

Научный центр волновых исследований
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук
(филиал)

На правах рукописи

Михнюк Александр Николаевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

01.04.06 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: к. т. н. Драченко В. Н.

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Мультистатическая система подводного наблюдения в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта.....	15
1.1. Особенности построения мультистатической системы подводного наблюдения, влияющие на эффективность ее функционирования	15
1.2. Критерии, показатели, характеризующие эффективность мультистатической системы подводного наблюдения	20
1.3. Модели сигналов и помех, используемые для оценки эффективности функционирования мультистатической системы подводного наблюдения	22
1.3.1 Модель функции Грина.....	23
1.3.2. Модель прямого поля	25
1.3.3. Модель поля эхо-сигнала	26
1.3.4. Характеристики малоразмерного движущегося подводного объекта при моделировании процесса обнаружения.....	28
1.3.5. Модели помех.....	30
1.4. Существующие методы обработки сигнально-помеховой ситуации, определяющие эффективность функционирования мультистатической системы подводного наблюдения	38
1.5. Постановка задачи по разработке методов повышения эффективности функционирования мультистатической системы по обнаружению малоразмерных движущихся подводных объектов.....	40
1.6. Выводы.....	43
2. Реализация гидроакустической совместимости в мультистатической системе подводного наблюдения	45
2.1. Гидроакустическая совместимость при функционировании гидролокационных станций в мультистатическом режиме в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта.....	45
2.2. Адаптивная режекция сигналов с известной формой и временами приема.	46

2.2.1. Математическое описание метода адаптивной режекции сигналов с известной формой и временами приема	46
2.2.2. Анализ эффективности алгоритма, реализующего метод адаптивной режекции сигналов с известной формой и временами приема.....	47
2.3. Адаптивная режекция мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах.....	51
2.3.1. Математическое описание метода адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах.....	51
2.3.2. Анализ эффективности алгоритма, реализующего метод адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах	54
2.4. Применение разработанных методов решения задачи гидроакустической совместимости при обработке экспериментальных данных	66
2.5. Выводы.....	67
3. Идентификация эхо-сигналов и комплексирование их параметров мультистатической системой подводного наблюдения.....	69
3.1. Идентификация эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой	69
3.2. Комплексирование параметров эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой.....	75
3.3. Оценка эффективности методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров.....	77
3.4. Практическое применение разработанных методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров	91
3.5. Выводы.....	93
4. Позиционирование гидролокационных станций в мультистатической системе подводного наблюдения	94
4.1. Взаимное позиционирование гидролокационных станций в составе мультистатической системы подводного наблюдения	94
4.1.1. Взаимное позиционирование гидролокационных станций по излучаемым ими сигналам в однородной среде.....	95

4.1.2. Взаимное позиционирование гидролокационных станций в неоднородном морском волноводе с применением системы гидроакустических расчетов.....	103
4.2. Оценка координат источника звука, основанная на согласовании с морским волноводом разностей времен распространения сигналов по различным лучам	106
4.2.1. Математическое описание метода согласованной с морским волноводом обработки сигналов.....	106
4.2.2. Анализ эффективности метода согласованной с морским волноводом обработки сигналов.....	107
4.3. Позиционирование гидролокационных станций по неподвижным отражателям.....	116
4.3.1. Математическое описание метода позиционирования гидролокационных станций по неподвижным отражателям	116
4.3.2. Анализ эффективности алгоритма, реализующего метод позиционирования гидролокационных станций по неподвижным отражателям	120
4.4. Выводы.....	130
5. Оценка вклада разработанных методов в повышение эффективности мультистатической системы подводного наблюдения	132
5.1. Метод оценки эффективности алгоритмов, реализующих обработку гидроакустической информации в мультистатической системе подводного наблюдения	132
5.2. Методика оценки эффективности разработанных алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю...	135
5.3. Выводы.....	148
Заключение	150
Список сокращений	151
Список литературы	152
Приложение А. Малоразмерные движущиеся подводные объекты	167

Введение

Актуальность решаемой задачи.

Интенсивное развитие и освоение акваторий в пределах морской экономической зоны государства, а также освоение морских просторов в масштабе Мирового океана обусловили необходимость разработки и создания систем подводного наблюдения. Одним из наиболее перспективных классов подобных систем являются мультистатические системы подводного наблюдения (МСПН), которые представляют собой систему пространственно разнесенных гидролокационных станций с пересекающимися зонами обзора. Подклассом таких систем являются МСПН для обнаружения малоразмерных подводных объектов, на примере которых ведется рассмотрение в настоящей работе.

В связи со значительным прогрессом в развитии и применении различного рода морских подводных малоразмерных роботизированных средств и комплексов в морской хозяйственной деятельности возникает необходимость организации наблюдения при выполнении следующих процессов [1 – 7]:

- подводный мониторинг акваторий с целью отслеживания перемещений морских животных и рыб;
- охраны акваторий от несанкционированного проникновения различных подводных объектов;
- получение данных по текущим координатам всех обнаруженных в акватории объектах и параметрам их движения;
- навигационное обеспечение для контроля и управления режимами движения подводных роботизированных средств.

Проведенный анализ развития гидроакустических средств за рубежом позволяет выделить мультистатический режим работы гидроакустических средств обнаружения подводных объектов как приоритетное направление, которое будет совершенствоваться за счет расширения частотного диапазона, перехода

функционирования на шумоподобные сигналы, отстройку от реверберационной помехи и внедрения активно-пассивных многопозиционных систем [1, 8, 9].

Актуальные требования к МСПН [10 – 12]:

- моностатический, бистатический и мультистатический режимы функционирования, в том числе при целевом управлении работой гидролокаторов подсветки и пассивных приемных систем;
- согласование работы стационарных, быстроразвертываемых и буксируемых средств подсветки с трактами шумопеленгования;
- совместное функционирование однотипных быстроразвертываемых гидролокационных станций (ГЛС), входящих в состав МСПН, для оперативного создания зон освещения подводной обстановки произвольной формы;
- увеличение дальности обнаружения малоразмерных целей до 1 – 2 км и точности оценки координат обнаруживаемых объектов до 5 – 10 м.

Технологической основой для улучшения эффективности функционирования МСПН послужили достижения в следующих областях науки и техники:

- развитие приемных и излучающих гидроакустических антенн, с использованием новых достижений в технологиях и материаловедении;
- развитие вычислительной техники, электронной аппаратуры и ее компонентов;
- развитие математического обеспечения и алгоритмов обработки гидроакустической информации.

Научные усилия исследователей в области повышения эффективности функционирования МСПН направлены на решение следующих задач:

- минимизация влияния помех, обусловленных внешними акустическими шумами, присутствующими в контролируемой акватории, а также минимизация влияния реверберации;
- минимизация мешающего влияния излучения соседних ГЛС, входящих в состав МСПН (задача гидроакустической совместимости);

- обеспечение возможности позиционирования ГЛС (в том числе динамического) в акватории;

- минимизация потока данных, передаваемых с ГЛС на пост наблюдения и комплексирования информации;

- максимальная унификация ГЛС, входящих в состав МСПН.

Совокупность этих сложных научных и технологических направлений составляет актуальную задачу, направленную на повышение эффективности функционирования МСПН, построенной на основе последних научных, технических и технологических разработок.

Значительная роль в развитии гидроакустических методов обнаружения объектов принадлежит выдающимся российским и советским ученым. Леонард Эйлер при работе в Петербургской академии наук впервые в России создал ряд работ в области гидродинамики и гидроакустики. Даниил Бернулли написал ряд работ по гидродинамике и механике, решил волновое уравнение. Из русских ученых позднего периода, занимавшихся вопросами гидроакустики, следует отметить А.Г. Столетова, П.Н. Лебедева, В.Д. Зернова, А.Н. Крылова и многих других.

Из отечественных ученых и инженеров советского периода можно отметить Н.Н. Андреева, В. А. Зарайского, С.Н. Ржевкина, Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанова, А.А. Харкевича, Ю.М. Сухаревского, Л.Я. Гутина, В.Н. Тюлина и других, которые разработали основы современной теоретической и прикладной гидроакустики.

Проблемам повышения эффективности функционирования сложных гидроакустических систем, в части применения эффективных алгоритмов обработки сигналов вторичного гидроакустического поля посвящены труды авторов: В.В. Богородского, В.А. Гусева, Л.П. Блиновой [13], А.Е. Колесникова [14], В.В. Ольшевского [15], а в части функционирования МСПН: Б.К. Новиков, О.В. Руденко, В.И. Тимощенко, А.Г. Голубков [16], В.Б. Митько [17] и иностранные специалисты: Х.О. Барктей, Т.А. Биркен, К.Л. Бьерно, Р. Вархаген, Р. Дрейк, Д и С Тиота.

В последние годы проблеме повышения эффективности обнаружения малоразмерных движущихся подводных объектов уделяли внимание В.С. Давыдов [18], иностранные специалисты: Д. Кейсенсент [19], Д. Исалтис, М. Кандак.

На настоящее время разработаны принципы построения мультистатических систем, различные алгоритмы совместной обработки информации в мультистатическом режиме [20 – 36], выполнена оценка ошибок целеуказания, обусловленных неточным позиционированием станций [37 – 39], поднимался вопрос оценки эффективности мультистатической локации [40, 41].

Целью диссертационного исследования является разработка новых методов способствующих повышению эффективности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения и целеуказания для малоразмерных движущихся подводных объектов.

Предметом диссертационного исследования являются методы повышения эффективности функционирования мультистатической системы подводного наблюдения.

Задачами диссертационного исследования являются:

1. Проведение комплексного анализа эффективности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта, включающего в себя оценку применения существующих методов обработки информации.

2. Разработка современных методов обработки сигналов, реализующих повышение эффективности функционирования МСПН.

3. Разработка методики оценки вклада в эффективность функционирования МСПН предлагаемых методов.

4. Проведение оценки повышения эффективности функционирования МСПН, с учетом предлагаемых методов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке комплекса методов решения задач обработки гидроакустической информации, позволяющих повысить эффективность МСПН. Разработанная в диссертации методика оценки функционирования МСПН позволяет количественно определить вклад предлагаемых алгоритмов в эффективность ее работоспособность.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в развитии математического описания методов, повышающих эффективность МСПН.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в развитии цифровой обработки гидроакустической информации, позволяющей улучшать технические характеристики гидроакустических станций функционирующих в мультистатическом режиме. Областью применения результатов является организация мониторинга акваторий с помощью МСПН для решения задачи обнаружения и целеуказания движущихся подводных объектов.

Методы исследования включают в себя математическое моделирование сигналов и помех (в лучевом приближении), функционирования МСПН, применение теории обнаружения, статистического анализа и обработку результатов натуральных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Режекция мощного прямого поля от соседних ГЛС, входящих в состав МСПН, увеличивает вероятность обнаружения движущихся подводных объектов.
2. Идентификация обнаруженных МСПН эхо-сигналов и комплексирование их параметров повышает точность оценки координат подводных объектов.
3. Динамическое позиционирование ГЛС в составе МСПН уменьшает смещение оценок координат подводных объектов.

4. Методика оценки вклада разработанных методов в эффективность функционирования МСПН, позволяет количественно определить их роль и место в увеличении эффективности функционирования МСПН.

Достоверность и апробация результатов диссертационного исследования основывается на следующих материалах:

- публикация автором 8 печатных работ по теме диссертационного исследования, из них в изданиях рекомендованных ВАК России – 6;

- участие автора в 2 конференциях по вопросам и материалам диссертационного исследования;

- использование результатов диссертационной работы при разработке технических средств подводного мониторинга (2 акта внедрения);

- научно-технические отчеты (более 30 шт.), выпущенные в рамках выполнения НИОКР НЦВИ ИОФ РАН («Самолов», «Аргонавт», «Тильда», «Олимп», «Кижуч–Гидросовместимость», «Валдай»);

- подготовка и участие автора в многочисленных натуральных морских экспериментальных исследованиях и работах (Охотское море, озеро Тунайча о. Сахалин, Японское море, Баренцево море, Черное море, Пироговское вдхр., Химкинское вдхр., Ивановское вдхр.), из них в части диссертационного исследования более 10 экспериментов.

Личный вклад автора в получении результатов диссертационного исследования заключается:

- в разработке методов, повышающих результативность МСПН;

- исследовании эффективности алгоритмов, реализующих указанные методы путем численного моделирования;

- в непосредственном участии в многих натуральных экспериментах;

- в обработке полученной гидроакустической информации и в анализе полученных результатов.

Все вошедшие в диссертацию научные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы задачи исследований и проведен анализ научной новизны полученных результатов и их практической ценности. Описывается структура диссертации.

В главе 1 рассмотрены особенности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта, проведен анализ особенностей построения МСПН, влияющих на эффективность, описаны качественные и количественные критерии и показатели, характеризующие эффективность функционирования МСПН.

Проведен системный анализ методов и способов обработки сигнально-помеховой ситуации, влияющих на эффективность функционирования МСПН, с учетом особенностей обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта, в том числе и с учетом анализа математических моделей гидроакустических полей.

В результате проведенного анализа особенностей функционирования МСПН выявлены следующие способы повышения эффективности применительно к задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта: увеличение дальности действия отдельных ГЛС, увеличение вероятности обнаружения цели (в том числе за счет уменьшения мешающего влияния излучения соседних ГЛС), увеличение точности целеуказания (в том числе и за счет увеличения точности позиционирования ГЛС в составе МСПН). С учетом модели функционирования МСПН в целом, поставлена формализованная задача, которая заключается в разработке и создании алгоритмов, реализующих методы

повышения эффективности функционирования МСПН в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта.

В главе 2 рассмотрены способы решения задачи гидроакустической совместимости ГЛС в составе МСПН, т.е. задачи преодоления мешающего воздействия прямых полей от соседних станций на работу каждой станции в системе.

В качестве решения задачи увеличения эффективности функционирования МСПН предложен ряд методов режекции прямых полей соседних ГЛС при различной степени априорной неопределенности. Сформированы алгоритмы обработки сигналов, реализующие обнаружение по вторичному гидроакустическому полю, с учетом предложенного математического описания. Проведено математическое моделирование с применением указанных алгоритмов с целью проверки их работоспособности и приведены достигнутые при их применении результаты.

В главе 3 рассмотрены методы решения задачи идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров (оценок текущих координат подводного объекта).

При обнаружении по вторичному гидроакустическому полю максимальный вклад в ошибку при оценке координат обнаруженной цели вносит ошибка определения направления на цель, в то время как время распространения эхо-сигнала от цели (дистанция) при применении сложных широкополосных сигналов оценивается с высокой точностью. Таким образом, при работе системы ГЛС можно использовать различные модификации разностно-дальномерного метода, при котором точность оценок координат определяется точностью оценок времен распространения.

В качестве решения задачи увеличения точности оценки координат цели предложены методы идентификации обнаруживаемых эхо-сигналов и комплексирования их параметров. Сформированы алгоритмы обработки сигналов

с учетом предложенного математического описания. Проведено математическое моделирование с применением указанных алгоритмов с целью проверки их работоспособности и приведены достигнутые при их применении результаты.

В главе 4 рассмотрены методы позиционирования ГЛС.

В случае, когда станции в мультистатической системе не имеют жесткой связи с дном, они могут перемещаться в пределах некоторого расстояния, определяемого длиной якорного каната. Данные перемещения приводят к ошибкам в оценках текущих координат обнаруживаемых целей, а также снижают эффективность методов идентификации целей и комплексирования их параметров. Для компенсации указанных ошибок необходимо точно определить текущее местоположение и ориентацию ГЛС. Иными словами необходимо решить задачу позиционирования ГЛС на момент получения отметок обнаруженных объектов.

В качестве решения задачи увеличения эффективности функционирования МСПН предложен ряд методов позиционирования ГЛС в составе МСПН. С учетом предложенного математического описания сформированы алгоритмы обработки сигналов. Проведено математическое моделирование с применением указанных алгоритмов с целью проверки их работоспособности и эффективности, приведены достигнутые при их применении результаты.

В главе 5 разработана и апробирована методика оценки эффективности алгоритмов, реализующих методы повышения эффективности функционирования МСПН, на основании модели функционирования МСПН.

Проведены статистические исследования с целью оценки повышения эффективности функционирования МСПН, с учетом применения предложенных алгоритмов, реализующих методы обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю применительно к задаче обнаружения малоразмерных движущихся подводных объектов, с учетом многочисленных исследований и испытаний в натурных морских условиях.

В заключении представлены выводы диссертационного исследования, позволяющие судить об объеме и полноте диссертационного исследования, выполнении цели и задач диссертационного исследования, решении поставленных научных и технических вопросов, значимости полученных результатов и их научно-технической новизне и практичности.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения, изложена на 173 страницах и содержит 63 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 169 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность своим научным руководителям д.ф.-м.н. В.В. Бородину и к.т.н. В.Н. Драченко за неоценимую помощь при подготовке диссертационной работы

1. Мультистатическая система подводного наблюдения в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта

1.1. Особенности построения мультистатической системы подводного наблюдения, влияющие на эффективность ее функционирования

Гидроакустическая техника все более широко применяется для решения важнейших коммерческих и военных задач в части мониторинга и поиска малоразмерных подводных, движущихся объектов, в части решения проблем по освоению Мирового океана и надежного обеспечения технических сил коммерческих организаций и военных ведомств, ведущих свою деятельность на море. Задачи информационного водного и подводного мониторинга решаются с помощью современных систем и технических средств непрерывного и дискретного наблюдения.

В качестве ключевых и наиболее эффективных средств решения задач информационного мониторинга надводной и подводной обстановки рассматриваются МСПН, нацеленные на не только глубоководные океанские акватории, но и мелководные прибрежные зоны.

В военно-морских силах (ВМС) иностранных государств, в настоящее время имеются следующие системы подводного наблюдения [42]:

- Интегрированная система освещения подводной обстановки IUSS (Integrated Undersea Surveillance System), объединяющая стационарные и мобильные комплексы дальнего гидроакустического наблюдения, боевого управления и связи в зонах действий передовых группировок ВМС. Система IUSS предполагает совместное использование обобщенной информации о подводной обстановке различными, в том числе удаленными или находящимися в подводном положении, абонентами, входящими в состав единой сети обмена данными.

- Стационарная система дальнего гидроакустического наблюдения SOSUS была развернута в Атлантическом и Тихом океанах еще в начале 70-х годов

прошлого столетия, в самый разгар «холодной» войны. Основное ее предназначение – обнаружение, определение местоположения и элементов движения атомных ракетных подводных лодок вероятного противника с помощью кабельной сети подводных гидрофонов, проложенной по дну океанов.

- Позиционно-маневренная система дальнего гидроакустического наблюдения SURTASS предназначена для освещения подводной и надводной обстановки на океанских и морских театрах военных действий. Основой этой системы являются корабли гидроакустической разведки, оборудованные активно-пассивными гидроакустическими комплексами с гибкими протяженными буксируемыми антеннами. Эта система обладает достаточно высокой надежностью и эффективностью и дополняет систему SOSUS.

- Позиционная система прибрежного гидроакустического наблюдения FDS разработана для обнаружения подводных целей (малошумных дизельно-электрических подводных лодок, подводных аппаратов) в мелководных районах моря. Она состоит из подводного элемента UWS (Underwater Segment) и берегового центра обработки и анализа информации SSIPS (Shore Signal Information Processing Segment). Основу подводного элемента составляют закрепленные на дне протяженные линии гидрофонов. Разработка системы велась с использованием современных достижений в области гидроакустики, микропроцессорной и электронно-вычислительной техники, а также перспективных разработок в волоконной и акустооптической областях. В настоящее время в рамках программы «Акустическое наблюдение» развернуты антенные поля системы FDS (большой протяженности) в Западной части Атлантического океана в районе п-ова Флорида.

- Система освещения подводной обстановки ADS, которая разрабатывается для многократного использования с кораблей и подводных лодок. Она предназначена для обнаружения в прибрежных акваториях малошумных, в том числе сверхмалых подводных лодок и аппаратов противника, а также для вскрытия скрытых минных постановок. ADS будет иметь меньшие по сравнению с существующими образцами массогабаритные характеристики, а ее модульная

архитектура позволит изменять конфигурацию в зависимости от поставленных задач и условий применения. В состав этой системы предусматривается включить три основных элемента: комплект средств подводного наблюдения, аппаратуру обработки поступающих данных, а также сменные специализированные автономные подводные модули разного типа и назначения.

В целях повышения эффективности подобных систем основные усилия разработчиков в следующих областях [28 – 36]:

- создание новых систем формирования гидроакустических сигналов, применение которых обеспечит возможность осуществлять поиск одновременно с узко- и широкополосной обработкой сигнала в целях своевременного обнаружения малоподвижных (в том числе лежащих на грунте) и высокоскоростных целей;

- совершенствование и внедрение алгоритмов многопроцессорной корреляционной обработки сигналов с компиляцией полученных данных в целях достижения высокой надежности обнаружения целей в сложных динамических условиях тактической обстановки;

- дальнейшее развитие перспективных методов и способов классификации объектов, основывающихся на широком применении передовых наработок в области технологий сверхбольших интегральных схем и монокристалльных систем с высокой степенью интеграции вентиляционных матриц и реструктурируемыми программными блоками, а также программно-аппаратных средств с расширенными функционально-логическими возможностями решения неопределенностей;

- нейтрализация влияния на шумопеленгаторные системы помех, обусловленных шумами моря и винтов проходящих судов и создание адаптивных антенных решеток как инструмента для борьбы с мешающими целями при обработке сигналов в пространственной области;

- совершенствование способов и аппаратуры гидроакустической классификации, обнаруженных целей и использование при производстве

электроакустических преобразователей новых магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов (терфенол, пьезорезина и др.);

- внедрение оптоволоконных технологии и оснащение гидроакустических станций (ГАС) антеннами с синтезированной апертурой и технологии искусственного интеллекта на этапах обработки информации, анализа гидроакустических условий и принятия решений оператором гидроакустического комплекса (ГАК) в сложных многоальтернативных ситуациях.

На рисунке 1.1 показан пример структуры построения МСПН военного назначения.



Рисунок 1.1 Вариант структуры построения МСПН военного назначения

В зарубежных странах наиболее масштабные и целенаправленные работы проводятся по созданию МСПН и технических средств защиты объектов ВМС в местах их базирования, а также гражданской морской инфраструктуры от малоразмерных движущихся подводных объектов и террористов. Они носят системный характер и выполняются в рамках национальных проектов и программ.

Системы подобного рода строятся по зонально-объектовому принципу, что предусматривает создание последовательных рубежей обнаружения малоразмерных подводных объектов как на подходах к порту и на входе в порт, так и во внутренних акваториях портов и пунктов базирования. По своей структуре

система состоит из следующих элементов: средств обнаружения, систем управления и связи, а также средств поражения.

Важной особенностью МСПН является физическое расстояние между излучателем, который является источником гидроакустического импульса, и приемными антеннами, отвечающими за обнаружение и локацию эхосигналов.

Преимущество таких систем, в частности, состоит в их гибкой и модульной архитектуре, сложность которой устанавливают применительно к географическим и эксплуатационным условиям. С другой стороны, такая архитектура требует наличия средства связи между всеми ГЛС, входящими в состав МСПН. В частности, чтобы обеспечивать когерентное обнаружение, принимающим ГЛС должны быть известны параметры излучаемого сигнала.

Широко распространенным средством установления связи между излучающей базой и приемными базами является радиосвязь, например, по линиям высокочастотной или спутниковой связи. Как правило, осуществляют передачу информации двух типов:

- контекстную информацию, касающуюся природы излучаемого импульса (кодировки, длительности и т.д.), положения излучающей ГЛС, общей конфигурации гидроакустической системы, или иную фактическую информацию,
- синхронизирующую информацию, которая позволяет точно установить момент излучения гидроакустического импульса и рассчитать расстояние между объектами, от которых отразился эхосигнал, и приемными базами.

В данной работе рассматривается быстроразворачиваемая МСПН для обнаружения малоразмерных объектов, состоящая из однотипных ГЛС. Задача синхронизации решается предварительной настройкой системы. Сигналы излучаемые отдельными ГЛС известны.

1.2. Критерии, показатели, характеризующие эффективность мультистатической системы подводного наблюдения

Способ оценки эффективности многопозиционной активно-пассивной ГАС [43] заключается в вычислении зон вероятности обнаружения сигнала в виде сечений в горизонтальной или вертикальной плоскости при заданной вероятности ложной тревоги, различных конфигураций системы излучающих и приемных антенн и для меняющихся гидрологических условий заданного региона (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2. Пример МСПН.

Способ определения эффективности ГЛС в структуре МСПН заключается в расчете эффективности как отдельных ГЛС, так и оценки эффективности функционирования МСПН в целом. Излучающие и приемные антенны могут быть как стационарными, так и находящимися на мобильных носителях.

Предполагается периодическое измерение меняющихся гидрологических условий (характеристик гидроакустического канала распространения сигналов,

характеристик волнения моря и др.) [44 – 46], уточнение координат приемных и излучающих антенн и проведение расчета вероятности правильного обнаружения при заданном уровне ложной тревоги.

Гидроакустические антенны являются частью (чувствительным элементом) ГЛС. При этом специальные вычислители формируют на основе сигналов датчиков пространственно-временные либо пространственно-частотные спектры акустического поля с помощью адаптивных либо не адаптивных алгоритмов [47, 48].

Расчет порога для построения вероятностных зон обнаружения ГАС при наличии одной излучающей и одной приемной антенны представлен в [49]. Расчет дальности действия гидроакустических антенн-приемных систем (одна излучающая и одна приемная антенна) представлен в [50]. Данные подходы выбираются за аналог для применяемого способа обработки сигналов.

Недостатком известных аналогов является отсутствие общей системы расчета, для наглядного демонстраирования эффективности определенной гидроакустической системы и сравнения ее с другими, с учетом различных конфигураций системы излучающих и приемных антенн и с учетом меняющихся гидрологических условий заданного региона.

Наиболее близким по своей сущности и достигаемому результату (прототипом) к предлагаемому способу является «Модель зон обнаружения морской РЛС» П.В. Николаева и Н.В. Самбунова [51], в которой рассмотрены прикладные вопросы построения зон обнаружения радиотехнических средств. Особое внимание в указанной работе уделено программной реализации построения зон и разработана модель прогнозирования зон обнаружения и алгоритм их построения, которые позволяют производить расчет и построение зон обнаружения на основе исходных данных о параметрах окружающей среды на трассе радиотехническое средство-цель, параметров станции и водной поверхности.

Недостатком известной модели является отсутствие построения зон обнаружения при условии многопозиционной активно-пассивной

гидроакустической системы. Также наш способ построения, в отличие от известной модели, учитывает водную среду распространения сигналов.

Как правило, эффективность МСПН, в том числе и ГАС, определяется вероятностью обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги. Определение эффективности отдельных гидроакустических антенн обычно является частью гидроакустических расчетов и реализуется с помощью соответствующих компьютерных программ [52].

Методология оценки эффективности ГЛС была разработана в середине 80-х годов в Акустическом институте им. Н.Н. Андреева с учетом условий распространения звука в океане, определяемых путем расчета с помощью функции Грина и статистических характеристик помех [53, 54].

1.3. Модели сигналов и помех, использующиеся для оценки эффективности функционирования мультистатической системы подводного наблюдения

Модель измерения в морском волноводе в активном режиме выглядит следующим образом. Сигналы, регистрируемые приемниками антенны, расположенными в точках \mathbf{r}_R , пропорциональны звуковому давлению $p(\mathbf{r}_R, t)$ [55, 56].

$$p(\mathbf{r}_R, t) = p_S(\mathbf{r}_R, t) + \varepsilon p_T(\mathbf{r}_R, t) + p_N(\mathbf{r}_R, t), \quad R = 1, \dots, N_R, \quad t \in (0, T), \quad (1.1)$$

где $p_S(\mathbf{r}_R, t)$ – давление прямого поля;

$p_T(\mathbf{r}_R, t)$ – давление поля эхо-сигнала, значение параметра ε равно единице при наличии цели и нулю, если цель отсутствует;

$p_N(\mathbf{r}_R, t)$ – давление поля помехи, которая состоит из следующих компонент – тепловые шумы предварительных усилителей тракта обработки сигналов, шумы моря, помехи от дальнего и ближнего судоходства и морской бистатической реверберации, порождаемой рассеянием прямого поля на взволнованной поверхности, объемных неоднородностях и неровностях дна.

1.3.1 Модель функции Грина

Акустические поля, как сигналов, так и помех, можно рассчитать, используя функцию Грина [57]. На частотах от сотен герц и выше наиболее эффективным для решения большинства задач как в регулярных плоскостойких [58], так и в нерегулярных двух- и трехмерных океанических волноводах, оказывается лучевое приближение функции Грина [59], когда она представляется в виде суммы по лучам отдельных квазиплоских волновых полей:

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) = \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} A_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \delta(\tau - t_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')) \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) &= \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} A_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) \cdot \exp(i\omega t_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')) = \\ &= \oint \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} A_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) \cdot \exp(i\omega t_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')) \cdot \delta(\mathbf{e} - \mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')) d\Omega(\mathbf{e}) \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $M(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – полное число лучей, соединяющих точку наблюдения \mathbf{r} и точку \mathbf{r}' , в которой расположен источник;

$$A_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) = \frac{F_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega)}{R(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} \quad \text{– амплитуда поля, пришедшего по } \mu\text{-му лучу,}$$

$$\mu = 1 \dots M(\mathbf{r}, \mathbf{r}');$$

$$F_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) = \sqrt{f_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} \cdot V_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega);$$

$f_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – фактор фокусировки для μ -го луча;

$$V_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) = (V_{\text{Surf}}(\mu))^{n_{\text{Surf}}} (V_{\text{Bot}}(\mu))^{n_{\text{Bot}}} \cdot 10^{-0.05\beta_{\text{Wat}}ct_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} \quad \text{– коэффициенты, учитывающие}$$

ослабление поля при распространении по соответствующим лучам вследствие n_{Surf} , n_{Bot} взаимодействий с границами волновода с коэффициентами отражения $V_{\text{Surf}}(\mu)$, $V_{\text{Bot}}(\mu)$ и вследствие поглощения в воде с коэффициентом затухания β_{Wat} (в дБ/км);

$R(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – расстояние в горизонтальной плоскости между источником и точкой наблюдения;

$t_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – время распространения сигнала по μ -му лучу;

$\mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – единичный вектор μ -го луча в точке приема.

Для вычисления коэффициента отражения от взволнованной поверхности V_{Surf} используются следующие выражения [53]:

$$V_{\text{Surf}} = e^{-0,1p \sin \chi \cdot \max\{5p \sin \chi, \sqrt{p}\}}, \quad p = 8,3776f \sigma_{\text{Surf}}, \quad \sigma_{\text{Surf}} = \begin{cases} 0,0053v^2, & v > 8 \text{ м/с} \\ 0,0018v^2, & v < 8 \text{ м/с} \end{cases} \quad (1.4)$$

где χ – угол скольжения луча у соответствующей границы, f – частота, v – скорость ветра.

Коэффициент отражения от дна V_{Bot} вычисляется с использованием следующих моделей дна и соответствующих им выражений [53]:

1. дно со слаборасчлененным (выровненным) рельефом,
2. дно с умеренно изрезанным рельефом,
3. дно с сильнорасчлененным рельефом,
4. дно – жидкое или упругое изоскоростное полупространство.

$$V_{\text{Bot}} = \begin{cases} \begin{cases} \alpha \sin^2 \chi + \beta \sin \chi + 1, & \chi < \chi_* \\ a_i, & \chi > \chi_* \end{cases} & (\chi_* = 0,376) \text{ для моделей } i = 1,2, \\ \alpha = \frac{0,6 - a_i}{0,061}, \quad \beta = \frac{3a_i - 2,2}{0,349}, \quad a_1 = (0,37f + 2,12)^{-1}, \quad a_2 = 0,5(a_1 + 0,1), & \\ 0,1 \text{ для модели 3} & \\ \text{формулы Френеля для модели 4} & \end{cases} \quad (1.5)$$

где χ – угол скольжения у дна, f – частота.

Коэффициенты отражения могут быть также заданы с помощью таблиц, составленных по экспериментальным данным.

Формально, декремент затухания β_{Wat} можно вычислить по мнимой части фазовой скорости волн в среде [60 – 63]:

$$\beta_{\text{Wat}} = -20\pi \cdot \lg e \cdot \frac{\text{Im} c}{(\text{Re} c)^2} f \quad [\text{дБ/км}]. \quad (1.6)$$

Из многочисленных экспериментальных данных по измерению β_{Wat} [64]:

$$\beta_{\text{Wat}} = \beta_0 (f/f_0)^\alpha, \quad \beta_0; \alpha = \begin{cases} 0,0279; 1,5, & \text{если } f < f_* \\ 0,0114; 2, & \text{если } f > f_* \end{cases}, \quad f_0 = 1 \text{ кГц}, \quad f_* = 6 \text{ кГц}. \quad (1.7)$$

Таким образом, соответствующая мнимая часть скорости звука в воде оказывается зависящей от частоты:

$$\text{Im } c = -\frac{(\text{Re } c)^2}{20 \pi \lg e} \frac{\beta_0}{f_0} (f/f_0)^{\alpha-1}. \quad (1.8)$$

В рамках модели 4 дно является жидким или упругим изоскоростным полупространством. При вычислении коэффициента отражения от дна в этом случае, которое производится по формулам Френеля [65], необходимо задавать комплексные фазовые скорости продольных (c_L) и поперечных (c_T) упругих волн. При этом малые комплексные части этих скоростей, определяющие затухание волн, могут считаться независимыми от частоты.

Действительно, как показывают результаты многих натуральных морских экспериментальных исследований, декремент затухания звука в донных осадках прямо пропорционален частоте, так что из (1.6) следует, что предположение о независимости мнимых частей скоростей упругих волн от частоты является оправданным.

1.3.2. Модель прямого поля

Пусть в некоторой точке с координатами \mathbf{r}_S расположен источник (рисунок 1.3), излучающий сигнал $f(t)$ со спектром $S(\omega)$, обладающий диаграммой направленности $\mathbf{P}_S(\mathbf{e}-\mathbf{e}_0; \omega)$, \mathbf{e} – единичный вектор, определяющий направление излучения, \mathbf{e}_S^0 – единичный вектор, определяющий направление компенсации излучающей антенны.

Тогда модель прямого поля в точке с координатами \mathbf{r}_R будет выглядеть следующим образом [66 – 68]:

$$p_S(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega) = \sqrt{\frac{W \rho c \gamma_s}{4 \pi}} \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)} A_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) e^{i \omega t_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) + i \frac{\omega}{c} (\mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S), \mathbf{r}_S - \mathbf{r}_R)} \mathbf{P}_S(\mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) - \mathbf{e}_S^0; \omega) S(\omega) \quad (1.9)$$

где W – мощность излученного сигнала;

ρc – волновое сопротивление (импеданс) среды;

γ_s – коэффициент концентрации излучающей антенны;

\mathbf{r}_R – координаты фазового центра приемной антенны;

$M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ – число лучей, соединяющих точки излучения и приема;

$A_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ – амплитуда поля, пришедшего по μ -му лучу, $\mu=1..M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$;

$t_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ – время распространения сигнала по μ -му лучу;

$\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S)$ – единичный вектор, касательный к μ -му лучу в точке приема;

$\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ – единичный вектор, касательный к μ -му лучу в точке излучения.

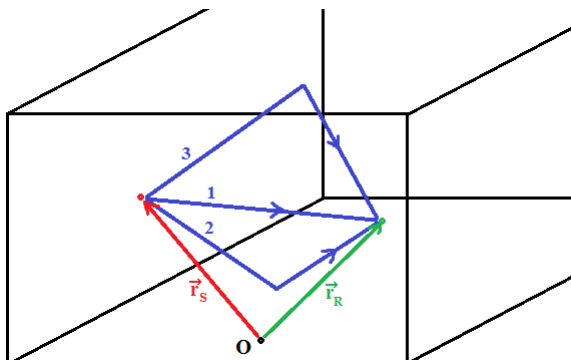


Рисунок 1.3. Модель прямого поля.

На рисунке 1.3 изображен пример расположения излучателя и приемника, а также лучи соединяющие данные точки.

1.3.3. Модель поля эхо-сигнала

В общем случае, когда излучающую антенну и цель, а также приемную антенну и цель соединяют поверхностные, донные и водные лучи, эхо-сигнал представляет собой суперпозицию когерентной и некогерентной компонент.

Когерентная компонента на приемной антенне представляет собой детерминированный процесс либо полностью известный, либо с неизвестными параметрами.

Отражающие свойства объекта локации описываются эквивалентным радиусом $R_T(\mathbf{e}_\nu, \mathbf{e}_\mu; \omega)$, который равен радиусу абсолютно отражающей сферы, создающей в зоне Фраунгофера сигнал такого же уровня, что и рассматриваемый объект ($\mathbf{e}_\nu, \mathbf{e}_\mu$ – единичные векторы отраженной и падающей волн). Когерентная составляющая эхо-сигнала подводной цели в частотном представлении с использованием лучевого приближения имеет следующую структуру:

$$p_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S; \omega) = \sqrt{\frac{W \rho c \gamma_S}{4\pi}} \cdot \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T)} \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S)} A_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T; \omega) A_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S; \omega) \cdot e^{i\omega(t_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S) + t_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T))} \times \times \frac{1}{2} R_T(\mathbf{e}_\nu, \mathbf{e}_\mu; \omega) \cdot \mathbf{P}_S(\mathbf{e}_\mu - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot S(\omega) \quad (1.10)$$

где W – излучаемая акустическая мощность;

γ_S – коэффициент концентрации излучающей антенны;

ρc – волновое сопротивление среды;

$M(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S)$ – число лучей, соединяющих точку излучения и цель,

$A_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S; \omega)$ – амплитуда поля, пришедшего по μ -му лучу, из точки излучения к цели, $\mu = 1.. M(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S)$;

$N(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T)$ – число лучей, соединяющих цель и точку приема,

$A_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T; \omega)$ – амплитуда поля, пришедшего по ν -му лучу, от цели в точку приема, $\nu = 1.. N(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T)$;

$t_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S)$, $t_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T)$ – время распространения μ -му и ν -му лучам соответственно;

\mathbf{r}_S – координаты фазового центра излучающей антенны;

\mathbf{r}_R – координаты фазового центра приемной антенны;

\mathbf{r}_T – координаты цели;

$\mathbf{P}_S(\mathbf{e}_\mu - \mathbf{e}_S^0; \omega)$ – диаграмма направленности излучающей антенны, скомпенсированной в направлении, определяемом единичным вектором \mathbf{e}_S^0 ;

$S(\omega)$ – спектр излучаемого сигнала.

О статистических характеристиках эхо-сигнала обычно делаются следующие гипотезы:

- Общая фаза эхо-сигнала случайна и равномерно распределена на интервале $(0; 2\pi)$.

- Амплитуда эхо-сигнала в зависимости от условий распространения предполагается либо детерминированной, либо случайной и распределенной по закону Рэлея.

- Поскольку в типичных гидроакустических условиях эхо-сигнал имеет многолучевой характер, то обычно предполагается, что начальные фазы и флуктуации амплитуд сигналов, пришедших по разным лучам, независимы.

1.3.4. Характеристики малоразмерного движущегося подводного объекта при моделировании процесса обнаружения

При проектировании и оценке эффективности МСПН ключевым параметром является бистатическая сила цели (БСЦ), которая сложным образом зависит от углов падения и отражения зондирующего сигнала

На практике по аналогии с моностатической гидролокацией часто удобно вместо БСЦ оперировать с бистатическим эквивалентным радиусом (БЭР).

Для оценки БСЦ в случае, когда объект имеет достаточно большие волновые размеры и относительно гладкую поверхность, можно использовать геометрооптическое (высокочастотное) приближение дифракции гидроакустического поля.

В рефракционном волноводе дифрагированное поле является суммой парциальных лучевых компонент, соединяющих источник, и соответствующие им точки бликов на поверхности тела и приемник. Суммируются только те лучевые компоненты, для которых в точках бликов нормаль совпадает с биссектрисой. Коэффициент отражения в каждой бликующей точке тела определяется кривизной поверхности и акустическими характеристиками тела.

В случае, когда тело имеет достаточно большие размеры, рассеянные различными волновыми компонентами, а также бликовыми областями поля могут складываться в противофазе, что приведет к подавлению дифрагированных сигналов (этот эффект можно интерпретировать как уменьшение интегральной БСЦ).

Таким образом, подводные объекты в соответствии с их формой можно разделить на два класса:

- объекты простой формы,
- объекты сложной формы.

К объектам простой геометрической формы можно отнести главным образом тела искусственного происхождения: сферы, цилиндры, сфероиды, конусы и др. Как правило, тела искусственного происхождения имеют вид оболочек эллипсоидной или цилиндрической. Для них отраженные звуковые

колебания могут быть определены расчетным путем, например методами Фурье, интегрального преобразования Лапласа, Т-матричного метода и др. Результаты экспериментальных исследований российских и зарубежных специалистов подтвердили правильность расчетов для тел простой геометрической формы при определенных углах облучения [69].

К объектам сложной геометрической формы можно отнести как тела естественного, так и тела искусственного происхождения, характеризующиеся сложной конфигурацией отражающей поверхности и имеющие, как правило, размеры, намного превышающие длины волн звуковых колебаний. Гидроакустическое поле таких тел формируется в результате сложения полей, отраженных от отдельных участков облучаемой поверхности [70, 71]. В отдельных случаях тела сложной геометрической формы могут быть аппроксимированы телами простой формы, для которых известны формулы расчета отраженных звуковых колебаний. Рассчитанные сигналы от отраженных элементов тела сложной геометрической формы могут быть просуммированы, либо с учетом фазового множителя, либо энергетически в зависимости от требований конкретной задачи.

Малоразмерные движущиеся подводные объекты можно разделить на следующие классы:

- подводные пловцы, движущиеся с помощью ласт,
- подводные пловцы на средствах доставки с механическим двигателем,
- автономные необитаемые подводные аппараты,
- крупные морские животные.

В специализированных изданиях в области по вопросу гидролокации и БЭР малоразмерных целей БЭР одиночного подводного пловца на ластах принимается равным 0.2 – 0.3 м [72 – 75]. БЭР подводного пловца с учетом средств доставки может увеличиваться [76]. Значения БЭР различных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) лежат в широком диапазоне (0.1 – 10 м) в зависимости от класса (размера) АНПА [77 – 79]. БЭР крупных морских

животных равен 0.1 – 1 м [80, 81]. Более подробно малоразмерные подводные объекты описаны в приложении А.

Приведенные данные по БЭР малоразмерных подводных объектов могут быть использованы при оценке возможностей гидроакустических средств по обнаружению указанных объектов по вторичному акустическому полю [1]. Также указанные данные используются в настоящей работе при моделировании процесса функционирования МСПН.

1.3.5. Модели помех

Предполагается, что поля помех независимы от поля эхо-сигнала. Помехами при приеме и обработке эхо-сигнала от цели являются:

- собственная помеха приемной системы (тепловые шумы аппаратуры и т.п.),
- шумы моря (динамические шумы поверхности, шум дальнего судоходства и т.п.),
- шумы ближнего судоходства;
- морская реверберация.

Относительно всех этих помех мы предполагаем, что они распределены в пространстве и во времени по нормальному закону, средним значением этих полей можно, как правило, пренебречь, так что их статистические характеристики полностью описываются пространственно-временной ковариационной функцией $\mathbf{K}_N(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_q, t_1, t_2)$.

Модель собственной помехи. Относительно собственной помехи мы предполагаем, что она гауссова, центрирована, некоррелирована между приемниками и стационарна во времени, так что полностью описывается своей функцией временной корреляции:

$$\mathbf{K}_{N_1}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_q, t_1, t_2) = \mathbf{K}_{N_1}(t_1 - t_2) \delta(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_q), \quad (1.11)$$

где $\delta(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_q)$ – δ -функция Дирака;

$\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_q$ – координаты отдельных приемных элементов антенны.

Модель шумов моря. Шум моря представляет собой одну из основных помех приему акустических сигналов в океане и всегда присутствует на практике. Его источниками являются динамика вод и поверхности, сейсмические возмущения, сверхдальнее (так называемое распределенное) судоходство, биологические и тепловые шумы [82 – 84].

В случае, когда рабочими частотами гидроакустических систем являются частоты от единиц кГц и выше, доминирующим источником шумов является влияние ветра и вызванное им волнение морской поверхности (т.н. динамические шумы моря).

В качестве модели шумов моря принято шумовое поле, создаваемое равномерным распределением источников звука в тонком приповерхностном слое. В регулярном стратифицированном горизонтально-однородном океане вертикальный угловой спектр динамического шума у поверхности $\mathbf{N}(\chi; \omega)$ на частоте ω не будет зависеть от угла φ в горизонтальной плоскости и горизонтальных координат [85]. Без учета рассеяния на поверхности, выражение для $\mathbf{N}(\chi; \omega)$ имеет вид [53]:

$$\mathbf{N}_0(\chi; \omega) = S_{\text{Surf}}(\chi; \omega) \left(1 - |V_{\text{Surf}}(\chi; \omega) V_{\text{Bot}}(\chi_{\text{Bot}}(\chi; 0); \omega) e^{-\beta R(\chi)}|^2 \right)^{-1}, \quad (1.12)$$

где $S(\chi; \omega) = \kappa_{\text{Surf}}(\omega) \sin^{2u_{\text{Surf}}-1}(\chi)$ – частотно-угловой спектр поверхностных источников шума;

$\kappa_{\text{Surf}}(\omega)$ – спектральная плотность мощности поверхностных источников;

u_{Surf} – показатель степени в диаграмме направленности поверхностных источников шума;

$R(\chi)$ – длина цикла луча, имеющего угол скольжения χ на поверхности (т.н. циклическая дистанция);

$\chi_{\text{Bot}}(\chi; z)$ – угол скольжения у дна луча, вышедшего с горизонта z под углом χ ;

$\beta = 0.1(\ln 10)\beta_{\text{Wat}}(\omega)$ – коэффициент затухания в воде, величина $\beta_{\text{Wat}}(\omega)$ рассчитывается с помощью выражения (1.7).

При необходимости пересчета углового спектра шумов моря с поверхности на некоторую ненулевую глубину z , применяется следующее выражение:

$$N(\chi, z; \omega) = N_0(\chi_{surf}(\chi, z); \omega) \frac{c^2(0)}{c^2(z)} \times \begin{cases} e^{-2\beta R_+(\chi)}, & \chi \geq 0, \\ e^{-2\beta R_-(\chi)} |V_{Bot}(\chi_{Bot}(\chi, z); \omega)|^2, & \chi < 0, \end{cases} \quad (1.13)$$

где $R_+(\chi)$ и $R_-(\chi)$ – длины дуг лучей, соединяющих фазовый центр антенны с поверхностью и вышедших из него соответственно вверх и вниз с углом скольжения χ ,

$\chi_{surf}(\chi, z)$ – угол скольжения у поверхности луча, вышедшего с горизонта z по углом χ .

Из данной модели следует, что шумы моря можно считать гауссовым центрированным однородным полем на апертуре антенны, время нестационарности которого определяется временем изменчивости гидрометеоусловий (ГМУ). Учитывая, что это время относительно велико, шумы моря можно считать стационарными во времени, если речь идет о временных промежутках порядка десятков минут.

Таким образом, для шумов моря справедливо следующее равенство:

$$\mathbf{K}_{N_2}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_q, t_1, t_2) = \mathbf{K}_{N_2}(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_q, t_1 - t_2). \quad (1.14)$$

В силу этого удобно перейти к матрице спектральных плотностей, которая описывается выражением:

$$\mathbf{K}_{N_2}(\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{r'}, \omega) = \int N(\mathbf{e}, \omega) \exp\left(i \frac{\omega}{c} (\mathbf{e}, \mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{r'})\right) d\Omega, \quad (1.15)$$

где $N(\mathbf{e}, \omega)$ – угловой спектр шумов окружающей среды;

\mathbf{e} – единичный вектор в направлении наблюдения;

\mathbf{r}_r – координаты r -го приемника антенны;

ω – циклическая частота;

c – скорость звука;

$d\Omega$ – элемент телесного угла.

Модель помехи ближнего судоходства. Рассмотрим случай, когда вблизи приемной антенны находятся N_M кораблей в точках с координатами \mathbf{r}_S , $S = 1..N_M$.

Полагается, что каждый из кораблей излучает независимый, стационарный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью $F_S(\omega)$. В данном случае матрица спектральных плотностей помехи ближнего судоходства будет иметь вид:

$$\mathbf{K}_{N_3}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{R'}; \omega) = \sum_{S=1}^{N_M} \mathbf{G}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{G}^*(\mathbf{r}_{R'}, \mathbf{r}_S; \omega) F_S(\omega), \quad (1.16)$$

где $\mathbf{G}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S; \omega)$ – функция Грина в лучевом приближении (1.3);

$\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{R'}$ – координаты приемников антенны.

Модель реверберационной помехи. Основным источником реверберации при активной локации подводных объектов является рассеяние звука на неровных границах водной среды (дне и поверхности) [86 – 89], а также на неоднородностях, заключенных в ее объеме.

В соответствии с механизмом возникновения, реверберацию подразделяют на поверхностную, донную и объемную. Реверберация во времени, вообще говоря, не является стационарным процессом.

Однако во многих случаях реверберационную помеху можно описать процессом, приводимым к стационарному, у которого коэффициент корреляции является функцией разности времен, а дисперсия зависит от текущего времени. Если зависимость дисперсии от времени относительно «медленная», то на временных промежутках порядка единиц секунд и менее, соответствующих длительности эхо-сигнала в классической гидролокации, реверберационной процесс можно считать стационарным.

Интервал корреляции реверберационной помехи при тех же условиях, наложенных на длительность эхо-сигнала, нам известен и равен интервалу корреляции зондирующего сигнала (ЗС). При относительно небольших размерах приемной антенны реверберационная помеха может рассматриваться как однородное поле и характеризоваться угловым спектром [90].

Рассмотрим приемную антенну, скомпенсированную в направлении \mathbf{e}_R^0 и имеющую характеристику направленности (ХН) по давлению, описываемую функцией $\mathbf{P}_R(\mathbf{e})$. Будем предполагать, как обычно, что реверберация на выходе

приемной антенны представляет собой гауссовый процесс с ненулевым средним и ковариационной функцией $K_I^{\text{Rev}}(t_1, t_2)$ ($I = \text{"Surf", "Bot" или "Vol"}$). Интенсивность реверберации определяется следующим образом: $I_I^{\text{Rev}}(t) = K_I^{\text{Rev}}(t, t)$. Если на приемной антенне формируется веер ХН, рассматривают корреляционную матрицу $[K_I^{\text{Rev}}(t_1, t_2)]_{ij}$ по выходам ХН антенны, элементами которой являются ковариационные функции выходов характеристик. В силу этих определений, интенсивность реверберации и корреляционная матрица связаны так:

$$I_I^{\text{Rev}}(t) = [K_I^{\text{Rev}}(t, t)]_{ij} \Big|_{\mathbf{e}_R^0 = \mathbf{e}_i} . \quad (1.17)$$

По определению, мгновенный угловой спектр реверберации $N_I^{\text{Rev}}(\mathbf{e}, t)$ следующим образом связан с корреляционной матрицей:

$$[K_I^{\text{Rev}}(t, t)]_{ij} = \oint N_I^{\text{Rev}}(\mathbf{e}, t) \mathbf{P}_R(\mathbf{e} - \mathbf{e}_i) \mathbf{P}_R(\mathbf{e} - \mathbf{e}_j) d\Omega(\mathbf{e}) \quad (1.18)$$

и с интенсивностью реверберации:

$$I_I^{\text{Rev}}(t) = \oint N_I^{\text{Rev}}(\mathbf{e}, t) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e} - \mathbf{e}_R^0) d\Omega(\mathbf{e}) \quad (1.19)$$

Объемная реверберация. Непрерывный режим.

В предположении о малости пространственного интервала корреляции рассеивателей по сравнению с характерным пространственным масштабом интерференционной структуры поля, выражение для интенсивности однократной объемной реверберации, созданной рассеянием на элементе dV объема, запишется в виде [91]:

$$dI_{\text{Vol}}^{\text{Rev}} = \frac{W \rho c \gamma_S}{4\pi} dV(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Vol}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega), \quad (1.20)$$

где W – излучаемая акустическая мощность;

γ_S – коэффициент концентрации излучающей антенны;

ρc – волновое сопротивление среды;

\mathbf{r} – координаты точки, в которой происходит рассеяние;

\mathbf{r}_S – координаты фазового центра излучающей антенны;

\mathbf{r}_R – координаты фазового центра приемной антенны;

$N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)$ – число лучей, соединяющих излучатель и точку, в которой происходит рассеяние;

$M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})$ – число лучей, соединяющих приемную антенну и точку, в которой происходит рассеяние;

$m_{\text{Vol}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r})$ – коэффициент обратного рассеяния объемной реверберации;

$\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)$ и $\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r})$ – единичные векторы падающей волны в точке рассеяния и излучения соответственно;

$\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R)$ и $\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})$ – единичные векторы рассеянной волны в точке рассеяния и приема соответственно;

$A_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega)$ – амплитуда поля, пришедшего по ν -му лучу, от излучателя в точку, в которой происходит рассеяние;

$A_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R; \omega)$ – амплитуда поля, пришедшего по μ -му лучу, из точки рассеяния в точку приема;

$\mathbf{P}_S(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega)$ и $\mathbf{P}_R(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega)$ – диаграммы направленности излучающей и приемной антенн соответственно;

\mathbf{e}_S^0 и \mathbf{e}_R^0 – единичные вектора, соответствующие направлениям компенсации излучающей и приемной антенн.

Полная интенсивность реверберации определяется интегрированием по всему объему волновода:

$$I_{\text{Vol}}^{\text{Rev}} = \int_V dV I_{\text{Vol}}^{\text{Rev}}. \quad (1.21)$$

Выражение для углового спектра:

$$N_{\text{Vol}}^{\text{Rev}}(\mathbf{e}_R) = \frac{W\rho c \gamma_S}{4\pi} \int dV(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Vol}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \delta(\mathbf{e}_R - \mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})) \cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega). \quad (1.22)$$

При интегрировании в объеме волновода необходимо так выбирать размеры рассеивающего элемента (ячейки интегрирования), чтобы они были меньше характерных интервалов пространственной изменчивости поля, вызванной интерференцией отраженных и рефрагированных волн.

При выполнении этого условия, а также условия, что находятся все основные энергонесущие лучи, соединяющие три точки (приемник, рассеивающий элемент и источник), можно гарантировать, что реверберация будет рассчитана «полностью» (в рамках принятой модели).

Объемная реверберация. Импульсный (узкополосный) режим.

Пусть функция $S(t)$ задает нормированную форму сигнала по огибающей для узкополосных импульсных сигналов. Аналогично случаю стационарного излучения, в предположении о малости пространственного интервала корреляции рассеивателей по сравнению с характерным пространственным масштабом интерференционной структуры поля, элементарный вклад в мгновенную интенсивность однократной объемной реверберации, созданной рассеянием на элементе dV объема, будет равен [91]:

$$\begin{aligned} dI_{\text{Vol}}^{\text{Rev}}(t) = & \frac{W\rho c\gamma_S}{4\pi} dV(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Vol}}(-\mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \\ & \cdot A_{\nu}^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_{\nu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_{\mu}^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega) \cdot \\ & \cdot S^2(t - t_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - t_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)), \end{aligned} \quad (1.23)$$

где $t_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)$ и $t_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})$ – времена распространения по ν -му и μ -му лучам от излучателя в точку рассеяния и от точки рассеяния к приемнику соответственно, прочие величины аналогичны выражению (1.20).

Таким образом, отличие от случая стационарного излучения заключается в присутствии квадрата огибающей сигнала. При вычислении интенсивности объемной реверберации путем интегрирования элементарных вкладов по всему объему волновода она будет играть роль «обрезающей функции», вырезающей в волноводе объем в виде псевдоэллипсоидного слоя, охватывающего излучающую и приемную антенны.

Выражение для углового спектра:

$$\begin{aligned} N_{\text{Vol}}^{\text{Rev}}(\mathbf{e}_R, t) = & \frac{W\rho c\gamma_S}{4\pi} \int dV(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Vol}}(-\mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \delta(\mathbf{e}_R - \mathbf{e}_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})) \cdot \\ & \cdot A_{\nu}^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_{\nu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_{\mu}^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \cdot S^2(t - t_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - t_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)). \end{aligned} \quad (1.24)$$

Граничная реверберация. Непрерывный режим.

В принятых нами обозначениях, выражение для интенсивности однократной граничной реверберации, созданной на элементе $d\Sigma$ границы Σ , например на дне, запишется в виде:

$$dI_{\text{Bot}}^{\text{Rev}} = \frac{W\rho c\gamma_S}{4\pi} d\Sigma(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Bot}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega), \quad (1.25)$$

где $m_{\text{Bot}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r})$ – коэффициент обратного рассеяния донной реверберации [92].

При этом полная интенсивность граничной реверберации определяется интегрированием (1.25) по всей границе. Если, как можно считать практически всегда в задачах акустики океана [93 – 96], рассеивающая граница горизонтальна и статистически однородна, то коэффициент рассеяния на границе не зависит от горизонтальных координат.

Выражение для углового спектра граничной реверберации при непрерывном излучении:

$$N_{\text{Bot}}^{\text{Rev}}(\mathbf{e}_R) = \frac{W\rho c\gamma_S}{4\pi} \int d\Sigma(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Bot}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \delta(\mathbf{e}_R - \mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})) \cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega). \quad (1.26)$$

Граничная реверберация. Импульсный (узкополосный) режим.

Для узкополосных импульсных сигналов получаем следующие выражения для элементарного вклада в интенсивность и мгновенного углового спектра граничной реверберации [97, 98]:

$$dI_{\text{Bot}}^{\text{Rev}}(t) = \frac{W\rho c\gamma_S}{4\pi} d\Sigma(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Bot}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega) \cdot S^2(t - t_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - t_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)), \quad (1.27)$$

$$N_{\text{Bot}}^{\text{Rev}}(\mathbf{e}_R, t) = \frac{W\rho c\gamma_S}{4\pi} \int d\Sigma(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{\text{Bot}}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \delta(\mathbf{e}_R - \mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})) \cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \cdot S^2(t - t_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - t_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)). \quad (1.28)$$

где $S(t)$ – нормированная форма сигнала по огибающей излучаемого импульсного сигнала.

Как и в случае объемной реверберации, при вычислении интенсивности граничной реверберации интегрированием элементарных вкладов по всей рассеивающей границе волновода форма сигнала будет играть роль «обрезающей функции», вырезающей на границе площадь в виде ленты-псевдоэллипса, охватывающего проекции положений излучающей и приемной антенн на рассматриваемую границу.

1.4. Существующие методы обработки сигнально-помеховой ситуации, определяющие эффективность функционирования мультистатической системы подводного наблюдения

В настоящее время одним из перспективных направлений повышения эффективности обработки гидроакустических сигналов является адаптивный подход, связанный с реализацией алгоритмов обработки гидроакустической информации, согласованных со средой распространения и характеристиками полей сигнала и помехи. Термин «согласования со средой и характеристиками сигнала и помехи», как правило, включает различные подходы:

- Классический подход согласования с полем сигнала в виде плоской волны, в котором учитывается направление прихода и характеристики сигнала.

- Подход согласования с полем помехи, в котором учитываются направление прихода и характеристики помехи.

- Подход согласования со средой распространения сигнала, в котором учитываются особенности изменения звукового поля в волноводе.

Последний из перечисленных подходов включает в себя корреляционную связь между реальным полем сигнала, полученным приемниками, и прогнозированным полем, основанным на информации о положении источника и предполагаемой модели среды. Это направление основано на использовании необходимой информации о характеристиках сигнала и помехи, совместно с априорными данными о канале (или среде) распространения сигнала.

В рамках совершенствования ГАС и МСПН, а также организации их применения основной упор в научных и опытно-конструкторских разработках делается на повышение эффективности и дальности действия ГАС в неблагоприятной для работы гидроакустических средств среде распространения сигналов, каковой является среда в мелководных морях. Проведены исследования моделей распространения звука в мелком море и сделаны выводы о том, что обработка гидроакустических сигналов, в зависимости от условий распространения звука в море, должна осуществляться, как с применением традиционных алгоритмов обработки сигналов, так и с применением алгоритмов, в максимально возможной степени приближенных к алгоритмам «согласованной с полем обработки».

Применение алгоритмов согласования со средой распространения обеспечивает получение максимальных, «физически возможных», дальностей обнаружения прямого (или отраженного) сигнала от заданного источника, конкретным приемником, в сложившихся, конкретных условиях распространения сигналов. Поэтому главный вывод о методах повышения эффективности ГАС, сделанный в США, также касается актуальности применения алгоритма согласования со средой: «современные акустические модели распространения волн, в случае если они нужного качества, правильно применены и сопряжены с адекватными данными об окружающей среде, могут давать решения с получением тактических преимуществ» [99 – 102].

Этому направлению посвящены многие теоретические работы, в том числе работа Ван Триса [103] с перечислением ряда адаптивных алгоритмов, в которой понятие согласованной обработки (MFP) обосновано следующим образом: «вместо согласования принятого сигнала с плоской волной, следует согласовать его со средой распространения».

В работе автора Николая Колева [104] кратко представлено определение методов согласованной обработки, при которых направляющий вектор определяется предсказанным (расчетным) звуковым давлением с моделью распространения для диапазона координат источника в волноводе с известным

вертикальным распределением скорости звука (ВРСЗ) и акустическими параметрами дна.

Кроме того, за последние годы опубликовано большое число работ в зарубежной и отечественной литературе, посвященных согласованной с полем обработке сигналов [105 – 128]

В основе увеличения эффективности МСПН лежит требование выполнения расчета с заданной точностью параметров морской среды (полей течений температуры, солености, плотности и давления) в реальном времени и с необходимым пространственно-временным разрешением.

1.5. Постановка задачи по разработке методов повышения эффективности функционирования мультистатической системы по обнаружению малоразмерных движущихся подводных объектов

Формализованную постановку задачи по оценке эффективности функционирования МСПН можно сформулировать исходя из того, что основной целью функционирования МСПН является обнаружение и оценка координат малоразмерного движущегося подводного объекта. В данном случае, эффективность функционирования системы подводного наблюдения – это решение функциональных задач системы наблюдения с требуемой точностью с выдачей результата силам охраны прибрежного или морского объекта.

Основным критерием эффективности как отдельной ГЛС, так и МСПН является дальность обнаружения подводного объекта (с заданной вероятностью и при заданной вероятности ложной тревоги). Однако помимо дальности обнаружения существенным фактором является и точность оценки текущих координат объекта и параметров его движения. Следовательно, для более корректной оценки эффективности функционирования МСПН критерий эффективности необходимо расширить, с учетом точности оценки координат обнаруженных объектов [11, 129 – 132].

За основу критерия эффективности функционирования МСПН примем критерий, предложенный А.В. Измайловым [133] – вероятность перехвата цели. Применительно к МСПН указанная вероятность зависит от следующих характеристик: дальности и вероятности обнаружения подводных объектов отдельными станциями в составе МСПН, а также от точности оценки координат:

$$P = 1 - (1 - P_{ПО} P_{СС})^{N_{СС}}, \quad (1.29)$$

где $P_{ПО}$ – вероятность обнаружения объекта (определяется отношением сигнал-помеха (ОСП) и вероятностью ложной тревоги),

$P_{СС}$ – вероятность того, что силы охраны смогут перехватить цель после однократного применения специальных средств (определяется характеристиками спецсредств и точностью оценки координат цели),

$N_{СС}$ – возможное число реакций сил охраны, за время нахождения цели в акватории, контролируемой МСПН.

$$P_{СС} = \int_{\mu_{Ц} - R_{СС}}^{\mu_{Ц} + R_{СС}} f_{МСПН}(x) dx, \quad (1.30)$$

где $\mu_{Ц}$ – истинные координаты цели,

$R_{СС}$ – радиус действия спецсредств,

$f_{МСПН}(x)$ – плотностью вероятности оценки координат цели:

$$f_{МСПН}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{МСПН}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{Ц} - \Delta_{МСПН})^2}{2\sigma_{МСПН}^2}\right), \quad (1.31)$$

где $\sigma_{МСПН}$ – среднеквадратичное отклонение (СКО) оценки координат цели,

$\Delta_{МСПН}$ – смещение оценки координат цели.

Анализ выражений, описывающих вероятность перехвата подводного объекта, показал, что возможны следующие способы увеличения эффективности функционирования МСПН:

- а) увеличение дальности действия отдельных станций в составе МСПН,
- б) увеличение вероятности обнаружения цели,
- в) уменьшение мешающего влияния излучения соседних ГЛС (гидроакустическая совместимость),

г) увеличение точности целеуказания МСПН,

д) увеличение точности позиционирования ГЛС в составе МСПН.

Методы повышения эффективности функционирования МСПН за счет увеличения дальности действия отдельных ГЛС применяются на этапе разработки ГЛС и в рамках данной диссертационной работы не исследуются.

В рамках данной работы рассматриваются МСПН, предназначенные для обнаружения малоразмерных движущихся подводных объектов, что приводит к следующим ограничениям:

- Обнаруживаемые цели: подводный пловец на ластах, подводный пловец на средстве доставки, АНПА, крупные морские животные.

- Скорости движения малоразмерных подводных объектов полагаются в диапазоне от 1 до 6 узлов.

- Эквивалентные радиусы отражения подводных объектов ограничиваются диапазоном от 0.1 до 5 м.

- Рабочие частотные диапазоны МСПН от единиц до сотен килогерц, вследствие чего в рамках данной работы применяется лучевое представление акустических полей.

Постановка задач на диссертационное исследование:

1. Провести комплексный анализ эффективности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения малоразмерных движущихся целей, включающий в себя оценку применения существующих методов обработки гидроакустической информации.

2. Разработать современные методы, реализующие повышение эффективности функционирования МСПН.

3. Разработать методику оценки вклада в эффективность функционирования МСПН алгоритмов, реализующих предлагаемые методы повышения эффективности функционирования МСПН.

4. Провести анализ вклада разработанных методов в повышение эффективности функционирования МСПН.

1.6. Выводы

1. Особенности построения и функционирования МСПН в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта являются:

1.1 МСПН относятся к классу сложных технических систем сбора и обработки информации, функционирующих в условиях постоянного изменения характеристик среды эксплуатации.

1.2 Изменчивость подводной морской среды эксплуатации ГЛС в МПСН оказывает случайное возмущающее воздействие на работу отдельных элементов и каналы передачи информации.

2. В настоящее время ГЛС в МСПН находят свое применение в различных областях хозяйственной деятельности на море, выполняя различные функциональные задачи, в том числе:

2.1 создания систем связи; систем обнаружения и оценки координат подводных и надводных объектов;

2.2 измерения глубин и сейсмопрофилирования дна океана, подводной навигации и управления подводными автономными аппаратами

3. В целях повышения эффективности функционирования МСПН, обработка гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю, в условиях неопределенности воздействия внешней морской среды, требует создания и применения специальных алгоритмов, реализующих перспективные методы обработки данных на этапах разработки и создания МПСН, в том числе ГЛС, с учетом условий длительной эксплуатации в агрессивной морской среде.

4. Методам обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю, анализа различных характеристик морской среды, моделей обнаружения подводных малоразмерных движущихся объектов, с учетом параметров сложных гидроакустических систем проведено множество исследований в работах как зарубежных (Роберт Дж. Урик, К. Пекерис, Дж. Келлер, В. Манк (W. Munk), Дж. Пападакис, К. Вунш (C. Wunsch), и др.), так и отечественных ученых (Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов, М.Д. Смаришев,

В.А. Елисеевнин, В.А. Зверев, А.Г. Лучинин, А.И. Хилько, В.Г. Петников, Б.Г. Кацнельсон, К.В. Авилов, А.И. Белов, Г.С. Малышкин, В.Н. Кравченко, Ю.С. Крюков и др.).

5. Особенности применения модели обнаружения МСПН малоразмерного движущегося подводного объекта является наличие большого многообразия типов малозумных движущихся подводных объектов с малыми эквивалентными радиусами (в рамках исследования ограничиваемся следующими: пловец на ластах, пловец на подводном средстве доставки, АНПА, морские животные) с соответствующими скоростями (от 1 до 6 узлов) и характеристиками подводного маневрирования.

6. Проведенный анализ методов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю выявил научно-техническую гипотезу – предположение о повышении эффективности функционирования ГЛС в структуре МСПН. Суть гипотезы заключается в разработке методов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю ГЛС в составе МСПН, реализующих повышение эффективности функционирования ГЛС в структуре МСПН и всей системы, в части увеличения точности оценки координат обнаруженных малоразмерных подводных движущихся целей.

7. На основании выявления научно-технической гипотезы о повышении эффективности функционирования ГЛС в структуре МСПН и всей системы, с учетом модели эффективности функционирования МПСН в целом, поставлена формализованная задача, которая заключается в разработке и создании алгоритмов, реализующих методы повышения эффективности функционирования МСПН в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта.

2. Реализация гидроакустической совместимости в мультистатической системе подводного наблюдения

2.1. Гидроакустическая совместимость при функционировании гидролокационных станций в мультистатическом режиме в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта

В случае, когда в пределах одной акватории функционирует несколько однотипных ГЛС, возникает задача преодоления мешающих прямых сигналов соседних станций. Эта задача является актуальной при функционировании МСПН и на сегодняшний день. Суть задачи заключается том, что отношение амплитуды прямого поля соседней ГЛС к амплитуде эхо-сигнала может достигать 1000 раз и более. При таких соотношениях никакой согласованный фильтр (СФ), никакая остронаправленная антенна не могут избавиться от мертвой зоны обусловленной приходом прямого сигнала соседней станции.

В настоящее время с этой проблемой борются либо разносом по частоте ЗС разных станций, либо разносом по времени, т. е. увеличением периода повторения излучения. Первый способ приводит к сужению рабочего частотного диапазона каждой станции и как следствие понижению помехоустойчивости по отношению к реверберационной помехе. Второй способ – разнос излучения станций во времени. При этом увеличивается период обзора контролируемой области каждой из ГЛС, что отрицательно сказывается на последующей траекторной фильтрации (оценке параметров движения цели – скорости и курса) и эффективности функционирования МСПН в целом.

Столбовой путь решения указанной задачи – применение адаптивных методов режекции прямого поля. Назначение этих методов заключается в подавлении мощных прямых сигналов, приходящих от соседних ГЛС в составе МСПН, до уровня, позволяющего распознать на их фоне слабые эхо-сигналы, отраженные от цели.

2.2. Адаптивная режекция сигналов с известной формой и временами приема

2.2.1. Математическое описание метода адаптивной режекции сигналов с известной формой и временами приема

Предположим, что форма принятых сигналов $s_\mu(t)$ ($\mu = 1..M$), которые соответствуют мощному прямому полю M соседних ГЛС из состава МСПН, и время их приема известны априорно. В данном случае принятая реализация имеет следующий вид:

$$g(t) = as_0(t) + \sum_{\mu=1}^M z_\mu s_\mu(t) + n(t), \quad (2.1)$$

где $s_0(t)$ – форма эхо-сигнала,

a – амплитуда эхо-сигнала,

z_μ – амплитуды мешающих сигналов, $z_\mu \gg a$,

$n(t)$ – помеха, распределенная по нормальному закону помеха с нулевым математическим ожиданием и СКО σ_n ($z_\mu \gg \sigma_n$).

Плотность вероятности данного измерения:

$$f = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right)^{Nt} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{t=1}^{Nt} \left(g(t) - as_0(t) - \sum_{\mu=1}^M z_\mu s_\mu(t) \right)^2 \right\}, \quad (2.2)$$

где Nt – длина принятой реализации (2.1).

Логарифм плотности вероятности (2.2):

$$L = Nt \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right) - \frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{t=1}^{Nt} \left(g(t) - as_0(t) - \sum_{\mu=1}^M z_\mu s_\mu(t) \right)^2, \quad (2.3)$$

Введем следующие обозначения:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g(1) \\ \cdot \\ g(t) \\ \cdot \\ g(Nt) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1(1) & \cdot & s_\mu(1) & \cdot & s_M(1) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_1(t) & \cdot & s_\mu(t) & \cdot & s_M(t) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_1(Nt) & \cdot & s_\mu(Nt) & \cdot & s_M(Nt) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}_0 = \begin{bmatrix} s_0(1) \\ \cdot \\ s_0(t) \\ \cdot \\ s_0(Nt) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \cdot \\ z_\mu \\ \cdot \\ z_M \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

В данных обозначениях выражение для логарифма плотности вероятности (2.3) принимает вид:

$$L = Nt \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right) - \frac{1}{2\sigma_n^2} |(\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) - \mathbf{sz}|^2. \quad (2.5)$$

Максимизировав выражение (2.5) по неизвестным амплитудам \mathbf{z} получим их оценку:

$$\begin{aligned} L &\sim -|(\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) - \mathbf{sz}|^2, \\ L &\sim -((\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) - \mathbf{sz})^+ ((\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) - \mathbf{sz}), \\ L &\sim -(\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0)^+ (\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) + \mathbf{z}^+ \mathbf{s}^+ (\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) + (\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0)^+ \mathbf{sz} - \mathbf{z}^+ \mathbf{s}^+ \mathbf{sz}. \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{z}^+} &= \mathbf{s}^+ (\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0) - \mathbf{s}^+ \mathbf{sz} = 0. \\ \mathbf{z} &= [\mathbf{s}^+ \mathbf{s}]^{-1} \mathbf{s} (\mathbf{g} - a\mathbf{s}_0). \end{aligned} \quad (2.6)$$

С учетом того, что $z_\mu \gg a$ получим:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{s}^+ \mathbf{s}]^{-1} \mathbf{s} \mathbf{g}. \quad (2.7)$$

Режекция мощных мешающих сигналов, т.е. их удаление из принятой реализации (2.1), производится с помощью следующего выражения:

$$\mathbf{g}_0 = \mathbf{g} - \mathbf{sz} = \mathbf{g} - \mathbf{s} [\mathbf{s}^+ \mathbf{s}]^{-1} \mathbf{s} \mathbf{g} = \mathbf{Q} \mathbf{g}, \quad (2.8)$$

где \mathbf{Q} – проектор на подпространство, ортогональное пространству мешающих сигналов (матричный оператор режекции), который вычисляется с помощью следующего выражения:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{E} - \mathbf{s} [\mathbf{s}^+ \mathbf{s}]^{-1} \mathbf{s}, \quad (2.9)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица размером $M \times M$ (M – количество мешающих сигналов).

2.2.2. Анализ эффективности алгоритма, реализующего метод адаптивной режекции сигналов с известной формой и временами приема

На основании вышеприведенного математического описания получаем следующий алгоритм режекции сигналов:

1. На основе априорной информации о мешающих сигналах вычисляется матрица \mathbf{s} (2.4).

2. По формуле (2.9) вычисляется проектор на подпространство, ортогональное пространству мешающих сигналов.

3. Производится удаление мешающих сигналов из принятой реализации с применением формулы (2.8).

На рисунках 2.1 – 2.3 представлены результаты, получаемые при функционировании алгоритма, реализующего метод адаптивной режекции сигналов с известной формой при различном числе мешающих сигналов:

- рисунок 2.1 соответствует одному мешающему сигналу,
- рисунок 2.2 соответствует двум мешающим сигналам,
- рисунок 2.3 соответствует трем мешающим сигналам.

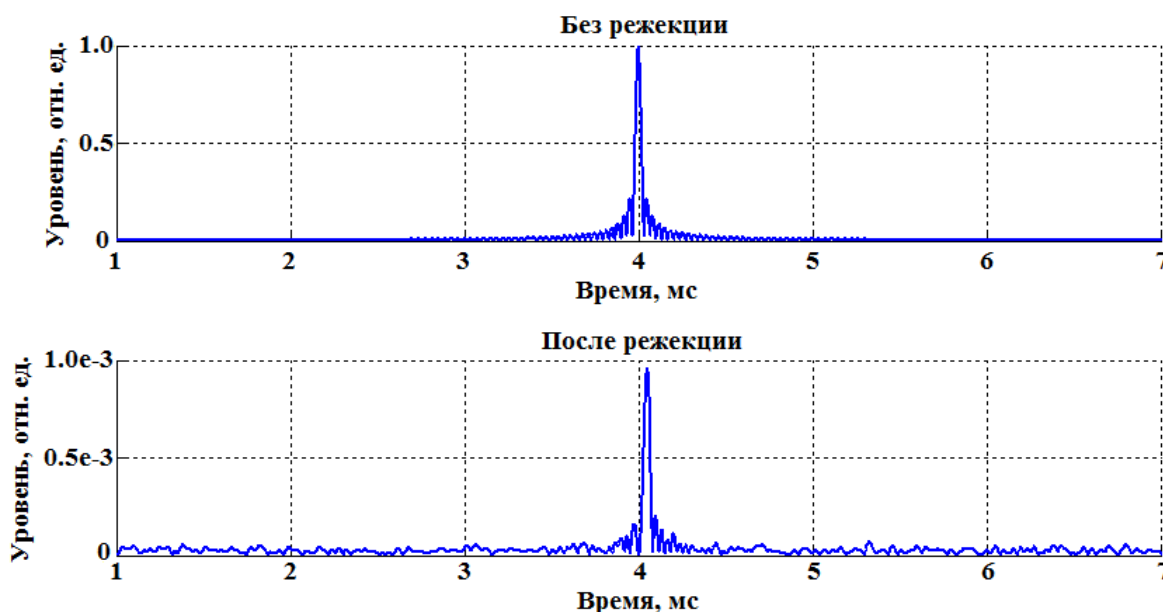


Рисунок. 2.1. Результат применения алгоритма, реализующего режекцию сигналов известной формы, в случае одно мешающего сигнала.

На рисунке 2.1 приведены результаты согласованной фильтрации входной реализации (сверху) и реализации, полученной после режекции мешающих сигналов (снизу).

Входная реализация представляет собой сумму:

- мощного мешающего сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуда 1 отн. ед., время приема 4 мс),
- слабого эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуда 0.001 отн. ед., время приема 4.05 мс),

- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.001 отн. ед.

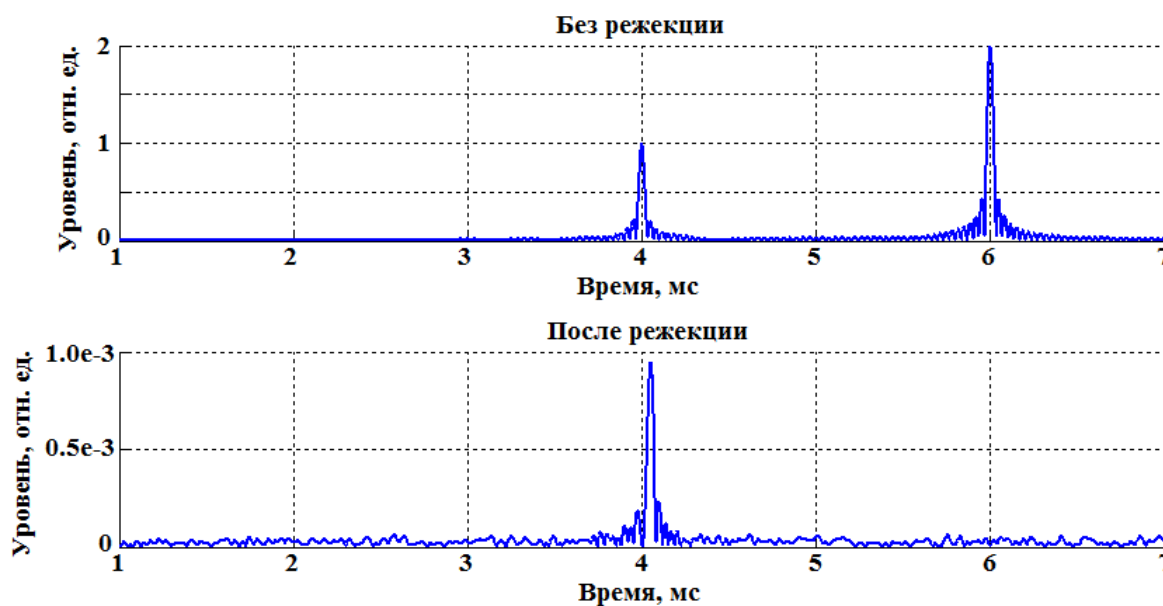


Рисунок 2.2. Результат применения алгоритма, реализующего режекцию сигналов известной формы, в случае двух мешающих сигнала.

На рисунке 2.2 приведены результаты согласованной фильтрации входной реализации (сверху) и реализации, полученной после режекции мешающих сигналов (снизу).

Входная реализация представляет собой сумму:

- 2 мощных мешающих сигналов (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуды 1 и 2 отн. ед., время приема 4 и 6 мс соответственно),
- слабого эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуда 0.001 отн. ед., время приема 4.05 мс),
- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.001 отн. ед.

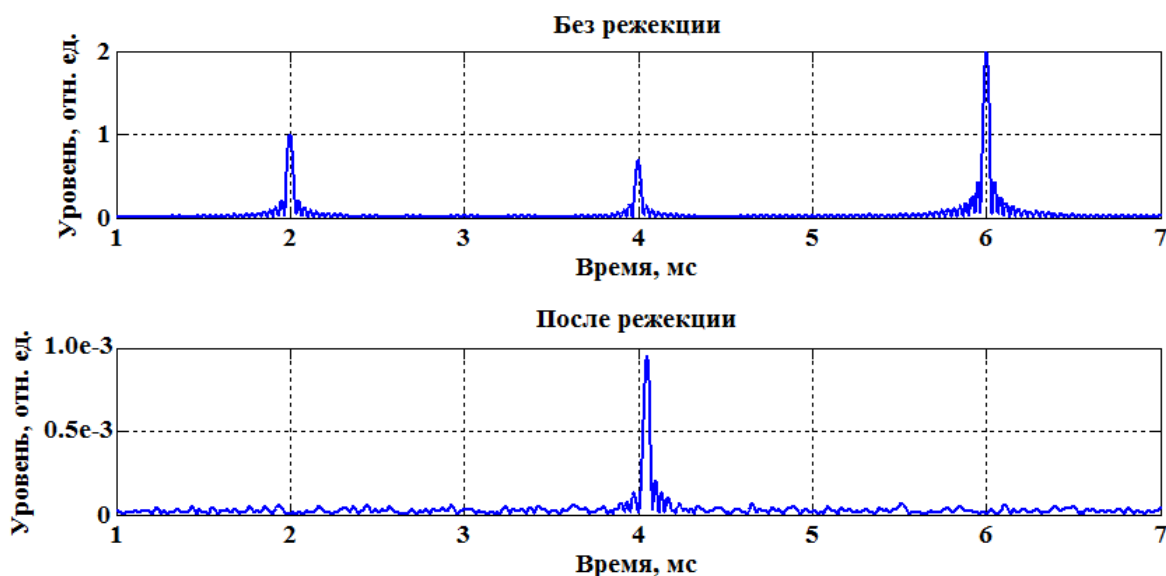


Рисунок 2.3. Результат применения алгоритма, реализующего режекцию сигналов известной формы, в случае трех мешающих сигнала.

На рисунке 2.3 приведены результаты согласованной фильтрации входной реализации (сверху) и реализации, полученной после режекции мешающих сигналов (снизу).

Входная реализация представляет собой сумму:

- 3 мощных мешающих сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуды 1, 0.7 и 2 отн. ед., время приема 2, 4 и 6 мс соответственно),
- слабого эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуда 0.001 отн. ед., время приема 4.05 мс),
- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.001 отн. ед.

Результаты, приведенные на рисунках 2.1 – 2.3, подтверждают эффективность предлагаемого метода: в результате обработки с применением алгоритма, реализующего данный метод, мощные мешающие сигналы режектированы полностью, а эхо-сигнал передался практически без искажений.

Однако для того чтобы иметь возможность применения данного метода, мы должны априори знать форму принимаемых мешающих сигналов и время их приема. В реальных системах мы не сможем точно спрогнозировать форму сигналов, даже если измерим искажения, вносимые конкретным излучателем, так

как при распространении звука возникают дополнительные искажения, вызываемые многолучевостью, а также частотной зависимостью поглощения.

2.3. Адаптивная режекция мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах

Особенностью предлагаемого здесь метода является то, что нам неизвестны сигналы, излучаемые соседними станциями. В данном случае, производится оценка формы мешающих сигналов на основании предположения, что их форма одинакова во всех приемных каналах ГЛС. При этом режекция осуществляется на основании информации содержащейся только в сигналах принятых ГЛС на текущем периоде обзора [134].

2.3.1. Математическое описание метода адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах

Пусть на приемную антенну ГЛС приходят прямые сигналы от M соседних ГЛС, находящихся в ее поле видимости. Для простоты в качестве приемной антенны будем рассматривать звукопрозрачную антенную решетку (АР), состоящую из ненаправленных приемников. В данном случае выражение для принимаемой k -ым приемником антенной решетки (АР) смеси сигналов можно записать следующим образом:

$$g_k(t) = \sum_{\mu=1}^M s_{\mu}(t - \Delta t_{k,\mu}) + a s_0(t - \Delta t_{k,0}) + n_k(t), \quad (2.10)$$

где $s_{\mu}(t)$ – сигнал, излучаемый μ -ой ГЛС, измеренный в фазовом центре АР принимающей ГЛС;

$\Delta t_{k,\mu}$ – задержки во времени прихода сигнала μ -ой ГЛС на k -ый приемник, определяемые геометрией АР;

$s_0(t)$ – эхо-сигнал, отраженный от цели, измеренный в фазовом центре АР принимающей ГЛС;

$\Delta t_{k,0}$ – задержки во времени прихода эхо-сигнала на k -ый приемник, определяемые геометрией АР;

a – амплитуда эхо-сигнала ($a \ll 1$);

$n_k(t)$ – помеха на входе k -го приемника АР;

t – время;

$k = 1..N$ – номера приемников в АР;

$\mu = 1..M$ – номера соседних ГЛС.

В частотной области выражение (2.10) будет иметь вид:

$$G_k(\omega) = \sum_{\mu=1}^M S_{\mu}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega) + a S_0(\omega) \varepsilon_{k,0}(\omega) + \eta_k(\omega), \quad (2.11)$$

где $S_{\mu}(\omega)$ – комплексный спектр сигнала, излучаемого μ -ой ГЛС;

$S_0(\omega)$ – комплексный спектр эхо-сигнала;

$\eta_k(\omega)$ – комплексный спектр шума на входе k -го приемника АР;

$\varepsilon_{k,\mu}(\omega) = e^{-i\omega\Delta t_{k,\mu}}$ – набег фазы в μ -го сигнала для k -го приемника АР;

ω – круговая частота.

Так как режекция мешающих сигналов есть не что иное, как удаление этих сигналов из принятой входной реализации, то для возможности ее осуществления нам необходимо оценить форму этих мешающих сигналов.

Логарифм отношения правдоподобия измерения в частотной области (2.11) в случае нормально распределенной помехи пропорционален следующей величине:

$$L \sim - \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \left| x_k(\omega) - \sum_{\mu=1}^M s_{\mu}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega) \right|^2 \quad (2.12)$$

Произведем оценку спектров сигналов соседних станций $S_{\mu}(\omega)$ путем минимизации невязки пропорциональной минус логарифму отношения правдоподобия по спектрам.

$$J = \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \left| x_k(\omega) - \sum_{\mu=1}^M s_{\mu}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega) \right|^2 \quad (2.13)$$

Преобразуем выражение для невязки J (2.13):

$$\begin{aligned}
J &= \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N |x_k(\omega)|^2 - 2 \operatorname{Re} \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \sum_{\mu=1}^M x_k(\omega) s_{\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) + \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \left| \sum_{\mu=1}^M s_{\mu}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega) \right|^2; \\
J &= \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N |x_k(\omega)|^2 - 2 \operatorname{Re} \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \sum_{\mu=1}^M x_k(\omega) s_{\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) + \\
&+ \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \sum_{\mu=1}^M |s_{\mu}(\omega)|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \sum_{\mu=1}^M \sum_{\substack{\mu'=1 \\ \mu' \neq \mu}}^M s_{\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) s_{\mu'}(\omega) \varepsilon_{k,\mu'}(\omega).
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Вычислим производные выражения (2.14) по величинам $s_{\mu}^*(\omega)$:

$$\frac{\partial J}{\partial s_{\mu}^*(\omega)} = -2 \sum_{k=1}^N x_k(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) + 2 \sum_{k=1}^N s_{\mu}(\omega) + 2 \sum_{k=1}^N \sum_{\substack{\mu'=1 \\ \mu' \neq \mu}}^M s_{\mu'}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu'}(\omega). \tag{2.15}$$

Приравняв производные (2.15) к нулю, получим для каждой частоты ω систему из M уравнений вида:

$$Ns_{\mu}(\omega) + \sum_{\substack{\mu'=1 \\ \mu' \neq \mu}}^M \sum_{k=1}^N s_{\mu'}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu'}(\omega) = \sum_{k=1}^N x_k(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega). \tag{2.16}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
P_{\mu,\mu'}(\omega) &= \sum_{k=1}^N \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu'}(\omega), \\
q_{\mu}(\omega) &= \sum_{k=1}^N x_k(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega), \\
\mathbf{Q}(\omega) &= \begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ \cdot \\ q_{\mu}(\omega) \\ \cdot \\ q_M(\omega) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}(\omega) = \begin{bmatrix} s_1(\omega) \\ \cdot \\ s_{\mu}(\omega) \\ \cdot \\ s_M(\omega) \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\mathbf{P}(\omega) = \begin{bmatrix} P_{1,1}(\omega) & \cdot & P_{1,\mu}(\omega) & \cdot & P_{1,M}(\omega) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{\mu,1}(\omega) & \cdot & P_{\mu,\mu}(\omega) & \cdot & P_{\mu,M}(\omega) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{M,1}(\omega) & \cdot & P_{M,\mu}(\omega) & \cdot & P_{M,M}(\omega) \end{bmatrix}.$$

С учетом обозначений (2.17) система (2.16) примет вид:

$$\mathbf{P}(\omega) \mathbf{S}(\omega) = \mathbf{Q}(\omega). \tag{2.18}$$

Решение этой системы:

$$\hat{\mathbf{S}}(\omega) = [\mathbf{P}(\omega)]^{-1} \mathbf{Q}(\omega). \tag{2.19}$$

Подставив решение (2.19) в выражение для невязки (2.13) получим:

$$\hat{J} = \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N |x_k(\omega) - \varepsilon_k(\omega) \hat{S}(\omega)|^2 = \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N |x_k(\omega) - \varepsilon_k(\omega) [\mathbf{P}(\omega)]^{-1} \mathbf{Q}(\omega)|^2, \quad (2.20)$$

где $\varepsilon_k = [\varepsilon_{k,1}(\omega) \cdot \varepsilon_{k,\mu}(\omega) \cdot \varepsilon_{k,M}(\omega)]$.

Зная геометрию АР и направления на соседние ГЛС, мы можем вычислить задержки $\Delta t_{k,\mu}$ т. е. сформировать матрицы $\mathbf{P}(\omega)$ и $\mathbf{Q}(\omega)$ (2.17), и, следовательно, оценить спектры мешающих сигналов (2.19). Если же направления на соседние ГЛС φ_{μ} априорно неизвестны или известны с недостаточной точностью, то их можно определить путем численной минимизации величины \hat{J} (2.20) по данным направлениям.

Сама режекция осуществляется непосредственно вычитанием из спектра смеси, принятой k -ым приемником, спектров сигналов соседних станций, оцененных в соответствии с формулой (2.19):

$$G_k^{(0)}(\omega) = G_k(\omega) - \sum_{\mu=1}^M \hat{S}_{\mu}(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega). \quad (2.21)$$

Величина $G_k^{(0)}(\omega)$ представляет собой не что иное, как комплексный спектр сигнала принятого k -ым приемником в отсутствие прямого поля соседних станций.

Применяя обратное преобразование Фурье [135 – 138] можно получить выражение для сигнала принятого k -ым приемником в отсутствие прямого поля соседних станций во временной области $g_k^{(0)}(t)$. Полученные таким образом сигналы $g_k^{(0)}(t)$ или их спектры $G_k^{(0)}(\omega)$ подвергаются далее типичной для гидролокации обработке, а именно согласованной фильтрации и формированию характеристик направленности.

2.3.2. Анализ эффективности алгоритма, реализующего метод адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах

Эффективность указанного метода режекции прямого поля была исследована путем численного моделирования в среде Matlab. Исследование было

проведено для случая кольцевой звукопрозрачной АР с радиусом равным 15 см, состоящей из $N = 96$ приемных элементов. В качестве ЗС использовался сигнал с линейной частотной модуляцией со следующими параметрами: полоса – 30 кГц, центральная частота – 75 кГц, длительность – 3 мс. Частота квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – 300 кГц, что составляет 1.67 от удвоенной верхней частоты ЗС.

Для каждого приемного элемента данной АР задавалась входная реализация, состоящая из суммы нескольких мешающих сигналов и эхо-сигнала плюс белый шум с нулевым математическим ожиданием и СКО равным амплитуде эхо-сигнала. Эхо-сигнал и мешающие сигналы задавались в виде плоских волн приходящих с различных направлений. Соотношение амплитуд мешающих сигналов и эхо-сигнала задавалось исходя из условий, соответствующих реальным условиям функционирования ГЛС.

Рассмотрим сначала случай одного мешающего сигнала. На рисунке 2.4 представлена входная реализация на АР ГЛС, которая состоит из мешающего сигнала единичной амплитуды, пришедшего в момент времени 3.5 мс с направления 182° ; эхо-сигнала от цели, пришедшего в момент времени 3.6 мс с направления 200° , с амплитудой в 500 раз меньше амплитуды мешающего сигнала; а также белого шума с СКО равным амплитуде полезного сигнала.

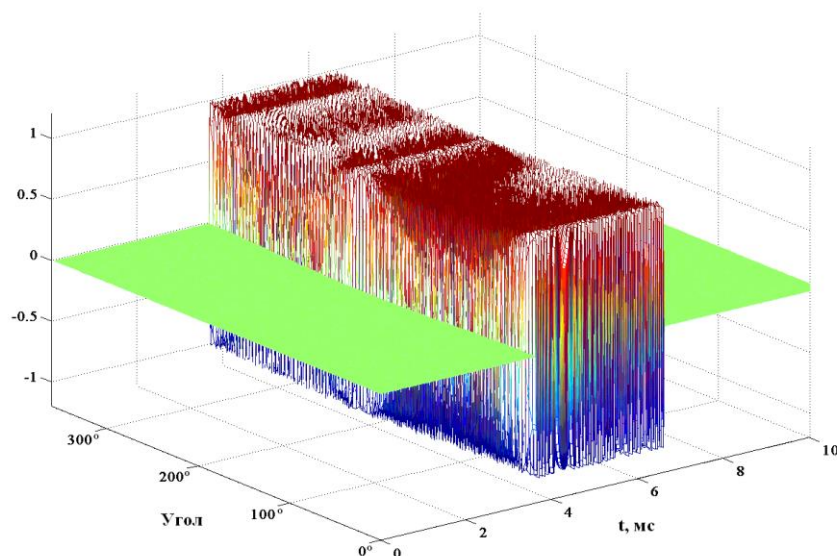


Рисунок 2.4. Принятая ГЛС входная реализация.

На этом рисунке 2.4 можно различить лишь мешающий сигнал, амплитуда которого значительно превосходит как амплитуду эхо-сигнала, так и шум.

Вычислим пространственно-временной отклик приемной АР на данную входную реализацию [139 – 142]. Полученный результат приведен на рисунке 2.5.

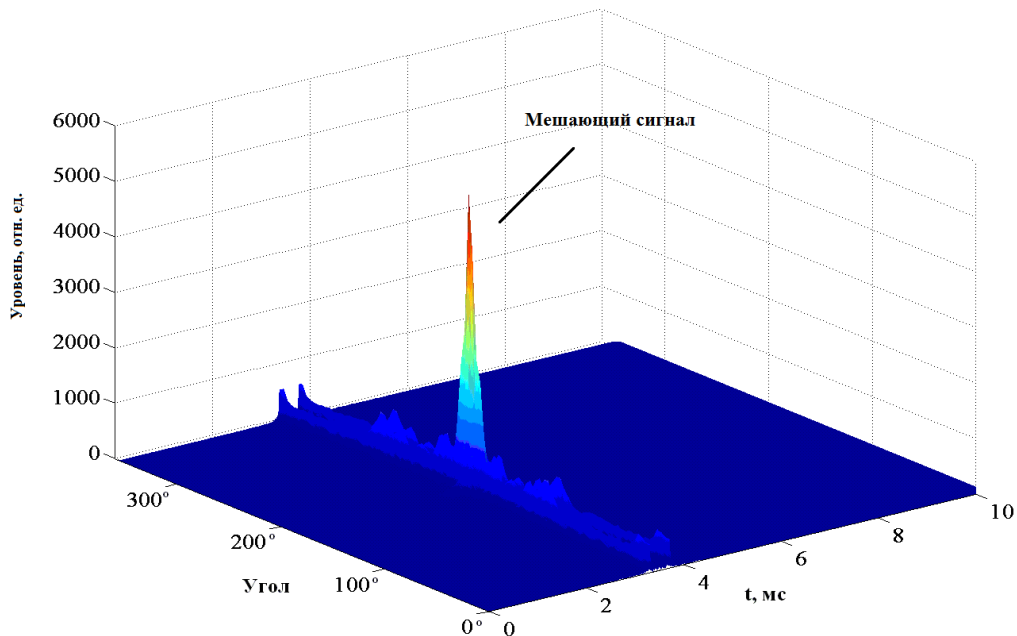


Рисунок 2.5. Пространственно-временной отклик АР на задаваемую входную смесь.

На рисунке 2.5 изображен пространственно-временной отклик приемной АР на 2 плоские волны с амплитудами 1 и $2 \cdot 10^{-3}$, приходящие с направлений 182° и 200° в моменты времени 3.5 и 3.6 мс соответственно. Как и ожидалось, здесь мы снова видим только один пик, соответствующий мощному мешающему сигналу, падающему с направления 182° , и его боковые лепестки. Уровень пика A_0 равен 5500 относительным единицам. Эхо-сигнал на его фоне не виден.

Выполним далее обработку входной реализации в соответствии с алгоритмом, реализующим предлагаемый метод адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах. С помощью прямого преобразования Фурье измерение во временной области $g_k(t)$ преобразуем к измерению в частотной области $G_k^{(0)}(\omega)$. Затем, зная геометрию АР ГЛС и направление φ_1 на источник мешающего сигнала, вычислим задержки $\Delta t_{k,1}$:

$$\Delta t_{k,1} = \frac{a}{c} \cos(\varphi_1 - \beta_k).$$

где a – радиус приемной АР ГЛС;
 c – скорость звука в воде на горизонте ГЛС;
 β_k – направление на k -ый приемник АР.

Подставляя вычисленные таким образом задержки в формулы (2.17) и (2.19) получим спектр мешающего сигнала $\hat{S}_1(\omega)$. С помощью обратного преобразования Фурье [135 – 138] можно также получить форму этого сигнала.

На рисунке 2.6 приведены графики, изображающие форму мешающего сигнала: красная кривая соответствует его истинной форме, синяя кривая – форма мешающего сигнала оцененная с помощью выражений (2.17) и (2.19).

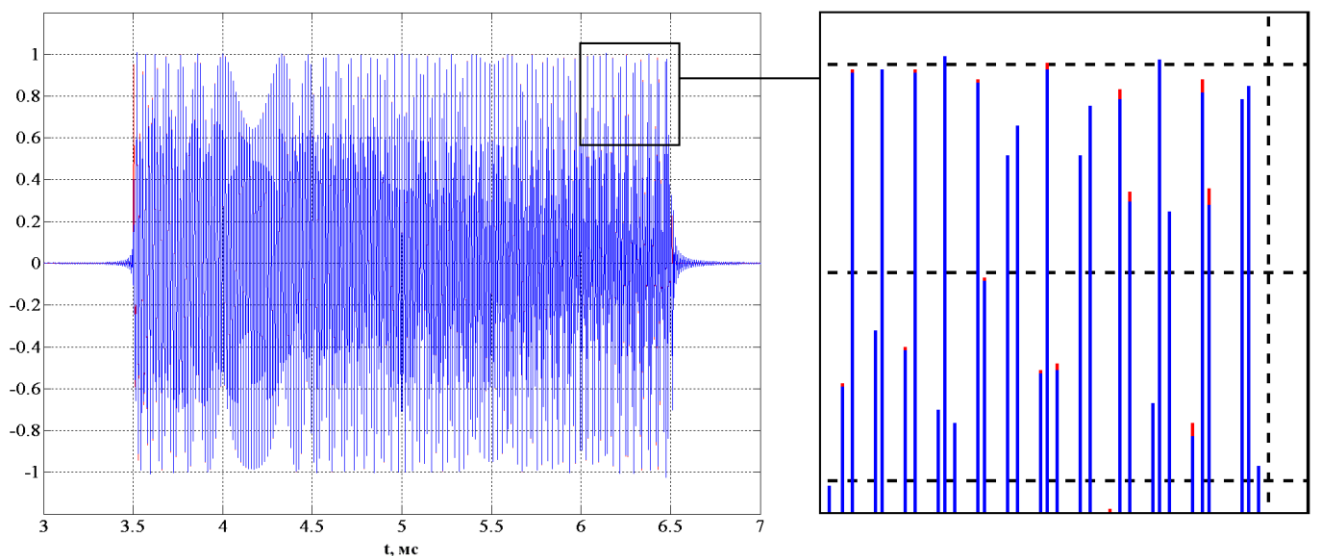


Рисунок 2.6. Форма мешающего сигнала.

Из рисунка 2.6 видно, что оценка формы мешающего сигнала практически не отличается от его истинной формы. Небольшие отличия обуславливаются наличием шума во входной смеси.

Далее, подставив полученный спектр $\hat{S}_1(\omega)$ в формулу (2.21), осуществим режекцию, и после этого сформируем отклик АР на смесь, не содержащую мешающего сигнала. На рисунке 2.7 приведен полученный таким образом результат – пространственный отклик АР станции на принятую реализацию после режекции мешающего сигнала.

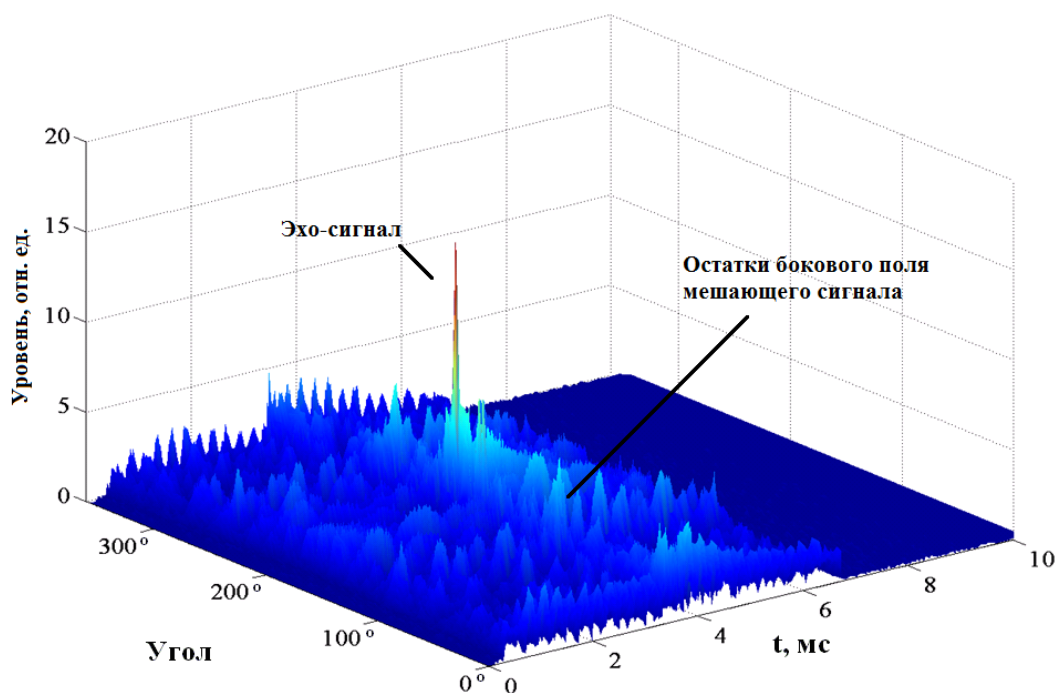


Рисунок 2.7. Пространственно-временной отклик АР на входную реализацию после режекции.

На рисунке 2.7 виден пик, который соответствует плоской волне приходящей с направления 200, т.е. эхо-сигналу от цели, амплитуда которого в 500 раз меньше амплитуды мешающего сигнала. Уровень этого пика равен 16.5 относительным единицам. Помимо данного пика на рисунке видны остатки боковых лепестков (по пространству и времени) не полностью режектированного мешающего сигнала, уровень которых не превосходит 8 относительных единиц. Эти остатки обусловлены ошибками при оценке его формы.

Сравнивая рисунки 2.5 и 2.7, мы видим, что степень режекции мешающего сигнала составила $5500/8 \approx 690$ раз. Такой результат получен в случае точно известного направления на мешающий сигнал.

В реальных условиях оценка данного направления производится с некоторой ошибкой. Для того чтобы определить необходимую точность оценки направления на мешающий сигнал, построим зависимость степени режекции от ошибки при определении указанного направления. Полученные результаты представлены в таблице 2.1 и на рисунке 2.8.

Таблица 2.1. Зависимость уровня остатка после режекции (A) степени режекции (A_0/A) от ошибки оценки направления на мешающий сигнал ($\delta\varphi$).

Ошибка оценки направления $\delta\varphi$, °	Уровень остатка после режекции A , отн. ед.	Степень режекции A_0/A
0	8	690
0.001	8	690
0.002	10	550
0.005	22	250
0.01	45	120
0.02	90	60
0.05	220	25
0.1	450	12
1	4200	1.3

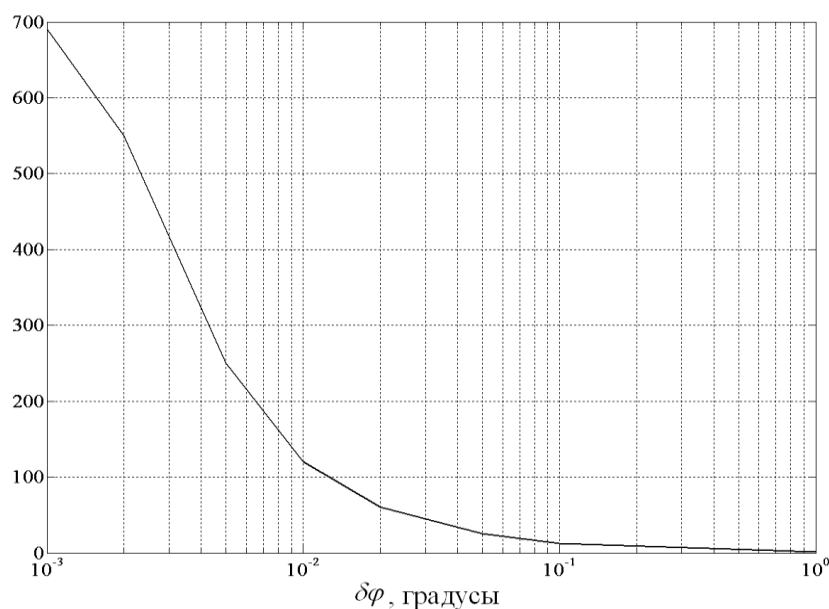


Рисунок 2.8. График зависимости степени режекции мешающего сигнала от ошибки оценки угла его приема.

Как видно из таблицы 2.1 и графика, приведенного на рисунке 2.8, уровень остатка, начиная с ошибки в 0.005° , становится пропорциональным ошибке. Равенство степени режекции при ошибках равных 0° и 0.001° обуславливается влиянием шума на оценку спектра и, естественно, формы мешающего сигнала.

На основании полученных результатов, можно сделать следующее заключение: для того, чтобы уровень эхо-сигнала был сравним с уровнем остатка мешающего сигнала после режекции или превосходил его, точность определения направления на мешающий источник должна быть выше 0.005° .

В реальных условиях направление на мешающий источник можно приблизительно оценить по выходу ХН приемной АР ГЛС, которые мы можем вычислить с произвольным достаточно малым шагом. Однако, и в этом случае мы можем не получить достаточно точной оценки искомого направления. Данный факт обуславливается влиянием шума, а также взаимным влиянием мешающих источников на положение максимумов, соответствующих направлениям на эти источники. Поэтому возникает необходимость оценивать направления на мешающие источники φ_μ путем численной минимизации величины невязки \hat{J} (2.20) по указанным направлениям.

Минимизацию будем проводить следующим образом. За нулевое приближение принимаем оценки направлений на мешающие источники, полученные по выходу сформированных ХН.

После чего производим режекцию вышеизложенным методом, с использованием полученных направлений. Далее вычисляем величину невязки \hat{J} (2.20) и ее M -мерный градиент (координатами M -мерного пространства являются направления на мешающие ГЛС). За следующее приближение направлений на мешающие источники $\vec{\varphi} = (\varphi_\mu)$ принимаем следующую величину [143 – 146]:

$$\vec{\varphi}_{i+1} = \vec{\varphi}_i - \delta\varphi \cdot \frac{\nabla \hat{J}(\vec{\varphi}_i)}{|\nabla \hat{J}(\vec{\varphi}_i)|},$$

где $\delta\varphi$ – шаг, величина которого определяется необходимой точностью определения направлений на мешающие источники.

Таким образом, мы движемся в направлении обратном направлению градиента невязки \hat{J} , т.е. к ее минимуму.

Итерации заканчиваются, когда выполняется условие $\hat{J}(\vec{\varphi}_{i+1}) > \hat{J}(\vec{\varphi}_i)$. При этом за искомые направления принимаются направления, полученные на i -ой итерации.

На рисунках 2.9 – 2.14 приведены результаты, полученные в случае определения направлений на мешающие источники путем минимизации невязки \hat{J} (2.20) вышеописанным методом при различном количестве мешающих ГЛС:

- Рисунки 2.9 – 2.10 соответствуют одному мешающему сигналу.

- Рисунки 2.11 – 2.12 соответствуют двум мешающим сигналам.

- Рисунки 2.13 – 2.14 соответствуют трем мешающим сигналам. Рассмотрим случай трех мешающих источников.

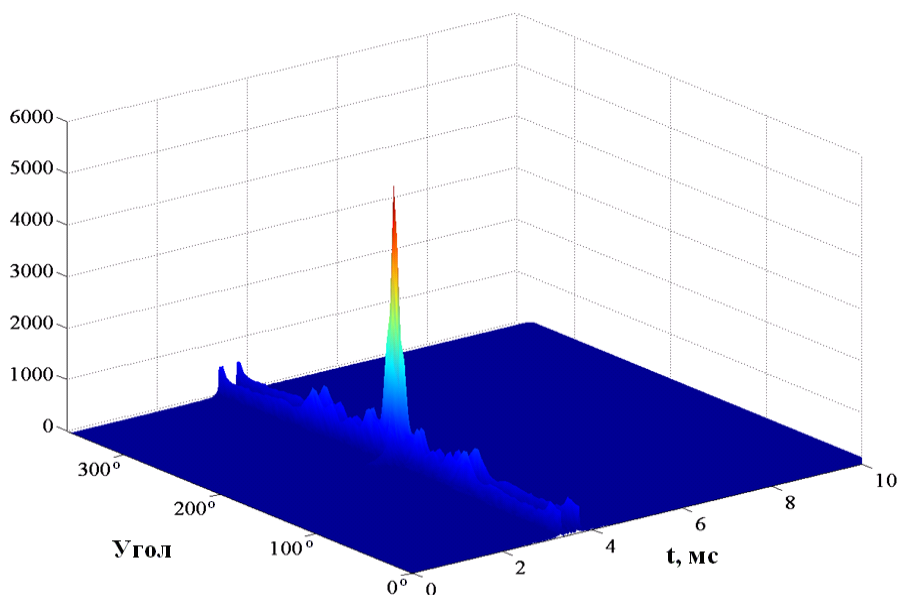


Рисунок 2.9. Пространственно-временной отклик АР на принимаемую реализацию.

На рисунке 2.9 приведен пространственно-временной отклик АР на принятую реализацию, которая представляет собой сумму:

- мощного мешающего сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуда 1 отн.ед., время приема 3.5 мс, пеленг 182°),
- эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуда 0.002 отн. ед., время приема 3.6 мс, пеленг 200°),
- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.002 отн. ед.

На рисунке 2.9 виден только пик соответствующий мешающему сигналу.

Нулевое приближение направления на мешающий сигнал, полученное из сформированных ХН в составило 181.985°. Оценка направления на мешающий сигнал после минимизации невязки \hat{J} (2.20) вышеописанным методом: 182°.

На рисунке 2.10 приведен пространственно-временной отклик АР ГЛС на принятую смесь после режекции мешающего сигнала.

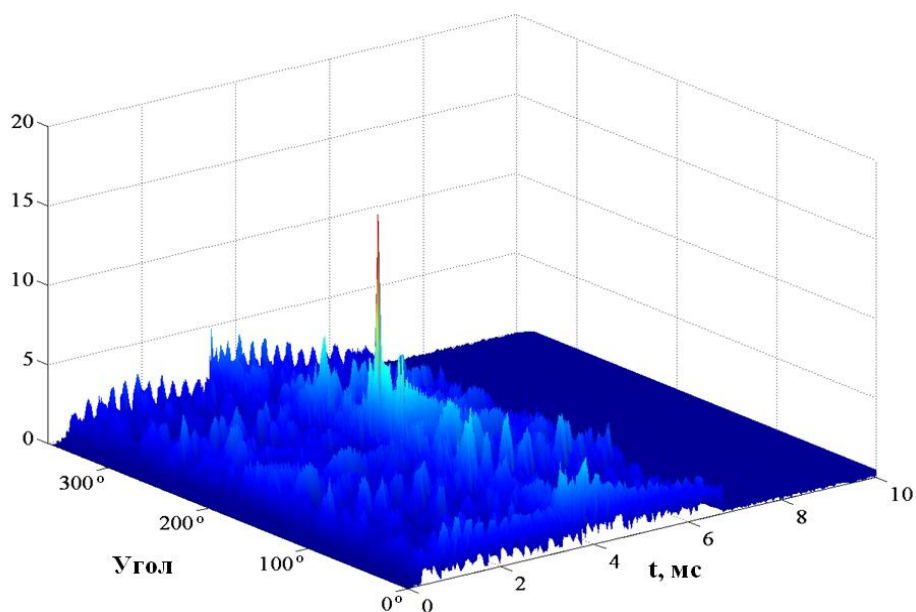


Рисунок 2.10. Пространственно-временной отклик АР на входную смесь после режекции.

На рисунке 2.10 виден пик, который соответствует плоской волне приходящей с направления 200° , т.е. эхо-сигналу от цели, амплитуда которого в 500 раз меньше амплитуды мешающего сигнала. Также на данном рисунке присутствуют остатки бокового поля (по времени и направлениям) мешающего сигнала.

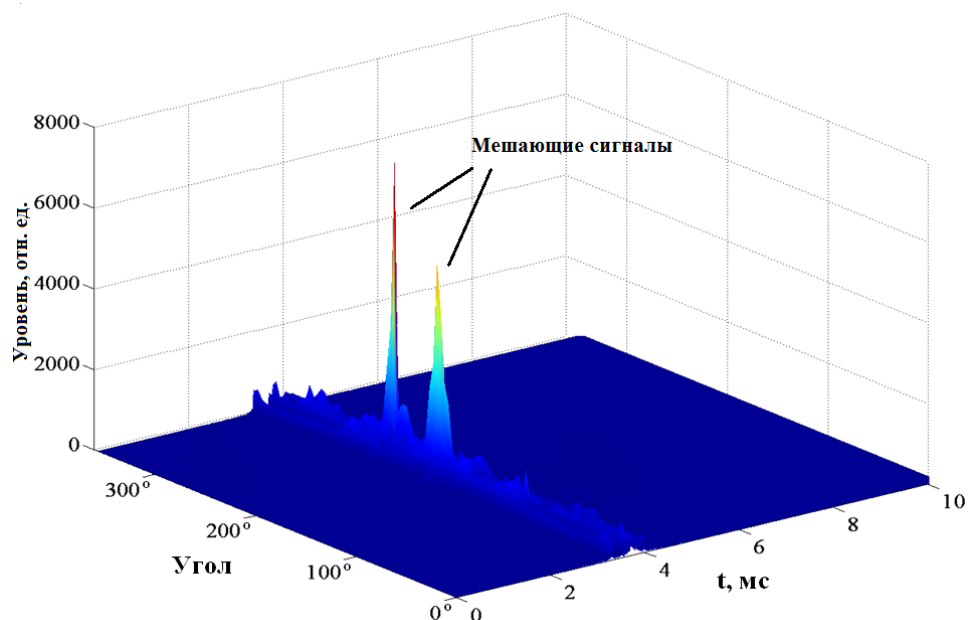


Рисунок 2.11. Пространственно-временной отклик АР на принимаемую смесь.

На рисунке 2.11 приведен пространственно-временной отклик АР на принятую реализацию, которая представляет собой сумму:

- двух мощных мешающих сигналов (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуды 1 и 0.9 отн.ед., время приема 3.5 и 3.8 мс, пеленга 182° и 239° соответственно),

- эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуда 0.002 отн. ед., время приема 3.6 мс, пеленг 200°),

- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.002 отн. ед.

На рисунке 2.11 мы видим только 2 пика соответствующие мешающим сигналам.

Нулевое приближение направлений на мешающие сигналы, полученное из сформированных ХН: 181.985° и 239.365°. Оценка направлений на мешающие сигналы после минимизации невязки \hat{J} (2.20) вышеописанным методом: 181.9999° и 239.0003°.

На рисунке 2.12 приведен пространственно-временной отклик АР ГЛС на принятую смесь после режекции мешающих сигналов.

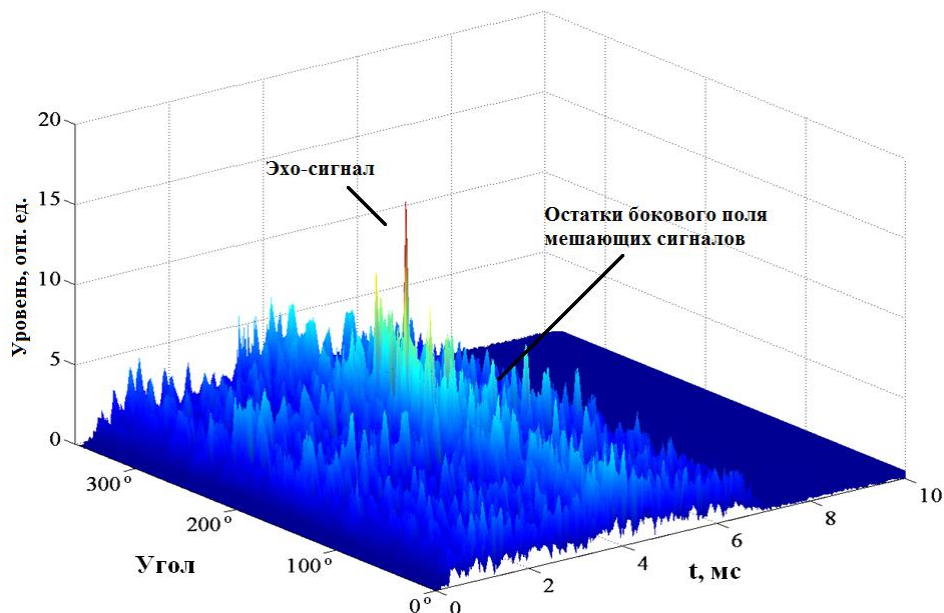


Рисунок 2.12. Пространственно-временной отклик АР на входную смесь после режекции.

На рисунке 2.12 виден пик, который соответствует плоской волне приходящей с направления 200°, т.е. эхо-сигналу от цели, амплитуда которого значительно меньше амплитуды мешающих сигналов. Также на данном рисунке

присутствуют остатки бокового поля (по времени и направлениям) мешающих сигналов.

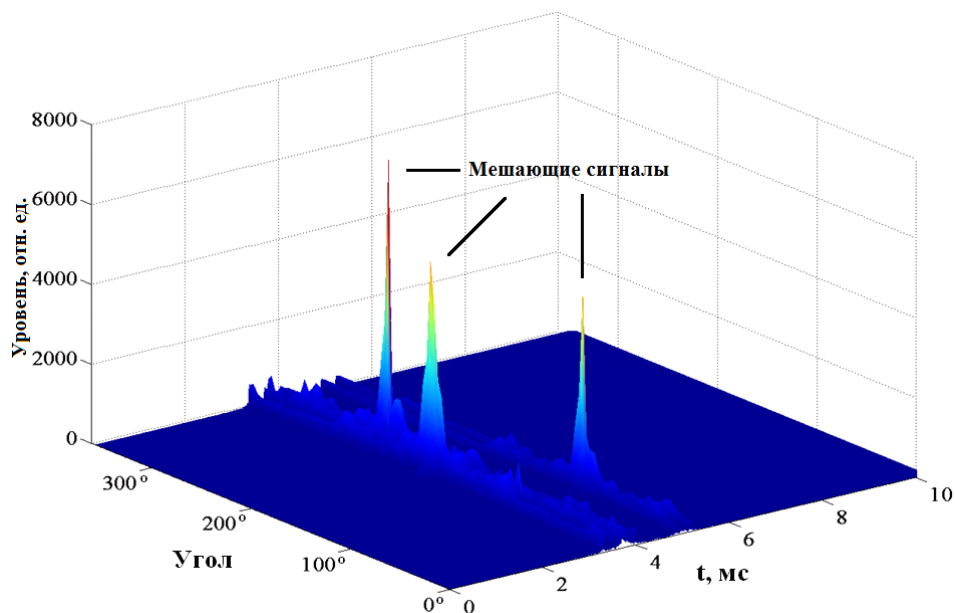


Рисунок 2.13. Пространственно-временной отклик АР на принимаемую смесь.

На рисунке 2.13 приведен пространственно-временной отклик АР на принятую реализацию, которая представляет собой сумму:

- трех мощных мешающих сигналов (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуды 0.7, 1 и 0.9 отн.ед., время приема 5.0, 3.5 и 3.8 мс, пеленга 100°, 182° и 239° соответственно),
- эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуда 0.002 отн. ед., время приема 3.6 мс, пеленг 200°),
- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.002 отн. ед.

На рисунке 2.13 мы видим только 3 пика соответствующие мешающим сигналам.

Нулевое приближение направлений на мешающие сигналы, полученное из сформированных ХН: 100.365°, 181.985° и 239.365°. Оценка направлений на мешающие сигналы после минимизации невязки \hat{j} (2.20) вышеописанным методом: 100.0005°, 182° и 238.9988°.

На рисунке 2.14 приведен пространственно-временной отклик АР ГЛС на принятую смесь после режекции мешающих сигналов.

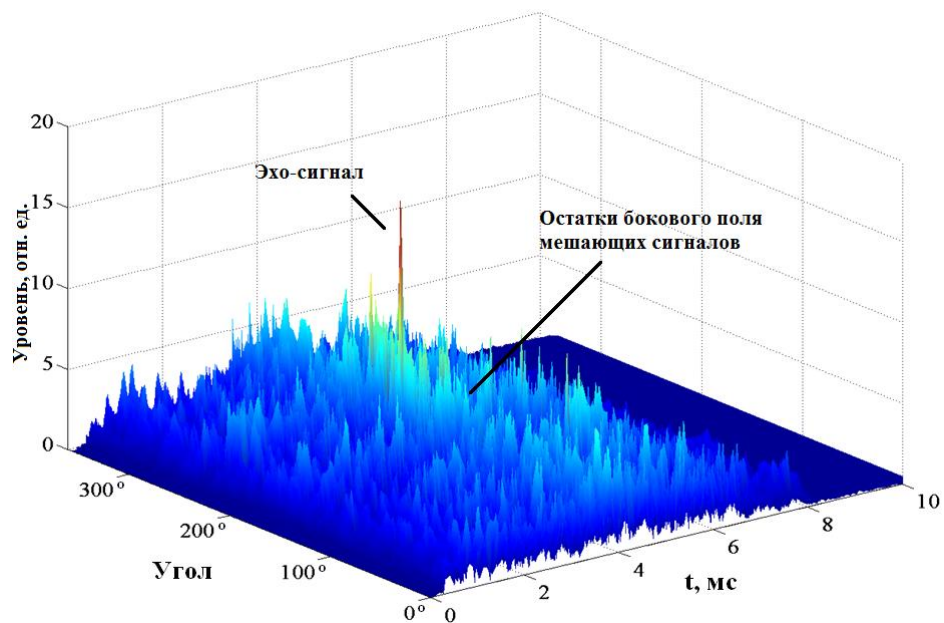


Рис. 2.14. Пространственный отклик АР на входную смесь после режекции.

На рисунке 2.14 виден пик, который соответствует плоской волне приходящей с направления 200° , т.е. эхо-сигналу от цели, амплитуда которого значительно меньше амплитуды мешающих сигналов. Также на данном рисунке присутствуют остатки бокового поля (по времени и направлениям) мешающего сигнала.

Как показывают результаты математического моделирования метод адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах можно эффективно (степень режекции до 1000 раз) применять в случае априорно неизвестной формы мешающих сигналов.

Для достижения существенной степени режекции при применении данного метода необходимо очень точно определять направление на мешающий сигнал, что в свою очередь приводит к значительному увеличению вычислительных затрат.

Основные вычислительные затраты в алгоритме, реализующем метод адаптивной режекции мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах, приходится на оценку направлений прихода мешающих сигналов с необходимой точностью.

2.4. Применение разработанных методов решения задачи гидроакустической совместимости при обработке экспериментальных данных

Алгоритм, основанный на разработанных методах режекции сигналов, был применен и подтвердил свою эффективность при обработке экспериментальных записей. Указанные записи представляют собой оцифрованные сигналы со всех приемных каналов АР ГЛС и были получены при проведении натурных испытаний с экспериментальными образцами ГЛС подводного мониторинга в Охотском море в 2016 и 2017 году в рамках выполняемой НЦВИ ИОФ РАН СЧ ОКР. В силу недостаточной отработки используемых решений по электропитанию ГЛС в автономном режиме, в записях содержатся мощные синфазные электрические наводки. При обработке указанных записей данный метод применялся с целью режекции мощных синфазных электрических наводок. Результаты, подтверждающие его эффективность, приведены на рисунке 2.15.

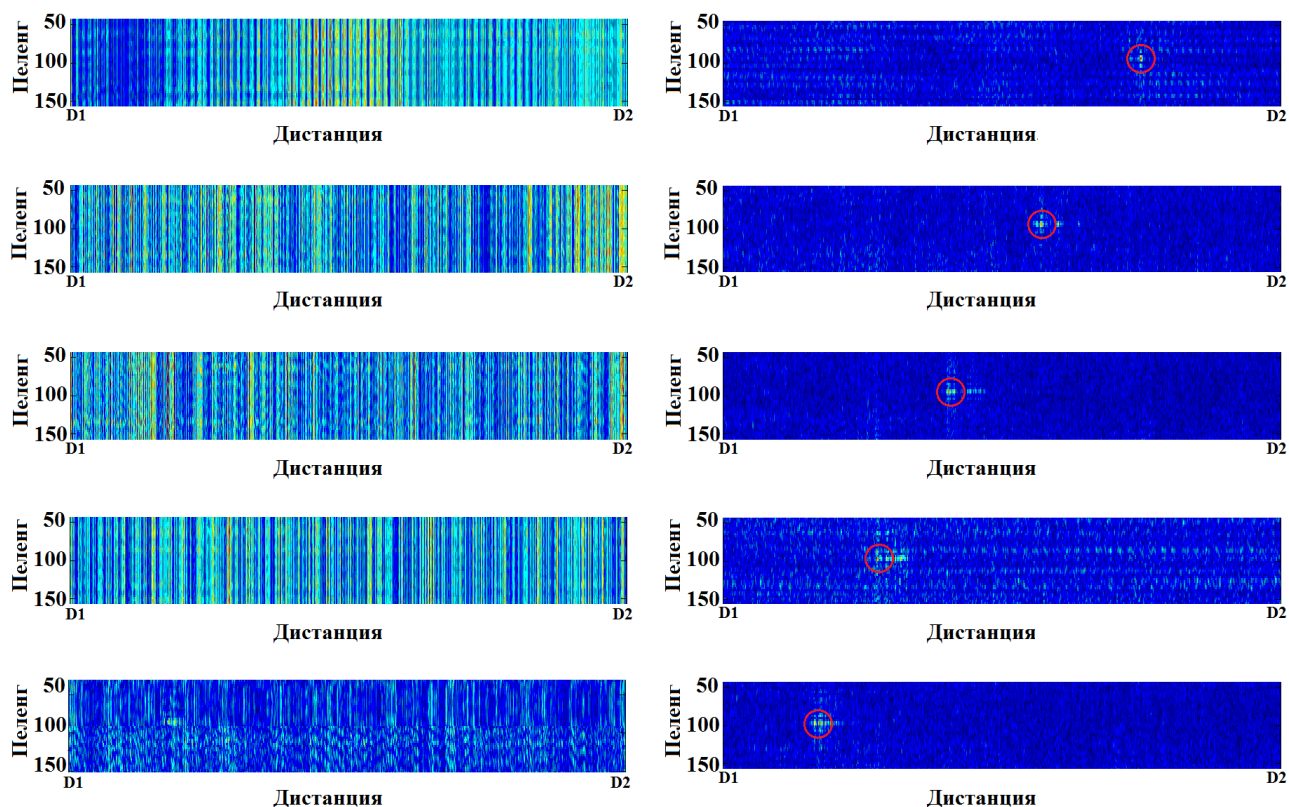


Рисунок 2.15. Индикаторный процесс при обнаружении подводного объекта по вторичному гидроакустическому полю.

На рисунке 2.15 приведены участки пространственно-временного отклика приемной АР, содержащие эхо-сигнал от движущегося подводного объекта, для пяти последовательных периодов обзора ГЛС в хронологическом порядке (первый период соответствует верхним откликам).

На рисунке 2.15 слева, который соответствует классическому алгоритму обработки, из-за мощной электрической помехи эхо-сигнал от цели не наблюдается.

На рисунке 2.15 справа, который соответствует обработке с применением разработанных методов режекции мощных сигналов, хорошо видны эхо-сигналы от цели, расстояние до которой с течением времени уменьшается.

2.5. Выводы

1 Анализ особенностей процесса гидроакустической совместимости при функционировании ГЛС в составе МСПН определил положительные качественные стороны применения метода адаптивной режекции прямого поля на выходе характеристик направленности антенны ГЛС в составе МСПН, повышающие вероятность обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта.

2 Для того чтобы иметь возможность применения метода режекции сигналов известной формы, должна быть априорно известна точная форма принятых ЗС от соседних ГЛС. В реальных системах мы не сможем точно спрогнозировать форму ЗС, даже если измерим искажения, вносимые конкретным излучателем, так как при распространении звука возникают дополнительные искажения, вызываемые многолучевостью, а также частотной зависимостью поглощения звука.

3 Метод режекции мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов, в отличие от метода режекции сигналов известной формы,

не требует априорного задания точной формы принятых ЗС от соседних ГЛС в составе МСПН.

4 Метод режекции мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов позволяет осуществить режекцию на основании измерения, сделанного на текущем импульсе, что в свою очередь приводит к снижению требований к объему памяти вычислительного комплекса ГЛС.

5 Применение алгоритма, реализующего метод режекции мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов, позволяет достигнуть достаточно высокой степени режекции (до 10^3 раз).

6 Основные вычислительные затраты в алгоритме, реализующем метод режекции мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов, приходится на определение направлений прихода мешающих сигналов с необходимой точностью.

7 В случае звуконепрозрачной АР ГЛС, состоящей из приемников, которые имеют собственные ХН, можно также применять этот метод режекции мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов, предварительно его модифицировав. Необходимость его модификации вызвана необходимостью оценки амплитуды мешающих сигналов в каждом из приемных каналов. Амплитуды мешающих сигналов можно определить, применяя метод режекции сигналов известной формы.

8 Алгоритм, основанный на разработанных методах режекции сигналов, был применен и подтвердил свою эффективность при обработке экспериментальных записей, где данный метод применялся с целью режекции мощных синфазных электрических наводок. Указанные записи представляют собой оцифрованные сигналы со всех приемных каналов АР ГАС и были получены при проведении натуральных экспериментов с экспериментальными образцами ГАС подводного мониторинга в Охотском море в 2016 и 2017 году в рамках выполняемой НЦВИ ИОФ РАН СЧ ОКР.

3. Идентификация эхо-сигналов и комплексирование их параметров мультистатической системой подводного наблюдения

3.1. Идентификация эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой

При функционировании мультистатической системы подводного наблюдения одному объекту соответствует несколько обнаруженных эхо-сигналов. В данной работе под идентификацией эхо-сигнала подразумевается сопоставление эхо-сигнала обнаруженному объекту и определение номера станции в составе системы, излучение которой обусловило данный эхо-сигнал.

Исходными данными алгоритмов идентификации эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой, и комплексирования их параметров, являются все эхо-сигналы от подводных объектов, как моностатические, так и бистатические, полученные со всех ГЛС системы. Для каждого обнаруженного эхо-сигнала имеется следующая информация: идентификационный номер обнаружившей его ГЛС, номер текущего импульса (периода обзора), номер эхо-сигнала в наборе всех эхо-сигналов обнаруженных данной ГЛС на данном импульсе, время приема эхо-сигнала, а также соответствующие ему пеленг и ОСП.

Задачу идентификации можно решить путем использования в разных ГЛС, входящих в состав МСПН, ЗС с отличающимися параметрами. Таким образом, станция, породившая сигнал, определяется путем выбора максимального из откликов полученных после пространственно-временной СФ. Однако для использования такого метода необходимо увеличивать быстродействие вычислительного комплекса каждой из станций пропорционально числу ГЛС используемых в МСПН.

Предлагаемые в данной работе методы идентификации обнаруженных эхо-сигналов и комплексирования их параметров основаны на максимизации функции

правдоподобия, могут применяться на посту наблюдения, и не требуют больших вычислительных затрат.

Математическое описание метода идентификации обнаруженных эхо-сигналов.

Пусть в одной акватории функционируют M гидролокационных станций. Предположим, что все станции излучают синхронно. Вначале рассмотрим случай, когда в этой акватории находится одна цель. Считаем, что координаты станций известны. Предположим, что ошибки измерения времен приема эхо-сигналов распределены по нормальному закону. В данном случае плотность вероятности измерения времени приема отраженного от цели сигнала имеет вид:

$$f_{RS}(\mathbf{x}_T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{RS}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{RS}^2}(t_{RS} - t(\mathbf{x}_T, \mathbf{x}_S) - t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_T))^2\right\}, \quad (3.1)$$

где $R, S = 1..M$ – номера принявшей и излучившей станций;

$\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S, \mathbf{x}_T$ – координаты принимающей и излучающей станций и цели соответственно;

t_{RS} – измеренное R -ой ГЛС время приема отраженного от цели сигнала, порожденного излучением S -ой ГЛС;

$t(\mathbf{x}_T, \mathbf{x}_S)$ – время распространения сигнала от излучившей ГЛС к цели;

$t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_T)$ – время распространения сигнала от цели к принявшей эхо-сигнал ГЛС;

σ_{RS} – СКО измерения этого времени.

В качестве времени распространения сигнала принимается время его распространения вдоль луча с максимальной амплитудой.

Логарифм плотности вероятности единичного измерения (3.1):

$$L_{RS}(\mathbf{x}_T) = -\ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{RS}) - \frac{1}{2\sigma_{RS}^2}(t_{RS} - t(\mathbf{x}_T, \mathbf{x}_S) - t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_T))^2. \quad (3.2)$$

Суммарный логарифм плотности вероятности измерения всей мультистатической системы:

$$L(\mathbf{x}_T) = \sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M L_{RS}(\mathbf{x}_T). \quad (3.3)$$

Путем максимизации суммарного логарифма плотности вероятности по номерам излучивших станций (по индексу S) идентифицируем моностатические и бистатические эхо-сигналы, соответствующие цели.

В общем случае количество эхо-сигналов от одной цели, обнаруженных ГЛС за один период обзора, N может быть меньше числа станций в системе M . Это обусловлено тем, что АЦП станций принимают сигнал в течение ограниченного промежутка времени, а также слабостью эхо-сигналов порожденных излучением значительно удаленных ГЛС. На рисунке 3.1 изображен пример некоторой МСПН и эхо-сигналы, обнаруженные ГЛС №8 из состава данной МСПН.

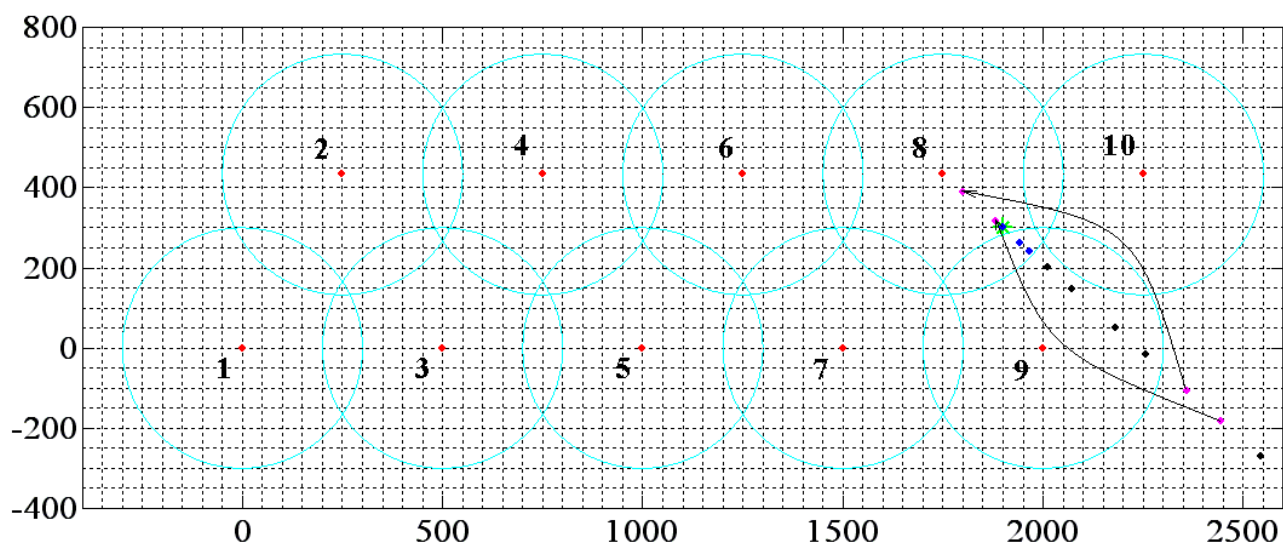


Рисунок 3.1. Пример МСПН и эхо-сигналов от цели, обнаруженных одной ГЛС.

На рисунке 3.1 красными точками указано расположение ГЛС, голубыми окружностями – их зоны обзора. Зеленым цветом здесь отмечено истинное положение цели. Синими точками обозначены эхо-сигналы, которые попадают в зону обзора ГЛС, черными – эхо-сигналы, время приема которых не совпадает со временем приема ГЛС. Фиолетовые точки соответствуют эхо-сигналам, у которых время приема превышает период обзора системы, вследствие чего они принимаются на следующем периоде обзора. По данной причине время приема указанных эхо-сигналов будет определяться как

$$\hat{t}_{RS} = t(\mathbf{x}_T, \mathbf{x}_S) + t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_T) - T,$$

где T – период обзора системы.

Стрелками на рисунке 3.1 показан перенос времени эхо-сигналов, вызываемый таким эффектом. Так как расстояние, проходимое звуком в данном случае, велико, то на практике такой эффект можно наблюдать лишь при очень большом эквивалентном радиусе объекта или в случаях, когда объект расположен вблизи ГЛС.

Максимизацию логарифма плотности вероятности L (3.3) при идентификации эхо-сигналов будем проводить в соответствии со следующим алгоритмом.

Для хранения результата идентификации введем трехмерный массив $T_map_{ijk} = n$, котором: индекс $i = 1..N_0$ – номер гипотезы, состоящей в том, что i -ый эхо-сигнал является моностатическим (N_0 – количество эхо-сигналов обнаруженных системой на текущем периоде обзора); индекс $j = 1..M$ – номер ГЛС, излучившей ЗС (M – количество ГЛС в МСПН); индекс $k = 1..M$ – номер принявшей эхо-сигнал ГЛС; n – номер эхо-сигнала в наборе всех эхо-сигналов, обнаруженных МСПН. Изначально инициализируем данный массив нулями.

Рассмотрим гипотезу H_i : i -ый эхо-сигнал является моностатическим.

Зная координаты станции $\mathbf{x}_R = (x_R, y_R)$, обнаружившей этот моностатический эхо-сигнал, мы можем оценить координаты цели \mathbf{x}_0 :

$$\begin{cases} x_0 = x_R + D(t_{Ri}/2)\cos(\varphi_{Ri}), \\ y_0 = y_R + D(t_{Ri}/2)\sin(\varphi_{Ri}), \end{cases} \quad (3.4)$$

где $D(t_{Ri}/2)$ – дистанция, соответствующая времени распространения $t_{Ri}/2$,

t_{Ri} – время приема i -го эхо-сигнала R -ой ГЛС,

φ_{Ri} – соответствующий эхо-сигналу пеленг.

Далее, зная координаты всех ГЛС в МСПН, можно рассчитать теоретические времена приема для всех потенциально возможных эхо-сигналов от этой цели:

$$t_{RS} = t(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_S) + t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_0). \quad (3.5)$$

Далее определим минимальную невязку с измеренными временами приема эхо-сигналов, обнаруженных системой, а также номер эхо-сигнала j^* , соответствующей минимальной невязке:

$$\Delta J_{RS} = \min_j (|t_{RS} - \hat{t}_{Rj}|), \quad (3.6)$$

где \hat{t}_{Rj} – времена приема эхо-сигналов, обнаруженных R -ой станцией.

Если значение ΔJ_{RS} меньше порога, который определяется ошибками оценки параметров эхо-сигналов и ошибками их прогноза, то присвоим значение элементу массива $T_map_{iSR} = j^*$, также количество использований эхо-сигнала номер j^* ($EchoUsed_{j^*}$) увеличиваем на единицу.

Суммарное значение логарифма плотности вероятности при гипотезе H_i :

$$L_i = -J_i = -\sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M \frac{1}{\sigma_{RS}^2} \Delta J_{RS}^2. \quad (3.7)$$

После того как вычислены значения логарифма плотности вероятности L_i для всех гипотез H_i , определяем истинность этих гипотез путем сравнения L_i с порогом, величина которого определяется ошибками оценки параметров эхо-сигналов и ошибками их прогноза.

Также необходимо учитывать следующее правило: если i -ый эхо-сигнал является бистатическим для другого моностатического эхо-сигнала, то он уже не может быть моностатическим.

В результате выполнения вышеописанных операций имеем номера истинных гипотез и соответствующие этим номерам матрицы размером $M \times M$, полученные из массива T_map . Элемент данных матриц стоящий на пересечении S -ой строки с R -ым столбцом равен номеру эхо-сигнала, обнаруженного МСПН, причем данный эхо-сигнал обнаружен R -ой ГЛС и порожден излучением S -ой ГЛС. Следовательно, идентификация эхо-сигналов выполнена.

На рисунке 3.2 изображена МСПН, состоящая из трех ГЛС, и все обнаруженные с ее помощью эхо-сигналы, соответствующие единственному объекту с координатами (300, 100). Также на данном рисунке изображен результат идентификации обнаруженных эхо-сигналов.

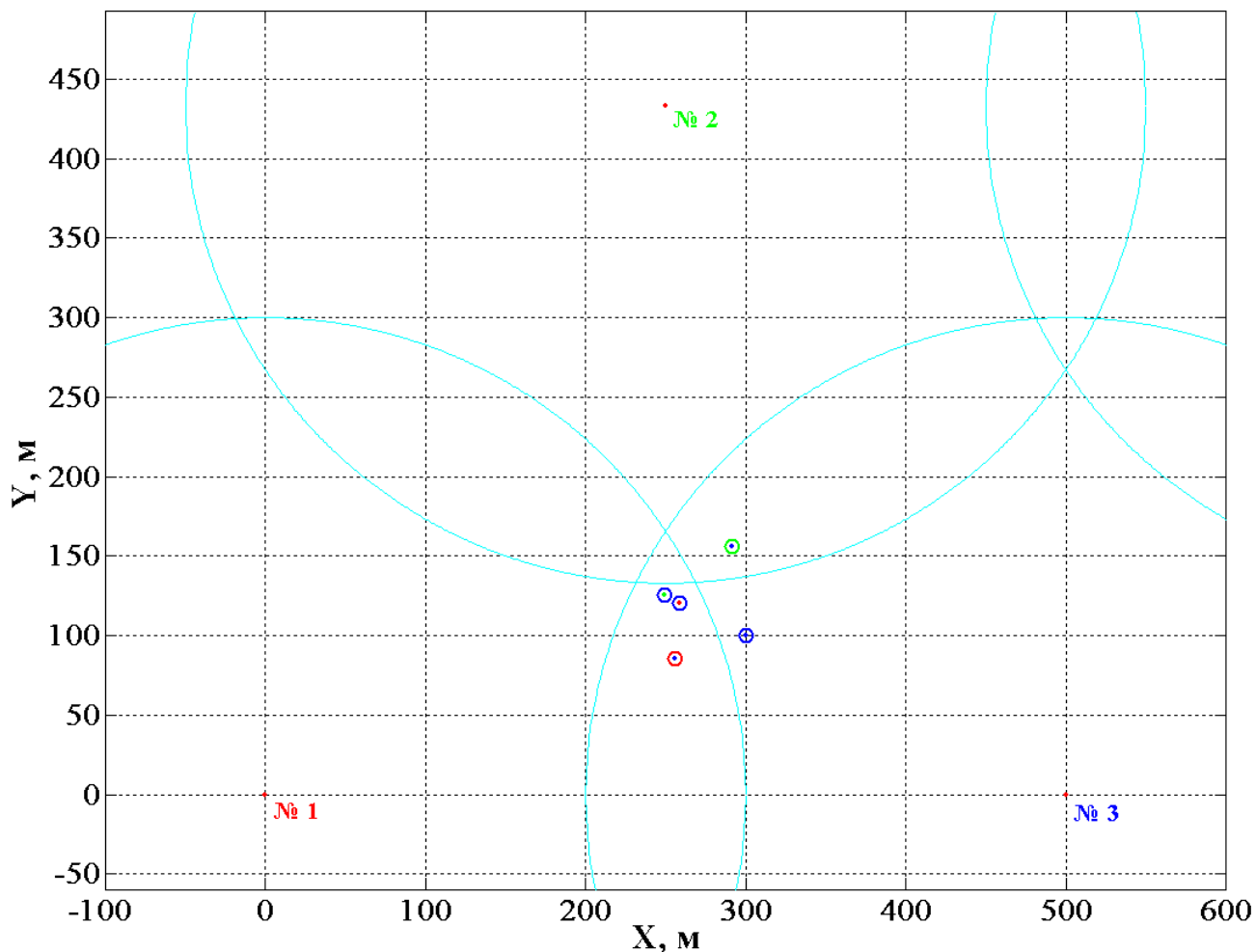


Рисунок 3.2. Эхо-сигналы, соответствующие объекту с координатами (300, 100).

На рисунке 3.2 красными точками указано расположение ГЛС (№ 1 – 3) в МСПН, голубыми окружностями – их зоны обзора. Окружностями малого радиуса на данном рисунке обозначены эхо-сигналы, обнаруженные МСПН. Причем, цвет окружности соответствует обнаружившей эхо-сигнал ГЛС: красный – ГЛС № 1, зеленый – ГЛС № 2 и синий – ГЛС № 3. Результатом работы алгоритма идентификации является номер ГЛС, излучение которой порождает эхо-сигнал: этот номер на рисунке 3.2 обозначен цветом точек, расположенных внутри малых окружностей, соответствующих обнаруженным эхо-сигналам.

3.2. Комплексование параметров эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой

Под комплексированием параметров эхо-сигналов в данной работе подразумевается использование всех обнаруженных МСПН эхо-сигналов от одной цели при оценке ее координат.

В результате идентификации получена информация о соответствии обнаруженных эхо-сигналов определенным подводным объектам и о номерах ГЛС, излучение которых породило данные эхо-сигналы. В данном случае для оценки текущих координат цели помимо одного моностатического эхо-сигнала, можно также использовать информацию, содержащуюся во всех эхо-сигналах обнаруженных МСПН [147].

Математическое описание метода комплексирования параметров эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой.

На основании измеренных времен t_{RS} и известных координат станций \mathbf{x}_R и \mathbf{x}_S нам необходимо получить координаты цели \mathbf{x}_T . Для решения данной задачи также применим метод максимального правдоподобия.

Логарифм плотности вероятности оценки координат цели, полученной МСПН (3.2, 3.3):

$$L_{RS}(\mathbf{x}_T) = -\ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{RS}) - \frac{1}{2\sigma_{RS}^2} (t_{RS} - t(\mathbf{x}_T, \mathbf{x}_S) - t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_T))^2,$$
$$L(\mathbf{x}_T) = \sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M L_{RS}(\mathbf{x}_T).$$

Путем его максимизации по координатам цели \mathbf{x}_T получим максимально правдоподобные оценки текущих координат цели (ТКЦ).

Максимизацию $L(\mathbf{x}_T)$ можно выполнить с применением различных численных методов.

Далее с целью упрощения расчетов рассмотрим задачу максимизации величины $L(\mathbf{x}_T)$ в двумерном пространстве. В данном случае:

$$L_{RS}(\mathbf{x}_T) = -\ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{RS}) - \frac{1}{2\sigma_{RS}^2} \left(t_{RS} - \frac{\|\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_R\| + \|\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_S\|}{c} \right)^2, \quad (3.8)$$

где c – скорость звука.

Максимизацию выполним помощью метода Ньютона [143, 148 – 150]:

$$\mathbf{x}_{T(1)} = \mathbf{x}_{T(0)} - \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{x}_T^2} \right)_{\mathbf{x}_{T(0)}}^{-1} \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_T} \right)_{\mathbf{x}_{T(0)}} \quad (3.9)$$

Для этого вычислим первую и вторую производные логарифма плотности вероятности по координатам цели:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_T} = \sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M \frac{1}{c\sigma_{RS}^2} \left(t_{RS} - \frac{\|\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_R\| + \|\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_S\|}{c} \right) (\mathbf{e}_{RT} + \mathbf{e}_{ST}), \quad (3.10)$$

где \mathbf{e}_{RT} и \mathbf{e}_{ST} – единичные вектора, направленные из принимающей и излучающей ГЛС соответственно в точку расположения цели.

При вычислении вторых производных пренебрежем зависимостью векторов \mathbf{e}_{RT} и \mathbf{e}_{ST} от координат цели:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{x}_T^2} = \sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M \frac{1}{c^2 \sigma_{RS}^2} (\mathbf{e}_{RT} + \mathbf{e}_{ST})(\mathbf{e}_{RT} + \mathbf{e}_{ST})^T. \quad (3.11)$$

Используя в качестве нулевого приближения координат цели, координаты, полученные из моностатического эхо-сигнала, по формулам (3.10) и (3.11) вычислим вектор первых и матрицу вторых производных логарифма плотности вероятности измерения и, подставив их в формулу (3.9), найдем искомое значение координат цели.

Потенциальную точность оценки координат цели можно вычислить с помощью информационной матрицы Фишера [151]:

$$\mathbf{I} = \mathbf{E} \left\{ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_T} \cdot \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_T} \right\}, \quad (3.12)$$

где символ \mathbf{E} обозначает вычисление математического ожидания,

L – суммарный логарифм плотности вероятности оценки координат цели, полученной МСПН (3.3);

\mathbf{x}_T – координаты цели.

Подставляя производную (3.10) в выражение (3.12) и вычисляя математическое ожидание, получим следующее выражение для информационной матрицы Фишера:

$$I = \sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M \frac{1}{c^2 \sigma_{RS}^2} (\mathbf{e}_{RT} + \mathbf{e}_{ST})(\mathbf{e}_{RT} + \mathbf{e}_{ST})^T. \quad (3.13)$$

3.3. Оценка эффективности методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров

Эффективность алгоритмов, реализующих методы идентификации эхо-сигналов, обнаруженных МСПН, и комплексирования их параметров исследована путем моделирования в среде Matlab.

Моделирование проводилось следующим образом:

1. Задавалось количество ГЛС в МСПН, расположение ГЛС в акватории, количество целей, параметры их движения.
2. На каждом периоде обзора рассчитывались все обнаруживаемые МСПН эхо-сигналы от целей.
3. С применением алгоритмов, реализующих предлагаемые методы, осуществлялись идентификация эхо-сигналов и комплексирование текущих координат обнаруженных целей, также оценивалась эффективность данных алгоритмов.

На рисунке 3.3 изображено расположение ГЛС в акватории, соответствующее МСПН, для которой проводилось моделирование.

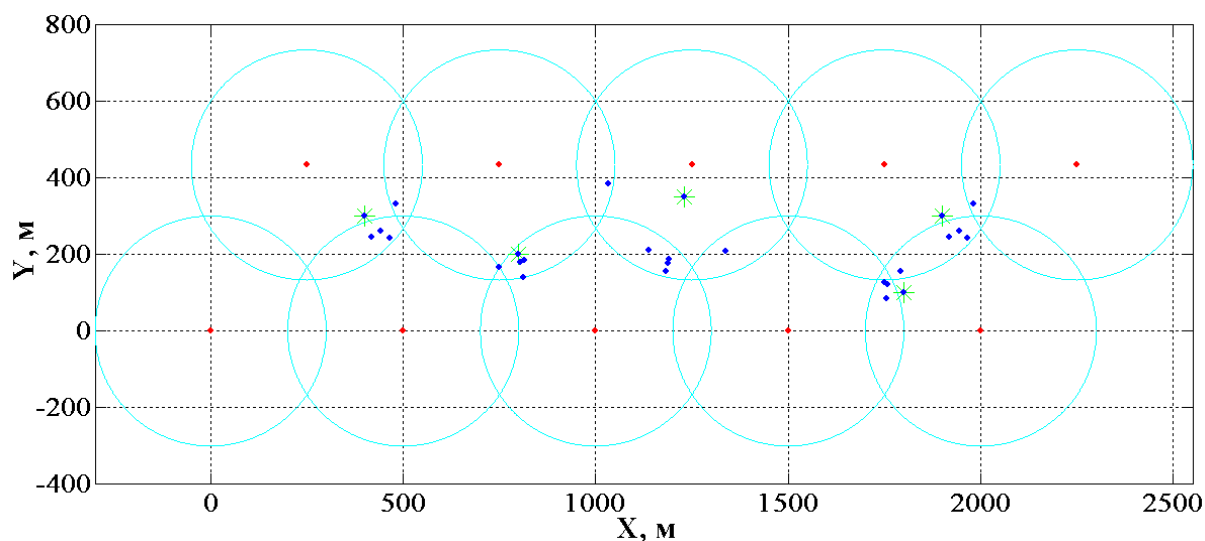


Рисунок 3.3. Эхо-сигналы, обнаруженные МСПН за один период обзора, которые соответствуют пяти целям, находящимся в зоне обзора МСПН.

На рисунке 3.3 также приведены все эхо-сигналы, обнаруженные МСПН, состоящей из 10 ГЛС, при наличии в контролируемой акватории 5 целей. Красными точками указано расположение станций, голубыми окружностями – их зоны обзора. Зеленым цветом обозначено истинное расположение целей. Синие точки – эхо-сигналы, обнаруженные системой за текущий период обзора.

Рассмотрим сначала случай одной цели. Параметры ее движения:

$$x_0 = 300 \text{ м}, y_0 = 800 \text{ м};$$

$$v_x = 8 \text{ м/с}, v_y = -5 \text{ м/с}.$$

Количество периодов обзора равно 250. На рисунках 3.4 и 3.5 приведены эхо-сигналы, обнаруженные всеми ГЛС в составе МСПН.

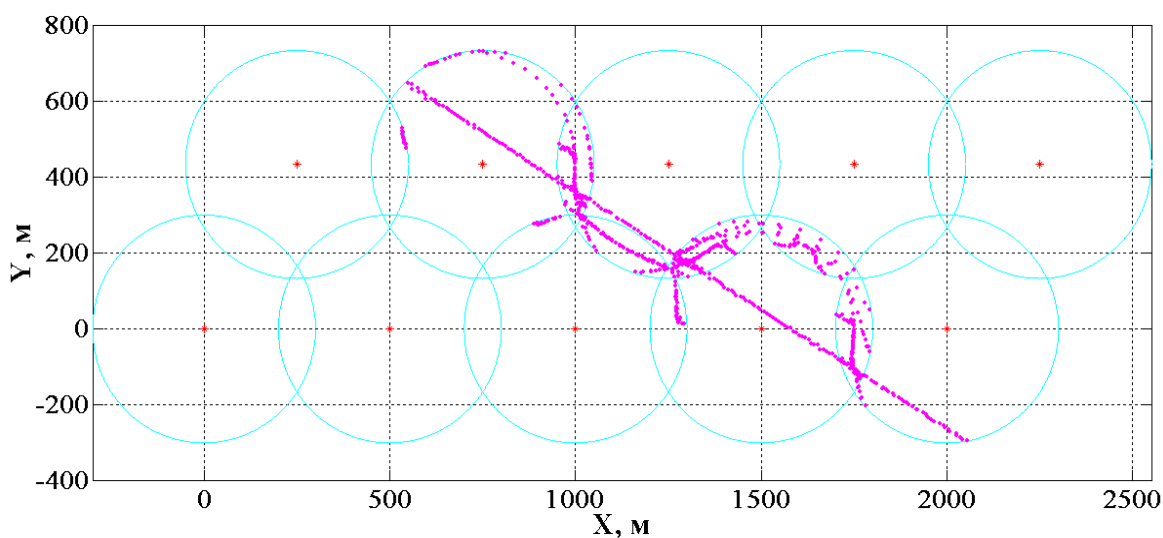


Рисунок 3.4. Все эхо-сигналы, обнаруженные МСПН за 250 периодов обзора.

На рисунке 3.4 точками малинового цвета представлены все эхо-сигналы, обнаруженные системой за 250 периодов обзора. Помимо эхо-сигналов, расположенных вдоль прямой, соответствующей траектории движения цели, присутствует существенное число бистатических эхо-сигналов, расположенных вдоль различных кривых, форма которых помимо траектории движения цели зависит и от расположения ГЛС в акватории.

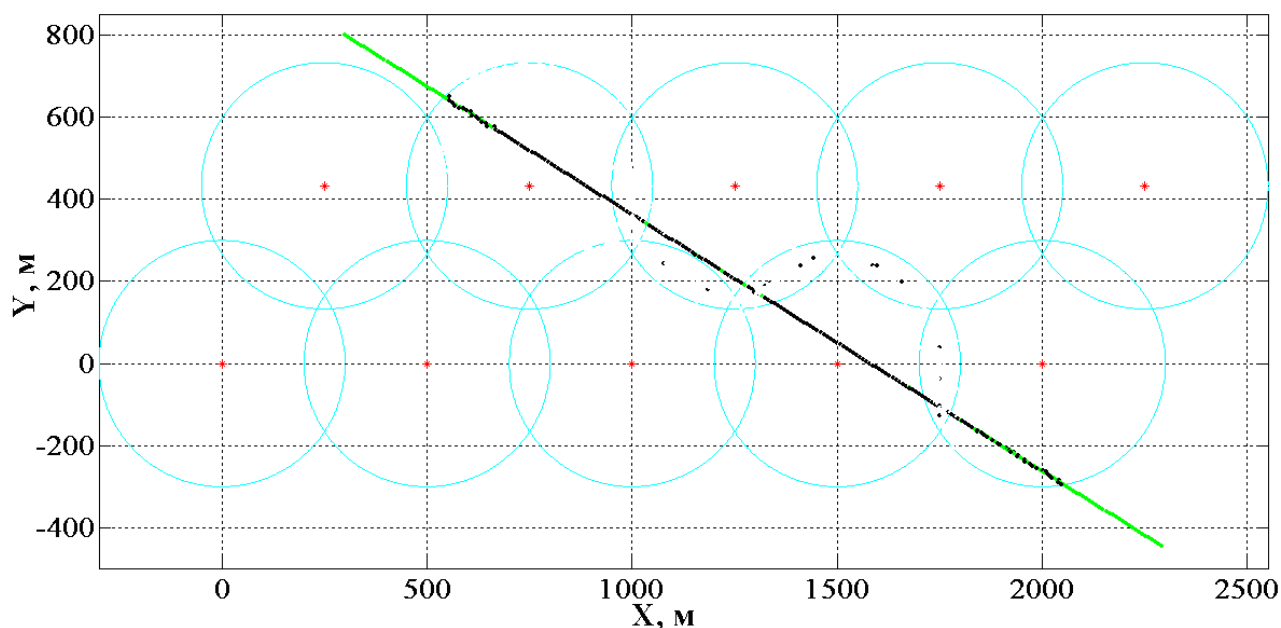


Рисунок 3.5. Результат применения алгоритмов, реализующих методы идентификации и комплексирования.

На рисунке 3.5 приведена истинная траектория движения цели (точки зеленого цвета), а также результат применения алгоритмов, реализующих предложенные методы идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров (точки черного цвета). На данном рисунке также можно увидеть несколько черных точек, которые расположены не вдоль траектории движения цели. Эти точки соответствуют «ложным» целям, под которыми здесь и далее в этой главе мы будем понимать бистатические эхо-сигналы, идентифицированные как моностатические.

На рисунке 3.6 представлены графики зависимости количества обнаруженных МСПН эхо-сигналов от номера периода обзора при данных параметрах моделирования (законе движения цели).

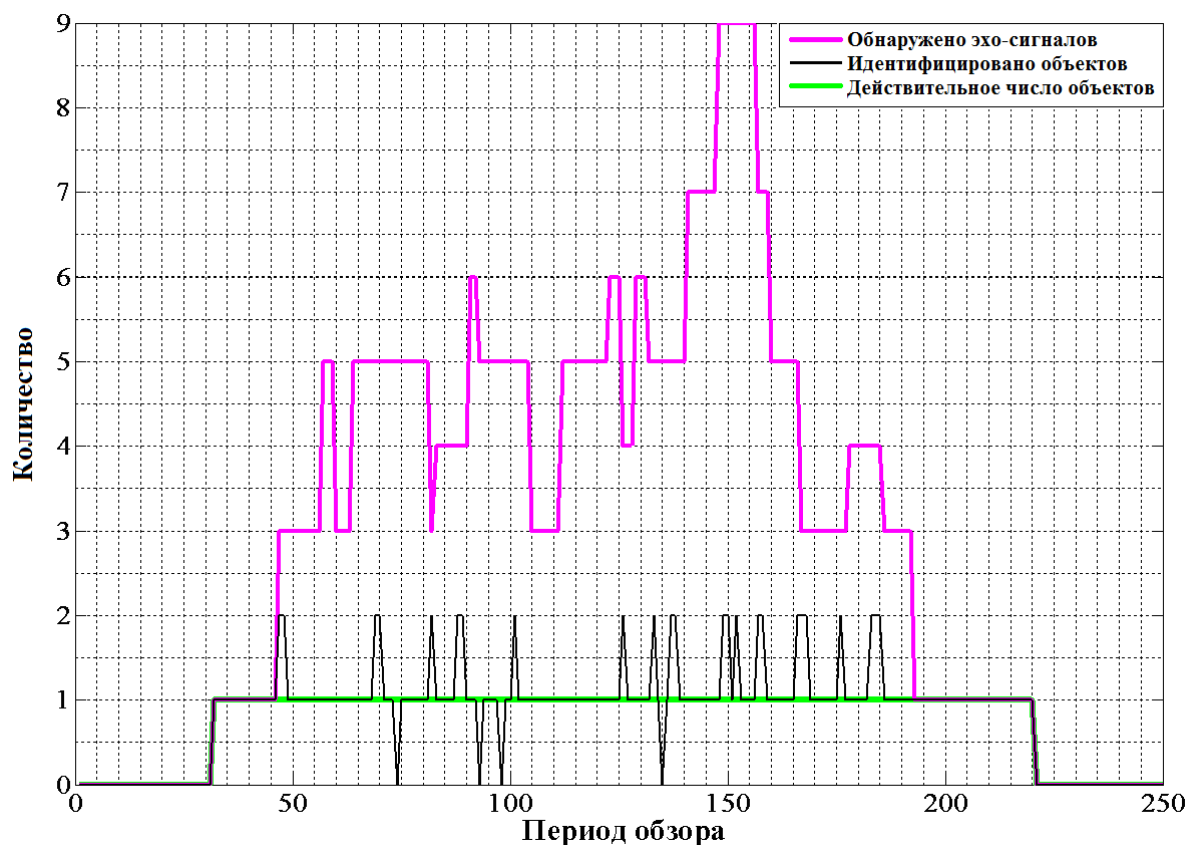


Рисунок 3.6. Зависимость числа обнаруженных МСПН эхо-сигналов от номера периода обзора.

На рисунке 3.6 малиновым цветом изображено количество эхо-сигналов, обнаруженных МСПН, зеленым цветом – количество объектов, находящихся в зоне обзора МСПН, черным – количество идентифицированных целей.

Из рисунка 3.6 видно, что помимо ошибок ложной идентификации, также возникают ошибки пропуска целей. Нулевые значения в начале и конце графиков соответствуют случаю, когда в зоне обзора МСПН нет ни одной цели.

Для количественной оценки эффективности алгоритма, реализующего метод идентификации обнаруженных МСПН эхо-сигналов, построим путем численного моделирования зависимость количества ошибок, получаемых при применении указанного алгоритма, от точности определения параметров эхо-сигналов (времени приема эхо-сигнала его пеленга) отдельными ГЛС системы. Результаты применения алгоритма, реализующего метод идентификации, при различных точностях измерения времен приема эхо-сигналов, полученные в предположении, что направления приема эхо-сигналов измерены точно, представлены в таблице 3.1 и на рисунке 3.7.

Таблица 3.1. Результаты применения алгоритма идентификации при различных точностях измерения времен приема эхо-сигналов.

σ_t , мс	Количество целей	Количество эхо-сигналов	Идентифицировано целей	Пропущено целей	«Ложных» целей
0	189	738	206	0 (0.0%)	17 (9.0%)
0.05	945	3693	1030	1 (0.1%)	86 (9.1%)
0.1	945	3693	1033	2 (0.2%)	90 (9.6%)
0.2	945	3692	1027	3 (0.3%)	85 (9.0%)
0.5	945	3696	1019	11 (1.2%)	85 (9.0%)
1.0	945	3690	1017	14 (1.5%)	85 (9.0%)

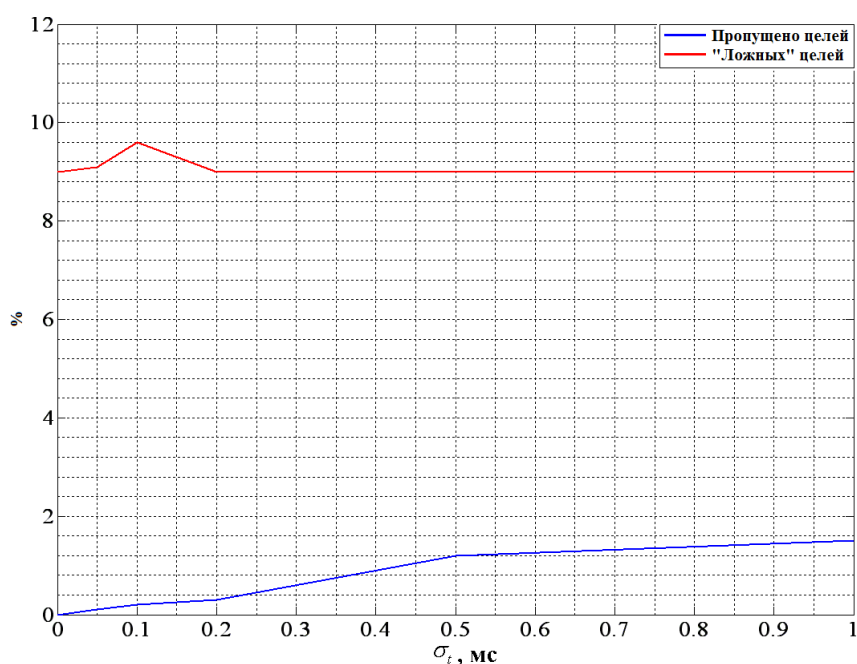


Рисунок 3.7. Графики зависимости количества пропущенных (синяя кривая) и «ложных» (красная кривая) целей, от СКО оценки времен приема эхо-сигналов.

На рисунке 3.7 кривой синего цвета приведен график зависимости процента пропущенных целей от СКО ошибок оценки времен приема эхо-сигналов. Красная кривая соответствует графику аналогичной зависимости процента «ложных» целей.

На основании приведенных графиков, а также результатов, представленных в таблице 3.1, можно сделать следующие выводы:

- при СКО ошибок оценки времен приема эхо-сигналов до 1 мс число пропусков растет с ростом указанных ошибок,

- число «ложных» целей остается практически постоянным и составляет приблизительно 10% от истинного количества целей в зоне обзора МСПН.

Результаты применения алгоритма, реализующего метод идентификации, при различных точностях измерения направления приема эхо-сигналов представлены в таблице 3.2. При этом предполагаем, что времена приема эхо-сигналов измерены точно. На рисунке 3.8 приведены графики, построенные по данным таблицы 3.2.

Таблица 3.2. Результаты использования алгоритма идентификации при различных точностях измерения направления приема эхо-сигналов

σ_φ , градусы	Количество целей	Количество эхо-сигналов	Идентифицировано целей	Пропущено целей	«Ложных» целей
0	189	738	206	0 (0.0%)	17 (9.0%)
0.1	945	3690	1029	3 (0.3%)	87 (9.2%)
0.2	945	3690	1028	3 (0.3%)	86 (9.1%)
0.5	945	3690	1046	5 (0.5%)	107 (11.3%)
1.0	945	3690	1032	19 (2.0%)	106 (11.2%)
2.0	945	3690	964	91 (9.6%)	110 (11.7%)

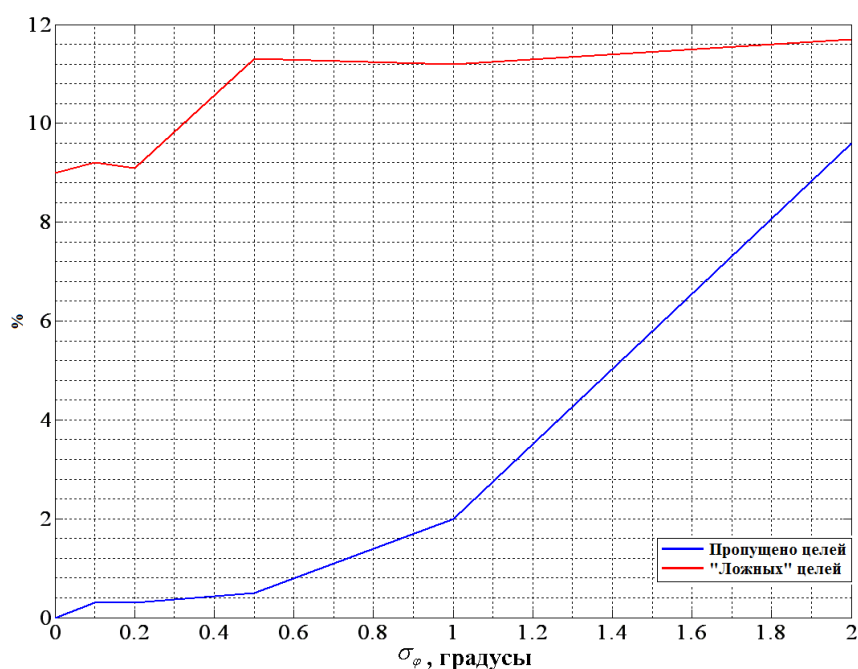


Рисунок 3.8. Графики зависимости количества пропущенных (синяя кривая) и «ложных» (красная кривая) целей, от СКО оценки направления приема эхо-сигналов.

На рисунке 3.8 кривой синего цвета приведен график зависимости процента пропущенных целей от СКО ошибок оценки направления приема эхо-сигналов.

Красная кривая соответствует графику аналогичной зависимости процента «ложных» целей.

На основании графиков, приведенных на рисунке 3.8, а также результатов, представленных в таблице 3.2, можно сделать следующие выводы:

- при СКО ошибок оценки направлений приема эхо-сигналов до 2 градусов число пропусков значительно возрастает с ростом этих ошибок,
- число «ложных» целей, как и в предыдущем случае, остается практически неизменным и составляет приблизительно 10% от истинного количества целей в зоне обзора МСПН.

Далее рассмотрим эффективность функционирования алгоритма, реализующего метод комплексирования параметров целей, обнаруженных МСПН, для чего построим графики ошибок при оценках ТКЦ.

На рисунке 3.9 приведены графики зависимости ошибок при оценках ТКЦ от периода обзора МСПН.

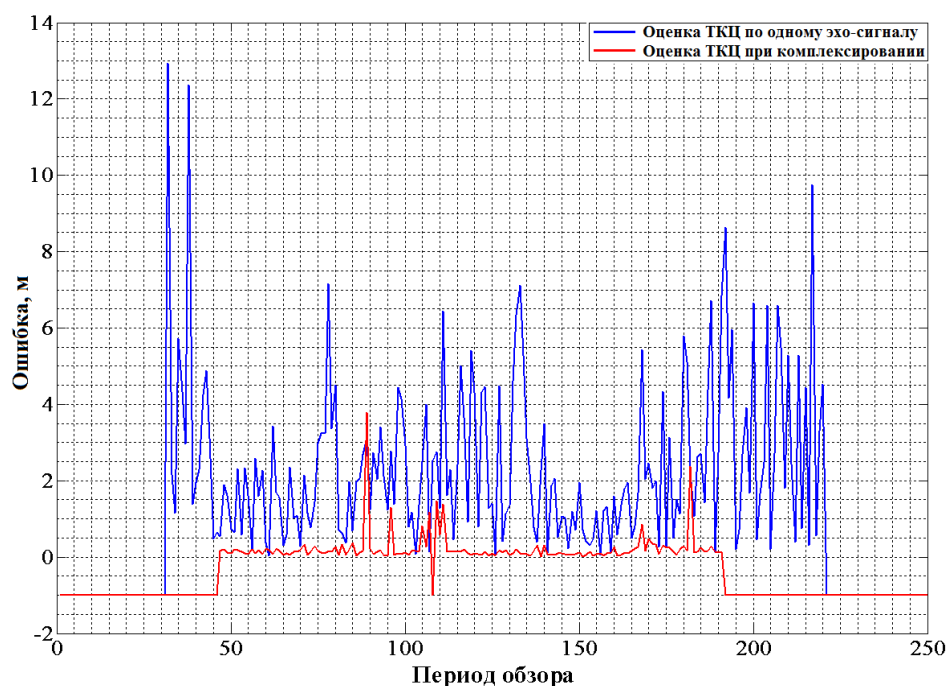


Рисунок 3.9. Ошибки оценки ТКЦ.

На рисунке 3.9 приведены графики ошибок оценки ТКЦ (в метрах) от периода обзора МСПН при использовании одного моностатического эхо-сигнала (синяя кривая) и при использовании всех эхо-сигналов от данной цели, обнаруженных МСПН (красная кривая), т. е. при комплексировании. Под

ошибкой оценки ТКЦ здесь понимается расстояние между истинным положением цели и его оценкой.

Значение минус единица для синей кривой означает, что во время текущей посылки в зоне обзора МСПН нет ни одной цели.

Для красной кривой минус единица означает, что комплексирование провести невозможно. Это может быть вызвано следующими причинами: во время текущего периода обзора в зоне обзора МСПН нет ни одной цели, цель не идентифицирована (пропущена), цели соответствует только один эхо-сигнал; матрица вторых производных (3.11) близка к сингулярной.

На рисунке 3.10 для наглядности приведен участок траектории цели (рисунок 3.5) в более крупном масштабе.

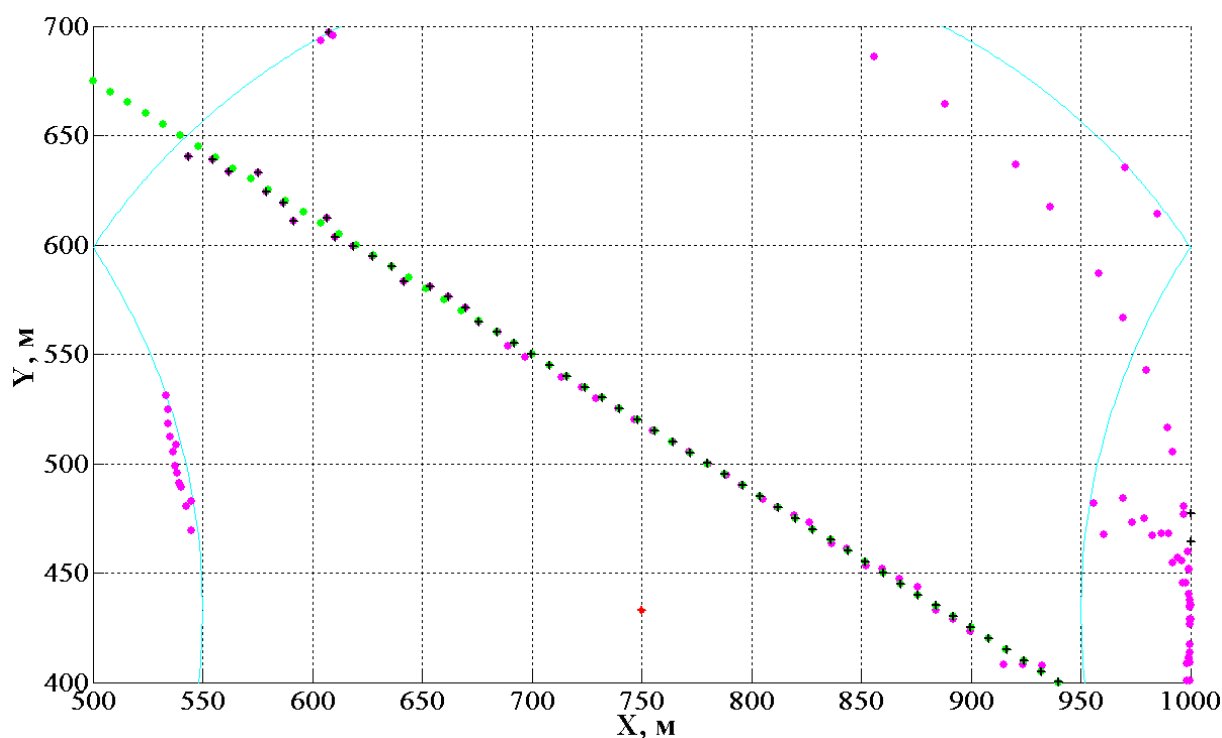


Рисунок 3.10. Эхо-сигналы, обнаруженные МСПН, и результат применения алгоритмов, реализующих методы идентификации и комплексирования.

На рисунке 3.10 малиновыми точками обозначены эхо-сигналы обнаруженные мультистатической системой, зелеными – истинная траектория движения цели, черными крестиками – результат идентификации и комплексирования (если оно возможно). На данном рисунке можно различить два случая: когда комплексирование проведено и когда нет. В случае невозможности

проведения комплексирования, идентифицированные цели, обозначенные черными крестиками, совпадают с эхо-сигналами, обнаруженными МСПН (малиновые точки). Если же комплексирование проведено, то идентифицированные цели, обозначенные черными крестиками, практически совпадают с зелеными точками (истинным местоположением цели). Также на данном рисунке можно увидеть несколько «ложных» целей.

Для количественной оценки эффективности алгоритма, реализующего метод комплексирования, построим путем моделирования зависимости средних ошибок оценки ТКЦ от точности определения параметров эхо-сигналов станциями системы. Так как точность оценки времен приема эхо-сигналов значительно превосходит точность оценки их направления, ограничимся построением указанной зависимости от ошибок оценки направлений приема эхо-сигналов. При этом мы предполагаем, что времена приема эхо-сигналов измерены точно. Полученные результаты представлены в таблице 3.3 и приведены на рисунке 3.11 в виде графиков.

Таблица 3.3. Зависимость ошибок оценки ТКЦ от СКО оценки направлений приема эхо-сигналов.

σ_φ , градусы	Средняя ошибка ТКЦ по одному эхо-сигналу, м	Средняя ошибка оценки ТКЦ при комплексировании, м
0.0	0.0	0.0
0.05	0.11	$3 \cdot 10^{-4}$
0.1	0.24	$7 \cdot 10^{-4}$
0.2	0.49	0.012
0.5	1.3	0.014
1.0	2.3	0.13
2.0	4.4	0.35

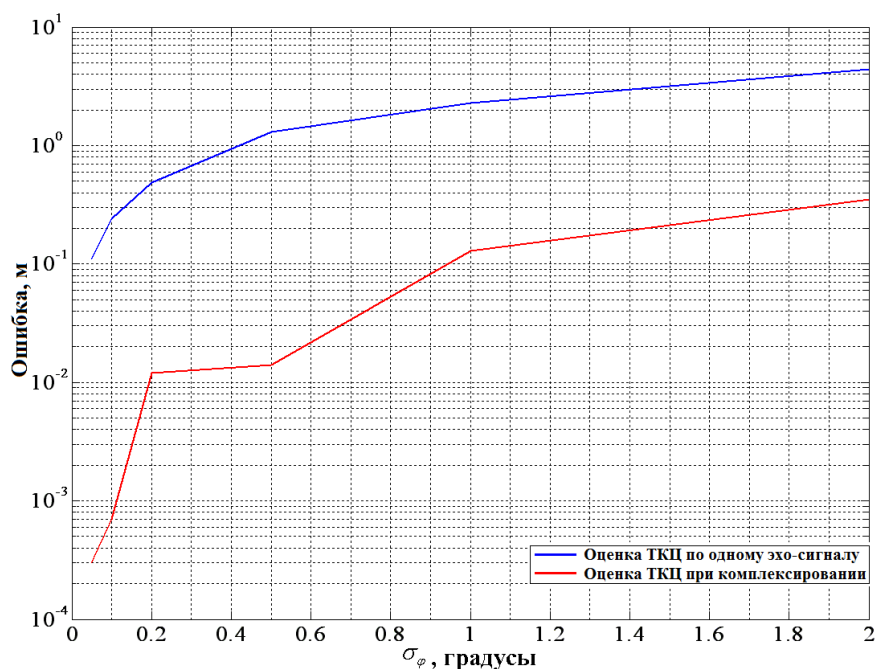


Рисунок 3.11. Средние ошибки при оценке ТКЦ по одному моностатическому эхо-сигналу (синяя кривая) и при комплексировании (красная кривая).

На рисунке 3.11 приведены графики зависимости средних ошибок оценки ТКЦ (в метрах) от СКО оценки направлений приема эхо-сигналов. Синяя кривая соответствует оценке ТКЦ по одному моностатическому эхо-сигналу, красная – использованию всех эхо-сигналов от этой цели, обнаруженных МСПН, т. е. комплексированию.

На основании графиков, приведенных на рисунке 3.11, а также результатов представленных в таблице 3.3, можно сделать следующие выводы:

- с ростом ошибок измерения углов растут ошибки оценки ТКЦ каждым из способов,
- точность оценки ТКЦ при комплексировании на порядок выше, точности достигаемой при использовании одного моностатического эхо-сигнала.

В алгоритмах, реализующих предлагаемые методы идентификации обнаруженных МСПН эхо-сигналов и комплексирования их параметров, количество целей находящихся в зоне обзора МСПН не используется. Следовательно, указанные алгоритмы можно применять при любом количестве целей без внесения каких-либо изменений.

Рассмотрим случай четырех целей со следующими параметрами движения:

цель 1: $x_{10} = 300$ м, $y_{10} = 800$ м;

$v_{1x} = 8$ м/с, $v_{1y} = -5$ м/с;

цель 2: $x_{20} = 805$ м, $y_{20} = 800$ м;

$v_{2x} = 3$ м/с, $v_{2y} = -5$ м/с;

цель 3: $x_{30} = 1500$ м, $y_{30} = 805$ м;

$v_{3x} = -5$ м/с, $v_{3y} = -5$ м/с;

цель 4: $x_{40} = 1500$ м, $y_{40} = 800$ м;

$v_{4x} = -4$ м/с, $v_{4y} = -5$ м/с.

Количество периодов обзора равно 250. Расположение ГЛС в акватории такое же, как и в предыдущем случае.

На рисунке 3.12 малиновыми точками приведены все эхо-сигналы, обнаруженные МСПН, при наличии в охраняемой акватории четырех целей с данными параметрами движения.

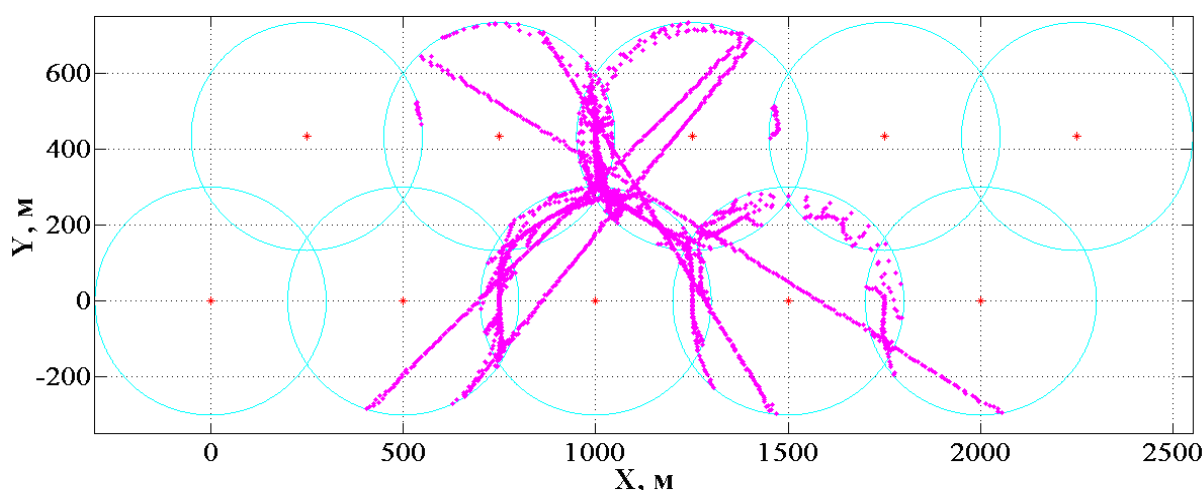


Рисунок 3.12. Все эхо-сигналы, обнаруженные МСПН за 250 периодов обзора.

Помимо моностатических эхо-сигналов, располагающихся вдоль прямых, соответствующих траекториям движения целей, на рисунке 3.12 присутствует множество бистатических эхо-сигналов, которые при отсутствии их корректной идентификации значительно усложняют дальнейший траекторный анализ.

На рисунке 3.13 черными точками представлен результат обработки обнаруженных МСПН эхо-сигналов, которые изображены на рисунке 3.12, с помощью алгоритмов, реализующих предлагаемые методы идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров.

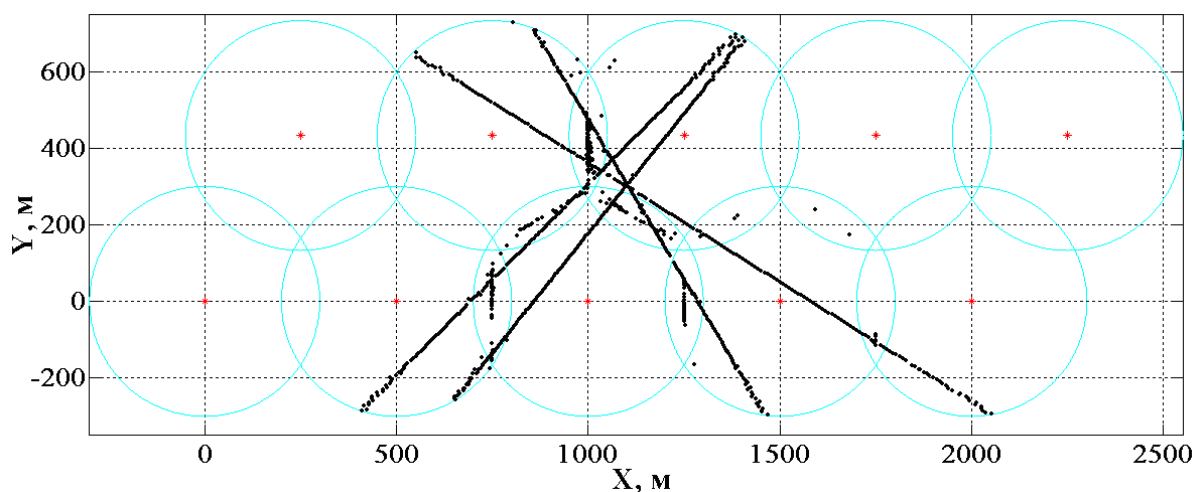


Рисунок 3.13. Результат идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров для случая 4 целей.

Из рисунка 3.13 видно, что значительно сократилось число отметок, которые не совпадают с траекториями движения целей, а отметки соответствующие целям располагаются ближе к истинным траекториям их движения.

На рисунке 3.14 представлена зависимость числа обнаруженных МСПН эхо-сигналов от номера периода обзора при заданных параметрах движения четырех целей.

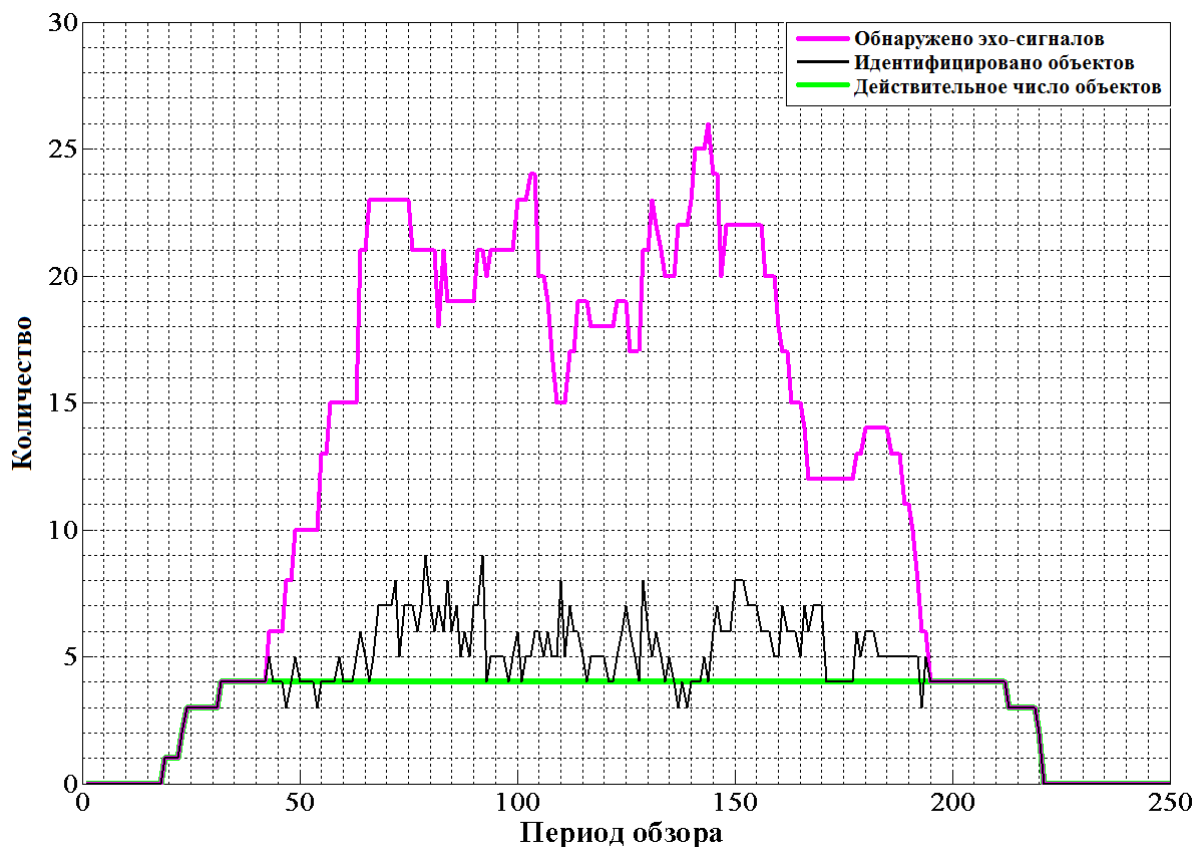


Рисунок 3.14. Зависимость числа обнаруженных МСПН эхо-сигналов от номера периода обзора.

На рисунке 3.14 малиновым цветом приведено количество эхо-сигналов, обнаруженных всеми ГЛС в составе МСПН, зеленым цветом обозначено количество целей, находящихся в зоне обзора МСПН, черным – число идентифицированных целей.

На рисунке 3.15 приведены графики зависимости ошибок оценки координат всех четырех целей от номера периода обзора.

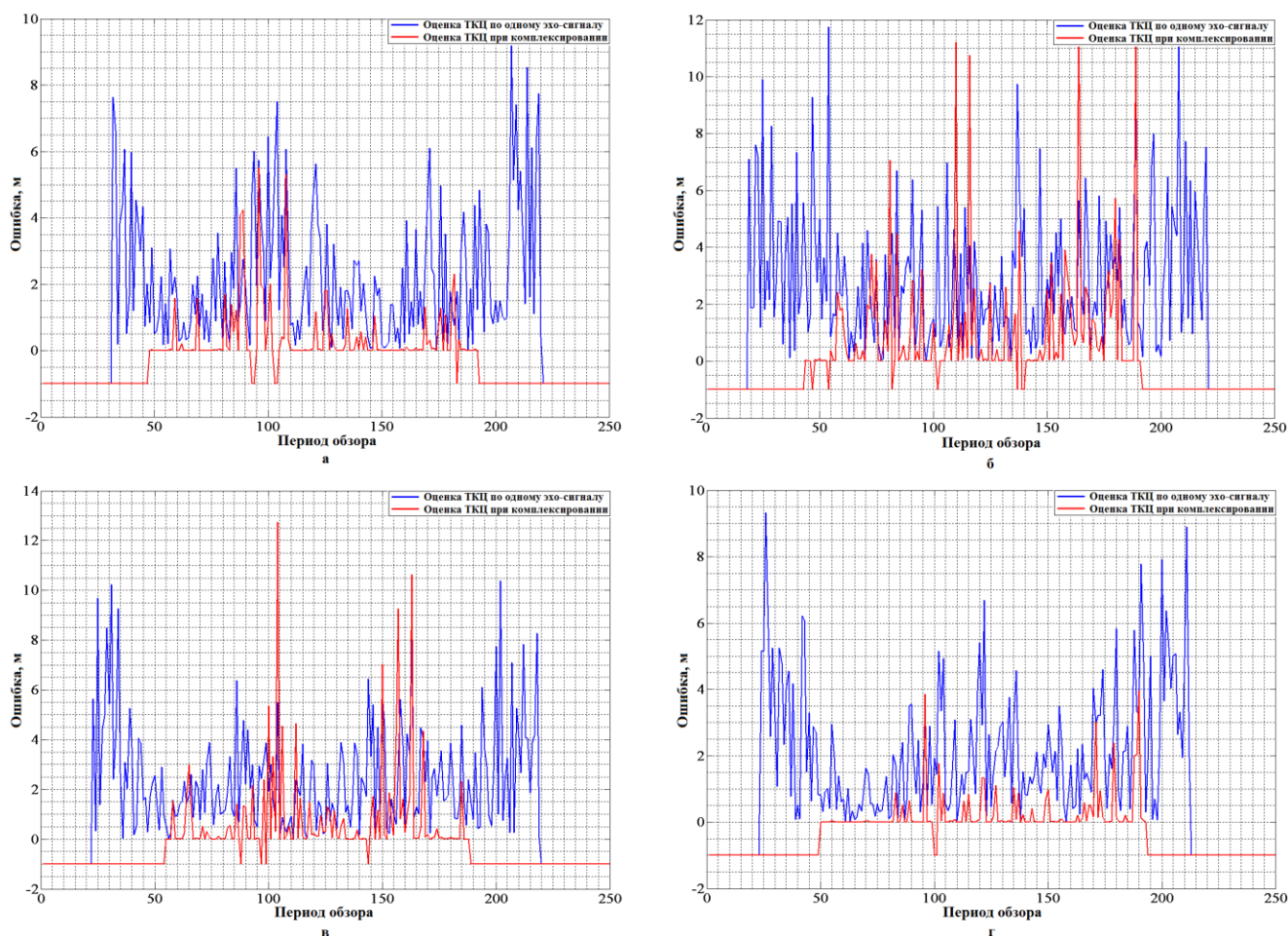


Рисунок 3.15. Ошибки оценки координат целей: цель 1 (а), цель 2 (б), цель 3 (в), цель 4 (г).

Графики, представленные на рис. 3.15, иллюстрируют зависимости ошибок оценки местоположения целей (в метрах) от номера периода обзора. Синий цвет соответствует ошибкам при определении местоположения цели по одному моностатическому эхо-сигналу, красный – ошибкам при комплексировании информации, содержащейся во всех эхо-сигналах соответствующих указанной цели. Значение минус единица для синих кривых означает, что во время текущего периода обзора в зоне обзора МСПН данная цель отсутствует. Для красных кривых минус единица означает, что комплексирование параметров для данной цели провести невозможно. Из приведенных графиков видно, что за исключением нескольких случаев в результате работы алгоритма, реализующего предложенный метод комплексирования, точность оценки ТКЦ возрастает.

3.4. Практическое применение разработанных методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров

Работоспособность предлагаемых методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров была также проверена при испытаниях МСПН, состоящей из двух ГЛС, в натуральных условиях (Иваньковское вдхр., Московская обл.). Испытания проводились с опытными образцами ГЛС, в рамках работ по СЧ ОКР «Аргонавт-НЦВИ».

Полученные результаты представлены на рисунках 3.16 и 3.17.

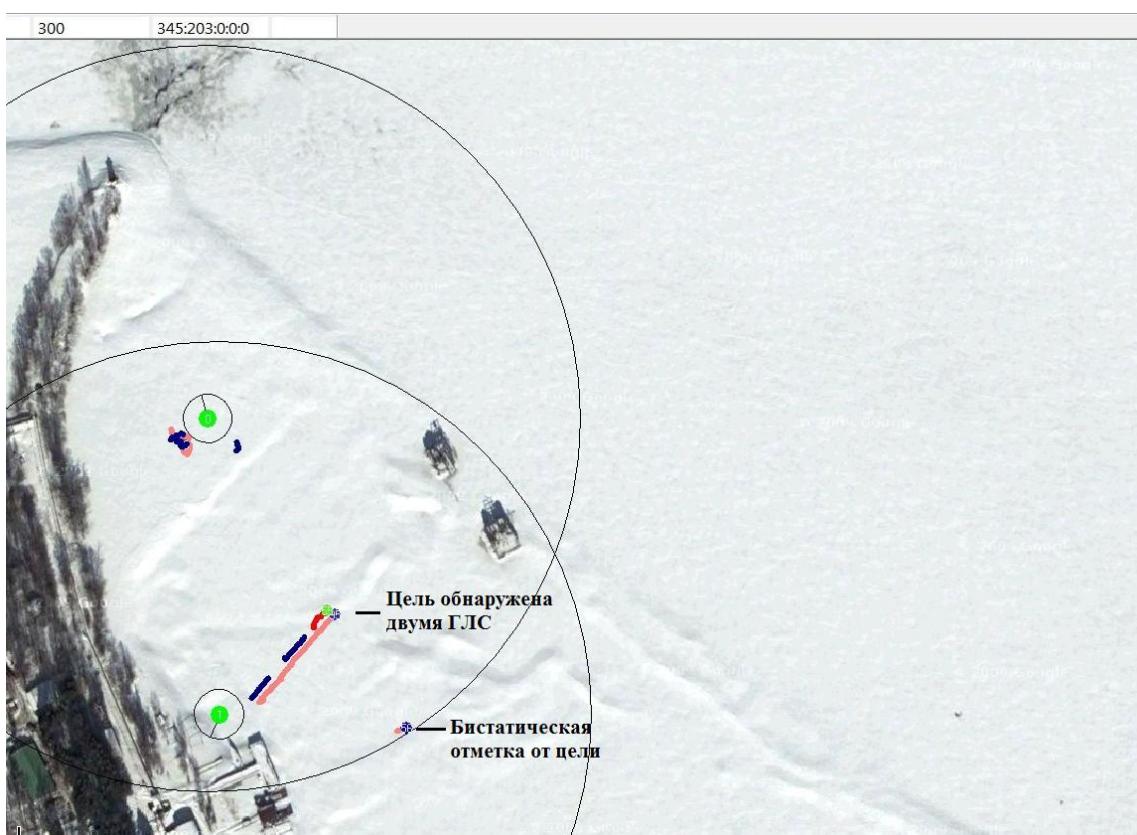


Рисунок 3.16. Снимок экрана оператора МСПН (МСПН функционирует без применения алгоритмов идентификации и комплексирования).

На рисунке 3.16 приведен снимок экрана оператора МСПН при функционировании МСПН без применения алгоритмов, реализующих методы идентификации целей и комплексирования их параметров. На указанном рисунке видно, что объект, движущийся в месте перекрытия зон обзора двух ГЛС, обнаруживается как две разных цели. Также на данном рисунке наблюдается

траектория, соответствующая бистатическому эхо-сигналу, обнаруженному ГЛС, расположенной выше (севернее).

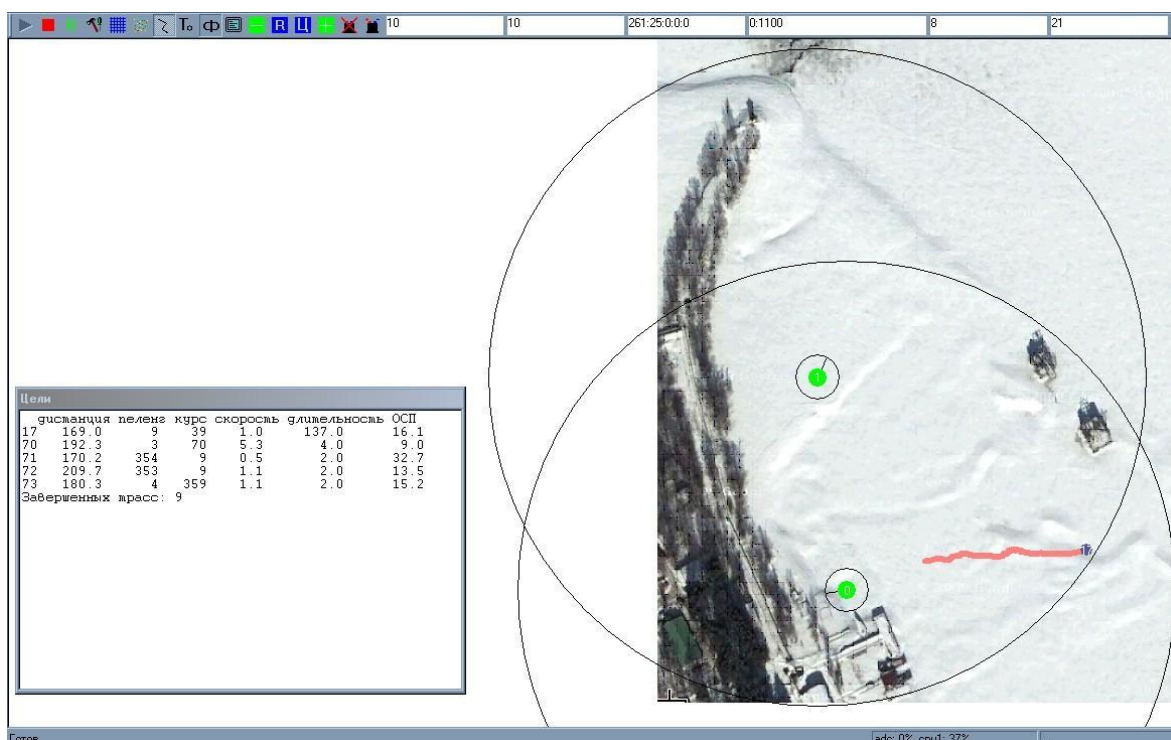


Рисунок 3.17. Снимок экрана оператора МСРН (МСРН функционирует, применяя алгоритмы идентификации и комплексирования).

На рисунке 3.17 приведен снимок экрана оператора МСРН при функционировании МСРН с использованием алгоритмов, реализующих методы идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров. В этом режиме объект, движущийся в месте перекрытия зон обзора двух ГЛС, обнаруживается как одна цель, траектории, соответствующие бистатическому эхо-сигналу, не отображаются.

Следует отметить, что на рисунках 3.16 и 3.17 изображены результаты для двух различных галсов при буксировке подводного объекта, которые выполнялись в один день. Оба результата получены в рамках сдаточных испытаний МСРН с целью проверки ее эффективности при функционировании в режиме комплексирования информации, поступающей со всех ГЛС. МСРН была установлена в конфигурации соответствующей условиям эксплуатации. По этой причине отсутствовала возможность сохранения исходных данных для их последующей обработки с применением различных алгоритмов. В соответствии с

программой и методикой указанных испытаний первый галс (рисунок 3.16) выполнялся для подтверждения того, что объект обнаруживается двумя ГЛС, а второй галс (рисунок 3.17) выполнялся непосредственно с целью проверки режима комплексирования.

3.5. Выводы

1 Корректное и достаточно точное разделение обнаруживаемых эхо-сигналов от малоразмерных подводных движущихся целей, при функционировании МСПН, на моностатические и бистатические позволяет:

1.1 провести идентификацию целей, то есть дает возможность определить количество малоразмерных целей в составе групп, из практически одинаковых подводных целей;

1.2 выделить и различать в группах цели, имеющие практически одинаковую эффективную площадь рассеяния;

1.3 различить и передавать на трассовый анализ только одну отметку от каждой цели, что увеличит его быстродействие и эффективность.

2. При применении алгоритма, реализующего разработанные методы идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров, существенно возрастает точность выдачи целеуказания и уменьшается СКО в определении дальности и координат подводных целей, по сравнению с классическим (моностатическим) методом определения текущих координат цели.

3. Малые вычислительные затраты и простота реализации предлагаемых алгоритмов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров позволяют применять их без существенного увеличения стоимости вычислительного комплекса берегового поста наблюдения.

4. Позиционирование гидролокационных станций в мультистатической системе подводного наблюдения

4.1. Взаимное позиционирование гидролокационных станций в составе мультистатической системы подводного наблюдения

В случае, когда ГЛС в составе МСПН применяются без жесткой постановочной конструкции и вследствие чего могут перемещаться в пределах некоторого расстояния, определяемого расстоянием, заданным длиной удерживающего троса, возникает необходимость решения задачи позиционирования ГЛС, то есть повышения точности оценки текущего местоположения ГЛС и его ориентации. На рисунке 4.1 приведен один из вариантов такой МСПН [152].

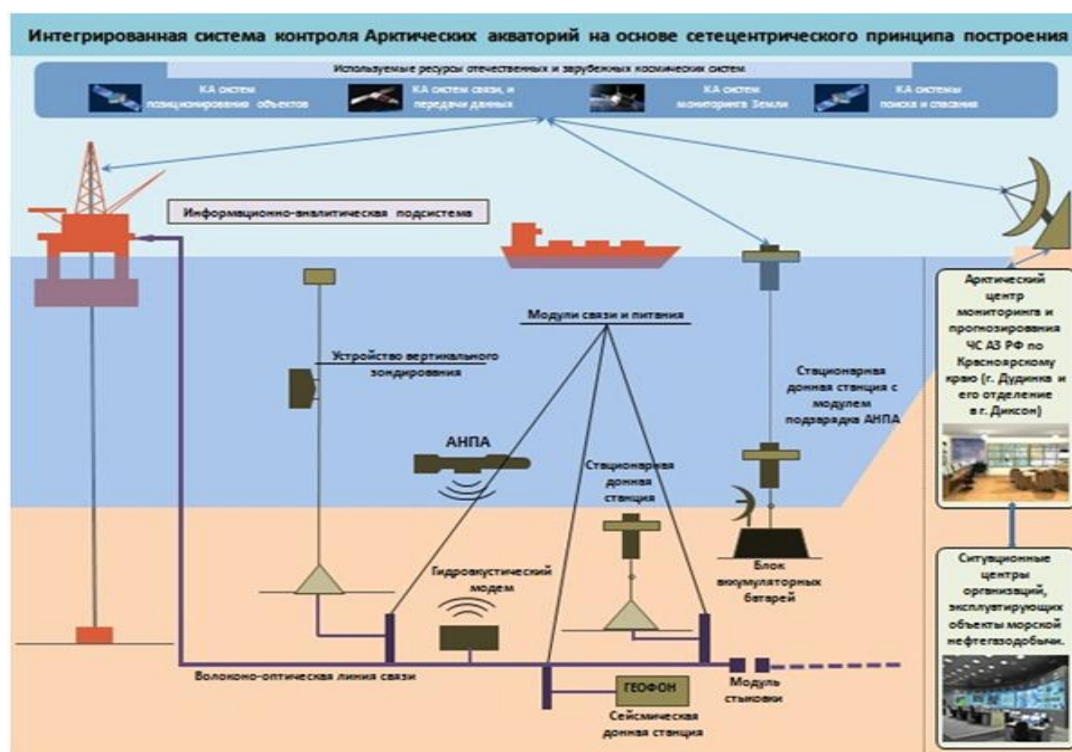


Рисунок 4.1. Вариант МСПН.

Знание точного пространственного расположения каждой из ГЛС необходимо для корректного определения текущих координат целей, а также для возможности проведения идентификации отметок с последующим комплексированием их параметров.

4.1.1. Взаимное позиционирование гидролокационных станций по излучаемым ими сигналам в однородной среде

Пусть в точках с координатами \mathbf{x} расположено M ГЛС (индексы S и R обозначают излучающую и принимающую станцию соответственно), излучающих один и тот же сигнал $f(t)$ в моменты времени t_S . Будем считать, что каждая ГЛС излучает и принимает сигналы ненаправленно. Таким образом, сигнал, зарегистрированный R -ой станцией ($R = 1, \dots, M$), будет иметь вид:

$$p_R(t) = n_R(t) + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq R}}^M A_{RS} f\left(t - t_S - \frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c}\right), \quad (4.1)$$

где $n_R(t)$ – помеха, которую мы будем считать некоррелированной между ГЛС, со спектральной плотностью $\eta_R(\omega)$;

A_{RS} – амплитуда сигнала излученного S -ой станцией в месте расположения R -ой ГЛС ($S = 1, \dots, M$);

c – скорость звука.

Выражение (4.1) в частотной области:

$$P_R(\omega_n) = \eta_R(\omega_n) + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq R}}^M Z_{RS} \exp\left(i\omega_n\left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S\right)\right) S(\omega_n), \quad (4.2)$$

где $S(\omega_n)$ – спектр излучаемого сигнала $f(t)$,

Z_{RS} – комплексная амплитуда сигнала излученного S -ой станцией и принятого R -ой.

Логарифм плотности вероятности измерения всех ГЛС в составе МСПН в частотной области будет пропорционален следующей величине:

$$\begin{aligned} L &= -\sum_{R=1}^M \sum_{\omega_n} \left| P_R(\omega_n) - \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq R}}^M Z_{RS} \exp\left(i\omega_n\left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S\right)\right) S(\omega_n) \right|^2 = \\ &= -\sum_{\omega_n} \left\{ \sum_{R=1}^M |P_R(\omega_n)|^2 - 2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M P_R(\omega_n) Z_{RS}^* \exp\left(-i\omega_n\left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S\right)\right) S^*(\omega_n) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{R=1}^M \sum_{\substack{S,S'=1 \\ S',S' \neq R}}^M Z_{RS}^* Z_{RS'} \exp\left(i\omega_n\left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\| - \|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_{S'}\|}{c} + (t_S - t_{S'})\right)\right) |S(\omega_n)|^2 \right\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Обозначим взаимнокорреляционную функцию (ВКФ) измерения R -ой ГЛС с эталонным сигналом:

$$q_R(t) = \sum_{\omega_n} P_R(\omega_n) \exp(-i\omega_n t) S^*(\omega_n), \quad (4.4)$$

а автокорреляционную функцию (АКФ) эталонного сигнала:

$$R_0(t) = \sum_{\omega_n} \exp(-i\omega_n t) |S(\omega_n)|^2. \quad (4.5)$$

Учитывая введенные обозначения и оставляя члены, зависящие от координат ГЛС, получим:

$$L \sim 2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M Z_{RS}^* q_R \left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} - t_S \right) - \sum_{R=1}^M \sum_{\substack{S,S'=1 \\ S,S' \neq R}}^M Z_{RS}^* Z_{RS'} R_0 \left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\| - \|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_{S'}\|}{c} + (t_S - t_{S'}) \right) \quad (4.6)$$

Предположим, что времена приема в R -ой ГЛС сигналов от S -ой и S' -ой ГЛС различаются более чем на интервал корреляции эталонного сигнала, тогда:

$$L \sim 2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M Z_{RS}^* q_R \left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S \right) - \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M |Z_{RS}|^2. \quad (4.7)$$

Из данного выражения методом максимального правдоподобия получаем оценки комплексных амплитуд \hat{Z}_{RS} :

$$\hat{Z}_{RS} = q_R \left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S \right). \quad (4.8)$$

Подставляя оценки амплитуд (4.8) в выражение (4.7) получим:

$$L \sim \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M \left| q_R \left(\frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S \right) \right|^2. \quad (4.9)$$

Каждая функция $q_R(t)$ должна иметь $M - 1$ максимумов соответствующих временам приема сигналов от других ГЛС. Обозначим эти времена \hat{t}_{RS} . Тогда, раскладывая функции $q_R(t)$ в ряд Тейлора вокруг точек \hat{t}_{RS} и ограничиваясь только квадратичным членом, получаем:

$$T \approx \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M i_{RS} \left(\hat{t}_{RS} - \frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S \right)^2, \quad (4.10)$$

где $i_{RS} = \frac{\partial^2 q_R(t)}{\partial t^2} \Big|_{t=\hat{t}_{RS}}$ характеризует точность оценки времен приема сигналов.

Минимизируя выражение (4.10) по координатам, получим их оценки. Данное выражение целесообразно минимизировать численно в $3M$ -мерном пространстве. Задача оценки координат решается неоднозначно с точностью до трансляции и поворота всей МСПН как целого. Для определенности мы можем за начало координат взять координаты ГЛС №1, а угол отсчитывать от направления от ГЛС №1 на ГЛС №2.

Точность оценки координат при взаимном позиционировании можно определить из информационной матрицы Фишера [151]. В нашем случае она будет иметь следующую структуру:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{11} & \cdot & \mathbf{I}_{1j} & \cdot & \mathbf{I}_{1M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{I}_{i1} & \cdot & \mathbf{I}_{ij} & \cdot & \mathbf{I}_{iM} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{I}_{iM} & \cdot & \mathbf{I}_{Mj} & \cdot & \mathbf{I}_{MM} \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Матрица \mathbf{I} – матрица размерности $3M \times 3M$ элементов (M – число ГЛС в составе МСПН), имеющая блочную структуру. Блоки \mathbf{I}_{ij} являются матрицами размером 3×3 следующего вида:

$$\mathbf{I}_{ij} = \begin{bmatrix} J_{x_i x_j} & J_{x_i y_j} & J_{x_i \varphi_j} \\ J_{y_i x_j} & J_{y_i y_j} & J_{y_i \varphi_j} \\ J_{\varphi_i x_j} & J_{\varphi_i y_j} & J_{\varphi_i \varphi_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{x_i x_j} & \mathbf{J}_{x_i \varphi_j} \\ \mathbf{J}_{\varphi_i x_j} & \mathbf{J}_{\varphi_i \varphi_j} \end{bmatrix}, \quad (4.12a)$$

Найдем выражения для указанных блоков. По определению:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{x_i x_j} &= \mathbf{E} \left\{ \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}_i} \cdot \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}_j} \right\}, \\ \mathbf{J}_{x_i \varphi_j} &= \mathbf{E} \left\{ \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}_i} \cdot \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial (\delta \varphi_j)} \right\}, \\ \mathbf{J}_{\varphi_i \varphi_j} &= \mathbf{E} \left\{ \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial (\delta \varphi_i)} \cdot \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial (\delta \varphi_j)} \right\}, \end{aligned} \quad (4.12б)$$

где символ \mathbf{E} обозначает вычисление математического ожидания;

\mathbf{L} – логарифм плотности вероятности измерения;

\mathbf{x}_i – координаты i -ой станции;

$\delta\varphi_i$ – поворот i -ой станции.

Полагаем, что ошибки измерения ГЛС времен и направлений приема сигналов распределены по нормальному закону. Тогда логарифм плотности вероятности имеет вид:

$$\mathbf{L} = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M \left\{ -\ln(2\pi\sigma_{(t)ij}\sigma_{(\varphi)ij}) - \frac{1}{2\sigma_{(t)ij}^2} \left[\hat{t}_{ij} - \frac{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|}{c} - (t_j - t_i) \right]^2 - \frac{1}{2\sigma_{(\varphi)ij}^2} \left[\hat{\varphi}_{ij} - \arctg\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) - \delta\varphi_i \right]^2 \right\}, \quad (4.13)$$

где $\sigma_{(t)}$ и $\sigma_{(\varphi)}$ – СКО измерений времен и углов соответственно;

$\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ – координаты i -ой ГЛС;

\hat{t}_{ij} – измеренное время приема ЗС от i -ой ГЛС j -ой ГЛС;

t_i – момент излучения i -ой ГЛС;

$\hat{\varphi}_{ij}$ – направление на j -ую ГЛС, измеренное i -ой ГЛС;

$\delta\varphi_i$ – поворот i -ой ГЛС;

$i, j = 1..M$ – номера ГЛС в МСПН.

Производные выражения (4.14):

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}_j} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \left\{ \frac{1}{c\sigma_{(t)ij}^2} \left[\hat{t}_{ij} - \frac{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|}{c} - (t_j - t_i) \right] \mathbf{e}_{ij} + \frac{1}{\sigma_{(\varphi)ij}^2} \left[\hat{\varphi}_{ij} - \arctg\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) - \delta\varphi_i \right] \frac{\mathbf{n}_{ij}}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|} \right\}, \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial (\delta\varphi_j)} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \left\{ \frac{1}{\sigma_{(\varphi)ij}^2} \left[\hat{\varphi}_{ij} - \arctg\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) - \delta\varphi_j \right] \right\},$$

где \mathbf{e}_{ij} – единичный вектор, направленный из i -ой ГЛС на j -ую,

\mathbf{n}_{ij} – единичный вектор нормальный к направлению \mathbf{e}_{ij} .

Подставляя производные (4.14) в выражения (4.12) и вычисляя математическое ожидание, получим:

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_{x_i x_j} &= \begin{cases} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M \left\{ \frac{\mathbf{e}_{ki} \mathbf{e}_{ki}^T}{c^2 \sigma_{(i)ki}^2} + \frac{\mathbf{n}_{ki} \mathbf{n}_{ki}^T}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|^2 \sigma_{(\varphi)ki}^2} \right\}, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \\
\mathbf{J}_{x_i \varphi_j} &= \begin{cases} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M \frac{\mathbf{n}_{ki}}{\sigma_{(\varphi)ki}^2 \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|}, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \\
\mathbf{J}_{\varphi_i \varphi_j} &= \begin{cases} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M \frac{1}{\sigma_{(\varphi)ik}^2}, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

В среде Matlab была написана программа для вычисления точности взаимного позиционирования при различном взаимном расположении ГЛС в МСПН. В целях упрощения расчетов СКО измерения времен прихода сигналов полагаем одинаковым и равным 0.1 мс. СКО ошибок измерения направления приходов сигнала также считалось одинаковым.

Расчеты были выполнены для нескольких вариантов расположения ГЛС в структуре МСПН.

На рисунках 4.2 (а, б и в) представлены варианты расположения ГЛС в МСПН, для которых рассчитаны точности оценок координат ГЛС при взаимном позиционировании. Красными точками на данных рисунках обозначено положение ГЛС в МСПН, голубыми окружностями – их зоны обзора.

На рисунках 4.3 – 4.6 приведены результаты расчетов для соответствующих конфигураций МСПН.

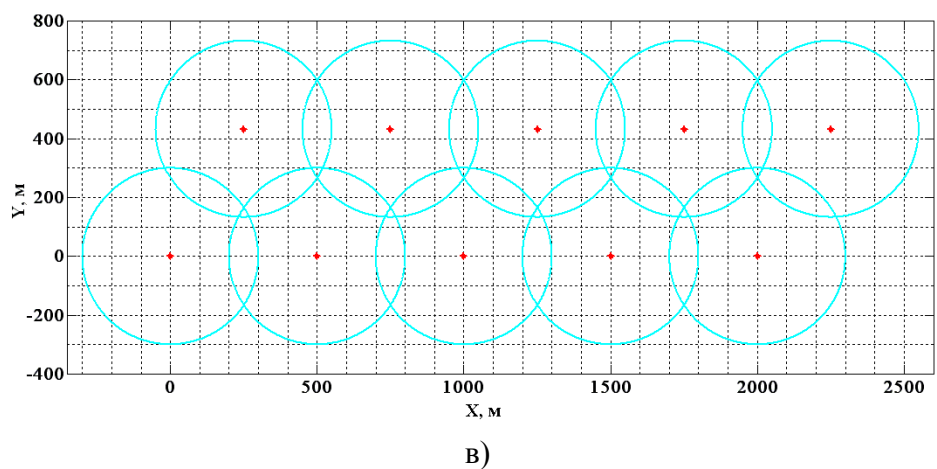
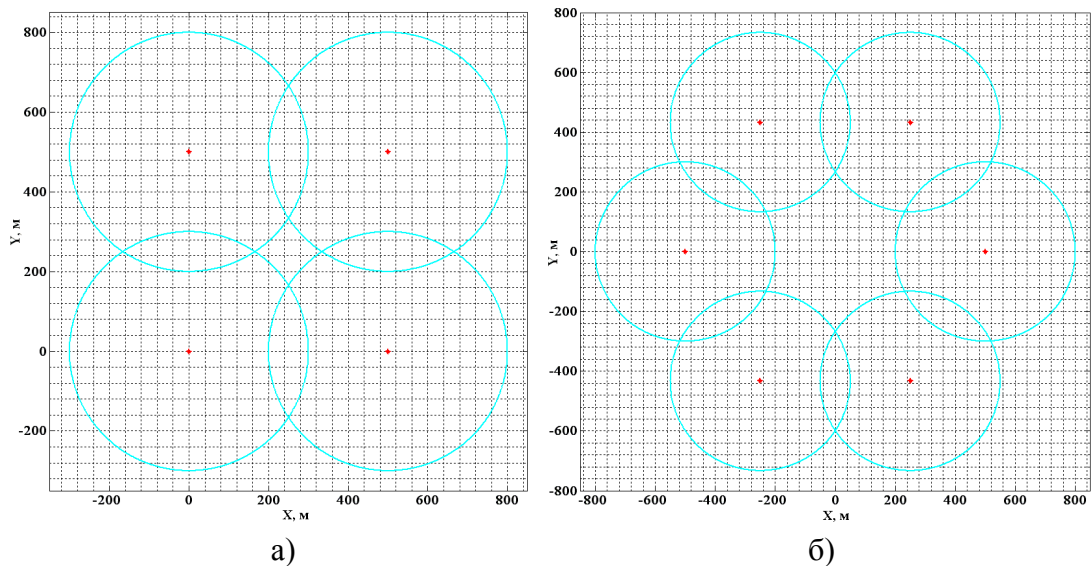


Рисунок 4.2. Варианты расположения ГЛС в МСПН:

а) квадрат; б) шестиугольник; в) двойной барьер.

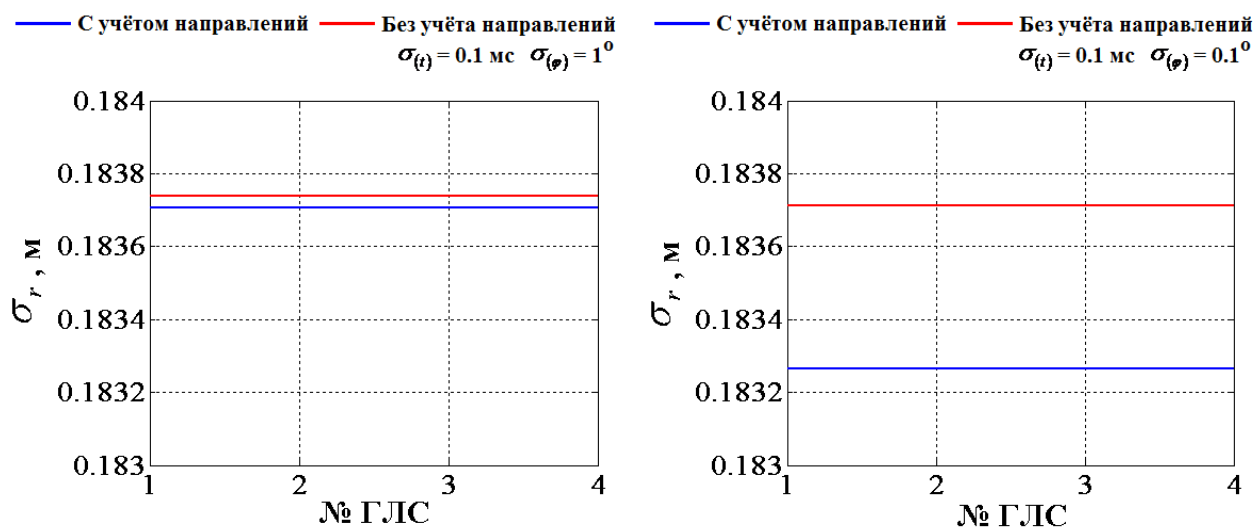


Рисунок 4.3. СКО ошибок определения относительных координат станций, расположенных в вершинах квадрата со стороной равной 500 м (рисунок 4.2а).

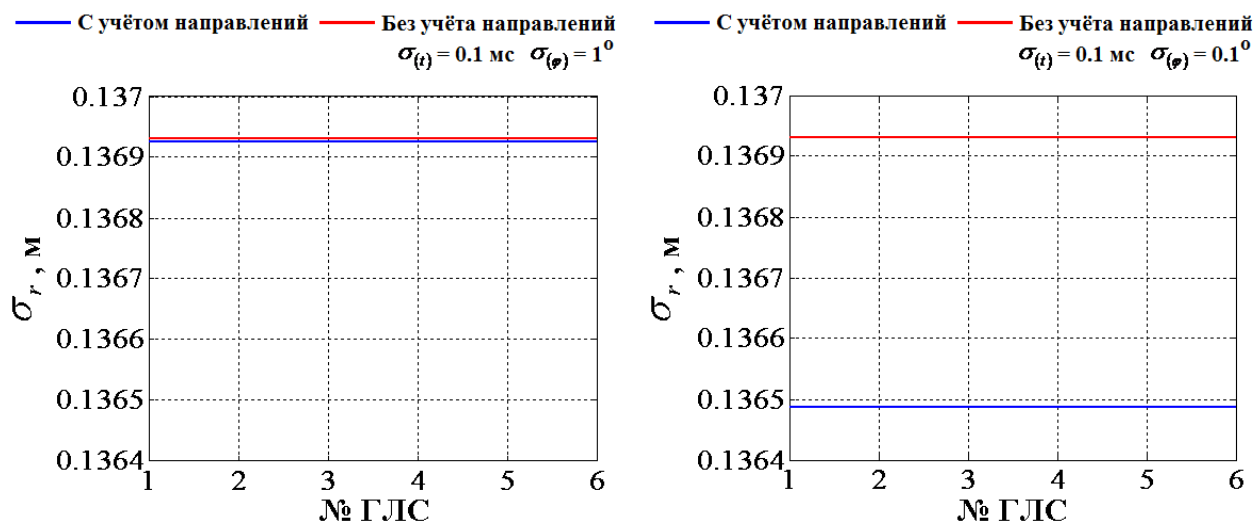


Рисунок 4.4. СКО ошибок определения относительных координат станций, расположенных в вершинах правильного шестиугольника со стороной равной 500 м (рисунок 4.2б).

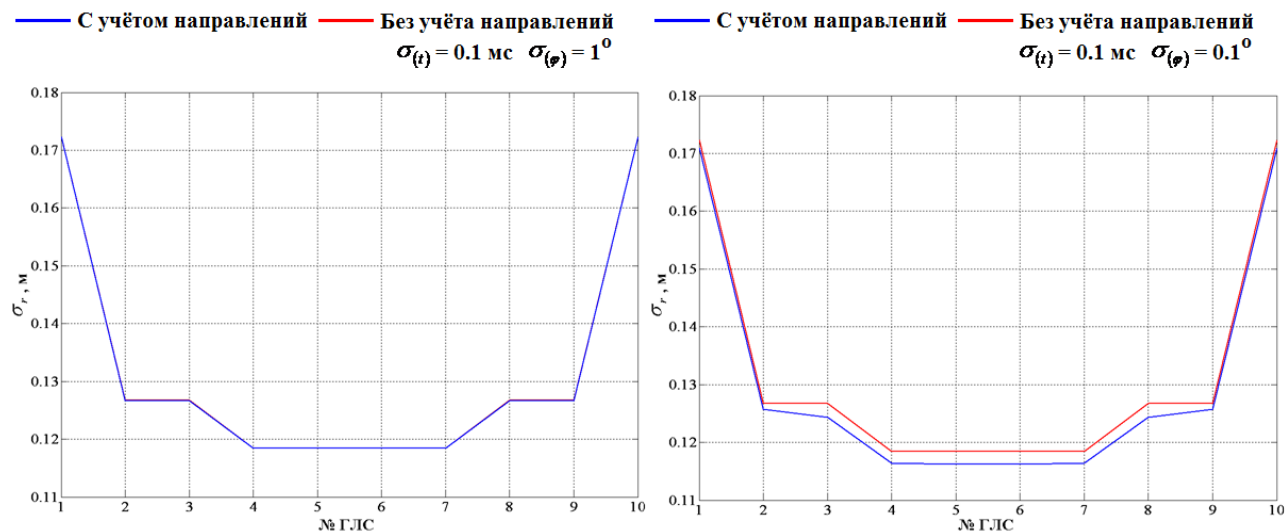


Рисунок 4.5. СКО ошибок определения относительных координат станций расположенных в виде двойного барьера (рисунок 4.2в).

На рисунках 4.3 – 4.5 приведены значения СКО оценки смещения относительно изначальной позиции для каждой ГЛС при позиционировании в однородной среде. Синими кривыми изображены СКО, полученные при использовании всей информации, содержащейся в измерениях, в том числе и в углах приема сигналов. Красные кривые получены при пренебрежении вторым слагаемым в выражении для $\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}_j}$ (4.14), т.е. без учета информации, содержащейся в углах прихода сигналов. На рисунках слева СКО оценок направлений приема

сигналов равно 1 градусу, справа – 0.1 градуса. Из представленных рисунков видно, что учет информации, содержащейся в углах приема сигналов, увеличивает точность позиционирования несущественно, даже при весьма высокой точности их измерения.

На рисунке 4.6 приведены значения СКО ошибок оценки координат каждой станции при позиционировании в однородной среде, полученные при различных ошибках измерения времен приема сигналов.

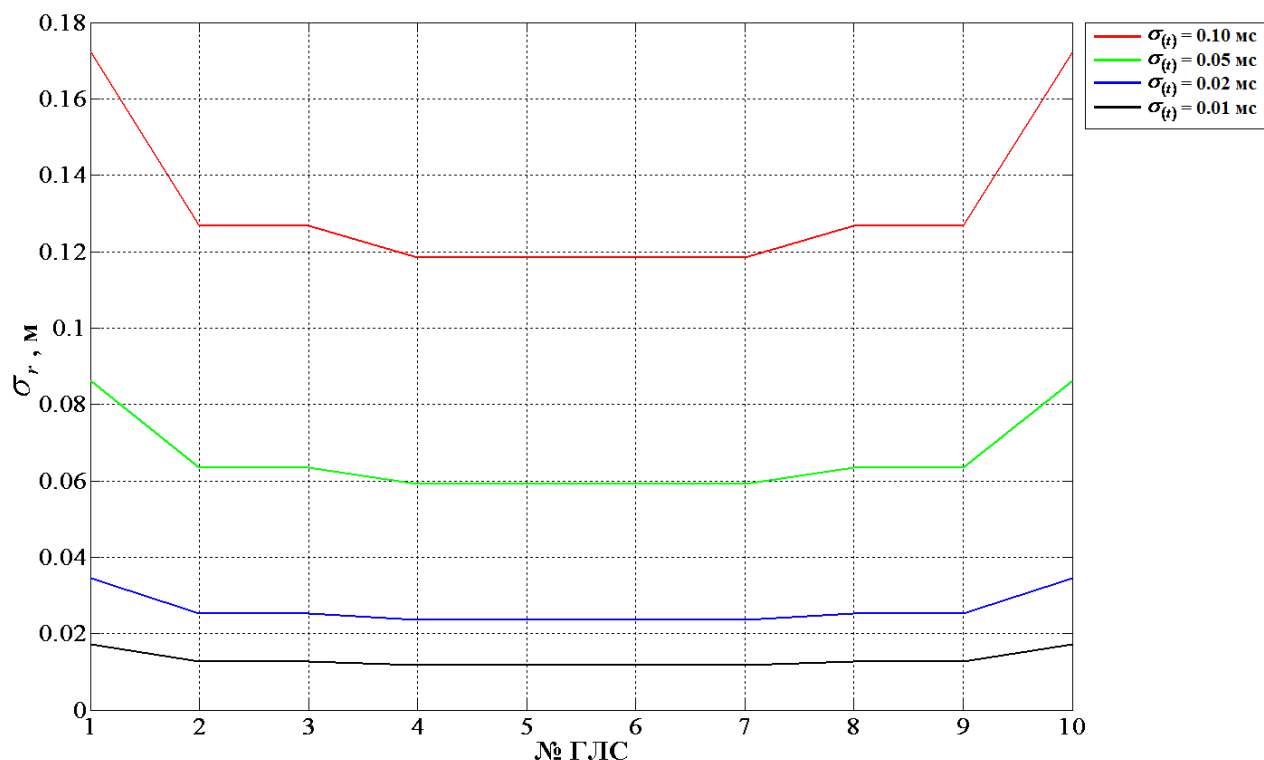


Рисунок 4.6. СКО оценки относительных координат ГЛС расположенных в виде двойного барьера (рисунок 4.2в), при различной точности оценки времен приема сигналов.

Красный цвет на рисунке 4.6 соответствует СКО равной 100 мкс, зеленый – 50 мкс, синий – 20 мкс и черный – 10 мкс. Графики строились без учета информации содержащейся в углах прихода сигналов. Из рисунка 4.6 видно, что точность позиционирования сильно зависит от точности измерения времен приема сигналов, в то время как от точности измерения направлений прихода сигналов (рисунки 4.3 – 4.5) она зависит несущественно.

4.1.2. Взаимное позиционирование гидролокационных станций в неоднородном морском волноводе с применением системы гидроакустических расчетов

В морском волноводе за счет рефракции и отражения от границ каждую пару корреспондирующих точек соединяют несколько лучей. Пусть всеми ГЛС излучается сигнал $f(t)$ с комплексным спектром $S(\omega)$. В этом случае принимаемый R -ой станцией сигнал будет иметь вид [59]:

$$p_R(t) = n(t) + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} A_{RS\mu}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) f(t - t_S - t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)), \quad (4.16)$$

где $R, S = 1..M$ – номера ГЛС в МСПН;

N_{RS} – количество лучей соединяющих S -ую и R -ую ГЛС;

$A_{RS\mu}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)$ – амплитуда сигнала, пришедшего из S -ой и R -ую ГЛС по μ -му лучу ($\mu = 1..N_{RS}$);

$t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)$ – время распространения сигнала из S -ой и R -ую ГЛС по μ -му лучу;

t_S – момент излучения S -ой ГЛС.

Выражение (4.16) в частотной области:

$$P_R(\omega_n) = \eta_R(\omega_n) + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} Z_{RS\mu} \exp(i\omega_n(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))) S(\omega_n), \quad (4.17)$$

где $Z_{RS\mu}$ – комплексная амплитуда сигнала, пришедшего из S -ой и R -ую ГЛС по μ -му лучу.

Логарифм плотности вероятности измерения всех ГЛС в составе МСПН в частотной области будет пропорционален следующей величине:

$$L \sim - \sum_{R=1}^M \sum_{\omega} \left| P_R(\omega) - \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} Z_{RS\mu} \cdot e^{i\omega(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))} \cdot S(\omega) \right|^2. \quad (4.18)$$

Раскрывая квадрат модуля, получим:

$$\begin{aligned}
L \sim & - \sum_{R=1}^M \sum_{\omega} |P_R(\omega)|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} \sum_{\omega} P_R(\omega) \cdot Z_{RS\mu}^* \cdot e^{-i\omega(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))} \cdot S^*(\omega) - \\
& - \sum_{\substack{R,S,S'=1 \\ S,S' \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} \sum_{\mu'=1}^{N_{RS'}} \sum_{\omega} Z_{RS\mu}^* \cdot Z_{RS'\mu'} \cdot e^{i\omega(t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) - t_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_{S'}) + t_S - t_{S'})} \cdot |S(\omega)|^2
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Учитывая введенные ранее обозначения (4.4 и 4.5) и оставляя члены, зависящие от координат ГЛС, получим:

$$\begin{aligned}
L \sim & 2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} Z_{RS\mu}^* \cdot q_R(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)) - \\
& - \sum_{\substack{R,S,S'=1 \\ S,S' \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} \sum_{\mu'=1}^{N_{RS'}} Z_{RS\mu}^* \cdot Z_{RS'\mu'} \cdot R_0((t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) - t_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_{S'}) + t_S - t_{S'}))
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Предположим, что времена приема в R -ой ГЛС сигналов от S -ой и S' -ой ГЛС различаются более чем на интервал корреляции эталонного сигнала, тогда:

$$L \sim 2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} Z_{RS\mu}^* \cdot q_R(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)) - \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} |Z_{RS\mu}|^2. \tag{4.21}$$

Из данного выражения методом максимального правдоподобия получаем оценки комплексных амплитуд \hat{Z}_{RS} :

$$\hat{Z}_{RS,\mu} = q_R(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)). \tag{4.22}$$

Подставляя оценки амплитуд (4.22) в выражение (4.21) получим:

$$L \sim \sum_{\substack{R,S=1 \\ S \neq R}}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} |q_R(t_S + t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))|^2. \tag{4.23}$$

Пусть на выходе первичной обработки R -ой ГЛС в составе МСПН корреляционные пики можно разбить на $M-1$ группу. Каждая из этих групп соответствует сигналам, пришедшим на R -ую ГЛС от S -ой по различным лучам. Обозначим времена приема данных сигналов $\hat{t}_{RS\mu}$. Затем, раскладывая функции $q_R(t)$ в ряд Тейлора вокруг точек $\hat{t}_{RS\mu}$ и ограничиваясь только квадратичным членом, получаем следующее выражение:

$$H = \sum_{R \neq S=1}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} i_{RS\mu} (\hat{t}_{RS\mu} - t_S - t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))^2, \tag{4.24}$$

где $i_{RS\mu} = \left. \frac{\partial^2 q_R(t)}{\partial t^2} \right|_{t=\hat{t}_{RS\mu}}$ характеризует точность оценки времен приема сигналов.

Минимизировав выражение (4.24) по координатам, получим их оценки.

Минимизация данного выражения выполняется численно. Время распространения сигналов вдоль различных лучей из точки с координатами \mathbf{x}_S в точку \mathbf{x}_R вычисляется с помощью программного обеспечения, выполняющего расчет функции Грина морского волновода для любых пар корреспондирующих точек [153] с учетом известного (измеренного) ВРСЗ [45].

Точностные характеристики $i_{RS\mu}$ определяются как точностью оценки времени приема сигнала $\hat{t}_{RS\mu}$, так и точностью прогноза времени распространения $t_\mu(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)$. Точность оценки времени приема сигналов пропорциональна ОСП и полосе излученного сигнала, точность же прогноза определяется тем, насколько точно известны условия распространения. При использовании сложных зондирующих сигналов, точность оценки выше точности прогноза. С учетом того, что суммируются обратные величины, итоговая точность, в основном, определяется точностью прогноза.

В данном случае горизонтальные координаты ГЛС также оцениваются с точностью до трансляции и поворота всей МСПН в горизонтальной плоскости как целого.

В выражении (4.24) фигурирует абсолютное время. Таким образом, минимизацию указанного выражения можно провести лишь в случае, когда нам известны моменты излучения сигналов всеми ГЛС. Однако, если моменты излучения сигналов всеми ГЛС априорно неизвестны, то в выражении (4.24) время следует отсчитывать от самого быстрого луча, как в измерениях, так и в модели [154].

Точностные характеристики оценки относительных координат ГЛС в мультистатической системе определяются информационной матрицей Фишера (4.12а), блоки которой вычисляются в соответствии со следующим выражением:

$$\mathbf{J}_{R,S}^{ij} = \sum_{\mu} i_{R,S,\mu} \varepsilon_{\mu}^i \varepsilon_{\mu}^j, \quad (4.25)$$

где вектор ε_μ^i определяется выражением

$$\varepsilon_\mu^i = \left(\frac{\cos \chi_R^{(\mu)}}{c_R}, \frac{\sin \chi_R^{(\mu)}}{c_R}, -\frac{\sin \chi_S^{(\mu)}}{c_S} \right), \quad (4.26)$$

где $\chi_{R,S}^{(\mu)}$ – угол скольжения μ -го луча в R -ой или в S -ой ГЛС соответственно,
 $c_{R,S}$ – скорость звука на горизонтах R -ой и в S -ой ГЛС соответственно.

4.2. Оценка координат источника звука, основанная на согласовании с морским волноводом разностей времен распространения сигналов по различным лучам

Даже на таких небольших расстояниях, как сотни метров, точки излучения и приема соединяет несколько лучей [155]. Зная ВРСЗ, можно, используя измеренные значения параметров указанных лучей, определить координаты источника акустического сигнала.

4.2.1. Математическое описание метода согласованной с морским волноводом обработки сигналов

Пусть на расстоянии r от приемника и на глубине z расположен излучатель. Глубина приемника известна и равна z_0 . Излучается сигнал $f(t)$ с комплексным спектром $S(\omega)$. Будем полагать, что сигнал принимается и излучается ненаправленно. Таким образом, измеренный сигнал будет иметь вид [59]:

$$p(t) = p_N(t) + \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} A_\mu f(t - t_0 - t_\mu(r, z | z_0)), \quad (4.25)$$

где: N_{RS} – число лучей соединяющих точки излучения и приема;

A_μ – амплитуда сигнала пришедшего по μ -му лучу;

$t_\mu(r, z | z_0)$ – время распространения вдоль μ -го луча;

t_0 – момент излучения сигнала.

Решающая статистика для оценки дистанции и глубины удаленного излучателя получается из выражения (4.24) для случая одного излучателя и одного приемника и имеет следующий вид:

$$H = \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} i_{\mu} (\hat{t}_{\mu} - t_S - t_{\mu}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))^2 = \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} i_{\mu} (\hat{t}_{\mu} - t_S - t_{\mu}(r, z | z_0))^2, \quad (4.26)$$

где $i_{\mu} = \left. \frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} \right|_{t=\hat{t}_{\mu}}$ весовые коэффициенты, характеризующие точность оценки времен приема сигналов, распространяющихся по различным лучам.

Так как момент излучения t_S в выражении (4.26) нам априорно не известен, то вместо времен распространения сигналов вдоль различных лучей воспользуемся задержками между приемом сигналов, распространяющихся вдоль μ -го и первого лучей:

$$\tau_{\mu}(r, z | z_0) = t_{\mu}(r, z | z_0) - t_1(r, z | z_0),$$

$$\hat{\tau}_{\mu} = \hat{t}_{\mu} - \hat{t}_1,$$

$$J = \sum_{\mu=2}^{N_{RS}} i_{\mu} (\hat{\tau}_{\mu} - \tau_{\mu}(r, z | z_0))^2. \quad (4.27)$$

Минимизируя выражение (4.27) по расстоянию r и глубине z , мы получим оценки указанных величин.

4.2.2. Анализ эффективности метода согласованной с морским волноводом обработки сигналов

Для оценки работоспособности и эффективности функционирования алгоритма, реализующего указанный метод согласованной обработки, были проведены экспериментальные исследования в натуральных морских условиях [154].

ГМУ, соответствующие данным экспериментальным исследованиям в натуральных морских условиях: волнение 1 балл; температура воздуха 20 °С; относительная влажность 68%; атмосферное давление 752 мм рт.ст.; ВРСЗ приведено в таблице 4.1 и на рисунке 4.7.

Таблица 4.1. ВРСЗ при проведении эксперимента.

Глубина, z (м)	Скорость звука, c_z (км/с)
0.0	1.5077
4.0	1.5075
8.0	1.5074
9.5	1.5066
11.0	1.5060

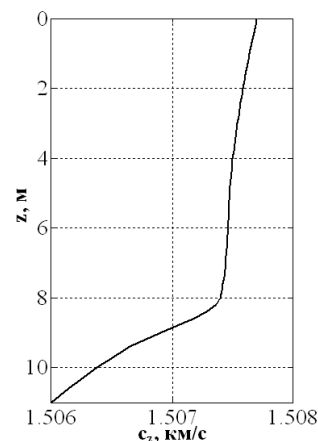


Рисунок 4.7. ВРСЗ при проведении эксперимента.

Характеристики излучающей ГЛС: глубина места установки 11 м; длина якорного троса ГЛС 5 м; расстояние до приемника 471 м; форма излучаемого сигнала сигнал с ЛЧМ (частотный диапазон $60 \div 90$ кГц, длительность 20 мс).

В качестве приемника использовался ненаправленный калиброванный гидрофон, расположенный на глубине 1 м. Принимаемый сигнал усиливался, оцифровывался и передавался в компьютер. Осциллограмма одного из полученных таким образом сигналов приведена на рисунке 4.8.

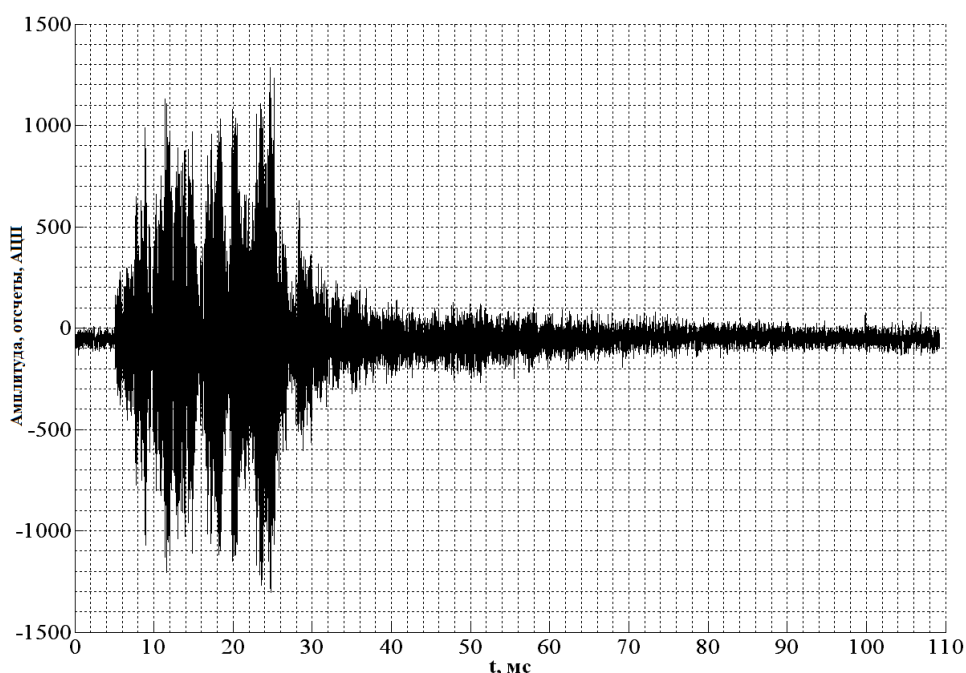


Рисунок 4.8. Осциллограмма сигнала, принятого контрольным гидрофоном.

На рисунке 4.8 виден сигнал, излученный ГЛС. Можно примерно оценить время приема первого луча многолучевого сигнала (около 5 мс). Также, начиная со времени в 25 мс, виден спадающий «хвост», соответствующий приему последующих лучей многолучевого сигнала и реверберации.

С целью определения времен приема всех лучей принятый сигнал подвергался обработке с применением преобразования Гильберта и согласованной с формой излучаемого сигнала фильтрации [156, 157]. Результат такой обработки приведен на рисунке 4.9.

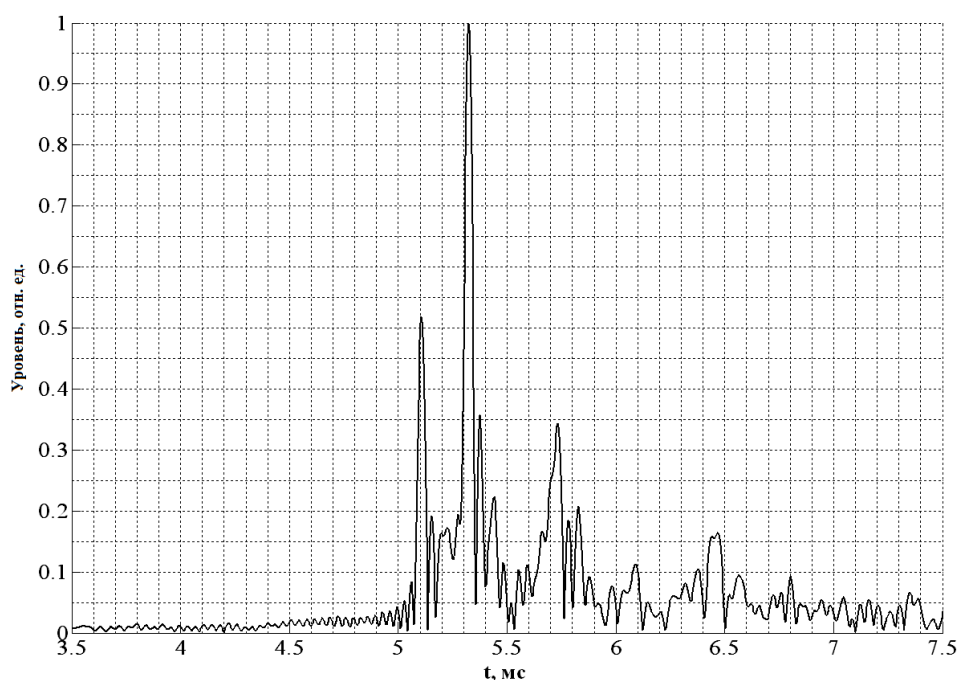


Рисунок 4.9. ВКФ сигнала, изображенного на рисунке 4.8, с эталонным сигналом.

На рисунке 4.9 видны пики, соответствующие приему сигналов пришедших вдоль различных лучей. Превышение уровня второго пика над уровнем первого, объясняется тем, что приемник расположен близко к поверхности (глубина 1 м) и не различает во времени два луча, сигнал по одному из которых из-за отражения от поверхности приходит в противофазе к другому.

Под моментом времени приема сигнала подразумевается положение локального максимума ВКФ с точностью до отсчета. Из полученного таким образом множества максимумов выбирается K значений времен приема сигналов, пришедших вдоль различных лучей, с наибольшим значением ВКФ [158]. Сигналы с наибольшей амплитудой выбираются потому, что их легче

спрогнозировать при расчете параметров модельного сигнала. Затем полученные значения времен упорядочиваются по возрастанию. В результате имеем K времен приема сигналов, пришедших вдоль различных лучей, которые обозначим $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_K$. Затем вычтем из всех этих времен величину \hat{t}_1 , т. е. перейдем к задержкам во времени приема сигналов:

$$\hat{\tau}_k = \hat{t}_k - \hat{t}_1, \quad k = 2..K.$$

Вычисление лучевых параметров модельного сигнала осуществлялось с помощью программы «BiStat» [153], которая позволяет провести расчет параметров лучей, вдоль которых распространяются сигналы, в условиях плоскостойкого волновода: амплитуды, времени распространения, глубины, углов скольжения лучей в точках излучения и приема в узлах заданной сетки дальность-глубина. При расчете учитываются следующие данные: глубина волновода, ВРСЗ, коэффициент затухания, волнение, коэффициенты отражения от дна и поверхности. В описываемом эксперименте расчеты проводились в узлах следующей сетки (глубина приемника равна 1 м): расстояние между излучателем и приемником от 100 до 500 м с шагом 1 м; глубина излучателя от 1 до 10 м с шагом 0.2 м.

Рассчитанные времена приема модельного сигнала обозначим $t_1(r, z), t_2(r, z), \dots, t_L(r, z)$, где L – рассчитанное теоретически количество лучей в текущей точке ($L > K$). Затем, аналогично, перейдем к задержкам во времени распространения сигналов вдоль различных лучей:

$$\tau_l(r, z) = t_l(r, z) - t_1(r, z), \quad l = 2..L.$$

Невязка измеренных и рассчитанных задержек во временах прихода лучей, в соответствии с выражением (4.27):

$$J(r, z) = \frac{1}{KD} \sum_{k=1}^K \left(\min_l |\hat{\tau}_k - \tau_l(r, z)| \right)^2, \quad (4.28)$$

где $D = 1 \text{ мс}^2$.

Значения r^* и z^* , при которых величина невязки J (4.28) достигает минимума, считаются искомыми значениями расстояния до источника и его

глубины. На рисунке 4.10 изображена величина обратная квадратному корню из невязки $J(r,z)$ (4.28), рассчитанная для сигнала, осциллограмма которого приведена на рисунке 4.8 (при расчете использовались $K = 3$ луча с максимальными амплитудами).

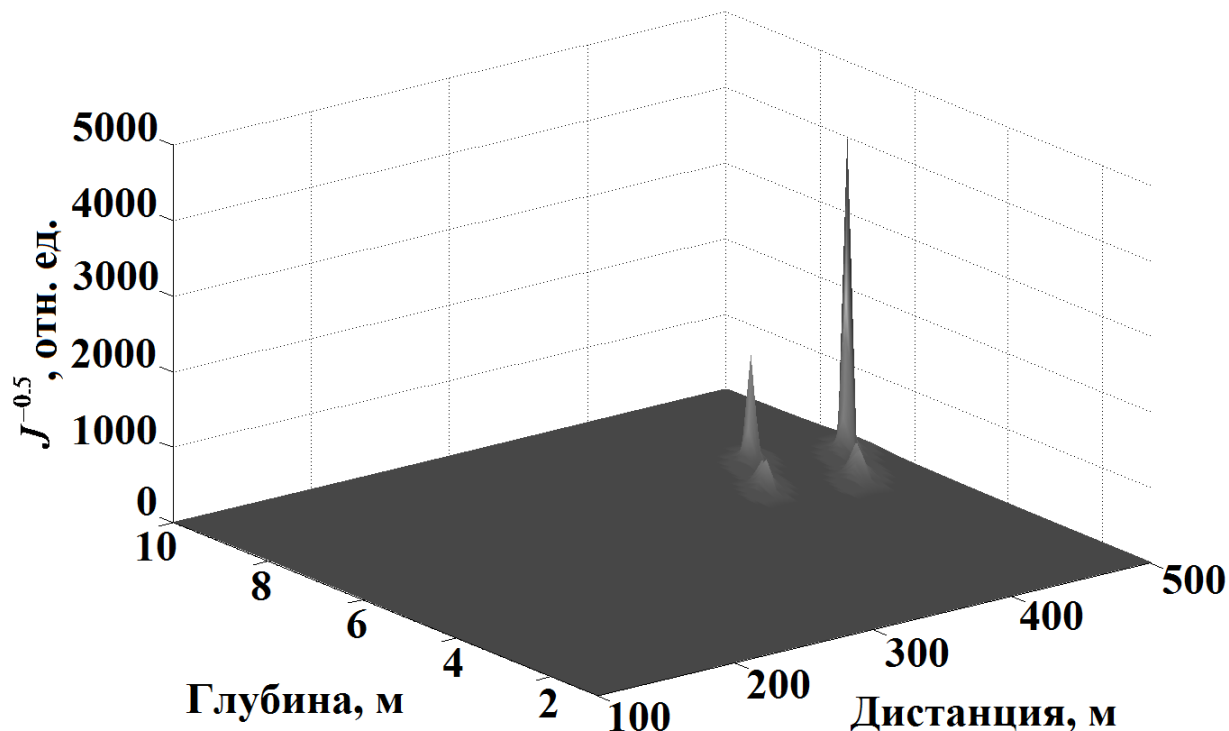


Рисунок 4.10. Зависимость от координат величины обратной квадратному корню из невязки.

На рисунке 4.10 хорошо виден большой пик, соответствующий максимуму величины обратной квадратному корню из невязки, т. е. минимуму самой невязки. Положение максимального пика соответствует дистанции 478 м и глубине 6.8 м (истинные дистанция и глубина 471 м и 6 м соответственно). При оценке расстояния и глубины использовались только $K = 3$ луча с максимальными амплитудами принятого сигнала. Их времена приема на измерительный гидрофон равны 5.11, 5.33 и 5.74 мс.

На рисунке 4.11 помимо результата согласованной фильтрации исходной записи (рисунок 4.9), нанесены рассчитанные теоретически времена приема сигналов, пришедших вдоль различных лучей, и результат согласованной фильтрации теоретически рассчитанного сигнала.

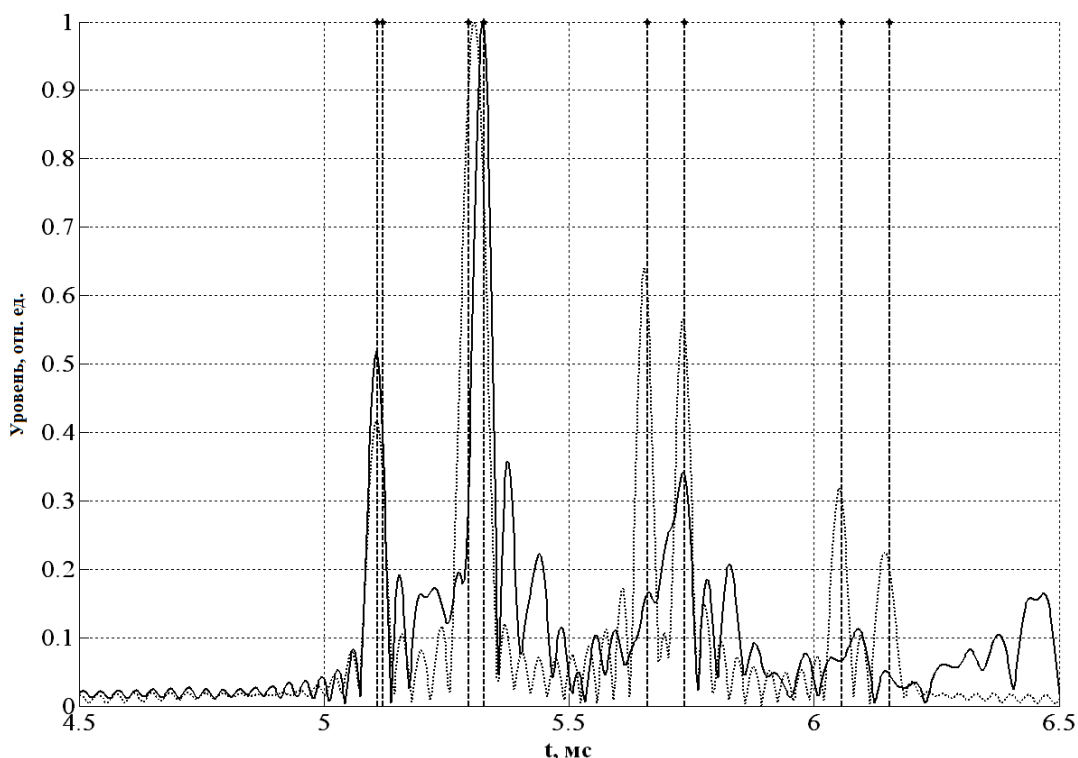


Рисунок 4.11. Результат согласованной фильтрации измеренного сигнала и его модели.

На рисунке 4.11 приведены:

- график ВКФ принятого и эталонного сигналов (сплошная линия),
- рассчитанные времена распространения сигнала вдоль различных лучей от источника, расстояние до которого и его глубина оценены вышеизложенным методом (вертикальные прерывистые отрезки),
- график ВКФ эталонного и теоретически рассчитанного многолучевого сигнала (пунктирная линия).

Оценка расстояния до источника сигнала и его глубины предлагаемым методом (при обработке использовались $K = 3$ луча с максимальными амплитудами) проводилась для 10 различных участков записи с контрольного гидрофона, содержащих сигнал. Полученные результаты (расстояние до источника и его глубина) представлены в таблице 4.2.

Анализ результатов, приведенных в таблице 4.2, показывает, что глубина источника звука находится в диапазоне $5.8 \div 7.2$ м (СКО = 0.62 м) и расстояние до него составляет $416 \div 479$ м (СКО = 24 м). Данные результаты соответствуют действительной глубине постановки ГЛС и расстоянию до нее.

Таблица 4.2. Полученные расстояния и глубины источника звука.

Расстояние до источника r , (м)	Глубина источника z , (м)
478	6.8
452	5.8
479	6.8
449	7.2
416	6.0
473	5.8
427	7.2
449	5.8
471	6.6
425	7.2

Также для оценки работоспособности и эффективности алгоритма, реализующего предлагаемый метод согласованной с морским волноводом обработки сигналов, были выполнены модельные расчеты для условий Баренцева моря в летний период.

Параметры лучей теоретического сигнала были рассчитаны с помощью программы «ViStat» [153] для ВРСЗ, которое изображено на рисунке 4.12 сплошной линией, глубина приемника 1 м.

Параметры сетки, для узлов которой выполнялись расчеты: расстояние между излучателем и приемником от 105 до 1000 м с шагом 5 м, глубина от 0.5 до 100 м с шагом 0.5 м.

Рассчитанные таким образом времена приема будем считать теоретическими и обозначим $t_1(r, z)$, $t_2(r, z)$, ..., $t_L(r, z)$, где $L = 10$ – рассчитанное количество лучей в точке приема. От времен переходим к задержкам между сигналами, пришедшими вдоль различных лучей: $\tau_l(r, z) = t_l(r, z) - t_1(r, z)$, $l = 2..L$.

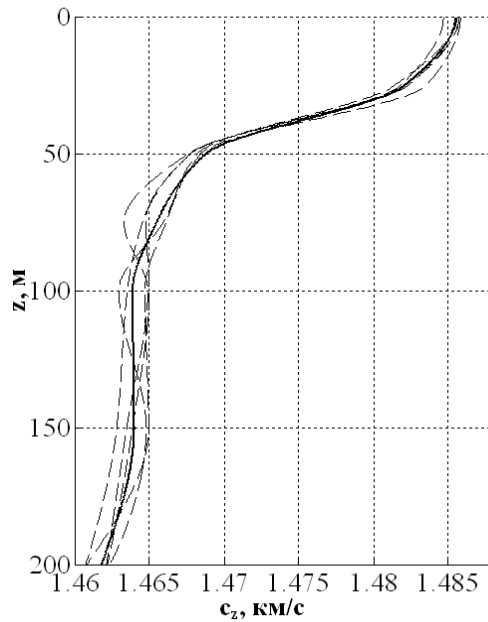


Рисунок 4.12. ВРСЗ, использовавшиеся при модельном эксперименте.

Затем рассчитаем параметры «принимаемого» сигнала. Источник расположим на расстоянии 600 м от приемника и на глубине 20 м.

В ВРСЗ внесем неточности. В каждом из заданных слоев к исходной скорости звука добавим случайную ошибку, распределенную по нормальному закону (математическое ожидание равно нулю, СКО равно 1 м/с). Полученные ВРСЗ изображены на рисунке 4.12 прерывистыми линиями.

Для полученных таким образом ВРСЗ с помощью программы «BiStat» [153] рассчитаем параметры лучей, соединяющих точки излучения и приема. В полученные времена распространения сигналов вдоль различных лучей добавим нормально распределенную ошибку с нулевым математическим ожиданием и СКО равным 1 мс. В результате получены «измеренные» времена приема сигналов, пришедших по различным лучам: $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_K, K=10$. Далее вычислим задержки между сигналами, пришедшими вдоль различных лучей: $\hat{\tau}_k = \hat{t}_k - \hat{t}_1, k = 2..K$.

Имея задержки $\hat{\tau}_k$ и $\tau_l(r, z)$, мы можем рассчитать решающую статистику (4.28) и, найдя ее минимум, оценить расстояние до источника сигнала, а также его глубину. Полученные таким образом результаты приведены в таблице 4.3 (при вычислении решающей статистики использовались 5 первых лучей).

Таблица 4.3. Результат модельного расчета.

Оценка расстояния, (м)	Ошибка оценки расстояния, (м)	Оценка глубины z, (м)	Ошибка оценки глубины, (м)
595	5	18.5	1.5
605	5	21.0	1.0
605	5	21.5	1.5
590	10	15.0	5.0
600	0	19.5	0.5

Анализ результатов моделирования, приведенных в таблице 4.3, показывает, что оценка глубины источника составляет $15 \div 21.5$ м, СКО = 2.6 м; оценка расстояния между источником и приемником – $590 \div 605$ м, СКО = 6.6 м.

На основании статистики полученной в результате моделирования и при обработке данных, полученных при проведении эксперимента, можно сделать вывод, что метод достаточно устойчив к ошибкам измерения гидрологии. В тоже время, если ошибки в определении ВРСЗ приводят к кардинальному изменению характера морского волновода (например, к появлению выраженного канала или изменению его типа), то предлагаемый метод будет не эффективен.

Указанный метод применим при условии различения как минимум трех лучей от источника звука, что обусловлено требованиями однозначной оценки двух величин (расстояния и глубины). Следовательно, границы применимости зависят от уровня принимаемого сигнала и шумов акватории, т. е. отношения сигнал/помеха.

Совместное решение задачи определения координат источника сигнала и томографической задачи [159 – 163] должно приводить к увеличению точности оценок координат целей [164].

Предлагаемый метод согласованной с морским волноводом обработки сигналов после небольшой модификации можно применять для оценки дистанции до подводного объекта и его глубины при обнаружении по первичному гидроакустическому полю [165, 166]. Модификация указанного метода заключается в следующем: при оценке задержек времен распространения сигналов вдоль различных лучей вместо ВКФ принятой реализации с известным эталонным сигналом используется автокорреляционная функция (АКФ) принятой

реализации. Необходимость такой модификации обусловлена тем, что при обнаружении цели по первичному гидроакустическому полю сигнал, излучаемый целью, неизвестен.

4.3. Позиционирование гидролокационных станций по неподвижным отражателям

Кроме применения метода взаимного позиционирования нескольких ГЛС в структуре МПСН, существует возможность применения метода позиционирования отдельных ГЛС относительно неподвижных отражающих звук объектов, расположенных на дне в зоне обзора ГЛС. Такими отражателями могут являться крупные камни, выступы скал, затопленные предметы и т.п. Наличие отражателя несложно организовать, искусственно затопив в охраняемой акватории отражающий предмет, например уголкового отражатель.

В штатном режиме работы ГЛС в каждом элементе пространственного разрешения оцениваются амплитуды принятых сигналов. При достаточном эквивалентном радиусе (ЭР) рассеяния объекта значение амплитуды эхо-сигнала превышает порог одноактного обнаружения и передается для дальнейшей обработки вместе с оценками следующих параметров: времени приема и соответствующей этому времени дистанции, пеленга и ОСП. Для обнаружения истинных движущихся подводных объектов должна производиться селекция неподвижных отметок, которые впоследствии отбрасываются.

4.3.1. Математическое описание метода позиционирования гидролокационных станций по неподвижным отражателям

Предлагаемый метод и реализующий его алгоритм основаны на применении метода максимального правдоподобия. В результате применения данного алгоритма помимо оценки изменения положения ГЛС производится еще и уточнение координат неподвижных отражателей.

Пусть в зоне обзора ГЛС присутствуют M отражателей, координаты которых $\bar{x}_\mu = (x_\mu, y_\mu)$, $\mu = 1..M$ нам неизвестны. Координаты ГЛС $\bar{x}_0(t_n) = (x_0(t_n), y_0(t_n))$, угол поворота ГЛС $\varphi_0(t_n)$, $n = 1..N$, N – количество периодов обзора. Измеряемые станцией величины $\hat{R}_\mu(t_n)$ и $\hat{\varphi}_\mu(t_n)$ – дистанция до отражателя и его пеленг.

Также на каждом периоде обзора при помощи компаса оценивается поворот ГЛС $\varphi_K(t_n)$, а во время постановки при помощи GPS/ГЛОНАСС определяются ее начальные координаты \bar{x}_H .

Задача: требуется на каждом периоде обзора оценить положение ГЛС, с учетом уточнения координат неподвижных отражателей.

При нормальном распределении ошибки оценки расстояния до отражателя и его пеленга и при независимости данных измерений функция правдоподобия оценки координат μ -го отражателя в n -ый момент времени запишется в виде:

$$L_{\mu,n} = \frac{1}{2\pi\sigma_{\mu,n}^{(R)}\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)}} \exp \left\{ - \frac{\left(\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_0(t_n)\| \right)^2}{2\sigma_{\mu,n}^{(R)2}} - \frac{\left(\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_0(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_0(t_n)}{x_\mu - x_0(t_n)} \right) \right)^2}{2\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)2}} \right\} \quad (4.29)$$

где $\sigma_{\mu,n}^{(R)}$ и $\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)}$ – СКО оценки дистанции до отражателя и его пеленга соответственно.

Логарифм функции правдоподобия:

$$\ln(L_{\mu,n}) = - \frac{1}{2\sigma_{\mu,n}^{(R)2}} \left(\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_0(t_n)\| \right)^2 - \frac{1}{2\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)2}} \left(\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_0(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_0(t_n)}{x_\mu - x_0(t_n)} \right) \right)^2 + \ln \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{\mu,n}^{(R)}\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)}} \right) \quad (4.30)$$

Обозначим вес измерений как:

$$i_{\mu,n}^{(R)} = \frac{1}{\sigma_{\mu,n}^{(R)2}} = \frac{\rho_\mu(t_n)}{\left(\frac{c}{2\Delta f} \right)^2}, \quad (4.31a)$$

$$i_{\mu,n}^{(\varphi)} = \frac{1}{\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)2}} = \frac{\rho_\mu(t_n)}{(\Delta\varphi)^2}, \quad (4.31b)$$

где $\rho_\mu(t_n)$ – ОСП соответствующее μ -му отражателю,

c – скорость звука,

Δf – ширина полосы ЗС,

$\Delta\varphi$ – ширина ХН АР ГЛС на уровне 0.7.

Последнее слагаемое в выражении (4.30) не зависит от искомым величин, и его можно исключить. С учетом обозначений (4.31), получаем:

$$-\ln(L_{\mu,n}) \sim i_{\mu,n}^{(R)} \left(\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_0(t_n)\| \right)^2 + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \left(\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_0(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_0(t_n)}{x_\mu - x_0(t_n)} \right) \right)^2 \quad (4.32)$$

В случае M отражателей и N периодов обзора логарифм функции правдоподобия будет пропорционален следующему выражению:

$$-\ln(L_{uzm}) \sim \sum_{n=1}^N \sum_{\mu=1}^M \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} \left(\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_0(t_n)\| \right)^2 + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \left(\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_0(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_0(t_n)}{x_\mu - x_0(t_n)} \right) \right)^2 \right\} \quad (4.33)$$

Аналогично для логарифма функции правдоподобия априорных неакустических измерений $\bar{x}_0(t_n)$ и $\varphi_0(t_n)$ получаем:

$$-\ln(L_{anp}) \sim \sum_{n=1}^N \left\{ i_{0,n}^{(\varphi)} (\varphi_0(t_n) - \varphi_K(t_n))^2 + \frac{1}{D_{GPS}} \|\bar{x}_0(t_n) - \bar{x}_H\|^2 \right\} \quad (4.34)$$

Введем обозначения:

$$\delta\bar{x}_0(t_n) = \bar{x}_0(t_n) - \bar{x}_H, \quad (4.35a)$$

$$\delta\varphi_0(t_n) = \varphi_0(t_n) - \varphi_K(t_n). \quad (4.35b)$$

Логарифм функции правдоподобия, с учетом введенных обозначений (4.35):

$$\begin{aligned} -\ln(L_\Sigma) = & -\ln(L_{anp}) - \ln(L_{uzm}) = \sum_{n=1}^N \left\{ i_{0,n}^{(\varphi)} (\delta\varphi_0(t_n))^2 + \frac{1}{D} \|\delta\bar{x}_0(t_n)\|^2 \right\} + \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{\mu=1}^M \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} \left(\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\| \right)^2 + \right. \\ & \left. + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \left(\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_K(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_H - \delta y_0(t_n)}{x_\mu - x_H - \delta x_0(t_n)} \right) - \delta\varphi_0(t_n) \right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Минимизируя выражение (4.36) по величинам \bar{x}_μ , $\delta\bar{x}_0(t_n)$ и $\delta\varphi_0(t_n)$, получим максимально правдоподобные оценки указанных величин.

Найдем оптимальное значение вектора искомым параметров:

$$\theta = (\bar{x}_\mu, \delta\bar{x}_0(t_n), \delta\varphi_0(t_n)) \quad (4.37)$$

методом Ньютона [143, 148 – 150]:

$$\theta_{(1)} = \theta_{(0)} - \left(\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial\theta^2} \right)_{\theta_{(0)}}^{-1} \left(\frac{\partial(-\ln(L_\Sigma))}{\partial\theta} \right)_{\theta_{(0)}}. \quad (4.38)$$

Для чего вычислим первые и вторые частные производные выражения (4.36) по каждому из искомых параметров:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(-\ln(L_\Sigma))}{\partial\bar{x}_\mu} = & -2 \sum_{n=1}^N \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} (\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|) \bar{e}_\mu(t_n) + \right. \\ & \left. + \frac{i_{\mu,n}^{(\varphi)} \left[\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_K(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_H - \delta y_0(t_n)}{x_\mu - x_H - \delta x_0(t_n)} \right) - \delta\varphi_0(t_n) \right] \bar{n}_\mu(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|} \right\}, \end{aligned} \quad (4.39a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(-\ln(L_\Sigma))}{\partial(\delta\bar{x}_0(t_n))} = & \frac{1}{D_{GPS}} \delta\bar{x}_0(t_n) + 2 \sum_{\mu=1}^M \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} (\hat{R}_\mu(t_n) - \|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|) \bar{e}_\mu(t_n) + \right. \\ & \left. + \frac{i_{\mu,n}^{(\varphi)} \left[\hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_K(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_H - \delta y_0(t_n)}{x_\mu - x_H - \delta x_0(t_n)} \right) - \delta\varphi_0(t_n) \right] \bar{n}_\mu(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|} \right\}, \end{aligned} \quad (4.39б)$$

$$\frac{\partial(-\ln(L_\Sigma))}{\partial(\delta\varphi_0(t_n))} = 2i_{0,n}^{(\varphi)} \delta\varphi_0(t_n) - 2 \sum_{\mu=1}^M \left\{ \hat{\varphi}_\mu(t_n) - \varphi_K(t_n) - \arctg \left(\frac{y_\mu - y_H - \delta y_0(t_n)}{x_\mu - x_H - \delta x_0(t_n)} \right) - \delta\varphi_0(t_n) \right\}, \quad (4.39в)$$

где \bar{e}_μ – единичный вектор направленный от ГЛС к μ -му отражателю;

\bar{n}_μ – единичный вектор нормальный к вектору \bar{e}_μ .

При вычислении вторых производных пренебрежем зависимостью векторов

\bar{e}_μ и $\frac{\bar{n}_\mu}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|}$ от искомых параметров и получим:

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial\bar{x}_\mu^2} = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} \bar{e}_\mu(t_n) \bar{e}_\mu^T(t_n) + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \frac{\bar{n}_\mu(t_n) \bar{n}_\mu^T(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|^2} \right\}, \quad (4.40a)$$

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial\bar{x}_\mu \partial(\delta\bar{x}_0(t_n))} = -2 \sum_{n=1}^N \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} \bar{e}_\mu(t_n) \bar{e}_\mu^T(t_n) + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \frac{\bar{n}_\mu(t_n) \bar{n}_\mu^T(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\|^2} \right\}, \quad (4.40б)$$

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial \bar{x}_\mu \partial (\delta \rho_0(t_n))} = \frac{2i_{\mu,n}^{(\varphi)} \bar{n}_\mu(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta \bar{x}_0(t_n)\|}, \quad (4.40\text{В})$$

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial (\delta \bar{x}_0(t_n))^2} = \frac{1}{D_{GPS}} + 2 \sum_{n=1}^N \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} \bar{e}_\mu(t_n) \bar{e}_\mu^T(t_n) + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \frac{\bar{n}_\mu(t_n) \bar{n}_\mu^T(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta \bar{x}_0(t_n)\|^2} \right\}, \quad (4.40\text{Г})$$

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial (\delta \bar{x}_0(t_n)) \partial (\delta \rho_0(t_n))} = -2 \sum_{\mu=1}^M \frac{i_{\mu,n}^{(\varphi)} \bar{n}_\mu(t_n)}{\|\bar{x}_\mu - \bar{x}_H - \delta \bar{x}_0(t_n)\|}, \quad (4.40\text{Д})$$

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial (\delta \rho_0(t_n))^2} = 2i_{0,n}^{(\varphi)} + 2 \sum_{\mu=1}^M i_{\mu,n}^{(\varphi)} \quad (4.40\text{Е})$$

$$\frac{\partial^2(-\ln(L_\Sigma))}{\partial (\delta \rho_0(t_n))^2} = 2i_{0,n}^{(\varphi)} + 2 \sum_{\mu=1}^M i_{\mu,n}^{(\varphi)}.$$

Используя нулевое приближение $\theta = (\bar{x}_\mu, 0, 0)$ по формулам (4.39) и (4.40) строим вектор первых и матрицу вторых производных функции правдоподобия и, подставив их в формулу (4.38), находим искомые значения \bar{x}_μ , $\delta \bar{x}_0(t_n)$ и $\delta \rho_0(t_n)$.

Количество неизвестных величин равно $2M + 3N$, а число оцениваемых величин равно $2MN$. Поэтому найти все неизвестные можно лишь после $N^* > \frac{2M}{2M-3}$ периодов обзора.

4.3.2. Анализ эффективности алгоритма, реализующего метод позиционирования гидролокационных станций по неподвижным отражателям

Анализ эффективности алгоритма, реализующего предлагаемый метод позиционирования ГЛС по неподвижным отражателям, был исследован путем численного моделирования в среде Matlab.

Исходными данными алгоритма позиционирования ГЛС по неподвижным отражателям являются последовательности «кадров» (наборов превышающих заданный порог отметок целей, обнаруженных ГЛС при каждом периоде обзора). Генерация исходных данных произведена следующим образом:

1. Координаты ГЛС $(X_0(0), Y_0(0))$ и ее поворот $\varphi_0(0)$ в первом периоде обзора полагались равными нулю. Затем случайным образом задавались координаты

неподвижных отражателей (X_m, Y_m) в неподвижной системе координат (при этом $-300 < X_m, Y_m < 300$), $m = 1..N_m$, N_m – количество неподвижных отражателей. Также задавалась одна движущаяся прямолинейно цель со следующими параметрами движения: (X_{c0}, Y_{c0}) и (V_{cx}, V_{cy}) .

2. Далее на каждом периоде обзора задавались координаты ГЛС $(X_0(t), Y_0(t))$ и ее поворот $\varphi_0(t)$.

3. Вычислялись наклонные расстояния до отражателей и направления на них. При этом в рассчитанные величины вносились ошибки измерений:

$$R_m(t) = \sqrt{(H_m - h)^2 + (X_m - X_0(t))^2 + (Y_m - Y_0(t))^2} + \text{randn}\left(0, \frac{c}{2\Delta f \sqrt{\rho_m}}\right),$$

$$\varphi_m(t) = \arctg\left(\frac{Y_m - Y_0(t)}{X_m - X_0(t)}\right) + \text{randn}\left(0, \frac{\Delta\varphi}{\sqrt{\rho_m}}\right).$$
(4.41)

где $\text{randn}(M, \sigma)$ – распределенная по нормальному закону случайная величина с математическим ожиданием равным M и СКО равным σ ;

ρ_m – ОСП эхо-сигнала от m -го отражателя;

c – скорость звука;

Δf – полоса ЗС;

$\Delta\varphi$ – ширина ХН АР;

h – глубина погружения ГЛС;

H_m – глубина m -го неподвижного отражателя, которая равна глубине акватории и в общем случае зависит от координат.

Аналогичным образом поступаем и с движущейся целью, при этом считая глубину ее погружения постоянной и равной глубине погружения ГЛС.

4. Затем выбираются все отметки целей, расстояния до которых лежат в пределах $L_0 < R < L$ (L_0 – мертвая зона, L – зона обнаружения ГЛС).

5. Выбранные таким образом отметки целей записываются в файл.

Алгоритм обработки, реализующий предлагаемый метод позиционирования, заключается в следующем:

1. Полагаем, что на первом периоде обзора сдвиг и поворот ГЛС отсутствуют. На основании этого предположения и отметок целей, обнаруженных ГЛС, вычисляется нулевое приближение для координат отражателей (опорный кадр). Помимо координат отражателей в полярной и Декартовой системах по формулам (4.31) вычисляются их веса: $i_{\mu,i}^{(R)}$ и $i_{\mu,i}^{(\varphi)}$, суммы взвешенных значений дистанций и направлений: $\sum_{n=1}^1 i_{\mu,n}^{(R)} \hat{R}_{\mu}(t_n)$ и $\sum_{n=1}^1 i_{\mu,n}^{(\varphi)} \hat{\varphi}_{\mu}(t_n)$, и суммы весов: $\sum_{n=1}^1 i_{\mu,n}^{(R)}$ и $\sum_{n=1}^1 i_{\mu,n}^{(\varphi)}$.

2. Идентификация отражателей: для каждого неподвижного отражателя (и целей, если они присутствуют в зоне обзора ГЛС) из опорного кадра, с учетом смещения и поворота на предыдущем шаге, находятся разности углов приема и дистанций со всеми отражателями в текущем кадре. Если эти разности для какой-либо пары отражателей из текущего и опорного кадров лежат в пределах возможных значений смещения и поворота станции, то считаем, что это один и тот же отражатель. Идентифицированные таким образом отражатели из текущего кадра используются в позиционировании.

3. Позиционирование ГЛС:

- по формулам (4.39) и (4.40) строятся вектор первых и матрица вторых производных. Причем, при суммировании по n моментам времени (от 1 до $N-1$) сдвиг и поворот ГЛС считаются равными нулю, а в текущий момент времени N за нулевое приближение сдвига и поворота принимается его значение, полученное для предыдущего импульса.

- по формуле (4.38) вычисляются значения искомого вектора параметров θ (4.37).

4. Уточнение координат отражателей:

- для идентифицированных отражателей производится усреднение предыдущих и полученных в текущий момент времени значений координат с учетом их веса, усреднение веса отражателей и накапливаются суммы весов:

$\sum_{n=1}^N i_{\mu,n}^{(R)}$ и $\sum_{n=1}^N i_{\mu,n}^{(\varphi)}$, а также взвешенных значений дистанции и направления на каждый

отражатель: $\sum_{n=1}^N i_{\mu,n}^{(R)} \hat{R}_{\mu}(t_n)$ и $\sum_{n=1}^N i_{\mu,n}^{(\varphi)} \hat{\varphi}_{\mu}(t_n)$.

- для не идентифицированных (не обнаруженных в текущем периоде обзора) отражателей значения координат остаются прежними, а вес уменьшается как $i = i \frac{N-1}{N}$.

При моделировании задавались $N_m = 20$ неподвижных отражателей и одна движущаяся цель, количество «кадров» $N_p = 100$, параметры ГЛС:

$$\begin{aligned} X_0(t) &= 0.1 \cdot t, \\ Y_0(t) &= 0, \\ \varphi_0(t) &= 0.1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{100}\right), \end{aligned} \tag{4.42}$$

где: $t = 0..N_p - 1$.

С учетом того, что точные параметры ГЛС (координаты и ориентация) определены, то можно оценить эффективность функционирования алгоритма.

Моделирование проводилось для 2 случаев: 1) глубина акватории известна точно, 2) вместо точной глубины акватории используется ее среднее значение. С целью упрощения расчетов скорость звука при моделировании полагалась постоянной.

В первом случае (глубина акватории известна точно) при моделировании глубина акватории постоянна и равна $H = 20$ м, глубина погружения ГЛС $h = 5$ м. Полученные при моделировании результаты приведены в таблице 4.4.

Анализ результатов моделирования, приведенных в таблице 4.4, подтвердил эффективность алгоритма, реализующего предлагаемый метод позиционирования, для варианта с известной глубиной акватории: максимальная СКО при оценке сдвига ГЛС вдоль одной из двух взаимно перпендикулярных осей (dX и dY) составила 14 см, а при оценке угла ее поворота $d\varphi - 1.25^\circ$.

Таблица 4.4. Результаты моделирования функционирования алгоритма позиционирования для варианта с известной глубиной акватории.

Количество отражателей в опорном кадре	СКО оценки $X_0(t)$, м	СКО оценки $Y_0(t)$, м	СКО оценки $d\varphi(t)$, градусы	Среднее время обработки одного «кадра», мс
20	0,0376	0,0893	0,418	18,6
21	0,0343	0,0719	0,319	20,5
20	0,0401	0,0538	0,361	19,1
20	0,0394	0,0391	0,282	19,2
19	0,0423	0,0816	0,420	17,9
20	0,0352	0,0362	0,272	19,7
21	0,0365	0,0335	0,257	20,4
20	0,0673	0,0937	1,25	19,0
21	0,0872	0,138	1,08	20,5
21	0,0460	0,0750	0,495	20,5

На рисунке 4.13 изображен восстановленный закон движения ГЛС соответствующий случаю, представленному строкой 9 в таблице 4.4 (действительный закон движения ГЛС описывается формулами (4.42)).

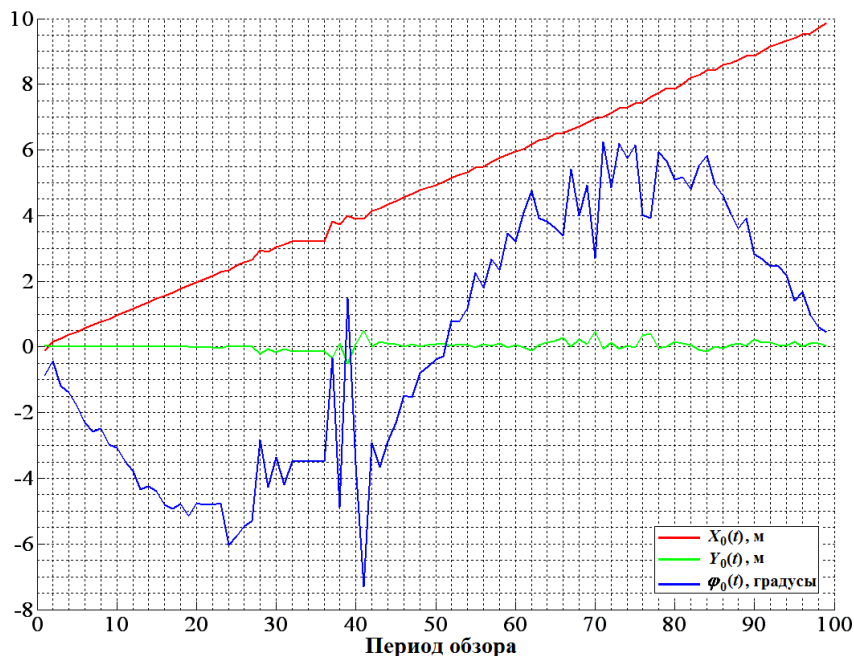


Рисунок 4.13. Восстановленный закон движения ГЛС.

На рисунке 4.13 красная кривая соответствует смещению ГЛС вдоль оси X (метры), зеленая – смещению вдоль оси Y (метры), синяя – ее поворот (градусы). Вдоль оси абсцисс на рисунке 4.13 отложен номер периода обзора. Анализ восстановленного закона движения ГЛС позволяет сделать вывод, что смещение

ГЛС вдоль координатных осей определяется достаточно точно, а в угле поворота на некоторых периодах обзора возникают неточности.

На рисунке 4.14 представлены все отметки, обнаруженные ГЛС за 100 периодов обзора.

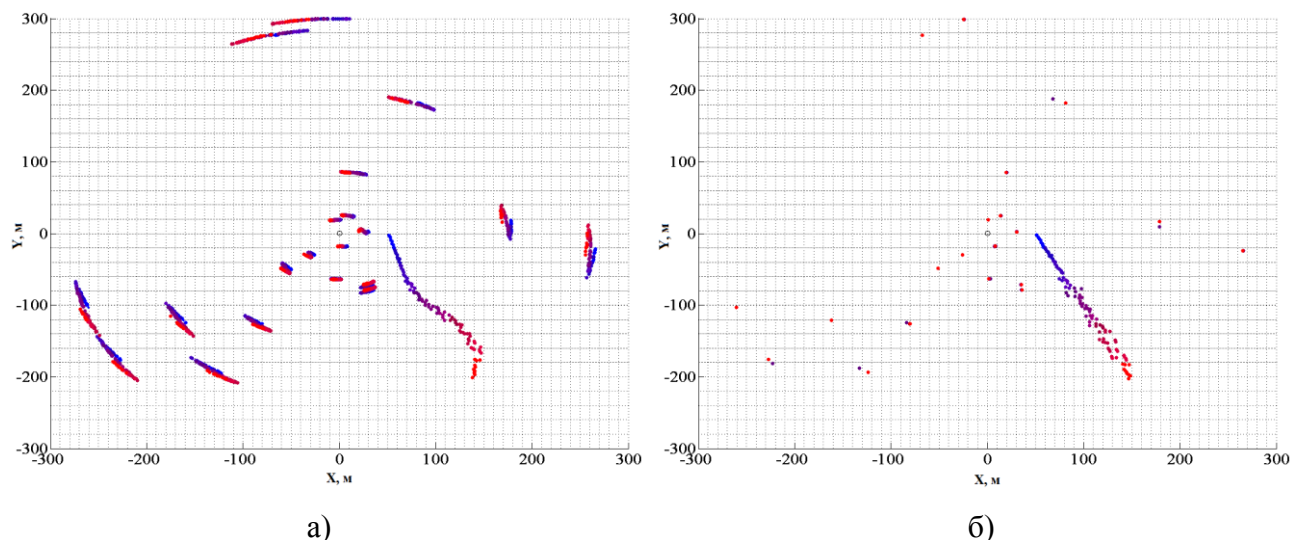


Рисунок 4.14. Отметки, обнаруженные ГЛС: а) до введения компенсации сдвига и поворота; б) после компенсации сдвига и поворота.

На рисунке 4.14 (а, б) вдоль координатных осей отложено расстояние в метрах, цвет плавно меняется в зависимости от номера периода обзора (от синего к красному). Из рисунка 4.14а видно, какие искажения может вносить собственное движение ГЛС в определение координат неподвижных отражателей и движущихся целей. На рисунке 4.14б представлен результат работы алгоритма, реализующего предлагаемый метод позиционирования, где видна прямолинейная трасса движущейся цели и соответствующие неподвижным отражателям красные «точки». Наличие фиолетовых «точек» рядом с некоторыми красными объясняется тем, что эти точки не были сопоставлены с опорным кадром, и в их положение была внесена неправильная коррекция из-за неточной оценки поворота ГЛС.

Во втором случае (вместо точной глубины акватории используется ее среднее значение) при моделировании задается наклонное дно акватории (глубина зависит от координаты x : $H = 20 + 0.05 \cdot x$ м). При оценке наклонной дистанции до обнаруженных объектов вносится коррекция на постоянную глубину $H_0 = 20$ м, глубина погружения ГЛС $h = 5$ м.

Результаты позиционирования, полученные в таких условиях, приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Результаты моделирования функционирования алгоритма позиционирования для варианта с неточной информацией о глубине акватории.

Количество отражателей в опорном кадре	СКО оценки $X_0(t)$, м	СКО оценки $Y_0(t)$, м	СКО оценки $d\varphi(t)$, градусы	Среднее время обработки одного «кадра», мс
20	0,0523	0,0612	0,744	18,8
20	0,0408	0,0414	0,381	19,1
21	0,0474	0,0306	0,246	20,0
21	0,0606	0,0720	0,410	20,4
20	0,0365	0,0291	0,287	18,5
21	0,0441	0,0460	0,318	20,4
21	0,0687	0,163	0,911	20,9
20	0,0394	0,0330	0,248	18,8
21	0,368	0,134	0,821	20,7
20	0,0512	0,0826	0,475	19,1

Как видно из таблицы 4.5 отсутствие точных данных о глубине акватории (при обработке используется постоянная глубина $H_0 = 20$ м вместо «реальной» глубины $H = 20 + 0.05 \cdot x$ м) не приводит к значительному снижению точности оценки смещения и поворота ГЛС:

- СКО при оценке смещения ГЛС вдоль одной из двух взаимно перпендикулярных осей (dX и dY) составила 37 см (ухудшение менее чем в 3 раза).

- СКО при оценке угла ее поворота не превышает одного градуса (такой же результат, как и в предыдущем случае).

На рисунке 4.15 изображен восстановленный закон движения ГЛС соответствующий случаю, представленному строкой 9 в таблице 4.5 (действительный закон движения ГЛС описывается формулами (4.42)).

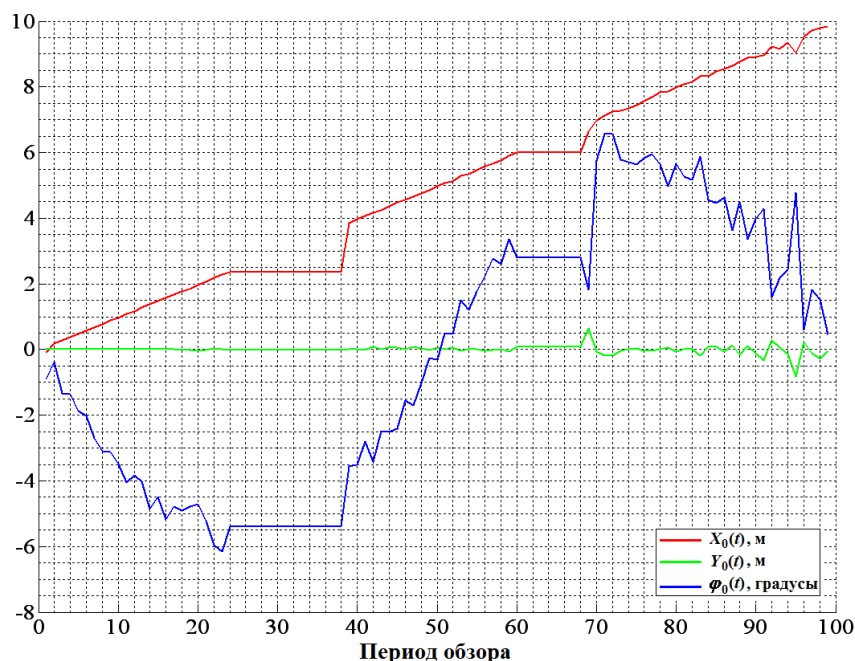


Рисунок 4.15. Восстановленный закон движения ГЛС (в случае неточных данных о глубине акватории).

На рисунке 4.15 красная кривая соответствует смещению ГЛС вдоль оси X (метры), зеленая – смещению вдоль оси Y (метры), синяя – ее поворот (градусы). Вдоль оси абсцисс здесь отложен номер импульса.

Анализ результатов, приведенных на рисунке 4.15, показывает, что положение ГЛС определяется достаточно точно, за исключением случаев, когда ни одному из отражателей в текущем кадре не найдено соответствия в опорном кадре. В таком случае полагается, что положение ГЛС на текущем периоде обзора равно предыдущему его значению (три графика на рисунке 4.15 одновременно имеют горизонтальные участки). Увеличение количества отражателей в опорном кадре позволяет уменьшить влияние этого явления.

На рисунке 4.16 представлены отметки целей, обнаруженные ГЛС за 100 импульсов.

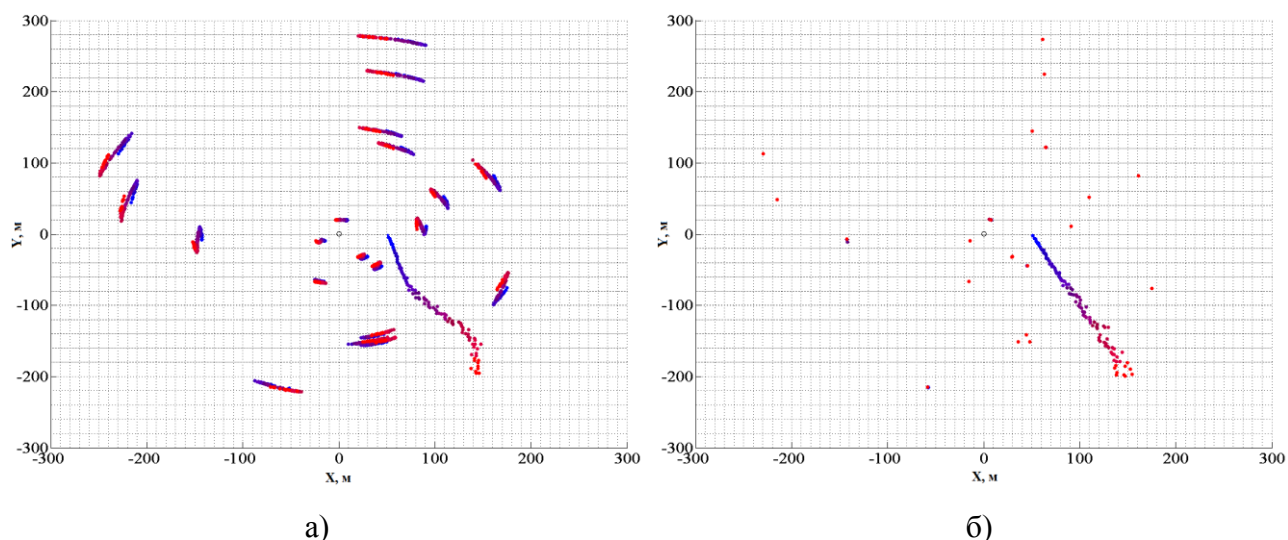


Рисунок 4.16. Отметки, обнаруженные ГЛС: а) до введения компенсации сдвига и поворота; б) после компенсации сдвига и поворота.

На рисунке 4.16 (а, б) вдоль координатных осей отложено расстояние в метрах. Цвет используется для обозначения номера периода обзора (номер увеличивается от синего к красному). На рисунке 4.16а представлены отметки с искажениями вносимыми движением ГЛС. На рисунке 4.16б представлен результат обработки, т. е. позиционирования, где хорошо видна прямолинейная трасса, соответствующая движущейся цели, а также красные «точки», соответствующие неподвижным отражателям.

При сравнении рисунков 4.14б (известна точная глубина) и 4.16б (глубина известна приближенно) видимых отличий не наблюдается. Таким образом, предлагаемый алгоритм, является устойчивым по отношению к отсутствию точных априорных сведений о глубине акватории и, следовательно, глубине неподвижных отражателей.

Помимо математического моделирования эффективность алгоритма, реализующего предложенный метод позиционирования по неподвижным отражателям, была проверена путем обработки записи, полученной при проведении натуральных экспериментальных работ.

Данная запись была получена при проведении экспериментов в Голубой бухте, г. Геленджик в сентябре 2006 г., при испытаниях экспериментального образца ГЛС подводного мониторинга, разработанной НЦВИ ИОФ РАН в рамках НИОКР. Запись представляет собой оцифрованные сигналы со всех приемных

каналов AP ГЛС за 35 последовательных периодов обзора. При проведении данного эксперимента ГЛС опускалась с края пирса на тресе и поэтому могла вращаться и отклоняться от своего первоначального положения под действием подводного течения.

На рисунках 4.17 и 4.18 представлены результаты, полученные при обработке данной записи с применением алгоритма, реализующего предлагаемый метод позиционирования.

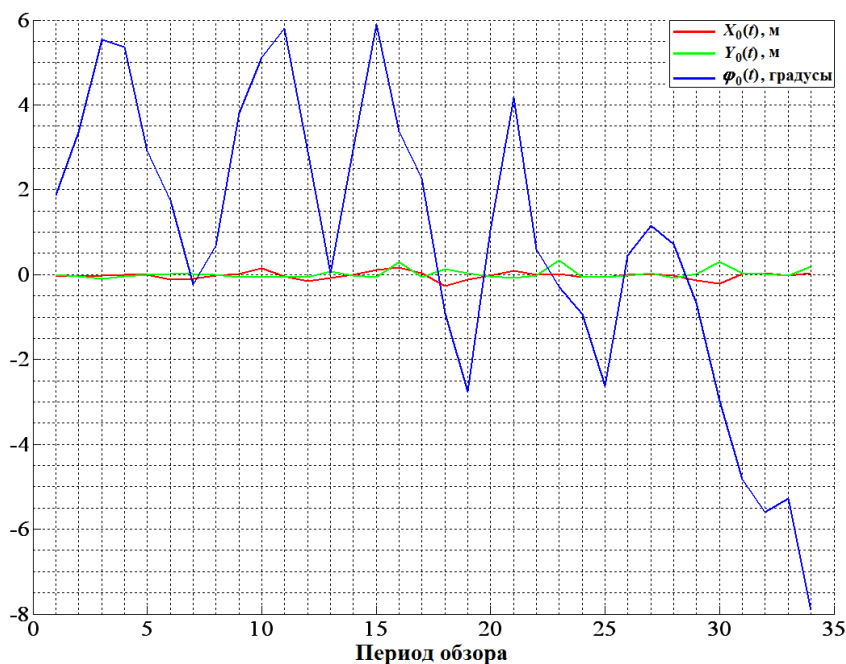


Рис. 4.17. Смещение и поворот ГЛС, полученные при обработке экспериментальной записи.

На рисунке 4.17 по оси ординат отложена величина смещения ГЛС вдоль координатных осей в метрах или ее поворота в градусах, а по оси абсцисс – номер импульса. Красная и зеленая кривые – смещение станции вдоль осей X и Y соответственно, а синяя – ее поворот.

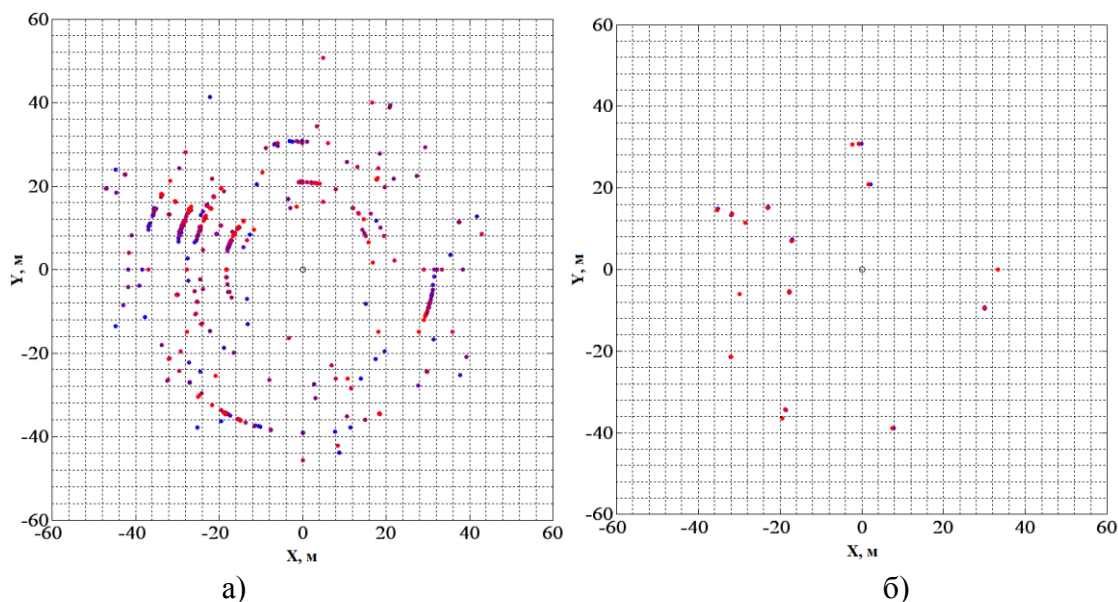


Рисунок 4.18. Отметки, обнаруженные ГЛС за 35 периодов обзора: а) до введения компенсации сдвига и поворота; б) после компенсации сдвига и поворота.

На рисунке 4.18 (а и б) вдоль координатных осей отложены расстояния в метрах. Цвет также используется для обозначения номера импульса (номер увеличивается от синего к красному). На рисунке 4.18б помимо компенсации сдвига и поворота ГЛС удалены отметки не идентифицированные как местники.

4.4. Выводы

1. Разработан метод взаимного позиционирования ГЛС в составе МСПН и метод позиционирования отдельной ГЛС по неподвижным отражателям.
2. Эффективность разработанных методов подтверждается результатами численного моделирования: ошибки оценки текущего положения ГЛС снижаются в 3 – 5 раз, соответственно снижаются ошибки оценок текущих координат обнаруженных МСПН объектов.
3. Эффективность разработанных методов также подтверждается результатами, полученными при обработке экспериментальных данных.
4. Алгоритм, реализующий оценку координат источника звука разработанным методом согласованной с морским волноводом обработки сигналов, дает оценки координат цели с удовлетворительной для практических

задач точностью. СКО оценки глубины составляет единицы метров, а СКО оценки дистанции – десятки метров на расстояниях до километра.

5. Разработанный метод согласованной с морским волноводом обработки сигналов после небольшой модификации можно также применять для оценки дистанции до подводного объекта и его глубины при обнаружении по первичному гидроакустическому полю [165, 166].

5. Оценка вклада разработанных методов в повышение эффективности мультистатической системы подводного наблюдения

5.1. Метод оценки эффективности алгоритмов, реализующих обработку гидроакустической информации в мультистатической системе подводного наблюдения

Качество функционирования сложной системы, в данном случае МСПН, принято выражать через показатели эффективности, которые можно оценить как степень приспособленности системы к выполнению поставленных перед нею задач по обнаружению малоразмерных подводных движущихся объектов [167, 168].

Показатель эффективности сложных систем наблюдения, в том числе МСПН, зависит от структуры системы, значений ее параметров, характера взаимодействия с внешней средой. Можно сказать, показатель эффективности определяется процессами функционирования системы, т.е. он является функционалом от процесса функционирования системы.

На основании формализованной постановки задачи, можно определить требования к критериям эффективности оценки функционирования алгоритмов, реализующих методы повышения эффективности функционирования МСПН:

- 1) Критерий должен быть количественным, т.е. выразить эффективность числовыми значениями скалярного или векторного выражения.
- 2) Критерий должен быть статистически значимым, т.е. разброс измеряемых значений по отношению к истинной величине не должен быть большим.
- 3) Критерий должен быть комплексным (при наличии частных целей), т.е. характеризовать эффективность системы в целом.
- 4) Критерий должен иметь явно выраженный физический смысл, т.е. четко выражать содержательную сторону показателя эффективности.

5) Критерий должен быть простым, т.е. его вычисление и сбор исходных данных, не должны быть связаны с большими трудозатратами.

В связи с тем, что сложные системы наблюдения, в том числе МСПН, работают в условиях действия случайных факторов, значения функционалов являются случайными величинами. Поэтому при выборе показателей эффективности обычно пользуются средними значениями соответствующих функционалов. Иногда используют удельные критерии, представляющие собой отношение, например, полезного эффекта к вероятности обнаружения малоразмерной подводной движущейся цели.

Вследствие трудности составления исчерпывающей математической модели систем наблюдения, и действующих на нее возмущений на практике прибегают к более или менее обоснованной декомпозиции критерия по характеристикам, относящимся к различным сторонам эффективности систем наблюдения. Указанные характеристики называются показателями качества наблюдения (ПКН).

ПКН МСПН является одним из наиболее важных показателей эффективности ее функционирования, при оценке которого обычно учитывается некоторая обобщенная совокупность разнообразных факторов. ПКН являются: дальность обнаружения подводного объекта, площадь зоны обзора МСПН, СКО оценки комплексных параметров движения подводного объекта, время выработки решения об обнаружении подводного объекта, вероятность правильной классификации обнаруженных подводных объектов.

Если в процессе функционирования МСПН каждый из выбранных или заданных ПКН принимает только экстремальные значения, т.е. при применении алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю обеспечивается требуемая эффективность функционирования МСПН, то и значение показателя эффективности системы также является оптимальным.

Однако, на практике такая идеальная ситуация встречается крайне редко, поскольку использование при решении единой (общей) оптимизационной задачи

множества разных критериев оптимальности, как правило, приводит к дополнительной и весьма сложной проблеме – согласованию различных требований или частных решений.

Следует отметить, что в большинстве случаев решение вопросов повышения эффективности МСПН сводится к поиску взвешенного компромисса между точностью решения задачи обнаружения подводных объектов и длительностью времени, необходимого для получения результатов, а также устойчивостью работы алгоритма в аварийных (сбойных) ситуациях, возникающих по техническим, программным, информационным, организационным или иным причинам.

Задача сравнительной оценки эффективности методов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю для ПКН МСПН – $R_{пкн}$, основывается на оценке величины отклонений показателя эффективности R метода, при различных вариантах применения математического описания [169] и, следовательно, функционирования при решении задач по обнаружению малоразмерного подводного движущегося объекта, в виде:

$$\Delta R_{пкн} = R_{(a)} - R_{(b)}, \quad (5.1)$$

где $R_{(a)}$ – эффективность предлагаемого к реализации метода обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю

$R_{(b)}$ – эффективность классического алгоритма обработки.

Условием корректности при сравнительной оценке эффективности алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю, является единство входных данных по параметрам среды, характеристикам малоразмерных подводных движущихся целей.

Следовательно, для проведения такой сравнительной оценки, как правило, применяются одни и те же записи гидроакустической информации.

5.2. Методика оценки эффективности разработанных алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю

В основе методики оценки эффективности алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю для ПКН МСПН применяется следующая первоначальная информация (исходные данные):

- формализованные описания входных полей сигнала и помехи, канала распространения (в лучевом приближении);

- математические описания классических и предлагаемых алгоритмов (сами алгоритмы);

- расчет показателей эффективности;

- сопоставительная оценка;

- статистическая оценка полученных результатов на базе имитационной модели (методом Монте-Карло).

Обобщенная блок-схема программного обеспечения, производящего сопоставительную оценку эффективности алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю для ПКН МСПН показана на рисунке 5.1.

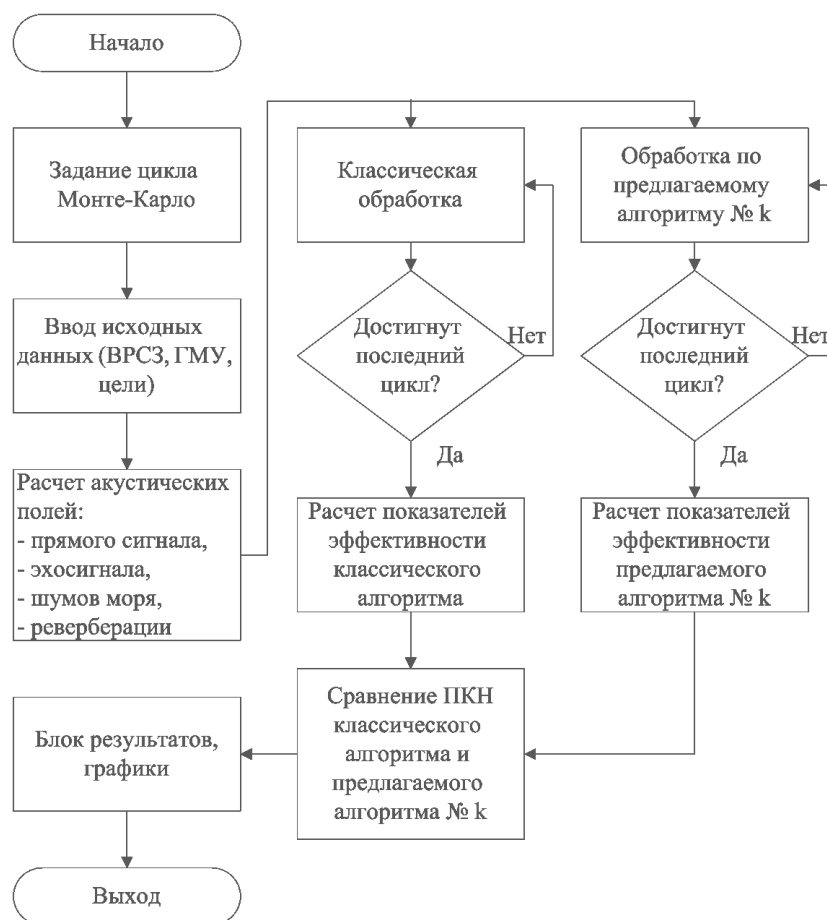


Рисунок 5.1. Обобщенная блок-схема программного обеспечения, производящего сопоставительную оценку эффективности алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю для ПКН МСПН.

Оценка эффективности алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю для ПКН МСПН производится путем следующей последовательности действий, с учетом блоков алгоритмов и стандартных математических процедур:

1. Задается число циклов моделирования с применением метода Монте-Карло.
2. Задаются исходные данные для расчета входных сигналов, принимаемых ГЛС в составе МСПН: ВРСЗ, ГМУ, структура МСПН, характеристики ГЛС и целей.
3. Производится расчет характеристик гидроакустических полей сигналов и помех (применяемые математические модели приведены в главе 1):
 - первичного гидроакустического поля (поля прямого сигнала);
 - вторичного гидроакустического поля (поля эхосигнала);

- поля реверберации;
- поля шумов моря.

4. По полученным характеристикам гидроакустических полей сигналов и помех рассчитываются входные сигналы, принимаемые ГЛС в составе МСПН.

5. Производится обработка входных сигналов с применением различных алгоритмов – классического и предлагаемых:

- алгоритмов адаптивной режекции прямого поля (глава 2);
- алгоритмов идентификации обнаруженных эхо-сигналов и комплексирования их параметров (глава 3);
- алгоритмов позиционирования ГЛС (глава 4).

6. Для статистической оценки полученных результатов шаги 4 и 5 повторяются для каждого цикла моделирования с применением метода Монте-Карло.

7. Вычисляются показатели эффективности по результатам применения различных алгоритмов:

- результирующее отношение сигнал/помеха – параметр, который определяет вероятность правильного обнаружения цели (для заданной вероятности ложной тревоги);
- точность (СКО) оценки координат цели и параметров ее движения;
- точность (СКО) оценки положения (координат и угла поворота) ГЛС в составе МСПН.

8. Сравнение ПКН достигаемых при использовании различных алгоритмов.

9. Представление полученных результатов в виде графиков.

Проведен анализ полученных результатов по эффективности вышеописанных алгоритмов обработки гидроакустической информации по вторичному гидроакустическому полю для ПКН МСПН.

В качестве ПКН МПСН в работе применены вероятность правильного обнаружения цели и точности оценки (или СКО) местоположения цели и параметров ее движения (скорость, курс).

Вероятность правильного обнаружения цели рассчитывается по рабочей характеристике ГЛС (зависимости вероятности правильного обнаружения от ОСП при фиксированной вероятности ложной тревоги).

Обозначим P_D – среднюю вероятность правильного обнаружения по всей зоне обзора ГЛС (под зоной обзора будем считать дистанцию R_0 , в пределах которой вероятность обнаружения цели превышает 0.9) в отсутствие мешающих сигналов.

При наличии мешающего сигнала посреди зоны обзора возникает «мертвая зона», протяженность которой R_M определяется длительностью мешающего сигнала ($R_M=0.5 \cdot T \cdot c$, где T – длительность мешающего сигнала, c – скорость звука).

Вероятность обнаружения цели в пределах мертвой зоны без режекции мешающего сигнала близка к нулю. В данном случае среднее значение вероятности правильного обнаружения цели по всей зоне обзора будет равно:

$$P_{DM} = \frac{1}{R_0} ((R_0 - R_M) \cdot P_D + R_M \cdot 0) = P_D \cdot \frac{R_0 - R_M}{R_0} + 0 \cdot \frac{R_M}{R_0}. \quad (5.2)$$

Предлагаемые в данной диссертационной работе методы режекции мешающих сигналов и, соответственно, реализующие их алгоритмы предназначены для увеличения ОСП в мертвой зоне.

Как показывают результаты математического моделирования, а также практика применения предлагаемых алгоритмов в натурных экспериментальных исследованиях, в случае применения алгоритмов режекции ОСП в мертвой зоне увеличивается (рисунок 5.2). Увеличение ОСП приводит и к увеличению вероятности обнаружения цели до величины P_D^* . В данном случае среднее значение вероятности правильного обнаружения цели по всей зоне обзора будет определяться следующим выражением:

$$P_{DR} = P_{DM} + P_D^* \cdot \frac{R_M}{R_0}. \quad (5.3)$$

Отношение средней по зоне обзора вероятности обнаружения цели при применении алгоритмов режекции к средней вероятности без режекции:

$$\frac{P_{DR}}{P_{DM}} = \frac{(P_D(R_0 - R_M) + P_D^* R_M) \cdot R_0}{R_0 \cdot P_D(R_0 - R_M)} = 1 + \frac{P_D^*}{P_D} \cdot \frac{R_M}{R_0 - R_M}. \quad (5.4)$$

На рисунках 5.2 и 5.3 приведены графики ОСП в зоне, засвеченной прямым сигналом, и диаграмма, отображающая эффективность МПСН.

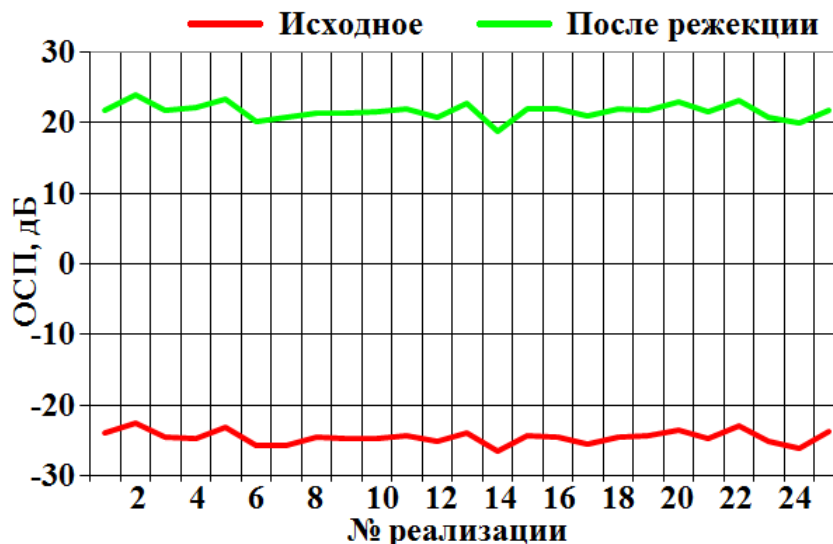


Рисунок 5.2. ОСП в зоне, засвеченной прямым сигналом.

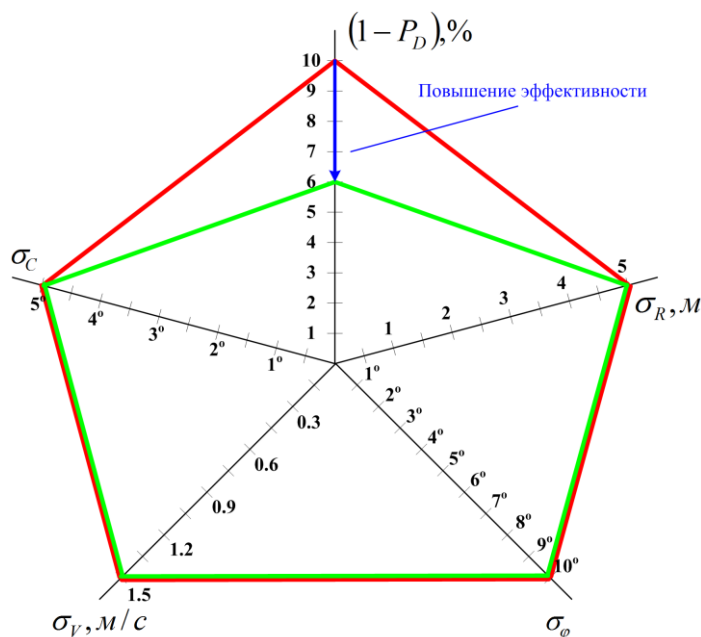


Рисунок 5.3. Диаграмма, отображающая эффективность МПСН при применении алгоритмов режекции мешающих сигналов.

На рисунке 5.2. приведены графики ОСП, полученные путем математического моделирования с применением метода Монте-Карло, для случайных реализаций помех (реверберации и шумов моря). Ось абсцисс соответствует порядковому номеру цикла вычисления случайных реализаций

помех (номеру цикла математического моделирования с применением метода Монте-Карло).

Различный цвет графиков соответствует обработке сигналов с применением следующих алгоритмов:

- классическая обработка без режекции (красный график, среднее ОСП равно минус 24 дБ);
- адаптивная режекция мощного прямого поля при неизвестных мешающих сигналах (зеленый график, среднее ОСП равно 21.5 дБ).

На рисунке 5.3 приведена диаграмма эффективности МСПН при применении алгоритмов режекции мешающих сигналов. Вдоль лучей диаграммы отложены следующие величины, количественно описывающие ПКН:

- средняя по всей зоне обзора МСПН вероятность пропуска цели, которая равна единице минус вероятность правильного обнаружения ($1 - P_D$);
- СКО оценки местоположения цели (σ_R и σ_φ – СКО дистанции и пеленга соответственно);
- СКО оценки параметров движения цели (σ_V и σ_C – СКО скорости и курса соответственно).

Из диаграммы видно, что алгоритмы режекции влияют только на вероятность пропуска цели, а, следовательно, и на вероятность правильного обнаружения.

Приращение средней по зоне обзора вероятности правильного обнаружения по результатам математического моделирования составляет от 2 до 10%. Данные результаты также подтверждаются практикой экспериментальных исследований, где получен диапазон увеличения средней по зоне обзора вероятности правильного обнаружения от 2 до 7%.

Как видно из формул (5.3) и (5.4) максимальное приращение средней вероятности правильного обнаружения определяется размером мертвой зоны, которая в свою очередь зависит от количества и длительности мешающих сигналов, и вероятностью правильного обнаружения (или ОСП) после режекции мешающих сигналов. На результирующее ОСП оказывают влияние следующие

факторы (и их изменение с течением времени): ВРСЗ, ГМУ, расположение ГЛС в структуре МСПН.

ПКН – точности оценки местоположения цели определяется следующими факторами: непосредственно точностью ГЛС по оценке дистанции и пеленга цели, а также точностью позиционирования самой ГЛС. В свою очередь, точность оценки параметров движения цели пропорциональна точности оценки ее координат.

Предлагаемые в данной диссертационной работе методы идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров и, соответственно, реализующие их алгоритмы предназначены для увеличения собственной точности ГЛС (уменьшения СКО оценки дистанции и пеленга цели).

Как показывают результаты математического моделирования, приведенные на рисунках 5.4 и 5.5, а также практика применения предлагаемых алгоритмов в натурных экспериментальных исследованиях, в случае применения вышеописанных алгоритмов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров СКО оценки координат целей уменьшается.



Рисунок 5.4. СКО оценки координат цели.

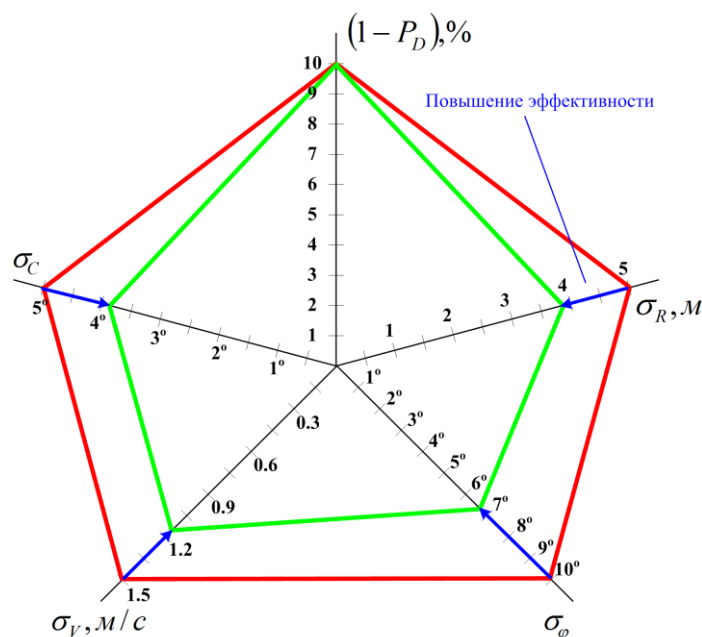


Рисунок. 5.5. Диаграмма, отображающая эффективность МСПН, при применении алгоритмов идентификации целей и комплексирования их параметров.

На рисунке 5.4. приведены графики СКО оценок координат цели, полученные путем математического моделирования с применением метода Монте-Карло, для случайных реализаций помех. Ось абсцисс соответствует порядковому номеру цикла вычисления случайных реализаций помех (номеру цикла математического моделирования с применением метода Монте-Карло).

Различный цвет графиков соответствует следующей обработке:

- классическая обработка (красный график, средняя ошибка 4.1 м);
- обработка с последовательным применением предлагаемых алгоритмов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров (зеленый график, средняя ошибка 0.4 м).

При применении предлагаемых алгоритмов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров уменьшение СКО оценки координат целей по результатам математического моделирования составляет от 10 до 20 раз. Данные результаты также подтверждаются практикой экспериментальных исследований, где СКО оценки координат целей и, следовательно, параметров их движения уменьшаются в диапазоне от 3 до 10 раз.

Получаемые результаты в первую очередь определяются точностью пересчета времени распространения эхо-сигналов от целей в соответствующие

дистанции. Указанная точность пересчета времени в дистанцию зависит от точности, с которой измерено ВРСЗ, а также от степени его изменчивости с течением времени и по пространству в акватории функционирования МСПН. Также оказывают влияние на результаты (в меньшей степени) ГМУ и расположение ГЛС в структуре МСПН.

Приведенные на рисунке 5.4 результаты получены с учетом предположения исключения факторов воздействия подводных течений и процессов, влияющих на неподвижность установки выносных частей ГЛС в составе МСПН.

Однако в случае подвижности ГЛС под влиянием факторов воздействия подводных течений и процессов, влияющих на неподвижность установки выносных частей ГЛС в составе МСПН, к ошибкам оценки координат целей добавляется еще одна компонента, обусловленная ошибкой в местоположении самой ГЛС, что приводит к увеличению результирующих ошибок оценки координат целей.

На рисунке 5.5 приведена диаграмма эффективности МСПН при применении алгоритмов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров. При построении данной диаграммы предполагается, что составляющие ошибок оценки местоположения цели, обусловленные собственной точностью ГЛС и точностью позиционирования ГЛС, независимы, т.е. суммируются дисперсии этих компонент ошибки. Таким образом, несмотря на существенное увеличение собственной точности ГЛС (рисунок 5.4), ошибки оценки местоположения целей снижаются менее чем в 2 раза, так как дальнейшее снижение ошибок ограничивается точностью позиционирования ГЛС.

Точность позиционирования ГЛС в классическом случае определяется способом постановки ГЛС на позиции (неподвижно на дне или на каком-либо сооружении, либо с возможностью перемещения в некоторых пределах, например, растяжка с помощью якоря и плавучести посреди волновода) и используемыми техническими средствами (встроенный в ГЛС компас).

В случае неподвижной постановки ГЛС ее местоположение определяется с высокой точностью (СКО менее метра) и не изменяется с течением времени. В этом случае дополнительное позиционирование ГЛС не требуется.

Однако при постановке ГЛС с помощью растяжки якорь-плавучесть, ее местоположение может изменяться в зависимости от течений в пределах, определяемых длиной якорного троса (до нескольких десятков метров), а угол поворота может изменяться в пределах от 0 до 360 градусов. Точность оценки угла поворота в данном случае определяется характеристиками собственного компаса ГЛС (СКО в данном случае составляет несколько градусов).

Предлагаемые в данной диссертационной работе методы позиционирования ГЛС и, соответственно, реализующие их алгоритмы предназначены для увеличения точности оценки собственных координат и угла поворота ГЛС. Как показывают результаты математического моделирования, приведенные на рисунках 5.6 – 5.8, а также практика применения предлагаемых алгоритмов в натуральных экспериментальных исследованиях, ошибки оценки положения ГЛС с применением вышеописанных алгоритмов уменьшаются.

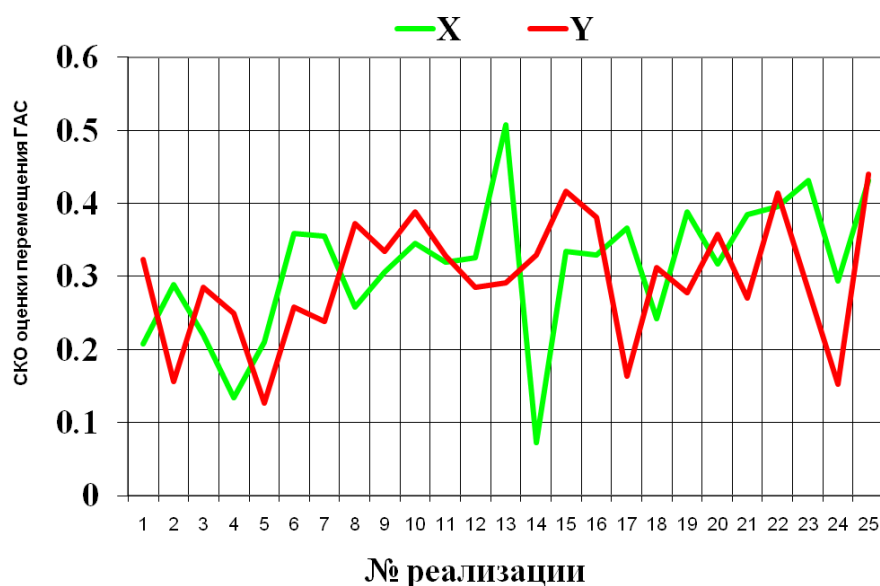


Рисунок 5.6. СКО оценки изменения координат ГЛС вдоль двух взаимно перпендикулярных осей (метры).

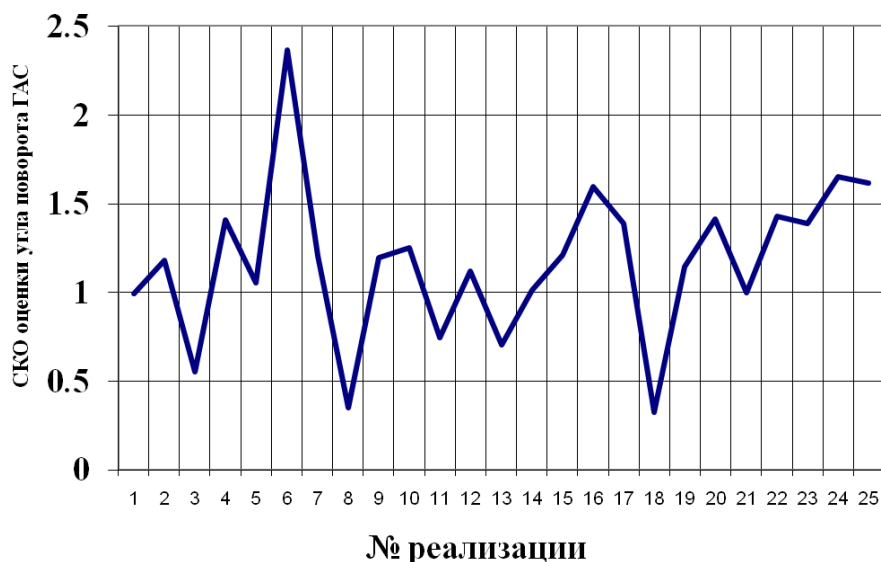


Рисунок 5.7. СКО оценки угла поворота ГЛС (градусы).

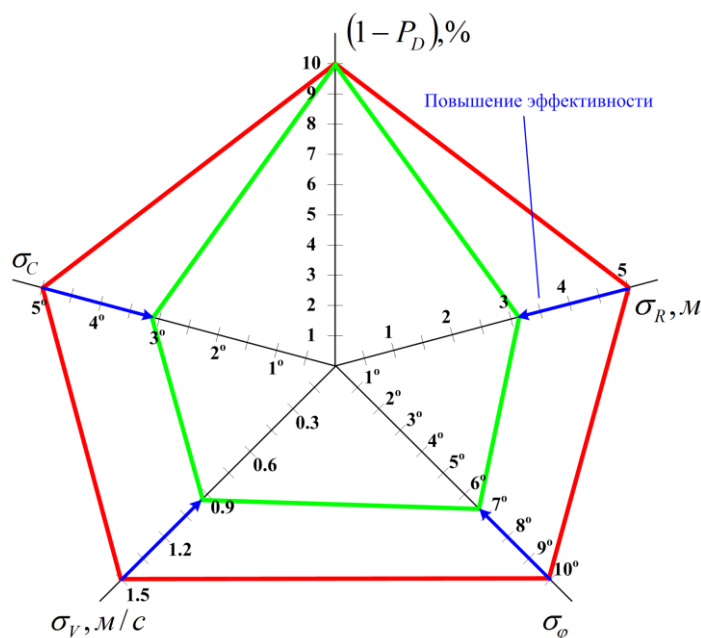


Рисунок 5.8. Диаграмма, отображающая эффективность МСПН при применении алгоритма позиционирования ГАС по неподвижным отражателям.

На рисунках 5.6 и 5.7 приведены графики СКО оценки местоположения ГЛС вдоль двух взаимно перпендикулярных осей и СКО оценки угла ее поворота соответственно при использовании алгоритма позиционирования по неподвижным отражателям. Графики получены путем математического моделирования с применением метода Монте-Карло, для случайных реализаций помех. Ось абсцисс на рисунках 5.6 и 5.7 соответствует порядковому номеру цикла вычисления случайных реализаций помех (номеру цикла математического моделирования с применением метода Монте-Карло).

При применении предлагаемого алгоритма позиционирования по неподвижным отражателям уменьшение СКО оценки координат ГЛС по результатам математического моделирования составляет от 10 до 20 раз, уменьшение СКО оценки угла поворота ГАС – от 5 до 10 раз. Данные результаты также подтверждаются практикой экспериментальных исследований (испытания экспериментального образца ГАС на Черном море), где СКО оценки координат ГЛС уменьшается в 5 – 10 раз, а СКО оценки угла поворота ГЛС – в 3 – 5 раз.

В данном случае получаемые результаты также в первую очередь определяются точностью пересчета времени распространения сигналов в соответствующие дистанции. Указанная точность пересчета времени в дистанцию зависит от точности, с которой измерено ВРСЗ, а также от степени его изменчивости с течением времени и по пространству акватории, в которой функционирует МСПН. Также оказывают влияние на результаты (в меньшей степени) ГМУ и расположение ГЛС в структуре МСПН.

На рисунке 5.8 приведена диаграмма, на которой наглядно представлен вклад алгоритма позиционирования ГЛС по неподвижным отражателям в эффективность МСПН. При построении данной диаграммы также предполагается, что составляющие ошибок оценки местоположения цели, обусловленные собственной точностью ГЛС и точностью позиционирования ГЛС, независимы, т.е. суммируются дисперсии этих компонент ошибки. Таким образом, несмотря на существенное увеличение точности позиционирования ГЛС (рисунки 5.6 и 5.7), ошибки оценки местоположения целей снижаются менее чем в 2 раза, так как дальнейшее снижение этих ошибок ограничивается собственной точностью ГЛС.

Для дальнейшего снижения СКО оценки координат целей и, следовательно, СКО оценки параметров их движения необходимо единовременное применение вышеописанных алгоритмов позиционирования ГЛС с алгоритмами идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров. На рисунке 5.9 приведена диаграмма эффективности МСПН, получаемая при применении всего комплекса, разработанных в рамках диссертационного исследования, методов повышения эффективности функционирования МСПН.

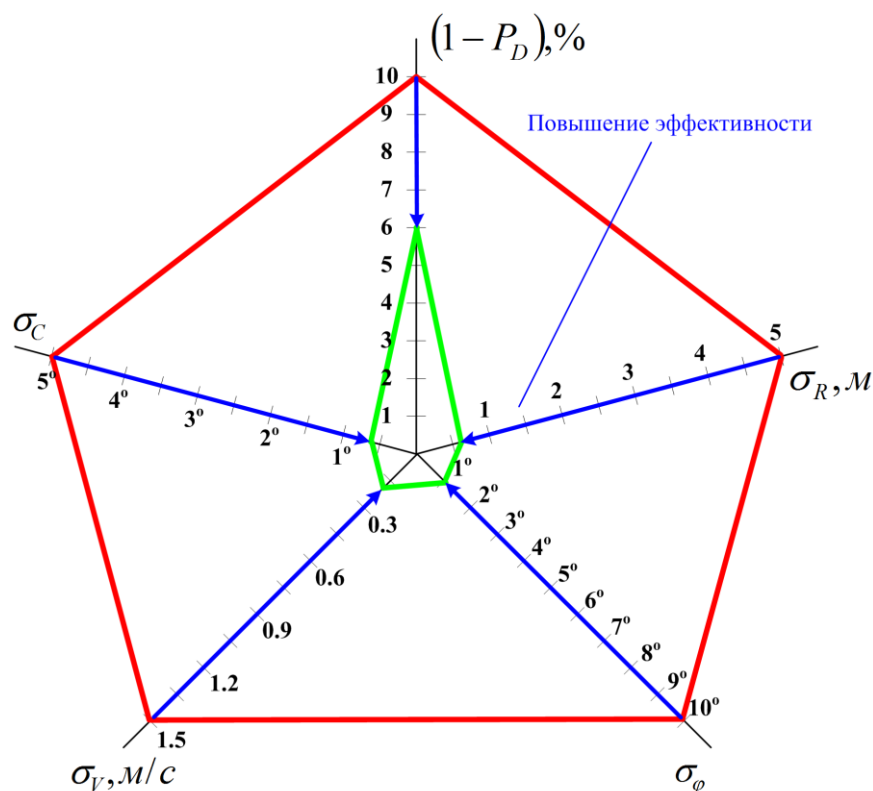


Рисунок 5.9. Диаграмма, отображающая эффективность МСПН при применении всего комплекса предлагаемых алгоритмов.

На рисунке 5.9 приведена диаграмма эффективности МСПН, на которой наглядно представлен суммарный вклад всего комплекса разработанных методов повышения эффективности функционирования МСПН, а также реализующих их алгоритмов. Вдоль лучей диаграммы отложены следующие величины: средняя по всей зоне обзора МСПН вероятность пропуска цели, которая равна единице минус вероятность правильного обнаружения ($1 - P_D$), СКО оценки местоположения цели (σ_R и σ_φ – СКО дистанции и пеленга соответственно), СКО оценки параметров движения цели (σ_V и σ_C – СКО скорости и курса соответственно). Данная диаграмма построена при предположении статистической независимости компонент ошибок оценки местоположения цели, обусловленных собственной точностью МСПН и точностью позиционирования ГЛС.

Результаты, полученные для отдельных ПКН, пересчитываются в комплексный количественный критерий эффективности МСПН: вероятность перехвата подводного объекта силами охраны. Как видно из графиков,

представленных на рисунке 5.10, указанная вероятность сильно зависит от характеристик применяемых спецсредств (например, радиуса действия – $R_{\text{ССПЦ}}$).

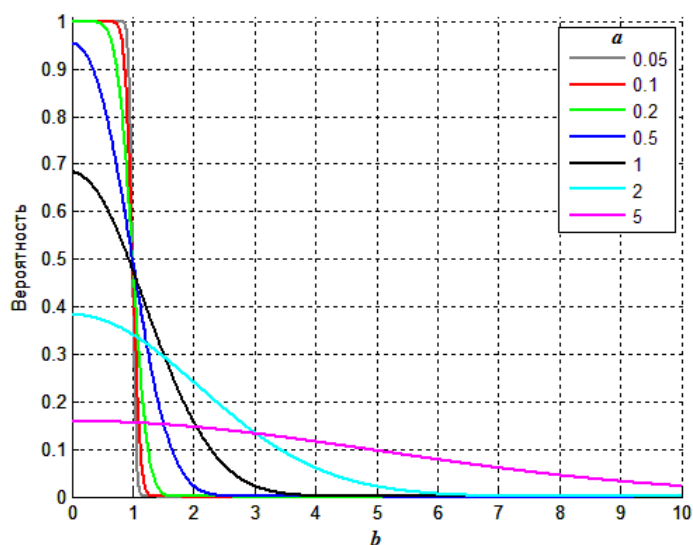


Рисунок 5.10.

На рисунке 5.10 параметр $a = \sigma_{\text{МСПН}}/R_{\text{ССПЦ}}$ – отношение СКО оценки координат цели к радиусу действия спецсредств, параметр $b = \Delta_{\text{МСПН}}/R_{\text{ССПЦ}}$ – отношение смещения оценки координат цели к радиусу действия спецсредств. Из приведенных на рисунке 5.10. графиков видно, что при величине смещения оценки местоположения цели равной радиусу действия спецсредств вероятность одноактного перехвата цели снижается до 0.5 и продолжает быстро снижаться с увеличением смещения; а рост СКО оценки местоположения цели приводит к уменьшению предельно достижимой вероятности одноактного перехвата цели.

5.3. Выводы

1. Разработана методика оценки вклада в эффективность функционирования МСПН алгоритмов, реализующих предлагаемые методы повышения эффективности.

2. Проведена оценка повышения эффективности функционирования МСПН, при применении алгоритмов, реализующих предлагаемые методы повышения эффективности функционирования МСПН, как по отдельности, так и комплексно.

3. Полученные результаты подтверждают существенное увеличение эффективности МСПН при использовании алгоритмов, реализующих предложенные методы повышения эффективности функционирования МСПН, особенно при комплексной реализации данных методов – увеличение эффективности функционирования МСПН при применении высокоточных спецсредств составляет до 50 %.

Заключение

1. Разработанные методы адаптивной режекции мощного прямого поля, позволяют уменьшить уровень прямых сигналов соседних ГЛС в составе МСПН до 1000 раз, что приводит к увеличению вероятности обнаружения движущихся подводных объектов в зоне влияния мешающих сигналов на 80 % и более.

2. Разработанные методы идентификации обнаруженных МСПН эхо-сигналов и комплексирования их параметров:

- 2.1. повышают точность оценки координат подводных объектов в 3 – 10 раз по сравнению с оценкой по одному моностатическому эхо-сигналу,
- 2.2. сопоставляют все обнаруженные МСПН эхо-сигналы соответствующим целям и передают на дальнейшую обработку (траекторный анализ) только одну отметку от каждой цели, что увеличивает ее быстродействие и эффективность.

3. Разработанные методы динамического позиционирования (уточнения координат и ориентации) ГЛС в составе МСПН уменьшают смещение оценки координат подводных объектов в 3 – 5 раз.

4. Разработанный метод оценки дистанции до удаленного источника звука и его глубины позволяет оценить данные параметры с достаточной в практических задачах точностью.

5. Методика оценки вклада разработанных методов в эффективность функционирования МСПН, позволила количественно оценить суммарный вклад комплекса разработанных методов в повышение эффективности, который в случае применения высокоточных спецсредств составляет до 50 %.

Список сокращений

АКФ	Автокорреляционная функция
АНПА	Автономный обитаемый подводный аппарат
АР	Антенная решетка
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
БСЦ	Бистатическая сила цели.
БЭР	Бистатический эквивалентный радиус
ВКФ	Взаимокорреляционная функция
ВМС	Военно-морские силы
ВРСЗ	Вертикальное распределение скорости звука
ГАК	Гидроакустический комплекс
ГАС	Гидроакустическая станция
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ГЛС	Гидролокационная станция
ГМУ	Гидрометеосоусловия
ЗС	Зондирующий сигнал
ЛЧМ	Линейная частотная модуляция
МСПН	Мультистатическая система подводного наблюдения
ОСП	Отношение сигнал-помеха
ПКН	Показатель качества наблюдения
РЛС	Радиолокационная станция
СКО	Среднеквадратичное отклонение
СФ	Согласованный фильтр, согласованная фильтрация
ТКЦ	Текущие координаты цели
ХН	Характеристика направленности
GPS	Global Positioning System

Список литературы

1. Бакут П.А. и др. Обнаружение движущихся объектов. М.: Сов. Радио, 1980 г.
2. Гермаер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций, М.: Наука, 1971 г.
3. Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей. М.: Воениздат, 1979 г.
4. Красовский П.А, Цыганков С.Г., Теверовский Г.В. Проблема измерения гидроакустических характеристик морских объектов. «Новый оборонный заказ. Стратегии» № 3 (10) 2010.
5. Мишин В. Л., Матишов Г.Т. Морские технические системы двойного назначения. Апатиты, 2000 г.
6. Пивак А.И., Савченко А.Х. Комплексный подход по организации защиты с морских направлений важных государственных объектов от противоправной деятельности террористических группировок. Труды 3 Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: 2000 г, приложение № 6 к альманаху Защита и безопасность.
7. Соловьев И.В., Корольков Г.Н., Бараненко А.А., Баранов М.Н, и др. Морская радиоэлектроника (краткий справочник посвященный 60-летию РТС ВМФ). Спб.: Политехника, 2003 г., 245 с.
8. Афанасьев А.А., Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей радиотехническими средствами наблюдения, Воениздат, 1964 г.
9. Иностранная печать о техническом оснащении полиции капиталистических государств. ВИНТИ АН СССР. М.: № 7-1989 г, №12, № 10 – 1991 г.
10. Force 2001. Vision...Presence...Power... A Program Guide to the U.S. Navy 1997 Edition. Deputy Chief of Naval Operations. Resources, Warfare Requirements, and Assessments (N8). Washington D.C. 20350-2000, 1997. p.112.
11. Koopman B.O. Theory of search: 3.The optimum distribution of searching efforts /Operations Research.-1956.-v.4, No.5.

12. Science and Technology Requirements Guidance (STRG). Department of the Navy. Chief of Naval Operations. Director, Test and Evaluation and Technology Requirements N091. July 1997. p. 145.

13. Блинова Л.П., Колесников А.Е. Ланганс Л.Б. Акустические измерения. М.: Стандартов, 1971 г., 273 с.

14. Клюкин И. И., Колесников А. Е., Акустические измерения в судостроении, 2 изд., Л., 1968.

15. Ольшевский В.В. «Характеристики обнаружения эхо-сигналов при использовании корреляционного и квадратичного детектирования в гидролокационных системах поиска биологических объектов» // Акустический журнал, 1973, 19, 1, с. 60-66.

16. А.Г. Голубков Гидролокатор дельфина, Л.: Судостроение, 1977, 95 с.

17. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике, Л.: Судостроение, 1989, 145 с/

18. В.С. Давыдов Распознавание в гидролокации, СПб 2005, издательство Спб ЭТУ «ЛЭТИ», публикация в авторской редакции.

19. Д. Кейсенсент Оптическая обработка информации. М.: Мир, 1980, 349 с.

20. A. Farina and E. Hanle, "Position accuracy in netted monostatic and bistatic radar," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 19, no. 4, pp. 513–520, Oct. 1983.

21. Бородина Е.Л., Горская Н.В., Горский С.М., Зверев В.А., Николаев Г.Н., Хилько А.И., Широков В.Н. «Многоракурсные системы видения в плоскостной среде», Акустический журнал, 41, 2, с. 185-193 (1995).

22. Смирнов И.П., Хилько А.А. Томография неоднородностей мелкого моря при зондировании фокусированным высокочастотным акустическим полем / Труды Нижегородской акустической научной сессии. ТАЛИАМ, 2007. С. 160-162.

23. Erdinc, O., Willett, P., and Coraluppi, S. (2007), Sonobuoy placement for optimal multistatic detection and localization, ISIF Journal of Advances in Information Fusion, 2(3), 22–34.

24. Смирнов И.П., Хилько А.А. «Наблюдение перемещающихся локализованных неоднородностей в мелком море с помощью ВЧ акустической

томографии / Труды Нижегородской акустической научной сессии / Ред. А.В. Якимова Нижний Новгород: ГАЛАМ, 2008.

25. Лазарев В.А., Мазанников А.А., Неронов А.Н., Хилько А.А. «Экспериментальная оценка параметров сферы с помощью высокочастотных частотно модулированных гидроакустических импульсов», *Акустический журнал*, 55, 2, с. 198-207 (2009).

26. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Трофимов А.Т., Трусова О.И., Тихомиров М.М., Хилько А.А., Малеханов А.И., Коваленко В.В., Хилько А.И. «Высокочастотное акустическое наблюдение неоднородностей в мелком море с неровным дном в присутствии сильной реверберации», *Акустический журнал*, 57, 5, с. 642-648 (2011).

27. Хилько А.И., Смирнов И.П., Машошин А.И., Шафранюк А.В., Хилько А.А. «Сила цели в океанических волноводах», *Акустический журнал*, 61, 3, с. 377-386 (2015).

28. S. Coraluppi and D. Grimmer, "Multistatic sonar tracking," in *Proc. SPIE Conf. Signal Process., Sensor Fusion, Target Recognit. XII*, Orlando, FL, Apr. 2003, pp. 399–410.

29. S. Coraluppi, "Multistatic sonar localization analysis" NURC Rep. SR-377, Jun. 2003.

30. S. Coraluppi, C. Carthel, "Distributed tracking in multistatic sonar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 41, No. 3 July 2005*, pp. 1138–1147.

31. S. Coraluppi, "Multistatic sonar localization," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 964–974, Oct. 2006.

32. S. Kim, B. Ku, W. Hong, and H. Ko, "Performance comparison of target localization for active sonar systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, no. 4, pp. 1371–1380, Oct. 2008.

33. Daun, M. & Ehlers, F. (2010). Tracking Algorithms for Multistatic Sonar Systems. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2010, 2010.

34. D. Orlando and F. Ehlers (2011). *Advances in Multistatic Sonar*, Sonar Systems, Prof. Nikolai Kolev (Ed.), ISBN: 978-953-307-345-3, InTech, 2011, 334 p.

35. S. Schoenecker, P. Willett, Y. Bar-Shalom, "Maximum likelihood probabilistic multi-hypothesis tracker applied to multistatic sonar data sets," *Proc. SPIE 8050, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XX*, 80500A (5 May 2011)

36. Е.Л. Шейнман, И.С. Школьников Идентификация сигналов и оценка координат объектов, обнаруженных в ненаправленных системах при полистатическом режиме гидролокации. *Гидроакустика/HYDROACOUSTICS*, 2011г. Вып.13 (1).

37. M. Sandys-Wunsch and M. Hazen, "Multistatic localization error due to receiver positioning errors," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 328–334, Apr. 2002.

38. S. Blouin, "Multistatic localization error bound due to transducers' location uncertainties," *Defence R&D Canada Sci. Rep. DRDC-RDDC-2014-R19*, May 2014

39. А.А. Покровский, В.Ф. Емельяненко «О реализации мультистатической системы наблюдения на основе дрейфующих приемно-излучающих элементов» // *Экологические системы и приборы №12 2015*, с. 22-25.

40. В.В. Колесниченко, И.А. Соскунова, И.С. Школьников, А.Л. Шутов. Вопросы точности определения координат и параметров движения цели в режимах моно – и мультистатической активной гидролокации. *Гидроакустика/HYDROACOUSTICS*, 2013г. Вып.17 (1).

41. В.В. Колесниченко, И.А. Соскунова, И.С. Школьников, А.Л. Шутов, Некоторые вопросы эффективности режима мультистатической активной гидролокации. *Гидроакустика/Hydroacoustics*, 2014г. Вып.19 (1)

42. С. Пичугин Состояние и перспективы развития систем гидроакустического наблюдения ВМС США. [Электронный ресурс] / С. Пичугин // *Зарубежное военное обозрение № 6, 2010. С. 61-70.* – Режим доступа: http://pentagonus.ru/publ/materialy_posvjashheny/2000_nastojashhij_moment/sostojani

[e i perspektivy razvitiya sistem gidroakusticheskogo nabljudeniya vms ssha/122-1-0-1585](http://www.findpatent.ru/patent/261/2611556.html)

43. Патентный поиск. [Электронный ресурс] / FindPatent.ru, 2012–2017 г. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/261/2611556.html>
44. Простаков А.Л. Электронный ключ к океану, Л., Судостроение, 1986, с. 69.
45. Тарасюк Ю.Ф. Измеритель XSV для ВМС США. Судостроение за рубежом, 1979, 4, с. 90-93.
46. Океанографические таблицы, Л., Гидрометеиздат, 1975 г.
47. Г.В. Лоскутова, К.И. Палканов "Пространственно-частотные и частотно-волновые методы описания и обработки гидроакустических полей", СПб: Наука, 2007 г., С. 108–135.
48. Г.С. Малышкин "Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов", т. 1 "Оптимальные методы", СПб: Электроприбор, 2009 г., с. 175–185.
49. Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер, Адаптивные антенные решетки, М: Радио и связь, 1986, с. 100-101.
50. А.П. Сташкевич. Акустика моря, Ленинград "Судостроение", 1966, с. 314.
51. «Модель зон обнаружения морской РЛС» П.В. Николаева и Н.В. Самбурова, «Радиотехника», Журнал «Электромагнитные волны и электронные системы» №10 за 2014 г., с. 12-17.
52. Я.А. Ивакин Изделие «Онтомап В2». Программно-аппаратный комплекс гидроакустических расчетов. [Электронный ресурс] / Я.А. Ивакин // СПИИРАН – Режим доступа: <http://www.spiiras.nw.ru/ru/scientific-activity/unique-equipment.html>.
53. Акустика океана. Под. ред. Л.М. Бреховских // М.: Наука, 1974, 657 с.
54. Сухаревский Ю.М. Статистика основных акустических параметров глубоководных районов океана и вероятностная дальность действия гидроакустических систем. Акустический журнал. 1995, т. 41, №5, с. 848-864.

55. Келлер Дж. Б., Пападакис Дж. С., Распространение волн и подводная акустика, М.: Мир. 1980.
56. Формирование акустических полей в океанических волноводах // сбор. науч. тр., Н.Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1991.
57. Ф.М. Морс, Г. Фешбах Методы теоретической физики. Т. 1, М., ИЛ, 1958. – 931 с.
58. Чупров С. Д., Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане //в кн.: Акустика океана. Современное состояние / под ред. Бреховских Л. М. и И. Б. Андреевой. М.: Наука. 1982. с. 71-91.
59. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. – 343 с.
60. Вадов Р. А., Затухание низкочастотного звука в океане //в кн.: Проблемы акустики океана / под ред. Л. М. Бреховских и И. Б. Андреевой., М.: Наука. 1984. с. 31-42.
61. Marsh H. M., Schulkin M. Sound absorption in sea water., J. Acoust. Soc. America, 1962, vol. 34, N 6, p. 864-865.
62. Schulkin M., Marsh H. W., Low-frequency sound absorption in the ocean., J. Acoust. Soc. America, 1978, vol. 63, N 1, p. 43-48.
63. Thorp W. H., Browning D. G., Attenuation of low frequency sound in the ocean., J. Sound and Vibration, 1973, vol. 26, N 4, p. 576-578.
64. Sheehy M. T., Hallley R., Measurement of the attenuation of low-frequency underwater sound., J. Acoust. Soc. America, 1957, vol. 29, N 4, p. 464-469.
65. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Гидрометеиздат, Ленинград, 1982.
66. Агеева Н. С., Звуковое поле сосредоточенного источника в океане// в кн.: Акустика океана/, М., 1974, с. 169-229.
67. Ahluwalia D. S., Keller J. B., Exact and asymptotic representations of the sound field in a stratified ocean // In: Wave propagation and underwater acoustics/ Ed. by J. B. Keller, J. S. Papadakis/, Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1977, p. 14-84.

68. Hale F. E., Long-range sound propagation in the deep ocean, J. Acoust. Soc. America, 1961, vol. 33, N 4, p. 456-464.
69. Метсавезр Я. И., Векслер Н.Д, Стулов А.С. Дифракция акустических импульсов на упругих телах, М, Наука, 1979, 239 с.
70. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Пер. с англ., Л, судостроение, 1978, 448 с.
71. Штагер Е.А. Чаевский Е.В. Рассеивание волн на телах сложной формы. М., Советское радио, 1974, 240 с.
72. Виролянский А.Л. О временной структуре импульса в подводном звуковом канале // акустический журнал, 1985, Т31, вып.6.
73. Волощенко В.Ю, Максимов В.Н., Тимошенко В.И. Параметрическая акустическая система для классификации объектов лоцирования // Акустика и ультразвук, техника: Межвуз, 1986, вып. 21.
74. Митько В.Б., Евтютов А.П., Гуцин С.Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения, Л, Судостроение, 1982, 200 с.
75. Прокофьев С. Совершенствование подводных средств доставки сил специальных операций ВМС США, Зарубежное военное обозрение №8-2000.
76. Константинов В. Военно-морские силы США – курс в XXI век (Основные направления развития подводных сил) ЗВО – 11/2000.
77. Колесников Ю. Морской спецназ. Изд-во Яуза, 2004 г-376 с.
78. Пономарев А. И., Устинович В. В. Состояние и перспективы развития систем освещения подводной обстановки военно-морских сил США и НАТО. М.: ВНИИ системных исследований, 1986.
79. Якутов И.Н. Математическое моделирование при экономическом обосновании при разработке и выборе СОО ПНТ (Отчет по НИР Эффективность, гл. 3). // ЦНИИ Курс, 2002.
80. Матишов Г.Т, Симоненко С.В, Максимов Н.М. Морские млекопитающие на страже стратегических объектов, Вестник РАН, 2005 г, т 75, № 9 стр.825-830.

81. Шмакова Р.А. под редакцией Дельфины служат флоту. Спб.: Подводное кораблестроение, 1998, вып. 12.
82. Курьянов Б. Ф., Подводные шумы океана //в кн.: Акустика океана. Современное состояние / Под ред. Л. М. Бреховских и И. Б. Андреевой, М.: Наука. 1982. С. 164-174.
83. Моисеев А. А., Поле собственных шумов случайно-неоднородного океана //Акуст. журн. 1987. Т. 33, № 6. с. 1105-1111.
84. Фурдуев А. В., Шумы океана //в кн.:Акустика океана/, М.: Наука. 1974. с. 615-691.
85. Фурдуев А. В., Спектры шумов океана и псевдозвуковые помехи звукоприему, Вопросы судостроения, сер. Акустика, 1978, вып. 10.
86. Авербах В. С, Бондарь Л. Ф., Голубев В. Н. и др., Дальняя поверхностная реверберация звука в океане, Акуст. журн. 1990. Т. 36. с. 29-33.
87. Андреева И. Б. Рассеяние звука поверхностью и приповерхностным слоем океана// в кн.: Акустика океана. Современное состояние / Под ред. Л. М. Бреховских и И. Б. Андреевой., М.: Наука, 1982. с. 118-132.
88. Галыбин Н. Н., Обратное рассеяние звука взволнованной поверхностью океана. Расчет и эксперимент,. Акуст. журн., 1976, т. 22 № 3, с. 343-350.
89. Ивакин А. И., Обратное рассеяние звука дном океана. Теория и эксперимент //в кн.: Акустика океанской среды / под ред. Л. М. Бреховских и И. Б. Андреевой, М.: Наука. 1989. с. 160-169.
90. Фукс И. М., О ширине спектра сигналов, рассеянных на взволнованной поверхности моря, Акуст. журн., 1974, т. 20, № 3, с. 458-468.
91. Андреева И.Б., Гончаров В.Н., Методы расчета многолучевой реверберации и контрольные сравнения с экспериментом. //В сб. *Проблемы акустики океана*/, М.: Наука, 1984, сс.69-77.
92. D.D. Ellis, D.V. Crowe, Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function // J. Acoust. Soc. Am., 1991, Vol. 89, No. 5, pp. 2207–2214.

93. Басс Ф. Г., Фукс И. М., Рассеяние волн на статистически неровной поверхности, М.: Наука, 1972.
94. Исакович М. А., Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности, ЖЭТФ, 1952, т. 23, № 3, с. 305-314.
95. Курьянов Б. Ф., Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей, Акуст. журн., 1962, т. 8, №3, с. 325-333.
96. Лысанов Ю. П., Рассеяние звука неровными поверхностями // в кн.: Акустика океана/, М., 1974, с. 231-330.
97. Луньков А.А., Михнюк А.Н. Оценка характеристик интенсивных внутренних волн по сигналам донной реверберации.// Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIX сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2016, с. 228–231.
98. Lunkov A.A., Malykhin A.Yu., Mihnyuk A.N. Effect of internal waves on interference pattern of bottom reverberation [Электронный ресурс] / Lunkov A.A., Malykhin A.Yu., Mihnyuk A.N. // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2016. V. 24. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000160>
99. Ainslie M. A. and Harrison C. H. Fast and Self - Consistent ASW Performance Prediction, Oceans 1998, pp 1553-1558.
100. Aviloff C.V. An effective numerical solution of guided wave equations, Journal de Physique IV, Colloque C1, Supplement au Journal de Physique III, volume 3, p.1011–1023, April 1992.
101. Baer R. N. and Collins M. D.. Source Localization in the Presence of Gross Sediment Uncertainties. J. Acoust. Soc. Am. 120, 870-874 (2006).
102. Brian F. Harrison. Richard J. Vaccaro, Donald W. Tufts. Robust matchedfield localization in uncertain ocean environments. J. Acoust. Soc. Am. 103 (6), 3721- 3724.
103. Van Trees H. L., Optimum Array Processing, Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory, John Wiley & Sons. 2002, p 1328.

104. Nikolai Kolev and Georgi Georgiev (2011). Sonar Model Based Matched Field Signal Processing, Sonar Systems, Prof. Nikolai Kolev (Ed.), ISBN: 978-953-307-345-3, InTech, DOI: 10.5772/18822.

105. Авилов К.В. Аддитивная факторизация + приближения Падэ = эффективное вычисление подводного звука. In Aspects Recent de l'Acoustique Sous-Marine Russe, M. Galactionov, Ed., Editions de l'IFREMER, Brest, France, 1994.

106. Авилов К. В. Вычисление гармонических звуковых полей в двумерно-неоднородных волноводах в уточненном широкоугольном параболическом приближении. Отчет Акустического института, 1983.

107. Авилов К.В. Вычисление гармонических звуковых полей в волноводах в уточненном широкоугольном параболическом приближении. Волны и диффракция-85, Труды Всесоюзного Симпозиума, Тбилиси, 1985.

108. Авилов К.В., Баронкин. В.М., О.Е. Попов. Разработка программных средств системы гидроакустических расчетов и обнаружения целей для горизонтального массива приемников акустического давления с использованием априорной информации о морской среде, источниках звука и помех. Отчет «Минотавр – ИМАШ», 2005.

109. Авилов К.В., Попов О.Е. Вычисление сигнала широкополосного точечного источника, произвольно движущегося в океане, свойства которого зависят от горизонтальных координат. Сборник трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, Москва, ГЕОС, 1998.

110. Авилов К.В., Н.Е. Мальцев. К вычислению звуковых полей в океане методом параболического уравнения. Акуст. журн., т. 27, вып. 3, стр. 335-340.

111. Авилов К.В. Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численное решение. Акус.журн., т. 41, вып.1, 1995, с 5–12.

112. Авилов К.В. Приближение однонаправленного распространения в вычислении звуковых полей в океане. Акустика океанской среды, под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой, Москва, Наука, 1989.

113. Chandler H. A., Alphonso K. J., GRASP: An Object – Oriented Approach to Sonar Performance Modeling and Tactical ASW Search Planning. *Oceans 2002.*, pp 1449- 1455.
114. Claire Debever, Kuperman W. A. . Robust matched-field processing using a coherent broadband white noise constraint processor . *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 1979-1986 (2007).
115. Stan E. Dosso, Michael J. Wilmut. Bayesian multiple-source localization in an uncertain ocean environment. *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (6), 3577-3589, (2011).
116. Stan E. Dosso, Michael J. Wilmut. Bayesian focalization: Quantifying source localization with environmental uncertainty. *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 2567-2574 (2007).
117. Stan E. Dosso, Michael J. Wilmut. Uncertainty estimation in simultaneous Bayesian tracking and environmental inversion. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 82-97, (2008).
118. Granger Hickman, Jeffrey L. Krolika. Matched-field depth estimation for active sonar. *J. Acoust. Soc. Am.* 115 (2), 620 - 629, (2004).
119. Hailiang Tao, Jeffrey L. Krolik. Waveguide invariant focusing for broadband beamforming in an oceanic waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 1338-1346, (2008).
120. Laurie T. Fialkowski, John S. Perkins, Michael D. Collins, Michael Nicholas. Matched-field source tracking by ambiguity surface averaging. *J. Acoust. Soc. Am.* 110 (2), 739-746, (2001).
121. Lisa M. Zurk, Nigel Lee, James Ward. Source motion mitigation for adaptive matched field. Shorey J. A., Nolte L. W. Wideband optimal a posteriori probability source localization in an uncertain shallow ocean environment. *J. Acoust. Soc. Am.* 103, 355-361 (1998).
122. Cristiano Soares, Sérgio M. Jesus. Broadband matched-field processing: Coherent and incoherent approaches. *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (5), 1587-1598, (2003).
123. Cristiano Soares, Sérgio M. Jesus. Environmental inversion using high-resolution matched-field processing. *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 3391-3404 (2007).

124. Stacy L. Tatum, Loren W. Nolte. Tracking and localizing a moving source in an uncertain shallow water environment. *J. Acoust. Soc. Am.* 103, 362 (1998).
125. Tolstoy. A. A deterministic (non-stochastic) low frequency method for geoacoustic inversion. *J. Acoust. Soc. Am.* 127, 3422-3429, (2010).
126. Tolstoy. A. Waveguide monitoring (such as sewer pipes or ocean zones) via matched field processing. *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (1), 190-194, (2010).
127. Tolstoy. A. Volumetric (tomographic) three-dimensional geoacoustic inversion in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 2793-2804, (2008).
128. Brian Tracey, Nigel Lee, Srinivas Turaga. Cluster analysis and robust use of full-field models for sonar beamforming. *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 2635-2647 (2006).
129. Прокофьев С. Исследование поражающих факторов подводного взрыва, *Зарубежное военное обозрение* № 6, 2003 г.
130. Бутырский Е.Ю. Основы моделирования. Петродворец.: ВМИРЭ, 2005 г.
131. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т.2.-М., Мир, 1973 г.
132. Вентцель Е.С. Исследование операций, М.: Советское радио, 1972 .
133. Измайлов А.В. Концептуальное проектирование интегрированных систем безопасности // *Безопасность. Достоверность. Информация.* 1998. № 1, 2.
134. Mikhnyuk A.N. Hydroacoustic Compatibility of Sonars in a Multistatic Underwater Observation System // *Physics of Wave Phenomena*, 2011, Vol. 19, No. 1, pp. 1–8.
135. Гольдберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н., Цифровая обработка сигналов.- М.: Радио и связь, 1990.
136. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. -М.: Мир, 1990.
137. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.:Мир, 1978.
138. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – 2-е. – Спб: Питер, 2006. — С. 751.

139. Ван Трис Г., Теория обнаружения, оценок и модуляции. т.3 Обработка сигналов в радио и гидролокации /пер. с англ., М.: Сов.радио, 1975.
140. Бьерне Л. (ред.), Подводная акустика и обработка сигналов /пер. с англ., М.: Мир, 1985.
141. Драченко В.Н., Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н. Пространственные спектры и помехоустойчивость скалярных и векторно-скалярных антенн // Доклады XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2011, с. 332–335.
142. Кремер И.Я., Кремер А.И., Петров В.М., Пространственно-временная обработка сигналов, М.: Радио и связь, 1984.
143. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
144. Максимов Ю.А. Алгоритмы линейного и дискретного программирования. — М.: МИФИ, 1980.
145. Максимов Ю.А., Филипповская Е.А. Алгоритмы решения задач нелинейного программирования. — М.: МИФИ, 1982.
146. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978.
147. Михнюк А. Н. Идентификация и уточнение координат целей, обнаруживаемых мультистатической системой подводного наблюдения. // Научно-технический сборник «Гидроакустика». С.-Петербург: ОАО «Концерн Океанприбор», 2013. С. 81–89.
148. Амосов А.А., Дубинский Ю. А., Копченова Н.П. Вычислительные методы для инженеров. — М.: Мир, 1998.
149. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. – 8-е изд. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000.
150. Волков Е.А. Численные методы. — М.: Физматлит, 2003.
151. Боровков А. А. Математическая статистика. – Учебник. – М.: Наука. Главная редакция физикоматематической литературы, 1984. – 472 с.

152. «Аварийные ситуации в Арктике поставят под контроль». [Электронный ресурс] / Информационное агентство «Би-порт», 2013 г. – Режим доступа: <http://www.b-port.com/news/item/101993.html?tmpl=component>

153. Скрипник А. Г. Компьютерный имитатор полей сигналов и помех на выходе элементов приемной системы.– М.: Янус-К, 2004.– 40 с.

154. Михнюк А. Н. Определение координат источника звука с помощью согласованных с морским волноводом алгоритмов обработки сигналов // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 401–406.

155. Pedersen M. A., White D. W., Ray theory for sources and receivers on an axis of minimum velocity., J. Acoust. Soc. America, 1970, vol. 48, N 5, p.1219-1245.

156. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

157. Натансон И.П. Теория функций вещественной переменной. М., Наука, 1974. – 484 с.

158. Машошин А. И. Помехоустойчивость выделения максимумов корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 823–829.

159. Бухштабер В. М., Машаров Н. Ф., О трехмерных лучах в подводном звуковом канале. Методы томографии в физико-технических измерениях // Сб. научных трудов/, М.: Изд. НПО ВНИИФТРИ. 1988. с. 76-84.

160. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И., Акустическая томография океана, Н.Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1997.Исакович М.А., Общая акустика, М.: Наука, 1973.

161. Гончаров В. В., Куртепов В. М., Численные эксперименты по томографии океана //в кн.: Акустика океанской среды / под ред. Л. М. Бреховских и И. Б. Андреевой., М.: Наука, 1989. с. 107-115.

162. Чепурин Ю.А. Эксперименты по подводной акустической томографии // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 3. С. 451–476.

163. Munk W. H., Wunsch C., Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring., *Deep Sea Res.*, 1979, 26A, p. 123-161.

164. Бородин В.В. О потенциальной точности решения задачи томографии океана. *Акуст. журн.*, 1995, № 6.

165. Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н., Полканов К.И., Смирнов Н.М. Использование буксируемого векторно-скалярного модуля и согласованной фильтрации для однозначной оценки координат широкополосного источника в пассивном режиме // Научно-технический сборник «Гидроакустика». С.-Петербург: ОАО «Концерн Океанприбор», 2015. С. 36–51.

166. Drachenko V.N., Karishnev N.S., Kuznetsov G.N., Mikhnyuk A.N. Estimation of the Source Distance and Depth in a Multipath Waveguide Using a Vector-Scalar Antenna // *Physics of Wave Phenomena*, 2014, Vol. 22, No. 4, pp. 1–12.

167. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. Пер. с англ. Наппельбаума Э. Л. Под ред. Емельянова С.В. М.: «Мир», 1978.

168. Воронов А.А. Исследование операций и управление. М.: Наука, 1970. 128 с.

169. Алексеева Е.Г. Анализ алгоритмов статистической обработки данных для моделирования локализации источников звука. «Вопросы радиоэлектроники», 2010, вып. 2, с. 44-49.

Приложение А. Малоразмерные движущиеся подводные объекты

1. Малоразмерный подводный объект – подводный пловец, движущийся с помощью ласт.

В специализированных изданиях в области по вопросу гидролокации и БЭР малоразмерных целей одиночный подводный пловец имеет БЭР до 0.5 м.

2. Малоразмерный подводный объект – подводный пловец на технических средствах доставки с механическим двигателем.

В зависимости от применяемых средств доставки подводных пловцов БЭР пловца может увеличиваться до 1 м и более. Технические характеристики средств доставки приведены в таблицах П.1 – П.3.

3. Малоразмерный подводный объект, движущийся с помощью механического двигателя – АНПА.

За последние два-три десятилетия в различных странах, занимающих ведущее положение в области морских технологий, было создано значительное число автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), использующихся для широкого круга военных и гражданских задач. За этот период АНПА продемонстрировали свою эффективность при выполнении противоминных, обзорно-поисковых и обследовательских работ и открыли ряд важных применений. Самоходные АНПА (в иностранной литературе такие аппараты получили название UUV – Unmanned Underwater Vehicle) принято разделять на два больших класса: неавтономные (привязные) НПА и автономные НПА (АНПА). К неавтономным НПА относятся буксируемые и самоходные привязные подводные аппараты.

Управляемые НПА за рубежом получили название Remote Operated Vehicle (ROV). В отечественной литературе наиболее часто называют дистанционно управляемыми НПА (ДНПА) или подводными телеуправляемыми аппаратами

(ПТА). Причем наличие проводного канала энергообеспечения и телеуправления (кабель связи) является принципиальным для отнесения аппарата к этому классу (ДПА-ПТА-ROV).

Самоходные НПА могут быть плавающими в толще воды, самоходными, донными или с комбинированным типом движения.

К АНПА относятся самоходные НПА с автономной системой энергообеспечения и как, правило, беспроводным каналом телеуправления и связи.

К настоящему времени АНПА сформировались в достаточно представительный класс, насчитывающий 500-600 различных проектов, причем общее количество созданных 9 построенных за рубежом превысило 5000. Мировыми лидерами в разработке НПА являются США, Великобритания, Канада, Франция, Германия.

Неавтономные НПА являются наиболее представительными по сравнению с АНПА и уже прочно закрепившимися на мировом коммерческом рынке

По целевому назначению и особенностям технического оснащения неавтономные НПА различного назначения разделяют на следующие классы:

1. Подводные микроаппараты (ПМА). Это класс неавтономных НПА (micro-ROV) сформовался относительно недавно и объединяет аппараты, масса которых не превышает 5 кг. Как правило, ПМА предназначены для выполнения обзорно-поисковых работ на глубинах до 100-150 м.

2. Подводные малогабаритные аппараты (неавтономные самоходные подводные аппараты класса – mini-ROV). Представители данного класса являются самоходные НПА, масса которых находится в пределах от 5 до 30 кг.

3. Основной класс. Аппараты данного класса предназначены для решения поисковых, инспекционных и осмотровых задач, выполнение легких механических работ в толще воды и проведения измерений и осмотровых работ. НПА основного класса имеют следующие типовые характеристики: максимальная рабочая глубина до 3000 м. (в большинстве проектов до 1000 м.); радиус действия (максимальное

удаление от обеспечивающего судна): 100-150 м. (в редких случаях до 1000 м.); скорость подводного хода 1-2,5 узла; масса от 20-350 кг.

4. Рабочий класс. Аппараты данного класса предназначены для решения широкого круга подводно-технических работ (аварийно-спасательных, поисково-обзорных, инженерно-строительных, ремонтных). Рабочий класс составляют аппараты от 30 до 6000 кг (легкие, средние, тяжелые) с достаточно сложным навесным оборудованием.

5. Донные (самоходные НПА). Этот класс составляют аппараты на гусеничном ходу, предназначенные для проведения тяжелых механических работ на морском дне.

К числу достоинств неавтономных НПА по сравнению с АНПА можно отнести:

- большая продолжительность непрерывной работы (энергоснабжение этих аппаратов осуществляется либо с борта обеспечивающего судна, либо при помощи берегового оборудования) и возможность выполнения сложных и тяжелых механических работ в толще воды и на донной поверхности;

- относительно низкая стоимость постройки и эксплуатации и высокая надежность конструкции (отсутствие риска от невозвращения).

Как показывает проведенный системный анализ зарубежных проектов неавтономных НПА, аппараты класса «микро» (micro-ROV) составляют 4-6% от общего из числа. Основные сведения о зарубежных моделях ПМА представлены в таблице П.4.

4. Малоразмерный подводный объект – крупные морские животные.

Пристальное внимание антитеррористических служб к китам и тюленям при разработке систем безопасности объясняется необходимостью повышения эффективности обнаружения и классификации подводных малозумных целей.

Тактико-технические характеристики средств подводного поиска и охраны не столь точны по сравнению с сенсорными системами морских животных, которые совершенствовались в течение миллионов лет эволюции.

Морские млекопитающие обладают высокочувствительной сенсорной гидролокацией, позволяющей распознавать подводные биологические и технические объекты с высокой степенью разрешения в условиях естественных и искусственных шумов, при сложной томографии дна.

Электромагнитные, шумовые и вибрационные поля китов и тюленей малозаметны, что дает возможность размещать высокочувствительные микропроцессоры для получения информации, контролируемой извне.

В США и СССР дрессированных животных использовали в борьбе с ПЛ, для поиска затопленных мин, торпед и других боезарядов.

Впервые в мировой практике служебные дельфины участвовали в охране кораблей 7-го флота США на акватории военно-морской базы Кам-Рань, в период войны во Вьетнаме. Дельфины успешно противодействовали аквалангистам. К началу 80-х годов крупные базы морских боевых животных были оборудованы на Гавайях, Сан-Диего, Ки-Уэст. Десятки дельфинов и морских львов из специального подразделения ВМС США весьма активно участвовали в войнах 1991-2004 гг. в Персидском заливе.

Учения НАТО «Baltik Challenge-98» в Клайпеде доказали возможность применения дельфинов (с калифорнийской базы Сан-Диего) для поиска мин и снарядов в Балтийском море и у берегов Норвегии (учения «Blue Game»). Специфический этап обучения этих животных по обозначению объекта с помощью сигнального буя был выполнен в кратчайшие сроки. Для охраны военно-морских баз Бангор и Кингс-Бей в 1990 г. приняты на вооружение биотехнические системы.

В СССР Военно-Морским Флотом был накоплен большой опыт использования морских животных в интересах охранных и поисковых задач на Черноморском и Северном флотах. Ведущиеся с 1984 года исследования в этой области Мурманским морским биологическим центром в Северном регионе показали очевидность того, что в Северном регионе аборигенные типы ластоногих по потенциальным возможностям более перспективны, чем китообразные. Основные характеристики морских животных, которые могут быть

использованы в служебных целях, приведены в таблице П.5.

Арктические тюлени не уступают дельфинам теплых морей по возможностям выработки навыков, необходимых для проведения работ в море. Оценка характеристик арктических тюленей приведена в таблице П.6.

Таблица П.1. Основные технические характеристики носителей легких водолазов.

Название носителя, страна-изготовитель	Вес, кг	Размеры, м			Скорость подводн., узл
		длина	ширина	высота	
«Буксировщик Кусто» (Франция)	50	1	0.3	-	2-3
«Дольфин-дивер», США	46	-	-	-	-
«Дольфинтвер», США	-	-	-	-	5-6
«Блауворт марин», США	35	1.1	0.3	0.4	1.4-2.2
«Минисаб» МК-4, США	86	1.35	-	-	3.25
«Пегас»Франция	55	2.1	0.8	0.6	2
«Роллейн-Марин»Англия	-	6.1	0.53	-	4
«Омега»США	70	3.0	1.35.	-	6-22
«Текна»США	20	0.5	-	-	1.2-2.8
ВНИРОСССР	70	1.5	1.3	0.5	0.5-4.0
Буксировщик Водолазов СССР	85	1.6	0.3	0.6	2
«Минисаб МК-2» США	46	2.5	0.6	1.0	4
«Минисаб МК-3» США	66	2.6	0.6	1.1	4.74

Таблица П.2. Основные технические характеристики носителей легких водолазов, движущихся с помощью механического двигателя.

Характеристики	Подводные средства движения (страна – изготовитель)				
	SDV Mk8 (США)	STD (США)	“Хавас” Mk9 (Франция)	CE 2F/X 100T (Италия)	“Сабкэт” (Великобрит ания)
Масса, т	-	0,07	-	-	1,9
Размеры, м: длина/ширина/ высота	6,45/1,32/ 1,32	-	-/0,9/-	7/0,8/1,5	3,1/1,63/0,7
Скорость хода, уз	6	2	6	4,5	5
Глубина погружения, м	-	36	до 300	100	200

Таблица П.3. Основные технические характеристики сверхмалых подводных лодок.

Характеристики	Сверхмалые подводные лодки (страна-изготовитель)				
	ASDS (США)	SX756 (Италия)	GST9 (Италия)	“Пиранья” (Великобритания)	“Сихорс- KD” (ФРГ)
Водоизмещение, т: надводное/подводное	-/28	80/123	27/30	134/190	-
Размеры, м: длина/ширина/осадка	19,81/2,43/2, 43	25,2/2/3,8	9,55/2,2/ 3,5	26,6/2,75/2,7	14,5/2,4/-
Скорость хода, уз: надводная/подводная	-/8	8,5/6	8/8	-/9	-/6
Глубина погружения, м	50	100	400	100	300

Таблица П.4. Основные сведения о зарубежных ПМА

Страна	Название аппарата	Н макс м.	Масса кг.	Скорость, уз
Великобритания	AC-ROV SP50	75	3	1,5
Канада	SCALLOP	40	4	2
США	VR-250	75	3,6	2
США	VRDB XE	300	4	2
США	VREX	90	4	2
США	VR-PRO II	150	3,5	2
США	VR-PRO III	150	4	2
США	VR-PRO IIIXE GTO	150	4	2
США	VR-Scout	90	3,5	2
Франция	Observer 21	100	5,0	2
Чили	Gnom	100	3	2
Чили	MICRO	300	3	1,6

Таблица П.5. Характеристики морских животных, пригодных для использования в служебных целях

Характеристики, размерность	Подотряд зубатых китов		
	Семейство дельфиновых		Семейство нарваловых
	Афалина	Касатка	Белуха
Масса тела, кг (самка-самец)	250 - 350	5000 - 8000	500 -1000
Скорость плавания макс., км/час	45	55	22
Скорость плавания «экономическая», км/час	10	15	10
Грузоподъемность, кг	10	300	30
Глубина погружения, м	300	300	700
Время погружения, мин.	10	15	15
Дальность непрерывного сопровождения катера, км	35	90	50
Рацион в сутки, кг	15	50	25
Наличие природного гидролокатора	+	+	+
Оценка дальности действия гидролокатора, км	2	20	5
Возможность эффективного поиска бесшумных объектов на грунте	+	+	+
Возможность эффект поиска бесшумных объектов под слоем ила, грунта	-	-	+
Возможность длительного пребывания в пресной воде	-	+	+
Возможность длительного пребывания во льдах	-	-	+
Запрет или ограничение на отлов	запрещено	-	ограничено

Таблица П.6. Характеристики арктических тюленей, пригодных для использования в служебных целях.

	Семейство ушастых тюленей		Семейство безухих тюленей		
	Сивуч	Северный морск. Кот	Серый тюлень	Гренл. тюлень	Нерпы
Масса тела, кг.	350-1100	60 –300	150 -300	150	100
Скорость плавания км/ч	20	20			20
Грузоподъемность	30	20	20	10	3
Глубина погружения, м	300	150	150	150	100
Время погружения, мин	15	6	20	20	36