

На правах рукописи

КИРЬЯНОВ Владимир Владимирович

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ
МНОГОЧАСТОТНЫХ КОГЕРЕНТНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ
НА ФОНЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ**

Специальность 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководи- доктор технических наук, профессор
тель: **Попов Дмитрий Иванович**

Официальные оппо- доктор технических наук, профессор
ненты: **Паршин Юрий Николаевич**

кандидат технических наук, главный специалист
ЗАО НТЦ «Спектр»
Гусев Сергей Игоревич

Ведущая организация: Обособленное подразделение
ОАО «Корпорация» Фазотрон – НИИР» –
НИИ «Рассвет» (г. Рязань)

Защита состоится « 22 » сентября 2006 г. в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.211.04 в ГОУВПО «Рязанский государствен-
ный радиотехнический университет» по адресу: **390005, г. Рязань,**
ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «РГРТУ»

Автореферат разослан « » _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При обработке радиосигналов одной из актуальных проблем является селекция сигналов на фоне коррелированных (пассивных) помех, создаваемых интенсивными мешающими отражениями от неподвижных объектов. При этом спектрально-корреляционные свойства параметров полезных сигналов и пассивных помех неизвестны, что затрудняет реализацию оптимальных систем обнаружения. Для преодоления априорной неопределенности используются системы обнаружения, адаптирующиеся к неизвестным параметрам. Решение данной задачи усугубляется наличием эффекта слепых скоростей, который проявляется в невозможности обнаружения отраженного сигнала с доплеровской частотой, равной или кратной частоте повторения излученного импульсного сигнала, так как при этом спектр отраженного сигнала попадает в зону режекции. Кроме того, необходимо учитывать большое количество параметров, влияющих на структуру и рабочие характеристики систем обнаружения радиосигналов, решать ряд противоречивых требований, предъявляемых к современным радиосистемам. Также большое значение имеет увеличение числа одновременно решаемых задач в различных режимах работы.

Одним из способов исключения эффекта слепых скоростей, а также улучшения других характеристик систем обнаружения радиосигналов является использование многочастотных систем обнаружения когерентно-импульсных сигналов. основополагающие работы в области обнаружения и обработки многочастотных сигналов были сделаны такими учеными, как Миддлтон Д., Тартаковский Г.П., Ширман Я.Д., Манжос В.Н., Вишин Г.М., Григорин-Рябов В.В., Попов Д.И., Лезин Ю.С. и др.

В настоящее время задачи исследования систем обнаружения многочастотных сигналов решены не полностью. Поэтому тема диссертации является актуальной и направлена на повышение эффективности обнаружения многочастотных сигналов в радиосистемах различного назначения.

Цель и задачи работы

Целью данной работы являются анализ, структурная и параметрическая оптимизация систем обнаружения многочастотных когерентно-импульсных сигналов на фоне коррелированных помех для повышения эффективности обнаружения многочастотных сигналов в радиосистемах различного назначения.

В связи с этим необходимо выделить следующие основные задачи, решаемые в работе:

- разработка общей методики анализа эффективности систем между-периодной обработки многочастотных сигналов на фоне пассивных помех на основе методов математической статистики и теории матриц;
- анализ и структурная оптимизация инвариантных систем обнаруже-

- ния многочастотных сигналов с учетом рабочего диапазона доплеровских частот радиосистемы;
- структурная и параметрическая оптимизация систем обнаружения многочастотных сигналов на основе режекторных фильтров (РФ) в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных свойств пассивных помех;
 - разработка принципов построения и структур адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов, совместно использующих информацию о доплеровской фазе пассивных помех всех частотных каналов;
 - анализ вероятностных характеристик адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов;
 - имитационное моделирование рассматриваемых систем обнаружения многочастотных сигналов для проверки достоверности теоретических расчетов;
 - реализация систем обнаружения многочастотных сигналов на основе программируемых сигнальных процессоров.

Методы проведения исследований

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования, статистической теории обнаружения и оценивания сигналов; метод характеристических функций, в частности метод собственных значений; теория матриц, а также энергетический, вероятностный и минимаксный критерии оптимизации.

Научная новизна

Проведенное в диссертационной работе исследование систем обнаружения многочастотных сигналов включает в себя следующие результаты:

- разработана общая методика анализа эффективности систем между-периодной обработки многочастотных сигналов на фоне пассивных помех;
- предложена методика выбора оптимального числа частотных каналов по критерию минимизации пороговых сигналов на слепых скоростях в рабочем диапазоне доплеровских частот радиосистемы;
- разработана методика структурной и параметрической оптимизации систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных свойств пассивных помех;
- предложены принципы построения автокомпенсатора (АК) с между-канальным усреднением оценок доплеровской скорости пассивных помех.

Практическая значимость диссертационной работы

Теоретические положения диссертационной работы доведены до практически полезных результатов, к числу которых относятся:

- выбор оптимального числа частотных каналов по критерию минимизации пороговых сигналов на слепых скоростях в рабочем диапазоне доплеровских частот радиосистемы;
- структура и параметры системы обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ, оптимизированной по критерию минимизации максимальных потерь в пороговых сигналах в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных свойств пассивных помех;
- принципы построения и структура автокомпенсатора с междуканальным усреднением оценок доплеровской скорости пассивных помех;
- имитационные модели предложенных алгоритмов и систем обнаружения многочастотных сигналов, позволяющие анализировать широкий класс соответствующих систем обработки с целью проверки достоверности теоретического анализа.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты.

1. Оптимальная по числу частотных каналов система обнаружения многочастотных сигналов, основанная на минимизации пороговых сигналов с учетом рабочего диапазона доплеровских частот радиосистемы.
2. Оптимальная по структуре и параметрам система обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ, полученная по критерию минимизации максимальных потерь в пороговых сигналах в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных свойств пассивных помех.
3. Принципы построения и структура систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ и АК с междуканальным усреднением оценок доплеровской скорости пассивных помех, обеспечивающих повышение эффективности обнаружения многочастотных сигналов по сравнению с традиционными системами.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

1. Девятая международная НТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”. 4 – 5 марта 2003 г., МЭИ.
2. 12-я международная НТК “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. 12 – 14 января 2004 г., РГРТА.
3. 38-я научно-техническая конференция. 2–7 февраля 2004 г., РГРТА.
4. Десятая международная НТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”. 2 – 3 марта 2004 г., МЭИ.
5. 12-я всероссийская межвузовская НТК студентов и аспирантов

- “Микроэлектроника и информатика”. 19 – 21 апреля 2005 г., Зеленоград МИЭТ.
6. 10-я всероссийская НТК студентов, молодых ученых и специалистов “Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании”. 20 – 22 апреля 2005 г., РГРТА.

Внедрение результатов

Результаты диссертационной работы внедрены в НИОКР, выполняемые в НТЦ «Коралл» ОАО «ММЗ», а также в учебный процесс Рязанской государственной радиотехнической академии, что подтверждено соответствующими актами.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ. Из них 1 статья в центральной печати, 3 статьи в вузовских сборниках, 7 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований и трех приложений. Объем диссертации 189 страниц, в том числе 112 страниц основного текста и 36 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследований, формулируются цель и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе, имеющей обзорный характер, указывается, что многочастотные сигналы являются одним из перспективных направлений при разработке современных радиосистем различного назначения. Рассматриваются математические модели и результаты анализа структур междупериодной обработки, приведенные в работах, посвященных системам обработки многочастотных сигналов. Далее указываются нерешенные задачи проведенного в литературе исследования систем обнаружения многочастотных сигналов.

В начале главы представлены практические приложения, в которых возможно применение многочастотных сигналов, а также результаты основополагающих работ в области обнаружения и обработки многочастотных сигналов.

Далее проводится обзор математических моделей структур и анализа систем обнаружения многочастотных сигналов на фоне пассивных помех. Синтез систем оптимальной обработки, проведенный в литературе, основывается на критерии Неймана-Пирсона. Однако алгоритмы оптимальной обработки многочастотного сигнала содержат в качестве неизвестных параметров

доплеровские сдвиги фаз многочастного сигнала, отраженного от движущейся цели. Преодоление априорной неопределенности путем построения многоканальной по доплеровской фазе системы обработки приводит к необходимости отдельного обнаружения в частотных каналах. Для преодоления априорной неопределенности доплеровских сдвигов фаз многочастного сигнала алгоритм обработки усредняется по неизвестным параметрам, что приводит к структуре подоптимальной обработки многочастотных сигналов.

Реализуемая по такому принципу система обработки является инвариантной к доплеровской фазе многочастотного сигнала, а обработка принятого сигнала заключается в когерентном режектировании помехи матричным фильтром (МФ) и некогерентном накоплении остатков режекции. Объединение частотных каналов осуществляется путем суммирования.

Методика анализа систем обнаружения многочастотных сигналов основывается на методе характеристических функций, который приводит к использованию ряда Эджворта. Однако метод собственных значений позволяет вычислять характеристики обнаружения, наиболее полно соответствующие результатам статистического моделирования в широком диапазоне значений вероятности ложной тревоги.

В следующем разделе первой главы рассматриваются математические модели структур, а также результаты анализа многочастотных систем с когерентным режектированием помехи и некогерентным накоплением сигнала, в которых когерентное режектирование помехи осуществляется режекторным фильтром (РФ). При этом недостатком анализа практически реализуемых систем обнаружения многочастотных сигналов является то, что рассмотрены только двухчастотные системы, в связи с этим отсутствует критерий выбора оптимального числа частотных каналов. Кроме того, полагается, что весовые коэффициенты РФ оптимизируются по энергетическому критерию для каждого частотного канала в отдельности. Необходимо учитывать тот факт, что энергетический критерий синтеза не всегда приводит к оптимальным в смысле критерия Неймана – Пирсона параметрам РФ. Наиболее полно характеризует эффективность выделения полезных сигналов усредненная по доплеровской фазе сигнала вероятность правильного обнаружения. Результаты синтеза одночастотных систем обработки, для которых весовые коэффициенты режекторных фильтров оптимизируются по вероятностным критериям, позволяют утверждать, что данные критерии могут существенно повысить эффективность обнаружения сигналов. Поэтому целесообразно рассмотреть варианты построения систем обнаружения многочастотных сигналов, в которых весовые коэффициенты РФ оптимизируются по вероятностным критериям.

Системы, в которых подавление пассивной помехи осуществляется с помощью неадаптивных РФ, можно применять в случае, когда известны априорные сведения о параметрах помехи. В случае неизвестных или изменяющихся параметров повысить эффективность подавления пассивных помех можно путем применения РФ, адаптирующихся к неизвестным параметрам. Поэтому далее в главе рассматриваются результаты анализа систем об-

наружения многочастотных сигналов на основе адаптивных режекторных фильтров (АРФ).

Существенным недостатком структур и анализа известных адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов является то, что при оценивании доплеровской фазы пассивной помехи в каждом частотном канале не учитывается информация об оценках других частотных каналов. В связи с этим отсутствуют принципы построения и структура адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов, совместно использующих информацию о доплеровской фазе пассивной помехи всех частотных каналов.

Рассмотренные адаптивные системы обнаружения многочастотных сигналов относятся к системам с полной адаптацией к спектрально-корреляционным свойствам помехи, однако полная адаптация существенно усложняет структуру систем обработки и не всегда является оправданной. В случае многочастотных систем структура системы обработки усложняется пропорционально числу частотных каналов. Вследствие этого применение систем на основе РФ с частичной адаптацией может быть способом, который позволит значительно упростить структуру систем обнаружения многочастотных сигналов. Анализ таких систем позволит определить степень целесообразности применения частичной адаптации.

Следует также заметить, что недостатком анализа всех рассмотренных систем обнаружения многочастотных сигналов является произвольный выбор доплеровских фаз сигнала. Целесообразно провести анализ и оптимизацию систем обнаружения многочастотных сигналов при доплеровских фазах сигнала, соответствующих рабочему диапазону радиосистемы, например системы управления воздушным движением (СУВД) в зоне аэропорта.

В связи с вышеизложенным во второй и третьей главах диссертации рассматриваются вопросы анализа, структурной и параметрической оптимизации систем обнаружения многочастотных сигналов.

Во второй главе проводятся анализ и оптимизация инвариантных систем обнаружения многочастотных сигналов на основе матричных и режекторных фильтров.

При статистическом описании многочастотных сигналов входные данные l -го частотного канала представлены вектором $\mathbf{U}_l = \{U_j^{(l)}\}^T$, где $U_j^{(l)}$ – комплексные огибающие отсчетов аддитивной смеси полезного сигнала пассивной помехи и шума, $j = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, L}$, N – число импульсов в пачке каждой частотной составляющей, L – число частотных каналов. Также полагается, что отраженные сигналы, соответствующие различным несущим частотам, являются статистически независимыми и случайными гауссовскими процессами. Тогда совместная плотность вероятности совокупности векторов $\{\mathbf{U}_l\} = \{\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_L\}$ равна произведению совместных плотностей вероятности отдельных векторов \mathbf{U}_l и имеет вид:

$$P(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^L P(\mathbf{U}_l) = (2\pi)^{-LN} \left(\prod_{l=1}^L \det \mathbf{W}_l \right) \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \mathbf{U}_l^{*\top} \mathbf{W}_l \mathbf{U}_l \right),$$

где $\mathbf{W}_l = \|\|W_{jk}^{(l)}\|\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице l -й частотной составляющей многочастотного сигнала $\mathbf{R}_l = \overline{\mathbf{U}_l \mathbf{U}_l^{*\top}} / 2$.

Элементы корреляционной матрицы для l -го частотного канала имеют вид:

$$R_{jk}^{(l)} = \sigma_{cl}^2 \rho_{jk}^{c(l)} e^{i(j-k)\varphi_l^c} + \sigma_{nl}^2 \rho_{jk}^{n(l)} e^{i(j-k)\varphi_l^n} + \sigma_{ш}^2 \delta_{jk} = \frac{q \rho_{jk}^{c(l)} e^{i(j-k)\varphi_l^c} + \rho_{jk}^{n(l)} e^{i(j-k)\varphi_l^n} + L\lambda \delta_{jk}}{1 + L\lambda},$$

где $\rho_{jk}^{(l)}$ – коэффициенты междупериодной корреляции флуктуаций полезного сигнала или пассивной помехи, $\varphi_l = 2\pi F_d^{(l)} T$ – доплеровский сдвиг фазы сигнала или пассивной помехи за период повторения T в l -м канале, причем $\varphi_l = r_l \varphi_1$, где $r_l = f_l / f_1$ – отношение несущих частот l -го и 1-го каналов (разнос несущих частот), δ_{jk} – символ Кронекера, $q = \sigma_{cl}^2 / \sigma_{nl}^2 = \sigma_c^2 / \sigma_n^2$ – отношение сигнал-помеха и $\lambda_l = \sigma_{ш}^2 / \sigma_{nl}^2 = L\sigma_{ш}^2 / \sigma_n^2 = L\lambda$ – отношение шум-помеха.

Общая методика анализа систем обнаружения многочастотных сигналов основывается на известном представлении алгоритма обработки в виде квадратичной формы:

$$V = \sum_{l=1}^L \mathbf{U}_l^{*\top} \mathbf{Q}_l \mathbf{U}_l = \sum_{l=1}^L \sum_{j,k=1}^N Q_{jk}^{(l)} U_j^{(l)*} U_k^{(l)}.$$

Тогда на основе метода характеристических функций, в частности метода собственных значений, полагая, что собственные значения $\lambda_j^{(l)}$ произведения матриц $\mathbf{R}_l \mathbf{Q}_l$ кратны, выражение для определения вероятности превышения порога V_0 величиной V можно записать в виде:

$$P(V \geq V_0) = \int_{V_0}^{\infty} w(V) dV = \sum_{j=1}^M \frac{1}{(k-1)!} \frac{d^{k-1}}{d\lambda_j^{k-1}} \left[\lambda_j^{k-1} \exp \left(-\frac{V_0}{\lambda_j} \right) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^{N-1} \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_j} \right)^{-p} \right].$$

Вероятность ложной тревоги F вычисляется на основе данного выражения при использовании собственных значений матриц $\mathbf{R}_l^n \mathbf{Q}_l$, а вероятность правильного обнаружения D – при использовании матриц $\mathbf{R}_l^{cn} \mathbf{Q}_l$.

Анализ систем обнаружения многочастотных сигналов на основе МФ, элементы матриц обработки которых имеют вид:

$$Q_{jk}^{(l)} = \sum_{n=1}^N W_{kn}^{n(l)} W_{jn}^{n(l)*},$$

проводился с учетом рабочего диапазона скоростей СУВД для гауссовской аппроксимации спектра пассивной помехи и резонансной сигнала, при значениях вероятности ложной тревоги $F = 10^{-6}$ и вероятности правильного обнаружения $D = 0,9$ для всей системы обработки. На основании проведенного

анализа можно утверждать, что для реализации системы обнаружения много-частотных сигналов достаточно трех частотных каналов. При этом критерий выбора оптимального числа частотных каналов выглядит следующим образом:

$$q^{(L+1)} - q^{(L)} \leq \Delta q,$$

где $q^{(L)}$ – значение порогового отношения сигнал-помеха при реализации системы обнаружения многочастотных сигналов с использованием L частотных каналов, Δq – приращение в пороговом отношении сигнал-помеха, которое определяется эмпирически исходя из оптимального соотношения между получаемым выигрышем в пороговом отношении сигнал-помеха и сложностью реализации системы.

Далее в главе решаются задачи анализа, структурной и параметрической оптимизации систем обнаружения многочастотных сигналов на основе неадаптивных РФ. Анализ зависимостей порогового отношения сигнал-помеха от числа частотных каналов на слепых скоростях СУВД показал, что для реализации системы обработки на основе РФ 3-го порядка с весовыми коэффициентами, оптимизированными по энергетическому критерию, так же как и для системы на основе МФ, целесообразно использовать три частотных канала. При этом выигрыш в пороговых сигналах трехчастотной системы, по сравнению с одночастотной, на слепых скоростях одночастотной системы в среднем составляет 18,5 дБ. Кроме того, для оптимальных скоростей трехчастотной системы на основе РФ значение порогового отношения сигнал-помеха в среднем на 1,5 дБ выше порогового отношения сигнал-помеха одночастотной системы.

Для систем обнаружения многочастотных сигналов, оптимизированных по числу частотных каналов, проведено сравнение эффективности обнаружения радиосигналов для различных параметров сигнала, пассивной помехи и шума. Определены степень сближения и различия эффективности рассмотренных типов систем, что с учетом сложности их реализации позволяет осуществить выбор соответствующего типа системы и ее параметров на практике.

Повысить эффективность обнаружения радиосигналов на фоне пассивных помех, как показывают результаты исследования одночастотных систем, можно, используя РФ с весовыми коэффициентами, оптимизированными по вероятностному критерию, исходя из усредненной по доплеровской фазе сигнала вероятности правильного обнаружения D . Поэтому в диссертационной работе проведен анализ систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ 4-го порядка, оптимизированных по вероятностному критерию. При этом рассматривались РФ, реализованные в виде каскадного соединения отдельных звеньев. В этом случае при нечетном m (порядок РФ) системную функцию в l – м частотном канале можно представить в виде:

$$H_l(z) = (1 - z^{-1}) \prod_{i=1}^{(m-1)/2} (1 + a_i^{(i)} z^{-1} + z^{-2}) = \sum_{k=0}^m g_k^{(l)} z^{-k}.$$

Тогда при реализации РФ оптимизируются непосредственно весовые

коэффициенты отдельных звеньев $a_l^{(i)}$, связанные с коэффициентами $g_k^{(l)}$. Полоса режекции при каскадной реализации РФ формируется звеном первого порядка с нулем системной функции $z_0 = 1$ и (или) звеном или звеньями 2-го порядка с лежащими на единичной окружности комплексно сопряженными нулями. А полоса пропускания формируется звеном или звеньями 2-го порядка с лежащими вне единичной окружности действительными нулями. Такое звено формирует монотонную полосу пропускания максимальной ширины. Необходимый компромисс между показателями амплитудно-частотной характеристики РФ в полосах пропускания и режекции при заданных D и F достигается при оптимизации вектора $\mathbf{a}_l = \{a_l^{(i)}\}$ ($l = \overline{1, L}$) по критерию $q(D) \rightarrow \min_{\mathbf{a}_l}$.

Для решения задачи оптимизации, которая в рассмотренном случае является задачей поиска экстремума функции нескольких переменных, использовался квазиньютоновский метод, являющийся разновидностью градиентного, для которого итерационная процедура оптимизации на n -м шаге имеет вид:

$$\mathbf{a}_l^{(n)} = \mathbf{a}_l^{(n-1)} - \nabla \Phi \{ \mathbf{a}_l^{(n-1)} \} \nabla^2 \Phi \{ \mathbf{a}_l^{(n-1)} \}^{-1},$$

где ∇ – оператор градиента, $\Phi(\mathbf{a}_l)$ – целевая функция, в качестве которой выступает функционал $q(D)$.

В результате анализа инвариантных систем обработки многочастотных сигналов на основе РФ, весовые коэффициенты которых оптимизируются по вероятностному критерию, установлено, что, так же как для одночастотных систем, применение вероятностного критерия позволяет существенно увеличить эффективность подавления многочастотных пассивных помех при относительно узкой ширине спектра пассивной помехи. Для помехи с широким спектром применение вероятностного критерия для оптимизации весовых коэффициентов РФ привело к таким же результатам, как в случае энергетического критерия оптимизации. При этом для рассматриваемого в работе диапазона изменения ширины спектра пассивной помехи выигрыш в пороговых сигналах изменяется до величины 4 дБ.

Следует заметить, что при анализе и оптимизации инвариантных систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ вектор весовых коэффициентов рассчитывался для известных значений ширины спектра пассивной помехи в первом частотном канале $\Delta f_1^n T$. В условиях априорной неопределенности возникает необходимость адаптации РФ к неизвестным параметрам. Избежать процедуры адаптации можно с помощью использования минимаксного критерия оптимизации весовых коэффициентов в априорном диапазоне спектрально-корреляционных параметров.

Для определения вектора весовых коэффициентов РФ в каждом из l частотных каналов системы обнаружения многочастотных сигналов предполагалось, что ширина спектра пассивной помехи $\Delta f_l^n T = \beta_n^{(l)}$ изменяется в диапазоне $[\beta_{n1}^{(l)}, \beta_{n2}^{(l)}]$. В этом случае минимаксное правило соответствует оп-

тимуму только для некоторых значений вектора $\beta_n = \tilde{\beta}_n = \{\beta_n^{(l)}\}$, $l = \overline{1, L}$, и находится в результате применения принципа минимакса к величине относительных потерь в пороговом отношении сигнал-помеха:

$$\delta q(\beta_n, \tilde{\beta}_n) = \tilde{q}(\tilde{\mathbf{G}}, \beta_n) - q(\mathbf{G}, \beta_n),$$

где $q(\mathbf{G}, \beta_n)$ – пороговое отношение сигнал-помеха при оптимизации вектора весовых коэффициентов $\mathbf{G} = \{G_l\}$ в соответствии с вектором β_n ; $\tilde{q}(\tilde{\mathbf{G}}, \beta_n)$ – пороговое отношение сигнал-помеха при том же векторе β_n , но при оптимизации вектора $\mathbf{G} = \tilde{\mathbf{G}}$ в соответствии с вектором $\tilde{\beta}_n$.

Условие выбора вектора $\tilde{\beta}_n$ и соответствующего ему вектора $\tilde{\mathbf{G}}$ на основе принципа минимакса записывается в виде:

$$\min_{\tilde{\beta}_n} \max_{\beta_n} \delta q(\beta_n, \tilde{\beta}_n) \leq \max_{\beta_n} \delta q(\beta_n, \tilde{\beta}_n).$$

Согласно указанному критерию в работе была проведена оптимизация систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ в заданном диапазоне изменения спектрально-корреляционных параметров пассивной помехи. Совместный учет относительных потерь в пороговом отношении сигнал-помеха и эффективности обнаружения многочастотных сигналов при вероятностном и энергетическом критериях оптимизации весовых коэффициентов РФ позволил определить структуру и параметры многочастотной системы для априорного диапазона изменения спектрально-корреляционных свойств пассивной помехи. Проведенные исследования систем обнаружения многочастотных сигналов при минимаксном критерии оптимизации РФ в диапазоне изменения ширины спектра пассивной помехи говорят в пользу вероятностного критерия оптимизации весовых коэффициентов в соответствии с вектором $\tilde{\beta}_n$. В этом случае выигрыш в пороговых сигналах по сравнению с системой на основе РФ, весовые коэффициенты которых оптимизировались по энергетическому критерию, изменяется в зависимости от ширины спектра пассивной помехи до величины 3 дБ.

В третьей главе проводится исследование адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов. Необходимость адаптации систем обнаружения радиосигналов к неизвестной доплеровской фазе пассивной помехи приводит к реализации структуры систем обработки на основе АРФ с комплексными весовыми коэффициентами (КВК) либо РФ с автокомпенсатором (АК) доплеровской скорости пассивной помехи. АРФ с КВК имеют известные недостатки, поэтому в диссертационной работе проводится исследование систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК.

В литературе рассматриваются вопросы, касающиеся адаптивных многочастотных систем, однако оценивание доплеровской фазы пассивной помехи в каждом частотном канале осуществляется без учета информации об оценках других частотных каналов. Поэтому в диссертационной работе рассматриваются принципы построения и структура АК, совместно использующего информацию о доплеровской фазе пассивной помехи всех частотных

каналов. А также проводится сравнительный анализ предложенной и известных структур систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК.

Для l -го частотного канала входные данные в p -м элементе разрешения по дальности можно представить в виде вектора $\mathbf{U}_{lp} = \{U_{jp}^{(l)}\}^T$. Пассивная помеха располагается во временном стробе и образует в пределах $n+1$ смежных элементов разрешения по дальности l -го частотного канала обучающую выборку в виде совокупности $\mathbf{U}_l = \{\mathbf{U}_{lp}\} = \{\mathbf{U}_{l1}, \dots, \mathbf{U}_{l,n+1}\}$.

Несмотря на линейную связь между доплеровскими фазами в различных частотных каналах, сразу найти алгоритм оценивания доплеровской фазы пассивной помехи по данным всех частотных каналов не представляется возможным. Поэтому сначала оценки фазы помехи в каждом частотном канале находятся раздельно по известным алгоритмам оценивания:

$$\hat{\phi}_j^{n(l)} = \arg \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{p=1}^n U_{jp}^{(l)*} U_{j+1,p}^{(l)}.$$

Затем, в силу того, что доплеровские сдвиги фаз пассивных помех в различных частотных каналах связаны между собой линейными зависимостями, после получения оценок $\hat{\phi}_l^n$ проводится их междуканальное усреднение. Для этого в каждом частотном канале оценки $\hat{\phi}_k^n$ других каналов пересчитываются для данного канала согласно выражению:

$$\hat{\phi}_{kl}^n = r_l \hat{\phi}_k / r_k, \quad k = \overline{1, L}.$$

Пересчитанные в l -й частотный канал оценки доплеровской фазы пассивной помехи других частотных каналов $\hat{\phi}_{kl}^n$ подвергаются эмпирическому усреднению. Однако усреднение оценок $\hat{\phi}_{kl}^n$ может привести к появлению ошибок автокомпенсации вследствие цикличности фазовых сдвигов. Поэтому усредняются тригонометрические величины, полученные в результате соответствующих преобразований. Усреднение значений $e^{i\hat{\phi}_{kl}^n}$ приводит к вычислению величин, представленных выражением:

$$Y_{l0} = \sum_{l=1}^L e^{i\hat{\phi}_{kl}^n}.$$

Тогда оценка доплеровской фазы пассивной помехи l -го частотного канала учитывает информацию об оценках других частотных каналов и вычисляется согласно формуле:

$$e^{i\hat{\phi}_{l0}^n} = Y_{l0} / |Y_{l0}|.$$

Дальнейшие операции приводят к вычислению полного сдвига доплеровской фазы пассивной помехи для каждого из входных отсчетов. Полученные величины $e^{-ij\hat{\phi}_{l0}^n}$ перемножаются с исходными отсчетами $U_j^{(l)} = u_j^{(l)} e^{i(j\phi_l^n + \phi_0^{(l)})}$, задержанными с целью временного согласования вводимых и компенсируемых фазовых сдвигов на интервал, равный задержке оценок по отношению к среднему элементу обучающей выборки. При этом величины на выходе ав-

тококомпенсатора $\tilde{U}_j^{(l)} = u_j^{(l)} e^{i(j\hat{\varphi}_l^n - j\hat{\varphi}_{l0}^n) + \varphi_0^{(l)}}$ с точностью до погрешностей измерения оценки не содержат доплеровских сдвигов фазы пассивной помехи.

В диссертационной работе предложена структура автокомпенсатора доплеровской скорости пассивной помехи с междуканальным усреднением оценок. Сравнительный анализ точности оценивания доплеровской фазы пассивной помехи для предложенной и известных структур автокомпенсатора показал, что для трехчастотной системы обнаружения радиосигналов точность оценивания в среднем в три раза выше, чем для системы без междуканального усреднения. Это приводит к тому, что потери в эффективности АРФ для систем обнаружения многочастотных сигналов с междуканальным усреднением достигают достаточно малых значений (< 1 дБ) уже при объеме обучающей выборки $n = 4$, в то время как для систем без междуканального усреднения такая же эффективность АРФ достигается только при большом объеме обучающей выборки $n \geq 8$.

Для предложенной системы обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК проведен анализ пороговых сигналов при различных критериях оптимизации весовых коэффициентов РФ. Установлено, что для вероятностного критерия требуется более точное оценивание доплеровской скорости пассивной помехи, чем для энергетического критерия. Однако уже при объеме обучающей выборки $n = 4$ потери в величине пороговых сигналов для АРФ с весовыми коэффициентами, оптимизированными по вероятностному критерию, по сравнению с АРФ, весовые коэффициенты которых оптимизируются по энергетическому критерию, не превышают 0,5 дБ. Проведенный анализ показывает также, что для систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК ошибки автокомпенсации доплеровской скорости пассивной помехи не приводят к существенному увеличению потерь в пороговых сигналах при минимаксной оптимизации РФ в априорном диапазоне изменения спектрально-корреляционных параметров пассивной помехи.

В четвертой главе проведено имитационное моделирование систем обнаружения многочастотных сигналов с целью проверки достоверности результатов теоретического анализа и оптимизации. Для этого использовалась универсальная математическая система MathCAD компании MathSoft, с помощью которой можно решать самые разнообразные математические задачи и оформлять результаты расчетов на высоком профессиональном уровне. Для решения задач имитационного моделирования были составлены модели пачек многочастотных сигналов и модели предложенной и известных структур систем обнаружения многочастотных сигналов. При определении вероятности ложной тревоги F использовался метод выборочных кумулянтов. В этом случае для определения значения F достаточную точность дает расчет, выполненный с помощью нулевого члена ряда Лагерра. Тогда выражение для определения значения вероятности ложной тревоги F можно представить следующим образом:

$$F = \int_{u_0}^{\infty} w(u) dV = \frac{1}{2^{\chi_2} \Gamma(\chi_1^2/\chi_2)} \int_{\sqrt{2\frac{\chi_1}{\chi_2}u_0}}^{\infty} x^{\frac{2\chi_1-1}{\chi_2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx,$$

где $\Gamma(\chi_1^2/\chi_2) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{\chi_1^2}{\chi_2}-1} dt$ – гамма-функция, χ_1 и χ_2 – оценки выборочных кумулянтов.

Вероятность правильного обнаружения определялась в соответствии с ее статистическим определением. В результате имитационного моделирования получены зависимости порогового отношения сигнал-помеха q от числа частотных каналов для системы обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ. Полученные зависимости подтверждают сделанный при теоретическом анализе вывод о том, что оптимальное число частотных каналов равно трем. При этом отличие в пороговых сигналах, соответствующих теоретическим, рассчитанным по методу собственных значений и экспериментальным характеристикам на основе метода выборочных кумулянтов, не превышает 0,2 дБ. Также получены экспериментальные зависимости порогового отношения сигнал-помеха от доплеровской фазы сигнала для различных значений ширины спектра пассивной помехи и отношения шум-помеха. Соответствие экспериментальных зависимостей теоретическим позволяет утверждать, что разработанная методика анализа адекватно отражает поведение системы обработки при изменении параметров пассивной помехи и шума. Это в свою очередь доказывает правильность результатов структурной и параметрической оптимизации систем обнаружения многочастотных сигналов по вероятностному и минимаксному критерию.

При имитационном моделировании систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК значительное расхождение теории и эксперимента наблюдается только при параметрах пассивной помехи и шума, соответствующих большим погрешностям автокомпенсации и объясняется особенностями теоретического расчета оценок максимального правдоподобия. Для значений ширины спектра пассивной помехи и шума, соответствующих малым ошибкам автокомпенсации, различие в пороговых сигналах теоретических и экспериментальных расчетов не превышает 0,5 дБ. Полученные результаты свидетельствуют о правильности теоретического анализа систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК.

Далее в главе рассмотрена возможность реализации систем обнаружения многочастотных сигналов с использованием цифровых сигнальных процессоров. В частности, рассматривается структурная схема l -го частотного канала многочастотной системы, в которой предлагается использовать процессоры семейства TMS320C620x. Применение цифровых сигнальных процессоров позволяет реализовать алгоритм обработки в виде программы, заложенной в памяти процессора, при этом имеется возможность гибкой перестройки рабочих параметров системы обработки.

В приложениях приведены: список условных обозначений, аббревиатур и сокращений; тексты программ расчета и имитационного моделирования систем обнаружения многочастотных сигналов, а также копии актов внедрения результатов, полученных в диссертационной работе.

В заключении приведены результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему.

1. Предложена общая методика анализа эффективности систем между-периодной обработки многочастотных сигналов на фоне пассивных помех, основывающаяся на методах математической статистики и теории матриц. Предложенная методика позволяет с высокой точностью рассчитывать характеристики обнаружения инвариантных как неадаптивных, так и адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов.
2. Определен критерий выбора оптимального числа частотных каналов, необходимых для практической реализации систем обнаружения многочастотных сигналов, учитывающий эффективность и сложность реализации системы обнаружения. С использованием предложенного критерия в рабочем диапазоне скоростей СУВД проведена структурная оптимизация инвариантных систем обнаружения многочастотных сигналов на основе матричных и режекторных фильтров.
3. Проведено сравнение пороговых сигналов для оптимизированных по числу частотных каналов систем обнаружения многочастотных сигналов на основе МФ и РФ при различных параметрах сигнала, пассивной помехи и шума. Определены степень сближения и различия эффективности рассмотренных типов систем.
4. Предложена методика структурной и параметрической оптимизации систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ в априорном диапазоне изменения спектрально-корреляционных параметров пассивных помех. Для заданного диапазона изменения спектрально-корреляционных параметров пассивных помех при условии минимизации максимальных потерь в пороговых сигналах определены структура и параметры системы обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ, обладающей высокой эффективностью обнаружения многочастотных сигналов на фоне пассивных помех.
5. Предложены принципы построения и определена структура автокомпенсатора доплеровской скорости многочастотных пассивных помех с междуканальным усреднением оценок. Проведен сравнительный анализ предложенной и известных структур адаптивных систем обнаружения многочастотных сигналов. Показано, что усреднение пересчитанных в каждый из трех частотных каналов оценок других каналов приводит к существенному повышению точности оценивания доплеровского сдвига фазы пассивной помехи. Это способствует тому, что для систем обнаружения многочастотных

- сигналов с междуканальным усреднением оценок доплеровской фазы пассивной помехи потери в эффективности АРФ достигают достаточно малых значений (< 1 дБ) уже при $n = 4$, в то время как для многочастотных систем без междуканального усреднения такая же эффективность АРФ достигается только при $n \geq 8$. Проведен анализ эффективности обнаружения многочастотных сигналов в зависимости от условий обнаружения сигнала и объема информации, используемой для адаптации многочастотных систем на основе РФ с АК, и различных критериев оптимизации весовых коэффициентов РФ.
6. Разработан комплекс программ для имитационного моделирования систем обнаружения многочастотных сигналов на основе РФ с АК с междуканальным усреднением оценок доплеровской скорости пассивной помехи. Проведено имитационное моделирование систем обнаружения многочастотных сигналов, подтвердившее правильность теоретического анализа и оптимизации.
 7. Рассмотрены вопросы практической реализации систем обнаружения многочастотных сигналов на основе цифровых принципов обработки радиосигнала на базе современных цифровых сигнальных процессоров.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кирьянов В. В. Анализ скоростных характеристик многочастотных систем СДЦ / Девятая международная НТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”: Тез. докл. Т. 1. М.: МЭИ, 2003. С. 94-95.
2. Кирьянов В. В. Анализ скоростных характеристик многочастотных инвариантных систем СДЦ / Методы и устройства обработки информации в радиотехнических системах: Межвуз. сб. научн. тр. Вып. 2. Рязань.: РГРТА, 2003. С. 95-98.
3. Попов Д. И., Кирьянов В. В. Оптимизация многочастотных систем инвариантной обработки сигналов / Информационные технологии в проектировании: Межвуз. сб. научн. тр. Рязань: РГРТА, 2004. С. 47-51.
4. Кирьянов В. В. Выбор числа каналов многочастотных систем векторной обработки сигналов / Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: Межвуз. сб. научн. тр. / Под ред. Ю. Н. Паршина. Рязань: РГРТА, 2004. С. 58-63.
5. Кирьянов В. В. Анализ многочастотных систем СДЦ / Десятая международная НТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”: Тез. докл. Т. 1. М.: МЭИ, 2004. С. 96-97.
6. Кирьянов В. В. Математический метод анализа многочастотных систем / 9-я всероссийская НТК студентов, молодых ученых и специалистов “Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании”: Тез. докл. Рязань: РГРТА, 2004. С. 61-63.

7. Кирьянов В.В. Оптимизация систем обработки многочастотных сигналов / Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 13-й международной НТК. Рязань: РГРТА, 2004. С. 75-77.
8. Попов Д. И., Кирьянов В. В. Анализ и оптимизация систем обработки многочастотных сигналов // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 2005. №9. С. 32-40.
9. Кирьянов В. В. Оптимизация многочастотных систем с частичной адаптацией / Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 13-й международной НТК. Рязань: РГРТА, 2004. С. 73-75.
10. Кирьянов В. В. Многочастотные системы СДЦ с частичной адаптацией / 10-я всероссийская НТК студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании": Тез. докл. Рязань: РГРТА, 2005. С. 42-43.
11. Кирьянов В. В. Оптимизация многочастотных адаптивных режекторных фильтров / 12-я всероссийская межвузовская НТК студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика": Тез. докл. М: МИЭТ, 2005. С. 309.

Кирьянов Владимир Владимирович

**Анализ и оптимизация систем обнаружения многочастотных
когерентно-импульсных сигналов на фоне коррелированных помех**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.07.2006 г. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

ООО Копировально-сервисный центр «Интермета»

390000, Рязань, ул. Каляева, 5.