

На правах рукописи



Нгуен Вьет Шон

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ФИЛЬТРОВ
ПОДАВЛЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ
НА ОСНОВЕ ИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем
Рязанского государственного радиотехнического университета.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент
Андреев Владимир Григорьевич.

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор
Костров Виктор Васильевич,
канд. техн. наук, доцент
Паршин Валерий Степанович.

Ведущая организация: ОАО «Корпорация Фазотрон-НИИР» НИИ
«Рассвет»,
390044, г. Рязань, ул. Костычева, 15.

Защита состоится 30 мая 2007 г. в 12 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном
радиотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань,
ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан

2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент, канд. техн. наук



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования состоит в необходимости повышения качественных показателей радиолокационных систем обработки информации. Современные высокоэффективные методы цифрового спектрального анализа и моделирования стационарных случайных процессов основаны на трудах зарубежных ученых: Р.Б. Блэкмана, Дж.В. Тьюки, Г. Дженкинса, Д. Ваттса, А. Шустера, М.С. Барлетта, М.Г. Кендалла, П.Дж. Даньелла, Дж. Берга, Дж. Картера, Р. Беллмана, Г. Эмилиани, Д. Кайзера, Р. Хэмминга, С.Л. Марпла-мл. и др. Заметный вклад внесли русские ученые: А.М. Трахтман, Л.М. Гольденберг, П.А. Бакулев, А.А. Ланнэ, Ю.Г. Сосулин, В.Ф. Писаренко, Ю.М. Коршунов, В.А. Лихарев, М.Б. Сverdлик, Ю.А. Брюханов, В.В. Витязев и др.

В теории цифрового спектрального анализа и моделирования широко известны цифровые фильтры авторегрессии (АР), скользящего среднего (СС) и авторегрессии-скользящего среднего (АРСС). Методы расчета параметров АРСС-моделей (фильтров) в установившемся режиме достаточно хорошо разработаны. Однако в известной литературе традиционные подходы к построению моделей, предназначенных для анализа эффективности функционирования систем первичной обработки эхо-сигналов, не связаны с характеристиками самих анализируемых систем. Это приводит к усложнению моделей, ориентированных на описание всех компонент процесса, в том числе и тех, которые будут заведомо подавлены системой обработки, в частности, фильтром устройства селекции движущихся целей (СДЦ).

Задачи обнаружения радиолокационных сигналов на фоне коррелированных помех методами подавления их узкополосных мешающих спектральных компонент и накопления полезных компонент спектра часто связаны с необходимостью синтеза и оптимизации режекторных и/или выбеливающих фильтров. На практике исходными данными являются лишь данные, ограниченные по объему реализации входного процесса. Вместе с тем обычно имеется плохо формализуемая априорная информация о характере спектра помех, которую можно учесть посредством аппроксимации входного процесса линейной параметрической АРСС-моделью заданной структуры.

Для оценки эффективности систем СДЦ когерентно-импульсных радиолокационных систем (РЛС) часто используются энергетические критерии. Такой подход достаточно прост и дает приемлемые результаты, но для более точной оценки эффективности систем первичной обработки сигналов целесообразно пользоваться характеристиками обнаружения, связывающими вероятности D правильного обнаружения и F ложной тревоги с энергетическими показателями. К настоящему времени известно несколько аналитических методик расчета D и F . Однако остается

неясным, какие из этих методик расчета являются предпочтительными. Кроме того, анализ D и F с помощью аналитических выражений часто затруднен необходимостью учета конкретных параметров системы обработки: частотных характеристик фильтров, разрядности их коэффициентов, погрешностей оценок параметров помех при адаптации и т.д. Это делает целесообразным использование метода имитационного моделирования, требующего построения моделей входных процессов.

Цель работы заключается в повышении качественных показателей, созданных на основе АРСС-моделей систем первичной обработки сигналов за счет учета априорной информации о спектральном составе процессов путем выбора структуры и оптимизации параметров их моделей. Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи: 1) выбрать метод расчета параметров линейных моделирующих фильтров при заданных порядках их нерекурсивной и рекурсивной частей. 2) оптимизировать АР- и АРСС-модели путем решения переопределенной системы уравнений Юла-Уолкера при синтезе и анализе систем первичной обработки радиолокационных сигналов, 3) создать методику оптимизации СС-фильтров для задач моделирования радиолокационных отражений с целью исследования эффективности подавления пассивных помех в системах первичной обработки эхо-сигналов, 4) оптимизировать параметры фильтров подавления системы селекции движущихся целей, полученных на основе параметрических моделей пассивных помех.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе, основаны на статистической теории радиотехнических систем, параметрическом моделировании случайных процессов, численных методах поиска экстремума целевой функции нескольких комплексных переменных, а также дифференциальном и интегральном исчислении таких функций. Основные числовые результаты получены на основе аналитических расчетов, статистического моделирования и численных методов решений линейных систем уравнений и линейных задач о собственных значениях.

Научное и практическое значение полученных результатов состоит в совершенствовании методики расчета параметров АРСС-моделей экспериментальных данных для снижения объемов информации, характеризующей исходный процесс с заданной точностью, что достигается в результате оптимизации параметров модели по критериям среднеквадратического отклонения (СКО) и модуля максимального отклонения (ММО).

Повышение эффективности обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия коррелированных помех достигается за счет предлагаемых методов адаптации фильтров подавления коррелированных помех к их параметрам.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Процедура структурно-параметрической оптимизации моделирующих АРСС-фильтров, основанная на минимизации отличий их частотных

характеристик от контрольного спектра, дает возможность уменьшить в 2–3 раза порядки моделей при обеспечении требуемой адекватности имитации радиоотражений.

2. Алгоритм синтеза моделирующих СС-фильтров, учитывающий параметры исследуемого фильтра подавления, дает возможность сократить порядок СС-модели в 3–5 раз при обеспечении адекватной оценки эффективности функционирования исследуемой системы первичной обработки эхо-сигналов.

3. Методика синтеза выбеливающих фильтров на основе обращения передаточных функций АРСС-моделей помех обеспечивает выигрыш до 12–14 дБ в коэффициенте улучшения отношения сигнал-помеха по сравнению с неоптимизированными к априорной информации о форме спектра помехи методиками синтеза фильтров обеления.

4. Методика синтеза фильтров подавления помех, основанная на критерии максимизации усредненной по всем доплеровским скоростям сигнала вероятности D правильного обнаружения, дает возможность дополнительно увеличить величину D на 1–2 % путем численного решения задачи оптимизации.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Предложен метод выбора порядка моделей при исследовании эффективности системы первичной обработки радиолокационных сигналов.

2. На основе параметрических моделей разработан алгоритм синтеза фильтров с бесконечной импульсной характеристикой и разработана процедура оптимизации их параметров в системах СДЦ РЛС.

3. Разработан модифицированный алгоритм синтеза адаптивного фильтра подавления радиолокационных помех.

4. Разработан алгоритм исследования характеристик обнаружения систем первичной обработки РЛС с помощью параметрических моделей эхо-сигналов.

Внедрение научных результатов диссертационной работы произведено в учебный процесс РГРТУ.

Апробация работы произведена в форме научных докладов по основным результатам диссертационной работы и дискуссий, которые проходили на следующих научных конференциях: 52-й студенческой научно-технической конференции РГРТА; Международной научной конференции, посвященной 1000-летию города Казани (г. Казань, 2005 г.); 39-й научно-технической конференции РГРТА; научно-технической конференции молодых ученых «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы» (г. Рязань, 2005 г.); XI Всероссийской научно-технической конференции РГРТУ «информационные технологии» (г. Рязань, 2006 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных научных

работ, в том числе две статьи в изданиях, входящих в список ВАК, одна статья в региональной печати, две статьи в межвузовских сборниках научных трудов, шесть тезисов докладов на конференциях различного, в том числе международного уровня.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 130 наименований и четырех приложений. Диссертационная работа содержит 160 страниц, в том числе 130 страниц основного текста, 8 таблиц и 52 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновываются актуальность, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится краткий обзор видов моделей сигналов и помех, общих сведений о линейных моделях радиотехнических сигналов и методах их обработки.

Во второй главе рассматривается вопрос разработки методов параметрического спектрального анализа в задаче построения моделей радиоотражений на основе математического описания в виде АР-, СС- и АРСС-моделей. Приводятся расчеты и результаты оптимизации параметров моделирующих фильтров на основе введенных критериев СКО и ММО.

Проведен статистический анализ эхо-сигналов, была подтверждена целесообразность применения параметрических моделей для моделирования радиоотражений.

Отмечено, что определения СС-параметров (векторного $\mathbf{b}$) АРСС-модели используют приближенные линейные методы, чтобы избежать сложностей, связанных с решением нелинейных систем уравнений. Распространены два таких приближенных метода. На основе их сопоставления выработаны рекомендации по выбору одного из методов расчета $\mathbf{b}$ в конкретных ситуациях.

Метод А. На первом этапе СС-составляющая моделирующего фильтра аппроксимируется так называемой «длинной» АР-моделью большего порядка $m > 2q$. При этом предполагается, что

$$B(z) \approx 1 / A_m(z), \quad (1)$$

где $A_m(z)$ – системная функция АР-процесса, который аппроксимирует СС-процесс $B(z)$. Тогда, определив из решения модифицированных уравнений Юла-Уолкера АР-параметры a_j , можно приблизительно выразить полином $B(z)$

$$A(z)[\tilde{B}(z) / \tilde{A}(z)] \approx B(z), \quad A(z) \approx \tilde{A}(z), \quad (2)$$

где $[\tilde{B}(z) / \tilde{A}(z)]$ – «точная» системная функция рассматриваемого АРСС-процесса, представляющая собой запись экспериментальных данных. На

втором этапе оценивается корреляционная $(N-m-1) \times (N-m-1)$ -матрица $\mathbf{Z}$ процесса ошибки, как результата фильтрации входного процесса, характеризуемого корреляционной $(N \times N)$ -матрицей $\mathbf{R}$ с помощью СС-фильтра, полученного из найденной АР-част и АРСС-модели -инвертированием передаточной функции. Матрицу $\mathbf{Z}$ можно рассчитать аналитически используя выражение $\mathbf{Z} = \mathbf{A}^H \mathbf{R} \mathbf{A}$, где знак H означает транспонирование и комплексное сопряжение, $N \times (N-m-1)$ -мерная матрица $\mathbf{A}$, которая имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ a[1] & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & a[1] & \ddots & 0 \\ a[p] & \vdots & \ddots & 1 \\ 0 & a[p] & \dots & a[1] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & a[p] \end{bmatrix}.$$

Затем на основе матрицы $\mathbf{Z}$, сформированной инверсным фильтром с передаточной функцией $H(z) = 1/H_{AP}(z)$, находится вектор-столбец $\mathbf{a}_m$ коэффициентов «длинной» АР-модели по нормальному уравнению Юла-Уолкера:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_m \end{bmatrix} = \mathbf{Z}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_z^2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

где σ_z^2 – дисперсия шума АР-модели m -го порядка для описания процесса ошибки, $\mathbf{0}$ – m -мерный вектор-столбец, состоящий из нулей. Искомый вектор $\mathbf{b}$ коэффициентов СС-части модели можно найти с помощью процедуры пересчета коэффициентов передаточной функции из знаменателя в числитель: $\mathbf{b} = (\mathbf{A}_m^{T*} \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{A}_m^{T*} \mathbf{a}_m$, где

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_m[1] & 1 & \dots & 0 \\ a_m[2] & a_m[1] & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_m[m-1] & a_m[m-2] & \dots & a_m[m-q] \end{bmatrix}.$$

Метод В. Аналогично методу А сначала рассчитывается длинная АР-модель с вектором $\mathbf{a}_m = \|1; a_m[1]; \dots; a_m[m-1]\|^T$. Затем из массива $\mathbf{a}_m$ находятся корреляционные коэффициенты входного процесса как функция автокорреляционной последовательности (АКП). После преобразования найденной АКП в теплицеву и эрмитову матрицу $\mathbf{R}_{aa}$ искомый вектор-столбец коэффициентов СС-части находится из решения нормальных

уравнений Юла-Уолкера:

$$\mathbf{b} = \mathbf{R}_{aa}^{-1} \mathbf{e}, \text{ где } \mathbf{e} = \begin{bmatrix} 1; 0; \dots; 0 \end{bmatrix}^T - \text{единичный вектор.}$$

Результаты исследования показали, что в зависимости от величины m и характеристик моделируемой последовательности методы А и В имеют различные качественные показатели по критерию СКО моделируемой спектральной плотности мощности (СПМ) от контрольного спектра. Например, метод В, имеющий выигрыш перед методом А в количестве вычислений, при жестких ограничениях на порядок m ($m=q$) имеет и меньшую ошибку по СКО по сравнению с методом А в случае моделирования унимодального узкополосного спектра. Но при широкополосном спектре или при $m \gg q$ метод А становится более предпочтительным. На основе проведенных исследований даны подробные рекомендации по выбору конкретного метода (А или В) расчета СС-параметров для различных ситуаций.

Известны методики нахождения АР-параметров $a[j]$ из решения переопределенной системы уравнений Юла-Уолкера, которая имеет вид

$$\begin{bmatrix} r[0] & r[-1] & \dots & r[-p] \\ r[1] & r[0] & \dots & r[1-p] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r[p] & r[p-1] & \dots & r[0] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r[s] & r[s-1] & \dots & r[s-p] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a[1] \\ \vdots \\ a[p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $(s-p)$ – глубина переопределенности ($s > p$), $r[\bullet]$ – коэффициенты автокорреляции. Для количественной оценки адекватности моделей, синтезированных по этой методике, использованы критерии СКО СПМ моделей и ММО в коэффициентах подавления смоделированных пассивных помех системой СДЦ. Результаты исследования показали, что применение переопределенной системы уравнений Юла-Уолкера (3) для расчета АР-коэффициентов улучшает качество моделирования по критерию СКО в 3–4 раза, что дает возможность уменьшить порядок формирующего фильтра в 1,5–2 раза при обеспечении требуемой адекватности моделирования. При этом выигрыш по критерию ММО модулей Δk отклонений между экспериментальным k_{exp} и теоретическим k_{opt} коэффициентами подавления помех составляет величину 8,7–14,8 дБ.

Общим недостатком традиционных подходов к построению моделей, предназначенных для анализа эффективности функционирования систем первичной обработки эхо-сигналов, является то, что при синтезе моделей не учитываются характеристики анализируемых систем. Это приводит к усложнению моделей, ориентированных на описание всех компонент процесса, в том числе и тех, которые будут заведомо подавлены системой обработки, в частности, фильтром системы СДЦ.

Спектральная характеристика $S_{cc}(f)$ выходного процесса для СС-фильтра аналитически выражается следующим образом:

$$S_{cc}(f) = 1 + \sum_{k=1}^q b[k] \exp(-j2\pi/kT), \quad (4)$$

где T – период следования отчетов сигнала, f – частота спектрального отсчета. При исследовании эффективности функционирования наземных РЛС часто возникает необходимость моделирования узкополосных спектральных компонент, порождаемых отражениями от пассивных помех. Для описания узких спектральных пиков используют АР-составляющую модели. Это приводит к возникновению ряда проблем: необходимости анализа устойчивости моделирующего фильтра, длительному переходному процессу и т.д. Вместе с тем узкополосные спектральные компоненты входного процесса $y[n]$ подавляются фильтрами системы СДЦ, параметры которых известны, а оставшиеся широкополосные составляющие спектра могут быть эффективно описаны СС-моделями, переходные процессы которых ограничены лишь их порядком q , а устойчивость гарантирована отсутствием обратных связей. В диссертации показано, что можно использовать лишь СС-составляющую модели, а влияние фильтра системы СДЦ, например изменение мощности входного процесса, учесть на последующих этапах анализа эффективности систем первичной обработки. На рис. 1 приведена структурная схема, связывающая модель, возбуждаемую белым гауссовским шумом (БГШ), и изучаемую систему обработки эхо-сигналов.

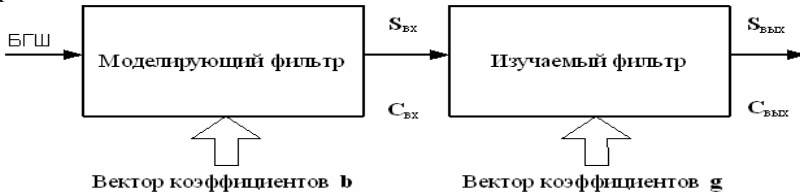


Рис. 1

Контрольный спектр $C_{вх}$ на входе режекторного фильтра определяется из выражения

$$C_{вх}(f) = \sum_{k=0}^K r[k] \exp\left(-j2\pi k \frac{l}{TL}\right),$$

где L – число спектральных отсчетов, T – период повторения зондирующих импульсов, l – текущий спектральный отсчет, $f = l/TL$ – относительная частота, K – число коэффициентов корреляции входной последовательности. Контрольный спектр $C_{вых}$ на выходе фильтра подавления пассивных помех имеет следующий вид:

$$C_{вых}(f) = \text{diag}(C_{вх}) \mathbf{F}_g \mathbf{g},$$

где diag – оператор диагонализации; $\mathbf{F}_g$ – прямоугольная $L \times (G+1)$ -мерная матрица дискретного преобразования Фурье с компонентами $F_g(l, k) = \exp(-j2\pi kl/TL)$ при $k = 0, \dots, G$; $l = 0, \dots, (L-1)$; $\mathbf{g}$ – вектор коэффициентов импульсной характеристики нерекурсивного фильтра подавления помех порядка G , используемого в системе СДЦ РЛС.

Предлагаемый метод нахождения вектора $\mathbf{b}$ коэффициентов моделирующего СС-фильтра порядка q основан на минимизации длины вектора невязок между L -мерными векторами $\mathbf{C}_{\text{вых}}$ отсчетов контрольного спектра и частотной характеристикой $\mathbf{S}_{\text{вых}}$ процесса на выходе фильтра подавления:

$$\mathbf{S}_{\text{вых}}(f) = \text{diag}(\mathbf{S}_{\text{вх}}) \mathbf{F}_g \mathbf{g}. \quad (5)$$

Поставляем $\mathbf{S}_{\text{вх}} = \mathbf{F}_b \mathbf{b}$ в (5) и получаем следующее выражение

$$\mathbf{S}_{\text{вых}}(f) = \text{diag}(\mathbf{F}_b \mathbf{b}) \mathbf{F}_g \mathbf{g}, \quad (6)$$

где $\mathbf{F}_b$ – прямоугольная $L \times (q+1)$ -мерная матрица дискретного преобразования Фурье с компонентами $F_b(l, k) = \exp(-j2\pi kl/TL)$ при $k = 0, \dots, q$; $l = 0, \dots, (L-1)$. Тогда квадрат длины $\boldsymbol{\varepsilon}$ вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязок (целевая функция) принимает следующий вид:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^H \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{C}_{\text{вых}} - \mathbf{S}_{\text{вых}})^H (\mathbf{C}_{\text{вых}} - \mathbf{S}_{\text{вых}}) \rightarrow \min_{\mathbf{b} \in C^{q+1}}, \quad (7)$$

где C^{q+1} – $(q+1)$ -мерное пространство комплексных чисел. Подстановка (6) в (7) дает следующее выражение для критерия оптимизации:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^H \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{C}_{\text{вых}} - \mathbf{Fb})^H (\mathbf{C}_{\text{вых}} - \mathbf{Fb}) \rightarrow \min_{\mathbf{b} \in C^{q+1}}, \quad (8)$$

где $\mathbf{F} = \text{diag}(\mathbf{F}_g \mathbf{g}) \mathbf{F}_b$ – прямоугольная $L \times (q+1)$ -мерная матрица. Искомый вектор $\mathbf{b}_{\text{opt}}$ определяется методом наименьших квадратов

$$\mathbf{b}_{\text{opt}} = (\mathbf{F}^H \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^H \mathbf{C}_{\text{вых}}.$$

На рис. 2 приведены СПМ процессов на выходе системы режекции пассивных помех типа череспериодного компенсатора порядка $G=3$ для подавления пассивной помехи с гауссовской огибающей энергетического спектра флуктуаций, его эффективной шириной $\Delta f T = 0,05$, относительной скоростью $f T = 0$ и отношением $\lambda = 10^{-6}$ мощности коррелированной составляющей к некоррелированной. Из рис. 2 видно, что СПМ неоптимизированной модели значительно отклоняется от контрольного спектра, а оптимизированная модель дает хорошие результаты. Так, достигаемое СКО неоптимизированным фильтром моделирования того же порядка q составляет величину $\delta_2 = 3,851$, а оптимизированная модель улучшает адекватность описания по введенному критерию (7) в 52,6 раза ($\delta_1 = 0,073$).

Предлагаемая методика оптимизации СС-моделей для анализа эффективности систем первичной обработки эхо-сигналов в радиолокации дает возможность уменьшить порядок моделирующих фильтров в два-три раза при сохранении адекватности моделирования эхо-сигналов за счет учета параметров моделируемой системы при синтезе модели.

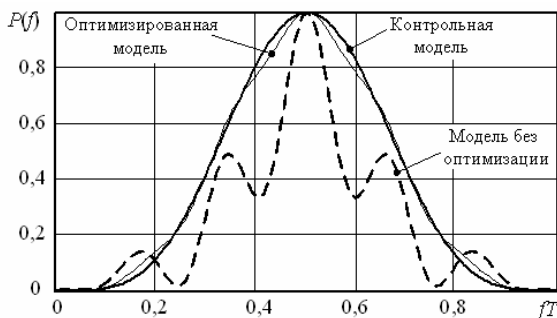


Рис. 2

В третьей главе проводятся оптимизация параметров системы СДЦ на основе АРСС-моделей пассивных помех и исследования характеристик обнаружения систем первичной обработки эхо-сигналов с помощью оптимизированных параметрических моделей.

Задачи обнаружения радиолокационных сигналов на фоне коррелированных помех часто связаны с необходимостью синтеза выбеливающих фильтров (ВФ). На практике исходными данными для синтеза ВФ являются лишь наборы реализаций входного процесса. Вместе с тем обычно имеется плохо формализуемая априорная информация о характере спектра помех, которую можно учесть посредством аппроксимации входного процесса линейной параметрической АРСС-моделью заданной структуры. При этом рекурсивный ВФ реализуется подстановкой параметров АР-части модели в его нерекурсивную часть, а параметров СС-модели в рекурсивную часть ВФ, т.е. обращением передаточной функции АРСС-модели. Она предполагает аппроксимацию отсчетов исходного стохастического процесса выходными отсчетами $y[n]$ линейного фильтра, описываемого линейно-разностным уравнением

$$y[n] = - \sum_{k=1}^p a[k]y[n-k] + \sum_{k=0}^q b[k]x[n-k] = \sum_{k=0}^{\infty} h[k]x[n-k], \quad (9)$$

где $x[n]$ – входная возбуждающая последовательность в виде белого шума с нулевым средним значением и дисперсией σ^2 ; $a[k]$, $b[k]$ – коэффициенты АР и СС; p , q – порядки АР- и СС-частей соответственно; $h[k]$ – коэффициенты эквивалентного СС-фильтра. Обычно дисперсию σ^2 возбуждающего шума выбирают таким образом, чтобы коэффициент $b[0]$ был равен единице, т.е. $b[0]=1$. Тогда передаточная функция $H[z]$ АРСС-модели, описываемой (9), имеет следующий вид:

$$H[z] = B[z]/A[z],$$

$$\text{где } A[z] = 1 + \sum_{k=1}^p a[k]z^{-k}, \quad B[z] = 1 + \sum_{k=1}^q b[k]z^{-k}, \quad H[z] = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} h[k]z^{-k}.$$

Коэффициенты полинома $A[z]$, эквивалентные АР-параметрам АРСС-модели, можно найти, решая нормальное уравнение Юла-Уолкера для АРСС-процесса. Значения СС-параметров АРСС-модели, входящих в полином $B[z]$, находятся по методу, изложенному во второй главе.

В диссертации произведен синтез рекурсивных ВФ с порядками p, q по требуемой амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) в соответствии со следующей методикой. На начальном этапе на основе заданных параметров помеховой обстановки и исходных предпосылок выбирается порядок и определяется АЧХ фильтра-прототипа, а затем находится приближение АЧХ ВФ к АЧХ фильтра-прототипа с учетом ограничений на сложность реализации ВФ. В качестве фильтра-прототипа применяется нерекурсивный фильтр большого порядка ($p \geq 30$). На основе решения нормального уравнения Юла-Уолкера определяются коэффициенты $a[k]$ АР-модели, затем они преобразуются в коэффициенты СС-фильтра того же порядка. Задача синтеза фильтра с произвольными порядками p, q сводится к нахождению значения минимума ММО η АЧХ синтезированного фильтра и фильтра-прототипа

$$\eta(p, q) = \max_{p, q} |S_{cc}(l/L) - S(l/L)| \rightarrow \min, l=0, 1, \dots, (L-1), \quad (10)$$

$$\text{где } S_{cc}(l) = \left| 1 + \sum_{k=1}^{30} a[k] \exp(-j2\pi kl/L) \right|, \quad S(l) = \frac{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a[k] \exp(-j2\pi kl/L) \right|}{\left| 1 + \sum_{k=1}^q b[k] \exp(-j2\pi kl/L) \right|}.$$

Метод синтеза ВФ на основе АРСС-модели осуществляется посредством нахождения минимальной величины η путем перебора значений p, q в заданных пределах. Они определяются, в частности, тем, что порядок рекурсивной части связан с длительностью переходного процесса, а обеспечить требуемую АЧХ синтезированного АРСС-фильтра необходимо на заданной длине N выборки.

Синтез ВФ по введенному критерию (10) на основе параметрической АРСС-модели коррелированных помех имеет выигрыш до 12–14 дБ в коэффициенте k_y улучшения отношения сигнал-помеха по сравнению с традиционными методиками синтеза фильтров обеления радиолокационных мешающих отражений с суммарными порядками $(p+q) \leq 10$. Выигрыш достигается за счет учета априорной информации о форме спектра помех в структуре (порядках p и q) синтезируемого выбеливающего фильтра. Для расчета параметров СС-части рекурсивных фильтров рекомендуется подбирать порядок m «длинной» АР-модели в диапазоне $2q_{\text{АРСС-модель}} \leq m \leq 5q_{\text{АРСС-модель}}$.

На основе параметрического моделирования разработаны процедуры имитации входного процесса для исследования характеристик обнаружения систем первичной обработки эхо-сигналов. На первом этапе определяются

параметры формирующего АРСС-фильтра, выходная последовательность которого имитирует цифровые отсчеты входного процесса, поступающие на каждый из двух квадратурных каналов системы первичной обработки РЛС. Моделирование дает возможность учесть параметры и тип фильтра подавления помех систем СДЦ, построенных на основе как режекторных фильтров (РФ), так и ВФ, а также параметры накопителя сигналов. Структура исследования характеристик обнаружения систем первичной обработки радиоотражений приведена на рис. 3.

Процедура включает создание имитационного процесса, описывающего радиолокационную обстановку на основе АР-модели оптимизированного порядка. При этом на выходе моделирующих фильтров формируются массивы sn_1 аддитивной смеси сигнала, помехи, шума, а также sn_0 смеси помехи и шума (случай отсутствия цели).



Рис. 3

Эти массивы подаются на вход фильтров СДЦ (исследуемой системы). Алгоритм расчета вероятности D в зависимости от отношения сигнал-шум s/n на входе основан на анализе превышения порога, выбираемого из требований постоянства вероятности F ложной тревоги. При прохождении имитационного процесса sn_1 через фильтр СДЦ получены характеристики обнаружения, т.е. зависимости $D(s/n)$, а при прохождении имитационного процесса sn_0 оценивается стабильность $F(s/n)$ для подтверждения правильности выбора порога, т.е. соблюдения условий критерия Неймана-Пирсона (см. рис. 4, 5). На рис. 4 представлены зависимости D правильного обнаружения от отношения s/n при использовании РФ и ВФ 2-го порядка и в случае применения последующего некогерентного накопления (НН) 48 импульсов. На рис. 5 показано поведение F . При этом были заданы следующие параметры: ширина спектров помехи и сигнала $\Delta f_c T = 0,02$ и $\Delta f_s T = 0,02$; относительные скорости помехи и сигнала $f_c T = 0$ и $f_s T = 0,5$ соответственно; относительные мощности помехи $P_c = 10^5$; шума $P_n = 1$; мощность сигнала P_s , которая изменялась в пределах $[10^{-1}; 10^4]$; моделирующий фильтр АР 5-го порядка, $F = 0,1$. Для оптимизации моделей в задаче исследования характеристики обнаружения систем первичной обработки радиоотражений, как и в предыдущем разделе, был применен критерий СКО между контрольной и исследуемой моделями. Для контроля результатов оптимизации использо-

$$|D_k(s/n, 40) - D_{ис}(s/n, p)| \rightarrow \min_p, \quad (11)$$

где $D_k(s/n, 40)$ – вероятность правильного обнаружения системы обрабо-

-тки, которая получена с помощью моделирующего АР-фильтра 40-го порядка (контрольной модели); $D_{ис}(s/n, p)$ – вероятность правильного обнаружения системы обработки, полученная с помощью исследуемого моделирующего АР-фильтра p -го порядка. Сопоставление по (11) показало, что редукция модели по критерию СКО частотных характеристик не существенно влияет на характеристики обнаружения. Усредненные отклонения между D_k и $D_{ис}$ составляют единицы процентов. Однако при попытке дальнейшего снижения порядка модели ($p < 5$) наблюдаются аномальные отклонения, составляющие неприемлемую величину ошибки, достигающую 50 %.

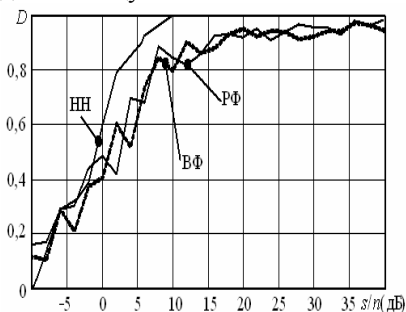


Рис. 4

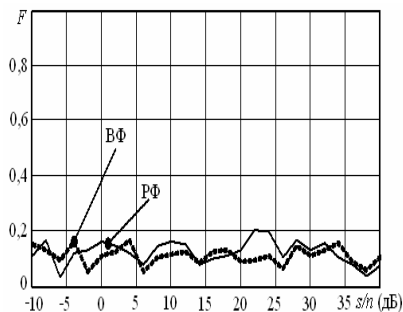


Рис. 5

В четвертой главе проводятся исследования эффективности адаптивных фильтров с оценкой параметров помех, основанной на измерении мощностей коррелированных помех на входе и выходе двух цифровых фильтров (ЦФ1 и ЦФ2) 1-го порядка с векторами весовых коэффициентов $\mathbf{W1}=[1, -1]^T$ и $\mathbf{W2}=[1, -j]^T$ соответственно, где T – знак транспонирования, а также фильтров, синтезированных на основе критерия максимизации вероятности правильного обнаружения.

Известно аналитическое выражение для расчета весового коэффициента a_1 адаптивного цифрового фильтра 1-го порядка (АЦФ1)

$$a_1 = -\frac{\sqrt{(2P_{вх1} - P_{вых1})^2 + (2P_{вх1} - P_{вых2})^2}}{2P_{вх1}} \left[\frac{(2P_{вх1} - P_{вых1}) + j(2P_{вх1} - P_{вых2})}{\sqrt{(2P_{вх1} - P_{вых1})^2 + (2P_{вх1} - P_{вых2})^2}} \right],$$

где $P_{вых1}$ и $P_{вых2}$ – мощность остатков коррелированных помех на выходе ЦФ1 и ЦФ2 соответственно, $P_{вх1}$ – мощность воздействия помехи на входе фильтров ЦФ1 и ЦФ2. В диссертации эффективность АЦФ1 была исследована с помощью АР-моделей помеховой обстановки со следующими параметрами: первая компонента, которая описывает коррелированную помеху от местных предметов, со спектральной шириной $\Delta f_1 T = 0,05$; вторая компонента, которая описывает отражения от гидрометеоров, с шириной $\Delta f_2 T = 0,08$ и относительной доплеровской скоростью $f_2 T$ в диапазоне $[0,01; 0,21]$; соотношение мощности между

этими мешающими компонентами $\sigma_1/\sigma_2=1/0,01$; отношение шум/помеха $\lambda=10^{-6}$; приняты длина реализации $N=5000$ и порядок АР-фильтра $q=5$.

При этом проигрыш АЦФ1 в коэффициентах подавления помех оптимальной системе составляет величину $2,6 \leq \varepsilon_1 \leq 3,6$ дБ в зависимости от конкретных значений $f_2 T$. На рис. 6 показана структура предложенного модифицированного адаптивного цифрового фильтра 2-го порядка (АЦФ2) в задаче подавления двухкомпонентных радиолокационных коррелированных помех. При этом $P_{\text{вых}3}$ и $P_{\text{вых}4}$ – мощность остатков коррелированных помех на выходе ЦФ3 и ЦФ4 соответственно, $P_{\text{вх}2}$ – мощность воздействия помехи на входе фильтров ЦФ3 и ЦФ4.

Второй весовой коэффициент a_2 АЦФ2 вычисляется по формуле

$$a_2 = -\frac{\sqrt{(2P_{\text{вх}2} - P_{\text{вых}3})^2 + (2P_{\text{вх}2} - P_{\text{вых}4})^2}}{2P_{\text{вх}2}} \left[\frac{(2P_{\text{вх}2} - P_{\text{вых}3}) + j(2P_{\text{вх}2} - P_{\text{вых}4})}{\sqrt{(2P_{\text{вх}2} - P_{\text{вых}3})^2 + (2P_{\text{вх}2} - P_{\text{вых}4})^2}} \right],$$

Показано, что предлагаемая модифицированная структура АЦФ2 дает высокую эффективность адаптации подавления пассивных помех, приближаясь по коэффициенту их подавления к оптимальной системе на величину $0,36-3,74$ дБ при заданных ранее параметрах пассивных помех. Результаты исследования такого типа адаптивных фильтров с помощью АР-моделей показали, что эффективность адаптации подавления пассивных помех резко уступает оптимальной системе при увеличении порядка фильтра, т.е. фильтр 3-го или 4-го порядков уже не эффективны.

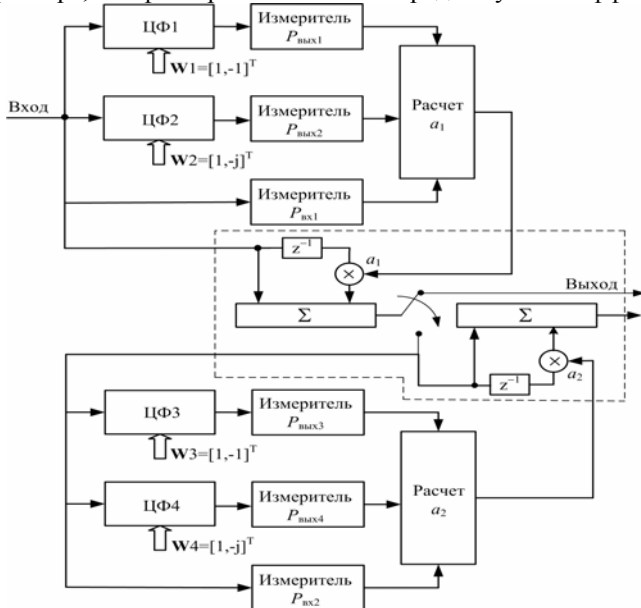


Рис. 6

Отметим, что к синтезу систем СДЦ, основывающихся на критериях обнаружения, мало разработан. В связи с этим представляет интерес рассмотрения синтеза одноканальных систем СДЦ по критериям, непосредственно связанным с качеством обнаружения движущихся целей, а именно, по усредненным характеристикам обнаружения, полученным в предыдущих разделах работы. Задача сводится к нахождению весового вектора $\mathbf{W}$ фильтра подавления помех, обеспечивающего максимум усредненной по скоростям цели вероятности правильного обнаружения $\bar{D}$, т.е.

$$\bar{D}(\mathbf{W}) = \frac{1}{\Phi} \sum_{l=0}^{\Phi-1} \exp \left[\frac{\mathbf{W}^H (\lambda \mathbf{I} + \mathbf{R}_c) \mathbf{W} \ln F}{\mathbf{W}^H (\lambda \mathbf{I} + \mathbf{R}_c) \mathbf{W} + \mathbf{W}^H \mathbf{R}_s \mathbf{W} (s/n)} \right] \rightarrow \max_{\mathbf{W} \in C^{G+1}}, \quad (12)$$

где $\mathbf{R}_s$ – корреляционная матрица сигнала, Φ – число доплеровских каналов.

Для решения (12) применялись численные методы поиска экстремума. При этом предлагается выбирать начальные значения вектора $\mathbf{W}$ исходя из априорной информации о собственном векторе корреляционной матрицы помехи и/или крайнем левом столбце $\mathbf{V}$ матрицы $\mathbf{R}_c^{-1}$. Результаты экспериментов показали, что в случае узкополосного спектра помех ($\Delta f_c T < 0,1$) целесообразнее выбирать в качестве начальных приближений вектор $\mathbf{V}$. В противном случае ($\Delta f_c T \geq 0,1$) начальные приближения выбираются исходя из собственного вектора $\mathbf{G}$ матрицы $\mathbf{R}_c$, соответствующего ее минимальному собственному значению. Правилom останова при поиске экстремума целевой функции (12) может служить выполнение следующих неравенств: $\bar{D}(\mathbf{W}) \geq \bar{D}(\mathbf{V})$ и $\bar{D}(\mathbf{W}) \geq \bar{D}(\mathbf{G})$.

Эксперименты показали, что методика синтеза фильтров подавления помех, основанная на критерии (12), дает возможность дополнительно увеличить величину $\bar{D}$ на 1–2 %. На рис. 7 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для трех типов фильтров одинакового порядка $G=10$ при $\Delta f_c T = 0,05$; $\lambda = 10^{-3}$; $\Phi = 1000$ и $F = 0,1$. Линией 1 показана АЧХ РФ, линией 3 – ВФ, а линией 2 – фильтра, построенного по (12).

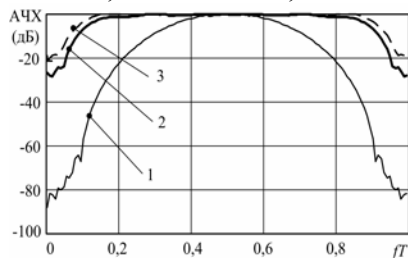


Рис. 7

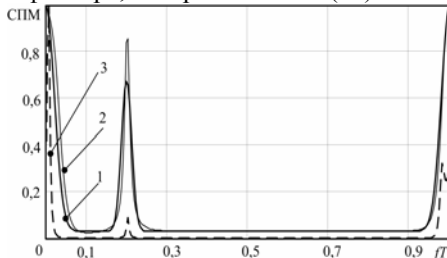


Рис. 8

В приложении рассматриваются аспекты практического применения результатов проведенных исследований. Предлагается использование переопределенных линейных уравнений Юла-Уолкера для синтеза и оптимизации АРСС-фильтров в рамках заданного общего порядка $M=p+q$. Приведем пример моделирования эхо-сигналов от двух мешающих объектов: 1) подстилающей поверхности (лесной покров в безветренную погоду); 2) гидрометеора с низкой турбулентностью (направление и скорость ветра на различных высотах одинакова). Параметры спектральных мод сведены в таблицу; $\lambda=10^{-6}$, что соответствует малому вкладу шумового процесса (специально организованная шумовая активная помеха отсутствует), $M=6$.

Номер моды i	Мощность P_i	Скорость $f_i T$	Ширина спектра $\Delta f_i T$
1	1	0	0,05
2	0,4	0,2	0,03

Ввиду наличия узкополосных компонент спектра целесообразно применение авторегрессионной контрольной модели (ее порядок принят $p=60$). Нормированные спектральные характеристики моделей приведены на рис. 8. Линией 1 показана СПМ контрольной модели, линией 2 – оптимизированной переопределенной АРССп-модели, линией 3 – неоптимизированной АРСС-модели.

Для уменьшения значений СКО СПМ от контрольной модели в ряде работ было предложено перераспределение порядков p и q . В диссертации проводится оптимизация АРСС-модели путем решения переопределенных уравнений Юла-Уолкера. При этом возможно сохранить рекомендацию о выборе $p=q$. Если переопределенное уравнение Юла-Уолкера не применяется, тогда значение ς СКО СПМ от контрольной модели при $p=q=3$ составляет $1,06 \cdot 10^{-4}$, а за счет решения переопределенных линейных уравнений Юла-Уолкера ς снижается до $\varsigma_{opt}=9,54 \cdot 10^{-6}$ и, следовательно, выполняется условие $\varsigma/\varsigma_{opt} \geq 10$ удовлетворительного качества редукции порядка M модели, что подтверждает эффективность предлагаемой методики.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые сводятся к следующему.

1. Получена методика оптимизации СС-моделей для анализа эффективности систем первичной обработки сигналов, основанная на процедуре синтеза модели, учитывающая частотные характеристики моделируемой системы.

2. Разработаны процедуры оптимизации параметров выбеливающих фильтров межпериодной обработки на основе параметрических моделей коррелированных помех, учитывающих априорную информацию об их

спектральном составе.

3. Проведено исследование характеристик обнаружения систем первичной обработки эхо-сигналов с помощью их оптимизированных параметрических моделей с целью оптимизации параметров фильтров подавления коррелированных помех.

В приложениях приведены список условных обозначений и аббревиатур, встречающихся в тексте диссертации, список основных компьютерных программ, использованных при моделировании, а также копия акта о внедрении результатов, полученных в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Андреев В.Г., Нгуен Вьет Шон. Оптимизация фильтров моделирования радиолокационных отражений в задаче анализа эффективности систем СДЦ // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Матер. XVI Всероссийской науч. техн. конф. (Computer-Based Conference). Н. Новгород, 2005. С. 31.

2. Андреев В.Г., Нгуен Вьет Шон. Анализ методов расчета СС-параметров АРСС-моделей // Туполевские чтения: Матер. Междунар. науч. конф., посвященной 1000-летию г. Казани. Казань, 2005. С. 24-25.

3. Нгуен Вьет Шон., Андреев В.Г. Анализ эффективности режекции и обеления помех на основе их параметрических моделей // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: XI Всероссийская науч. техн. конф. Рязань, 2006. С. 57-58.

4. Нгуен Вьет Шон., Андреев В.Г. Оптимизация фильтров моделирования радиоотражений для анализа эффективности обработки эхо-сигналов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XII Междунар. науч.техн. конф.: Тез. докл. В 3 т. М.: МЭИ, 2006. Т 1. С. 85-86.

5. Андреев В.Г., Нгуен Вьет Шон. Оптимизация фильтров моделирования коррелированных помех // Перспективные проекты и технологии: сб. науч. тр. Рязань, 2006. Выпуск 1 С. 42-47.

6. Нгуен Вьет Шон. Авторегрессионная модель в задаче анализа эффективности режекции и обеления пассивных помех // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвуз. сб. науч. тр. Рязан. гос. радиотех. ун-т. Рязань, 2006. С. 50-52.

7. Андреев В.Г., Нгуен Вьет Шон. Оптимизация фильтров моделирования мешающих радиоотражений для исследования систем первичной обработки эхо-сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. № 10. С. 65-76.

8. Нгуен Вьет Шон., Андреев В.Г. Параметрическое моделирование коррелированных радиоотражений для анализа эффективности обработки эхо-сигналов // Вестник РГРТУ. Рязань, 2006. Выпуск 18. С. 40-45.

9. Нгуен Вьет Шон., Андреев В.Г. Построение моделей вариательно-

-сти сердечного ритма для прогнозирования состояния здоровья человека // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы: Тез. докл. XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2006. С. 169-171.

10. Нгуен Вьет Шон., Андреев В.Г. Исследование характеристик обнаружения системы первичной обработки сигналов при помощи параметрических моделей радиолокационных отражений // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: XII Всероссийская науч. техн. конф. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2007. С. 67-68.

11. Нгуен Вьет Шон. Регрессионное моделирование процессов на входе системы первичной обработки радиолокационных сигналов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвуз. сб. науч. тр. Рязан. гос. радиотех. ун-т. Рязань, 2007. С. 73-76.

Н г у е н Вьет Шон

Методы построения фильтров
подавления коррелированных помех
на основе их параметрических моделей

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Отпечено ГНУ ВНИМС,
Рязань, Щорса 37/11
Формат бумаги 60×84 1/16.
Печатных листов 1.
Заказ № Тираж 100 экз.

апреля 2007 г.