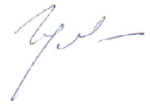


На правах рукописи



ГУСЕВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ОПТИМИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНОЙ И АДАПТИВНОЙ
ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ КОМПЛЕКСА ПОМЕХ**

Специальность 05.12.04

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань 2015

Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В непрерывно развивающихся в настоящее время радиотехнических системах (РТС) обнаружение, фильтрация, измерение параметров сигналов при устойчивом функционировании в условиях действия комплекса помех является традиционной и вместе с тем актуальной задачей, стоящей при проектировании и частотно-территориальном планировании РТС. Большую остроту данная проблема приобретает с непрерывно возрастающим потоком передаваемой, принимаемой и обрабатываемой информации, сложностью пространственной конфигурации, интеграцией радиосистем, решающих различные задачи при непрерывно растущей интенсивности использования частотного диапазона, проблемой электромагнитной совместимости и радиопротиводействия. Решение этих задач требует более полного учета характеристик радиосигналов и помех и, в частности, их пространственных и амплитудных распределений, использования дополнительных возможностей повышения эффективности, помехоустойчивости и качества функционирования РТС. В связи с этим развитие теории оптимального приема радиосигналов на фоне помех связано с усложнением моделей наблюдаемых процессов, в которых все более полно учитываются их характеристики.

В процессе развития приемных систем и, в основном, распределенных систем датчиков измерения электромагнитного поля, результаты корреляционной теории были распространены на случай многомерных процессов, что позволило создать корреляционную теорию пространственно-временной обработки сигналов. основополагающие работы в области теории помехоустойчивого приема и пространственно-временной обработки сигналов были сделаны такими отечественными и зарубежными учеными, как Ширман Я.Д., Абрамович Ю.А., Кловский Д.Д., Ван Трис Г., Монзинго Р.А., Миллер Т.У., Уидроу Б. и другими.

Решению задач и развитию теории и техники нелинейной пространственно-временной обработки многомерных сигналов и полей посвятили свои работы такие ученые, как Стратонович Р.Л., Сосулин Ю.Г., Тихонов В.И., Калман Р., Сейдж Э., Мелс Дж., Ярлыков М.С., Шмелев А.Б., Джиган В.И., Приоров А.Л. и другие.

Предложенный профессором Ю.Г. Сосулиным оценочно-корреляционно-компенсационный (ОКК) метод дает возможность синтезировать системы обработки сигналов, обладающие структурной инвариантностью, которая сохраняется при достаточно общих моделях радиосигналов и помех. Общность ОКК подхода позволяет сохранять структурную инвариантность на достаточно широком классе сигнально-помеховых ситуаций и охватывать практически все задачи обработки радиосигналов. Данный подход получил значительное развитие в научных исследованиях профессоров Ю.Н. Паршина и В.В. Кострова.

Следует отметить, что в настоящее время не существует технических средств, позволяющих реализовать непрерывную по пространству нелинейную обработку полей. Требуется развитие теории нелинейной обработки непрерывных полей в РТС, не разработаны алгоритмы дискретизации поля совместно с ОКК обработкой радиосигналов, которая представляется наиболее конструктивной в данной области и дает возможность решать задачи компенсации помех в целях повышения помехоустойчивости и качества функционирования РТС.

Алгоритмы оптимизации пространственных структур (ОПС) РТС при обработке непрерывных по пространству полей дают эффект при оптимизации произвольной системы датчиков, используемой для измерения полей, в частности при обработке радиосигналов в системах, использующих адаптивные системы датчиков измерения по-

ля. Поэтому подход, основанный на предварительной дискретизации поля, является перспективным с точки зрения технической реализации полученных алгоритмов.

В настоящей диссертационной работе проводится разработка методов получения оптимальных пространственных структур РТС и их геометрии при дискретизации непрерывного поля элементами приемной системы.

Таким образом, тема диссертации является актуальной и направленной на повышение помехоустойчивости и качества функционирования РТС с использованием возможности пространственной реконфигурации радиотехнических систем.

Цель и задачи работы. Основной целью диссертационной работы является повышение эффективности и помехоустойчивости РТС путем использования оптимальных и квазиоптимальных пространственно-реконфигурируемых структур РТС с использованием ОКК и пространственно - временной обработки радиосигналов на фоне помех для оптимальных, робастных и адаптивных систем.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

- разработки оптимальных и квазиоптимальных пространственных структур систем ОКК обработки сигналов по критерию максимального правдоподобия (МП);
- анализа полученного алгоритма по критерию минимума среднеквадратической ошибки (МСКО) путем вычисления границы Рао-Крамера, по критерию максимума отношения сигнал-(помеха+шум) (ОСПШ), а также анализ пространственных характеристик получаемых структур РТС;
- разработки робастного алгоритма ОПС РТС для обеспечения устойчивости решений задачи, относящейся к классу некорректных, методом регуляризации с использованием метрики, основанной на взаимном отличии пространственных структур (ПС);
- ОПС в динамическом режиме функционирования РТС для пространственно нестационарных помех;
- ОПС РТС на последовательных выборках наблюдаемых данных на основе теории оптимальных статистических оценок с использованием алгоритмов МП и полиномиальной аппроксимации достаточной статистики;
- получения и использования оптимальных пространственных структур РТС совместно с нелинейной пространственно-временной обработкой радиосигналов на фоне комплекса помех;
- повышения скорости сходимости процесса адаптации в системе обработки сигналов с ОПС;
- адаптации параметров алгоритмов фильтрации помех в условиях статистической априорной неопределенности;
- разработки вариантов практической реализации полученных алгоритмов оптимизации пространственных структур в условиях действия помех с использованием ОКК подхода для оптимальных, адаптивных и робастных систем;
- применения перспективных вариантов оптимальных пространственных структур в реконфигурируемых РТС.

Научная новизна.

1. Разработан метод получения оптимальных и квазиоптимальных пространственных структур (ПС) систем обработки непрерывных полей, основанный на их пространственной дискретизации. Представленный алгоритм оптимального приема сигналов совместно с вычислением максимально правдоподобной оценки пространственных координат элементов приемной системы позволяет определить оптимальную ПС РТС. Задача ОПС РТС поставлена и решена на основе ОКК метода.

2. Проведен анализ эффективности представленного алгоритма ОПС РТС по критерию МСКО путем вычисления границы Рао-Крамера, по критерию максимума ОСПШ, а также с точки зрения направленных свойств получаемых структур.

3. Решена задача получения робастных ПС РТС методом регуляризации с использованием метрики, которая позволяет получить устойчивое решение некорректной задачи при высокой чувствительности структур к изменению пространственного положения источников помех.

4. Впервые доказана возможность получения ОПС РТС помехоустойчивой пространственно-временной обработки сигналов на основе анализа последовательных выборок наблюдаемых данных с использованием метода МП.

5. Доказана эффективность оценивания параметров сигнала методом МП на последовательных выборках наблюдаемых данных.

6. Впервые решена задача ОПС на последовательных выборках на основе теории оптимальных статистических оценок. При этом для расчета оценок предложены алгоритм МП и алгоритм полиномиальной аппроксимации достаточной статистики.

7. Впервые доказана возможность применения методов ОПС РТС как одного из видов предпроцессорной обработки сигналов в задаче повышения скорости сходимости адаптивной пространственной компенсации помех, в том числе, с учетом взаимного влияния элементов, учитывающих технические ограничения на положения приемных элементов.

8. Разработан квазилинейный алгоритм адаптивной фильтрации негауссовской помехи, в котором в качестве модели помехи использован ограниченный по амплитуде гауссовский шум, что дает возможность дополнительно оптимизировать РТС путем подстройки уровня ограничения амплитуды оценки помехи.

9. Проведен анализ адаптивной подстройки параметров алгоритма среднеквадратичной фильтрации случайных процессов на фоне белого шума, который позволяет решать широкий круг задач обработки радиосигналов в условиях априорной неопределенности.

10. Разработан алгоритм оптимальной обработки радиосигнала на фоне комплекса широкополосных (ШП) гауссовских и негауссовских помех, содержащий операции пространственной декорреляции ШП помех и оптимальную пространственно-временную обработку сигнала на фоне негауссовской помехи и некоррелированного гауссовского шума. Критерий позволяет отразить влияние пространственных характеристик радиосигнала и помех, а также ПС системы обработки. Это дает новое решение задачи повышения помехоустойчивости путем перераспределения пространственного и временного ресурсов в системе обработки сигналов.

11. Разработан метод адаптации параметров алгоритмов фильтрации случайных процессов по критерию МП, обеспечивающий сходимость алгоритмов фильтрации к оптимальным в общем случае подстройки энергетических и неэнергетических параметров, а также получение алгоритмов адаптивной фильтрации, имеющих высокую эффективность при белых и небелых слабокоррелированных шумах наблюдения.

Практическая значимость и внедрение результатов работы. Представленные в диссертационной работе метод оптимизации и анализ полученных ПС РТС совместно с нелинейной обработкой сигналов в целях компенсации комплекса помех использованы при проектировании и частотно-территориальном планировании инфокоммуникационных систем. Реализация результатов исследований позволяет улуч-

шить качество функционирования РТС - повысить помехоустойчивость систем в сложной помеховой обстановке.

Получаемые робастные ОПС, обеспечиваемые применением регуляризованного алгоритма, позволяют понизить требования к быстродействию перестройки и, таким образом, более точно устанавливать оптимальные координаты приемных элементов. В результате помехоустойчивость системы обработки дополнительно увеличивается по сравнению со случаем отсутствия регуляризации при наличии инерционности пространственной механической реконфигурации ПС.

Разработанный квазилинейный алгоритм адаптивной фильтрации негауссовской помехи, в котором в качестве модели негауссовской помехи использован ограниченный шум, дает возможность оптимизировать РТС путем подстройки уровня ограничения амплитуды оценки помехи и обеспечить подавление класса помех с различной степенью отклонения от гауссовского закона распределения.

В соответствии с полученным алгоритмом квазилинейной компенсации негауссовской помехи разработана структурная схема устройства, содержащего в блоке формирования опорного сигнала новые отличительные элементы с нелинейными характеристиками. Получен патент на изобретение.

Применение ОПС совместно с нелинейной компенсацией помех позволяет эффективно реализовать адаптивное и робастное функционирование РТС.

Направление исследований диссертационной работы тесно связано с тематикой НИР, выполненных и выполняемых в РГРТУ:

- 1997 – 1998 г.г. НИР «Разработка и исследование пространственных структур телекоммуникационных систем в сложной помеховой обстановке» (ответственный исполнитель);
- 1997 – 1998 г.г. НИР «Разработка принципов построения бортовой системы грозового мониторинга» (исполнитель);
- 1999 – 2000 г.г. НИР «Методы, алгоритмы и устройства обработки всплесковых сигналов в системах гролокации» (ответственный исполнитель);
- 2003 – 2004 г.г. НИР «Разработка пространственных структур радиолокационных и телекоммуникационных систем» (исполнитель);
- 2006 – 2007 г.г. НИР «Оптимизация пространственных структур радиолокационных и телекоммуникационных систем» (исполнитель);
- 2008 – 2010 г.г. НИР «Методы оптимизации пространственных структур и алгоритмов обработки сигналов в ММО радиолокационных и телекоммуникационных системах» (исполнитель);
- с 2014 г. по настоящее время – НИР «Разработка базовых информационных технологий создания перспективных космических радиолокационных и инфокоммуникационных систем на основе методов нелинейной пространственно-временной обработки многомерных сигналов и полей» (научный руководитель);
- с 2015 г. по настоящее время – НИР «Исследования по разработке бортового информационно-измерительного комплекса с высокоскоростной системой передачи данных блока научной аппаратуры метеорологической ракеты, стабилизированной вращением» (ответственный исполнитель).

Результаты диссертационной работы были использованы в ФГБУ «НПО «Тайфун», ОАО «Концерн «Моринсис-Агат», АО «НПК «КБМ», ООО «АВБ Лабс», научно-исследовательской части ФГБОУ ВПО «РГРТУ», в учебном процессе Берлинского Технического Университета (Technische Universität Berlin), а также в учебном процессе ФГБОУ ВПО «РГРТУ», что подтверждено соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод получения оптимальной пространственной структуры РТС, обеспечивающий подавление помех при использовании меньшего количества элементов N приемной системы или позволяющий увеличить число подавляемых помех $M > N - 1$ при заданных показателях помехоустойчивости и количестве приемных элементов.

2. Метод получения оптимальной пространственной структуры РТС, позволяющий получать робастные, практически реализуемые с помощью интерполяции пространственных характеристик помех пространственные структуры, устойчивые как к неточностям задания начальных условий, так и априорной неопределенности сигнально-помеховой ситуации с выигрышем 4...7 дБ по сравнению с эквидистантной системой.

3. Метод повышения помехоустойчивости в динамической РТС с применением ОПС с регуляризацией, позволяющий получить выигрыш в ОСПШ до 5,5 дБ при обработке сигнала на фоне пространственно-нестационарных помех с инерционностью системы обработки до 1,5 длины волны за один такт работы системы.

4. Метод распределения ресурсов в радиотехнической системе, основанный на нелинейной оценочно-корреляционно-компенсационной обработке сигналов и оптимизации пространственной структуры РТС, позволяющий решать задачу повышения помехоустойчивости на 5...10 дБ.

5. Метод повышения качественных характеристик РТС при использовании оптимизации пространственной структуры в качестве предпроцессора в адаптивной приемной системе, позволяющий увеличить скорость сходимости процесса адаптивной подстройки весовых коэффициентов приемной системы при обработке сигнала на фоне пространственно сосредоточенных помех до 20 раз.

Методы проведения исследований. В диссертационной работе при проведении исследований использованы методы математической статистики, теории статистических решений, ОКК метод, методы нелинейной фильтрации марковских процессов, теории решения некорректных задач, аналитической геометрии.

Анализ получаемых решений проводится с использованием вычислительных методов многомерной оптимизации, статистического моделирования, теории матриц.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях (НТК): НТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях радиоэлектроники», г. Рязань, РГРТА, 1996 г.; Международная НТК «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», г.Туапсе, ХГТУРЭ, 1996 г.; Всероссийская НТК «XIII Гагаринские чтения», г.Москва, РГТУ-МАТИ, 1997 г.; НТК «Радиоволоконно-оптическая связь, локация и навигация», г.Воронеж, ВГТУ, 1997 г.; 2-я Международная НТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации», г. Владимир, ВлГУ, 1997 г.; Международная НТК «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», г. Туапсе, ХГТУРЭ, 1997 г.; Международная НТК «Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем», г. Пенза, ПГУ, 1997 г.; 52-я научная сессия РНТОРЭС им. А.С. Попова, г.Москва, 1997 г.; Международная НТК «К.Э.Циолковский - 140 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», г.Рязань, 1997; 1-я, 2-я, 3-я Международные НТК «Цифровая обработка сигналов и ее применения», г.Москва, 1998 г., 1999 г., 2000 г.; Международная НТК «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А.Котельникова», г. Москва, 2003 г.; Международная НТК «Излучение и рассеяние электромагнитных волн (ИРЭМВ)», г.Таганрог, 2007 г.; 9-я Международная НТК

«Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», г. Казань, КГТУ, 2008 г.; 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications, MIKON-2010, Vilnius, Lithuania, 2010; 17-я Международная НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», г.Рязань, 2012 г.; XXVIII Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред», г. Санкт-Петербург, ВКА им. А.Ф.Можайского, 2013 г.; 6-я Международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», г.Рязань, 2013 г.; 24-я, 25-я Международные Крымские конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2014, 2015 г.г.; 3-я Всероссийская научно-практическая конференция «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы (РЛС-2015)», г. Муром, 2015 г.; XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2015), Омск, 2015 г.; International Radar Symposium 2015 (IRS-2015), Dresden, Germany, 2015, а также на научном семинаре кафедры радиотехнических устройств ФГБОУ ВПО «РГРТУ».

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 48 работах. Из них 1 коллективная монография, 18 статей в журналах, рецензируемых ВАК РФ, 10 публикаций в международных базах данных (Scopus, Web of Science), 26 докладов на конференциях, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 202 наименований и 2 приложений. Диссертация содержит 305 страниц, в том числе 5 таблиц и 101 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления научных исследований, сформулированы цель работы и поставленные связанные с ней задачи, проводится анализ современного состояния дел и полученных научно-технических решений в рассматриваемой области.

В первой главе проводится обоснование и разработка метода получения ОПС, включающего:

- ОКК алгоритм оптимального приема сигналов,
- алгоритм вычисления МП оценки пространственных координат элементов приемной системы и определения оптимальной ПС системы обработки радиосигналов,
- квазиоптимальный алгоритм вычисления пространственных координат.

Полагается, что доступная наблюдению область пространства ограничена поверхностью S , а наблюдаемое на ней скалярное поле представляет собой сумму комплексных огибающих полезного сигнала и помехи:

$$x_t(r) = s_t(\theta, r) + \eta_t(r), \quad t \in [0, T],$$

где $\theta = \{0, L\}$ – номер дискретного сообщения, причем случай $\theta = 0$ соответствует отсутствию сигнала в наблюдаемом процессе, $r \in S \subset R_p$ – координата точки измерения поля в p -мерном пространстве. В зависимости от заданной структуры приемной системы p выбирается равным 1, 2 или 3. В частном случае обнаружения сигнала $\theta = \{0, 1\}$, а сигнал $s_t(\theta, r) = \theta s_t(r)$.

Полагается, что непрерывное по пространству поле может быть представлено в виде ряда, коэффициентами в котором являются n пространственных отсчетов комплексных огибающих с координатами r_i :

$$x_t(r) = \sum_{i=1}^n x_{it} \phi_i(r, r_i) = \sum_{i=1}^n s_{it}(\theta) \phi_i(r, r_i) + \sum_{i=1}^n \eta_{it} \phi_i(r, r_i),$$

где ϕ_i – базисные функции при пространственной дискретизации поля, $x_{it} = x_t(\theta, r_i)$, $s_{it} = s_t(\theta, r_i)$, $\eta_{it} = \eta_t(\theta, r_i)$ – комплексные огибающие пространственных отсчетов наблюдаемых полей сигнала и помехи, представляющие собой случайные процессы общего вида, на которые накладываются несущественные для практики ограничения физической реализуемости.

Погрешность такого представления реальных полей может быть сделана сколь угодно малой при увеличении числа пространственных отсчетов и уменьшении расстояния между ними. Базисные функции в общем случае зависят от пространственной динамики полей сигнала и помехи $s_t(\theta, r)$, $\eta_t(r)$. Синтез базисных функций для конкретной сигнально-помеховой ситуации в рамках данной работы не рассматривается, а $\phi_i(r, r_i)$, $i = 1, \dots, n$, считаются известными функциями с параметрами R_i .

Таким образом, непрерывное поле задается набором пространственных отсчетов и пространственных координат s_{it} , η_{it} , r_i , $i = 1, \dots, n$. Взятие пространственного отсчета может осуществляться, например, путем измерения напряженности электромагнитного поля с помощью приемного элемента. При этом к пространственному отсчету поля добавляются собственные шумы системы обработки сигналов:

$$y_{it} = x_{it} + \xi_{it} = s_{it}(\theta) + \eta_{it} + \xi_{it}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где ξ_{it} – комплексные огибающие независимых белых гауссовских шумов с диагональной матрицей интенсивностей N . В дальнейшем совокупность пространственных отсчетов обозначена векторами Y_t , S_t , H_t , Ξ_t :

$$Y_t = X_t + \Xi_t, \quad X_t = S_t + H_t.$$

В предположении, что n велико, наблюдение многомерного процесса Y_t эквивалентно наблюдению исходного непрерывного поля. Ставится задача по наблюдаемым данным определить информационный параметр θ в условиях, когда вектор неинформационных параметров $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ неизвестен. Последние по существу задают координаты пространственных отсчетов и, следовательно, пространственную структуру системы обработки сигналов.

Решаемая системой задача состоит в оценивании неизвестного параметра θ сигнала по критерию МП совместно с вычислением максимально правдоподобных оценок $\hat{R}$ координат пространственных отсчетов наблюдаемого поля. Искомые оценки получаются в результате совместного решения экстремальных задач:

$$\hat{\theta} = \arg \sup_{i=1, \dots, L} \Lambda_i(\hat{R}), \quad \hat{R} = \arg \sup_{R \in S} \Lambda_{\hat{\theta}}(R),$$

где условное ОП $\Lambda_i(R)$ определяется ОКК методом.

При рассмотрении двоичной задачи ($L=2$) – обнаружения сигнала или различения двух сигналов – достаточной статистикой является обобщенное ОП, а алгоритм оптимального оценивания параметров имеет вид:

$$\hat{R}_0 = \arg \sup_{R \in S} \Lambda_0(R), \quad \hat{R}_1 = \arg \sup_{R \in S} \Lambda_1(R), \quad \hat{\theta} = \begin{cases} 1, \Lambda > 1, \\ 0, \Lambda < 1. \end{cases}$$

Показано, что в отличие от известных многомерных ОКК алгоритмов при ОПС возникает необходимость создания двух различных компенсаторов помех

$$\tilde{Y}_{1t} = Y_{1t} - \hat{X}_{0t}, \quad \tilde{Y}_{0t} = Y_{0t} - \hat{X}_{0t}.$$

В обоих случаях компенсирующее напряжение $\hat{X}_{0t}$ одинаково и определяется при ПС $\hat{R}_0$. Наличие двух различных модификаций наблюдаемого процесса Y_{1t} и Y_{0t} может вызвать трудности при технической реализации алгоритмов. Поэтому рассмотрены сигнально-помеховые ситуации, когда $\hat{R}_1 = \hat{R}_0$, например, при малом отношении сигнал-помеха или неэнергетическом параметре θ . При этом $Y_{1t} = Y_{0t} = Y_t$, а обобщенное ОП принимает обычный вид. В этом случае для определения оптимальной ПС также необходимо пользоваться статистикой $\Lambda_0(R)$: $\hat{R} = \arg \sup_{R \in S} \Lambda_0(R)$.

Проведено обоснование квазиоптимальных пространственных структур РТС. Для определения по наблюдению вектора информационных параметров θ , α и вектора неинформационных параметров $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, которые задают координаты пространственных отсчетов и, следовательно, пространственную структуру системы обработки сигналов, в рассмотрение вводятся две гипотезы:

- в наблюдаемом поле присутствуют сигнал с параметрами $\theta = 1$, α , R и помеха с параметром R ;
- в наблюдаемом поле присутствует только помеха с параметром R .

Так как обе проверяемые гипотезы зависят от оцениваемого параметра R , то для использования метода МП вводится вспомогательная гипотеза: в наблюдаемом векторном сигнале присутствует только гауссовский шум. В соответствии с критерием МП запишем отношения правдоподобия (ОП) для каждой из гипотез:

$$\Lambda_1(\alpha, R) = \frac{w(Y_0^T | \alpha, R, \theta = 1)}{w(Y_0^T | \Xi_t, \theta = 0)}; \quad \Lambda_0(R) = \frac{w(Y_0^T | R, \theta = 0)}{w(Y_0^T | \Xi_t, \theta = 0)}$$

где $w(Y_0^T | \alpha, R, \theta = 1)$, $w(Y_0^T | R, \theta = 0)$, $w(Y_0^T | \Xi_t, \theta = 0)$ – плотности распределения вероятностей наблюдаемого процесса для каждой из гипотез. Результатом задачи является новый алгоритм выбора решения в пользу одной из гипотез, а также получения оценки МП информационного и неинформационного параметров:

$$(\hat{\theta}, \hat{\alpha}, \hat{R}) = \arg \max_{\theta} \max_{\alpha, R} \Lambda_{\theta}(\alpha, R).$$

Для вычисления ОП $\Lambda_{\theta}(\alpha, R)$ используется ОКК метод:

$$\ln \Lambda_{\theta}(\alpha, R) = \int_0^T (\theta S_t + \hat{H}_t)^T N^{-1} Y_t dt - \frac{1}{2} \int_0^T (\theta S_t + \hat{H}_t)^T N^{-1} (\theta S_t + \hat{H}_t) dt,$$

где $(\theta S_t + \hat{H}_t) = M \{(\theta S_t + H_t) | Y_0^t, \theta, \alpha, R\}$ – среднеквадратическая оценка по наблюдаемой реализации $Y_0^t = \{Y_x, 0 < x < t\}$.

Вычисление ОП связано с фильтрацией суммы сигнала и помехи и, в общем случае, представляет собой нелинейный инерционный функционал. Для квазидетерминированного сигнала $S_t(\alpha)$ задача несколько упрощается - при гауссовской помехе алгоритм фильтрации линейный, что позволяет разделить обработку сигнальной и помеховой компонент: $(\theta S_t + \hat{H}_t) = \theta S_t(\alpha) + \hat{H}_t$, где $\hat{H}_t = M \{H_t | (Y_t - \theta S_t)_0^t, \alpha, R\}$ – оценка помехи.

Отметим, что вычисление ОП $\Lambda_{\theta}(\alpha, R)$ при наличии помехи требует больших вычислительных затрат по сравнению со случаем обработки сигнала в присутствии только белого шума. Это объясняется тем, что ПС системы обработки влияет на про-

пространственные отсчеты помехи и не влияет на значения белого шума Ξ_t . Рассмотрены сигнально-помеховые ситуации, дающие более простые алгоритмы в предположении, что помеховая обстановка такова, что оценка помехи не зависит от координат пространственных отсчетов R . В этом случае ОП $\Lambda_0(R)$ не зависит от R , что позволяет сформулировать иначе проверяемые гипотезы:

- в наблюдаемом поле присутствует сигнал с параметрами $\theta = 1, \alpha, R$ и помеха;
- в наблюдаемом поле присутствует только помеха.

В соответствии с этим заключением ОП имеет упрощенный вид, а алгоритм обнаружения и измерения параметров определяется вновь полученным выражением:

$$(\hat{\alpha}, \hat{R}) = \arg \max_{\alpha, R} \Lambda(\alpha, R), \quad \hat{\theta} = \begin{cases} 1, & \text{при } \Lambda(\hat{\alpha}, \hat{R}) > 1 \\ 0, & \text{при } \Lambda(\hat{\alpha}, \hat{R}) < 1 \end{cases}.$$

В этом случае оптимальная пространственная структура зависит только от пространственных характеристик радиосигнала.

В работе доказано, что в случае отсутствия сигнала при воздействии одиночной пространственно сосредоточенной помехи ОП $\Lambda_0(R)$ не зависит от R . Рассмотрен случай воздействия m точечных помех на многоэлементную приемную систему. От их пространственного расположения необходимо достаточное разнесение по углам прихода, угловой сектор между помехами должен превышать ширину главного лепестка диаграммы направленности (ДН) приемной системы. Доказано, что при обработке в приемной системе в указанной ситуации зависимость от пространственного расположения помех также исчезает. В остальных случаях для вычисления статистики необходимо использовать полученные ранее общие выражения.

Во второй главе диссертации проведен анализ эффективности разработанного в главе 1 метода путем вычисления границы Рао-Крамера, которая является нижней границей дисперсии ошибки параметра координат элемента приемной системы, проведены исследования эффективности предложенного метода получения оптимальной ПС РТС по критерию максимума ОСПШ, МП. Впервые решена задача ОПС на последовательных выборках на основе теории оптимальных статистических оценок. Для расчета оценок предложены алгоритм МП и алгоритм квадратичной аппроксимации достаточной статистики. Проведены исследования пространственных характеристик получаемых оптимальных структур доказательства подавления большого числа помех формированием дополнительных минимумов ДН приемной системы.

Известно, что оптимальные процессоры сигналов, синтезированные на основе теории статистических решений, близки к процессорам, полученным при максимизации выходного отношения сигнал-шум. Для линейных систем оптимальные весовые векторы, получаемые при использовании различных критериев: МСКО, МП, минимума дисперсии шума могут быть представлены в виде: $\tilde{W} = k \tilde{R}_{yy}^{-1} \tilde{A}^*$, где k – скалярный коэффициент, вектор $\tilde{A}$ задает амплитудно-фазовое распределение сигнала в приемных элементах, $\tilde{R}_{yy}$ – корреляционная матрица помех. Все эти решения обеспечивают одно и то же ОСПШ, соответствующее решению по критерию максимума ОСПШ.

Поэтому для оценки эффективности ОПС системы обработки сигналов определено выходное ОСПШ: $q(R) = \frac{m_l^2}{D_l}$, где $m_l = \mathbf{M}\{\ln \Lambda(R)\}$, $D_l = \mathbf{M}\{(\ln \Lambda(R) - m_l)^2\}$.

Исследована эффективность предложенного метода оптимизации пространственной структуры РТС по критерию максимума ОСПШ на модельной приемной системе, показан существенный выигрыш (6...11 дБ), получаемый за счет ОПС.

Поскольку ОП $\Lambda_\theta(R)$ имеет асимптотически нормальное распределение и при обеспечении условий высокой точности оценивания - большого ОСШ или большого времени наблюдения T - справедливо приближенное равенство

$$(\hat{\theta}, \hat{R}) \approx \arg \max_{\theta} \max_R \mathbf{M}\{\ln \Lambda_\theta(R)\}.$$

Доказано, что МП оценки координат элементов приемной системы обеспечивают появление минимумов ДН в направлении на источники помех. Доказано защищаемое положение 1, что полученные системы с ОПС позволяют обеспечить подавление большего числа помех, чем при фиксированном расположении элементов, рисунок 1.

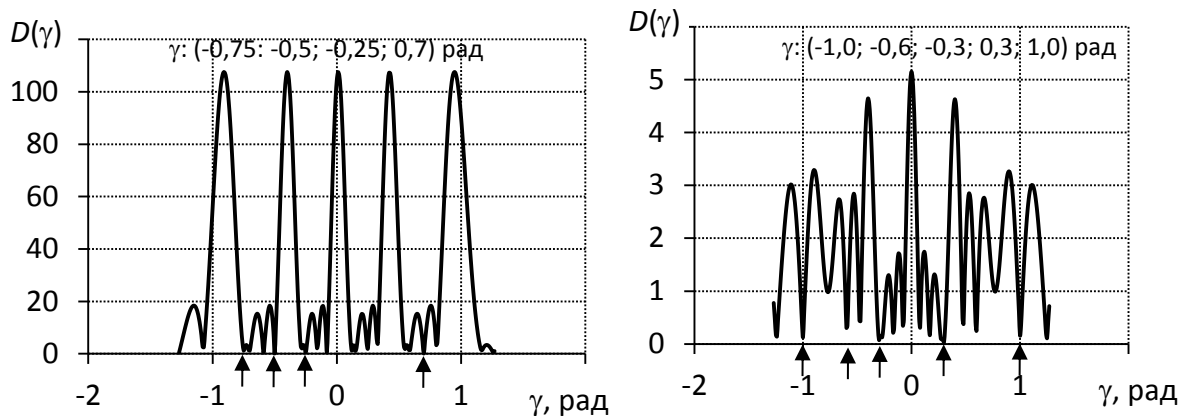


Рисунок 1 - Формирование минимумов ДН при ОПС

Для случая m гауссовских ШП точечных помех выигрыш в ОСПШ составляет 7...11 дБ по сравнению с эквидистантной приемной системой. При заданном размере апертуры в процессе оптимизации система стремится использовать ее полностью, что позволяет создать большее число дифракционных минимумов ДН и компенсировать большее число помех. При увеличении числа помех $m \geq n$ наблюдается существенный - более 6 дБ - выигрыш в ОСПШ при оптимальной ПС, причем одинаковый выигрыш для двумерной системы получается при большем числе помех, чем для линейной.

Доказана независимость ОПС от значений θ : $\hat{R}_0 = \hat{R}_1$ при условии $m \ll n$ для случая неэнергетического оцениваемого параметра. Использование алгоритма дает эффект и в том случае, когда сигнально-помеховая обстановка не обеспечивает независимости оценки помехи от координат приемных элементов, причем в случае квазиоптимальной обработки обеспечивается выигрыш 7...16 дБ по сравнению с эквидистантной приемной системой. Несколько меньший выигрыш 5,5 дБ достигается при целочисленной ОПС с шагом $\lambda/2$, где λ - длина волны.

Известно, что оценки МП, будучи асимптотически эффективными, не являются устойчивыми к отклонениям закона распределения помехи от предполагаемого. Кроме этого при априорно неизвестных или неточно определенных параметрах принимаемых сигналов и помех, эффективность функционирования систем обработки существенно снижается, вплоть до непреднамеренного подавления полезного сигнала. Поэтому при оптимизации пространственной структуры РТС важной проблемой является разработка алгоритмов обработки сигналов с пониженной чувствительностью к

неточностям априорных данных о параметрах сигналов и помех, близких по эффективности к оптимальным и слабо ее снижающие при отклонении распределений наблюдений от исходных моделей в некоторых пределах – робастных алгоритмов.

Разработан метод получения робастных ПС, обладающих пониженной чувствительностью к неточностям априорных данных о параметрах сигналов и помех, близких по эффективности к оптимальным. Метод включает:

- алгоритм регуляризации решения некорректной задачи ОПС с неустойчивостью получаемых ПС при малых отклонениях предположений о помехах,
- алгоритм вычисления метрики в качестве меры получаемых ПС,
- градиентный алгоритм с применением кластеризации,
- алгоритм расчета робастных структур с помощью интерполяции ПС.

$$\tilde{R} = \arg \min_{R \in D_n} \{(1 - \Phi(R)/\Phi_{\max}) + \alpha \Gamma(R)\}, \alpha > 0,$$

где α – коэффициент регуляризации. В качестве функции-стабилизатора нового вида введена мера отличия одной пространственной структуры A от другой B , то есть метрика в пространстве векторов координат отсчетов R :

$$L(A, B) = \min_{\substack{1 \leq i_k \leq n \\ \forall k \neq j \\ i_k \neq i_j}} \left\{ \sum_{k=1}^n \rho(a_k, b_{\pi(k)}) \right\} = \min_{\pi \in S_n} \left\{ \sum_{k=1}^n \rho(a_k, b_{\pi(k)}) \right\},$$

где $\rho(a, b) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}$ – расстояние между элементами наборов A, B , а минимум берется по всем перестановкам из n элементов набора B , в частности $\Gamma(R) = \sum_{i=1}^n (r_i - r_0)^2$.

В условиях многоэкстремальности целевой функции решение определяется методом разбиения области нахождения максимума на кластеры с последующим уменьшением размеров подобласти и поиском экстремума градиентным методом на каждом кластере. Установлено, что для одной и той же сигнально-помеховой ситуации существуют несколько соизмеримых или равных локальных максимумов и соответствующих им ПС. С введением регуляризации при некотором критическом значении $\alpha_{кр}$ неустойчивость исчезает, структуры сходятся к единственной для каждого углового положения помех γ . Устойчивость обеспечивается при снижении отношения сигнал-помеха до 3 дБ, что дает выигрыш не менее 7 дБ по сравнению с эквидистантной приемной системой, что доказывает защищаемое положение 2. Установлено, что при увеличении γ и $\alpha_{кр}$ влияние помех на пространственную структуру уменьшается, а с уменьшением γ размер апертуры приемной системы растет, что объясняется необходимостью повышения углового разрешения при сближении в пространстве источников помех и сигнала.

Непрерывная зависимость оптимальных координат элементов, полученных при синтезе робастных пространственных структур, от параметров сигнально-помеховой ситуации позволяет использовать интерполяционные методы для вычисления промежуточных значений координат элементов приемной системы при сравнительно небольшом числе узлов интерполяции. В узлах интерполяции ОПС определяются заранее для всех комбинаций значений мощностей и угловых координат заданного числа источников помех. Так как интерполяционные процедуры обладают высокой вычислительной эффективностью, то становится возможным определение ОПС в реальном масштабе времени. Вычислительная эффективность за счет интерполяции многократ-

но возрастет при использовании двумерных систем датчиков поля, увеличении числа помех и их расположении во всей передней полусфере, при рассмотрении помех с различным уровнем мощности.

Результаты исследования дают теоретическую основу для синтеза пространственных структур систем обработки радиосигналов при различных априорных сведениях о пространственных характеристиках наблюдаемых полей и позволяют получать оптимальные, адаптивные и робастные пространственные структуры. Особенности разнообразных технических приложений отражены путем наложения ограничений при решении задачи условной оптимизации: допустимый размер апертуры, дискретный или непрерывный характер изменения пространственных координат, а также возможность проведения ОПС в реальном масштабе времени.

Разработан метод повышения помехоустойчивости в динамическом режиме работы алгоритма ОПС РТС, включающий алгоритмы:

- регуляризации решения задачи ОПС,
- градиентный алгоритм с применением кластеризации,
- оценки быстродействия ПС при перемещении приемных элементов РТС.

Механическое перемещение элементов в пространстве обладает заметной инерционностью, которая должна учитываться при анализе динамического режима ОПС на фоне нестационарных помех. Для количественной оценки быстродействия перестройки пространственной структуры используется максимальное механическое перемещение приемного элемента $v = 0...5\lambda$ за один такт работы системы ОПС, а нестационарность помех оценивается угловым перемещением сектора расположения помех $\delta\gamma = 0...0,01 \pi$ рад за тот же временной интервал.

Анализ проведен моделированием при различных значениях параметра регуляризации ($0...0,01$), угловой скорости помех $\delta\gamma = 0,005\pi$ рад. Усреднение отношения сигнал-помеха проводилось по угловым положениям сектора расположения помех $\gamma \in [-\pi/3; \pi/3]$ рад. Для доказательства защищаемого положения 3 установлено, что при больших значениях параметра быстродействия ($v = 0...1,5\lambda$) и при эквидистантном начальном положении элементов, введение регуляризации с α_{opt} обеспечивает максимальное улучшение в помехоустойчивости до 5,5 дБ по сравнению со случаем ОПС без регуляризации. Изменение начального положения приемного элемента незначительно влияет на поведение зависимости. Расширение границ усреднения отношения сигнал-помеха и увеличение скорости движения помех $\delta\gamma$ расширяет область параметра v , при котором получается дополнительный выигрыш в $q(v)$ при $\alpha = \alpha_{opt}$.

Использование всех пространственных отсчетов наблюдаемого поля из области S не в полной мере соответствует реальной ситуации, так как параметры ПС не являются параметрами наблюдаемых сигналов. Устранить это противоречие возможно при новом представлении наблюдений - в виде последовательных выборок, в каждой из которых возможна реализация другой ПС. Принцип последовательных выборок позволяет обосновать тестирование функции правдоподобия для различных ПС, определяя, таким образом, оптимальную ПС.

Наблюдаемое поле комплексных данных в новом представлении для совокупности N выборок, каждая из которых представляет собой последовательность K отсчетов во времени комплексных огибающих сигналов с выходов M элементов приемной системы имеет вид:

$$\mathbf{Y}_{nk} = \chi_n(\theta \mathbf{S}_{nk} + \mathbf{V}_{nk}) + \Xi_{nk}, \quad n = 1..., N, \quad k = 1..., K,$$

где $\mathbf{S}_{nk}$ – полезный сигнал, $\mathbf{V}_{nk}$ помеха, Ξ_{nk} – стационарный гауссовский некоррелированный шум с дисперсией D_ξ . Помеха представляет собой гауссовский случайный процесс с независимыми значениями отсчетов во времени и в различных выборках. В пространственной области помеха характеризуется корреляционной матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{M}\{\mathbf{V}_{nk} \mathbf{V}_{nk}^H\}$, H обозначает эрмитово сопряжение матрицы.

Совокупность выборок упорядочена в соответствии со значениями $\mathbf{X}$ координат элементов приемной системы, характеризующих ПС РТС. Полагаем, что в поле наблюдаемых данных имеется одна выборка, соответствующая присутствию полезного сигнала и помехи, а параметр ПС равен $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$, то есть $\chi_n = \begin{cases} 1, & \mathbf{X} = \mathbf{X}_0 \\ 0, & \mathbf{X} \neq \mathbf{X}_0 \end{cases}$. Полезный радиосигнал представляет собой точечный источник, ориентированный в направлении нормали к приемной системе: $\mathbf{S}_{nk} = \{a_{nk}, \dots, a_{nk}\}^T$

Для случая линейной системы датчиков поля, элементы которой имеют координаты $\mathbf{X}$, помеховая ситуация задается в виде P точечных источников гауссовских стационарных помех $v_{nk}^{(p)}$ с дисперсий $D_v^{(p)} = \mathbf{M}\{|v_{nk}^{(p)}|^2\}$ и угловым направлением α_p относительно нормали к плоскости приемной системы, $p = 1, \dots, P$. Для данной помеховой обстановки корреляционная матрица помех имеет вид:

$$\mathbf{R} = \left\{ R_{ij} = \sum_{p=1}^P D_v^{(p)} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \sin \alpha_p (x_j - x_i) \right], \quad i, j = 1, \dots, M \right\}.$$

В результате обработки поля наблюдаемых данных на последовательных выборках определяется оптимальное значение параметра ПС $\hat{\mathbf{X}}$, а также выносится решение о наличии полезного сигнала $\hat{\theta} = 1$ или о его отсутствии – $\hat{\theta} = 0$. Таким образом, решается задача совместного обнаружения-оценивания. Достаточной статистикой для данной задачи является логарифм ОП, новое представление которого для детерминированного полезного сигнала $\mathbf{S}_{nk} = \{a, \dots, a\}^T$ имеет вид:

$$\lambda(\mathbf{X}_n) = - \sum_{k=1}^K (\mathbf{Y}_{nk} - a)^H (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{Y}_{nk} - a) + \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_{nk}^H (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Y}_{nk},$$

а для случайного гауссовского полезного сигнала $\mathbf{S}_{nk} = \{s_{nk}, \dots, s_{nk}\}^T$ имеет вид:

$$\lambda(\mathbf{X}_n) = K \ln \frac{\det(\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})}{\det(\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I} + D_s)} + \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_{nk}^H \left[(\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})^{-1} - (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I} + D_s)^{-1} \right] \mathbf{Y}_{nk},$$

где D_s – дисперсия полезного сигнала.

На основе анализа последовательных выборок решена задача оценки эффективности оптимизации ПС РТС при различных наблюдаемых процессах.

Полагается, что каждой выборке поставлено в соответствие одно из значений оцениваемого параметра. Наблюдаемый процесс Y_{in} представляет собой сумму гауссовского шума Ξ_{in} с независимыми значениями и дисперсией D и постоянного значения полезного сигнала $S_{im} = \lambda$, $i = 1, \dots, N$. При таких условиях оценивание методом МП представляет собой вычисление ОП для каждой из выборок в отдельности при соответствующем значении параметра:

$$z(\lambda_n) = \ln \Lambda(\lambda_n) = \sum_{i=1}^N (-(Y_{in} - \lambda_n)^2 + Y_{in}^2) / 2D = \sum_{i=1}^N (2(\delta_{mn}\lambda_m + \Xi_{in})\lambda_n - \lambda_n^2) / 2D.$$

Рассчитаны значения дисперсии D_ε ошибки оценивания $\varepsilon = \hat{\lambda} - \lambda_m$ и смещения оценки m_ε , полученные моделированием для случая присутствия сигнала во всех выборках и аналогичные данные для случая присутствия сигнала только в одной выборке.

Оценены предельные значения погрешностей оценивания на последовательных выборках методом, аналогичным используемому при выводе границ Рао-Крамера:

$$D_\varepsilon \geq \left(\int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{w(Y/\lambda_m + \delta\lambda)/w(Y/\lambda_m) - 1}{\delta\lambda} \right]^2 w(Y/\lambda_m) dY \right)^{-1}. \quad (1)$$

Рассмотрен пример для случая $y_{ij} = s_{ij} + n_{ij}$, где $i = 1, \dots, N$, $k = 1, \dots, K$, n_{ij} - независимые отсчеты гауссовского шума с дисперсией D . Получено новое выражение для нижней границы дисперсии ошибки оценивания:

$$D_{\min} = \frac{\delta\lambda^2}{\prod_{i=1}^K \prod_{j=1}^N \exp \left[\left(\delta_{in} s_{ij}^{(\lambda + \delta\lambda)} - \delta_{in} s_{ij}^{(\lambda)} \right)^2 / D \right] - 1}, \quad (2)$$

где K - количество выборок, N - число отсчетов в выборке.

Нижняя граница дисперсии ошибки оценивания сигнала получается конкретизацией для рассматриваемого случая $m \neq n$ соотношений (1), (2).

Известно, что значение параметра, обеспечивающее максимум среднего значения ОП $m_\lambda(\hat{\mathbf{a}}, \mathbf{x})$ равно оптимальному значению этого параметра по критерию МСКО оценивания. Оценки МП информационных и неинформационных параметров определяются в результате решения оптимизационной задачи:

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \max_{\mathbf{a}} \sum_{n=1}^N \lambda_n(\mathbf{Y}_n / \mathbf{a}, \hat{\mathbf{x}}), \quad \hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} m_\lambda(\hat{\mathbf{a}}, \mathbf{x}).$$

Разработан метод адаптивной ОПС, включающий использование независимой векторной статистики, в соответствии с которым, новое эквивалентное решение задачи может быть проведено путем поиска экстремума обобщенной функции качества:

$$(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{x}}) = \arg \max_{\mathbf{a}, \mathbf{x}} \left[\sum_{n=1}^N \lambda_n(\mathbf{Y}_n / \mathbf{a}, \mathbf{x}) + m_\lambda(\mathbf{a}, \mathbf{x}) \right].$$

Функциональная зависимость $w(\lambda(\mathbf{a}/\mathbf{x}))$ от вектора неинформационных параметров $\mathbf{x}$, как правило, неизвестна. Для восстановления функциональной зависимости используем адаптивный байесовский подход на основе гауссовской аппроксимации, справедливой для многих практических приложений. К таким случаям относится наблюдение квазидетерминированного сигнала на фоне гауссовского шума, а также случай длительных наблюдений $K \gg 1$, когда на основании центральной предельной теоремы векторную статистику можно считать асимптотически гауссовской. Зависимость математического ожидания $m(\mathbf{x})$ и дисперсии $D(\mathbf{x})$ от пространственной структуры $\mathbf{X}$ аппроксимируем дифференцируемой функцией, имеющей не менее одного максимума, в данном случае - полиномом второго порядка:

$$m(\mathbf{x}) = c^{(0)} + \mathbf{c}^{(1)} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{c}^{(2)} \mathbf{x}, \quad D(\mathbf{x}) = d^{(0)} + \mathbf{d}^{(1)} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{d}^{(2)} \mathbf{x},$$

где $c^{(0)}$, $d^{(0)}$ - скалярные величины, $\mathbf{c}^{(1)}$, $\mathbf{d}^{(1)}$ - вектор-строки размером $1 \times M$, $\mathbf{c}^{(2)}$, $\mathbf{d}^{(2)}$ - квадратные матрицы размером $M \times M$. Совместная максимизация функции качества по информационным и неинформационным параметрам требует больших вычис-

лительных затрат. Более эффективным является адаптивный подход, когда для получения оценки информационного параметра $\hat{\mathbf{a}}$ используются оценки неинформационного параметра $\hat{\mathbf{x}}$, полученные на предыдущих интервалах времени при некотором тестовом значении параметра $\mathbf{a}_0$ и условии, что значение $\hat{\mathbf{x}}$ не зависит от $\mathbf{a}_0$. В этом случае оптимальное значение параметра $\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} m_{\lambda}(\mathbf{x})$ получается из условия

дифференцирования данного выражения и равно $\hat{\mathbf{x}} = -(\mathbf{c}^{(2)} + \mathbf{c}^{(2)\text{T}})^{-1} \mathbf{c}^{(1)\text{T}}$. Адаптивное оценивание параметра $\mathbf{a}$ совместно с адаптацией параметра $\mathbf{x}$ производится в соответствии с вновь предложенным алгоритмом: $(\hat{\mathbf{c}}, \hat{\mathbf{d}}) = \arg \max_{\mathbf{c}, \mathbf{d}} w(\lambda(\mathbf{a}_0)/\mathbf{c}, \mathbf{d})$,

$$\hat{\mathbf{x}} = -(\hat{\mathbf{c}}^{(2)} + \hat{\mathbf{c}}^{(2)\text{T}})^{-1} \hat{\mathbf{c}}^{(1)\text{T}}, \quad \hat{\mathbf{a}}(\mathbf{Y}_{N+1}) = \arg \max_{\mathbf{a}} \lambda_{N+1}(\mathbf{a})|_{\hat{\mathbf{x}}}.$$

Таким образом, ОПС производится для некоторого тестового значения информационного параметра $\mathbf{a}_0$ на N последовательных выборках, а затем на следующей $(N+1)$ -й выборке производится оценивание информационного параметра. Рассматриваемые задачи совместного оценивания являются нелинейными и многоэкстремальными, что затрудняет получение аналитических выражений для оценок $\hat{\mathbf{x}}$. Задача значительно упрощается, если дисперсия $D(\mathbf{x}) = \mathbf{d}^{(0)} + \mathbf{d}^{(1)}\mathbf{x} + \mathbf{x}^{\text{T}}\mathbf{d}^{(2)}\mathbf{x}$ известна, то есть параметры $\mathbf{d}^{(0)}, \mathbf{d}^{(1)}, \mathbf{d}^{(2)}$ могут быть определены по априорным данным. В этом случае оценивание оставшихся коэффициентов $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}^{(1)}, \mathbf{c}^{(2)}$ по векторной статистике $\lambda = \{\lambda_n, n = 1, \dots, N\}$ методом МП сводится к решению задачи квадратичной оптимизации. Достаточное условие максимума получено в результате дифференцирования по элементам вектора $\mathbf{c} = (\mathbf{c}^{(0)}, \mathbf{c}^{(1)}, \mathbf{c}^{(2)})$ и представления результатов дифференцирования в виде вектора-столбца размером $1 + M + M^2$. Кратко эта система линейных уравнений может быть записана в матричном виде: $\mathbf{F} \times \mathbf{c} = \mathbf{L}$. Оценки коэффициентов аппроксимации получаются в результате решения обратной задачи: $\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{F}^{-1} \times \mathbf{L}$.

В процессе моделировании рассмотрен случай оценки неинформационного параметра – положения приемного элемента, когда полезный сигнал известен и присутствует в наблюдаемом процессе. Оценка производится методами МП: по всей совокупности последовательных выборок, по каждой из последовательных выборок.

Рассчитаны зависимости дисперсий ошибки от уровня сигнала. Последовательные выборки получены при изменении положения среднего элемента на апертуре $x_3 - x_1 = 4$ с шагом $0,05\lambda$. Квадратичная аппроксимация проводится на интервале $\pm \lambda/2$ от положения максимума ОП.

Как следует из расчетов, дисперсия ошибки оценивания нерекуррентным алгоритмом меньше в 10...20 раз ошибки алгоритма МП при сравнительно больших отношениях сигнал-помеха. При малых уровнях сигнала квадратичная аппроксимация статистики, полученной на последовательных выборках, неустойчива и дает аномальные значения ошибки, рисунок 2. Оценки ПС на основе ОП, рассчитанных для каждой из последовательных выборок, являются также оптимальными по критерию максимума отношения сигнал-помеха. При уменьшении шага изменения положения 2-го элемента $0,02\lambda$ в окрестности $\pm \lambda$ положения максимума ОП ошибка уменьшается, а выигрыш от применения квадратичной аппроксимации увеличивается, рисунок 3.

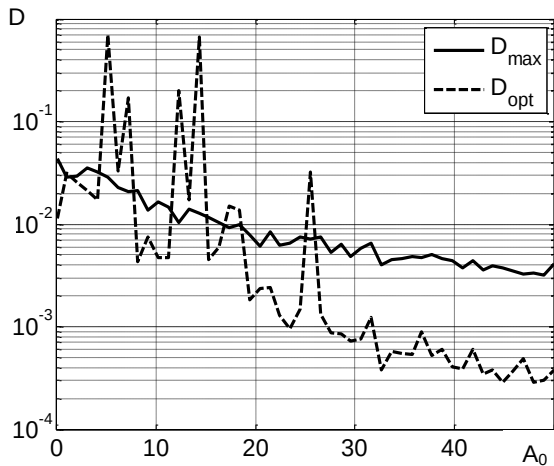


Рисунок 2 - Дисперсия ошибки оценивания при шаге $0,05\lambda$

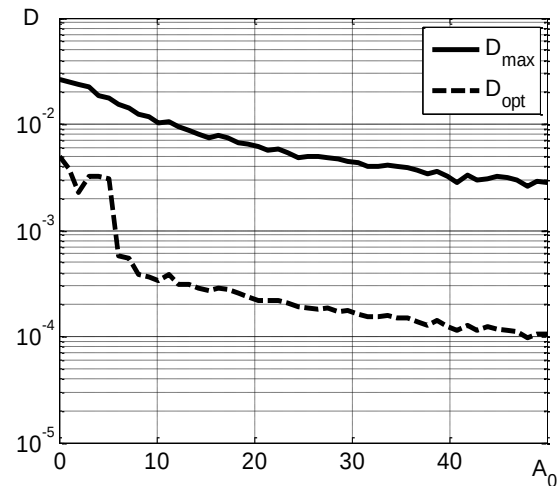


Рисунок 3 - Дисперсия ошибки оценивания при шаге $0,02\lambda$

В третьей главе проведена разработка метода распределения ресурсов в РТС, включающего:

- алгоритм вычисления МП оценки пространственных координат элементов приемной системы,
- ОКК метод нелинейной обработки многомерных сигналов,
- алгоритм адаптивной нелинейной фильтрации негауссовской помехи.

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы защиты радиотехнических каналов от помех является разработка устройств их адаптивной компенсации, автоматически приспособляющихся к помеховой обстановке.

Адаптация алгоритмов обработки сигналов является одним из основных способов преодоления априорной неопределенности, в частности, при фильтрации случайных процессов на фоне белого гауссовского шума. Задача фильтрации имеет самостоятельное значение, а также является одной из основных операций оценочно-корреляционного и ОКК алгоритмов обработки сигналов. Весьма конструктивным описанием стохастических сигналов представляется их аппроксимация многомерным марковским процессом, позволяющая путем увеличения размерности получить необходимую точность, а структура синтезированных на основе данной аппроксимации рекуррентных алгоритмов делает возможной их реализацию в реальном времени.

Среди множества мощных помех обширный класс составляют негауссовские помехи. В данном разделе диссертации рассмотрен случай, когда моделью помехи является гауссовский процесс, прошедший через амплитудный ограничитель, где степень негауссовости зависит от уровня ограничения амплитуды на передающей стороне, который на приемной стороне неизвестен и стоит задача его адаптивной подстройки. Модель является адекватной, так как реальные передающие устройства работают с ограничением амплитуды в выходных каскадах. Кроме этого, конструктивной моделью представляется фазомодулированная гармоническая помеха за счет сравнительной простоты и адекватности реальным помехам.

Как следует из ОКК метода обработки сигналов, фильтрация случайных процессов (СП) является одним из основных этапов обработки сигналов на фоне помех общего вида и белого гауссовского шума, причем в общем случае оптимальная фильтрация является нелинейной. Практическая реализация нелинейных алгоритмов фильтрации СП встречает значительные трудности, что связано с их недостаточной универсальностью, чувствительностью к априорной неопределенности относитель-

но параметров помех. В данной главе проводится синтез и анализ алгоритма фильтрации негауссовского узкополосного процесса, который учитывает негауссовость распределения и в соответствии с этим производит адаптивную подстройку параметров алгоритма.

Решение задач повышения помехоустойчивости РТС требует более полного учета всех характеристик сигналов и помех, а также перераспределения имеющихся ресурсов в пространственной и временной обработке. На основе ОКК подхода в главе 1 диссертации разработан метод ОПС приемной системы. В то же время ОКК обработка является универсальной для общих моделей случайных сигналов и помех, в том числе позволяет решать задачи оптимальной и квазиоптимальной обработки сигналов при воздействии помех с негауссовским законом распределения.

Проведена разработка и анализ квазилинейного фильтра негауссовского узкополосного СП, который учитывает как спектральное, так и амплитудное распределения данного процесса. Разработан адаптивный вариант фильтра с подстройкой его параметров в соответствии с уровнем ограничения амплитуды СП.

СП η_t представлен виде реакции типового радиотехнического звена, состоящего из безынерционного нелинейного элемента с проходной характеристикой $f(x)$ и полосового фильтра с оператором $L_1\{f(\chi_t)\}$, выделяющего часть спектра в окрестности частоты входного сигнала ω_0 .

Воздействие $\chi_t = x_{1t} \cos \omega_0 t + x_{2t} \sin \omega_0 t$ представляет собой узкополосный СП, где ω_0 – несущая частота, x_{1t} , x_{2t} – компоненты многомерного марковского процесса $X_t = \{x_{it}, i=1, \dots, p\}$ с коэффициентом сноса $\{b_i(X_t, t), i=1, \dots, p\}$ и диффузии $\{c_{ij}(X_t, t), i=1, \dots, l, j=1, \dots, m\}$ и определяемого соответствующей системой стохастических дифференциальных уравнений. Наблюдаемый процесс $y_t = \eta_t + \xi_t$ представляет собой сумму полезного сигнала η_t и белого гауссовского шума ξ_t с интенсивностью N_0 .

Уравнения фильтрации СП η_t и компонент марковского процесса X_t могут быть получены на основе общих алгоритмов квазилинейной фильтрации марковских процессов, справедливых при достаточно большой мощности СП, с учетом зависимости помехи только от двух элементов x_{1t} , x_{2t} вектора X_t .

Поскольку в рассматриваемом случае ОСШ велико, то использована упрощенная запись уравнений для элементов k_{ijt} матрицы апостериорных дисперсий, пренебрегая разностью $y_t - \hat{\eta}_t$. Особенностью задачи является то, что апостериорные дисперсии в виде коэффициентов k_{ijt} являются случайными функциями времени, что не позволяет применить распространенный метод временного усреднения. Поэтому использованы численные методы решения дисперсионных уравнений с применением статистического моделирования.

Анализ эффективности алгоритма адаптивной фильтрации помехи на выходе амплитудного ограничителя проведен методом статистического моделирования путем вычисления дисперсий ошибок фильтрации и усредненных во времени апостериорных дисперсий k_{11} , k_{22} . Программно реализован алгоритм решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих формирование процесса, фильтрацию и поведение апостериорных дисперсий методом Эйлера. Расчет проводился как в случае неадаптивной системы фильтрации при значении параметра

ограничения амплитуды $\tilde{a} = a_0$, так и при включенной адаптивной подстройке уровня ограничения в ситуации, когда он заранее неизвестен. Получены зависимости, описывающие работу системы при изменении нормированного значения параметра ограничения $r = a/\sqrt{D_x}$ в случае оптимальной обработки без адаптации. Шаг интегрирования находился в пределах $\alpha\Delta t = 10^{-4} \dots 10^{-2}$ в зависимости от величины отношения сигнал-шум $p = D_x/\alpha N_0$, при этом для малых значений r шаг выбирался минимальным. Для повышения точности статистических оценок дисперсий интервал наблюдения выбран равным $1000/\alpha$.

Рассчитаны усредненные апостериорные дисперсии k_{11} , а также дисперсии D_e ошибки оценивания $e_i = x_i - \tilde{x}_i$, полученные методом статистического моделирования, при различных p . Так как алгоритм квазилинейной фильтрации справедлив для больших отношений сигнал-шум, то в области сильного ограничения, а также при уменьшении p наблюдается расхождение между D_e и k_{11} . В этом случае для анализа необходимо пользоваться расчетными величинами D_e , полученными моделированием. С уменьшением уровня ограничения растет дисперсия ошибки фильтрации $D_{\text{ен}} = M\{(\eta_t - \hat{\eta}_t)^2\}$, и растут дисперсии k_{11} и k_{22} . В то же время растет корреляция ошибок e_1 и e_2 , увеличивается ошибка в оценивании амплитуды. Так как $\tilde{\lambda}_t$ проходит через амплитудный ограничитель, то дисперсия ошибки оценивания амплитуды меньше, чем для квадратурных составляющих $\hat{x}_1$ и $\hat{x}_2$. В результате рост $D_{\text{ен}}$ при уменьшении уровня ограничения происходит в меньшей степени, чем рост дисперсий квадратурных составляющих.

Поведение системы при адаптивной подстройке уровня ограничения показывает, что процесс адаптации можно ускорить в несколько раз регулировкой коэффициента адаптации γ , однако необходимо учитывать границу устойчивости сходимости алгоритма. Сходимость параметра $\tilde{a}$ к оптимальному значению a_0 исследовалась при различных начальных значениях $\tilde{a}(0)$ с коэффициентом адаптации $\gamma_t = \gamma = 10\alpha$. При $\tilde{a}(0) = a_0$ система удерживает оптимальное значение параметра. Для $\tilde{a}(0) < a_0$ сходимость более быстрая, чем в случае $\tilde{a}(0) > a_0$.

Для меньших значений p при том же коэффициенте γ процесс адаптации идет более медленно, при этом из-за большего влияния шума увеличиваются его флуктуации. Таким образом, в условиях априорной неопределенности начальное значение параметра ограничения целесообразно выбирать заведомо меньше оптимального.

Компенсация помех является одной из основных операций ОКК обработки сигналов. ОКК алгоритмы могут быть получены также и для комплекса помех, представляющего собой сумму помех различного происхождения с характерными отличиями в значениях параметров. Характеризовать сумму помех как комплекс целесообразно в случае, когда различия в свойствах приводят к различным алгоритмам компенсации каждой из помех в отдельности. Тогда для компенсации целесообразно применять комплекс компенсаторов. Данный подход распространен на случай, когда для компенсации комплекса пространственно сосредоточенных помех используется приемная система с амплитудно-фазовым управлением и регулируемой пространственной структурой, а также нелинейный компенсатор помехи с угловой модуляцией.

В целях повышения эффективности обработки сигнала при компенсации ком-

плекса помех в условиях ограничений на число управляемых приемных элементов, а также ОПС системы компенсации, проведена разработка и анализ алгоритма ОКК обработки сигналов при наличии комплекса ШП гауссовских и негауссовской помехи. Полагается, что обработка реализуется в результате оптимизации амплитудно-фазового распределения на приемной системе, ОПС системы обработки, а также путем последующей нелинейной компенсации негауссовской помехи и корреляционной обработки. Получено аналитическое выражение для отношения сигнал-помеха, что позволяет произвести оптимизацию пространственной структуры. На основе аналитического выражения отношения сигнал-помеха проведена оптимизация пространственной структуры для различных сигнально-помеховых ситуаций.

Рассмотрена N -элементная приемная система с координатами в трехмерном пространстве $\mathbf{R}$, на выходе которых наблюдается векторный процесс $\mathbf{Y}_t = \theta \mathbf{S}_t + \mathbf{H}_t + \mathbf{\Xi}_t$, $0 < t < T$, где $\mathbf{S}_t$ - детерминированный полезный сигнал, $\mathbf{H}_t$ - негауссовская помеха; $\mathbf{\Xi}_t$ - пространственно коррелированный белый гауссовский шум, описывающий совокупно ШП пространственно сосредоточенные помехи и тепловой шум системы обработки, $\theta = [0; 1]$ - параметр обнаружения. Сигнал и негауссовская помеха являются узкополосными в радиотехническом смысле процессами: $s_t = A_s \sin(\omega_0 t + \varphi_{st})$, $\eta_t = A_\eta \sin(\omega_0 t + \varphi_{\eta t})$, что позволяет в необходимых случаях использовать их комплексные огибающие.

Матрица пространственной корреляции $\mathbf{N}_1$ шума $\mathbf{\Xi}_t$, определяется интенсивностями ШП помех и шума, а также сдвигами фаз помех φ_{nm} в элементах и может быть факторизована с помощью процедуры разложения Холецкого $\mathbf{N}_1 = \mathbf{U}\mathbf{U}^H$.

ПС системы, определяемая вектором координат $\mathbf{R}$, совместно с пространственными характеристиками сигнала и помех - угловыми координатами направлений прохода плоской электромагнитной волны, определяют вид алгоритма обработки. Например, сдвиги фаз гауссовских ШП помех равны

$$\varphi_{nm} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sin \gamma_m (r_{xn} \cos \beta_m + r_{yn} \sin \beta_m) + r_{zn} \cos \gamma_m \right] \quad n = 1, \dots, N, \quad m = 1, \dots, M,$$

где α_m , γ_m - азимут и угол места расположения источников гауссовских помех, λ - длина волны, определяют матрицу пространственной корреляции $\mathbf{N}_1$.

Статистика, получаемая в результате ОКК обработки многомерных сигналов имеет отличный от других задач вид:

$$z(\mathbf{Y}_0^T) = \frac{1}{2N_0} \int_0^T \tilde{\mathbf{S}}_t^H \tilde{\mathbf{S}}_t dt + \text{Re} \frac{1}{N_0} \int_0^T \tilde{\mathbf{S}}_t^H \tilde{\mathbf{\Xi}}_t dt = \frac{1}{2N_0} \sum_{n=1}^N \int_0^T |\tilde{S}_t^{(n)}|^2 dt + \text{Re} \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^N \int_0^T \tilde{S}_t^{(n)*} \tilde{\Xi}_t^{(n)} dt,$$

где $\tilde{\mathbf{S}}_t = \mathbf{S}_t + \Delta \mathbf{S}_t$ - полезный сигнал на выходе компенсатора помехи с учетом его искажений $\Delta \mathbf{S}_t = \hat{\mathbf{H}}_{1t} - \hat{\mathbf{H}}_{0t}$ $\hat{\mathbf{H}}_{0t} = \{\hat{\eta}_t^{(n)}, n = 1, \dots, N\} = \mathbf{M}\{\mathbf{H}_t | \mathbf{Y}_0^t, \theta\}$ - оценка помехи при гипотезе θ , $\tilde{\mathbf{\Xi}}_t$ - белый гауссовский шум, статистически идентичный шуму $\mathbf{\Xi}_t$. Таким образом, в результате оптимальной компенсации помех получаем наблюдения, содержащие искаженный полезный сигнал на фоне белого шума.

При обработке сигналов на фоне ШП гауссовских пространственно коррелированных помех используется пространственная декорреляция гауссовских помех, которая в силу линейности и обратимости не нарушает оптимальности последующей обработки: $\mathbf{W} = \mathbf{U}^{-1} = \{W_{nk}, n, k = 1, \dots, N\}$.

После декорреляции наблюдаемый процесс преобразуется к виду:

$$\tilde{\mathbf{Y}}_t = \mathbf{W}\mathbf{Y}_t = \mathbf{W}(\mathbf{S}_t + \mathbf{H}_t + \mathbf{\Xi}_t) = \mathbf{W}\mathbf{S}_t + \mathbf{W}\mathbf{H}_t + \tilde{\mathbf{\Xi}}_t, \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{\Xi}}_t$ - белый гауссовский шум с диагональной матрицей пространственной корреляции и интенсивностью N_0 . На выходе декоррелятора формируются измененные комплексные огибающие сигнала и помехи:

$$\tilde{\mathbf{S}}_t = \tilde{\mathbf{Q}}_S \{S_t, \dots, S_t\} = \mathbf{W}\mathbf{S} = \left\{ S_t \tilde{a}^{(n)}, n=1, \dots, N \right\}^T, \quad \tilde{\mathbf{H}}_t = \tilde{\mathbf{Q}}_H \{\eta_t, \dots, \eta_t\} = \mathbf{W}\mathbf{H} = \left\{ \eta_t \tilde{b}^{(k)}, n=1, \dots, N \right\}^T,$$

где коэффициенты $\tilde{a}^{(n)}$, $\tilde{b}^{(i)}$ характеризуют амплитудно-фазовое распределение сигнала и негауссовской помехи на выходе декоррелятора. Пространственная декорреляция ШП помех выполняет компенсацию этих помех, приходящих с определенных направлений. Вместе с тем, декорреляция сопровождается пространственным преобразованием полезного сигнала и негауссовской помехи, что необходимо учитывать при последующей обработке.

Когда пространственный уровень боковых лепестков приемной системы достаточно мал, а ширина ее главного максимума меньше, чем угловое разнесение источников сигнала и негауссовской помехи, то мощность полезного сигнала на входе устройства оценивания помехи пренебрежимо мала, что значительно упрощает вычисление статистики обнаружения.

При указанных условиях пространственная и временная обработка сигналов осуществляется отдельно, причем пространственная обработка осуществляется отдельно для сигнала и негауссовской помехи, что обеспечивает синфазное сложение составляющих сигнала и негауссовской помехи. Отметим, что алгоритм обработки не учитывает искажения полезного сигнала в нелинейном компенсаторе негауссовской помехи, так как эти искажения существенно ослаблены вследствие высокой пространственной избирательности приемной системы.

Согласование ПС системы $\mathbf{R}$ с пространственными характеристиками сигнала и помех существенно увеличивают помехоустойчивость. Критерием оптимизации пространственной структуры являются:

- максимум ОСПШ $\mathbf{R}_{opt} = \arg \max_{\mathbf{R}} q(\mathbf{R})$, если оптимизация производится на этапе проектирования системы обработки,
- максимум логарифма ОП $\mathbf{R}_{opt} = \arg \max_{\mathbf{R}} z(\tilde{\mathbf{Y}}_0^T, \mathbf{R})$, если оптимизация производится адаптивно в процессе функционирования системы обработки.

Для реализации возможностей ОПС необходимо обеспечить изменение координат приемных элементов, а также изменение настроек блоков системы обработки.

Для определения степени влияния ПС на эффективность обработки сигнала проведем анализ, учитывающий как пространственные характеристики принимаемых радиосигналов и помех, так и пространственную структуру системы обработки. Эффективность алгоритма ОКК обработки сигнала, проводимой после декорреляции, при достаточно большом времени наблюдения T оценивается ОСШ

$$q = m_z^2 / D_z = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^N \tilde{E}_S^{(n)}, \quad (4)$$

где $m_z = \frac{1}{2N_0} \sum_{n=1}^N \int_0^T \mathbf{M} \left\{ \left| \tilde{S}_t^{(n)} \right|^2 \right\} dt$, $D_z = \frac{1}{2N_0} \sum_{n=1}^N \int_0^T \mathbf{M} \left\{ \left| \tilde{S}_t^{(n)} \right|^2 \right\} dt$, $\tilde{E}_S^{(n)} = E_0^{(n)} + \Delta E_1^{(n)} + \Delta E_2^{(n)}$ -

средняя энергия сигнальных компонент после компенсации негауссовской помехи,

$$E_0^{(n)} = \int_0^T |\tilde{S}_t^{(n)}|^2 dt = \frac{|A_s \tilde{a}^{(n)}|^2 T}{2} - \text{энергия полезного сигнала}, \quad \Delta E_1^{(n)} = 2 \int_0^T \tilde{S}_t^{(n)} \mathbf{M} \{ \Delta \tilde{S}_t^{(n)} \} dt -$$

корреляция сигнала и его искажений $\Delta \tilde{S}_t^{(n)}$ в компенсаторе негауссовской помехи,

$$\Delta E_2^{(n)} = \int_0^T \mathbf{M} \left\{ \left| \Delta \tilde{S}_t^{(n)} \right|^2 \right\} dt - \text{энергия искажений сигнала в компенсаторе помехи.}$$

Выражение (4) определяет эффективность оптимальной пространственно-временной обработки сигнала на фоне произвольной негауссовской помехи при различной пространственной структуре системы.

Пусть модуляция фазы негауссовской помехи осуществляется гауссовским марковским процессом x_t с параметрами: $\mathbf{M}\{x_t\} = 0$, $K_x(\tau) = \mathbf{M}\{x_t x_{t+\tau}\} = D_x \exp(-\alpha|\tau|)$.

Корреляционная функция негауссовской помехи η_t имеет вид:

$$\mathbf{M}\{A_\eta \cos(\omega_0 t + x_t) A_\eta \cos(\omega_0(t + \tau) + x_{t+\tau})\} = \frac{A_\eta^2}{2} R_\eta(\tau) \cos \omega_0 \tau,$$

где $R_\eta(\tau)$ – нормированная огибающая автокорреляционной функции помехи.

Данная помеха на выходах приемных элементов преобразуется к виду: $\tilde{\mathbf{H}}_t = \tilde{\mathbf{Q}}_H \{ \eta_t \}$, вид преобразования определяется характеристиками элементов, пространственной структурой и расположением источника помехи, а также результатом пространственной декорреляции гауссовских помех.

Искажения полезного сигнала $\Delta \tilde{S}_t^{(n)}$, $n=1, \dots, N$ в приемных элементах в задаче компенсации негауссовской помехи при большом отношении помеха-шум и помеха-сигнал равны:

$$\Delta S_t^{(n)} = -\frac{\partial \hat{\eta}_t^{(n)}}{\partial \hat{x}_t} \Delta x_t = -|\tilde{b}^{(n)}| \Delta x_t A_\eta \cos(\omega_0 t + \arg \tilde{b}^{(n)} + \hat{x}_t), \quad (5)$$

где Δx_t – изменение оценки фазы $\hat{x}_t$ помехи за счет присутствия в наблюдаемом процессе $\tilde{Y}_t$ сигнала $\tilde{S}_t$. В данной задаче уравнения фильтрации фазы в стационарном режиме при гипотезах $\theta=1$ и $\theta=0$ имеют вид:

$$\frac{d\hat{x}_t}{dt} + \frac{d\Delta x_t}{dt} = -\alpha(\hat{x}_t + \Delta x_t) + \frac{k_x}{N_V} (\mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}}_H^{-1} \{ \mathbf{S}_\tau \} + \eta_t + V) A_\eta \cos(\omega_0 t + \hat{x}_t + \Delta x_t), \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{x}_t}{dt} = -\alpha \hat{x}_t + \frac{k_x}{N_V} (\eta_t + V_t) A_\eta \cos(\omega_0 t + \hat{x}_t), \quad (7)$$

где V_t – белый гауссовский шум.

Дифференциальное уравнение для Δx_t получается почленным вычитанием из уравнения (6) уравнения (7), пренебрегая слагаемыми высших порядков малости и членами, имеющими удвоенную частоту. При этом вследствие высокой точности фильтрации фазы возможна замена оценки фазы ее истинным значением $\hat{x}_t \approx x_t$:

$$\frac{d\Delta x_t}{dt} = -k_1 \Delta x_t + \frac{k_x}{N_V} \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}}_H^{-1} \{ \mathbf{S}_\tau \} A_\eta \cos(\omega_0 t + x_t). \quad (8)$$

При начальных условиях $\Delta x(0) = 0$ решение уравнения (8) имеет вид:

$$\Delta x_t = e^{-k_1 t} \int_0^t \frac{k_x}{N_V} \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}}_H^{-1} \{\mathbf{S}_\tau\} A_\eta \cos(\omega_0 \tau + x_\tau) e^{k_1 \tau} d\tau. \quad (9)$$

Используя (5) и (9), запишем выражение для искажений сигнала на выходе n -го канала компенсатора негауссовской помехи:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S}_t^{(n)} &= -\tilde{b}^{(n)} \left| A_\eta \cos(\omega_0 t + x_t + \arg \tilde{b}^{(n)}) \Delta x_t \right| = \\ &= -\tilde{b}^{(n)} \left| A_\eta \cos(\omega_0 t + x_t + \arg \tilde{b}^{(n)}) e^{-k_1 t} \int_0^t \frac{k_x}{N_V} \tilde{S}_\tau A_\eta \cos(\omega_0 \tau + x_\tau) e^{k_1 \tau} d\tau \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив (10) в (4) при высокой мощности помехи, получим для случая ФКМ сигнала с большой базой:

$$\Delta E_1^{(n)} = -T A_s^2 \left| \tilde{a}^{(n)} \tilde{a}_s \tilde{b}^{(n)} \right| \cos(\arg \tilde{a}^{(n)} - \arg \tilde{a}_s) \cos \arg \tilde{b}^{(n)} \frac{A_\eta^2 k_x}{4 N_V} \int_0^T R_\eta(\tau) R_s(\tau) e^{-k_1 \tau} d\tau, \quad (11)$$

$$\Delta E_2^{(n)} = \frac{T}{2 k_1} \left| \tilde{b}^{(n)} \tilde{a}^{(n)} \tilde{a}_s \right|^2 A_s^2 \left(\frac{A_\eta^2 k_x}{2 N_V} \right)^2 \int_0^T R_\eta(\tau) R_s(\tau) e^{-k_1 \tau} d\tau, \quad (12)$$

где $R_s(\tau)$ – нормированная огибающая корреляционной функции сигнала S_t . Полученное с учетом (11), (12) выражение для средней энергии сигнальных компонент $E_s^{(n)}$ позволяет рассчитать выходное ОСПШ (4). Если пространственная корреляция сигнала и негауссовской помехи мала, то моменты статистики (3), необходимые для вычисления ОСПШ (4), определяются новыми полученными выражениями:

$$\begin{aligned} m_z &= \mathbf{M} \left\{ z(\mathbf{Y}_0^T) \right\} = \operatorname{Re} \int_0^T \mathbf{M} \left\{ \tilde{S}_t^* (\mathbf{A} \tilde{\mathbf{Y}}_t - E_1 \hat{\eta}_{0t}) \right\} dt - \frac{E_2}{2} \int_0^T \left| \tilde{S}_t \right|^2 dt, \\ D_z &= \mathbf{M} \left\{ \left[z(\tilde{\mathbf{Y}}_0^T) - m_z \right]^2 \right\} = \mathbf{M} \left\{ \left[\operatorname{Re} \int_0^T \tilde{S}_t^* (\mathbf{A} \tilde{\mathbf{Y}}_t - E_1 \hat{\eta}_{0t}) dt - \frac{E_2}{2} \int_0^T \left| \tilde{S}_t \right|^2 dt \right]^2 \right\} - \\ &\quad - \left[\operatorname{Re} \int_0^T \mathbf{M} \left\{ \tilde{S}_t^* (\mathbf{A} \tilde{\mathbf{Y}}_t - E_1 \hat{\eta}_{0t}) \right\} dt - \frac{E_2}{2} \int_0^T \left| \tilde{S}_t \right|^2 dt \right]^2. \end{aligned}$$

Проведенный анализ показал, что ОПС системы обработки совместно с нелинейной компенсацией негауссовской помехи позволяет увеличить число эффективно подавляемых пространственно сосредоточенных помех. Получаемый при этом выигрыш в ОСПШ составляет 5...15 дБ в зависимости от числа помех и их пространственных характеристик, что доказывает защищаемое положение 4.

Установлено, что применение нелинейной обработки дает выигрыш в ОСПШ 5...15 дБ в зависимости от числа приемных элементов и углового положения источника сигнала. Наибольший выигрыш получается при совпадении угловых положений источника радиосигнала и негауссовской помехи и $N = M = 3$.

Рассчитана зависимость ОСПШ углового положения источника сигнала при различном числе приемных элементов при действии только негауссовской помехи. Уменьшение ОСПШ при совпадении угловых положений источников сигнала и негауссовской помехи не превышает 3 дБ, что согласуется с полученными результатами. При увеличении углового разнесения источников сигнала и негауссовской помехи ОСПШ увеличивается вследствие пространственной компенсации помехи.

В предположении, что радиосигнал наблюдается на фоне M гауссовских помех и негауссовской помехи, а компенсация последней производится в результате нелинейной обработки, оптимальная структура, реализуемая путем изменения положения только одного из приемных элементов, дает выигрыш 5...10 дБ в ОСПШ.

тельно марковских моделей, которые могут обеспечить обоснованный выбор структуры алгоритма фильтрации с точностью до вектора неизвестных параметров.

Разработан алгоритм адаптации, обеспечивающий сходимость алгоритмов фильтрации к оптимальным в общем случае подстройки энергетических и неэнергетических параметров, а также получение алгоритмов адаптивной фильтрации, имеющих высокую эффективность как при белых, так и при небелых слабокоррелированных шумах наблюдения. Приведенные уравнения адаптивной фильтрации получены при условии, что стохастические интегралы и дифференциалы понимаются в смысле Ито. Применение алгоритмов адаптации такого вида в случае широкополосного, но небелого шума может вызвать их расходимость. Установлено, что при использовании симметризованных стохастических интегралов (интегралов Стратоновича) из уравнений линейной фильтрации процесса следует, что получаемая оценка коррелирована с шумом, действующим на входе фильтра. Таким образом, не выполняется свойство некоррелированности белого шума наблюдения с функционалом наблюдаемых данных, положенное в основу доказательства адекватности критерия МП среднеквадратическому критерию. Для получения алгоритмов адаптации, обладающих свойством сходимости при действии ШП шумов, полученные ранее в форме Ито стохастические дифференциальные уравнения записаны в симметризованной форме. При этом для получения окончательного результата используется формула перехода от одного типа СДУ к другому, приведенная в работах Р.Л. Стратоновича, Ю.Г. Сосулина.

Предлагаемый подход позволяет получить для гауссовского сигнала замкнутую систему точных уравнений в симметризованном виде для вычисления ОП и оценок фильтрации, а также алгоритмы адаптивной подстройки параметров алгоритмов. Для негауссовских сигналов аналогичные уравнения, полученные в гауссовском приближении, обеспечивают асимптотически оптимальную фильтрацию при большом ОСШ.

Анализ сходимости процесса адаптивной подстройки переменного коэффициента усиления фильтра к оптимальному значению проведен методом статистического моделирования для системы СДУ адаптивной фильтрации, записанной в форме Ито и Стратоновича, при условии, что шум наблюдения белый. Результаты решения систем СДУ как в симметризованной форме, так и в форме Ито показали, что установившееся в процессе адаптации значение коэффициента усиления фильтра совпадает с оптимальным значением при различных начальных значениях.

Проверка сходимости алгоритма адаптации при небелом шуме наблюдения ξ'_t проведена на примере одномерного марковского процесса, записанного в виде:

$$\frac{d\xi'_t}{dt} = -\alpha_\xi \xi'_t + \alpha_\xi \zeta_t,$$

уравнения дополняющего системы решаемых уравнений, где ζ_t - формирующий белый гауссовский шум с интенсивностью $N_\zeta = N_0$, ширина спектра $\alpha_\xi \gg \alpha$. Для алгоритма в форме Стратоновича, сходимость сохраняется, что иллюстрируется полученными графиками реализаций процесса адаптации, рисунок 6.

При этом скорость сходимости для начальных значений коэффициента $k(0) < k_0$ выше, чем при $k(0) > k_0$, поэтому начальное значение коэффициента усиления фильтра рекомендуется выбирать заведомо меньше оптимального. Алгоритм адаптивной подстройки, записанный в симметризованной форме, обеспечивает близкую к оптимальной оценку процесса также и при небелом шуме наблюдения. Вместе с тем при небелом шуме алгоритм адаптации в форме Ито расходится при любых начальных значениях, рисунок 7.

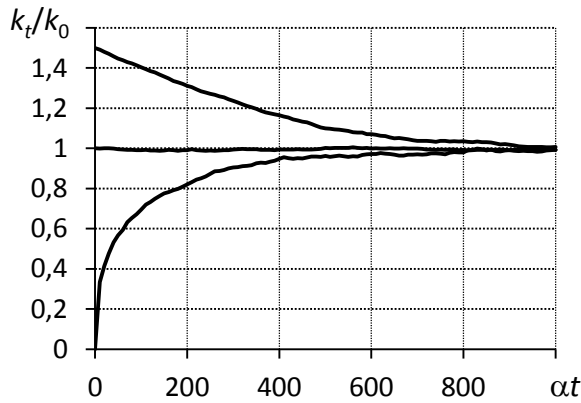


Рисунок 6 - Сходимость алгоритма в форме Стратоновича

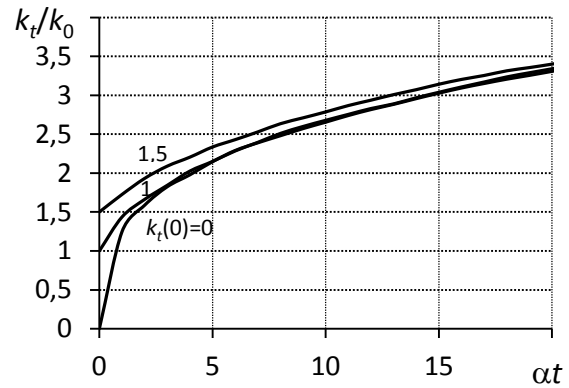


Рисунок 7 - Расходимость процесса в форме Ито при небелом шуме

Практически важным является факт, что при симметризованной форме сходимость и высокая эффективность адаптивной фильтрации сохраняются и при небелом шуме наблюдений. Область применения предложенного метода адаптации охватывает фильтрацию как гауссовских, так и негауссовских СП.

Разработана структурная схема устройства компенсации негауссовской помехи по обоснованному в главе 3 алгоритму нелинейной компенсации ограниченного гауссовского процесса, позволяющему с высокой точностью определять фазовую структуру помехи. Данная особенность синтезированного алгоритма реализуется в блоке формирования опорного сигнала компенсатора помехи. Выигрыш в коэффициенте подавления помехи от применения нелинейного компенсатора составляет около 6 дБ и увеличивается при более жестком ограничении помехи. Предложен вариант цифровой реализации компенсатора негауссовской помехи.

Разработаны варианты практической реализации алгоритма оптимизации пространственной структуры системы ОКК обработки сигналов для адаптивной и робастной системы. Робастная система представляется перспективной для практического применения. Анализатор помеховой обстановки позволяет измерять в пассивном режиме пространственные и энергетические характеристики помех: мощность, азимут и угол места. В базе данных хранятся рассчитанные координаты элементов для фиксированного количества сигнально-помеховых ситуаций для любой, не обязательно робастной системы.

В пятой главе рассматриваются перспективные задачи использования оптимальных ПС РТС. Разработан метод повышения скорости сходимости процесса адаптации в системе обработки сигналов с изменяемой ПС на фоне пространственно сосредоточенных помех, включающий:

- алгоритм вычисления МП оценки пространственных координат,
- рекуррентный алгоритм адаптивной компенсационной обработки сигнала,
- алгоритм наискорейшего спуска для расчета вектора весовых коэффициентов.

Показано, что предпроцессорная обработка с подстройкой элементов адаптивной приемной системы дает возможность значительно уменьшить разброс собственных значений пространственной корреляционной матрицы, что увеличивает скорость сходимости алгоритма адаптации градиентного типа.

Эффективность пространственного подавления помех в значительной степени зависит от свойств корреляционной матрицы помех, в частности от ее собственных

значений. При большом различии собственных значений корреляционной матрицы помех уменьшается скорость сходимости алгоритмов адаптации градиентного типа, возрастает чувствительность результата обращения матрицы к ошибкам ее оценивания. Особенно это заметно при одновременном приеме сигналов от источников слабых и мощных помех, а также источников мощных помех, расположенных на близком угловом расстоянии друг от друга.

Известные методы используют различные виды предпроцессорной обработки: методы ускоренного градиента, сопряженных градиентов с масштабированием, каскадные предпроцессоры с разложением входного процесса на главные компоненты. Предлагается реализовать предпроцессорную обработку путем изменения пространственной структуры приемной системы. Ранее ОПС использовалась для повышения ОСПШ, повышения скорости перестройки пространственной структуры, повышения эффективности нелинейной обработки сигнала на фоне негауссовских помех.

Поставлена и решена задача повышения скорости адаптивной пространственной компенсации помех путем предпроцессорной обработки на основе ОПС.

Проведено статистическое моделирование предпроцессорной обработки с ОПС и процессов в системе с адаптивной пространственной обработкой сигнала с различными параметрами приемной системы. Исследована ОПС как один из видов предпроцессорной обработки сигналов с учетом взаимного влияния элементов, учитывающего технические ограничения на их положения, рисунок 8.

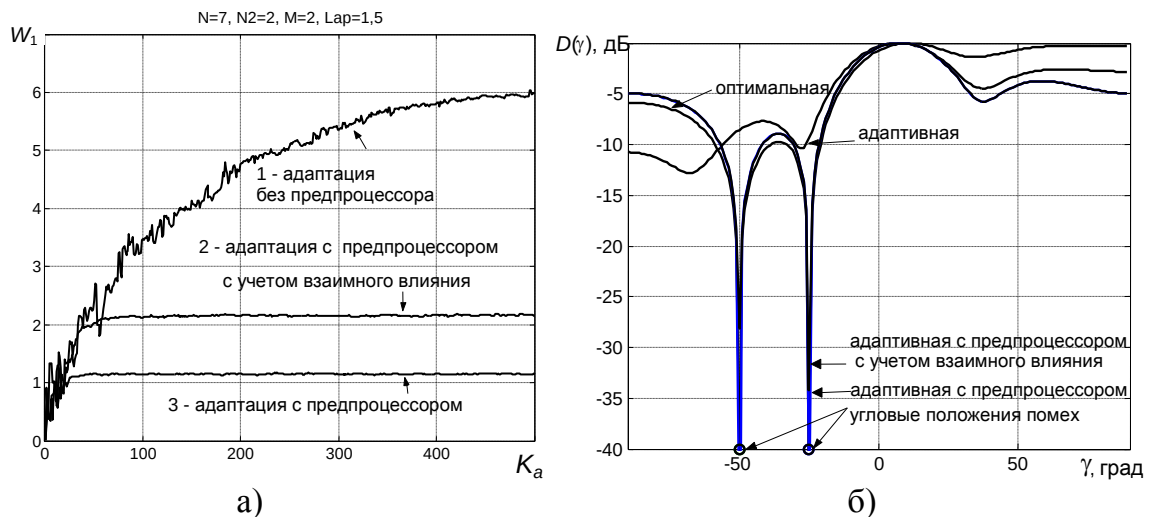


Рисунок 8. Адаптация с предпроцессорной обработкой с учетом взаимного влияния элементов во временной (а) и пространственной области (б)

Показан значительный выигрыш в скорости сходимости процесса адаптации с использованием ОПС в качестве предпроцессорной обработки в реконфигурируемой приемной системе, рисунок 8 а, б, что доказывает защищаемое положение 5.

Показана возможность применения в РТС приемных систем с оптимальными пространственными структурами с использованием технологии высокочастотных микроэлектромеханических устройств в качестве фидерных и коммутирующих цепей, а также ВЧ МЭМС, имеющих свойства пространственной реконфигурации.

В заключении приведены основные научные и практические результаты:

1. Разработан метод ОПС системы обработки непрерывных полей, основанный на их пространственной дискретизации при использовании ОКК подхода. Метод позволяет получать алгоритмы, структурно-инвариантные относительно статистических свойств процессов при достаточно общих моделях сигналов и помех.

2. Предложен квазиоптимальный алгоритм обработки для класса сигнально-помеховых ситуаций, в которых пространственная структура не зависит от пространственных характеристик сигнала. При этом существенно упрощается алгоритм совместного обнаружения сигнала и ОПС РТС, а также его техническая реализация.

3. Проведен анализ эффективности предложенного алгоритма оптимизации пространственной структуры РТС путем вычисления границы Рао-Крамера, которая является нижней границей дисперсии ошибки параметра координат приемных элементов.

4. Доказана эффективность предложенного метода ОПС РТС по критерию максимума ОСПШ на модельной приемной системе. Показан существенный выигрыш (6...11 дБ), получаемый за счет оптимизации пространственной структуры.

5. Исследованы направленные свойства получаемых оптимальных ПС. Доказано, что оценки МП координат элементов приемной системы обеспечивают минимумы ДН в направлении на источники помех, что дает существенный выигрыш в ОСПШ (до 11 дБ).

6. Доказано, что приемные системы с оптимальной структурой позволяют обеспечить подавление большего числа помех $M > N - 1$, чем системы с фиксированным расположением элементов.

7. Исследовано влияние сигнально-помеховой обстановки на оптимальную структуру РТС, выявлена ее высокая чувствительность к изменению пространственного положения источников помех. Результаты исследования дают теоретическую основу для получения ПС РТС при различных априорных сведениях о пространственных характеристиках наблюдаемых полей и позволяют получать оптимальные, адаптивные и робастные ПС. Особенности технических приложений могут быть отражены путем наложения ограничений при решении задачи условной оптимизации: допустимый размер апертуры, дискретный или непрерывный характер изменения пространственных координат, а также возможность проведения оптимизации в реальном масштабе времени.

8. Предложено решение задачи получения робастных пространственных структур РТС методом регуляризации с использованием метрики, позволяющее преодолеть проблемы, связанные с многоэкстремальностью целевой функции и с неустойчивостью получаемых решений некорректной задачи при сохранении улучшения ОСПШ на 4...7 дБ.

9. Так как реализация процедуры ОПС в реальном времени требует больших вычислительных затрат, то для повышения вычислительной эффективности рекомендовано использовать интерполяцию ОПС по вычисленным значениям, хранящимся в базе данных.

10. Так как высокая чувствительность ОПС к начальным условиям не позволяет установить оптимальное положение приемных элементов при наличии инерционности механической перестройки, то применение робастных ПС с использованием регуляризованного алгоритма, позволяет понизить требования к быстродействию перестройки и более точно установить оптимальные координаты элементов. В результате чего помехоустойчивость системы дополнительно увеличивается по сравнению со случаем отсутствия регуляризации до 6 дБ.

11. В результате исследований показано повышение помехоустойчивости РТС пространственно-временной обработки сигналов на основе анализа последовательных выборок наблюдаемых данных с применением ОПС и выигрыш в вероятности обнаружения до 3,5 раз.

12. Решена задача ОПС РТС на последовательных выборках наблюдаемых данных на основе теории оптимальных статистических оценок. Для расчета оценок предложены алгоритм МП и алгоритм квадратичной аппроксимации. Определены области применения алгоритмов, в которых достигается минимальная дисперсия ошибки ПС.

13. Разработан метод совместного оценивания информационного параметра сигнала и ПС РТС. Полученная оценка является эффективной, что доказывает достаточность используемой статистики. Показано, что ОПС позволяет существенно повысить точность оценивания информационного параметра при числе помех равном или более числа элементов приемной системы.

14. Получен квазилинейный алгоритм адаптивной фильтрации негауссовской помехи с использованием марковской аппроксимации. Результат дает возможность дополнительной оптимизации РТС путем подстройки уровня ограничения амплитуды помехи при обработке.

15. На основе разработанного алгоритма, позволяющего с высокой точностью определять фазовую структуру помехи, разработана структурная схема устройства квазилинейной компенсации негауссовской помехи.

16. Разработан метод оптимальной обработки сигнала на фоне комплекса ШП гауссовских и негауссовской помех, содержащий операции пространственной декорреляции ШП помех и оптимальную пространственно-временную ОКК обработку сигнала на фоне негауссовской помехи и некоррелированного гауссовского шума. Получено новое решение задачи повышения помехоустойчивости путем перераспределения пространственного и временного ресурсов в системе обработки сигналов в сложной помеховой обстановке.

17. Проведенный анализ показал, что ОПС системы обработки совместно с нелинейной компенсацией негауссовской помехи позволяет увеличить число эффективно подавляемых пространственно сосредоточенных помех. При этом выигрыш в ОСПШ, получаемый от применения ОПС составляет 5...10 дБ, от нелинейной обработки – 5...15 дБ.

18. Проведенный анализ адаптивной подстройки параметров алгоритма среднеквадратичной фильтрации случайных процессов на фоне белого шума позволяет решать широкий круг задач обработки сигналов в условия априорной неопределенности. К их числу относятся задачи фильтрации гауссовских и негауссовских случайных процессов, обоснование и использование оценочно-корреляционных и ОКК алгоритмов обнаружения, различения и измерения параметров стохастических сигналов.

19. Показано, что как симметризованная, так и несимметризованная формы алгоритма адаптивной фильтрации при выборе соответствующего метода численного моделирования обеспечивают сходимость процесса адаптации и в установившемся режиме дают оптимальные значения параметров алгоритмов. Практически важным является факт, что при симметризованной форме сходимость и высокая эффективность адаптивной фильтрации сохраняются и при небелом шуме наблюдений.

20. Область применения предложенного метода адаптации охватывает фильтрацию как гауссовских, так и негауссовских СП. При этом для их описания допускается использование марковских, а также полигауссовских и других моделей, которые могут обеспечить выбор структуры алгоритма фильтрации с точностью до вектора неизвестных параметров.

21. Показано применение метода ОПС РТС как одного из видов предпроцессорной обработки сигналов, в том числе, с учетом взаимного влияния элементов, учитывающего технические ограничения на положения приемных элементов. Анализ эффективности ОПС показал значительное увеличение скорости сходимости процесса адаптации в реконфигурируемой приемной системе, а также повышение эффективности подавления пространственно сосредоточенных помех. Установлено, что наибольший выигрыш в скорости адаптации (до 20 раз) достигается при малых размерах апертуры приемной системы.

22. Предложены варианты технической реализации разработанных алгоритмов ОПС РТС. Показано применение в РТС приемных систем с оптимальными ПС, использующих технологии высокочастотных микроэлектромеханических устройств в качестве фидерных и коммутирующих цепей, а также ВЧ МЭМС устройства пространственной и частотной реконфигурации.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы

Монографии

1. Марковская теория оценивания в радиотехнике / Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 504 с. (Коллективная монография. Авторский п. 5.2).

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

2. Гусев, С.И. Определение оптимальной пространственной структуры системы обработки сигналов по критерию максимального правдоподобия / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. –1997. – №2. – С. 5-11.

3. Гусев, С.И. Формирование нулей диаграммы направленности антенной решетки методом максимального правдоподобия / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 1997. – №3. – С. 9-15.
4. Гусев, С.И. Влияние сигнально-помеховой ситуации на оптимальную пространственную структуру антенной системы/ Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 1998. – №4. – С. 117-120.
5. Гусев, С.И. Адаптивная фильтрация негауссовского узкополосного процесса/ Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – Т.42. – №8. – С. 34-41.
6. Гусев, С.И. Адаптация параметров алгоритмов фильтрации случайных процессов методом максимального правдоподобия/ Ю.Г. Сосулин, Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Радиотехника. – 1999. – №10. – С.67-75.
7. Гусев, С.И. Оптимальный прием дискретных сообщений системой обработки с оптимальной пространственной структурой / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, №3. – С. 305-312.
8. Гусев, С.И. Синтез робастных пространственных структур радиосистем с использованием регуляризации / Ю.Н. Паршин, А.М. Лавров, С.И. Гусев // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 2000. – № 6. – С. 11-14.
9. Гусев, С.И. Исследование динамического режима оптимизации пространственных структур радиосистем / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2006. – №18. – С. 22-26.
10. Гусев, С.И. Обнаружение дискретных сигналов в радиосистемах с оптимальной пространственной структурой / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Цифровая обработка сигналов. – 2007. – №1. – С. 34-40.
11. Гусев, С.И. Повышение скорости сходимости адаптации в системе обработки сигналов с оптимизацией пространственной структуры / С.И. Гусев, Ю.Н. Паршин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – №3 (37). – С. 31-34.
12. Гусев, С.И. Реконфигурирование и адаптация пространственных структур информационных систем / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев, А.В. Ксендзов, С.В. Колесников, П.В. Жариков // Радиотехника. – 2012. – №3. – С. 36-46.
13. Гусев, С.И. Оценка влияния взаимных импедансов элементов антенной решетки на скорость адаптации в радиосистеме с оптимизацией пространственной структуры / С.И. Гусев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – №4 (46). Ч.2. – С.106-108.
14. Гусев, С.И. Алгоритм нелинейной компенсации комплекса помех с использованием оптимальной пространственной структуры радиосистемы / С.И. Гусев, Ю.Н. Паршин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – №6. – С.67-73.
15. Gusev, S.I. Research of Dynamic Characteristics in Radiosystem with Optimal Spatial Structure/ S.I. Gusev, Yu.N. Parshin // Journal of Radioelectronics. – 2013. – №9. – С.1-14.
16. Гусев, С.И. Синтез квазиоптимальных алгоритмов компенсации интермодуляционных помех в приемном тракте активной антенной решетки на основе теории фильтрации марковских процессов / Ю.Н. Паршин, С.В. Колесников, С.И. Гусев // Радиотехника. – 2015. – №5. – С. 13-18.
17. Гусев, С.И. Эффективность обработки сигнала на фоне гауссовских и негауссовской помех в радиотехнической системе с оптимальной пространственной структурой / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев, С.В. Колесников // Радиотехника. – 2015. – №5. – С. 88-96.
18. Гусев, С.И. Оценивание параметров сигнала методом максимального правдоподобия на последовательных выборках наблюдаемых данных / С.И. Гусев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 2 (52). – С. 11-16.

Патенты на изобретения

20. Патент № 2137297 Россия, МКИ 6 Н04b 1/10. Компенсатор шумовой помехи / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев (Россия). - № 98111537/09; Заявл. 15.06.98; Опубл. 10.09.99.

Статьи в сборниках научных трудов

21. Гусев, С.И. Синтез и анализ алгоритма адаптивной фильтрации ограниченного узкополосного процесса / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Обработка сложных сигналов с применением цифровых устройств и функциональной электроники. Межвуз. сб. – Рязань: РГРТА. – 1996. – С. 35-40.

22. Гусев, С.И. Оптимизация пространственной структуры радиосистемы с нелинейной компенсацией помех / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Радиотехника, телевидение и связь. Межвуз. сб. науч. трудов. – Муром: Муромский институт (филиал) ВлГУ. – 1999. – С.112-116.

Доклады в трудах зарубежных конференций

23. Gusev, S. I. Dynamic Mode of Radiosystem with Spatial Structure Optimization in Presence of Interferences / Yu.N. Parshin, S. I. Gusev // 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications, MIKON-2010, Vilnius, Lithuania. – 2010. – V.1. pp.133-136.

24. Gusev, S.I. Nonlinear Interference Compensation in Combination with Antenna Array Spatial Reconfiguration / Yu.N. Parshin, S.I. Gusev, S.V. Kolesnikov // International Radar Symposium. – Proc., V. I, II, Dresden, Germany. – German institute of navigation. – 2015 – pp. 469-474.

25. Gusev, S.I. Non-recurrent Signal Parameter Estimation and Optimization of Spatial Structure Based on Sequential Samples / Yu.N. Parshin, S.I. Gusev // International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015).

Доклады на международных и всероссийских конференциях

26. Гусев, С.И. Вычислительный эксперимент в исследовании адаптивного компенсатора негауссовской помехи / С.И. Гусев // Научно-техническая конференция “Новые информационные технологии в научных исследованиях радиоэлектроники”. Тез. докл. Рязань: РГРТА. – 1996. – С. 19-20.

27. Гусев, С.И. Исследование адаптивной фильтрации ограниченного гауссовского процесса / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // 2-я международная научно-техническая конференция “Теория и техника передачи, приема и обработки информации”. Тез. докл. Туапсе: ХГТУРЭ. – 1996. – С.35.

28. Гусев, С.И. Оптимизация расположения элементов антенной решетки при оценочно-корреляционно-компенсационной обработке сигналов / С.И. Гусев // XIII Гагаринские чтения. Всероссийская научно-техническая конференция. – М.: РГТУ-МАТИ. – 1997. – С. 98-99.

29. Гусев, С.И. Оптимизация геометрии решеток при оценочно-корреляционно-компенсационной обработке полей / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // 52-я научная сессия, посвященная Дню радио. Тезисы докладов. Ч.2. М.: РНТОРЭС. – 1997. – С.56.

30. Гусев, С.И. Квазиоптимальная обработка непрерывных полей с использованием пространственной дискретизации / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // 2-я МНТК “Перспективные технологии в средствах передачи информации”: Сб. докл. Владимир: ВлГУ. – 1997. – С.117-120.

31. Гусев, С.И. Оптимизация пространственной структуры системы оценочно-корреляционно-компенсационной обработки сигналов / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Международная научно-техническая конференция “Теория и техника передачи, приема и обработки информации”: Тезисы докладов. Туапсе: ХГТУРЭ. – 1997. – С.31.

32. Гусев, С.И. Размещение датчиков измерения поля в системе электромагнитного мониторинга атмосферы / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Международная научно-техническая конференция “К.Э. Циолковский - 140 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика.”: Тез. докл. Рязань: РГРТА– 1997.– С. 154-156.

33. Гусев, С.И. Эффективность оптимизации геометрии антенной решетки при обработке сигнала в комплексе помех / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Материалы НТК “Радиоволоконно-оптическая связь, локация и навигация”. Воронеж: ВГТУ. – 1997. – Т.1. – С.112-115.

34. Гусев, С.И. Оптимизация геометрии антенной решетки при обработке сигнала на фоне помех со случайной пространственной структурой / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // Тез. докл. МНТК “Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем”. Пенза: ПГУ. – 1997.– С.112-113.

35. Гусев, С.И. Синтез пространственной структуры системы оценочно-корреляционно-компенсационной обработки сигналов / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // 1-я Международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применения". Доклады, т.3, М.: МЦНТИ. – 1998. – С.29-36.
36. Гусев, С.И. Синтез и анализ цифровых алгоритмов адаптивной фильтрации случайных сигналов на фоне белых и небелых шумов / Ю.Г. Сосулин, Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // 2-я Международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применения". Доклады, т.III, М.: МЦНТИ. – 1999. – С.544-550.
37. Гусев, С.И. Регуляризованный алгоритм синтеза робастных пространственных структур радиосистем / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // 3-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применения". Доклады, т.2. М.: МЦНТИ. – 2000. – С. 26-28.
38. Гусев, С.И. Оптимизация пространственной структуры радиосистем с использованием дискретизации наблюдаемого поля / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев // «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А.Котельникова»/ МНК- М.: МЭИ. – 2003. – С.21-22.
39. Гусев, С.И. Анализ алгоритма обнаружения дискретных сигналов в радиосистемах с оптимизацией пространственной структуры на последовательных выборках/ Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев// Труды МНТК «ИРЭМВ-2007». Таганрог, Изд. ТТИ ЮФУ, 2007. Т.2. С.236-240.
40. Гусев, С.И. Эффективность оценивания параметров сигнала методом максимального правдоподобия на последовательных выборках / С.И. Гусев, Ю.Н. Паршин // 9 Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». Тезисы докладов. Казань, КГТУ. – 2008. – С.126-128.
41. Гусев, С.И. Влияние взаимных импедансов элементов антенной решетки на оптимальную пространственную структуру компенсатора помех / С.И. Гусев, Ю.Н. Паршин // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. 17-я Международная науч. техн. конф. Часть 1. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 76-78.
42. Gusev, S.I. Synthesis of spatial structure of estimation-correlation-compensation signal-processing system / Yu.N. Parshin, S.I. Gusev // 1-st International Conference “Digital Signal-processing and Its Applications”, Moscow– 1998. V.III. – pp. 21-25.
43. Gusev, S.I. Synthesis and Analysis of Digital Algorithms of Random Signals Adaptive Filtration at Presence of White and Quasiwhite Noises / Yu.G. Sosulin, Yu.N. Parshin, S.I.Gusev // 2-nd International Conference “Digital Signal-processing and Its Applications”. Proceedings. – V.II Moscow. –1999. – P.551-552.
44. Gusev, S.I. Synthesis of robust spatial structures of radiosystems with use of a regularization method / Yu.N. Parshin, S.I.Gusev // 3-rd International Conference “Digital Signal-processing and Its Applications”. Proceedings. – V.II, Moscow. – 2000. – p.29.
45. Гусев, С.И. Оценка влияния взаимных импедансов на скорость адаптации в пространственно реконфигурируемой антенной системе / С.И. Гусев, Ю.Н. Паршин // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): Севастополь: Вебер. – 2014. – С.1231-1232.
46. Паршин Ю.Н., Гусев С.И., Колесников С.В. Анализ нелинейной пространственной компенсации комплекса помех с использованием оптимальной пространственной структуры / Ю.Н. Паршин, С.И. Гусев, С.В. Колесников // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): Севастополь: Вебер. – 2014. – С.393-395.
47. Гусев, С.И. Реализация оптимальной структуры пространственно - реконфигурируемой радиотехнической системы / С.И. Гусев // Тезисы докладов 3-й всероссийской научно-практической конференции РЛС-2015 «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы». Муром: АО МЗРИП. – 2015. – С.16-18.
48. Гусев, С.И. Адаптивная оптимизация пространственной структуры радиосистемы на основе аппроксимации достаточной статистики / С.И. Гусев, Ю.Н. Паршин // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь: Вебер.– 2015. – С. 509-510.

Гусев Сергей Игоревич

Методы и алгоритмы
оптимизации пространственных структур
радиотехнических систем с нелинейной и адаптивной
обработкой сигналов на фоне комплекса помех

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать . . . 2015. Формат бумаги 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ

ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
Редакционно-издательский центр РГРТУ