

На правах рукописи
УДК 621.396.96;
621.37 (075.5)



Ву Туан Ань

**ЭФФЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ
НА ФОНЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРОВ
МНОГОКАНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения
Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель – д.т.н., профессор Кошелев Виталий Иванович

Официальные оппоненты – д.т.н., доцент Ключко Владимир Константинович

– к.т.н., доцент Филатов Александр Дмитриевич

Ведущая организация – ЗАО «Рязанская радиоэлектронная компания»,
г. Рязань

Защита состоится 16 мая 2008 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



А. Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из наиболее актуальных радиотехнических проблем является частотная селекция сигналов на фоне узкополосных помех, создаваемых интенсивными мешающими источниками сигналов, например эхо-сигналами отраженных от неподвижных либо медленно перемещающихся мешающих объектов. Такие задачи характерны для многих радиотехнических приложений и, в частности, для радиолокационных задач обнаружения сигналов движущихся целей при наличии на входе приемника РЛС пассивных помех. Мощность помех обычно значительно (на десятки децибел) превышает мощность полезного сигнала. Среди известных методов селекции движущихся целей (СДЦ) наиболее эффективным является частотный метод, основанный на использовании различий спектрально-корреляционных характеристик полезных сигналов, отраженных от движущихся целей и неподвижных помех. Традиционно режекция коррелированных помех осуществляется в одноканальных линейных фильтрах КИХ– или БИХ– структуры. Однако операция одноканальной режекции помех приводит к значительным потерям в отношении сигнал-шум по сравнению с операцией согласованной фильтрации. Поэтому, как правило, для обеспечения необходимых характеристик обнаружения после режекторного фильтра включают многоканальные доплеровские фильтры когерентного накопления сигналов. Кроме того, спектрально-корреляционные свойства пассивных помех априорно неизвестны, что затрудняет реализацию оптимальных систем обнаружения. Для преодоления априорной неопределенности используются системы обнаружения, адаптирующиеся к неизвестным параметрам.

Одним из способов исключения априорной неопределенности сдвига доплеровских фаз полезных сигналов, а также повышения эффективности подавления помех является использование фильтра на основе многоканальных структур. Это направление широко представлено в работах российских и зарубежных ученых, таких как Т. Murakami, R. Johnson, П.А. Бакулев, Я.Д. Ширман, В.А. Лихарев, А.П. Лукошкин и др. Широко известны работы по режекции помех научных коллективов кафедры радиолокации МАИ (технический университет) и кафедры радиотехнических систем РГРТУ.

В настоящее время задачи построения и исследования фильтров многоканальных структур решены далеко не полностью. Поэтому тема диссертации, связанная с повышением эффективности выделения сигналов на фоне узкополосных помех в фильтрах многоканальной структуры, является актуальной.

Цель работы

Основной целью работы является синтез и анализ режекторных фильтров на основе многоканальных структур, обеспечивающих эффективное подавление коррелированной помехи в условиях параметрической априорной

неопределённости сигналов и помех.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

- 1) синтезировать многоканальные режекторные фильтры (МРФ);
- 2) провести анализ предельной эффективности синтезированных МРФ и определить области их целесообразного применения;
- 3) разработать алгоритмы структурного синтеза МРФ, включающие оптимизацию числа частотных каналов и их оптимальную расстановку;
- 4) разработать вычислительные процедуры синтеза неадаптивного МРФ, не требующего оценок параметров помех;
- 5) проанализировать рекуррентные методы оценивания коэффициентов прямой и обратной корреляционной матрицы узкополосных процессов с целью их использования для адаптации МРФ;
- 6) синтезировать и проанализировать эффективность неадаптивной и адаптивной каскадно-многоканальной структуры системы обработки;
- 7) исследовать применение специализированных алгоритмов (алгоритма Герцеля) в многоканальной структуре системы обработки для уменьшения числа вычислительных операций;
- 8) рассмотреть пример реализации МРФ подавления коррелированных помех на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Методы анализа

В работе использовались методы статистической радиотехники, математической статистики, матричного исчисления, численные методы вычислительной математики, параметрического моделирования случайных процессов. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты.

1. Многоканальный режекторный фильтр обеспечивает более высокий коэффициент улучшения отношения сигнал-(помеха+шум) чем одноканальный режекторный фильтр (выигрыш составляет до 8 дБ при доплеровской фазе сигнала $\varphi_c=0,5\pi$) и многоканальный накопитель (выигрыш составляет до 19,5 дБ при $\varphi_c=0,4\pi$), при этом выигрыш по сравнению с многоканальным накопителем достигается при вдвое меньшем числе доплеровских каналов.
2. Система обработки, синтезированная по принципу минимакса, приближается по эффективности к системе с известными параметрами, уступая ей не более 3 дБ.
3. Рекуррентный метод адаптивного многоканального фильтра позволяет приблизиться к эффективности оптимальной системы при объеме обучающей выборки $m \geq 20$.
4. Каскадно-многоканальная структура обработки, включающая многоканальный режекторный фильтр и многоканальный накопитель, обеспечивает наибольшую эффективность в классе рассматриваемых многоканальных

структур, выигрыш относительно как многоканального режекторного фильтра, так и системы «одноканальный режекторный фильтр - многоканальный накопитель» составляет более 5 дБ.

Научная новизна

В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

- синтезирован МРФ, базирующийся на определении собственных значений и собственного вектора функциональных преобразований корреляционной матрицы помехи;
- разработан алгоритм оптимизации параметров МРФ, включающий оптимальную расстановку каналов и оптимизацию их количества;
- разработана вычислительная процедура синтеза МРФ по критерию минимакса и выполнена оптимизация параметров каждого канала;
- проанализирован рекуррентный метод оценивания коэффициентов прямой и обратной корреляционной матрицы узкополосных процессов и синтезирован адаптивный МРФ;
- синтезирована каскадно-многоканальная структура обработки, оптимизированы её структура и параметры;
- разработана вычислительная процедура синтеза каскадно-многоканальной структуры обработки по критерию минимакса;
- применен алгоритм Герцеля для реализации каскадно-многоканальной структуры обработки, что позволяет уменьшить число вычислительных операций.

Научное и практическое значение

Синтезированы режекторные фильтры многоканальной структуры, позволяющие повысить эффективность выделения сигналов с априорно неизвестной частотой на фоне коррелированных помех, преодолеть априорную неопределенность параметров помех методами адаптации. Синтезированы режекторные фильтры многоканальной неадаптивной структуры по критерию минимакса, обеспечивающие высокую эффективность в условиях параметрической априорной неопределенности помех без применения адаптации.

Полученные результаты целесообразно использовать в радиотехнических системах первичной обработки сигналов для повышения эффективности выделения сигналов на фоне узкополосных помех в условиях параметрической априорной неопределенности.

Внедрение научных результатов

Результаты диссертационной работы внедрены в ЗАО «Рязанская радиоэлектронная компания», г. Рязань и в учебный процесс РГРТУ.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция "Информационные системы и технологии – ИСТ-2007", посвященная 90-летию Нижегородского государственного технического университета. Нижний Новгород, 2007.
2. VII международная научно-практическая конференция "Перспективные технологии в средствах передачи информации". Владимир, 2007.
3. VI международная научно-практическая конференция "Физика и технические приложения волновых процессов". Казань, 2007.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций, 1 статья в межвузовском сборнике научных трудов, тезисы докладов на трех конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, приложений, списка литературы из 113 источников. Диссертация содержит 145 с., в том числе 130 с. основного текста, 11 таблиц и 49 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы; определены цель и решаемые в работе задачи; сформулированы общие и частные проблемы, требующие решения в рамках поставленных задач. Определены научно-практические цели работы, приведены сведения о публикациях и апробации; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор научно-технических источников, показана актуальность задачи селекции движущихся целей на фоне коррелированных помех, сформулирована цель работы и освещено состояние вопроса, являющегося предметом исследования. Обоснованы преимущества применения фильтров многоканальной структуры в условиях априорной неопределенности параметров сигналов и помех.

Рассмотрены проблемы подавления узкополосных помех в радиотехнических системах. Показало, что среди известных методов СДЦ наиболее эффективным является частотный метод, основанный на использовании различий спектрально-корреляционных характеристик полезных сигналов, отраженных от движущихся целей и неподвижных помех.

Проводится обзор алгоритмов оптимизации устройств межпериодной обработки сигналов на фоне помех. В качестве критерия оптимизации весового вектора целесообразно использовать критерий максимизации коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум), усредненного по множеству возможных доплеровских фаз сигнала.

Далее рассматривается проблема априорной неопределенности сигналов и помех и методы ее разрешения. Преодоление априорной неопределенности сигналов, связанной с неизвестным параметром его доплеровского сдвига фаз достигается путем построения многоканального режекторного

фильтра. Для реализации алгоритма МРФ весь интервал возможного изменения доплеровского смещения частоты (фазы) сигнала разбивают на L подынтервалов (каналов) и используют обнаружитель в каждом частотном канале. При числе каналов $L \rightarrow \infty$ эффективность многоканальной системы обнаружения стремится к эффективности системы обнаружения, работающей в условиях известных параметров. Отличительной особенностью данного подхода является то, что вводится многоканальность режекторного фильтра по доплеровскому сдвигу фаз сигнала.

Системы, в которых подавление пассивной помехи осуществляется с помощью неадаптивных РФ, можно применять в случае, когда априори известны 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 методы синтеза систем обработки сигналов на основе адаптивных режекторных фильтров (АРФ) и адаптивных многоканальных режекторных фильтров (АМРФ).

При анализе известных адаптивных систем обработки сигналов существенным недостатком является трудность, связанная с оцениванием и обращением корреляционной матрицы помех. Для преодоления этой трудности в рамках МРФ исследовано применение рекуррентного метода, позволяющего упростить трудоемкие операции при обращении корреляционной матрицы.

Показано, что в известных работах не полностью решены задачи анализа и оптимизации параметров МРФ, а проблемы накопления сигналов на фоне остаток помех в МРФ практически не рассмотрены. Кроме этого в известных работах задача адаптивной многоканальной режекции помех также не решена.

В связи с вышеизложенным, в следующих главах диссертации рассматриваются вопросы синтеза, анализа, структурной и параметрической оптимизации систем обнаружения многоканальной структуры.

Во второй главе рассматриваются вопросы синтеза, анализа и оптимизации МРФ при неограниченном увеличении числа каналов, при равномерной расстановке конечного числа каналов и при неэквидистантной расстановке каналов. Проведен сравнительный анализ эффективности МРФ с одноканальным режекторным (РФ) и многоканальным когерентным накопителем (МН) по энергетическому критерию коэффициента подавления помех.

Неопределенность фазы φ_c сигнала разрешается переходом к многоканальному построению фильтра. Используем для обнаружения сигнала, представляющего собой пачку импульсов с неизвестной доплеровской частотой, МРФ с матрицей обработки $\mathbf{W} = \{\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_l, \dots, \mathbf{W}_L\}$, где \mathbf{W}_l – вектор-столбец, образованный столбцом матрицы \mathbf{W} с номером l , $l = [1, L]$. Условием формирования \mathbf{W}_l в каждом канале является совпадение центра фазовой настрайки зоны режекции во всех каналах с межпериодным сдвигом фазы по-

мехи φ_n . При этом параметры формы амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) канальных фильтров будет зависеть от взаимного расположения спектров сигнала и помехи.

Полагая φ_c равновероятной в пределах полосы любого доплеровского канала, оптимальные векторы весовых коэффициентов МРФ определяются из условия максимума среднего коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум) в l -м канале:

$$\bar{\mu}_l = \frac{1}{\Delta\psi_l} \int_{\psi_l - \Delta\psi_l/2}^{\psi_l + \Delta\psi_l/2} \mu_l d\varphi_c = \frac{1}{\Delta\psi_l} \int_{\psi_l - \Delta\psi_l/2}^{\psi_l + \Delta\psi_l/2} \frac{\mathbf{w}_l^H \mathbf{R}_c \mathbf{w}_l}{\mathbf{w}_l^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{w}_l} d\varphi_c = \frac{\mathbf{w}_l^H \mathbf{r}_c \mathbf{w}_l}{\mathbf{w}_l^H \mathbf{r}_{\text{пш}} \mathbf{w}_l} \rightarrow \max_{\mathbf{w}_l}, \quad (1)$$

где \mathbf{R}_c , $\mathbf{R}_{\text{пш}} = \mathbf{R}_n + \lambda \mathbf{I}$ – нормированные корреляционные матрицы сигнала и смеси (помеха+шум), λ – отношение шум-помеха, \mathbf{I} – единичная матрица; ψ_l , $\Delta\psi_l$ – соответственно положения центров настройки l -го канала и его ширина.

Решением (1) является собственный вектор матрицы $\mathbf{r}_{\text{пш}}^{-1} \mathbf{r}_c$, соответствующий её максимальному собственному значению.

Исследования показали, что эффективность МРФ значительно превосходит РФ и МН. Максимальный выигрыш МРФ относительно РФ при порядке $N=10$, $\Delta F_n T=0,1$ и фазе $\varphi_c = \pm 0,5\pi$ составляет 8 дБ, а относительно МН 19,5 дБ. Получаемые результаты показывают, что целесообразность применения МРФ возрастает при сужении спектра флуктуаций помех и при возрастании уровня некоррелированных шумов. Например, при $\Delta F_n T > 0,15$ и малом ($\lambda = -60$ дБ) уровне шума МРФ и РФ имеют сравнимые характеристики, но с увеличением шума до $\lambda = -20$ дБ средний по всему диапазону значений φ_c выигрыш возрастает до $\sim 4,8$ дБ.

Как отмечалось ранее, эффективность МРФ значительно превосходит РФ, однако аппаратные затраты на реализацию МРФ увеличиваются в L раз по сравнению с РФ. Для уменьшения аппаратных затрат возможно уменьшить число каналов. Для этого учтем потери МРФ относительно РФ с бесконечно возрастающим числом каналов. Исследования показали, что при $L \geq 8$ потери в эффективности МРФ пренебрежимо малы. Например, при $\lambda = -40$ дБ и числе каналов $L=8$, потери эффективности МРФ не превышают 0,1 дБ.

Очевидно, величина μ принимает различные значения в зависимости от межпериодного доплеровского сдвига фазы сигнала φ_c в пределах интервала изменения $\varphi_c = [0, 2\pi]$. И хотя в общем случае эти фильтры имеют комплексные весовые коэффициенты, при скомпенсированной частоте (фазе) помехи $\varphi_n = 0$ они становятся действительными, а их амплитудно-частотные характеристики являются симметричными относительно $\varphi_n = 0$. Это дополнительно сокращает число каналов L МРФ в два раза. При этом зависимость

$\mu(\varphi_c)$ имеет четную симметрию относительно $\varphi_c=\pi$.

На рисунке 1 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для МРФ и МН порядка $N=10$, полученные при следующих параметрах: $\Delta F_n T=0,1$; $\Delta F_c T=0,015$. АЧХ на рисунке 1, а соответствуют каналу, настроенному на $\psi_l = 0,5\pi$. На этом же рисунке приведена АЧХ одноканального РФ. АЧХ на рисунке 1, б соответствуют каналу, настроенному на $\psi_l = 0,75\pi$.

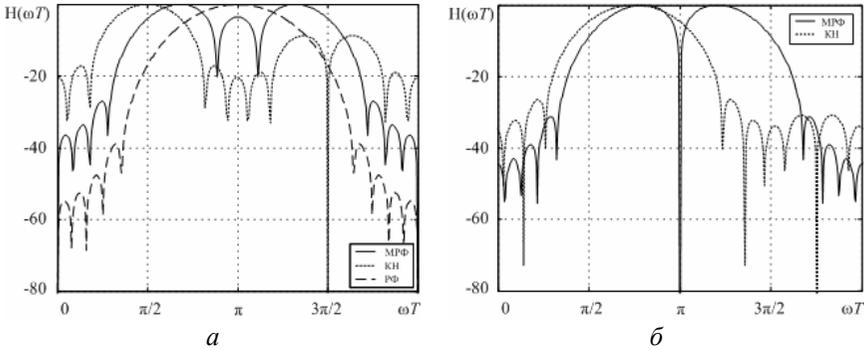


Рисунок 1 – Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Из анализа рисунка 1 можно сделать вывод о том, что АЧХ каналов МРФ симметричны как относительно значения $\varphi=\omega T=0$, так и относительно значения $\omega T=\pi$, что вдвое уменьшает число каналов МРФ по сравнению с МН, различающим знак доплеровской фазы сигнала. Заметим, что АЧХ МН в любом канале симметрична относительно значений ожидаемой доплеровской фазы сигнала $\omega T=\varphi_c=\psi_l$ и $\omega T=\varphi_c=\pi+\psi_l$. Из рисунка 1 также видно, что АЧХ РФ имеет наиболее узкую полосу пропускания при большей глубине зоны режекции по сравнению с МРФ и МН.

К основным параметрам МРФ, определяющим его структуру, будем относить число каналов и их расстановку по частотному диапазону, т.е. ширину доплеровских каналов (понятие ширины имеет условный смысл в силу отмеченных выше особенностей АЧХ МРФ). При разбиении интервала φ_c на L каналов с различной шириной, центры настройки каналов определяются из рекуррентного уравнения $\psi_{l+1} = \psi_l + \Delta\psi_l/2 + \Delta\psi_{l+1}/2$ ($\Delta\psi_l$ – ширина l -го канала).

Критерий для определения минимального числа каналов следует из условия:

$$\Delta\mu_L = \overline{\mu_{opt}} - \overline{\mu_L} \leq \Delta\mu_{доп}, \quad (2)$$

где $\Delta\mu_L$ – потери коэффициента улучшения при числе каналов равном L ; $\Delta\mu_{\text{доп}}$ – максимально допустимые потери; $\overline{\mu_{\text{опт}}}$ – усредненное отношение сигнал-(помеха+шум) по всему диапазону доплеровской фазы при числе L каналов, стремящихся к бесконечности, а μ_L – при числе каналов равном L .

Исследования показали, что МРФ с оптимальной расстановкой каналов имеет меньшие потери $\Delta\mu_L$ коэффициента улучшения по сравнению с МРФ при равномерной расстановке каналов (потери уменьшаются на 2 дБ при одинаковом числе каналов $L=5$). Поэтому неравномерная расстановка каналов позволяет уменьшить общие потери при $L = \text{const}$ или сократить необходимое число каналов при фиксированных суммарных потерях $\Delta\mu_{\text{доп}} = \text{const}$.

При многоканальном обнаружении в L -мерном пространстве соответствующие вероятности ложной тревоги определяются как $F_l = F/L$, где $l = 1 \dots L$ (в этом случае для упрощения предлагается $F_1 = F_2 = \dots = F_L$).

Положим, что вероятность ложной тревоги системы F и величина входного отношения сигнал-помеха q являются постоянными величинами. Тогда вероятность правильного обнаружения в каждом канале при гауссовской статистике сигнала, шума, помех является функцией от энергетического критерия – коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха + шум) $D_l = D(\mu_l) = F_l^{1/(1+q\mu_l)}$. Среднее значение величины правильного обнаружения в диапазоне значений $\varphi_c = (-\pi, +\pi)$ принимает следующий вид:

$$\overline{D}_L = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D_L(\varphi_c) d\varphi_c = \frac{1}{2\pi} \sum_{l=1}^L \int_{\psi_l - \Delta\psi_l/2}^{\psi_l + \Delta\psi_l/2} D_l d\varphi_c = \frac{1}{2\pi} \sum_{l=1}^L \int_{\psi_l - \Delta\psi_l/2}^{\psi_l + \Delta\psi_l/2} F_l^{1/(1+q\mu_l)} d\varphi_c. \quad (3)$$

Для вычисления значения усредненной величины правильного обнаружения использовались два метода:

- вычисление значения \overline{D}_L с настройками каналов, алгоритм вычисления которых приведен выше и основан на критерии максимума значения усредненного коэффициента улучшения.

$$\overline{\mu}_L \rightarrow \max_{\mathbf{w}_{l,j=1,L}} , \quad (4)$$

- вычисление значения \overline{D}_L с настройками каналов, алгоритм вычисления которых основан на критерии максимума значения усредненной вероятности правильного обнаружения.

$$\overline{D}_L \rightarrow \max_{\mathbf{w}_{l,j=1,L}} , \quad (5)$$

На рисунке 2 приведены зависимости средних значений вероятности

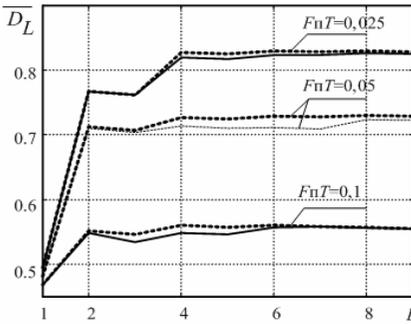


Рисунок 2 – Зависимости \bar{D}_L от L

правильного обнаружения \bar{D}_L от числа каналов L при $F = 10^{-4}$; $q = -40$ дБ; $\Delta F_c T = 0,015$; $\lambda = -60$ дБ; $N = 10$ и различной ширине спектра флуктуаций помехи $\Delta F_{пT}$. Пунктирные кривые соответствуют критерию (5), а сплошные кривые – критерию (4). Приведенные результаты показывают, что значения усредненной вероятности правильного обнаружения при настройках каналов, определенных по критерию (5), превышают ее значения

по сравнению с настройкой каналов в соответствии с критерием (4). В обоих случаях число каналов принято одинаковым $L=4$.

В третьей главе рассматриваются вопросы синтеза и анализа МРФ при неизвестных параметрах узкополосных помех, в частности, синтез и анализ МРФ по критерию минимакса, синтез и анализ АРФ, АМРФ на основе применения рекуррентного метода.

Синтез на основе адаптивного байесовского подхода предполагает замену в (1) неизвестных параметров \mathbf{R}_c , $\mathbf{R}_п$ оценками их максимального правдоподобия. Препятствиями на пути реализации являются сложность получаемых при этом алгоритмов оценки $\hat{\mathbf{R}}_п$, принципиальная трудность оценки $\hat{\mathbf{R}}_c$ ввиду малого отношения сигнал-помеха и необходимость проведения сложных расчетов для определения оптимального вектора \mathbf{W} . Задача существенно упрощается при использовании параметрического описания матрицы помех $\mathbf{r}_{пм} = f(\gamma)$, где γ – параметр, характеризующий помеху (например, $\gamma = \Delta F_{пT} \in \Gamma = [0,01 \dots 0,19]$ – относительная ширина спектра флуктуаций помехи) и переходе к неадаптивному варианту построения МРФ. Более полно использовать возможности оптимизации позволяет критерий минимакса, не требующий к тому же введения вероятностной меры $P(\gamma)$. Целесообразно применять его к величине $\Delta \mu_l = \bar{\mu}_l(\gamma, \mathbf{W}) - \bar{\mu}_l'(\gamma, \mathbf{W}')$, дБ, где $\bar{\mu}_l(\gamma, \mathbf{W})$ соответствует оптимизации МРФ при текущем значении γ ; $\bar{\mu}_l'(\gamma, \mathbf{W}')$ соответствует оптимизации МРФ при $\gamma = \gamma'$. Значение $\bar{\gamma}' \in \Gamma$ выбирается из условия

$$\min_{\gamma' \in \Gamma} \max_{\gamma \in \Gamma} \Delta \mu_l \leq \max_{\gamma \in \Gamma} \Delta \mu_l \quad (6)$$

для всех $\gamma \in \Gamma$.

На рисунке 3 показана зависимость усредненного коэффициента улучшения в каждом канале $\bar{\mu}_l$ от сдвига доплеровской фазы φ_c . При этом число

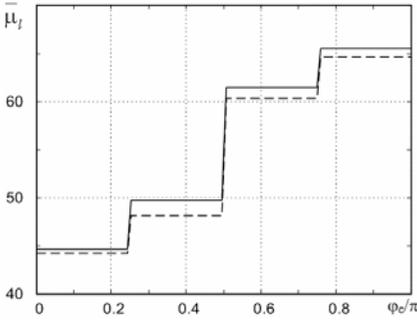


Рисунок 3 – Зависимость $\bar{\mu}_l$ от φ_c

импульсов $N=10$; $\lambda=10^{-6}$; $L=4$. Пунктирные кривые соответствуют эффективности системы, синтезированной по принципу минимакса, а сплошные кривые – системы с известными параметрами $\Delta F_n T=0,1$. Сравнение зависимостей показывает, что во всем диапазоне изменения φ_c система, синтезированная по принципу минимакса, уступает системе с известными параметрами не более 3 дБ.

Для повышения эффективности МРФ можно оптимизировать также ширину каналов по критерию

$$\bar{\mu} = \frac{1}{L} \sum_1^L [\bar{\mu}_l'(\gamma, \mathbf{W}')] \Delta \psi_l \rightarrow \max_{\Delta \psi_{l,l=1,L}} \quad (7)$$

В ряде задач оптимальной фильтрации сигналов на фоне помех необходимо производить вычисление весовых коэффициентов режекторного

фильтра (РФ) на основе обратной корреляционной матрицы помех $\hat{\mathbf{R}}_n^{-1}$. Ее вычисление возможно при использовании различных алгоритмов, что, однако, требует применения трудоемких вычислительных операций. В некоторой степени преодолеть эту проблему позволяет применение рекуррентной процедуры оценки. На m -м шаге для матрицы $\hat{\mathbf{R}}_n^{-1}$ справедливо следующее выражение:

$$\hat{\mathbf{R}}_m^{-1} = a_k \left[\hat{\mathbf{R}}_{m-1}^{-1} - \frac{b_k (\hat{\mathbf{R}}_{m-1}^{-1} \mathbf{X}_m) (\hat{\mathbf{R}}_{m-1}^{-1} \mathbf{X}_m^H)^H}{1 + b_k (\mathbf{X}_m^H \hat{\mathbf{R}}_{m-1}^{-1} \mathbf{X}_m)} \right], \quad (8)$$

где \mathbf{X}_m – последовательность сигнала на входе фильтра; a_k, b_k – некоторые весовые коэффициенты.

В качестве начального условия (нулевого приближения) при оценках $\hat{\mathbf{R}}_0^{-1}$ целесообразно принять диагональную матрицу белого шума.

Синтез адаптивного многоканального режекторного фильтра (АМРФ) подразумевает оптимизацию вектора весовых коэффициентов в каждом канале и разумное ограничение общего числа частотных каналов. При этом критерий синтеза l -го канала соответствует (1). В связи с трудностью операции обращения корреляционной матрицы помех используется рекуррентная про-

цедура (8). Учитывая слабую зависимость эффективности системы от вида матрицы \mathbf{R}_c , эта матрица задается априорно. Устройство, основанное на данном алгоритме, заявлено для патентования (заявка № 2007147089).

Для оценки точности вычисления коэффициента улучшения при применении рекуррентного метода используется значение отклонения (ошибки) $\Delta\mu_o = \bar{\mu}_p - \bar{\mu}_s$, где $\bar{\mu}_p$ – усредненное значение коэффициента улучшения по всем возможным значениям φ_c АМРФ, вычисляемое по рекуррентному методу; $\bar{\mu}_s$ – усредненное значение коэффициента улучшения АМРФ, вычисляемое моделированием.

На рисунке 4 показана зависимость значения $\Delta\mu_o$ от объема обучающей выборки m при различном числе каналов. При этом размерность корреляционной матрицы принята равной 10×10 , $\Delta F_n T = 0,1$; $\Delta F_c T = 0,015$ и $\lambda = -60$ дБ. Из анализа рисунка 4 видно, что при увеличении объема обучающей выборки m ошибка $\Delta\mu_o$ уменьшается и при $m \geq 20$ результаты мало изменяются. При этом эффективность АМРФ приближается к эффективности фильтра при точно известных параметрах помехи.

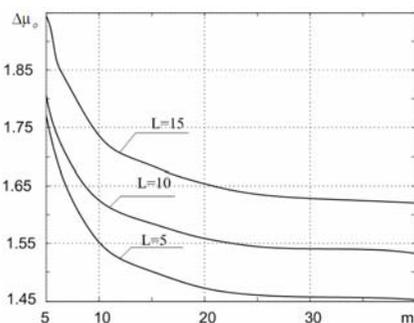


Рисунок 4 – Зависимость $\Delta\mu_o$ от объема обучающей выборки m

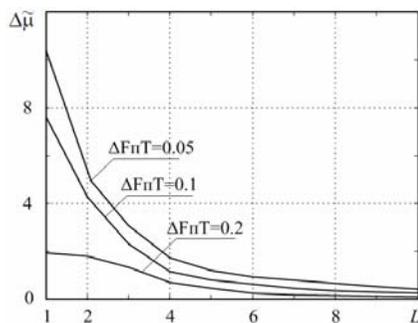


Рисунок 5 – Зависимость значения $\Delta\tilde{\mu}$ от L

Кривые средних потерь эффективности $\Delta\tilde{\mu}$ оптимального АМРФ в зависимости от числа каналов L и ширины спектра помехи приведены на рисунке 5. При этом объем обучающей выборки $m=20$, $\Delta F_c T = 0,015$, $\lambda = -30$ дБ.

Из анализа рисунка 5 видно, что потери $\Delta\tilde{\mu}$ значительно уменьшаются при увеличении числа каналов до 6 и слабо уменьшаются при числе каналов $L > 6$, при этом потери $\Delta\tilde{\mu}$ мало зависят от ширины спектра помехи.

В четвертой главе рассмотрены вопросы синтеза и анализа каскадно-многоканальной структуры алгоритма обработки радиолокационных сигналов на фоне узкополосных помех.

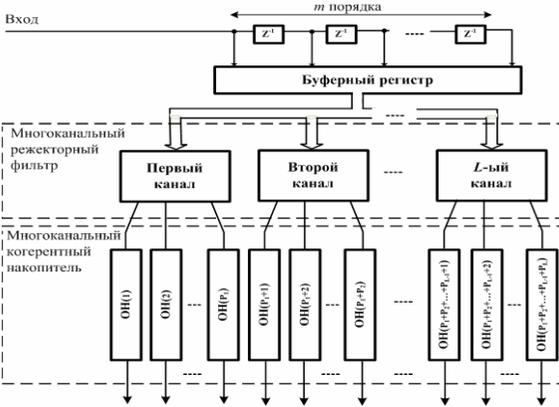


Рисунок 6 – Каскадно-многоканальная структура алгоритма обработки сигналов

Каскадно - многоканальная структура алгоритма обработки радиолокационных сигналов на основе комбинации МРФ и многоканального когерентного накопителя (МН) приведена на рисунке 6 и включает L одноканальных РФ, отличающихся выбором значений коэффициентов, выходной сигнал каждого из каналов МРФ поступает на вход группы каналов МН.

Общий для l -го канала с порядком m , режекторный фильтр характеризуем вектором обработки $\mathbf{G}_l = [G_1^l \dots G_m^l]^T$, где $G_k^l = g^l \exp(ik\varphi_l)$, $k=1 \dots m$. Остатки режекции поступают на МН $_l$, характеризуемый $(N-m)$ - мерным комплексным вектором коэффициентов импульсной характеристики $\mathbf{h}_r = [\dot{h}_r^1, \dot{h}_r^2, \dots, \dot{h}_r^{N-m}]^T$, $\dot{h}_r^k = h_r^k e^{ik\theta_r}$, где $r = [0 \dots R]$, $R = \sum_{i=1}^L P_i$, N – число импульсов в пачке, θ_r определяет настройку фильтра на доплеровскую фазу сигнала.

В работе использован метод последовательной оптимизации параметров МРФ и МН.

Вектор обработки \mathbf{G}_l в каждом канале должен соответствовать критерию максимума среднего в пределах канала отношения сигнал-(помеха+шум):

$$\bar{\gamma}_l = \frac{1}{\Delta\Psi_l} \int_{\Psi_l - \Delta\Psi_l/2}^{\Psi_l + \Delta\Psi_l/2} \gamma_l d\varphi_c = \frac{\mathbf{G}_l^H \mathbf{R}_c \mathbf{G}_l}{\mathbf{G}_l^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{G}_l} \rightarrow \max_{\mathbf{G}_l}, \quad (9)$$

где $\gamma_l = (\mathbf{G}_l^H \mathbf{R}_c \mathbf{G}_l) / (\mathbf{G}_l^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{G}_l)$, все матрицы имеют размерность $m \times m$.

Обработку входного процесса в МРФ удобно характеризовать N -мерной квадратной матрицей режекции \mathbf{D} , элементы которой $D_{jk} = G_{j-k}$ при $k \leq j \leq \min(n, m+k)$ и $D_{jk} = 0$ в противном случае. Для учета сокращения обрабатываемой выборки на выходе МРФ с целью исключения переходного процесса введем N -мерный вектор-столбец $H_r^k = 0$ при $1 \leq k \leq m$; $H_r^k = h_r^{k-m} e^{i(k-m)\theta_r}$ при $m < k \leq N$.

Будем характеризовать эффективность обработки сигнала на фоне помех в одноканальном накопителе $\text{OH}(r)$ коэффициентом улучшения отношения сигнал-(помеха+шум), который имеет следующий вид:

$$\mu_r = \frac{\mathbf{H}_r^{T*} \mathbf{D}_l^{T*} \mathbf{R}_c \mathbf{D}_l \mathbf{H}_r}{\mathbf{H}_r^{T*} \mathbf{D}_l^{T*} \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{D}_l \mathbf{H}_r}. \quad (10)$$

Здесь векторы и матрицы, в отличие от рассмотренных ранее выражений, являются N -мерными. Критерий синтеза OH представляется в следующем виде:

$$\bar{\mu}_r = \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\eta_r - \Delta\eta/2}^{\eta_r + \Delta\eta/2} \mu_r d\varphi_c \rightarrow \max_{\mathbf{H}_r}, \quad (11)$$

где $\eta_r, \Delta\eta$ – центральная настройка и ширина канала $\text{OH}(r)$.

Для повышения эффективности нужно найти оптимальные параметры m и L .

На рисунке 7 показана зависимость коэффициента μ улучшения комбинированной системы от доплеровского сдвига фазы сигналов φ_c при $\eta_r = \varphi_c$, $N=12$; $\Delta F_{\text{п}} T = 0,1$; $\Delta F_c T = 0,01$; $\lambda = -60$ дБ. По критерию максимума усредненного коэффициента улучшение $\bar{\mu} \rightarrow \max$ при числе каналов $L = 1$ оптимальный порядок МРФ $m_{\text{опт}} = 6$, а при числе каналов $L=5$ – $m_{\text{опт}} = 7$. Пунктирная кривая соответствует одному каналу МРФ $L = 1$, а сплошные кривые – $L = 5$. При значении $m=0$ алгоритм обработки включает только МН, а при $m=11$ – МРФ. Из анализа рисунка 7 видно, что рассматриваемая комбинированная система обработки превосходит системы, использующие только МРФ или только МН.

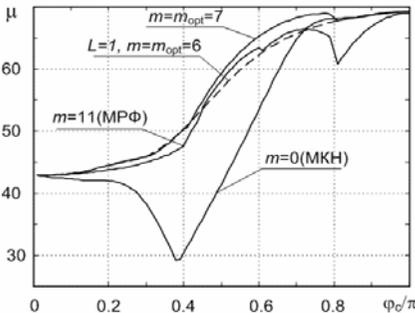


Рисунок 7 – Зависимость μ от φ_c при $\varphi_c = \pm(0,42\pi \dots 0,8\pi)$.

Её максимальный выигрыш относительно МН составляет более 20 дБ, а относительно МРФ – более 5 дБ. Рисунок 7 показывает, что эффективность комбинированной системы заметно повышается при увеличении числа каналов. Её максимальный выигрыш при числе каналов $L = 5$, порядке $m = m_{\text{опт}} = 7$ относительно случая $L = 1$ и $m = m_{\text{опт}} = 6$ составляет 3 дБ. Наибольший выигрыш наблюдается

Как отмечалось ранее, синтез на основе адаптивного байесовского подхода предполагает замену неизвестных параметров $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}_n$ их оценками максимального правдоподобия. В связи со сложностью процесса вычисления оценок $\hat{\mathbf{R}}_n$ и $\hat{\mathbf{R}}_c$ при определении оптимального вектора \mathbf{G}, \mathbf{H} можно использовать критерий минимакса. Целесообразно применить его к величине

$\Delta\bar{\mu}_r = \bar{\mu}_r(\gamma, \mathbf{G}, \mathbf{H}) - \bar{\mu}_r'(\gamma, \mathbf{G}', \mathbf{H}')$, дБ, где γ – параметр, характеризующий помеху; $\bar{\mu}_r(\gamma, \mathbf{G}, \mathbf{H})$ соответствует оптимизации МРФ при текущем значении γ ; $\bar{\mu}_r'(\gamma, \mathbf{G}', \mathbf{H}')$ соответствует оптимизации МРФ при $\gamma=\gamma'$. Значение $\gamma' \in \Gamma$ выбирается из условия

$$\min_{\gamma' \in \Gamma} \max_{\gamma \in \Gamma} \Delta\bar{\mu}_r \leq \max_{\gamma \in \Gamma} \Delta\bar{\mu}_r \quad (12)$$

для всех $\gamma \in \Gamma$.

На рисунке 8 показана зависимость коэффициента улучшения $\bar{\mu}_i$ от

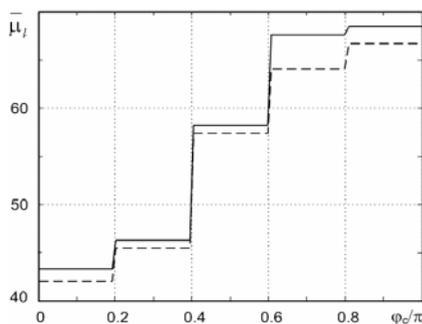


Рисунок 8 – Зависимость $\bar{\mu}_i$ от φ_c

сдвига доплеровской фазы φ_c . При этом число импульсов $N=12$; $m=7$; $L=5$; $\Delta F_c T=0,01$; $\Delta F_n T=0,01$; $\lambda=-60$ дБ. Пунктирные кривые соответствуют эффективности системы, синтезированной по принципу минимакса, а сплошные кривые – системе с известными параметрами. Сравнение зависимостей показывает, что во всем диапазоне изменения φ_c система, синтезированная по принципу минимакса, уступает системе с известными параметрами не более 4 дБ.

При использовании для реализации МН алгоритма БПФ число доплеровских каналов равно числу импульсов в пачке и может достигать нескольких сотен и даже тысяч. В некоторых задачах не требуется такой подробный анализ спектра доплеровских частот. Поэтому применение алгоритма БПФ становится избыточным. Представляет интерес реализация МН, при которой число каналов скорости не связано жестко с числом импульсов пачки. К таким алгоритмам наряду с ДПФ относится алгоритм Герцеля. Число умножений для него приблизительно в $\log_2 K$ раз меньше по сравнению с БПФ (где K – порядок фильтра МН) и вдвое меньше по сравнению с ДПФ.

В пятой главе решаются задачи применения многоканальных структур в системах первичной обработки и обнаружении сигналов на примере гипотетической РЛС управления воздушным движением (УВД); оценки вычислительных затрат при реализации многоканальных структур; реализации МРФ на современной элементной базе (ПЛИС).

Исследования показали, что выигрыш при применении многоканальных режекторных фильтров в РЛС УВД с типовыми техническими параметрами составляет 3 дБ при числе каналов МРФ $L=2$ и 7 дБ при числе каналов $L=5$. Применение МРФ позволяет повысить возможности РЛС по выделению сигналов на фоне помех или снизить требования к другим дорогостоящим устройствам РЛС.

В качестве элементной базы для реализации многоканального режекторного фильтра, которую целесообразно использовать на практике, применена ПЛИС XC4VL25. При следующих параметрах многоканального режекторного фильтра: числе каналов $L=5$, числе импульсов в пачке $N=17$, разрядности АЦП $v=8$, длительности импульса 1 мкс для его реализации требуются ПЗУ на 1360 бит, ОЗУ на 634576 бит. Для обработки одного кольца дальности требуется выполнять 85 операций умножения, 80 операций сложения, что вполне обеспечивается при выборе ПЛИС XC4VL25.

В заключении приведены основные результаты диссертации, которые состоят в следующем.

1. Проведен сравнительный анализ эффективности МРФ с одноканальным РФ и МН по коэффициенту подавления помех, показавший, что эффективность МРФ при ширине спектра $\Delta F_n T = 0,1$ и фазе $\varphi_c = \pm 0,5\pi$ значительно превосходит РФ (на 8 дБ) и МН (на 19,5 дБ).

2. Выработаны рекомендации, согласно которым МРФ целесообразно применять в случае помехи с шириной спектра флуктуаций $\Delta F_n T < 0,15$, а также при наличии уровня некоррелированной составляющей $\lambda > -50$ дБ.

3. Установлено, что АЧХ доплеровских каналов МРФ симметричны относительно центральной частоты спектра флуктуаций помехи, но имеют деформацию в области ожидаемого значения частоты сигнала, приводящую к повышению селективности сигнала на фоне помех по сравнению с одноканальным РФ, а по сравнению с МН МРФ имеет вдвое меньшее число доплеровских каналов, что приводит к выигрышу в аппаратных затратах.

4. Показано, что по критерию максимума вероятности правильного обнаружения сигнала оптимальное число каналов несколько меньше, чем при использовании критерия максимума коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум), что обусловлено учетом возрастания ложной тревоги при увеличении числа каналов обработки.

5. Синтезирован МРФ по критерию минимакса и определены оптимальные параметры ширины каналов, обеспечивающие эффективность, близкую к эффективности системы, синтезированной методами адаптивного байесовского подхода.

6. Синтезирован адаптивный МРФ, эффективность которого в наибольшей степени приближается к эффективности оптимальной системы при объеме обучающей выборки $m \geq 20$.

7. Предложена новая структура системы обработки сигналов на основе каскадного включения многоканальных режекторных и доплеровских фильтров, оптимизированы ее параметры и показано, что по сравнению с традиционной системой одноканальный режекторный фильтр-многоканальный накопитель она обеспечивает выигрыш в отношении сигнал-(помеха+шум) до 5 дБ.

8. Разработана каскадно-многоканальная структура обработки на ос-

нове фильтра Герцеля, имеющая преимущество в $\log_2 K$ раз (где K – порядок фильтра МН) по числу вычислительных операций по отношению к алгоритму БПФ и в 2 раза по отношению к алгоритму ДПФ.

9. Показано, что при применении МРФ в типовой РЛС управления воздушным движением достигается повышение эффективности выделения сигналов, а также детализирована структура МРФ и выбраны современные аппаратурные средства ее реализации.

В приложениях приведены список аббревиатур и условных обозначений, а также документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

Список публикаций

1. Кошелев В.И., Ву Туан Ань. Оценка эффективности режекции помех на основе рекуррентного алгоритма адаптации: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. "Информационные системы и технологии – ИСТ-2007", посвящ. 90-летию Нижегородского государственного технического университета.– Нижний Новгород, 2007.–С. 7.
2. Ву Туан Ань. Синтез многоканального режекторного фильтра по критерию минимакса: тез. докл. VI междунар. науч.-практ. конф. "Физика и технические приложения волновых процессов".–Казань, 2007.–С. 39-41.
3. Ву Туан Ань. Применение рекуррентных методов адаптации режекторного фильтра: тез. докл. VII междунар. науч.-практ. конф. "Перспективные технологии в средствах передачи информации".–Владимир, 2007.–С. 200-203.
4. Ву Туан Ань. Сравнительный анализ рекуррентных методов вычисления коэффициентов корреляции узкополосных помех. // Математическое и программирование обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязан. гос. радиотехн. унив. Рязань, 2007.–С. 76-79.
5. Кошелев В.И., Ву Туан Ань. Адаптация многоканального режекторного фильтра к параметрам помех // Вестник РГРТУ.–Рязань, 2007. Вып 21.–С. 94-97.
6. Кошелев В.И., Ву Туан Ань. Оптимизация и анализ характеристик многоканального режекторного фильтра // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 1.–С. 54-56.
7. Кошелев В. И., Ву Туан Ань. Оптимизация параметров многоканальных режекторных фильтров // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2007. № 3. Т.50.–С. 47-53.
8. Кошелев В. И., Ву Туан Ань. Каскадно-многоканальная структура алгоритма обработки радиолокационных сигналов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2007. Вып. 6.–С. 46-51.

Бу Туан Ань

**ЭФФЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ
НА ФОНЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРОВ
МНОГОКАНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Отпечатано ГНУ ВНИМС,
Рязань, Щорса 38/11.
Формат бумаги 60×84 1/16.
Печатных листов 1.
Тираж 100 экз. Заказ №

апреля 2008 г.