

*На правах рукописи*

ТИТЧЕНКО Юрий Андреевич

**ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И  
МИКРОВОЛНОВЫХ ЛОКАТОРОВ С ДИАГРАММАМИ  
НАПРАВЛЕННОСТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ**

25.00.29–физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород  
2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Караев Владимир Юрьевич  
(ИПФ РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Переслегин Сергей Владимирович  
(Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт океанологии им.  
П.П. Ширшова Российской академии наук)

кандидат физико-математических наук  
Смирнов Михаил Тимофеевич  
(Фрязинский филиал Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова Российской академии  
наук)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт космических  
исследований Российской академии наук

Защита состоится 27 июня 2016 г. в 16 часов на заседании диссертационного  
совета Д002.069.01 в ИПФ РАН по адресу: 603950 Нижний Новгород, ГСП-  
120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ИПФ  
РАН и на его официальном сайте (<http://www.ipfran.ru/>).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

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

А. И. Малеханов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Первые математические исследования рассеяния звуковых и электромагнитных волн на периодических шероховатых поверхностях при малой высоте неровностей, по сравнению с длиной падающей волны, были проведены Рэлеем [1] в конце 19 века и Мандельштамом [2] в первой половине 20 века. Уже к 40-м годам была разработана исчерпывающая теория расчёта характеристик рассеянных на статистически неровной поверхности волн методом возмущений [3, 4]. Первые экспериментальные работы 50-х годов по рассеянию метровых и декаметровых электромагнитных [5, 6] и акустических волн [7, 8] морской поверхностью показали возможность определения высоты и направления морских волн по интенсивности отраженного сигнала. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования позволили в конечном итоге установить достоверные связи между флуктуационными характеристиками рассеянных сигналов и параметрами морского волнения, а также разработать конкретные методы определения этих параметров [9].

Противоположный случай сколь угодно больших, по сравнению с длиной падающей волны, но пологих неровностей, рассмотрели Бреховских [10] и Исакович [11] с помощью метода касательной плоскости (метод Кирхгофа) в начале 50-х годов. Дальнейшая разработка теории шла по линии развития приближения малых возмущений [12, 13] и метода Кирхгофа [14, 15].

Результаты первых экспериментов по исследованию радиолокационного отражения СВЧ радиоволн морской поверхности [16, 17] не могли быть объяснены ни методом возмущений, ни методом Кирхгофа. Действительно, с одной стороны длина радиоволн этого диапазона сравнима, а зачастую и намного меньше высот морских волн. Таким образом, не выполняются условия применимости метода возмущений. С другой стороны, процесс рассеяния не может быть описан методом касательной плоскости, так как характерные радиусы кривизны поверхности сравнимы с длиной волны излучения. Аналогичные трудности возникли и в задачах гидроакустики при исследовании рассеяния звука 1-100 кГц на поверхности моря [18]. Существенный прогресс в этом направлении был достигнут благодаря совместному применению обоих методов теории дифракции на поверхности с непрерывным широким спектром неровностей с помощью двухмасштабной модели [19], и к началу 70-х годов разработка соответствующей теории была фактически завершена [20]. В настоящее время модели, базирующиеся на этих двух методах и их комбинациях, часто применяются для объяснения экспериментальных данных [21]. Основным недостатком двухмасштабной модели является отсутствие строгого критерия разбиения поверхностных

волн на крупные и мелкие, что допускает некоторый произвол выбора параметров модели.

В 1983 году Вороновичем был предложен новый подход [22] для расчета рассеяния на статистически неровной поверхности, называемый методом малых наклонов. Метод лишен недостатка двухмасштабной модели, требующей делить поверхностные волны на две части. Основным условием применимости этого приближения является малость наклонов поверхностных неровностей, что всегда выполняется для морской поверхности. Результаты расчетов по методу малых наклонов не противоречат двухмасштабной модели и сходным образом описывают рассеяние в СВЧ и ультразвуковом диапазонах. Основным недостатком метода малых наклонов является сложность решения обратной задачи восстановления параметров поверхностного волнения по данным измерения характеристик рассеяния.

Запущенный в 1978 году первый океанографический спутник Seasat-A [23], имевший на борту обширный арсенал радиолокационных средств, стал серьезным стимулом для развития теорий рассеяния морской поверхностью. Это событие ознаменовало начало эры космической радиоокеанографии.

На сегодняшний день космическая радиолокация предоставляет основной объем информации о приповерхностном слое Мирового океана и успешно применяется для решения задач судоходства, сельскохозяйственной деятельности, обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и составления прогнозов погоды. Сложность задачи рассеяния электромагнитных или акустических волн морской поверхностью привела к тому, что к настоящему моменту разработано более двух десятков математических моделей рассеяния [21], способных качественно объяснить значительную часть наблюдаемых эффектов. В основном модели строятся для расчета прямой задачи зондирования, вычисления характеристик рассеяния и остаются в интегральном виде, что не подразумевает аналитического решения обратной задачи. Для решения обратной задачи построены эмпирические регрессионные модели для скаттерометров [24], радиовысотометров [25, 26], радиолокаторов с синтезированной апертурой [27] и бистатистических систем, основанных на спутниковых навигационных системах [28]. Разработанные алгоритмы позволяют восстанавливать поле приповерхностного ветра. Современное развитие методов дистанционного зондирования морской поверхности направлено на увеличение количества измеряемых величин и повышение точности восстановления параметров волнения и скорости ветра. Например, измерение дисперсии наклонов поверхности позволит увеличить точность существующих регрессионных алгоритмов восстановления скорости ветра [29].

Однако возможности существующих космических методов дистанционного зондирования ограничиваются возможностями средств наземной валидации и верификации алгоритмов обработки. В частности, в

настоящее время предложены алгоритмы восстановления дисперсии наклонов поверхности по данным измерений спутника глобальной миссии изучения осадков GPM [30]. Однако новая информация не может использоваться из-за отсутствия надежных средств наземной валидации, т.к. традиционно используемые для валидации морские буи не могут обеспечить измерение дисперсии наклонов.

Для измерения параметров волнения разработаны разнообразные виды волнографов (см., например, [31]). Наиболее точными являются струнные и лазерные волнографы. Однако их существенным недостатком является необходимость крепления приборов неподвижно, что резко ограничивает возможность их применения в открытом море в автономном режиме.

Достоверными источниками данных о поверхностном волнении являются морские буи, расположенные в разных акваториях Мирового океана. Помимо спектра крупномасштабного волнения, буи измеряют следующие важные характеристики приповерхностного слоя: скорость и направление ветра, температуру воды и воздуха, интенсивность осадков. Сведения, поступающие от буюв, активно используются для калибровки алгоритмов обработки радиолокационных данных. В настоящее время в Мировом океане работает около 1500 волномерных буюв, используемых для оценки эффективности алгоритмов обработки. Традиционные методы измерения волнения морскими буюями не позволяют точно измерять параметры поверхности, влияющие на рассеяние радиолокационного сигнала в сантиметровом диапазоне длин волн. Расхождение между наклонами, измеренными морским буюем, и наклонами, измеряемыми радиолокатором может достигать порядка.

В результате возможности радиолокации опережают текущее состояние наземной измерительной аппаратуры и этот разрыв продолжает увеличиваться, так как активно ведется разработка новых спутниковых систем. Однако без синхронного развития калибровочной аппаратуры возможности дистанционного зондирования водной поверхности из космоса будут сильно ограничены.

Прорывом в решении задач подспутниковых измерений и наземной калибровки может стать использование методов подводной акустики. Это позволит проводить измерения в любом месте Мирового океана без использования стационарных платформ, не возмущая саму измеряемую поверхность. Кроме того, подводная акустика может работать в любых условиях, например, в сильных штормах и во время осадков, в Северном ледовитом океане, а также в замерзающих внутренних водоемах.

Измерение дисперсии высот с помощью подводных акустических систем хорошо известно, например, [32]. С помощью этих систем может быть измерен частотно-угловой спектр крупных морских волн и дисперсия орбитальных скоростей. Однако из-за плохого пространственного

разрешения, определяющегося глубиной установки подводной системы, шириной диаграммы направленности и используемыми алгоритмами обработки, эти системы не могут быть использованы для измерения дисперсии наклонов и других статистических моментов волнения второго порядка, необходимых для анализа обратного рассеяния радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона.

Так как статистические характеристики отраженных сигналов для акустических и радиолокационных систем будут одинаковыми при использовании одинаковой длины волны [11, 20], то можно перейти к непосредственному измерению тех характеристик поверхности (дисперсии наклонов в двух перпендикулярных плоскостях, дисперсии вертикальной скорости, коэффициента взаимной корреляции наклонов в двух перпендикулярных плоскостях, коэффициентов взаимной корреляции наклонов и вертикальной скорости), которые влияют на рассеяние электромагнитных волн, с помощью подводных высокочастотных акустических систем. Такой подход впервые позволяет миновать стадию измерения спектра волнения в натуральных условиях и решает вопрос сравнения моделей рассеяния.

Однако при высокочастотном акустическом (ультразвуковом) зондировании большое значение приобретает вклад в отраженный сигнал рассеяние на пузырьках, что резко ограничивает область углов, в которых можно принять сигнал, отраженный непосредственно морской поверхностью. Вклад рассеяния на пузырьках в отраженный сигнал становится значительным при средних углах зондирования в моностатической задаче, когда механизм обратного рассеяния становится резонансным, и растет с увеличением угла падения и частоты сигнала. Таким образом, нельзя просто перенести существующие радиолокационные схемы измерений и, например, «повторить» скаттерометр, работающий при средних углах падения, а требуется разработка новых методов измерений.

При малых углах падения (в квазизеркальной области) вкладом пузырьков можно пренебречь по сравнению с зеркальным отражением от водной поверхности. Именно в этой области и предлагается проводить подспутниковые измерения характеристик рассеивающей поверхности подводными акустическими средствами. Эти измерители могут быть как моностатическими и выполнять измерения участков поверхности, расположенных над собой, так и бистатическими, производя измерения на некотором удалении, зависящем от расстояния между приемником и передатчиком и глубины погружения.

Высота волнения не оказывает непосредственного влияния на процесс обратного рассеяния (спектральные и энергетические характеристики отраженного сигнала), поэтому она не восстанавливается при использовании предлагаемой схемы измерения. В то же время, высота волнения является

одним из важнейших параметров, характеризующих волнение, и желательно, уметь измерять этот параметр. В связи с этим применим к измерению высоты волнения акустическими методами подход, хорошо зарекомендовавший себя в радиолокации [33], основанный на анализе формы отраженного импульса.

### **Цель работы**

Работа посвящена развитию теоретических и экспериментальных подходов в задаче измерения параметров поверхностного волнения по спектральным и энергетическим характеристикам отраженных электромагнитных и акустических волн. Достижение этой цели потребовало решения следующих задач:

- построение модифицированной модели квазизеркального рассеяния волн различной природы морской поверхностью, устанавливающей взаимосвязь характеристик отраженных волн с параметрами поверхностного волнения, параметрами антенной системы и схемой измерения;
- развитие методов решения обратной задачи – определения параметров поверхностного волнения по сечению обратного рассеяния и доплеровскому спектру отраженных волн;
- разработка программного обеспечения для компьютерного моделирования эксперимента. Выполнение оценки эффективности разработанных методов решения прямой и обратной задачи на модельных данных;
- экспериментальная проверка разработанной модели и методов измерения параметров поверхностного волнения.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется новыми методами исследования и оригинальными результатами, полученными впервые:

1. Развита модифицированная модель квазизеркального рассеяния для случая бистатического радиолокационного и акустического зондирования, учитывающая разные диаграммы направленности приемной и передающей антенн. Получены формулы, устанавливающие в явном виде связь между сечением рассеяния, шириной и смещением доплеровского спектра волн, отраженных морской поверхностью, с одной стороны и вторыми моментами поверхностного волнения и параметрами антенн с другой;

2. Разработаны методы восстановления всех параметров поверхностного волнения, влияющих на сечение рассеяния, ширину и смещение доплеровского спектра отраженных электромагнитных и акустических волн.

3. Разработан алгоритм восстановления значительной высоты волнения по форме отраженного морской поверхностью импульса при использовании

радиолокатора или гидролокатора с широкими диаграммами направленности антенн.

4. Спроектированы и изготовлены два действующих макета акустических волнографов, с помощью которых в натуральных условиях подтверждена работоспособность предлагаемых методов и алгоритмов решения обратной задачи дистанционного зондирования.

5. Показана возможность дистанционной диагностики параметров дождя акустическими методами, путем анализа спектральных и энергетических характеристик отраженных волн при подводном наблюдении.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Все вторые статистические моменты поверхностного волнения могут быть восстановлены в бистатистической и моностатистической схемах измерений по спектральным и энергетическим характеристикам отраженного акустического или радиолокационного излучения при квазизеркальном отражении от морской поверхности.

2. Идентичность связей спектральных и энергетических характеристик волн, отраженных морской поверхностью, с параметрами волнения в случаях электромагнитного и акустического полей позволяет использовать подводные акустические волнографы в ходе подспутниковых экспериментов для калибровки космических радиолокаторов.

3. Подводный акустический волнограф может быть использован для измерения параметров поверхностного волнения во время осадков и для дистанционной диагностики дождя на основе данных об изменениях спектральных и энергетических характеристик отраженного излучения.

4. Развитая теоретическая модель квазизеркального отражения от морской поверхности при бистатистическом зондировании позволяет создавать методы измерения параметров волнения акустическими локаторами на значительном расстоянии от места установки в горизонтальной плоскости.

#### **Достоверность научных результатов**

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служат результаты качественного и количественного сравнения данных, полученных в натуральных экспериментах дистанционными методами, с данными контактных измерений, данными численного моделирования и аналитических расчетов. Физическая трактовка полученных результатов находится в согласии с общепризнанными представлениями о рассеянии волн на статистически шероховатых поверхностях. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, препринтах, докладывались на международных и всероссийских конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

## **Научная и практическая значимость работы**

Результаты работы составляют научно-методическую основу нового метода, который впервые позволит дистанционно измерять ключевые характеристики поверхностного волнения, влияющего на рассеяние волн морской поверхностью. Метод может быть использован для расширения числа измеряемых параметров морской поверхности в перспективных системах дистанционного зондирования как бистатических, так и моностатических. Метод основан на анализе спектральных и энергетических характеристик отраженного сигнала. Это могут быть подводные, наземные и космические средства. Например, в бистатической задаче применения спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования морской поверхности можно восстанавливать дисперсию наклонов поверхности в двух направлениях, используя две приемные антенны с различными диаграммами направленности. Разработанные в диссертационной работе методики позволят увеличить число измеряемых параметров при использовании перспективных бистатических радаров с синтезированной апертурой антенны [34] предназначенных для работы в квазизеркальной области.

## **Апробация результатов работы и публикации**

Диссертация выполнена в Институте прикладной физики РАН. Данная работа была выполнена в рамках проектов РФФИ (инициативных, региональных, международных, экспедиционных и молодежных), гранта Правительства Российской Федерации (11.G34.31.0048), программы президиума РАН «Радиофизика», программе «УМНИК» (№5119ГУ1/2014), Федеральной космической программы России на 2006-2015 годы, программы сотрудничества с Японским космическим агентством 2013-2015, а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии от 26 августа 2014 года 14.607.21.0055 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60714X0055).

Основные результаты и положения работы были доложены на:

Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016; Пятнадцатой научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород; Девятой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва; Четвертой и Пятой всероссийской научной конференции "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" в рамках Вторых Армандовских чтений, Муром, 2012, 2014; Научной школе «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2012», Бор; 50-й юбилейной Международной научной студенческой конференции «Студент и

научно-технический прогресс», Новосибирск; Конференции IGARSS 2014 and 35th Canadian Symposium on Remote Sensing Symposium, Квебек, Канада; 17-й, 18-й и 19-й сессии молодых ученых, Арзамас, 2012, 2013, 2014; Конференции Pan Ocean Remote Sensing conference (PORSEC-2012), Кочин, Индия; Конференции 13th URSI Commission F Triennial Open Symposium on Radiowave Propagation and Remote Sensing, Оттава, Канада; Конференции 40th COSPAR Scientific Assembly, Москва; Конференции PORSEC 2014 the 12th Biennial Conference, Бали, Индонезия; Конференции Radio Science Conference (URSI AT-RASC), 2015, Гран Канария, Испания; Конференции The 5th Pacific Rim Underwater Acoustics Conference, Владивосток; Конференции IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, Маврикий; На семинарах ИПФ РАН.

Автор удостоился ряда наград за проводимые исследования:

Диплом третьей степени за работу, представленную на пятидесятую юбилейную Международную научную студенческую конференцию «Студент и научно-технический прогресс», 2012 г; Грамота за второе место на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук 2012 г; Диплом 3-й степени за представление доклада на 18-й Нижегородской сессии молодых ученых Министерство образования Нижегородской области 2013 г.; Лауреат стипендии правительства Нижегородской области им. Г. А. Разуваева, 2013, 2014, 2015; Лауреат стипендии президента РФ молодым ученым и аспирантам на 2016-2018.

Результаты работы приведены в 4 статьях, опубликованных в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных Президиумом Высшей аттестационной комиссии, в 1 патенте, в 2 препринтах ИПФ РАН, в 5 трудах конференций и в 18 тезисах конференций.

### **Личный вклад автора**

Все результаты работы были получены непосредственно автором, включая построение модифицированной модели квазизеркального рассеяния волн взволнованной водной поверхностью, разработку методов восстановления параметров волнения, проведение лабораторных и натурных экспериментов на Горьковском водохранилище и Черном море, создание комплекса программ для обработки данных численного моделирования и натурных экспериментов. Кроме того автор принимал участие в разработке и тестовых испытаниях акустических волнографов, проводил обработку данных струнного волнографа, радиолокатора и акустических волнографов.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, приложений, списка литературы и списка публикаций автора. Объем диссертации

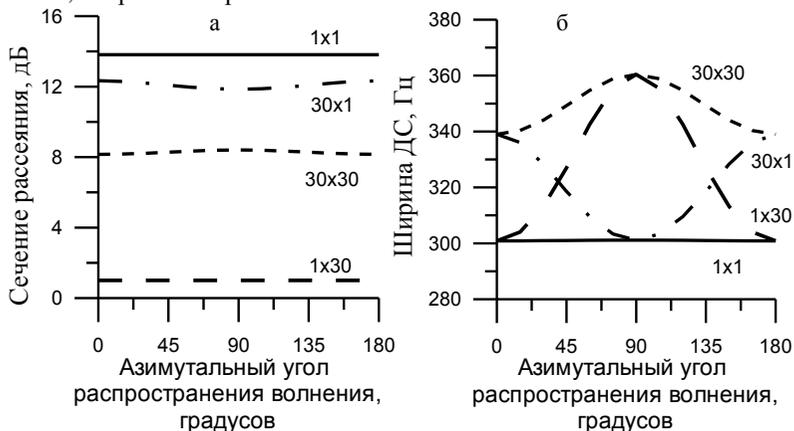
составляет 159 страниц, включая 75 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 115 наименований, включая работы автора.

### Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, указана научная новизна, обоснована научная и практическая значимость работы, определен личный вклад автора.

В **Главе 1** приведен вывод модифицированной модели рассеяния, описывающей спектральные и энергетические характеристики отраженных морской поверхностью волн для квазизеркального рассеяния в случае бистатистического зондирования. Для вычислений отраженного поля в **разделе 1.2** применяется метод касательной плоскости и рассматривается случай неподвижных излучателя и приемника с разными диаграммами направленности (ДН) антенн.

Используемый подход позволил получить аналитические выражения для сечения рассеяния, ширины и смещения доплеровского спектра (ДС) волн, рассеянных морской поверхностью в **разделе 1.3**. Зависимости характеристик рассеяния от азимутального угла распространения волнения для различных ДН антенн при бистатистическом зондировании показаны на рис. 1. Углы скольжения падающей и отраженной волны равны  $30^\circ$ . Азимутальный угол наблюдения равен  $0^\circ$ . Азимутальный угол отсчитывается от оси X, скорости ветра 10 м/с.



**Рис. 1.** Характеристики отраженного сигнала (а - сечение рассеяния, б - ширина ДС) от азимутального угла распространения волнения. Сплошная –  $1^\circ \times 1^\circ$ , штрих-пунктирная –  $30^\circ \times 1^\circ$ , короткие штрихи –  $30^\circ \times 30^\circ$ , длинные штрихи –  $1^\circ \times 30^\circ$

Если возьмем узкую ДН антенн, то ширина доплеровского спектра и сечение обратного рассеяния окажутся нечувствительными к направлению

распространения волнения. Совершенно другая ситуация наблюдается для широких и ножевых ДН антенн. В этом случае наблюдаются азимутальные зависимости ширины доплеровского спектра, следовательно при такой схеме наблюдения можно измерить направление распространения волнения.

Формулы, полученные в данной главе, справедливы для акустических волн, однако они могут быть применены для электромагнитного излучения в случае совпадения поляризаций излучаемой и принимаемой волны без изменений. Для электромагнитных волн формулы будут отличаться только коэффициентом, не зависящим от формы поверхности, поэтому статистическая картина будет одинаковой в обоих случаях. В разделе 1.4 проводится сравнение различных вариантов предварительной обработки доплеровских спектров, полученных в результате численного эксперимента, и методов оценки ширины спектра на уровне -10 дБ от максимума. Значения ширины доплеровского спектра в дальнейшем используется для восстановления параметров поверхностного волнения.

В **Главе 2** рассматриваются задачи восстановления основных параметров поверхностного волнения по данным зондирования морской поверхности акустическими системами различной конфигурации.

В разделе 2.2 рассматривается задача применения подводного акустического волнографа, оснащенного одной приемо-передающей антенной, для измерения дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости при вертикальном зондировании. В этом случае ширина ДС определяется в основном дисперсией вертикальной скорости. Оценку дисперсии вертикальной скорости можно получить на основе измерений ширины ДС, пренебрегая остальными характеристиками волнения.

В разделе 2.3 приводятся различные варианты обработки данных одноканального струнного волнографа. С помощью численного моделирования, в разделе 2.4 анализируется возможность сопоставления параметров волнения, измеренных акустическим и струнным волнографами. Показано, что по данным акустического волнографа ожидается более быстрое накопление достоверной оценки, чем по измерениям струнного волнографа. А сами оценки по короткой реализации могут существенно отличаться, что в условиях изменчивости волнения может приводить к расхождениям между измерениями струнного и акустического волнографов. При длительном накоплении результаты численных экспериментов со струнным и акустическим волнографами будут совпадать со значениями, использованными для моделирования волнения.

В разделе 2.5 обсуждается зондирование водной поверхности моностатической антенной системой, состоящей из двух приемо-передающих антенн, при углах зондирования близких к вертикали. Антенны имеют ножевые диаграммы направленности (ДН) и ориентированы

перпендикулярно друг другу. Такая конфигурация антенной системы позволяет восстанавливать все основные статистические характеристики рассеивающей поверхности и эффективный коэффициент отражения.

В разделе 2.6 решается задача измерения параметров волнения при использовании схемы акустического волнографа с одной излучающей и тремя приемными антеннами при вертикальном зондировании. Излучающая антенна имеет широкую симметричную ДН, так же как и одна из приемных антенн. Две другие приемные антенны имеют ножевые ДН и ориентированы перпендикулярно друг другу. Такая конфигурация позволяет восстанавливать все основные параметры поверхностного волнения, влияющие на отраженный сигнал. Отметим, что использование только одной излучающей антенны позволяет избежать проблемы совместимости при одновременной работе нескольких приемо-передающих антенн в едином антенном блоке. Результаты численного моделирования эксперимента с данной конфигурацией антенной системы подтвердили работоспособность предложенного метода.

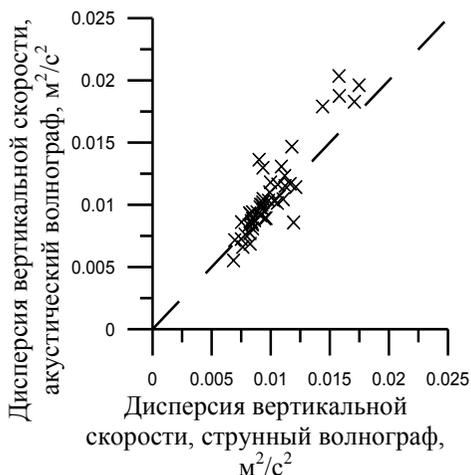
В разделе 2.7 выполнено теоретическое исследование влияния дождя на сечение обратного рассеяния и ДС отраженных морской поверхностью акустических волн в условиях ветрового волнения. С увеличением интенсивности дождя сечение обратного рассеяния при вертикальном зондировании уменьшается, т.к. растет дисперсия наклонов поверхностного волнения, определяемая высокочастотной частью спектра. Предложен алгоритм диагностики дождя по данным акустического волнографа. Нечувствительность ширины ДС к дождю связана с тем, что в случае ветрового волнения дождь оказывает незначительное влияние на дисперсию вертикальной скорости отражающих участков. В результате по изменению сечения рассеяния, при постоянной ширине ДС отраженных акустических волн, при подводном наблюдении, можно диагностировать наличие дождя.

Сечение рассеяния и параметры ДС в квазизеркальной области отражения не зависят от высоты волн, однако этот параметр чрезвычайно важен для прикладных задач. Поэтому, в разделе 2.8, рассмотрен принцип измерения высоты морских волн с применением подводного импульсного гидролокатора оснащенного одной приемо-передающей антенной с широкой симметричной ДН. Для анализа в этом случае используется длина переднего фронта отраженного импульса. Данный подход измерения высоты защищен патентом [61].

Разработанные в данной Главе методы и алгоритмы получены для акустических волн, однако они могут быть распространены и на электромагнитные волны для случая одинаковых излучаемой и приемной поляризации без существенных изменений.

**Глава 3** посвящена экспериментальной проверке методов решения прямой и обратной задач дистанционного зондирования поверхностного волнения, предложенных в первой и второй главе. В разделе 3.2 приводятся результаты применения в натуральных условиях первого акустического волнографа, изготовленного в ИПФ РАН в 2011 году.

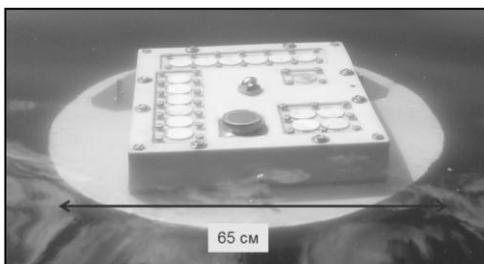
Гидролокатор первого акустического волнографа оснащен одной приемопередающей антенной, что позволяет проводить измерения ширины доплеровского спектра (ДС), сечения рассеяния и восстанавливать дисперсию вертикальной составляющей орбитальной скорости. Для контроля эффективности восстановления параметров поверхностного волнения в экспериментах использовался струнный волнограф или велась запись условий формирования волнения (скорость ветра, длина ветрового разгона). На рис. 2 показано сравнение дисперсий вертикальной составляющей орбитальной скорости, измеренных акустическим и струнным волнографами. Метод обработки данных сначала был протестирован с помощью численного моделирования измерений струнного и акустического волнографов в **Главе 2** и показал свою работоспособность. Обработка данных натуральных экспериментов также подтвердила применимость разработанного метода.



**Рис. 2.** Сравнение дисперсий вертикальной скорости, измеренных акустическим и струнным волнографами

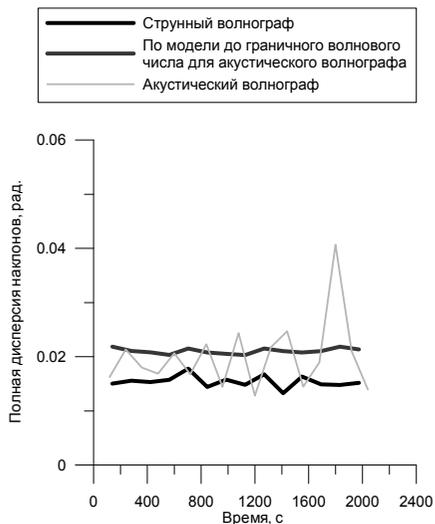
В разделе 3.3 приведены результаты исследования влияния дождя на характеристики отраженного акустического сигнала. В результате лабораторных экспериментов в условиях искусственного дождя получена оценка изменчивости ДС и дисперсии вертикальной скорости при слабом волнении.

В 2013 году в ИПФ РАН был изготовлен следующий вариант акустического волнографа, рис. 3, реализующий схему с одной излучающей широкой симметричной антенной и тремя приемными антеннами с разными ДН. Так же в новый прибор был интегрирован дополнительный блок акустического высотомера, позволяющий записывать форму отраженного водной поверхностью импульса.



**Рис. 3.** Фотография акустического волнографа, оснащенного одной излучающей и тремя приемными антеннами

антенны и выполнено сравнение с модельными оценками, полученными на основе данных струнного волнографа.



**Рис. 4.** Временные зависимости полных дисперсий наклонов полученных по экспериментальным данным акустического и струнного волнографа, а так же по модели спектра волнения

волнения, а не параметры ветра как это обычно делается.

В разделе 3.4 выполнено сравнение параметров поверхностного волнения (дисперсии вертикальной скорости и дисперсии наклонов, см. рис. 4), восстановленных по данным нового акустического волнографа, с данными струнного волнографа.

В ходе эксперимента на платформе были проведены измерения доплеровским радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны. Результаты эксперимента и сравнение приведено в разделе 3.5. В ходе эксперимента по изучению обратного рассеяния радиолокационного сигнала при малых углах падения исследовалась зависимость характеристик отраженного сигнала от азимутального угла поворота антенны. Скорость и направление ветра регистрировались с помощью метеостанции, а параметры волнения измерялись одноканальным струнным волнографом. Сравнение экспериментальных данных с оценками по теоретической модели показало хорошее совпадение, что подтверждает работоспособность предложенной в первой главе модели сечения рассеяния, ширины и смещения ДС волн, отраженных морской поверхностью. Показано, что при анализе спектральных и энергетических характеристик отраженных волн необходимо учитывать параметры поверхностного

На Горьковском водохранилище было проведено первое натурное испытание акустического высотомера, результаты которого приводятся в разделе 3.6. Проведенные эксперименты показали возможность измерения высоты значительного волнения импульсным высотомером с широкой ДН антенны.

**В Заключение** сформулированы основные результаты работы:

1. Развита модифицированная модель квазизеркального рассеяния для случая бистатического радиолокационного и акустического зондирования, учитывающая разные асимметричные диаграммы направленности приемной и передающей антенн. Получены формулы, устанавливающие в явном виде связь между сечением рассеяния, шириной и смещением доплеровского спектра волн, отраженных морской поверхностью, с одной стороны и вторыми моментами поверхностного волнения и параметрами антенн с другой. Включение в модель диаграммы направленности антенн позволяет подбирать схему измерений и корректно решать обратную задачу. Модифицированная модель рассеяния закладывает основу для расширения числа измеряемых параметров морской поверхности в перспективных системах дистанционного зондирования как бистатических, так и моностатических.

2. Проведено сравнение разных вариантов предварительной обработки доплеровского спектра и методов оценки его ширины на уровне  $-10$  дБ от максимума. Оценки ширины доплеровского спектра, полученные на основе анализа данных численного моделирования разными методами, дают разный результат и это необходимо учитывать при сравнении ширин. Критерием накопления статистически достоверной оценки является близость всех вариантов обработки доплеровского спектра.

3. Для зондирующей системы, состоящей из одной приемо-передающей антенны, разработан алгоритм восстановления дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости. С помощью численного моделирования исследовалась точность алгоритма и была подтверждена его эффективность. Проведено исследование возможностей акустического волнографа с одной приемо-передающей антенной в натурном эксперименте. Показано, что акустический волнограф с одной антенной является удобным автономным прибором для измерения интенсивности обратного рассеяния, ширины доплеровского спектра отраженного акустического сигнала и восстановления дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости.

4. Получено аналитическое решение задачи восстановления параметров волнения для моностатического зондирования с помощью неподвижной системы, состоящей из двух приемо-передающих антенн, при углах зондирования близких к вертикали. Такая конфигурация антенной системы позволяет восстанавливать все основные вторые моменты

поверхностного волнения, влияющие на рассеяние, и эффективный коэффициент отражения, зависящий от мелкокомасштабной ряби. Оценка точности предлагаемого алгоритма восстановления подтвердила его работоспособность.

5. Разработан метод измерения параметров волнения при использовании схемы измерений с одной излучающей и тремя приемными антеннами при вертикальном зондировании. С помощью численного моделирования подтверждена эффективность метода. В результате натурных испытаний подводного доплеровского акустического волнографа подтверждена работоспособность метода. В частности, точно измеряются дисперсии наклонов и вертикальная составляющая орбитальной скорости.

6. Разработан алгоритм восстановления значительной высоты волнения с помощью подводной импульсной акустической системы. В разработанном алгоритме восстановления высоты волнения входным параметром является длительность переднего фронта отраженного импульса. Первые натурные испытания подводного акустического высотомера подтвердили возможность измерения высоты волнения импульсным гидролокатором с широкой диаграммой направленности антенны.

7. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния дождя на характеристики отраженных акустических волн при подводном наблюдении поверхностного волнения. Показана возможность дистанционной диагностики дождя акустическими методами, путем анализа спектральных и энергетических характеристик отраженных волн.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория звука. / Рэлей: Гостехиздат, 1955.
2. Мандельштам Л. И. О шероховатости свободной поверхности жидкости // Полн. собр. трудов. – Ленинград: изд-во АН СССР, 1948. – С. 246-260.
3. Андронов А. А., Леонтович М. А. К теории молекулярного рассеяния на поверхности жидкостей // Собр. трудов А.А.Андронова изд-во АН СССР, 1956. – С. 5-18.
4. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль реальной поверхности // Сб. Исследования по распространению радиоволн / под ред. Введенского Б. А. Изд-во АН СССР, 1948.
5. Радиоокеанографические исследования морского волнения. / Брауде С. Я. – Киев: АН УССР, 1962.
6. Распространение ультракоротких радиоволн. пер. с англ.; Под ред. под ред. Шиллерова В. А. – Москва: «Сов. радио», 1954. пер. с англ.
7. Hoover R. M., Urick R. I. Sea Clutter in Radar and Sonar // IRE Nat. Conv. Record –1957. – Т. 5, № 9. – С. 17—22
8. Eckart C. The Scattering of Sound from the Sea Surface // J. Acoust. Soc. Amer. – 1953. – Т. 25. – С. 566-570.

9. Радиолокация морской поверхности. / Гарнакерьян А. А., Сосунов А. С. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1978. – 144 с.
10. Бреховских Л. М. Дифракция звуковых волн на неровной поверхности // ДАН СССР. – 1951. – Т. 79, № 4. – С. 585-588.
11. Исакович М. А. Рассеяние волн от статистически-шероховатой поверхности // ЖЭТФ. – 1952. – Т. 23, № 3 (9). – С. 305-314.
12. Stombie D. D. Doppler Spectrum of Sea Echo at 13,56 Mc/s // Nature. – 1955. – Т. 175, № 4459. – С. 681-682.
13. Басс Ф. Г. К теории комбинационного рассеяния волн на неровной поверхности // Известия ВУЗов, сер. Радиофизика. – 1961. – Т. 4, № 1. – С. 58-66.
14. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Об учете затенений при рассеянии волн на статистически неровной поверхности // Известия ВУЗов, сер. Радиофизика. – 1964. – Т. 7, № 1. – С. 101-112.
15. Басс Ф. Г. Граничные условия для среднего электромагнитного поля на поверхности со случайными неровностями и с флуктуациями импеданса // Известия ВУЗов, сер. Радиофизика. – 1960. – Т. 3, № 1. – С. 72-78.
16. Grant G. R., Yaplee V. S. Backscattering from Water and Land at Centimeter and Millimeter Wavelengths // Proc. IRE. – 1957. – Т. 45, № 7. – С. 976-982.
17. Калмыков А. И., Островский И. Е., Розенберг А. Д., Фукс И. М. Обратное рассеяние сантиметровых радиоволн взволнованной водной поверхностью моря при малых углах скольжения // Известия ВУЗов, сер. Радиофизика. – 1966. – Т. 9, № 6. – С. 1095-1099.
18. Акустика океана. Под ред. Бреховских Л. М. – Москва: Наука, 1974.
19. Курьянов Б. Ф. Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей // Акуст. ж. – 1962. – Т. 8, № 3. – С. 325—333
20. Рассеяние волн на статистически шероховатой поверхности. / Басс Ф. Г., Фукс И. М. – Москва: Наука, 1972.
21. Elfouhaily T., Guérin C. A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces // Waves in Random Media. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 1-40.
22. Voronovich A. G. Small slope approximation for electromagnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half spaces. // Waves in Random Media. – 1994. – Т. 4. – С. 337-367.
23. Born G. H., Dunne J. A., Lame D. B. Seasat mission overview // Science. – 1979. – Т. 204. – С. 1405-1406.
24. Fois F. Enhanced Ocean Scatterometry: PhD Thesis, 2015.
25. Karaev V. Y., Kanevsky M. B., Balandina G. N., Cotton P. D., Challenor P. G., Gommenginger C. P., Srokosz M. A. On the problem of the near ocean surface wind speed retrieval by radar altimeter: a two-parameter algorithm // International Journal of Remote Sensing. – 2002. – Т. 23, № 16. – С. 3263–3283.

26. Nekrasov A. Measurement of the wind vector over sea by an airborne radar altimeter having an antenna with the different beamwidth in the vertical and horizontal planes // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2008. – Т. 5, № 1. – С. 31-33.
27. Zhang B., Perrie W., Vachon P. W., Li X., Pichel W. G., Jie G., He Y. Ocean Vector Winds Retrieval From C-Band Fully Polarimetric SAR Measurements // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. – 2012. – Т. 50, № 11. – С. 4252–4261.
28. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. – 2000. – Т. 38, № 2. – С. 951-964.
29. Lemaire D. Non-Fully Developed Sea state Characteristics from Real Aperture Radar Remote Sensing: PhD Thesis, 1998.
30. Караев В. Ю., Панфилова М. А., Баландина Г. Н., Чу К. Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабных волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне // *Исследование Земли из космоса*. – 2012. № 4. – С. 62-77.
31. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне. Учебное пособие. / Коровин В. П. – СПб: РГГМУ, 2007. Учебное пособие.
32. Brumley B. H., Terray E. A., Strong B. S. System and method for measuring wave directional spectrum and wave height [Патент]: US 2004/0184350 A1. - USA, 09.06.09, 2003.
33. Chelton D., Walsh E., MacArthur J. Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry // *J. Atmos. Oceanic Technology*. – 1989. – Т. 9. – С. 407-438.
34. Переслегин С. В., Халиков З. А. Двухпозиционная квазизеркальная радиолокация морской поверхности. // *Известия ВУЗов, сер. Радиофизика*. – 2011. – Т. 47, № 4. – С. 562-576.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Метод определения параметров морского волнения с помощью модифицированного акустического волнографа // *Известия ВУЗов, сер. Радиофизика*. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 544-554.
2. Караев В. Ю., Мешков Е. М., Титченко Ю. А. Подводный акустический высотомер // *Известия ВУЗов, сер. Радиофизика*. – 2014. – Т. 57. – С. 543-554.
3. Titchenko Y., Karaev V., Meshkov E., Zuikova E. Measuring the variance of the vertical orbital velocity component by an acoustic wave gauge with a single transceiver antenna // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2015. – Т. 53, № 8. – С. 4340-4347.
4. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Особенности теоретической модели спектральных и энергетических характеристик рассеянных волн с учетом диаграмм направленности приемной и излучающей антенн при зондировании

- морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 2. – С. 67-84.
5. Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Мешков Е. М. Способ измерения характеристик волнения водной поверхности [Патент]: 2562934, 17/08-2015, 2015.
6. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М., Шишков А. В., Беляев Р. В., Грибов В. А. Измерение дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости подводной доплеровской акустической системой с одной приемо-передающей антенной: препринт: 811; ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2013.
7. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Модель отражения сигнала от статистически-шероховатой поверхности с учетом диаграмм направленности антенн для решения обратной задачи: Препринт: 813; ИПФ РАН. – Н.Новгород, 2016.
8. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Восстановление статистических параметров волнения по спектральным и энергетическим характеристикам радиолокационного СВЧ сигнала, отраженного водной поверхностью // Труды XV научной конференции по радиофизике – Нижний Новгород, 2011.
9. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Баландина Г. Н., Титов В. И. Применение акустического волнографа для измерения статистических параметров волнения: теория и эксперимент // V Всероссийская научная конференция "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" в рамках Вторых Армандовских чтений – Муром: Муромский институт, филиал Владимирского государственного университета имени Столетовых, 2012. – С. 218-222.
10. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Определение параметров морского волнения, с помощью модифицированного акустического волнографа // Всероссийский молодежный конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук – Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012. – С. 243-248.
11. Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Мешков Е. М. Теоретическая модель подводного акустического высотомера // IV Всероссийские Армандовские чтения – Муром: Муромский институт, филиал Владимирского государственного университета имени Столетовых, 2014. – С. 157-162.
12. Karaev V., Meshkov E., Titchenko Y. Sub-satellite measurements: new possibility of the advanced underwater acoustic wave gauge // IGARSS – Québec City, Canada: IEEE, 2014. – С. 706-709.
13. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Измерение основных статистических параметров взволнованной водной поверхности доплеровским радиолокатором сантиметрового диапазона // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – Москва: ИКИ РАН, 2010.

14. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Возможность измерения параметров волнения акустическим волнографом // 17-я сессия молодых ученых – Арзамас, 2012.
15. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Акустический волнограф для измерения крупномасштабных параметров морской поверхности в подспутниковых экспериментах // 18-я сессия молодых ученых – Арзамас, 2013.
16. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Численное и экспериментальное исследование влияния искусственного дождя на статистические характеристики волнения // 19-я сессия молодых ученых – Арзамас, 2014.
17. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Баландина Г. Н., Титов В. И. Использование акустического волнографа для измерения характеристик морской поверхности, // Научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2012» – Бор, 2012.
18. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Каневский М. Б., Мешков Е. М., Панфилова М. А. Концепция компактного радиолокатора для дистанционного мониторинга морской поверхности // 50-ая юбилейная Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» – Новосибирск: НГУ, 2012.
19. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М. Исследование влияния искусственного дождя на статистические характеристики поверхностного волнения, выполненное с помощью модифицированного акустического волнографа // Двенадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА» – Москва: ИКИ РАН, 2014.
20. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Баландина Г. Н. Применение акустического волнографа для измерения параметров крупномасштабного волнения // X открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – Москва: ИКИ РАН, 2012. – С. 299.
21. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Гольдблат В. Ю. Экспериментальное исследование влияния искусственного дождя на характеристики отраженного акустического сигнала // XI Открытая всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" – Москва: ИКИ РАН, 2013. – С. 273.
22. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М. Экспериментальное исследование доплеровского спектра радиолокационного СВЧ сигнала отраженного от морской поверхности при малых углах падения // Тринадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА» – Москва: ИКИ РАН, 2015. – С. 320.
23. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Кириллов А. Г., Беляев Р. В., Шишков А. В. Sea Surface Parameters Retrieval by a Doppler Underwater

Acoustic Wave Gauge in the Marine Experiment // The 5th Pacific Rim Underwater Acoustics Conference – Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2015. – С. 55-56.

24. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Титов В. И. Измерение дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости поверхностного волнения акустическим волнографом // Девятая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – Москва: ИКИ РАН, 2011. – С. 303.

25. Titchenko Y., Karaev V., Balandina G., Titov V. The use of an underwater acoustical wave gauge for measurement of sea surface parameters // Pan Ocean Remote Sensing conference – Kochi, Kerala, India, 2012. – С. 265.

26. Titchenko Y., Karaev V., Meshkov E. Underwater acoustic wave gauge for measuring the large-scale sea surface parameters in subsatellite experiments // 13th URSI Commission F Triennial Open Symposium on Radiowave Propagation and Remote Sensing – Ottawa, Canada, 2013.

27. Titchenko Y., Karaev V., Meshkov E. Numerical study of the rain effect on the water surface statistical characteristics and the first field experiments using the acoustic wave gauge // PORSEC 2014 the 12th Biennial Conference – Bali, Indonesia, 2014.

28. Titchenko Y., Karaev V., Meshkov E. The study of the influence of the surface waves formation conditions and rain on the acoustic waves backscattering by the water surface applied to remote sensing of the sea surface // Radio Science Conference (URSI AT-RASC) 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303078 – Gran Canaria, 2015. – С. 1.

29. Titchenko Y., Karaev V., Meshkov E., Goldblat V. The effect of artificial rain on backscattered acoustic signal: first measurements // 40th COSPAR Scientific Assembly – Moscow, 2014.

30. Titchenko Y. A., Karaev V. Y., Panfilova M. A., Zuykova E. M., Meshkov E. M., Osipov M. V., Khlusov V. A. Experimental study of the microwave radar doppler spectrum backscattered from the sea surface at small incidence angles // Radio and Antenna Days of the Indian Ocean 10.1109/RADIO.2015.7323374 – Mauritius: IEEE, 2015. – С. 1-2.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ОТ СТАТИСТИЧЕСКИ-ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	20
1.1 Введение.....	20
1.2 Поле волн, отраженное взволнованной водной поверхностью.....	21

1.3 Энергетические и спектральные характеристики сигналов отраженных морской поверхностью .....	24
1.4 Обработка доплеровских спектров отраженных сигналов и методы оценки характеристик отраженных сигналов .....	35
Основные результаты главы 1 .....	45
<b>ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ .....</b>	<b>47</b>
2.1 Введение.....	47
2.2 Восстановление дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости с помощью одной приемо-передающей антенны.....	48
2.3 Измерение параметров волнения струнным волнографом.....	52
2.4 Численное моделирование струнного волнографа и акустического волнографа оснащенного одной приемо-передающей антенной.....	55
2.5 Восстановление параметров волнения с помощью системы состоящей из двух приемо-передающих антенн.....	57
2.6 Восстановление параметров волнения при использовании схемы с одной излучающей и тремя приемными антеннами .....	61
2.7 Диагностика параметров дождя на основе спектральной и энергетических характеристик отраженных волн при подводном наблюдении .....	65
2.8 Измерение высоты волнения с помощью импульсного гидролокатора.....	72
Основные результаты главы 2.....	74
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ.....</b>	<b>77</b>
3.1 Введение.....	77
3.2 Натурный эксперимент с доплеровским акустическим волнографом с одной приемо-передающей антенной.....	78
3.3 Влияния дождя на характеристики поверхностных волн .....	87
3.4 Акустический волнограф, оснащенный полным набором антенн .....	89
3.5 Натурный эксперимент с радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны .....	110
3.6 Экспериментальные измерения дисперсии высот морских волн импульсным гидролокатором .....	120
Основные результаты главы 3.....	125
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. МОДЕЛЬ СПЕКТРА ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ.....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН .....</b>	<b>139</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>146</b>
<b>СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....</b>	<b>156</b>

ТИТЧЕНКО Юрий Андреевич

**ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И МИКРОВОЛНОВЫХ  
ЛОКАТОРОВ С ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ  
СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ**

Автореферат

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