскостройном волноводе при моностатической и бистатической схеме наблюдения	80

3.1.1. Модели пространственного и частотного спектров ветрового волнения	83
3.1.2. Структура сигналов поверхностной реверберации на выходе приемной антенной решетки	85
3.2. Структура областей эффективного формирования поверхностной реверберации	89
3.3. Модели и структура объемной и донной высокочастотной реверберации в рефракционном плоскостройном волноводе	96
3.4. Структура аддитивных шумов при высокочастотном акустическом наблюдении в океанических волноводах	98
3.5. Выводы к разделу 3.	102
4. Томографическое наблюдение тел в рефракционных плоскостройных волноводах приемными решетками при подсветке фокусированным акустическим полем	104
4.1. Анализ возможностей формирования акустических пучков в океане	107
4.1.1. Формирование акустических пучков с минимальным расхождением волнового фронта	110
4.2. Структура имитационной модели высокочастотного наблюдения в океанических волноводах	114
4.2.1. Максимизация эхосигнала и правило принятия решения о значениях параметров объекта наблюдения	119
4.3. Исследование эффективности высокочастотного акустического наблюдения тел в морской среде с помощью имитационной модели	123
4.3.1. Бистатическая томографическая проекция	125
4.3.2. Моностатическая томографическая проекция	138
4.3.3. Томографическое наблюдение пространственно локализованной неоднородности в мелком море	141
4.4. Выводы к разделу 4.	145
5. Экспериментальное исследование рассеяния высокочастотных гидроакустических импульсных сигналов на телах в мелком море	150
5.1. Описание условий проведения экспериментов, результаты измерений параметров рассеянных импульсов	155
5.2. Сравнение полученных в ходе эксперимента результатов с результатами, полученными путем компьютерного моделирования методом минимизации невязки	157
5.3. Выводы к разделу 5.	165
Заключение	166
Литература	168

Хилько Антон Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ
ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В
ОКЕАНИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Автореферат

Подписано к печати 11.11.2009 г.
Формат 60х90 1/16. Бумага писчая №1.
Усл. печ. Л. 2.0. Тираж 100 экз. Заказ № (2009).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46