

На правах рукописи



Симонов Роман Валерьевич

**РАЗВИТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Калининград – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский Федеральный университет имени Иммануила Канта», ОНК Институт высоких технологий

Научный руководитель:

Пахотин Валерий Анатольевич,
Доктор физико-математических наук,
профессор, профессор ОНК Институт
высоких технологий БФУ им. И. Канта

Официальные оппоненты:

Парфёнов Владимир Иванович,
Доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры радиофизики
Воронежского Государственного Университета

Егоров Владимир Викторович,
Доктор технических наук,
старший научный сотрудник АО «РИМР»

Ведущая организация:

«Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им.
В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)»

Защита состоится: 06 февраля 2026 г. в 11:00
На заседании диссертационного совета 24.1.111.02
На базе ФГБУН Институт радиотехники и
электроники имени В. А. Котельникова
по адресу 125009, г. Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, стр. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В. А. Котельникова
РАН, и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/SimonovRV/disser.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г

Ученый секретарь Диссертационного совета 24.1.111.02
доктор физико-математических наук



Кузьмин Лев Викторович

Общая характеристика работы.

Актуальность темы исследования

В отличие от радиоволн, ультразвуковые и звуковые волны способны распространяться в проводящих упругих средах, таких как вода (море) и металлы. Это уникальное свойство определяет их широкое применение в гидроакустике, локации, и создает основу для подводных систем связи. Благодаря малой длине волны, ультразвуковые волны нашли применение для решения разнообразных задач в области диагностики, дефектоскопии, акустической микроскопии, томографии и измерения расстояний. В частности, использование ультразвука в медицине позволяет осуществлять диагностику различных заболеваний и получать акустические изображения внутренних органов.

Эффективность широкого использования ультразвуковых и звуковых волн в различных отраслях обусловлена физикой их излучения и распространения. Малая длина волны позволяет приближенно описывать процесс их распространения и приёма в рамках геометрической оптики. При этом современные системы обеспечивают высокое разрешение: по времени – на уровне микросекунд, по пространству – до миллиметров и долей миллиметров. Такие характеристики достигаются за счет использования широкополосных сигналов и ультразвуковых фазированных решеток с большим количеством элементарных излучателей, способных формировать диаграммы направленности шириной в доли градуса. Например, в ультразвуковой медицинской диагностике применяются фазированные антенные системы, состоящие из сотен и даже тысяч пьезокристаллических преобразователей. В современных ультразвуковых и звуковых системах активно используется электронное сканирование диаграммой направленности, фокусирование энергии ультразвуковой волны и методы синтезированной апертуры. Для обнаружения подвижных объектов средствами ультразвуковой акустики широко используется эффект Доплера.

Таким образом, современные ультразвуковые и звуковые технические системы характеризуются высокой эффективностью, сопоставимой с эффективностью радиотехнических систем, благодаря использованию фазированных решеток, сложных широкополосных сигналов и доплеровской фильтрации.

Теоретической основой высокой эффективности обработки сигналов, как в радиотехнических, так и в ультразвуковых системах, являются положения теории оптимального приёма, разработанные В.А. Котельниковым, А.Н. Колмогоровым, Р.Л. Стратоновичем, Н. Винером, А. Вальдом, Я.Д. Ширманом. Наиболее доступное изложение ее основ представлено в работах В.И. Тихонова, А.И. Перова, А.П. Трифонова [1,2,3]. В рамках этой теории решаются ключевые статистические задачи: обнаружение сигналов, различение сигналов, оценка параметров сигналов, разрешение сигналов и их фильтрация на фоне помех [3]. В работах БФУ им. И. Канта к настоящему времени были уточнены положения теории оптимального приёма, и разработан новый метод решения этих задач, в основе которого лежит метод максимального правдоподобия с высоким

разрешением [4,5]. Были созданы фильтры максимального правдоподобия, способные разделять сигналы, неортогональные по частоте, времени приёма и угловым параметрам. Однако, применительно к ультразвуковой акустике, положения теории оптимального приёма остаются недостаточно разработанными и используются на прежнем уровне. При обработке ультразвуковых сигналов преимущественно применяются спектральный анализ, угловой спектральный анализ и корреляционный анализ. Разрешающая способность этих методов ограничена рэлеевским пределом и зависит от базы сигнала. Тем не менее, проблема повышения разрешающей способности остается одной из ключевых в медицине, дефектоскопии и гидроакустических системах. Эффективное развитие методов обработки ультразвуковых сигналов сдерживается следующими специфическими факторами:

- Особенности излучения/приема: Излучение и прием ультразвуковых сигналов осуществляется пьезокристаллическими преобразователями, нагруженными на среду распространения. Их возбуждение производится «ударным» методом (видеоимпульс), резонансным методом с помощью радиоимпульса или с помощью последовательности фазированных радиоимпульсов (коды Баркера, М-последовательности). Высокая добротность преобразователей приводит к существенному искажению сигналов на выходе из-за переходных процессов значительной длительности, что вызывает межимпульсную интерференцию.
- Частотная зависимость затухания: Затухание ультразвуковых волн при распространении в среде зависит от частоты, что приводит к значительному искажению формы сигнала в точке приёма (высокочастотные компоненты затухают сильнее низкочастотных).
- Структурный шум: Помимо теплового шума, при распространении ультразвуковых волн наблюдается структурный шум, обусловленный рассеянием на мелкой неоднородной структуре вещества. Следовательно, решение статистических задач должно учитывать наличие структурного шума.
- Многолучевость: Ограниченность размеров области распространения часто приводит к проблеме многолучевости.

Таким образом, специфические особенности излучения, распространения и приёма ультразвуковых и звуковых сигналов диктуют необходимость развития положений теории оптимального приёма применительно к ультразвуковой акустике. Именно это развитие составляет основное содержание настоящей работы.

Цели и задачи диссертационной работы

Дальнейшее развитие возможностей ультраакустических систем может быть достигнуто путем развития методов обработки сигналов на базе теории оптимального приёма. Эта теория охватывает основные статистические задачи радиотехники, в той или иной мере актуальные для ультразвуковых комплексов аппаратуры: обнаружение сигналов, оценку их параметров, разрешение сигналов и их фильтрацию на фоне помех.

Основной целью настоящей работы является развитие методов обработки сигналов в ультразвуковых комплексах аппаратуры на базе положений теории оптимального приёма. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Проведение сравнительного анализа операторных методов обработки сигналов и метода максимального правдоподобия на основе критерия оптимальности (минимум функционала правдоподобия).
2. Разработка алгоритмов обработки ультразвуковых сигналов с высоким разрешением на базе метода максимального правдоподобия.
3. Решение задачи раздельного обнаружения совокупности ультразвуковых сигналов с неизвестными параметрами.
4. Исследование предельных возможностей разрешения ультразвуковых сигналов.
5. Разработка методики оптимальной обработки сложных ультразвуковых сигналов.
6. Разработка метода фильтрации простых и сложных ультразвуковых сигналов на фоне помех.
7. Развитие оптимальных методов обработки пространственно-временных ультразвуковых сигналов.
8. Разработка алгоритмов и программ для модельных исследований потенциальных возможностей обработки временных и пространственно-временных ультразвуковых сигналов.
9. Разработка макетов и исследования, достижимых на практике возможностей обработки ультразвуковых сигналов.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в развитии теории и практики оптимальной обработки сигналов в ультразвуковых комплексах аппаратуры и определяется следующими положениями:

1. Предложен новый метод оптимальной обработки ультразвуковых сигналов, обеспечивающий сверхрэлееское разрешение и основанный на преобразованном функционале отношения правдоподобия.
2. Впервые теоретически обоснована и доказана ограниченность широко используемых методов обработки (спектрального, корреляционного, углового спектрального анализа). Установлено, что их оптимальность достигается только в случае присутствия в реализации единственного сигнала и при условии его согласования с принимаемым сигналом.
3. Выявлен ранее неучтенный фактор неоднозначности решений в методе максимального правдоподобия на итоговую эффективность обработки. Исследовано его влияние на решение. Для устранения этой неоднозначности предложена подстановка Хелстрема.
4. Впервые обнаружено и исследовано явление сингулярных шумовых максимумов на поверхностях функционалов правдоподобия, возникающее при решении уравнений правдоподобия для совокупности сигналов. Эти

максимумы препятствуют корректной оценке параметров множества сигналов. Предложен эффективный метод их подавления.

5. Разработано новое решение задачи обнаружения сигналов, основанное на статистике значений преобразованного функционала отношения правдоподобия.
6. Решена задача раздельного обнаружения ультразвуковых сигналов в условиях их высокой корреляции (неортогональности).
7. Предложен оригинальный метод оценки количества сигналов, содержащихся в принятой реализации.
8. Разработан новый метод возбуждения кодовых последовательностей (Баркера, М-последовательностей) пьезокерамическими преобразователями, позволяющий эффективно применять их в ультразвуковых комплексах и преодолеть ограничения, связанные с высокой добротностью.
9. Создана новая методика фильтрации ультразвуковых сигналов на фоне как ортогональных, так и неортогональных помех.
10. Заложены теоретические основы оптимальной обработки пространственно-временных ультразвуковых сигналов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- Развиты ключевые положения теории оптимального приёма применительно к решению основных статистических задач радиотехники в области неортогональности ультразвуковых сигналов.
- Усовершенствованы принципы оптимальной обработки простых и сложных ультразвуковых сигналов операторными методами.
- Выявлены и исследованы новые факторы (неоднозначность, сингулярные шумовые максимумы), существенно влияющие на применимость метода максимального правдоподобия для обработки ультразвуковых сигналов в реальных условиях.
- Разработана принципиально новая методика фильтрации ультразвуковых сигналов на фоне помех произвольного типа (ортогональных и неортогональных сигналу).
- Создан новый метод решения задачи обнаружения, основанный на статистике оценок значений преобразованного функционала отношения правдоподобия.
- Разработаны фундаментальные основы пространственно-временной обработки ультразвуковых сигналов.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- Обоснована возможность решения статистических задач в новой области - в области неортогональности ультразвуковых сигналов, что ранее считалось затруднительным.

- Доказана и реализована возможность существенного ускорения процесса обработки сигналов за счет применения эволюционных алгоритмов поиска экстремума.
- Разработаны, реализованы и апробированы алгоритмы и программы для оптимальной обработки ультразвуковых сигналов в условиях неортогональности.
- Созданы и исследованы функциональные макеты, демонстрирующие достижимые на практике возможности предложенных методов.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы выступают положения теории оптимального приёма, специально развитые и адаптированные для оптимальной обработки ультразвуковых сигналов.

Для решения поставленных задач использовался комплекс методов:

- Теоретический анализ: Углубленное изучение и развитие положений теории оптимального приёма применительно к особенностям излучения, распространения и приёма ультразвуковых сигналов.
- Математическое моделирование: Детальное моделирование процессов излучения, распространения, приёма и обработки ультразвуковых сигналов в различных сценариях (один сигнал, несколько сигналов, наличие помех, пространственно-временная обработка) для верификации теоретических выводов и оценки потенциальных возможностей.
- Экспериментальные исследования: Проведение натурных экспериментов на специально разработанных макетах для проверки работоспособности алгоритмов, оценки достижимых характеристик и подтверждения результатов моделирования.
- Сравнительный анализ: Систематическое сопоставление эффективности разработанных методов с традиционными операторными методами обработки сигналов и с известными теоретическими пределами (Рэлея, Крамера-Рао).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Структура и принципы оптимальной обработки ультразвуковых сигналов в области их неортогональности, включая выявленные новые факторы (неоднозначность, сингулярные шумовые максимумы) и методы их компенсации (подстановка Хелстрёма, метод подавления шумовых максимумов).
2. Результаты сравнительного анализа операторных методов обработки сигналов и метода максимального правдоподобия, подтверждающие их ограниченность (оптимальны только для одного согласованного сигнала) и обосновывающие необходимость использования, разработанных методов спектрального и корреляционного анализа, согласованных с сигналами при наличии амплитудно-фазовой модуляции.
3. Результаты теоретических исследований оптимальной обработки ультразвуковых сигналов, определяющие рабочие диапазоны по

разрешающей способности и требуемому отношению сигнал/шум в критической области неортогональности сигналов.

4. Разработанные и экспериментально проверенные методы решения задачи раздельного обнаружения совокупности ультразвуковых сигналов:

- На основе статистики оценок амплитуд сигналов.
- На основе статистики значений преобразованного функционала отношений правдоподобия.

5. Результаты экспериментальных (макетных) исследований, подтверждающих возможности практической реализации разработанных методов обработки ультразвуковых сигналов в области их неортогональности и их соответствие теоретическим прогнозам и результатам моделирования.

Степень достоверности и апробация работы

- Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается:
- Последовательным применением фундаментальных положений теории оптимального приёма и статистической теории оценок.
- Всесторонним математическим моделированием процессов обработки в широком диапазоне условий (число сигналов, уровни шумов и помех, степень неортогональности). Полученные результаты моделирования внутренне непротиворечивы и в частных предельных случаях согласуются с известными классическими результатами.
- Экспериментальной проверкой ключевых положений теории и эффективности разработанных алгоритмов на специально созданных макетах. Результаты макетных исследований хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями и данными моделирования.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на следующих научных форумах:

1. Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва), ежегодно в период с 2015 по 2023 год.
2. Международный Балтийский морской форум (г. Калининград), ежегодно в период с 2017 по 2023 год.
3. Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж), 2015 год.

Публикации:

Материалы диссертации опубликованы в 30 научных работах. Из них:

- 3 статьи – в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.
- 28 работ – в трудах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора

Автор лично выполнил следующие ключевые этапы исследования:

1. Разработка основных теоретических положений: Постановка основных задач работы и обсуждение получаемых результатов (теоретических,

модельных, экспериментальных) осуществлялись совместно с научным руководителем.

2. Разработка и проведение экспериментов:

- Разработано специализированное экспериментальное устройство для регистрации ультразвуковых сигналов.
- Проведены эксперименты по приёму множественных ультразвуковых сигналов в условиях многолучевого распространения и по приёму пространственно-временных сигналов.

3. Разработка алгоритмов и теоретический анализ:

- Созданы алгоритмы обработки сигналов на основе метода максимального правдоподобия.
- Проведены масштабные модельные исследования с использованием этих алгоритмов.
- Получены основные аналитические выражения и соотношения для разработанных методов.

4. Реализация и оптимизация:

- Реализованы алгоритмы поиска экстремума функционала правдоподобия (включая эволюционные методы).
- Проведено сравнительное исследование эффективности различных алгоритмов оптимизации.

5. Научные публикации: Подготовка и публикация научных работ осуществлялась совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы и заключения.

Объем работы: 228 страниц основного текста, содержит 149 рисунков. Список литературы содержит 121 наименование.

Содержание работы.

Во введении дано обоснование диссертационной работы: ее актуальность, степень разработанности.

В первой главе изложены результаты аналитического обзора литературы, выделены основные проблемы в области обработки ультразвуковых сигналов, сформулирована цель работы и задачи, которые решаются для достижения цели. Изложены основные положения теории оптимального приёма.

Во второй главе (§2.1) дано описание ранее неизвестного фактора неоднозначности решений в методе максимального правдоподобия, и предлагается применить подстановку, впервые предложенную Хелстромом. Она связана с оценкой амплитуд сигналов на основе уравнений правдоподобия и их подстановкой в функцию правдоподобия. Показано, что подстановка исключает фактор неоднозначности. Для сравнения на рисунке 1 представлен двумерный разрез поверхности функции правдоподобия по временам приема без подстановки Хелстрёма, а на рисунке 2 – с подстановкой. Функции имеют два равнозначных максимума: основной и зеркальный.

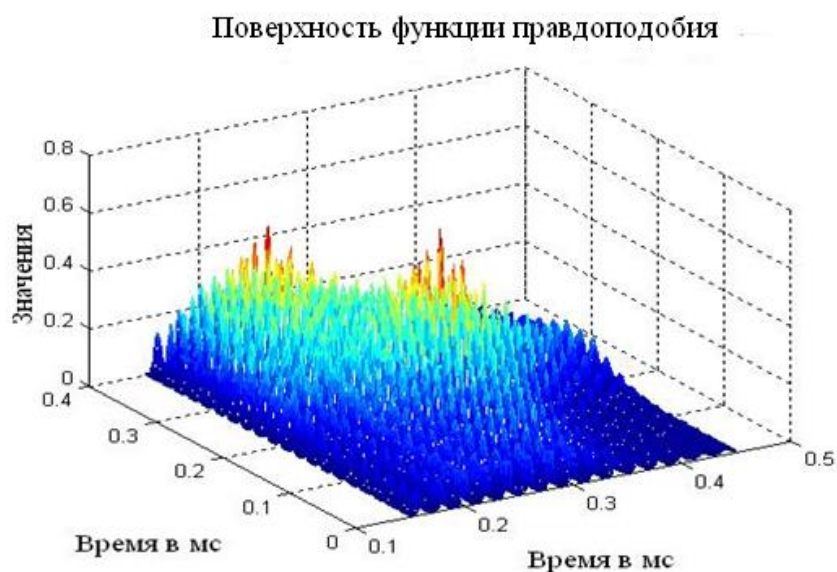


Рисунок 1 - Поверхность функции правдоподобия, полученной без подстановки Хелстрема.

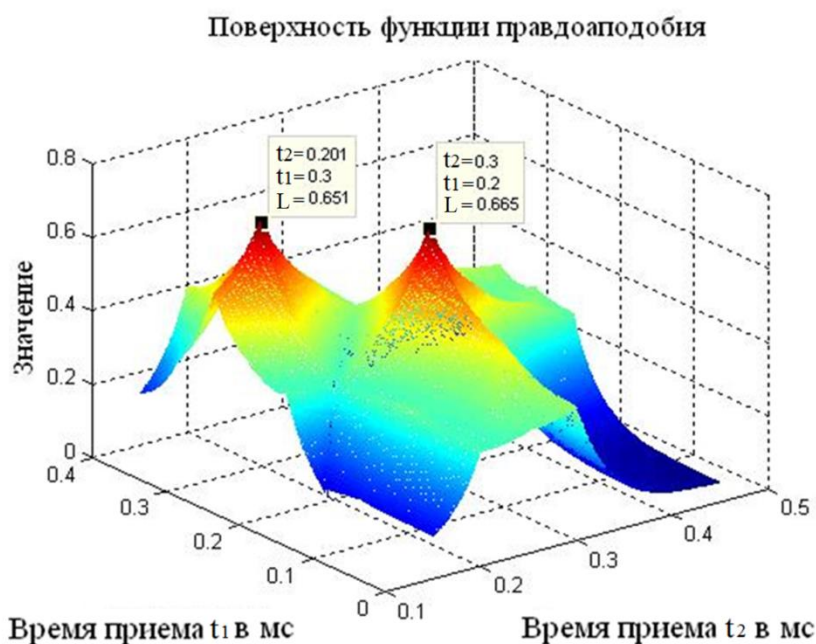


Рисунок 2 - Поверхность функции правдоподобия, полученной с подстановкой Хелстрема.

Из рисунков следует, что без подстановки Хелстрема, нахождение максимума и получение решения методом максимального правдоподобия крайне затруднено. Преобразованная функция правдоподобия с подстановкой, а также преобразованный функционал правдоподобия и преобразованный функционал отношения правдоподобия, являются основой настоящей работы.

В §2.2÷2.5 представлены результаты сопоставительного анализа операторных методов обработки сигналов и метода максимального правдоподобия. Основой является выражение для преобразованного функционала правдоподобия, как критерия оптимальности.

$$\Delta(\hat{\lambda}) = \int_{\tau}^{\tau+T} |\hat{y}(t) - \hat{U}_1(\hat{\lambda})f(\hat{\lambda}, t)|^2 dt \quad (1)$$

Математическое ожидание от минимума преобразованного функционала правдоподобия (1) определяет дисперсию шума в реализации. Оно используется для оценки оптимальности операторных методов обработки сигналов: спектрального, корреляционного и углового спектрального анализа. Основные результаты сопоставительного анализа следующие: Приведено доказательство того, что операторные методы являются частным случаем метода максимального правдоподобия. Сделан вывод: операторные методы оптимальны при наличии в принятой реализации лишь одного сигнала. Они не оптимальны, если в принятой реализации содержится два или более сигнала, или если сигналы имеют амплитудную модуляцию. Это приводит к тому, что такое фундаментальное положение, как соотношение неопределённости (функция неопределённости), не может быть основой теории разрешения сигналов. Оно справедливо лишь для операторных методов. В рамках минимизации функционала правдоподобия можно получить лучшее разрешение, чем рэлеевское. В данных параграфах представлен новый метод: спектрально-корреляционный анализ, согласованный с сигналом. Он является оптимальным, и позволяет получить новые результаты.

Так, например, на рисунке 3 показан вид экспоненциального сигнала (а), спектры экспоненциального сигнала и прямоугольного радиоимпульса (б), функционалы правдоподобия для радиоимпульса и экспоненциального сигнала (в), увеличенная копия функционалов правдоподобия (г). Отмечается неоптимальность обработки экспоненциального сигнала классическим спектральным анализом с порождающей функцией $x = \exp(i\omega_0 t)$. Неоптимальность решения связана со средним значением амплитуды экспоненциального сигнала, которое оценивается по максимуму спектральной линии (рисунок (б)), а также с тем, что функционал правдоподобия в этом случае не достигает минимального значения (рисунок (в), рисунок (г)). На рисунке 4 показан результат обработки экспоненциального сигнала спектральным анализом, согласованным с сигналом. В этом случае порождающая функция равна $\hat{x}(\omega_0) = \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \exp(i\omega_0 t)$. Анализ рисунка показывает оптимальность обработки. Это следует из того, что амплитуда спектральной линии (б) соответствует модельному значению амплитуды сигнала 2, а также из минимума функционала правдоподобия (рисунок 4(в)), значение которого соответствует модельному значению дисперсии шума.

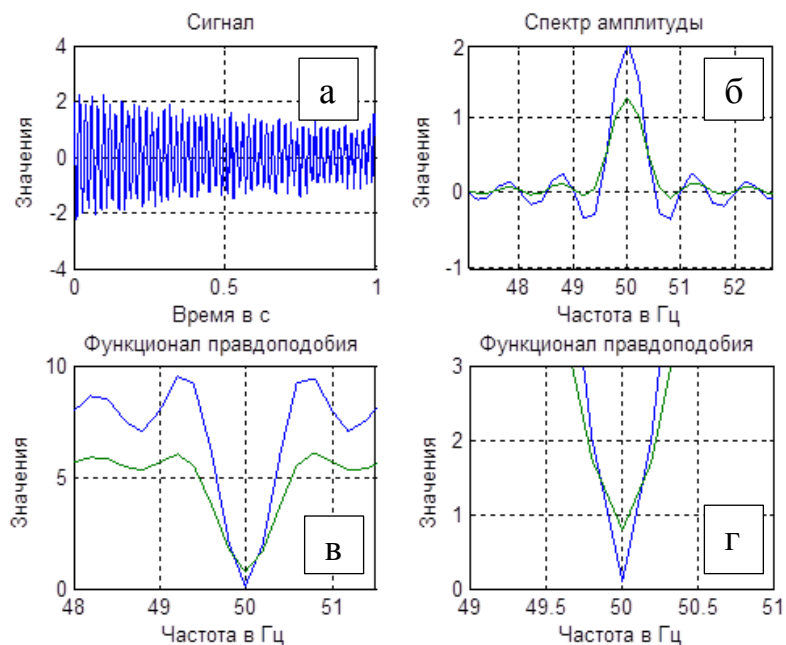


Рисунок 3 - Спектральная обработка радиоимпульса прямоугольной и экспоненциальной формы: (а) вид экспоненциального сигнала, (б) спектры прямоугольного и экспоненциального радиоимпульсов, (в) функционалы правдоподобия прямоугольного и экспоненциального радиоимпульсов, (г) увеличенный масштаб функционалов правдоподобия.

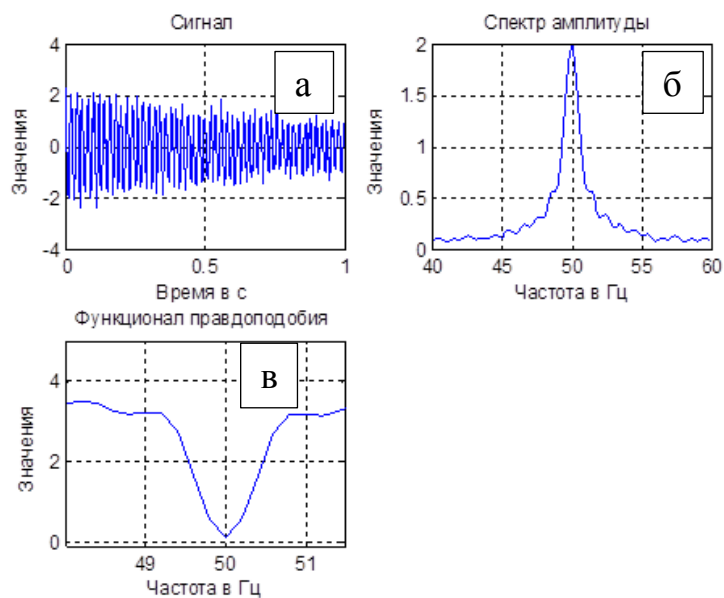


Рисунок 4 - Обработка радиоимпульса экспоненциальной формы спектральным анализом, согласованным с сигналом: (а) вид экспоненциального сигнала, (б) спектр экспоненциального радиоимпульса, (в) функционал правдоподобия для экспоненциального радиоимпульса.

Таким образом, модельные расчеты показали, что спектральный анализ, согласованный с сигналом, является оптимальным методом обработки сигналов с амплитудной модуляцией. Решение, получаемое спектральным анализом, согласованным с сигналом, является несмещенным, эффективным и достаточным. При оцениваемой по минимуму функционала правдоподобия дисперсии шума, можно оценить степень соответствия формы принятого сигнала, и его аналитической модели.

Более значимый результат можно получить при обработке сложных сигналов спектральным (или корреляционным) анализом, согласованным с сигналом. На рисунке 5 показана обработка ЛЧМ-сигнала классическим спектральным анализом с порождающей функцией $\hat{x}(\omega_0) = \exp(i\omega_0 t)$ и обработка ЛЧМ-сигнала спектральным анализом, согласованным с сигналом, с порождающей функцией

$$\hat{x}(\omega_0, t_0) = \mu(t) \exp(i\omega_0(t - t_0)) = \exp(iAt^2) \exp(i\omega_0(t - t_0)) .$$

На рисунке 5 (а) показан вид реализации, содержащей ЛЧМ-сигнал. Начальная частота равна 50 кГц, конечная частота 200 кГц, амплитуда равна 2, длительность ЛЧМ-сигнала равна 200 мкс, СКО шума равно 0.5.

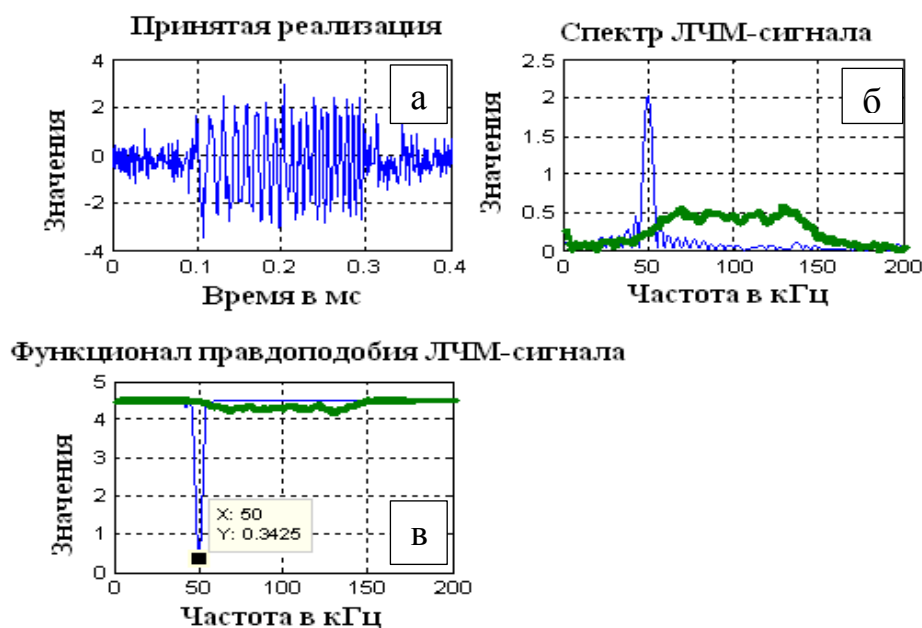


Рисунок 5 - Оптимальность обработки ЛЧМ-сигнала спектральным анализом, согласованным с сигналом: (а) принятая реализация с ЛЧМ-сигналом, (б) спектры ЛЧМ-сигнала, (в) - функционалы правдоподобия.

На рисунке 5 (б) показаны спектры ЛЧМ-сигнала. Кривая с маркером определяет спектр ЛЧМ-сигнала, полученный классическим спектральным анализом. Его ширина определяется девиацией частот. Амплитуда представляет собой усредненное значение. Спектральный анализ, согласованный с сигналом (линия

без маркера) определяет спектр, аналогичный спектру радиоимпульса с амплитудой 2 и частотой 50 кГц, имеющий выраженный максимум. На рисунке 5 (в) показана оптимальность спектрального анализа, согласованного с сигналом. Минимум функции правдоподобия (линия без маркера) равен дисперсии шума в реализации. Минимум функционала правдоподобия при классическом спектральном анализе (кривая с маркером) существенно превышает дисперсию шума в реализации и указывает на неоптимальность обработки.

Рассмотрим двумерную спектрально-корреляционную обработку ЛЧМ-сигнала. Она даёт известную функцию неопределенности для ЛЧМ-сигнала, которая определяет разрешение по времени приема и по частоте при классическом спектрально-корреляционном анализе. Рассмотрим два случая. В первом в качестве порождающей функции будем использовать функцию

$$\hat{x}(\omega_0, t_0) = \exp(i\omega_0(t - t_0)) \quad (2)$$

В этом случае обработка проводится классическим спектрально-корреляционным анализом без учета модулирующей функции ЛЧМ-сигнала. Во втором случае в качестве порождающей функции будем использовать функцию

$$\hat{x}_1(\omega_0, t_0) = \mu(t) \exp(i\omega_0(t - t_0)) = \exp(iAt^2) \exp(i\omega_0(t - t_0)) \quad (3)$$

В этом случае в порождающую функцию включается функция, модулирующая фазу, и обработка проводится спектрально-корреляционным методом, согласованным с сигналом. На рисунке 6 показан результат оптимальной обработки ЛЧМ-сигнала спектрально-корреляционным методом, согласованным с сигналом.

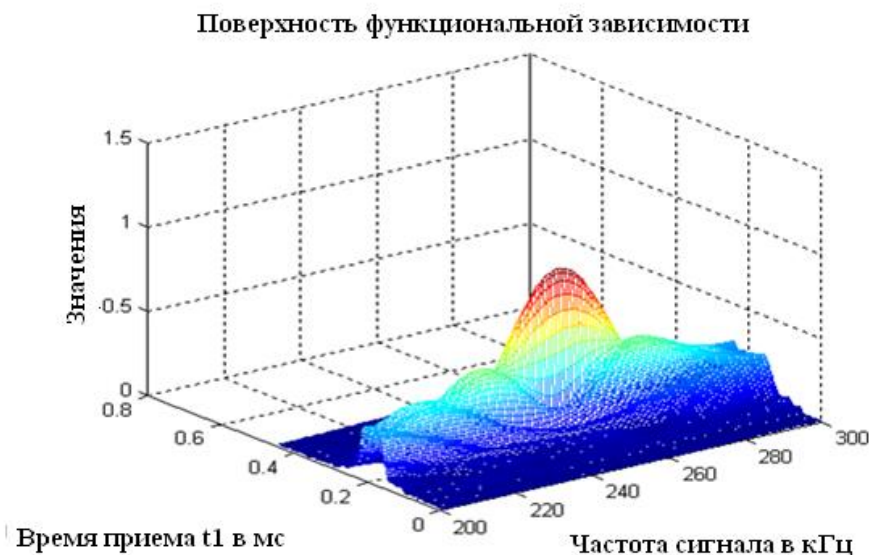


Рисунок 6 - Поверхность функциональной зависимости $\hat{U}(\omega_0, t_0)$ (функция неопределенности) при обработке ЛЧМ-сигнала спектрально-корреляционным методом, согласованным с сигналом.

Полученная поверхность $\hat{U}(\omega_0, t'_0)$ (функция неопределенности) характеризуется одним узким максимумом. Следовательно, разрешение спектрально-корреляционного метода, согласованного с сигналом, как по времени приема, так и по частоте, высокое. При обработке ЛЧМ-сигнала классическим спектрально-корреляционным методом, без учета функции, модулирующей фазу, ширина функции неопределенности по частоте оказывается значительной (рисунок 7). Она определяется девиацией частоты ЛЧМ-сигнала.

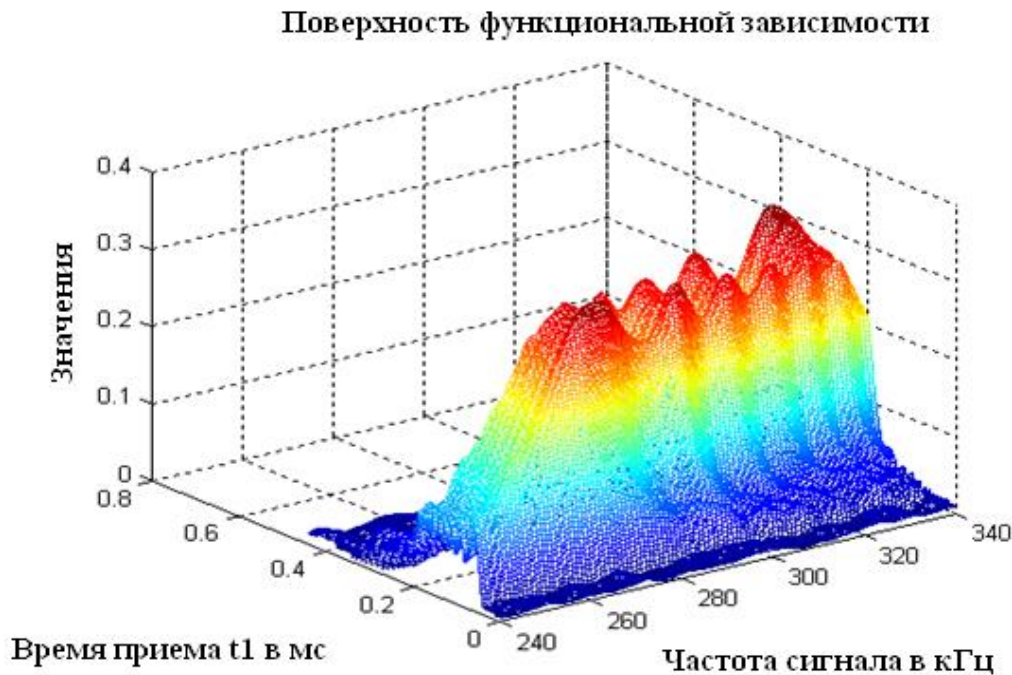


Рисунок 7 - Поверхность функциональной зависимости $\hat{U}(\omega_0, t'_0)$ (функция неопределенности) при обработке ЛЧМ-сигнала классическим спектрально-корреляционным методом.

В результате разрешение классического спектрально-корреляционного метода по времени приема высокое, однако разрешение по частоте оказывается неудовлетворительным по сравнению со спектрально-корреляционным методом, согласованным с сигналом. Аналогичные результаты можно получить и при обработке сложных сигналов на основе М-последовательностей, или на основе кодов Баркера (рисунок 8). Линия с маркером, показанная на рисунке, получена классическим спектральным анализом. Линия без маркера получена спектральным анализом, согласованным с сигналом.

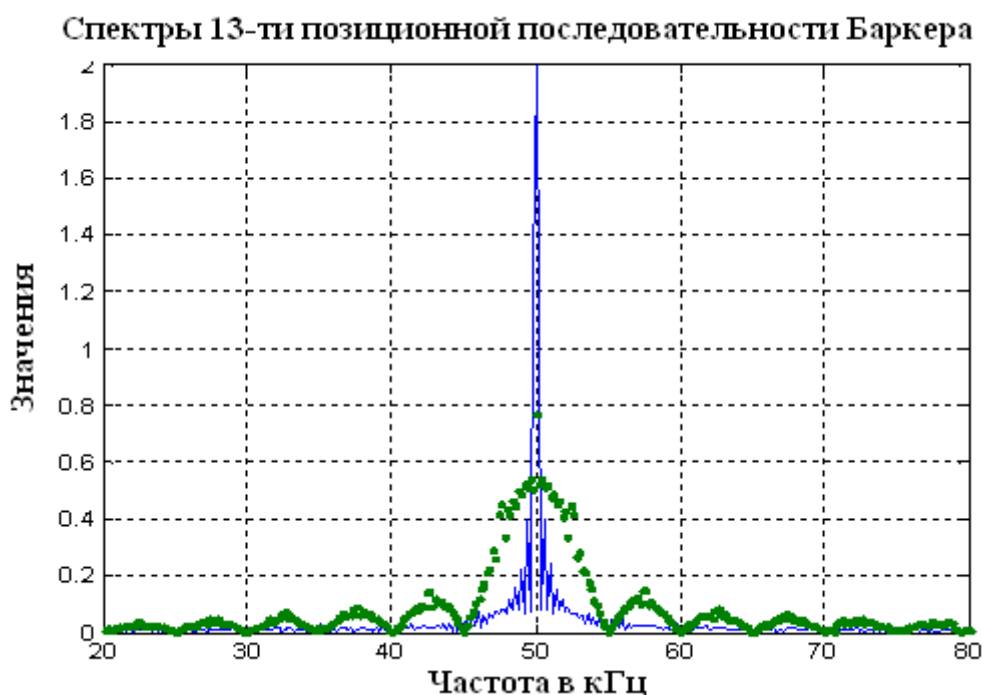


Рисунок 8 - Спектр сигнала на основе 13-ти позиционной последовательности кода Баркера (точки), спектр, согласованный с сигналом (сплошная линия).

Более узкая спектральная линия, соответствующая методу обработки, согласованному с сигналом, характеризует высокую разрешающую способность. Материалы, составляющие основу главы, подробно изложены в работах автора [1-4].

В третьей главе настоящей работы изложены вопросы, связанные с созданием технологии обработки ультразвуковых сигналов методом максимального правдоподобия. Метод максимального правдоподобия позволяет решать статистические задачи, возникающие в комплексах аппаратуры различного назначения. Если в главе 2 рассмотрен ряд вопросов, касающихся обработки сигналов, для случая, когда в принятой реализации содержится один сигнал, то в главе 3 рассмотрены те же вопросы для случая, когда в принятой реализации содержится два или более сигналов. При этом решение усложняется. Появляется дополнительная область – область неортогональности сигналов. В этой области критерий Рэлея не выполняется. Более того, в этой области корреляционная матрица уравнений правдоподобия имеет сингулярность, существенно затрудняющая решение статистических задач. В литературе практически отсутствует анализ влияния сингулярности корреляционной матрицы $\hat{R}(\hat{\lambda})$ на получаемые решения. Покажем ее влияние на решение статистических задач для случая, когда в реализации содержится два сигнала (§3.1). В этом случае решения уравнений правдоподобия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\hat{U}_1(\hat{t}_1, \hat{t}_2) &= \frac{\frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_1^*(\hat{t}_1, t) dt - \hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2) \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_2^*(\hat{t}_2, t) dt}{1 - |\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)|^2}, \\ \hat{U}_2(\hat{t}_1, \hat{t}_2) &= \frac{\frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_2^*(\hat{t}_2, t) dt - \hat{R}^*(\hat{t}_1, \hat{t}_2) \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_1^*(\hat{t}_1, t) dt}{1 - |\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)|^2}.\end{aligned}\quad (4)$$

$\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2) = \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_{\hat{t}_1}^{\hat{t}_2+2T} f_2(\hat{t}_2, t) \hat{f}_1^*(\hat{t}_1, t) dt$ – коэффициент корреляции по времени приема двух ультразвуковых сигналов.

$T_{\text{ЭКВ}} = \int_0^{2T} |\hat{f}_1(\hat{t}_1, t)|^2 dt$ – эквивалентная длительность сигнала.

$D_U = \frac{\sigma^2 \tau_k}{T_{\text{ЭКВ}}(1-|\hat{R}(\tau)|^2)} = \frac{\sigma^2}{N_{\text{ЭКВ}}(1-|\hat{R}(\tau)|^2)}$ – дисперсия Рао-Крамера.

На рисунке 9 показана поверхность функциональной зависимости (4), иллюстрирующая наличие шумовых сингулярных максимумов.

Поверхность функциональной зависимости $\hat{U}_1(\hat{t}_1, \hat{t}_2)$

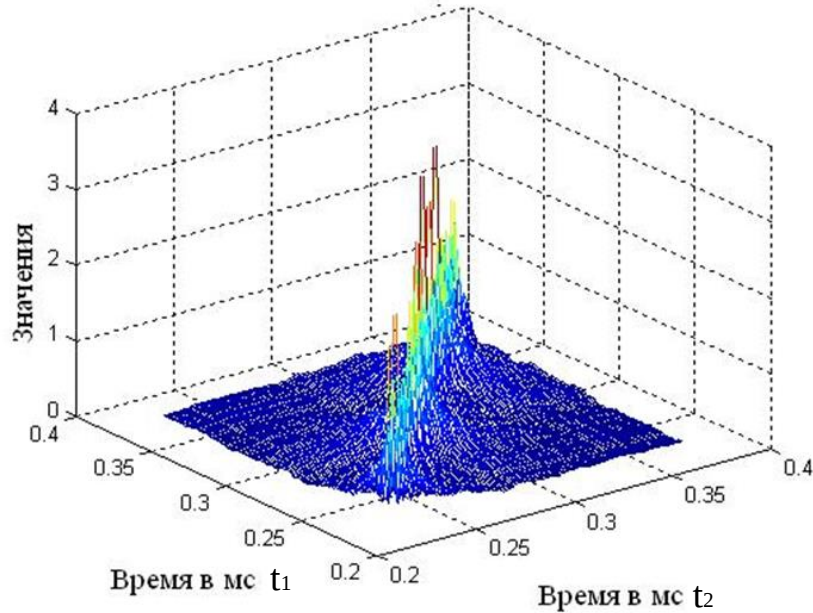


Рисунок 9 - Поверхность функциональной зависимости $\hat{U}_1(\hat{t}_1, \hat{t}_2)$ в пространстве оценок времен приема при отсутствии сигналов в принятой реализации.

Сингулярные максимумы располагаются вдоль диагональной линии, на которой $\hat{t}_1 = \hat{t}_2$ и модуль коэффициента корреляции равен единице. На рисунке 10 показаны совместные статистики оценок амплитуд и времен приема двух сигналов (отмечены прямоугольниками, а и б) и совместная статистика шумовых сингулярных максимумов и их времен приема, при отсутствии сигналов в реализации. Значения амплитуд шумовых сингулярных максимумов превышают амплитуды сигналов, и решение задачи обнаружения сигналов в этих условиях оказывается невозможным.

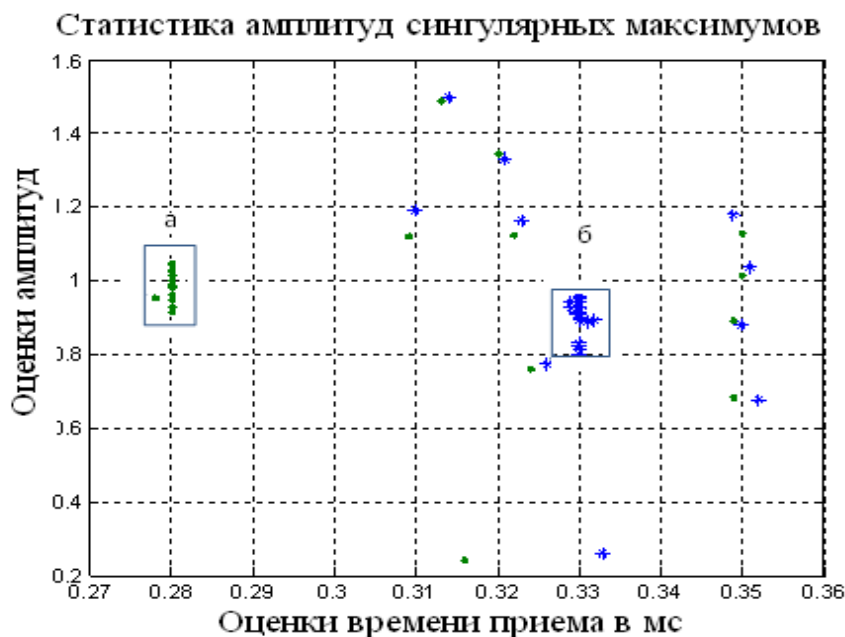


Рисунок 10 - Статистика оценок амплитуд сигналов, амплитуд шумовых сингулярных максимумов и статистика времен приема. Модельные значения времен приема сигналов равны 0.28 мс и 0.33 мс.

В §3.1 предложен метод ограничения разрешения. Он практически полностью подавляет шумовые сингулярные максимумы. Характерной особенностью шумовых сингулярных максимумов являются их попарные малые разности времен приема (близкие к единице модули коэффициентов корреляции). Эта особенность может быть использована для исключения шумовых сингулярных максимумов из рассмотрения. Для этого предлагается ограничить разрешение алгоритмически, ввести условие, согласно которому, если разность времен приема τ для решения меньше определённого значения, то это решение относится к шумовому сингулярному максимуму и может быть исключено из рассмотрения. На рисунке 11 показана совместная статистика оценок амплитуд и времен приема двух сигналов (а, б) и совместная статистика шумовых сингулярных максимумов после ограничения разрешения интервалом ± 5 мкс. Необходимый для исключения шумовых сингулярных максимумов интервал ограничения обычно много меньше длительности сигнала.

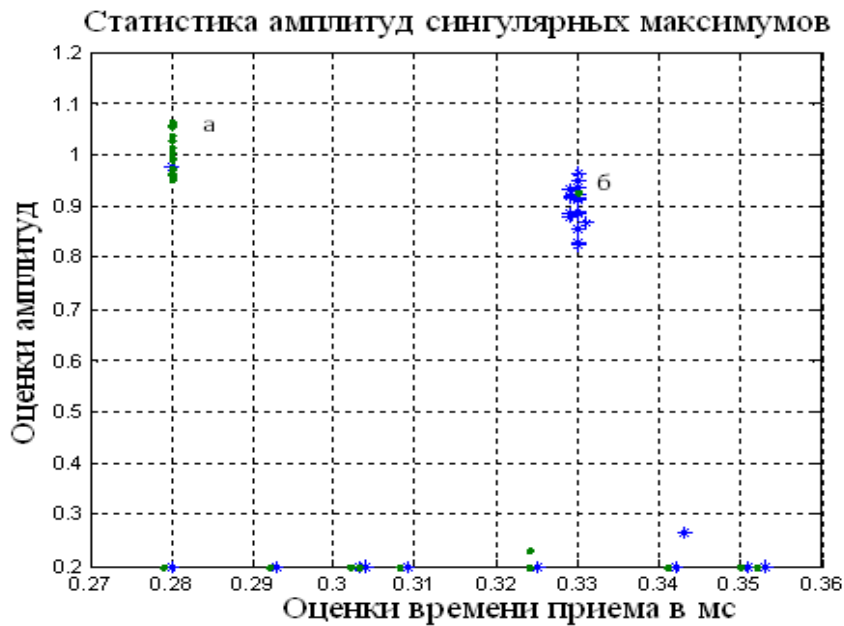


Рисунок 11 – Статистика амплитуд и времен приема двух сигналов и шума при введении ограничения на разрешение.

Амплитуда шумовых сингулярных максимумов, не удовлетворяющих введенному условию, приравнена значению 0.2. Как видно из рисунка, задача обнаружения двух сигналов с введенным ограничением вполне решается при различии времен приема сигналов на 40 мкс, что превышает рэлеевское разрешение в 10 раз.

В §3.2 представлено полное решение задачи обнаружения Я.Д. Ширмана: обнаружение-оценивание-разрешение двух сигналов. Данная задача не была решена до настоящего времени. В ходе работы создана программа, алгоритм которой на основе функционала отношений правдоподобия различает четыре альтернативных возможности: два сигнала содержатся в реализации (1÷20), нет сигналов в реализации (21÷40), первый сигнал содержится в реализации (41÷60), второй сигнал содержится в реализации (61÷80). При этом оказывается решенной и задача оценки времен приема сигналов (Рисунок 13). Алгоритм при ограничении разности времен приема ± 10 мкс позволяет практически полностью исключить шумовые сингулярные максимумы, что снижает вероятность ошибок типа «ложной тревоги».

На рисунке 14 показана статистика максимумов функционала отношения правдоподобия для всех четырёх случаев. Длительность сигналов составляет 300 мкс. Согласно рисунку, Вероятность обнаружения двух сигналов (при их наличии в реализации) выше, чем при обнаружении сигналов по отдельности. Это связано с тем, что энергия совокупности сигналов выше энергии составляющих сигналов.

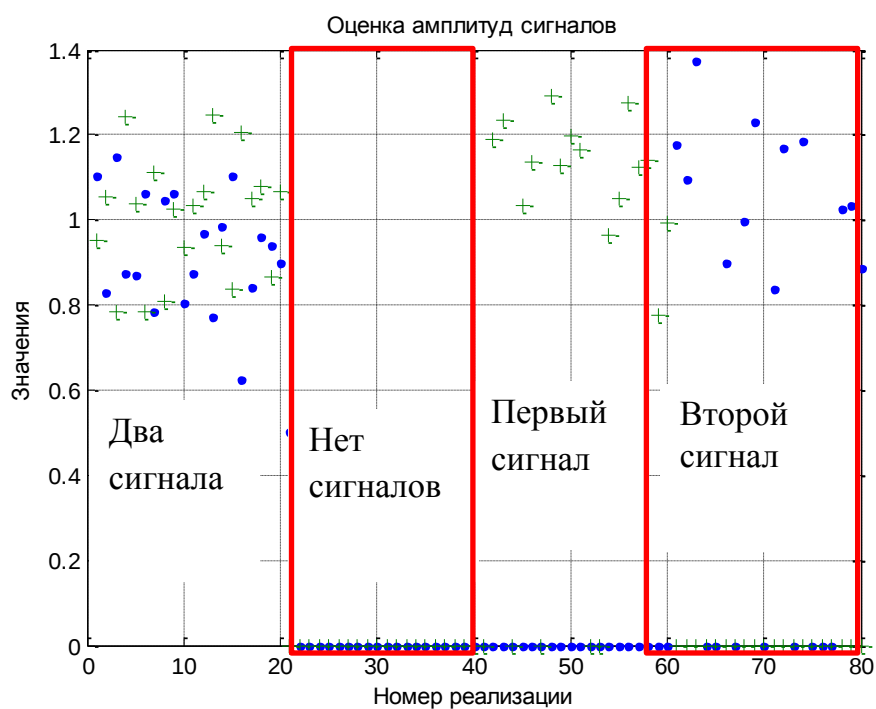


Рисунок 12 – Оценка амплитуд сигналов в области неортогональности с учетом порогового уровня. Отношение сигнал/шум 0 дБ, времена приема 300 мкс и 320 мкс, ограничение на разрешение 10 мкс.

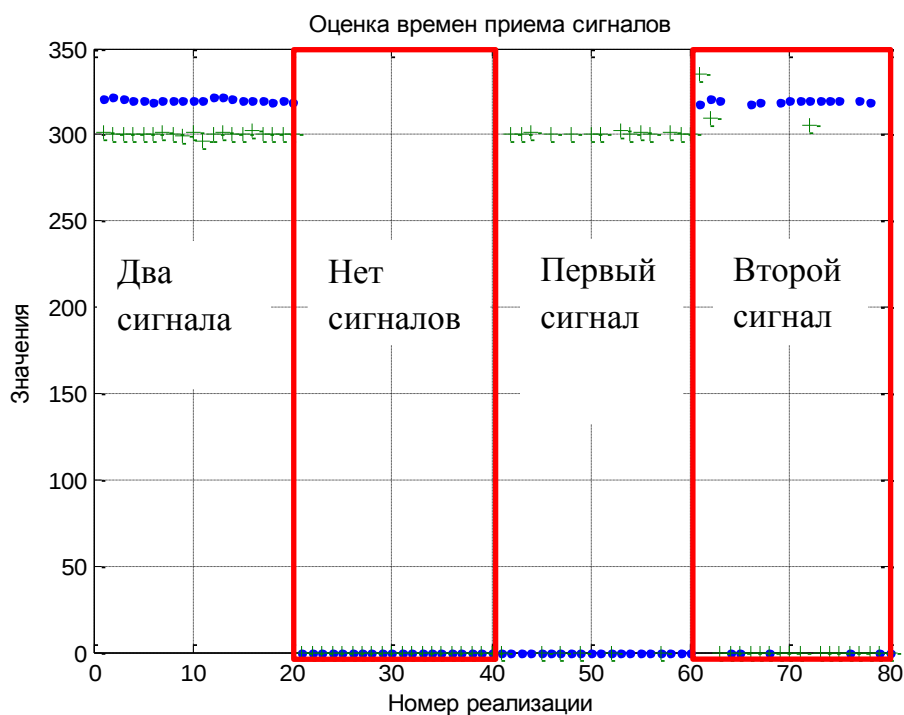


Рисунок 13 – Оценка времен приема сигналов в области неортогональности с учетом порогового уровня. Отношение сигнал/шум 0 дБ, времена приема 300 мкс и 320 мкс, ограничение на разрешение 10 мкс.

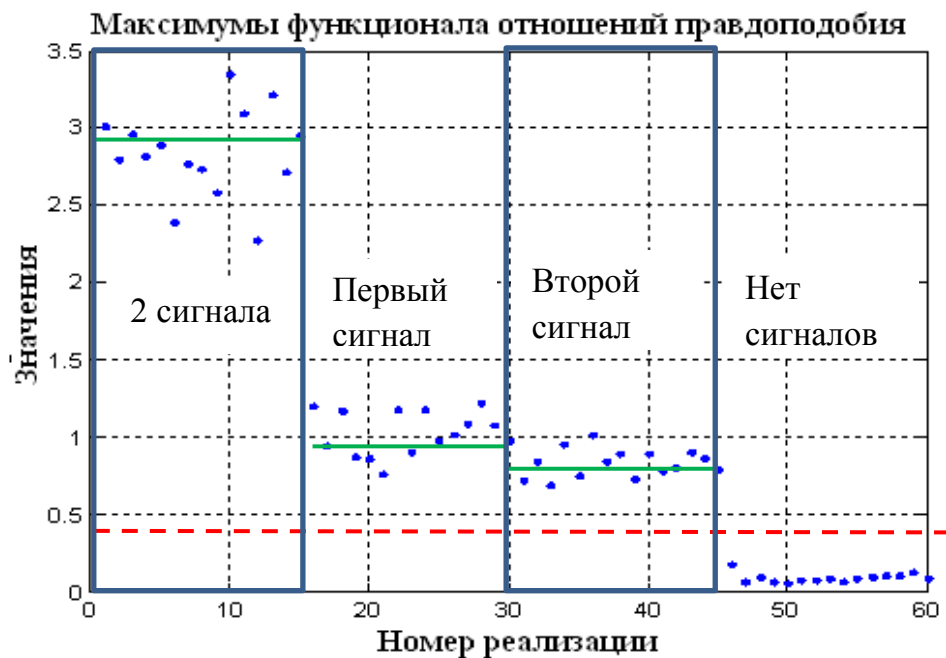


Рисунок 14 – Статистика максимумов функционала отношения правдоподобия в 4-х случаях: 2 сигнала в реализации (1-15-я реализации), 1-й сигнал в реализации (16-30-я реализации), 2-й сигнал в реализации (31-45-я реализации), сигналов в реализации нет (46-60-я реализации). Отношение сигнал/шум -5 дБ, различия времен приема 20 мкс.

В §3.4 рассмотрены статистики оценок параметров сигналов в зависимости от отношения сигнал/шум и разности времен приема в области неортогональности. При установленной точности, статистики параметров позволяют оценивать рабочие области методов обработки сигналов в зависимости от отношения сигнал/шум или разности времен приема. На основе статистики параметров производится оценка их дисперсий, которые сравниваются с дисперсиями Рао-Крамера. При этом может быть установлена несмещённость, эффективность и достаточность оценок. На рисунке 15 представлена отдельная статистика амплитуд двух радиоимпульсов в зависимости от отношения сигнал/шум. Длительность сигналов составляет 300 мкс, модельные значения времени приёма - 300 и 310 мкс, что соответствует области неортогональности. Из рисунка ясно, что при больших значениях отношения сигнал/шум можно получить несмещённые оценки амплитуд, соответствующие модельным значениям. Если ограничить точность оценок значением 20%, тогда рабочим диапазоном оценок амплитуд будут отношения сигнал/шум от 0 дБ и выше (область, отмеченная прямоугольником). На рисунке 16 представлены отдельные статистики оценок времен приема двух сигналов. При больших отношениях сигнал/шум они практически совпадают с модельными значениями. Это указывает на несмещённость решения. Ограничивая точность оценок времен приема значением 10%, можно установить рабочий диапазон измерений отношения сигнал/шум от -5 дБ и выше.

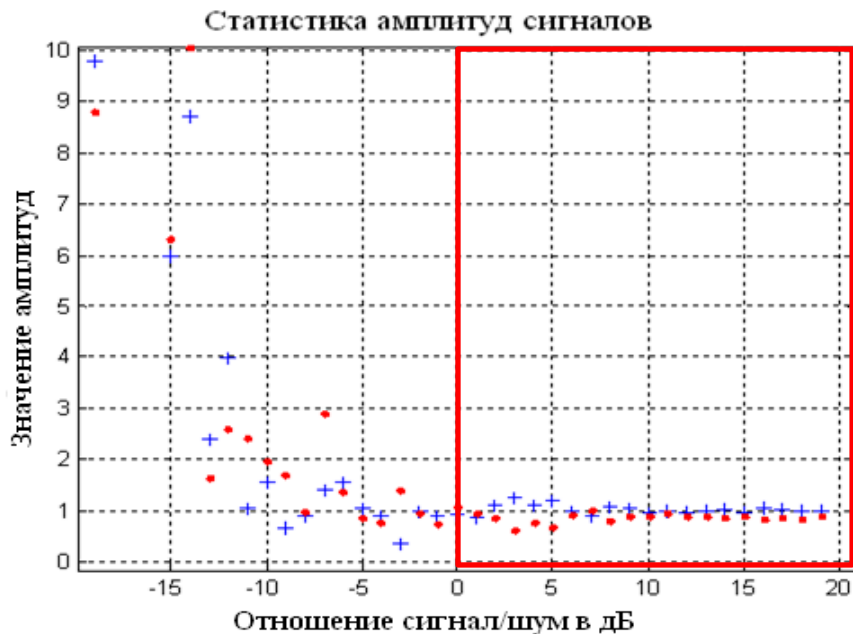


Рисунок 15 – Раздельная статистика оценок амплитуд двух сигналов.

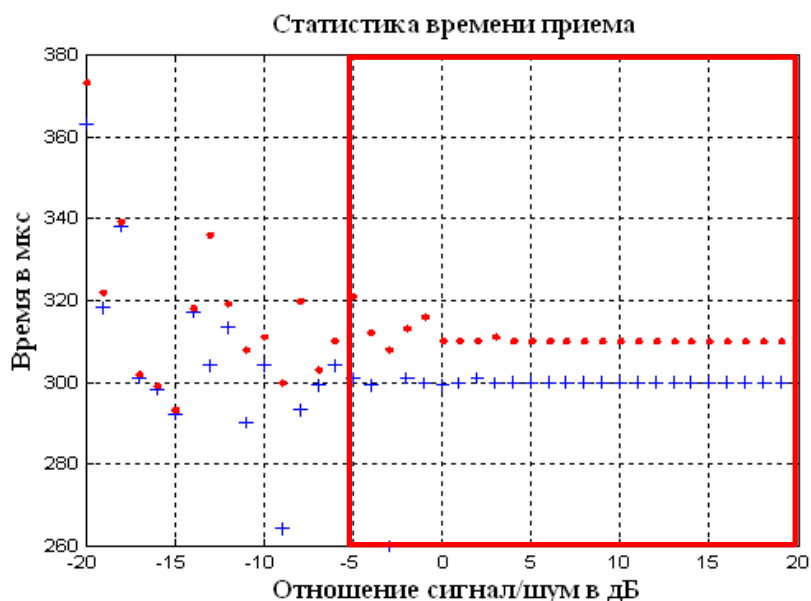


Рисунок 16 – Раздельная статистика оценок времен приема двух сигналов.

В §3.5 рассмотрены методы нахождения максимума функции правдоподобия. Проведено модельное исследование, показывающее возможности применения эволюционных алгоритмов при нахождении максимума функции правдоподобия. Проводится сопоставление их вычислительной эффективности при количестве оцениваемых параметров до 7. Оценивается точность получаемого решения в сравнении с методом перебора. Вопросы максимизации функции правдоподобия рассмотрены в работах автора [30, 31.]

В § 3.6 рассмотрена возможность применения в области ультразвука последовательностей импульсов в соответствии с кодом Баркера или М-последовательностями. Предлагается использовать в ультразвуке возбуждающую последовательность с разрывами в каждой позиции. В этом случае структура кодовой комбинации не меняется, а на выходе излучателя будут отклики одинаковой формы и длительности. На следующих двух рисунках показаны результаты обработки 13-ти позиционной последовательности на основе кода Баркера методом корреляционного анализа (рисунок 17) и методом максимального правдоподобия (рисунок 18). По горизонтали отложены значения разности времен приема последовательностей. По вертикали отложены значения полученных оценок времен приема двух последовательностей. Длительность сигналов составляет 0.3 мс.

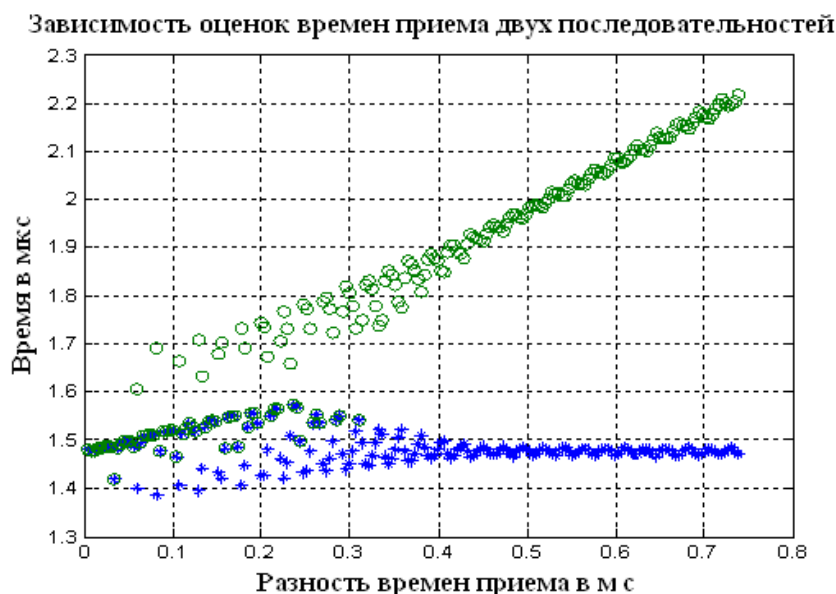


Рисунок 17 – Статистика времен приема двух 13-ти позиционных последовательностей ультразвуковых сигналов в зависимости от разности времен приема. Корреляционная обработка.

Корреляционная обработка не решает задачу разрешения в области разностей времен приема $0 \div 0.3$ мс. Метод максимального правдоподобия дает удовлетворительные оценки времен приема последовательностей практически во всей области решений.

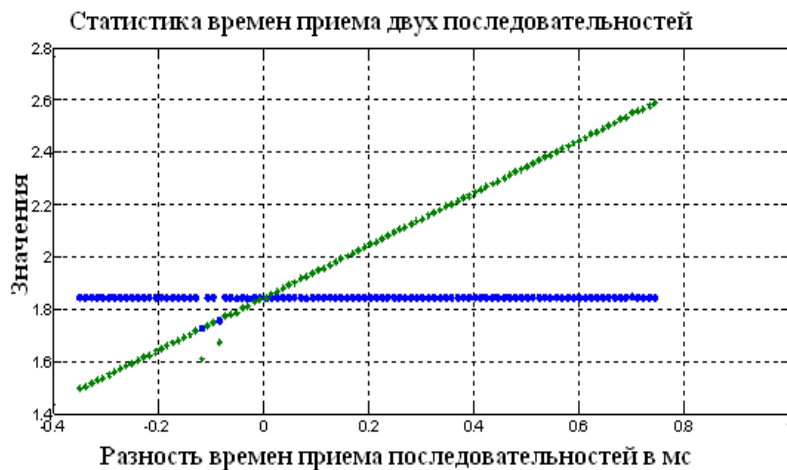


Рисунок 18 – Статистика оценок времен приема двух 13-ти позиционных ультразвуковых последовательностей в зависимости от разности времен приема. Метод максимального правдоподобия

В § 3.7 представлены результаты фильтрации ультразвукового сигнала на фоне помехи, полученные на основе рассматриваемой технологии обработки. При условии, что интервал корреляции случайных параметров помех много больше длительности сигнала, помеха на интервале обработки переходит в класс сигналов. В этом случае она может быть полностью исключена из реализации. Это утверждение подтверждается результатами модельных расчетов, представленных в § 2.8.

В § 3.8 представлены результаты эксперимента, которые показывают возможности разрешения по времени приема двух ультразвуковых сигналов: прямого и отраженного от поверхности, в зависимости от высоты расположения излучателя. Результат показан на рисунке 19.

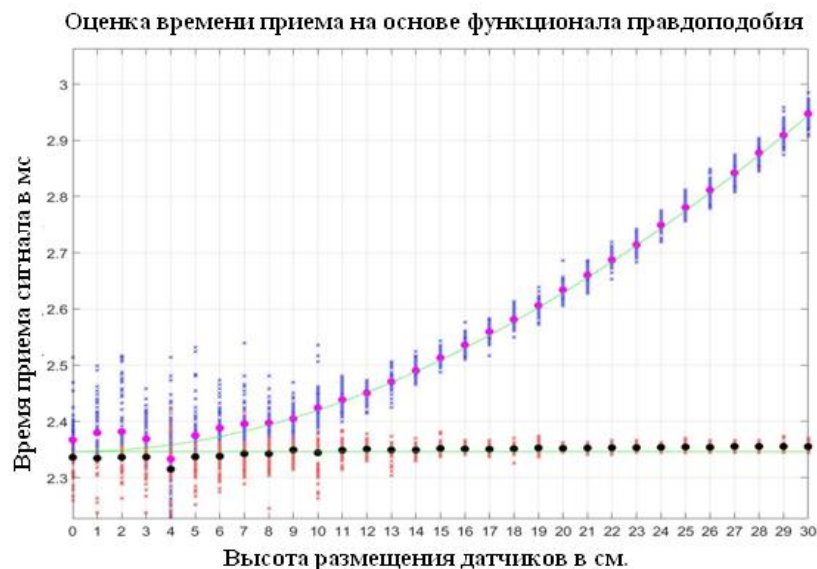


Рисунок 19 – Оценки времени приема прямого и отраженного ультразвукового сигнала, полученные с помощью экспериментальной установки.

Согласно рисунку, достижимое разрешение на макете увеличено по сравнению с рэлеевским в ≈ 7 раз, а при усреднении оценок по ряду реализаций - в ≈ 50 раз. Оценка разности времён приёма, при которой возможно разрешение, равна 0.08 мс, при том, что рэлеевский предел разрешения составляет 0.5 мс. Материалы, составляющие основу главы, подробно изложены в работах автора [1-29].

В четвёртой главе рассмотрены вопросы, связанные с обработкой пространственно-временных ультразвуковых сигналов, получаемых с использованием решетки пьезоэлектрических преобразователей или метода бокового обзора.

В § 4.1, 4.2 рассмотрено применение положений теории, разработанных в предыдущих главах, для обработки пространственно-временных ультразвуковых сигналов. Также приведены результаты модельных исследований. Особенностью является необходимость учёта изменений в пространстве как фазовой зависимости, так и огибающей ультразвукового сигнала. На рисунке 20 показана карта значений пространственно-временной корреляционной функции. Построены эллипсы неопределённости, соответствующие принятым сигналам. Белые точки соответствуют оценкам, полученным согласно минимуму преобразованного функционала правдоподобия. Азимуты источников сигнала: 83° , 88° ; времена приёма: 1 мс, 1.05 мс, отношения сигнал/шум: -10 дБ, -6.5 дБ, коэффициент корреляции $|\hat{R}| = 0.67$

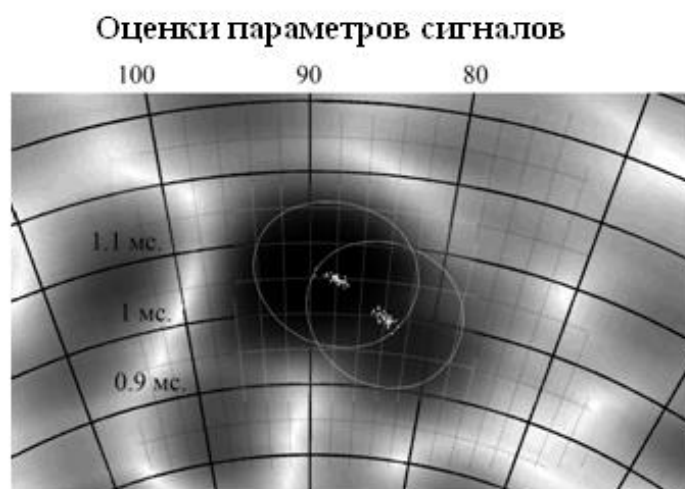


Рисунок 20 – сопоставление азимутов и времен приема двух ультразвуковых сигналов в области высокой корреляции.

Рисунок иллюстрирует возможность увеличения разрешения по азимуту в устройствах с синтезированной апертурой (устройства бокового обзора) по сравнению с разрешением согласно функции неопределенности.

В § 4.3 представлены результаты макетного исследования возможностей оптимальной обработки пространственно-временных ультразвуковых сигналов. Описана экспериментальная установка, реализующая метод бокового обзора, и результаты эксперимента. На рисунке 21 показана зафиксированная в ходе эксперимента диаграмма в координатах азимут - время приёма. Диаграмма направленности ультразвукового преобразователя имеет ширину 90 градусов. Различие азимутов двух объектов равно 15 градусам.

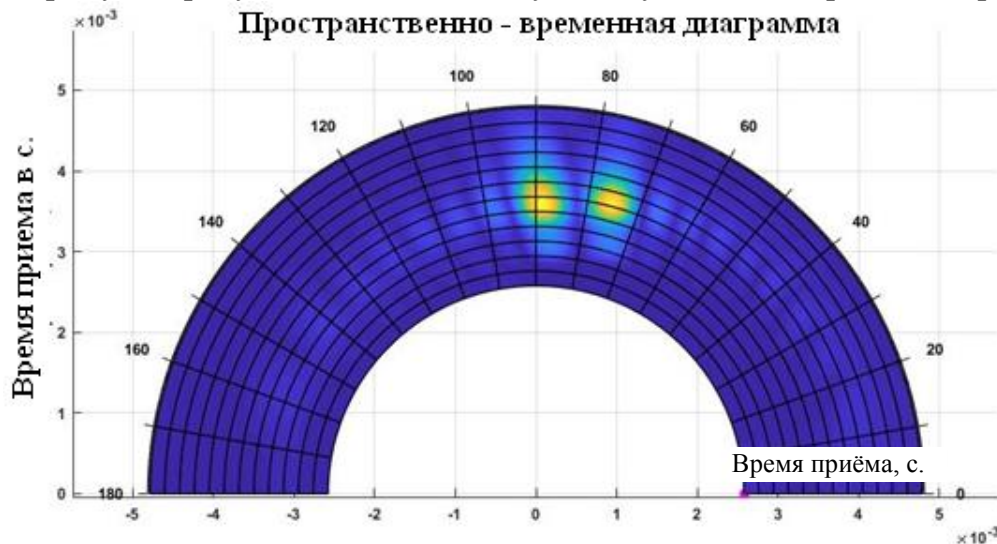


Рисунок 21 – Пространственно-временная диаграмма

Отмечается возможность разрешения двух сигналов за счёт синтезированной апертуры. Дополнительное увеличение разрешающей способности может быть достигнуто при использовании обработки на основе функционала правдоподобия, по аналогии с результатом, показанным на рисунке 20, что представлено в работе. Материалы, составляющие основу главы, изложены в работах автора [25, 26].

Литература

1. Тихонов, В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
2. Трифонов, А.П. Алгоритмы обнаружения сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью на фоне белого шума / Ю.Э. Корчагин, Е.В. Литвинов, А.П. Трифонов // Сборник докладов XIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2007. Т. 1. С. 51–60.
3. Перов, А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 400 с.
4. Пахотин, В.А. Оптимальная обработка сигналов с высоким разрешением / К.В. Власова, В.А. Пахотин, С.В. Петров, Р.В. Симонов // Мягкие измерения и вычисления. 2019. № 4 (17). С. 56–70.
5. Пахотин, В.А. Технология обработки информации, основанная на анализе преобразованного функционала правдоподобия / В.А. Бессонов, К.В.

Власова, С.В. Молостова, В.А. Пахотин, Е.Е. Пешегорин, Р.В. Симонов // Наука. Общество. Оборона. 2019. № 1 (18). С. 10.

Список публикаций автора по теме диссертации.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. Симонов, Р. В. Решение задачи обнаружения ультразвуковых сигналов в области их высокой корреляции / Р. В. Симонов, В. А. Пахотин, К. В. Власова // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 30-38.
2. Симонов, Р. В. Потенциальные возможности разрешения ультразвуковых сигналов Р. В. Симонов, В. А. Пахотин, И. В. Либерман // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024.Т.17, № 3.С12-20.
3. Симонов, Р. В. Технология оптимальной обработки сигналов в области ультразвука с высоким разрешением / Р. В. Симонов, В. А. Пахотин, С. В. Молостова // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 15-23

Публикации в сборниках международных конференций и других изданиях.

4. Власова, К.В. Обнаружение совокупности сигналов методом максимального правдоподобия / В.А. Бессонов, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, К.В. Власова // Материалы VIII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2020. С. 283–288.
5. Пахотин, В.А. Обнаружение сигналов методом максимального правдоподобия / К.В. Власова, И.В. Либерман, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС–2020. М., 2020. С. 41–45.
6. Пахотин, В.А. Потенциальные возможности ближней радиолокации наземных целей / В.А. Бессонов, К.В. Власова, И.В. Либерман, В.А. Пахотин, Э.И. Шустов, Р.В. Симонов // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA–2020: докл. 22-й Междунар. конф. М., 2020. С. 343–347.
7. Пахотин, В.А. Потенциальные возможности метода максимального правдоподобия / К.В. Власова, С.В. Петров, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Мягкие измерения и вычисления. 2021. Т. 43, № 6. С. 28–44.
8. Пахотин, В.А. Оптимальный приемник для обнаружения совокупности сигналов с неизвестными параметрами / К.В. Власова, С.В. Петров, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 4. С. 36–42.
9. Пахотин, В.А. Оптимальная обработка сигналов с высоким разрешением / К.В. Власова, С.В. Петров, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Мягкие измерения и вычисления. 2019. № 4 (17). С. 57–71.
10. Пахотин, В.А. Оценка высоты цели в радиолокаторах метрового диапазона волн / В.А. Бессонов, К.В. Власова, С.В. Молостова, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин, Э.И. Шустов // Цифровая обработка сигналов. 2019. № 2. С. 54–58.
11. Пахотин, В.А. Применение банка помех для решения статистических задач в системах ближней локации / К.В. Власова, С.В. Петров, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Мягкие измерения и вычисления. 2020. Т. 27, № 2. С. 19–36.
12. Пахотин, В.А. Потенциальные возможности обработки дифракционных максимумов в оптических системах / В.А. Бессонов, К.В. Власова, В.С.

- Чистяков, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Цифровая обработка сигналов и её применение (ЦОС-2021): докл. 23-й Междунар. конф. М., 2021. С. 116–120.
13. Симонов, Р.В. Разрешение ультразвуковых сигналов методом максимального правдоподобия / С.В. Молостова, В.А. Пахотин, С.В. Петров, Р.В. Симонов // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий. М., 2021. С. 56–60.
 14. Власова, К.В. К вопросу оптимальности методов обработки сигналов / В.А. Бессонов, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, К.В. Власова // Материалы IX Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2021. С. 420–425.
 15. Коротей, Е.В. Оптимальный приёмник для отдельного обнаружения сигналов / С.В. Молостова, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, Е.В. Коротей // Материалы IX Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2021. С. 435–440.
 16. Пахотин, В.А. Оптимальный приём сигналов с высоким разрешением / В.А. Бессонов, К.В. Власова, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019: докл. 21-й Междунар. конф. М., 2019. С. 331–336.
 17. Симонов, Р.В. Разрешающая способность в области ультразвуковой акустики / И.В. Либерман, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 1. С. 78–81.
 18. Пахотин, В.А. Обнаружение радиоимпульса с оценкой дисперсии шума / С.В. Молостова, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Радиолокация, навигация, связь: XXI Междунар. науч.-тех. конф. Воронеж, 2015. С. 223–229.
 19. Анискевич, В.М. Цифровая обработка ультразвуковых сигналов методом максимального правдоподобия / В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, В.М. Анискевич // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2015. С. 361.
 20. Симонов, Р.В. Угловое разрешение сигналов на основе преобразованного функционала правдоподобия / А.И. Бабинович, А.В. Парфенов, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2017. Т. 7, № 2. С. 209–213.
 21. Власова, К.В. Оценка угловых параметров пространственных сигналов на основе преобразованного функционала правдоподобия / А.И. Бабинович, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, К.В. Власова // V Международный Балтийский Морской Форум: материалы форума. Калининград, 2017. С. 452–461.
 22. Власова, К.В. Решение задачи обнаружения сигнала с неизвестными параметрами / С.В. Молостова, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, К.В. Власова // Материалы VIII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2018. С. 417–423.
 23. Чернова, И.Б. Обнаружение ЛЧМ-сигналов с неизвестными параметрами при обработке данных радиолокатора метрового диапазона / С.В. Молостова, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, И.Б. Чернова // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8, № 3. С. 78–82.

24. Пахотин, В.А. Проблемы обработки неортогональных радиолокационных сигналов / В.А. Бессонов, К.В. Власова, С.В. Молостова, В.А. Пахотин, Э.И. Шустов, Р.В. Симонов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8, № 3. С. 78–82.
25. Симонов, Р.В. Разрешение пространственных сигналов с применением преобразованного функционала правдоподобия / А.И. Бабинович, К.В. Власова, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов // Вестник молодежной науки. 2017. № 3 (10). С. 18.
26. Симонов, Р.В. Пространственно-временное разрешение ультразвуковых сигналов методом максимального правдоподобия / В.А. Пахотин, Р.В. Симонов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8, № 3. С. 103–107.
27. Пахотин, В.А. Потенциальные возможности систем связи с ограниченной частотной полосой каналов / А.Н. Алещенко, К.В. Власова, С.В. Петров, Р.В. Симонов, В.А. Пахотин // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 24–29.
28. Петров, С.В. Системы связи с ограниченной частотной полосой каналов / К.В. Власова, В.А. Пахотин, Р.В. Симонов, С.В. Петров // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС–2020. М., 2020. С. 60–64.
29. Власова, К.В. Потенциальные возможности систем связи с ограниченной частотной полосой / В.А. Пахотин, С.В. Петров, Р.В. Симонов, К.В. Власова // Материалы IX Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2021. С. 415–419.
30. Симонов, Р.В. Развитие методов поиска экстремума в задаче разрешения сигналов на основе функционала правдоподобия / В.А. Пахотин, Р.В. Симонов // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019: докл. 21-й Междунар. конф. М., 2019. С. 347–352.
31. Симонов, Р.В. Алгоритмы поиска экстремума в методе максимального правдоподобия / В.А. Пахотин, Р.В. Симонов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2016. № 3. С. 54–62.

Благодарности

Выражаю глубокую благодарность научному руководителю
Пахотину Валерию Анатольевичу, доктору физико-математических наук,
профессору, профессору ОНК Институт высоких технологий
БФУ им. И. Канта.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ:

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

- § 1.1. Аналитический обзор литературы .
- § 1.2 Математические модели ультразвукового сигнала.
- § 1.3. Основные положения теории оптимального приёма.

ГЛАВА 2. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ.

- § 2.1. Неоднозначность решения статистических задач методом максимального правдоподобия.
- § 2.2 Оптимальность спектрального, корреляционного и углового спектрального анализа
- § 2.3. Спектральный и корреляционный анализ, согласованный с сигналом
- § 2.4. Спектрально-корреляционный анализ ЛЧМ-сигналов
- § 2.5. Спектрально-корреляционный анализ синфазной импульсной последовательности

ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

- § 3.1. Обработка ультразвуковых сигналов с учетом сингулярности корреляционной матрицы.
- § 3.2. Решение задачи раздельного обнаружения двух ультразвуковых сигналов.
- § 3.3. Метод обнаружения сигналов на основе статистики значений функционала отношения правдоподобия.
- § 3.4. Потенциальные возможности оценки параметров ультразвуковых сигналов
- § 3.5. Максимизация функции правдоподобия эволюционными алгоритмами
- § 3.6. Метод обработки кодовых последовательностей в области ультраакустики.
- § 3.7. Помехоустойчивость при обработке ультразвуковых сигналов.
- § 3.8. Результаты эксперимента по разрешению ультразвуковых сигналов.

ГЛАВА 4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ.

- § 4.1. Основы пространственно-временной обработки ультразвукового сигнала
- § 4.2. Пространственно-временное разрешение ультразвуковых сигналов методом максимального правдоподобия
- § 4.3. Оптимальная обработка ультразвуковых сигналов при синтезировании апертуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРА

Симонов Роман Валерьевич

**РАЗВИТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
СИГНАЛОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать __.10.2025 г.
Формат 60×90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1.9
Тираж 66 экз. Заказ __

Отпечатано в Полиграфическом центре
Балтийского федерального университета им. И. Канта
236001, г. Калининград, ул. Гайдара, 6