

БУЙ ЧЫОНГ ЗАНГ

Методы обработки сигналов для стационарной системы, работающей
в режиме шумопеленгования и согласованной с каналом распространения
и характеристиками полей сигнала и помехи

Специальность: 01.04.06 - Акустика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ).

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент Селезнев Игорь Александрович, заместитель генерального директора ОАО «Концерн «Океанприбор» по стратегическому, инновационному развитию и научной работе, профессор базовой кафедры конструирования и технологии электронной аппаратуры СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Попович Василий Васильевич, заместитель директора Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН) по научной работе.

доктор технических наук, профессор Белов Борис Петрович, заведующий кафедрой "Морские информационные и роботизированные системы" Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

Ведущая организация – ОАО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева», Москва.

Защита состоится «12» ноября 2014 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: www.eltech.ru

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим высылать по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» сентября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.06
д.т.н., доцент

_____/А.М. Боронахин /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышенное внимание к разработкам полезных ископаемых на шельфе и создание для этих целей сложных технических сооружений – нефте- и газодобывающих платформ, требует создания систем освещения надводной и подводной обстановки в местах размещения таких платформ. Задачей таких систем является недопущение несанкционированного проникновения нарушителей в зону работы платформы, контроль судоходства в месте размещения платформы (что особенно актуально в мелководных районах и районах рыбного промысла, где возможно повреждение подводных кабелей и трубопроводов системами рыбного лова).

Не менее актуальной является задача охраны и пресечения несанкционированного доступа в экономически важные районы шельфовой зоны – районы интенсивного рыболовства и т.п. В данной ситуации предпочтителен выбор системы освещения подводной обстановки, работающей в режиме шумопеленгования (ШП), как минимально влияющей на экологическую обстановку в месте установки антенн.

Целью исследования является решение научной задачи повышения эффективности стационарных гидроакустических комплексов (СГАК), работающих в режиме ШП, в сложных гидролого-акустических условиях (ГАУ), в том числе в условиях мелководья.

Задачи исследования

В соответствии с целевой установкой исследования в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Анализ и выбор основных направлений повышения эффективности СГАК, работающего в сложных ГАУ.
2. Анализ комплекса алгоритмов обработки гидроакустических сигналов при решении задачи обнаружения для СГАК в режиме ШП, выбор показатели оценки решения задачи.
3. Разработка перспективных алгоритмов обработки гидроакустической информации в режиме ШП, согласованных с характеристиками канала распространения сигнала.
4. Создание физико-математической модели решаемой задачи, разработка и построение имитационной модели, позволяющей производить оценку эффективности предлагаемых алгоритмов обработки и их устойчивости в меняющихся ГАУ.
5. Сравнительная оценка эффективности предлагаемых алгоритмов обработки в рамках данного исследования.
6. Оценка устойчивости предлагаемых алгоритмов при ошибках оценки характеристик полей помех, воздействующих на систему.
7. Выработка рекомендаций по использованию предлагаемых в работе алгоритмов обработки в СГАК, работающих в сложных ГАУ Восточного моря Вьетнама.

Объектом исследования является СГАК, работающий в режиме ШП, предназначенный для освещения подводной и надводной обстановки в экономически важном районе Мирового океана.

Предметами исследования являются модели сигналов и помех в режиме ШП, учитывающие процесс распространения сигнала в реальном гидроакустическом канале с известными параметрами; адаптивные методы обнаружения сигналов в режиме ШП, согласованные с параметрами канала распространения и характеристиками полей сигнала и помехи.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы следующие научные методы:

1. Поиск средств повышения эффективности гидроакустических средств;
2. Теоретические исследования;
3. Создание и исследование математических моделей.

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются методы теории подобия и моделирования, теории численных методов интегрирования, теории распространения, приема и излучения звука, теории гидроакустических антенн, методы математической статистики, методика модельного проектирования.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Адаптивные алгоритмы обработки сигналов в режиме ШП, согласованные с параметрами канала распространения и характеристиками полей сигнала и помехи, позволяют повысить отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе тракта обработки за счет введения амплитудно-фазового распределения на элементах антенны.

2. Имитационная модель оценки эффективности и устойчивости алгоритмов обработки для систем обнаружения в режиме ШП, согласованных со средой распространения, позволяет производить сопоставительную оценку эффективности различных алгоритмов, а также оценку их устойчивости к ошибкам задания параметров среды и к различным законам распределения полей помех, воздействующих на входные элементы системы.

3. Методика оценки эффективности и устойчивости алгоритмов обработки сигналов в режиме ШП, согласованных со средой распространения, в сложных ГАУ позволяет производить сопоставление различных алгоритмов обработки в режиме ШП по единому критерию, а также оценивать устойчивость рассматриваемых алгоритмов к ошибкам определения характеристик полей сигналов, помех и канала распространения.

4. Результаты оценки устойчивости предложенного алгоритма обработки к ошибкам оценки характеристик передаточной функции среды (скорости звука в волноводе Пекериса, глубины волновода, характеристики дна) и различным законам распределения полей помех показывают высокую эффективность предлагаемого фазового алгоритма обработки гидроакустической информации в режиме ШП и его устойчивость при ошибках определения характеристик полей сигналов, помех и канала распространения.

Научную новизну представляют следующие результаты:

1. Новые адаптивные алгоритмы обработки сигналов в режиме ШП, применительно к задаче согласования с характеристиками передаточной функции среды.

2. Новая имитационная модель оценки эффективности и устойчивости алгоритмов обработки для систем обнаружения в режиме ШП, согласованных со средой. Предложенная модель позволяет производить сопоставительную оценку эффективности и устойчивости предложенных алгоритмов, подтвердить их выигрыш в ОСП (по сравнению с традиционным методом) на выходе тракта обработки для заданной модели канала распространения в виде волновода Пекериса и выбранных моделей сигнала и помехи на входе тракта обработки.

3. Результаты оценки устойчивости предложенного алгоритма обработки к ошибкам оценки характеристик передаточной функции среды и для различных законов распределения полей помех.

Теоретическая значимость. Предложенная автором в рамках работы имитационная модель в среде MATLAB позволяет проводить сопоставительную оценку эффективности (по

выбранному показателю) различных алгоритмов обработки, обеспечивающих согласование с характеристиками сигналов, помех и канала распространения, а также их устойчивости к ошибкам оценки характеристик передаточной функции среды (скорости звука в волноводе Пекериса, глубины волновода, характеристик дна) и к различным законам распределения полей помех, воздействующих на входные элементы антенны. Данная имитационная модель может быть также использована в учебном процессе при подготовке специалистов в области создания гидроакустических средств.

Практическая значимость. Предлагаемый комплекс технических и алгоритмических решений, апробированных на проведенных модельных испытаниях, позволяет повысить эффективность обработки сигналов для СГАК, работающего в режиме ШП и решающего задачи освещения обстановки экономически важных районов Мирового океана. Численная оценка, полученная в данной работе позволяют оценить выигрыш (по ОСП) одного алгоритма в сравнении с другим конкретным алгоритмом.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием методов исследований; применением современных компьютерных средств и программ расчетов; а также конкретными результатами компьютерного моделирования для различных условий расчетов, не противоречащих опубликованным результатам, полученным другими авторами.

Внедрение результатов работы. Имитационная модель, созданная в рамках выполнения диссертационного исследования, а также результаты оценки устойчивости алгоритмов обнаружения, согласованных со средой распространения, в режиме ШП, использованы сотрудниками ОАО «Концерн «Океанприбор» в НИР «Акула» и ОКР «Покров», выполняемых в рамках Федеральной целевой программы № 1 по заказу Минпромторга России. Результаты работы в части имитационной модели могут быть использованы в рамках учебного процесса для оценочной задачи, при производстве оценок эффективности различных алгоритмов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции "The 6th International Workshop on Information Fusion and Geographical Information Systems: Environmental and Urban Challenges (IF&GIS' 2013)" (Санкт-Петербург, 12-15 Мая 2013г.); 3-й молодежной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (МАГ-2013), (Санкт-Петербург, ОАО «Концерн «Океанприбор», 09-11 октября 2013г.); XXVII-ой сессии РАО, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смольякова и В.И. Попкова (Санкт-Петербург, 16-18 Апреля 2014 г.); 12-ой всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2014), (Санкт-Петербург, 27-29 Мая 2014 г.); а также на конференции аспирантов СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, из них 6 работ – в рекомендуемых ВАК РФ изданиях, 3 – в других статьях и материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения, списка литературы. Общий объем работы составляет 121 страница машинописного текста, который включает 45 рисунков, 6 таблиц и содержит список литературы из 84 наименований, среди которых 49 отечественных и 35 иностранных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны объект, предмет и методы исследования, приведены научная новизна, теоретическая значимость и практическая значимость исследования, а также научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ задачи повышения эффективности СГАК, работающего в сложных ГАУ.

На основе литературных источников проводится обзор современного состояния проблемы разработки методов согласованной обработки гидроакустической информации в России и за рубежом. Показано, что использование адаптивных методов, в т.ч. метода согласованной обработки, является перспективным для повышения эффективности обработки гидроакустических сигналов (роста ОСП по выходу тракта обработки), разработан ряд перспективных алгоритмов, в том числе и базирующихся на оптимальных методах обнаружения. Однако, предлагаемые в литературе алгоритмы обработки не доведены до стадии практической реализации, в первую очередь в части учета влияния ошибок определения передаточной функции среды распространения, а также оценок характеристик полей сигналов и помех, что является принципиально важным при реализации адаптивных методов обработки, особенно при адаптации к характеристикам канала распространения сигнала, что не позволяет использовать предложенные в литературе решения для практических задач.

В первой главе представлены основные направления исследований, повышающие эффективность работы (ОСП на выходе тракта обработки) СГАК при его функционировании в заливе Бакбо Вьетнама (предлагаемого района размещения системы). Проанализированы характеристики полей помех в указанной акватории, особенности распространения сигнала в данном водном районе с учетом пространственного распределения скорости звука в различные времена года, показана возможность использования для описания распространения звукового сигнала в данном районе модели Пекериса – модели двухслойного волновода с верхней мягкой границей и поглощением в дне, при этом скорости звука в слоях воды и дне являются постоянными. Рассмотрена изменчивость акустического поля сигналов в зависимости от внешних факторов и подтверждена необходимость использования алгоритма согласованной со средой обработки для этого района.

Рассмотрены известные аналитические решения, соответствующие постановке задачи исследования, в том числе т.н. «оптимальный» алгоритм обработки сигналов в режиме ШП, согласованный со средой распространения сигнала. Отмечено, что при синтезе данного алгоритма использовано предположение о Гауссовском (или нормальном) распределении полей сигнала и помехи, которое оказывается неправомерным в некоторых практически важных случаях, например в условиях интенсивного судоходства, что характерно для прибрежных районов Вьетнама, в том числе залива Бакбо. Более того, в литературе отсутствуют данные об оценке устойчивости этого алгоритма к изменению законов распространения полей помех и сигнала. Исходя из анализа литературы, автором обоснована необходимость создания нового алгоритма обработки в режиме ШП, мало чувствительного к изменениям характеристик полей помехи и сигнала, согласованного с каналом

распространения, при этом достаточно простого в реализации для широкого круга практических задач. Требуется также проведение оценки эффективности предложенного алгоритма, сопоставление его с известным алгоритмом типа «квадратор-интегратор» по выходу сформированного веера характеристик направленности, реализуемого сегодня в большинстве известных систем ШП, по показателю ОСП и оценка его устойчивости к ошибкам определения характеристик канала распространения.

Во второй главе проведена разработка комплекса предлагаемых алгоритмов согласованных со средой обработки гидроакустических сигналов при решении задачи обнаружения для СГАК, работающего в режиме ШП.

Определены показатели и критерии эффективности решения задачи обнаружения для СГАК в режиме ШП, по которым проводится сравнительная оценка эффективности предлагаемых в работе и традиционных алгоритмов обработки для режима ШП.

Предложен инструмент для исследования и анализа предлагаемых алгоритмов обработки – имитационная модель, включающая в свой состав входные модели сигналов и помех, модель среды распространения, в качестве которой выбран волновод Пекериса, модели предлагаемого и традиционных алгоритмов обработки, блок оценки эффективности алгоритмов по показателю сигнал/помеха.

В данной работе рассматриваемая гидроакустическая система является стационарной в силу географических и гидрологических особенностей района установки, и пассивной, поскольку такая система является более скрытной и более экономичной с точки зрения энергопотребления, чем активная система. Для решения поставленных в работе задач с учетом конкретных особенностей района размещения СГАК построен оптимизированный алгоритм обработки сигналов для системы освещения обстановки, согласованной с каналом распространения и характеристиками сигнала и помехи. Проведена оценка дальности действия предлагаемой системы освещения обстановки, работающей в режиме ШП, которая с учетом предложенных в рамках данной работы новых алгоритмов способна обеспечить дальность действия 10-15 км по малозумным объектам.

В качестве приемной антенны предлагается использовать конструкцию, собранную из вертикально размещенных дискретных антенных линеек, с 40 элементарными приемниками каждая, расстояние между приемными элементами в линейке составляет $d = 0.5 \cdot \lambda(f_{cp})$ (м) (где $\lambda(f_{cp})$: акустическая длина волны на средней частоте рабочего диапазона частот системы, который составляет 500-3000 Гц). Верхний приемник антенны погружен на глубину 10 м. Расчет такой конструкции и структура тракта обработки, решающего задачу обнаружения в режиме ШП для цилиндрической антенны, реализованной в виде набора вертикальных антенных модулей, рассматривались автором в дипломной работе, защищенной на кафедре ЭУТ в 2011 году.

Для построения имитационной модели автором выполнен анализ источников гидроакустических помех, влияющих на работы СГАК в конкретном месте размещения СГАК (заливе Бакбо). По результатам исследований (в статьях автора) может быть сделан вывод, что поле помех в месте установки СГАК представляет собой аддитивную смесь 3-х основных независимых компонентов: динамический шум моря, шум дальнего судоходства, гидродинамический шум. В работе приведены практические формулы расчета спектральной

плотности давления для этих шумов, зависящие от волнения моря, интенсивности шумов судоходства, скорости подводных течений в районе размещения СГАК.

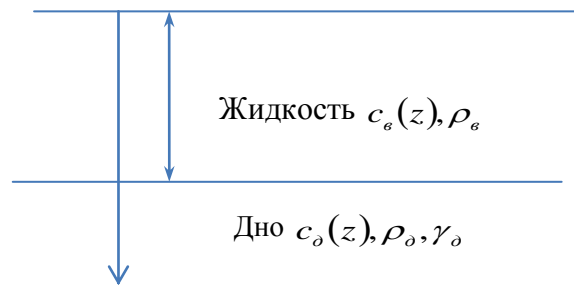
Приведено спектрально-пространственное представление полей сигнала, помехи и обоснована модель канала распространения, учитывающая особенности конкретного района наблюдения.

Наблюдаемое поле имеет вид: $P(f, x) = S(f, x) + N(f, x)$, ($f \in F, x \in A$)

где A – пространственная дискретная область наблюдений, определяемая координатами приемных элементов антенны, задание которых, в свою очередь, формирует конфигурацию антенны; $S(f, x)$ – поле сигнала, которое, как правило, предполагается Гауссовским случайным полем с нулевым математическим ожиданием и известными остальными параметрами закона распределения, в данной работе рассматриваем только одиночные источники; $N(f, x)$ – поле помехи, которое, как правило, предполагается Гауссовским случайным полем с нулевым математическим ожиданием.

С теоретической и практической точки зрения обоснована целесообразность использования для моделирования волновода Пекериса, а именно модель двухслойного волновода с верхней мягкой границей и поглощением в дне, скорости звука в слоях воды и дне являются постоянными, в качестве канала распространения сигнала в данном исследовании. Для решения поставленной задачи выбрана такая модель волновода, т.к. она, во-первых, обладает всеми основными характерными свойствами мелководного волновода, и во-вторых, применение которой позволяет избежать исключительно сложных и трудоемких расчетов и кроме того, позволяет легко изменять параметры моделируемой морской среды. При этом показано, что имитационная модель может быть реализована и для более сложных вариантов описания распространения звука в водной среде.

Рисунок 1 - Упрощенная иллюстрация модели Пекериса



Расчетная формула вычисления акустического давления для модели Пекериса:

$$P = \frac{2\pi i}{H} \sum_{l=1}^N \left\{ \frac{x_l \cdot \sin(x_l z) \cdot \sin(x_l z_0)}{1 - \frac{km^{-1}}{x_l} \cdot v^2 \cdot \frac{1}{x_l h} \cdot \sin^2(x_l z) \cdot \operatorname{tg}(x_l z)} \cdot H_0^{(1)}(\xi_l r) \right\} \quad (1)$$

где H – глубина волновода, z – координата приемника, z_0 – координата источника сигнала, r – расстояние от источника до приемников антенны, $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода, нулевого порядка, $\xi_l = k \sin \vartheta_l = \sqrt{k_e^2 - (x_l)^2}$ – горизонтальное волновое число нормальных волн (вдоль слоя), ϑ – угол падения, $k = k_e = \frac{2\pi f}{c_e}$ – волновое число для воды, f – частота,

$v = \sqrt{1 - n^2}$, $n = c_e / c_o$, $m = \rho_o / \rho_e$, x_l - вертикальное волновое число, ρ_o, ρ_e, c_o, c_e - плотности и скорости в воде и в дне соответственно.

Обозначим вектор-столбец функции Грина, компонентами которого являются передаточные функции морской среды от точки расположения источника к каждому элементу антенны $H(f, x)$ ($f \in F, x \in A$).

В условиях мелкого моря, ее практическое выражение имеет следующий вид

$$H(f, x) = \frac{A(f, x)}{r^{3/2}} \cdot 10^{-0.1 \cdot \beta(f) \cdot r} \quad (2)$$

здесь $A(f, x)$ – потеря за счет эффектов поглощения и затухания на граничных поверхностях волновода Пекериса; $1/r^{3/2}$ – потеря за счет расширения волновых фронтов. В условии мелкого моря, это затухание подчиняется закону «3/2», являющийся промежуточным между цилиндрическим законом для слоя с абсолютно отражающим дном и сферическим для безграничного однородного слоя; $\beta(f)$ – частотно-зависимое затухание (в мелком море $\beta(f) = 0.04 \cdot f^{1.28}$ (дБ/км)).

Передаточная функция среды является комплексной величиной и записывается как

$$H(f, x) = A_H(f, x) \cdot e^{j\phi_H(f, x)} \quad (3)$$

где $A_H(f, x)$ – амплитудная составляющая, $\phi_H(f, x)$ – фазовая составляющая.

Сформулирована структура адаптивных алгоритмов обработки для системы в режиме ШП, согласованной с каналом распространения.

В задачах пассивной локации ковариационная матрица сигналов является функцией координат источника звука и неизвестных параметров, характеризующих излучение и распространение звука в океанической среде. Для каждого сформированного пространственного канала наблюдения формируется статистика обнаружения, которая сравнивается с порогом обнаружения, выбираемым исходя из заданного уровня ложной тревоги. Тогда, полученная из отношения правдоподобия в предложении нормального закона распределения статистика обнаружения представляет собой следующий вид:

$$T_w(P_f, f \in F) = \sum_{f \in F} P_f^+ \cdot W_{0,f} \cdot P_f \quad (4)$$

где $P_f = S_f + N_f$, $f \in F_o$, F_o – множество дискретных частот, S_f и N_f – поля сигнала и помехи соответственно, $W_{0,f}$ – эрмитовы положительно определённые матрицы, которые характеризуют выбранную пространственно-частотную обработку («+» означает эрмитово сопряжение).

При использовании оптимального и локально-оптимального методов обработки сигналов требуются априорные данные о пространственных корреляционных и спектральных свойствах и помех, либо получение их апостериорных оценок. Кроме того, алгоритм предполагает наличие априорной информации о законе распределения шумов и сигналов. Возможен другой подход, являющийся развитием традиционных алгоритмов формирования характеристик направленности.

При традиционных методах формирования используется модель плоско-волновых фронтов, кроме того, часто в тракте обработки используется введение амплитудного распре-

деления на элементах антенны, согласованного с характеристиками полей помех (фильтр Эккарта). Поскольку на практике предположение о наличии плоских фронтов часто неверно, в работе сделана попытка ввести амплитудно-фазовое распределение, согласованное с передаточной функцией среды. При этом в качестве критерия сравнения алгоритмов допустимо рассматривать ОСП на выходе сформированного пространственного канала (ПК) или угла места (УМ).

На базе этого подхода и без учета ковариационной матрицы помех, используется мощность на выходе ПК антенны:

$$T_w(P_f, f \in F) = \sum_{f \in F_0} [P_f \otimes H^{(-1)}(f, x)]^+ \cdot [P_f \otimes H^{(-1)}(f, x)] \quad (5)$$

где $H^{(-1)}(f, x)$ – матрица, элементы которой являются обратными значениями элементов

передаточной функции среды, т.о. она имеет вид $H^{(-1)}(f, x) = \begin{bmatrix} 1/h_1(f, x) \\ 1/h_2(f, x) \\ \dots \\ 1/h_N(f, x) \end{bmatrix}$, а передаточная

функция среды (функция Грина) соответствует $H(f, x) = \begin{bmatrix} h_1(f, x) \\ h_2(f, x) \\ \dots \\ h_N(f, x) \end{bmatrix}$ ($i = 1 \dots N$ – номер эле-

мента антенны), $P_f = S_f + N_f$, $f \in F_0$, F_0 – множество дискретных частот, S_f и N_f – поля сигнала и помехи в виде спектральной плотности давления соответственно, \otimes – оператор умножения по элементам.

Данный алгоритм представляет собой вариант *согласованной обработки*, поскольку в его выражении присутствует информация о передаточной функции среды. Алгоритм использует максимально возможное априорное знание условий распространения сигналов без дополнительных предположений о характеристиках полей помех. Работоспособность рассмотренного алгоритма зависит от правильного задания параметров передаточной функции гидроакустического канала.

Для *согласованного метода* обнаружения (для мощности, полученной на выходе антенны) возможно использование 3-х вариантов метода:

1. Вариант амплитудно-фазового распределения при полном учете характеристики

среды (функции Грина): $W_{p1} = \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes H^{(-1)}(f, x) \right|^2$

2. Вариант амплитудного распределения при учете только амплитудной части (A)

функции Грина: $W_{p2} = \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes A^{(-1)}(f, x) \otimes e^{-iF_3(f, x)} \right|^2$ (где F_3 – задержки для плоского фронта).

3. Вариант фазового распределения при учете только фазовой части (Φ) функции Грина

(т.е. только формы волновых фронтов): $W_{p3} = \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes \Phi^{-1}(f, x) \right|^2$

ОСП на выходе антенны представляет собой отношение по мощности: $\beta_{\text{мрп}} = \frac{\hat{W}_P - \hat{W}_N}{\sigma_N}$;

\hat{W}_P – среднее значение мощности при наличии смеси сигнала и помехи на входе антенны,

\hat{W}_P соответствует величине $W_P = \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes e^{-iF_x} \right|^2$; \hat{W}_N – среднее значение мощности при

наличии только помехи на входе антенны, \hat{W}_N соответствует величине

$W_N = \frac{1}{T} \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} N_f \otimes e^{-iF_x} \right|^2$; $\sigma_N = \sqrt{(\mu_{N2} - \mu_{N1}^2)}$ – аналитическая оценка СКО при отсутствии

сигнала; μ_{N2} – нецентрированной момент мощности; μ_{N1} – оценка математического ожидания.

В третьей главе приведены результаты сравнительной оценки эффективности предлагаемого алгоритма (для 3-х рассмотренных вариантов метода в главе 2). Моделирование алгоритма обработки гидроакустических сигналов реализуется в среде MATLAB.

С помощью разработанной автором программы, реализующей предложенную в работе имитационную модель, созданы модели шумового сигнала и основных адаптивных шумов в районе исследования (см. рис.2,3,4,5).

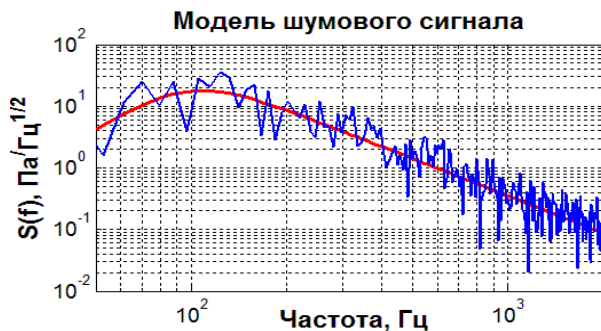


Рисунок 2 - Модель шумового сигнала

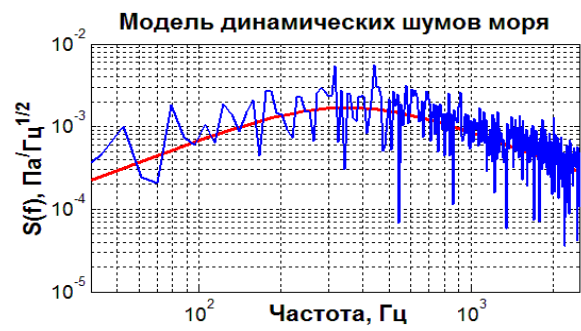


Рисунок 3 - Модель динамических шумов

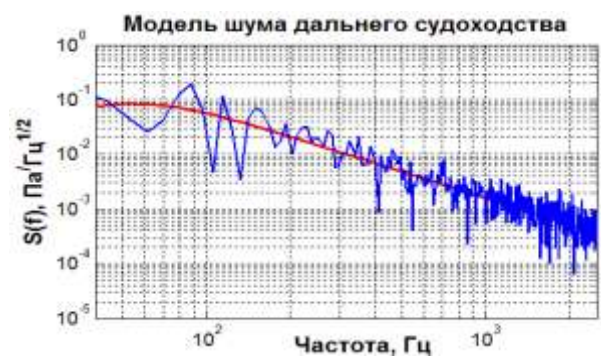


Рисунок 4 - Модель шума дальнего судоходства



Рисунок 5 - Модель гидродинамических шумов

При задании исходных данных сначала моделируются вероятности обнаружения Гауссовских случайных широкополосных акустических сигналов на фоне Гауссовской аддитивной помехи с помощью вертикальной линейной антенны. Антенна включает 40 гидрофонов, верхний приемник которой погружен на глубину 10 м. Источник сигналов находится на глубине 40 м и расстоянии 8 км от антенны. Приведенные давления сигналов и помех на час-

тоте 1 кГц соответствуют $P_s = 0.216$ и $P_N = 1.562 \cdot 10^{-3}$ (Па). Из результатов расчета выберем точки нахождения источника подводных сигналов с высокой вероятностью обнаружения (как правило, $P_{обн} \geq 0.7$).

В результате моделирования представлен относительный выигрыш (или проигрыш) в ОСП для предлагаемых и традиционного методов обработки сигналов $\beta_{адан.(1,2,3)} / \beta_{трад.}$ (где $\beta_{адан.(1,2,3)}$ и $\beta_{трад.}$ – оценки ОСП в 3-х адаптивных и традиционном методах соответственно)

На рис.6. а,б,в показан выигрыш (или проигрыш) для рассматриваемых 3-х вариантов реализации алгоритма согласованной обработки по сравнению с традиционным методом в зависимости от глубин волновода (при истинной глубине 70 м) и усредненных уровней сигналов. В последнем графике (рис.6 г) приведено сравнение ОСП для всех методов при фиксированном значении глубины (на графике: линия 1 соответствует ОСП для фазового варианта, линия 2 – ОСП для традиционного варианта, линия 3 – ОСП для амплитудно-фазового варианта, линия 4 – ОСП для амплитудного варианта).

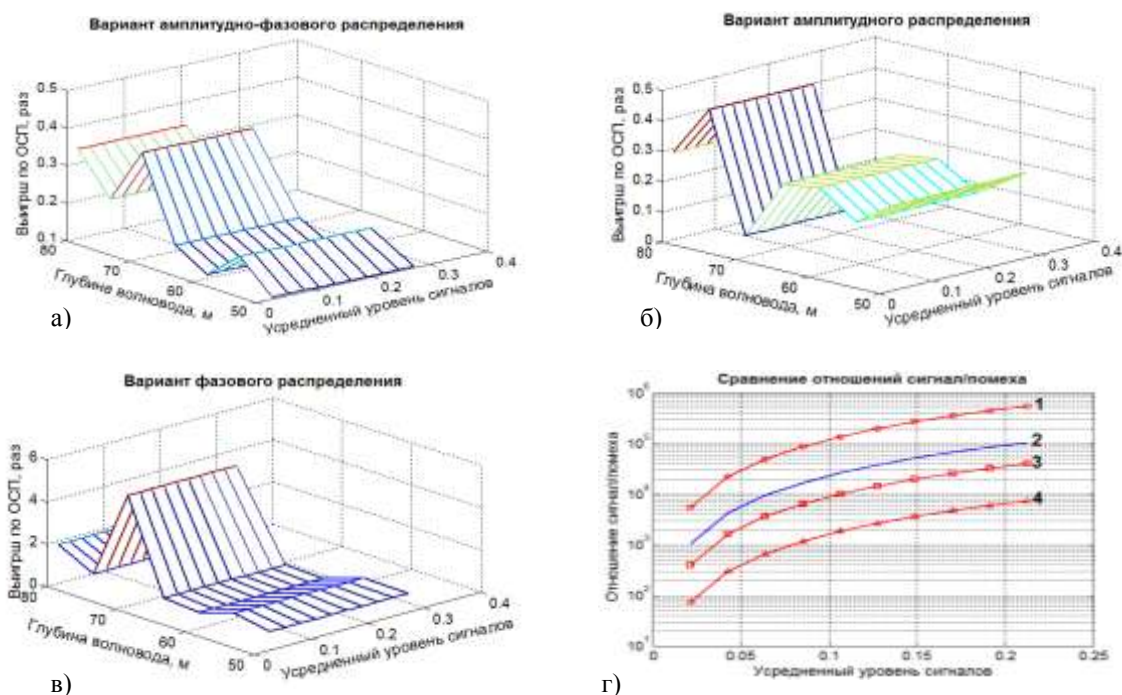


Рисунок 6 - Выигрыш/проигрыш 3-х адаптивных методов в сравнении с традиционным методом и сравнение ОСП

Видно, что вариант фазового распределения имеет самый сильный выигрыш в ОСП по сравнению с традиционным методом, чего не происходит в других остальных вариантах реализации алгоритма согласованной обработки (амплитудно-фазовом и амплитудном).

Выигрыш (/проигрыш) по ОСП обусловлен отношением между приращением сигналов и соответственным значением СКО. Выигрыш в случае фазового распределения обусловлен малым СКО, а в остальных случаях, СКО обладает большим значениям, отсюда возникает проигрыш в ОСП (рис.7).

Для других точек источника и других значений ошибок по глубине получим аналогичные результаты.

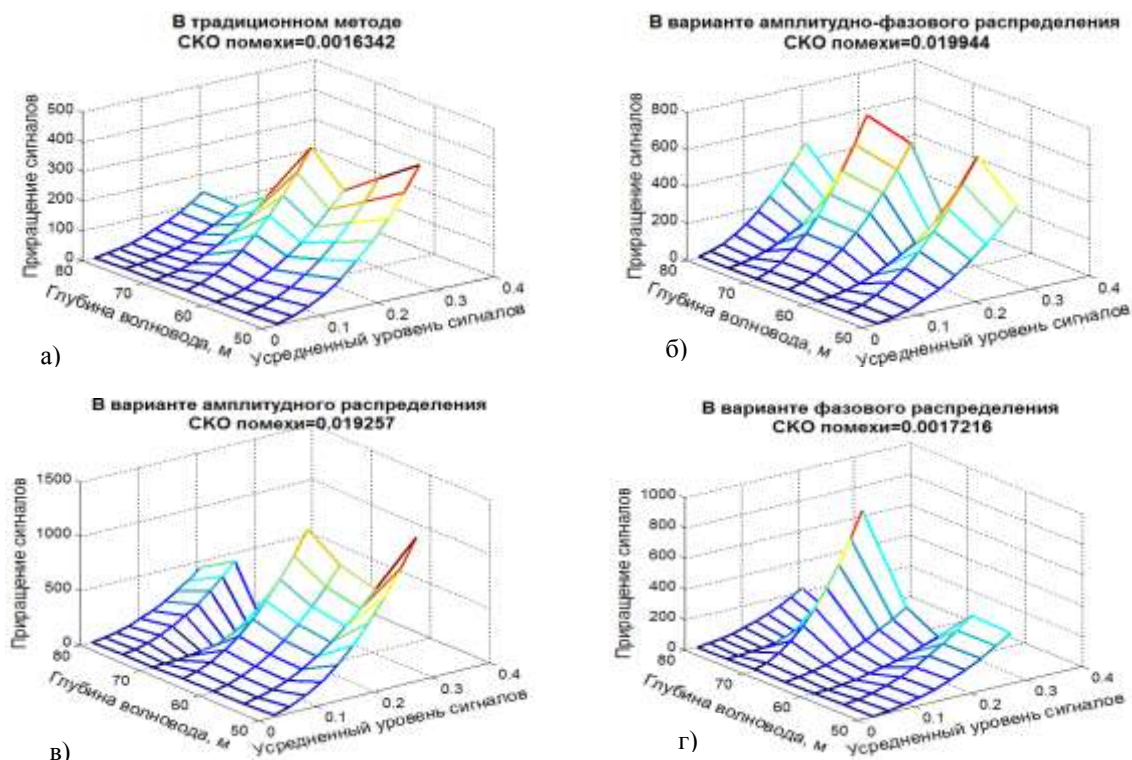


Рисунок 7 - Приращение сигналов и оценка СКО

Среди 3-х выше описанных адаптивных методов, вариант фазового метода приобретает самый большой выигрыш по ОСП, поэтому подробно оценим его устойчивость.

При проведении моделирования в качестве приемной антенны рассматриваются две дискретные линейные антенные решетки с рабочим диапазоном частот 0.5-3 кГц, верхний приемник которых погружен на глубину 20 м, и с разным количеством приемных элементов в 2-х линейках. Источник сигналов находится на глубине 40 м и расстоянии 8 км от антенны. На рис.8 показан выигрыш фазового метода по ОСП в сравнении с традиционным методом в зависимости от задания глубин волновода (при этом, точная глубина волновода составляет 70 м) и усредненных уровней сигналов для этих 2-х линеек (на рисунке: *а* – антенна с 30 элементами, *б* – антенна с 60 элементами).

На рис.9 приведено сравнение ОСП двух методов при точном задании глубины волновода 70 м для выше указанных антенн (на рисунке: *а* – антенна из 30 элементов, *б* – антенна из 60 элементов; линия 1 соответствует ОСП для фазового варианта, линия 2 – ОСП для традиционного варианта).

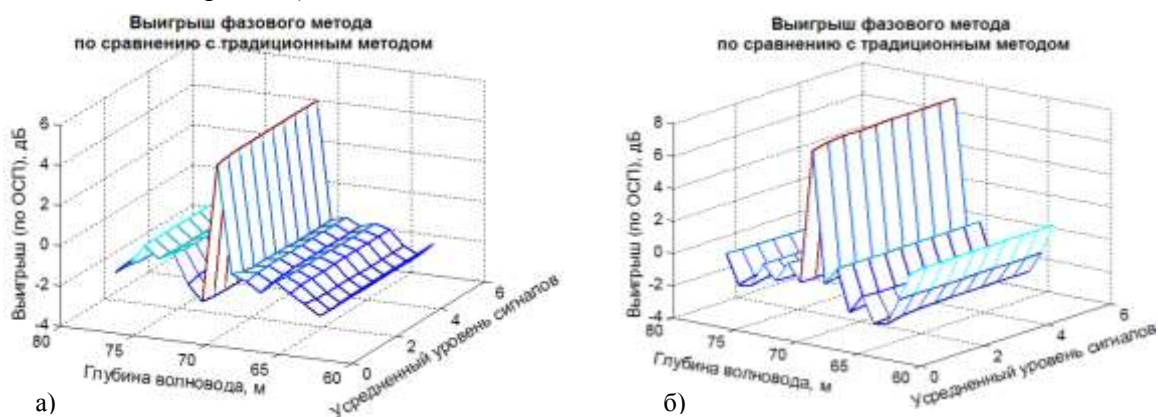


Рисунок 8 - Выигрыш/проигрыш фазового методов (по ОСП) в сравнении с традиционным методом

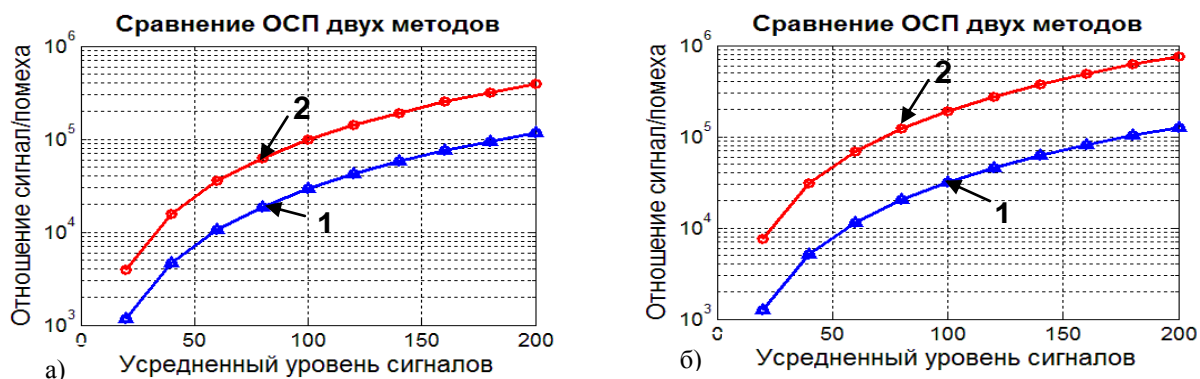


Рисунок 9 - Сравнение ОСП двух методов для 2-х различных антенн при истинной глубины волновода 70 м

Как показано на рисунках, в обоих случаях фазовый метод дает заметный выигрыш по ОСП в сравнении с традиционным методом.

В первом случае, выигрыш достигает значения 5 дБ при точном задании глубины и наглядно падает при присутствии ошибок в оценке глубины волновода. В втором случае, ситуация такая же, однако выигрыш оказывается выше, до 8 дБ при точном задании глубины.

Чтобы оценить устойчивость данного алгоритма к ошибкам, вызванным неверной оценкой глубин волновода и скоростей звука, зададим ряд величин ошибки с малыми шагами. Моделирование проводилось для такой же антенной линейки из 60 элементов (как и на рис. 8б, 9б). На рис.10а показано сравнение ОСП для этих 2-х методов при фиксированном значении уровня сигналов для истинной глубины 70 м и ошибки глубины с шагом 0.1 м (линия 1 соответствует ОСП для фазового варианта, линия 2 – ОСП для традиционного варианта). Из приведенных результатов видно, что фазовый метод дает существенный выигрыш (по ОСП) в сравнении с традиционным методом при точном задании глубины волновода (ошибка по глубине равна нулю) и при ошибках определения глубины волновода до 0.5 м. При больших ошибках фазовый метод теряет выигрыш по ОСП по сравнению с традиционным методом и возникает проигрыш на небольшую величину. Аналично, на рис.10б представлено сравнение ОСП для 2-х методов при фиксированном значении уровня сигналов для истинной скорости звука 1500 м/с и ошибки с шагом 3 м/с.

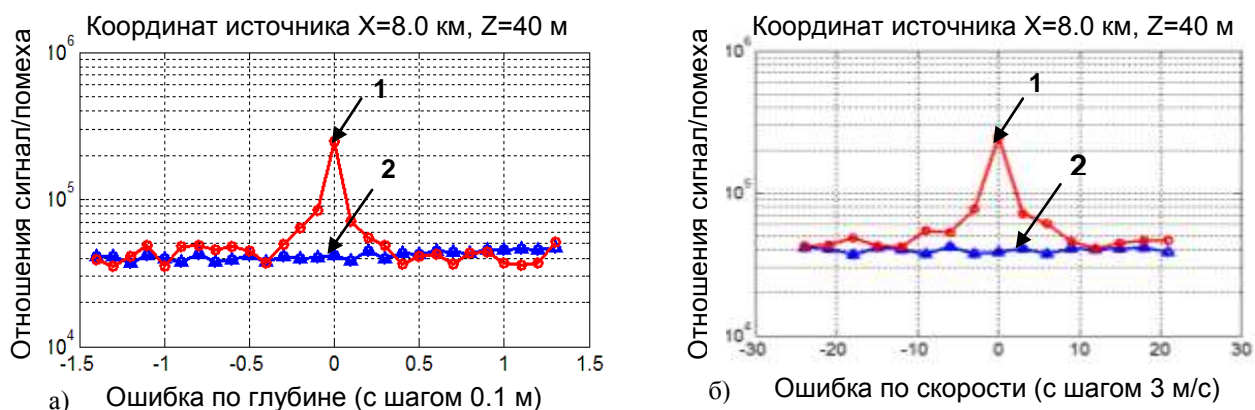


Рисунок 10 - Сравнение ОСП для двух методов при задании ошибок по глубине и скорости звука

Ясно, что в этом случае, ситуация схожа с результатами рис.10а, фазовый метод показывает заметный выигрыш по сравнению с традиционным методом. Более того, даже

при наличии немалых ошибок по скорости звука, фазовый метод также имеет преимущество по сравнению с традиционным методом.

В работе проведена оценка устойчивости фазового метода к ошибкам по глубине путем анализа выигрыша ОСП для сетки точек источника в случаях задания точной глубины, и с ошибками. Как показано на рис.11,12 по оси абсцисс отложено расстояние от источника до антенной линейки, на оси ординат отложена глубина источника.

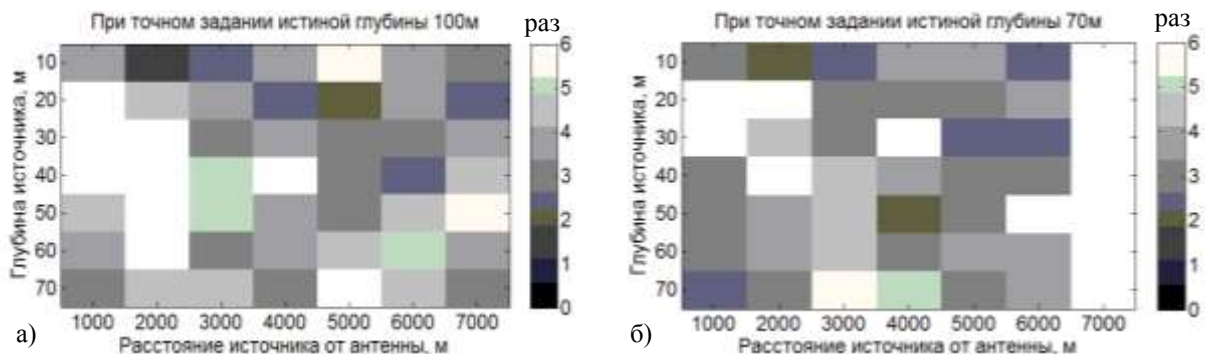


Рисунок 11 - Выигрыш (ОСП) фазового метода с традиционным методом при точном задании глубины волновода

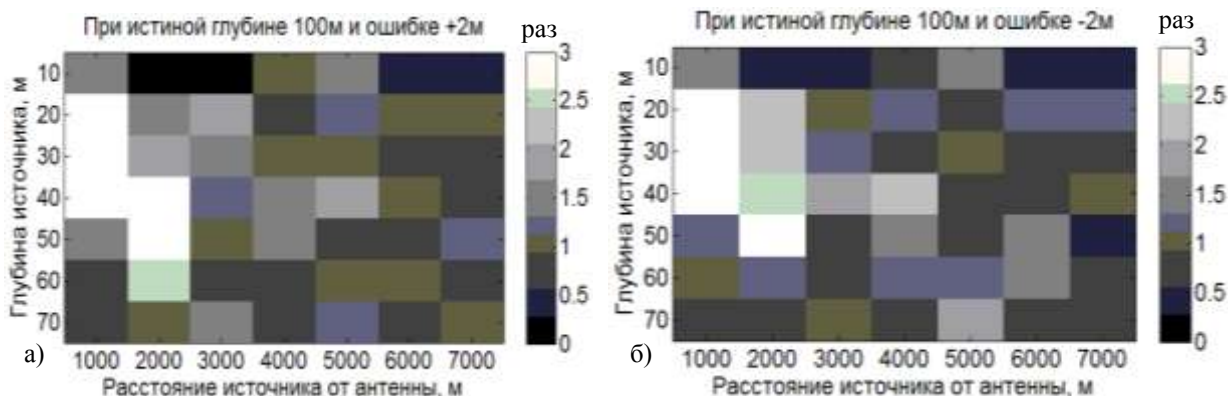


Рисунок 12 - Выигрыш (ОСП) фазового метода с традиционным методом при задании глубины волновода с ошибками

Из приведенных рисунков видно, что чем меньше величины ошибок по глубине, тем больше величины выигрыша фазового метода по сравнению с традиционным методом. При точном задании глубины (рис.11), выигрыш получен от двух до шести раз, даже более шести в некоторых координатах. Однако при больших ошибках (+2 м, -2 м на рис.12а,б), выигрыш не заметен, падает до трех раз, и даже возникает проигрыш в некоторых местах.

Чтобы точнее оценить устойчивость фазового метода, следует проводить анализ для более малых ошибок. При малых ошибках (± 0.5 м на рис.13а,б) выигрыш более заметен.

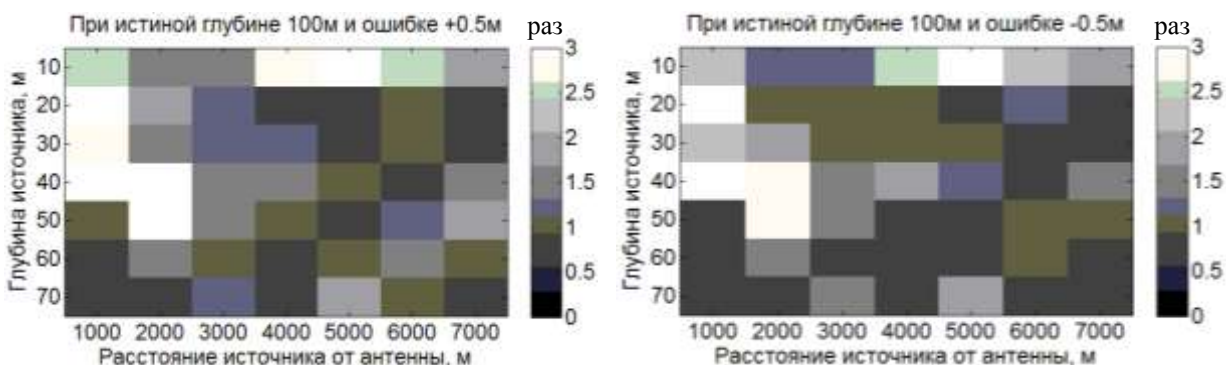


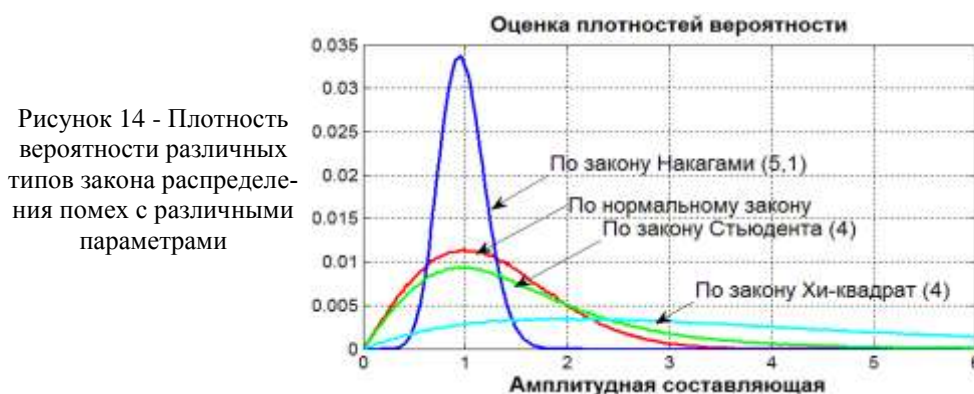
Рисунок 13 - Выигрыш (ОСП) фазового метода с традиционным методом при задании волновода с малыми ошибками

Таким образом, чем меньше величины ошибок по глубине, тем больше величины выигрыша фазового метода по сравнению с традиционным методом. При точном задании глубины, выигрыш достигает максимального.

По этому, следует обладать точным знанием о глубине при использовании фазового метода, и в целом, при применении методов обработки сигналов, согласованных со средой.

В четвертой главе проведен анализ методов согласованной обработки для разных законов распределения помех в качестве их амплитудной и фазовой составляющих. В результате полученных результатов оценивается устойчивость данного алгоритма и предлагается новое направление в дальнейшем исследовании. Выбор законов распределения базировался на имеющихся данных в литературе, а также возможностях пакета МАТЛАБ, в котором проводилось моделирование.

На рис.14 представлены результаты моделирования 4-х законов распределения с различными задачными параметрами: нормального закона, закона χ^2 (после нормирования), закона Стюдента (после нормирования), закона Накагами.



С помощью созданной модели автором рассмотрена эффективность работы алгоритмов фазового варианта при различных типах распределения помех: поле шума судоходства - по закону χ^2 (для амплитудной составляющей после нормирования); поле динамических шумов - по закону Стюдента после нормирования; поле гидродинамических шумов - по закону Накагами. Приводится пример источника в точке ($X = 8$ км, $Z = 40$ м), истинная глубина волновода составляет 100 м. На рис.15 показаны результаты сравнения ОСП фазового и традиционного методов для 2-х методов в двух случаях: а) все поля помех распределены по нормальному закону и б) поля помех распределены по различным законам.

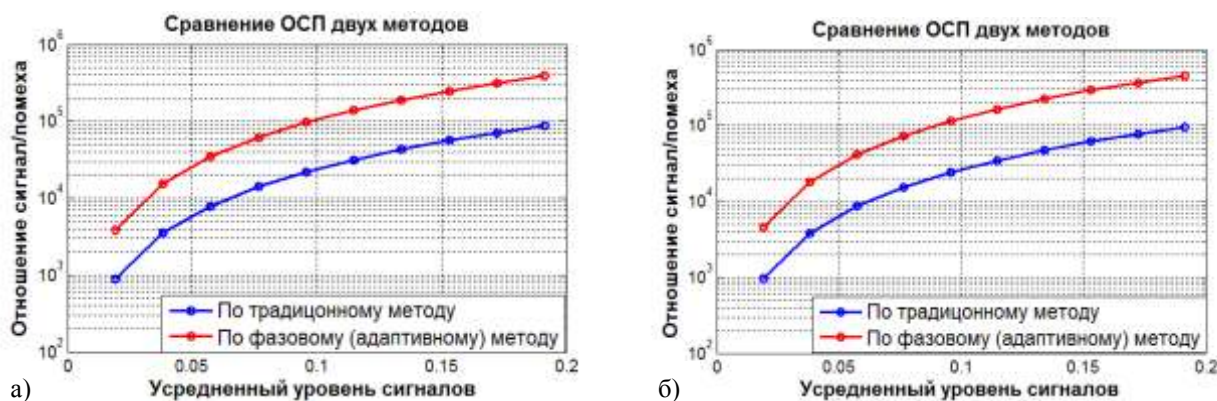


Рисунок 15 - Результаты сравнения ОСП традиционного и фазового методов

Результаты показывают, что фазовой метод является устойчивым к любым законам распределения помех с различными параметрами и имеет хороший выигрыш по сравнению с традиционным методом.

В настоящее время часто анализируется модель шумов как 2 части: амплитудная составляющая с распределением Накагами и фазовая составляющая с равномерным распределением в диапазоне $(-\pi \div \pi)$.

На рис.16 показаны результат моделирования в случаях, когда амплитудные части всех 3-х помех распределяющиеся по закону Накагами с различными параметров распределения: (рис.16.а: $m=1, \nu=1$) и (рис.16.б: $m=5, \nu=1$) и фазовая часть с равномерным распределением в диапазоне $(-\pi \div \pi)$

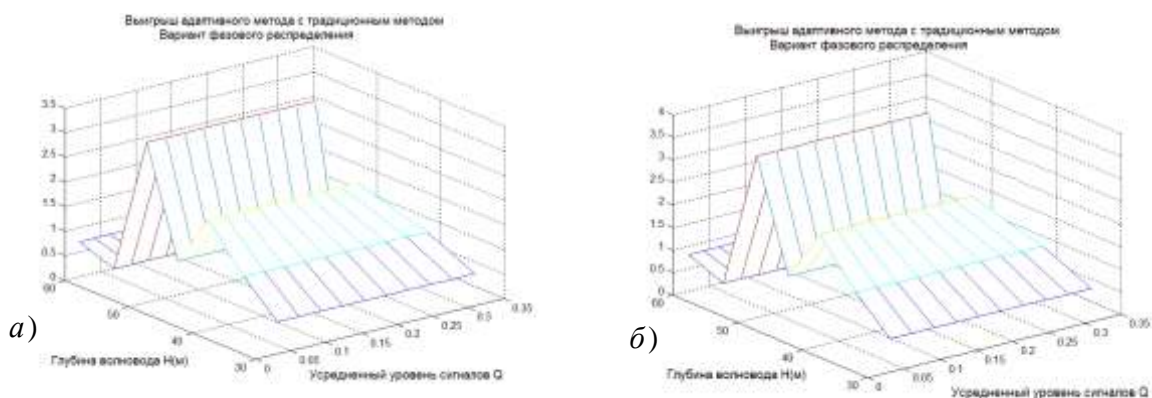


Рисунок 16 - Выигрыш фазового метода в 2 -х случаях распределения Накагами (для амплитудной части) с традиционным методом

Приведенные результаты показывают, что фазовой метод является устойчивым к любым законам распределению помех с различными параметрами и имеет хороший выигрыш (по ОСП) в сравнении с традиционным методом. При изучении ГАУ в любом районе мелкого моря следует серьезно проанализировать свойства сигнала, помехи и точно выбрать законы распределению.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Предложено новое направление повышения эффективности СГАК, работающего в режиме ШП, основанное на использовании метода согласованной со средой распространения сигнала обработки.

2. Созданы имитационные модели сигнала, помехи и универсальная программа в среде MATLAB, соответствующая требованиям поставленной задачи в условиях волновода Пеке-риса. Кроме того, предложенная имитационная модель может быть использована и расширена для других задач, связанных со обработкой сигналов в тракте ШП, в частности, для других моделей канала распространения, иных моделей полей помех или сигнала.

3. Разработаны адаптивные алгоритмы обработки сигналов, согласованные со средой распространения. Проанализирована эффективность работы 3-х вариантов согласованного со средой алгоритма: амплитудного, амплитудно-фазового и фазового распределений. На основе созданной программы проведена сравнительная оценка эффективности этих вариантов и

показано преимущество фазового варианта по сравнению с традиционным и другими методами, предложенными в работе.

4. Подтверждена устойчивость адаптивных алгоритмов, согласованных со средой, в различных ГАУ (в т.ч. мелком море). Показана целесообразность их применения в некоторых практических ситуациях.

5. Исследована устойчивость адаптивных алгоритмов к различным законам распределения полей помех, воздействующих на систему, и показано, что новый алгоритм приобретает перспективы применения для любого типа распределения сигнала и помехи.

Все результаты, полученные в диссертационной работе, направлены на практическое применение в реальных ГАУ, в т.ч. для района мелкого моря Вьетнама, и обеспечивают повышение эффективности работы СГАК в режиме ШП на этапе первичной обработки сигналов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Ермолаев В. И., Селезнев И. А., Буй Чыонг Занг. Анализ гидролого-акустических характеристик и расчет звукового поля в Северном регионе Восточного моря Вьетнама // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012, № 10, С. 83–91.

2. Буй Чыонг Занг. Анализ и моделирование гидроакустических помех в районе залива Бакбо // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013, № 2, С. 77-86.

3. Селезнев И.А., Янпольская А.А., Буй Чыонг Занг. Обработка гидроакустических сигналов в стационарной системе шумопеленгования с учетом согласования со средой // Гидроакустика, 2014, № 19, С.93-98.

4. И.А. Селезнев, А.А. Янпольская, Буй Чыонг Занг. Оценка влияния закона распределение шумов на помехоустойчивость линейных антенн // Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества", посвященной памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смольякова и В.И. Попкова. (<http://rao.akin.ru/Rao/sess27/proceedings27.htm>)

5. И.А. Селезнев, А.А. Янпольская, Буй Чыонг Занг. Адаптивные алгоритмы обработки сигналов в режиме шумопеленгования, согласованные со средой распространения сигнала // Сборник трудов XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», С.86-89.

6. Буй Чыонг Занг. Методы обработки сигналов, согласованные с каналом распространения, для стационарной гидроакустической системы, работающей в режиме шумопеленгования // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014, № 6, С.70-74.

Публикации в других изданиях

7. Ермолаев В. И., Буй Чыонг Занг. Моделирование помех и расчет акустического поля в ограниченно водном районе залива Бакбо использованием географических данных (перевод с английского языка) // Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013). Publisher: Springer Verlag (Germany). Lecture Notes in Geoinformation and Cartography 2014, pp 277-287.

8. Буй Чыонг Занг, Янпольская А.А. Об одном подходе к частично согласованной со средой обработке сигналов в гидроакустической системе ШП // Сборник трудов третьей молодежной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (МАГ-2013), Санкт-Петербург, ОАО «Концерн «Океанприбор», (Санкт-Петербург, 09 – 11 октября 2013г.), с.34-37.3.

9. Отчетные материалы по НИР «Акула-ОП» (этап 2, 2013 г.), ОКР «Покров» (этап 4, 2013 г.), выполняемых ОАО «Концерн «Океанприбор» в рамках ряда ФЦП по заказу Минпромторга РФ).