

На правах рукописи
УДК 621.396



Штрунова Екатерина Сергеевна

**АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОДАВЛЕНИЯ
АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ С ЧАСТИЧНО АДАПТИВНЫМИ ФАР**

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 2013

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем
в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический
университет»

Научный руководитель: Кошелев Виталий Иванович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Юдин Василий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры 401 «Радиолокация
и радионавигация» Московского авиа-
ционного института (национальный
исследовательский университет),
г. Москва

Савостьянов Владимир Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
начальник лаборатории
ОАО «Корпорация «Фазотрон – НИИР»
г. Москва

Ведущая организация: ОП НИИ «Рассвет» ОАО «Корпорация
«Фазотрон – НИИР», г. Рязань

Защита диссертации состоится 28 ноября 2013 г. в 12³⁰ на заседании
диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном ра-
диотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина,
59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«РГРТУ»

Автореферат разослан " ____ " _____ октября _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важным тактическим показателем радиотехнических систем (РТС) является их способность функционировать на фоне помех. Если в области защиты РТС от пассивных помех разработана достаточно эффективная теория, то задача защиты от активных помех (АП) далека от своего решения в связи с постоянным эффективным совершенствованием средств радиоэлектронного подавления (РЭП).

К наиболее универсальному виду маскирующих АП относят активные шумовые помехи (АШП). Увеличение энергетического потенциала постановщиков активных помех (ПАП) за счет использования в средствах РЭП фазированной антенной решетки (ФАР) привело к возможности эффективного применения АШП, действующих на приемник по боковым лепесткам (БЛ) диаграммы направленности (ДН) антенны РТС.

В средствах РЭП переход к цифровой реализации формирования лучей ФАР имеет ряд преимуществ, способных препятствовать эффективной работе РТС: решение проблемы обнаружения и подавления большего количества РТС за счет большего числа управляемых лучей ДН в режиме разведки и подавления; снижение уровня БЛ ДН антенны за счет адаптивного управления амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в апертуре; получение более высокой разрешающей способности и улучшение других технических и тактических характеристик систем РЭП.

Из-за усложнения задачи приема полезного сигнала на фоне данного типа помех целесообразно разрабатывать новые и совершенствовать известные методы и алгоритмы защиты РТС. В реальной ситуации, для которой характерна априорная неопределенность помеховой обстановки, перспективно применять угловую селекцию целей на основе адаптивного формирования ДН ФАР.

Существенный вклад в развитие адаптивных методов пространственной обработки сигналов на фоне помех внесли работы Монзинго Р.А., Миллера Т.У., Пистолькорса А.А., Литвинова О.С., Журавлева А.К., Лукошкина А.П., Поддубного С.С., Ширмана Я.Д., Манжоса В.Н., Фальковича С.Е., Ратынского М.В., Цветнова В.В., Куприянова А.И., Воскресенского Д.И., Уидроу Б., Гейбриела В., Апфельбаума С.П., Ван Триса Г.Л. и других авторов.

Задача защиты РТС усложняется при нестационарной помеховой обстановке, связанной со случайным изменением количества, вида и мощности излучаемых АШП, перемещением в пространстве с большими скоростями ПАП и другими факторами, действующими на различные виды РТС в процессе их работы.

Переход к цифровым ФАР способствует развитию многофункциональных РТС, поскольку применение цифрового диаграммообразования расширяет тактические и технические возможности. Полный переход на

цифровую реализацию алгоритмов подавления сопряжен с высокой стоимостью: цифровая ФАР РТС, как правило, состоит из десятков или сотен аналогово-цифровых модулей и многопроцессорного вычислительного комплекса, к которому предъявляются высокие требования по быстродействию. Поэтому целесообразно разрабатывать адаптивные пространственные алгоритмы защиты РТС от АШП, реализуемые в реальном масштабе времени.

Цель и задачи работы. Целью работы является повышение эффективности адаптивных алгоритмов защиты РТС на фоне АШП.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 1) синтезированы алгоритмы защиты РТС от АШП, действующих по БЛ, основанные на адаптивном формировании ДН ФАР;
- 2) оценено влияние помеховой ситуации на эффективность применения синтезированных алгоритмов помехозащиты РТС;
- 3) проведен анализ устойчивости алгоритмов к ошибкам оценивания межканальной корреляционной матрицы (КМ) АШП;
- 4) определено расположение настраиваемых элементов в частично адаптивной плоской ФАР прямоугольного раскрыва и выполнена оценка его влияния на формирование ДН;
- 5) проведен сравнительный анализ вычислительной эффективности синтезированных алгоритмов защиты и известных;
- 6) оценены требования к быстродействию системы и рассмотрены пути технической реализации синтезированных алгоритмов помехозащиты РТС.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- 1) синтезирован пространственный двухэтапный алгоритм, на основании которого вначале производится оптимизация вектора весовых коэффициентов по критерию минимума мощности помех; на втором этапе с учетом остатков помех от режекции определяется вектор формирования основного лепестка ДН по критерию максимума коэффициента улучшения (КУ) отношения сигнал – (АШП+шум) (ОСПШ);
- 2) найдена связь между расположением настраиваемых элементов и пространственными параметрами АШП, в том числе различием в направлениях прихода АШП и полезного сигнала, позволяющая в процессе синтеза алгоритма подавления АШП на основе частично адаптивной ФАР применять адаптивный выбор настраиваемых элементов.

Внедрение научных результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в промышленную разработку ОП НИИ «Рассвет» – ОАО «Корпорация «Фазотрон–НИИР», г. Рязань, и в материалы научно-исследовательской работы ЗАО «Рязанская радиоэлектронная компания», г. Рязань; в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» при преподавании дисциплин «Теорети-

ческие основы радиоэлектронной борьбы», «Средства радиоэлектронной защиты РЭС», «Радиотехнические системы», в том числе в форме программного обеспечения к лабораторным работам, что подтверждено соответствующими актами.

Методы анализа. Результаты работы получены в рамках методов статистической радиотехники, спектрального анализа сигналов, матричного исчисления, в частности метода поиска экстремальных собственных значений и собственных векторов матриц, теории антенн. Наряду с теоретическими методами были проведены исследования на основе имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) двухэтапный алгоритм, основанный на решении задачи со связями, имеет на 2 дБ больший КУ ОСПШ по сравнению с алгоритмом без разделения вектора весовых коэффициентов в условиях априорной неопределенности помеховой обстановки, что подтверждает его робастность к ошибкам оценивания межканальной КМ АШП в условиях априорной неопределенности при размерности выборочного вектора $N \geq 6$ в условиях действия АШП с относительной шириной углового спектра $\Delta q_{\text{пл}} d_x = 0,01 \dots 0,05$;

2) процедура определения расположения настраиваемых элементов в частично адаптивной плоской ФАР прямоугольной структуры, основанная на вычислении частных производных КУ ОСПШ, обеспечивает сокращение количества настраиваемых элементов на 20...50 % ;

3) пространственный алгоритм подавления АШП на базе частично адаптивной плоской ФАР прямоугольной структуры, применение которого позволяет повысить быстродействие РТС за счет сокращения количества вычислительных операций в 1,5 – 1,7 раза по сравнению с оптимальным алгоритмом и в 1,3 – 1,4 по сравнению с двухэтапным алгоритмом адаптации ФАР.

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным применением математических аппаратов, проведением компьютерного имитационного моделирования полученных алгоритмов; соответствием результатов диссертационной работы, в частных случаях, известным результатам.

Апробация работы произведена в форме научных докладов, дискуссий по основным результатам диссертационной работы, которые проходили на следующих научных конференциях и форумах.

1. Конференция молодых ученых ЦФО РФ. Калуга, 2009.
2. XV, XVI, XVII ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» НИТ-2010, НИТ-2011, НИТ-2012. Рязань, 2010, 2011, 2012.
3. 7, 8 и 9-я МНТК «Современные проблемы радиотехники и телеком-

муникаций» РТ-2011, РТ-2012, РТ-2013. Севастополь, 2011, 2012, 2013.

4. Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2011. Таганрог, 2011.

5. 4-й международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ – 2011). Харьков, 2011.

6. 18-я МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, радиотехника и энергетика». Москва, 2012.

7. 20-я и 21-я МНТК «Современные телевидение и радиоэлектроника». Москва, 2012, 2013.

8. 14-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» DSPA-2012. Москва, 2012.

9. 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке». Харьков, 2012.

10. XVII МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2012.

11. I МНТК «Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях». Тольятти, 2013.

12. X Международная научная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» ПТСПИ-2013. Владимир, 2013.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ. Из них 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 статья в журнале из списка РИНЦ, 4 статьи в межвузовских сборниках научных трудов, 17 тезисов докладов на научно-технических конференциях, получено свидетельство на регистрацию программного продукта № 2013610095 от 09.01.2013 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и приложений. Общий объем диссертации включает 127 страниц, в том числе 122 страницы основного текста, включая библиографический список из 140 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту, определены цель и задачи исследования, изложены новые результаты, полученные при исследовании, их научное и практическое значение, а также реализация и практическое внедрение.

В первом разделе рассмотрены существующие виды АШП и алгоритмы защиты РТС от них. Более подробно рассмотрены пространственные методы и алгоритмы защиты РТС, так как они имеют перед другими видами селекции следующие преимущества: отсутствие ограничений на

вид структуры помехи; возможность подавления АШП, приходящих от нескольких источников; возможность борьбы с АШП, действующими по БЛ ДН. Отмечена целесообразность применения адаптивных методов формирования ДН ФАР и проведен их обзор. Определены направления диссертационного исследования.

Во втором разделе применены критерии статистического синтеза алгоритмов защиты РТС, обоснованы методы анализа эффективности алгоритмов защиты, синтезирован двухэтапный пространственный алгоритм защиты РТС от АШП на основе поиска собственных значений и векторов матриц. Применительно к радиолокационным системам (РЛС) исследовано влияние относительной ширины углового спектра АШП $\Delta q_{\text{пх}}d_x$ и отраженного от цели сигнала $\Delta q_{\text{цх}}d_x$ от углового расстояния между направлениями прихода сигнала и АШП на КУ ОСПШ при применении оптимального и предлагаемого алгоритмов. Проанализировано влияние количества источников АШП и их разности в направлениях прихода на эффективность их подавления. Исследована возможность повышения устойчивости алгоритмов защиты РТС к ошибкам оценивания КМ АШП. Проанализировано влияние применения линейного предсказания элементов автокорреляционной последовательности (АКП) АШП высших порядков по оцененным элементам низших порядков на помехозащищенность РТС.

Оптимальный пространственный алгоритм заключается в нахождении вектора весовых коэффициентов (ВВК), определяющего АФР на раскрытие ФАР, при котором достигается максимум КУ ОСПШ.

Для оптимального алгоритма защиты КУ ОСПШ представляется в виде отношения Релея на базе N -элементной ФАР:

$$\mu_{\text{опт}}(\mathbf{W}) = (\mathbf{W}^H \mathbf{R}_c \mathbf{W}) / (\mathbf{W}^H \mathbf{R}_{\text{шш}} \mathbf{W}), \quad (1)$$

где \mathbf{W} – комплексный N -мерный ВВК $\mathbf{W} = (w_0, w_1, \dots, w_{N-1})^T$; $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}_{\text{шш}}$ – N -мерные межканальные КМ сигнала и аддитивной смеси АШП и шума, $\mathbf{R}_{\text{шш}} = (\mathbf{R}_{\text{п}} + \lambda \mathbf{I}) / (1 + \lambda)$; $\mathbf{R}_{\text{п}}$ – межканальная КМ АШП; \mathbf{I} – КМ шума (единичная); N – знак эрмитова сопряжения (транспонирование и комплексное сопряжение).

Элементы межканальной КМ сигнала и АШП с аппроксимацией углового спектра соответственно резонансной и гауссовской кривыми для линейной эквидистантной ФАР можно представить выражениями:

$$\rho(i, k)_c = \exp\{-\pi \Delta q_{\text{цх}} d_x |i - k|\},$$

$$\rho(i, k)_п = \exp\{-\pi^2 [\Delta q_{\text{пх}} d_x (i - k)]^2 / 2,8\},$$

где $\Delta q_{\text{цх}} d_x, \Delta q_{\text{пх}} d_x$ – относительная ширина углового спектра вдоль координаты x сигнала и АШП соответственно, d_x – межэлементное расстояние по координате x ; $\Delta q_{\text{с,пх}} = L / \lambda_{\text{с,п}}$, L – линейный размер ФАР по координате x , $\lambda_{\text{с,п}}$ – длина волны сигнала и АШП соответственно.

Для случая плоского раскрытия ФАР и действия одного источника

АПП межканальные коэффициенты корреляции ρ_c , ρ_n , образующие КМ сигнала и АПП, имеют вид:

$$\begin{aligned}\rho_c(i, j, k, m) &= \exp[-\pi (|i-m|d_x\Delta q_{cx}+|j-k|d_y\Delta q_{cy})], \\ \rho_n(i, j, k, m) &= \exp[-\pi^2/2,8 [(i-m)d_x\Delta q_{nx}+(j-k)d_y\Delta q_{ny}]^2].\end{aligned}$$

Максимум отношения квадратичных форм (1) соответствует наибольшему собственному числу μ_{\max} регулярного пучка форм $\mathbf{W}^H \mathbf{R}_c \mathbf{W} - \mu \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{W}$ и достигается на собственных векторах \mathbf{W} , соответствующих этому числу. Таким образом, оптимальный ВВК для ФАР определяется из алгоритма линейной фильтрации и является собственным вектором, который соответствует максимальному собственному числу матричного произведения:

$$\mathbf{R}_{\text{пш}}^{-1} \mathbf{R}_c \rightarrow \mathbf{W}_{\text{opt}}.$$

При этом собственные числа и собственные векторы матрицы $\mathbf{R}_{\text{вх}} = \mathbf{R}_{\text{пш}}^{-1} \mathbf{R}_c$ находятся из характеристического уравнения степени N и системы N линейных уравнений соответственно:

$$\det\{\mathbf{R}_{\text{вх}} - \mu \mathbf{I}\} = 0, \mathbf{R}_{\text{вх}} \mathbf{W} = \mu \mathbf{W}. \quad (2)$$

Способ (2) вызывает трудности при практической реализации, связанные с большим объемом вычислительных операций, затрачиваемых на обращение КМ помехи. Данные ограничения могут быть сняты при оптимизации обработки на основе двухэтапной процедуры.

Минимаксное представление собственных чисел матриц на основе теоремы Куранта–Фишера и оптимального вектора обработки \mathbf{W} в виде произведения $\mathbf{W} = \mathbf{D}\mathbf{H}$:

$$\mu_{\text{opt}}(\mathbf{W}) = (\mathbf{H}^H \mathbf{D}^H \mathbf{R}_c \mathbf{D}\mathbf{H}) / (\mathbf{H}^H \mathbf{D}^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{D}\mathbf{H})$$

позволяет разделить алгоритм нахождения ВВК на 2 этапа.

Этап 1. Формирование нулей ДН. Определяется N -мерная матрица формирования нулей (ФН) ДН ФАР \mathbf{D} верхней треугольной формы:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & G_0 & \dots & G_{m-1} & 0 \\ 0 & 1 & G_0 & \dots & G_{m-1} \\ 0 & 0 & 1 & G_0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & G_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $G_j = g_j \exp(i\psi_j)$ – элементы m -мерного вектора \mathbf{G} ФН ДН, который соответствует собственному вектору минимального собственного значения m -мерной подматрицы \mathbf{A}_n КМ помехи. Подматрица \mathbf{A}_n образуется вычеркиванием $N-m$ последних строк и столбцов КМ помехи.

Этап 2. Формирование основного лепестка ДН. При вычисленной матрице \mathbf{D} производится оптимизация $(N-m)$ -мерного вектора \mathbf{h} формирования основного лепестка ДН. Максимальное собственное значение $\mu_{\text{дв}}$ определяется из характеристического уравнения вида

$$\det\{[\mathbf{D}^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{D}]^{-1} [\mathbf{D}^H \mathbf{R}_c \mathbf{D}] - \mu_{\text{дв}} \mathbf{I}\} = 0,$$

где $[\cdot]$ – операция вычеркивания m строк и столбцов, а вектор \mathbf{h} формирования основного лепестка ДН ФАР, являющийся собственным вектором для этого собственного значения, находится из системы $N-m$ линейных уравнений

$$[\mathbf{D}^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{D}]^{-1} [\mathbf{D}^H \mathbf{R}_c \mathbf{D}] \mathbf{h} = \mu_{\text{дв}} \mathbf{h}.$$

КУ ОСПШ двухэтапного алгоритма примет вид:

$$\mu_{\text{дв}} = (\mathbf{h}^H [\mathbf{D}^H \mathbf{R}_c \mathbf{D}] \mathbf{h}) / (\mathbf{h}^H [\mathbf{D}^H \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{D}] \mathbf{h}).$$

При априорной неопределенности параметров помех, характерной для реальных условий, в соответствии с адаптивным байесовским подходом неизвестная межканальная КМ $\mathbf{R}_{\text{пш}}$ АШП заменяется в пространственных алгоритмах состоятельной оценкой $\hat{\mathbf{R}}_{\text{пш}}$. Условием состоятельности оценки КМ является выполнение требования

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P\{\|\hat{\mathbf{R}}_{\text{пш}} - \mathbf{R}_{\text{пш}}\| \leq \varepsilon_{\text{max}}\} = 1,$$

где ε_{max} – среднеквадратичное отклонение (СКО) оценки, показывающее максимально допустимую погрешность оценивания КМ АШП, $\|\cdot\|$ – операция определения нормы матрицы невязки, $\mathbf{R}_{\text{пш}}$ – истинная КМ,

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{пш}} - \text{оценочная КМ}, \quad \hat{\mathbf{R}}_{\text{пш}} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H \approx \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H.$$

На рисунке 1 приведены графики зависимости модуля СКО σ_p элементов межканальной КМ АШП с $\Delta q_{\text{пш}} d_x = 0,01, 0,05$; $\lambda = -30$ дБ от длины k , отводимой на оценивание выборки. На рисунке 2 изображены зависимости КУ ОСПШ от размерности N оцениваемого вектора \mathbf{X}_i (количества элементов ФАР, использующихся для оценивания КМ) при $\Delta q_{\text{пш}} d_x = 0,05$, $\Delta q_{\text{сш}} d_x = 0,01$, $\lambda = -30$ дБ, объеме выборки $k = 40$ для 10-элементной ФАР, построенные при аналитически заданной КМ АШП для оптимального – 1 и двухэтапного алгоритма – 2; при оценочной КМ для оптимального – 3 и двухэтапного алгоритма – 4.

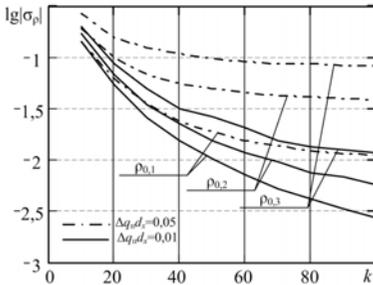


Рисунок 1

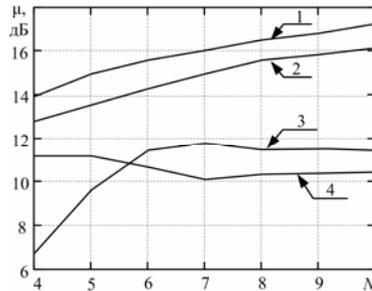


Рисунок 2

Из рисунка 1 видно, что при фиксированной длине выборки боль-

шую погрешность в оценку КМ АШП вносят элементы АКП высоких порядков. При аналитических исследованиях двухэтапный алгоритм проигрывает порядка 1–2 дБ оптимальному, в то время как в реальных условиях априорной неопределенности при оценивании КМ АШП, начиная с размерности оцениваемого вектора $N = 6$, имеет выигрыш до 2 дБ, что свидетельствует о большей устойчивости двухэтапного алгоритма к ошибкам оценивания КМ (рисунок 2).

В связи с увеличением модуля СКО элементов и с учетом свойства эрмитовости и теплицевости КМ предлагается оценивать l из возможных N элементов $\hat{r}_{\text{пш } r}$, $r = 0, \dots, l-1$, АКП, а остальные $L = N-l$ элементов $\hat{r}_{\text{пш } n}$, $n = l, \dots, N-1$, определять по оцененным элементам с помощью линейного предсказания.

В диссертационной работе показан выигрыш применения линейного предсказания L элементов АКП из возможных $N = 30$, который по сравнению с полным проведением оценки АКП для оптимального алгоритма при $L = 5$ доходит до 5 дБ, при $L = 10$ – до 2–3 дБ. Для двухэтапного алгоритма характерно изменение эффективности при применении линейного предсказания в зависимости не только от L , но и от размерности вектора формирования нулей ДН m .

В третьем разделе рассмотрены вопросы использования частичной адаптации ФАР с регулированием части элементов. Определение расположения настраиваемых элементов плоской ФАР с прямоугольным раскрытием на основе полученных результатов для линейной ФАР обусловлено возможностью факторизации множителя решетки.

Нахождение элементов ФАР, оказывающих наибольшее влияние на формирование требуемой ДН, основано на вычислении частной производной коэффициента улучшения ОСПШ по весовому коэффициенту w_l , показывающей изменение мощности помехи и сигнала при прохождении через систему обработки в результате изменения весового коэффициента l -го элемента ФАР. Поэтому в качестве настраиваемых элементов применяются элементы, соответствующие максимальной частной производной коэффициента улучшения ОСПШ:

$$\max \left\{ \frac{\delta \mu(\mathbf{W})}{\delta w_i} \right\}, i = 0 \dots N-1.$$

С учетом свойства эрмитовости КМ сигнала и помехи частные производная коэффициентов прохождения сигнала $K_c = (P_c)_{\text{вых}} / (P_c)_{\text{вх}}$ и аддитивной смеси АШП и шума $K_{\text{пш}} = (P_{\text{пш}})_{\text{вых}} / (P_{\text{пш}})_{\text{вх}}$ по w_l соответственно имеют вид:

$$\frac{\delta K_c}{\delta w_l} = 2(w_l \rho_{cl} + w_0 |\rho_{c0l}| \cos \phi_{c0l} + \dots + w_{N-1} w |\rho_{cN-1l}| \cos \phi_{cN-1l}),$$

$$\frac{\delta K_{\text{нш}}}{\delta w_l} = 2(w_l \rho_{\text{нш}l} + w_0 |\rho_{\text{нш}0l}| \cos \phi_{\text{нш}0l} + \dots + w_{N-1} |\rho_{\text{нш}N-1l}| \cos \phi_{\text{нш}N-1l}),$$

где ρ_{0l} – элемент нулевой строки l -го столбца КМ, $\rho_{0l} = |\rho_{0l}| e^{-j\phi_l} = |\rho_{0l}| (\cos \phi_{0l} + i \sin \phi_{0l})$.

Градиенты КУ ОСПШ по номеру настраиваемого элемента ФАР с нечетным ($N=11$) количеством элементов представлены при действии АШП по основному лепестку ДН антенны РТС (рисунок 3, а) и по БЛ (рисунок 3, б) для $\Delta q_{\text{тх}} d_x = 0,01 \dots 0,25$.

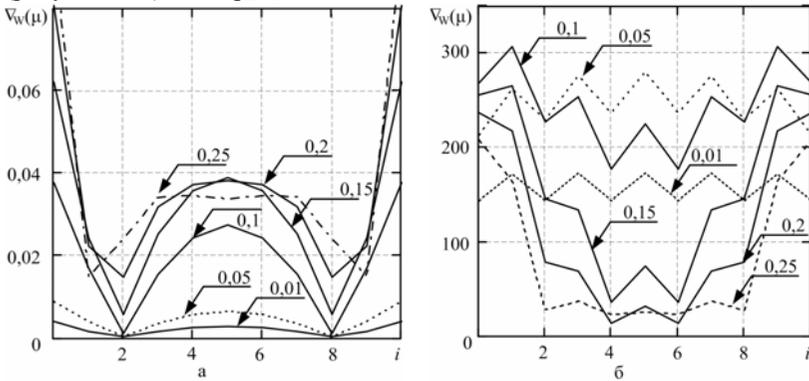


Рисунок 3

В рассматриваемом случае при действии одной АШП по основному лепестку ДН число настраиваемых элементов можно уменьшить до 6, а при действии АШП по боковым лепесткам – до 4–6 в зависимости от относительной ширины углового спектра АШП.

С учетом факторизации множителя решетки наибольшее влияние на формирование ДН плоской ФАР прямоугольного раскрыва, максимизирующей коэффициент улучшения ОСПШ, при действии АШП по основному лепестку ДН будут иметь угловые и центральные элементы. При действии АШП по БЛ расположение настраиваемых элементов плоской ФАР зависит от относительной ширины углового спектра. При $\Delta q_{\text{тх}} d_x = 0,01 \dots 0,05$ частные производные КУ ОСПШ по нечетным элементам превышают частные производные по остальным элементам, а при $\Delta q_{\text{тх}} d_x$ больше 0,05 степень влияния угловых элементов возрастает.

Задача частичной адаптации с регулированием части элементов сводится к условной оптимизации КУ ОСПШ. Функция Лагранжа для линейной ФАР с количеством элементов N при условии постоянства весо-

вых коэффициентов $w_{1\text{const}}, \dots, w_{N-2\text{const}}$ примет вид:

$\mu_{\text{част}} = \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{\text{вх}} \mathbf{W} - \mathbf{M}^T (\mathbf{W} - \mathbf{W}_{\text{const}})$,
 где $\mathbf{M} = (0, \mu, \dots, \mu, 0)^T$ – вектор-столбец, состоящий из множителей Лагранжа, $\mathbf{W} = \mathbf{W}_{\text{const}}$ – условие ограничения, $\mathbf{W}_{\text{const}} = (0, w_{1c}, \dots, w_{N-2c}, 0)^T$.

ВВК определяется из системы уравнений через фиксированные коэффициенты весового вектора w_{1c}, \dots, w_{N-2c} :

$$\begin{cases} \hat{\rho}_{0,0} w_0 + \hat{\rho}_{0,N-1} w_{N-1} = -\mu (\hat{\rho}_{0,1} w_{1c} + \dots + \hat{\rho}_{0,N-2} w_{N-2c}) / 2 \\ \hat{\rho}_{1,0} w_0 + \hat{\rho}_{1,N-1} w_{N-1} = -\mu (\hat{\rho}_{1,1} w_{1c} + \dots + \hat{\rho}_{1,N-2} w_{N-2c}) / 2 \\ \dots \\ \hat{\rho}_{N-1,0} w_0 + \hat{\rho}_{N-1,N-1} w_{N-1} = -\mu (\hat{\rho}_{N-1,1} w_{1c} + \dots + \hat{\rho}_{N-1,N-2} w_{N-2c}) / 2 \end{cases}$$

Ввиду симметрии амплитудного распределения относительно центра ФАР возможно адаптировать только половину весовых коэффициентов. Тогда множитель решетки по направляющим косинусам u примет вид:

$$h(u) = w_0(1 + e^{i(N-1)u}) + w_1(e^{iu} + e^{i(N-2)u}) + \dots + w_{N/2-1}(e^{i(N/2-1)u} + e^{iN/2u}).$$

Если центральные из них оставить постоянными, а крайние подстраивать, то множитель решетки будет определяться формулой:

$$h(u) = w_0(1 + e^{i(N-1)u}) + w_1(e^{iu} + e^{i(N-2)u}) + w_{2c}(e^{iu} + e^{i(N-3)u}) + w_{3c}(e^{iu} + e^{i(N-4)u}) + \dots + w_{N/2-1c}(e^{i(N/2-1)u} + e^{iN/2u}). \quad (3)$$

На рисунке 4 представлена структурная схема системы подавления помех на базе частично адаптивной антенной решетки.

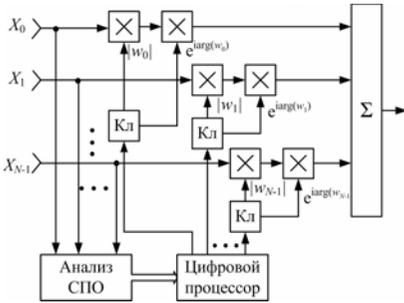


Рисунок 4

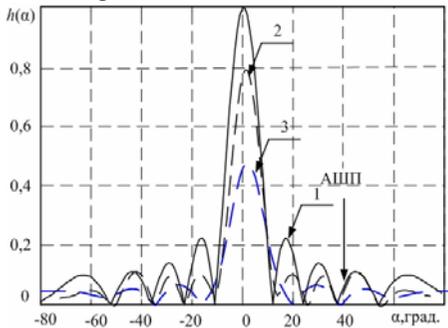


Рисунок 5

С учетом зависимости расположения настраиваемых элементов от параметров АШП, углового расстояния между направлением прихода сигнала и помехи обосновано применение блока анализа сигнально-помеховой обстановки (СПО). Цифровой процессор в системе подавления помех выбирает номера настраиваемых весовых коэффициентов управлением ключа (Кл) в зависимости от оцененных параметров АШП и производит их расчет.

На рисунке 5 представлен множитель решетки $N = 10$ при действии

АШП с направления $\alpha_n = 40^\circ$: при отсутствии адаптации – 1; при адаптации выбранных по разработанной процедуре элементов – 2, центральных элементов – 3.

Результаты исследований (рисунок 5) можно обобщить для плоской ФАР с учетом факторизации множителя решетки. Применение центральных элементов привело к значительному снижению величины основного лепестка ДН в отличие от случая адаптивного выбора расположения настраиваемых элементов. Из представленных графиков можно сделать вывод о целесообразности применения определения расположения настраиваемых элементов при изменении помеховой обстановки.

В четвертом разделе определены затрачиваемые на реализацию адаптивных пространственных алгоритмов подавления АШП в РТС вычислительные ресурсы (таблица 1).

Таблица 1

Алгоритм защиты	Количество комплексных умножений
Оптимальный при непосредственном обращении КМ	$0,5MN(N+1) + N^2(1,5N+2)$, $M \approx 2N$, M – количество выборок
Оптимальный при рекуррентном обращении КМ	$Nk(1,75N+2,25) + N^2(N+1)$, k – количество выборок, $k \approx 2J$
Двухэтапный алгоритм при непосредственном обращении КМ	$0,5MN(N+1) + (N-m)^2(1,5(N-m)+2) + m^2$
Алгоритм частичной адаптации с регулированием части элементов ФАР	$0,5MN(N+1) + (N-l)^2(1,5(N-l)+2)$, l – количество неизменных весовых коэффициентов

На рисунке 6 приведены зависимости объема вычислительных операций – комплексных умножений (КУмн) – от количества элементов ФАР $N = 100$ для оптимального алгоритма защиты от АШП – 1 ($k = 200$), 2 – двухэтапного алгоритма, кривые 3, 4 – алгоритма с частичной адаптацией 20 и 10 элементов соответственно.

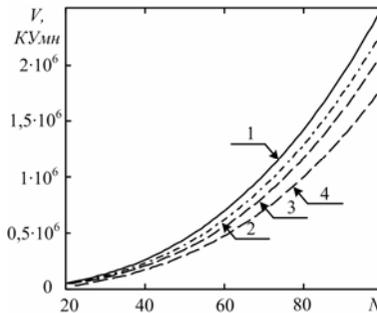


Рисунок 6

Применение частичной адаптации с регулированием части элементов

позволяет сократить количество вычислительных операций в 1,5–1,7 раза по сравнению с применением оптимального алгоритма и в 1,2–1,3 раза – по сравнению с двухэтапным алгоритмом адаптации ФАР (рисунок 6).

Рассмотрены возможности реализации алгоритмов подавления применительно к РЛС. С учетом того, что период повторения T_n зондирующих импульсов в пачке для наземной когерентно-импульсной РЛС составляет (2...4) мс, сделано предположение, что на адаптацию ФАР отводится интервал времени $T_n/3$. Тогда необходимое быстродействие адаптивного процессора для возможности реализации алгоритмов защиты РЛС от J источников помех с ФАР $N = 100$ в реальном масштабе времени для $T_n = 2$ мс представлено в таблице 2, где МАС – количество операций умножения и сложения с содержимым аккумулятора.

Таблица 2

N	T_n , мс	Оптимальный при непосредственном обращении КМ, МАС/с	Оптимальный при рекуррентном оценивании КМ, МАС/с		Двухэтапный при непосредственном обращении КМ, МАС/с
100	2	$7,6 \cdot 10^9$	$J=1$	$3,14 \cdot 10^9$	$3,17 \cdot 10^9, m=25$
			$J=2$	$3,25 \cdot 10^9$	$2,62 \cdot 10^9, m=30$

При заданном времени адаптации быстродействие современных сигнальных цифровых процессоров является достаточным для реализации адаптивных алгоритмов в ФАР с $N = 100$ в реальном масштабе времени. Сигнальные процессоры семейства TigerSHARC фирмы Analog Devices ADSP-TS 101S, -TS 201S и др. имеют быстродействие от $2,4 \cdot 10^9$ до $4,8 \cdot 10^9$ МАС/с; процессоры фирмы Texas Instruments TMS320C6455 – от $5,760 \cdot 10^9$ до $9,6 \cdot 10^9$ МАС/с. При снижении времени адаптации реализация оптимального алгоритма при непосредственном обращении КМ АШП в реальном масштабе времени затруднительна. Недостатком оптимального алгоритма формирования ДН при рекуррентном оценивании КМ АШП является повышение требований к быстродействию в случае увеличения источников АШП, что не характерно для двухэтапного алгоритма. Повышая размерность вектора формирования нулей ДН ФАР, можно снизить требование к быстродействию процессора для двухэтапного алгоритма.

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

1) в условиях априорной неопределенности ввиду большей робастности к ошибкам оценивания КМ помехи целесообразно использовать двухэтапный алгоритм, имеющего до 2 дБ КУ ОСПШ выше, чем алгоритм без разделения весового вектора, начиная с размерности выбороч-

ного вектора $N = 6$;

2) выигрыш от применения линейного предсказания L элементов АКП из возможных $N = 30$ по сравнению с полным проведением оценки для оптимального алгоритма при $L = 5$ доходит до 5 дБ, при $L = 10$ – до 2–3 дБ; для двухэтапного алгоритма характерно изменение эффективности при применении линейного предсказания в зависимости не только от L , но и от размерности m вектора ФН;

3) наибольшее влияние на формирование ДН плоской ФАР с прямоугольным раскрытием, максимизирующей коэффициент улучшения ОСПШ, при действии АШП по основному лепестку ДН имеют угловые и центральные элементы; при действии АШП по БЛ степень влияния угловых элементов возрастает при расширении углового спектра АШП;

4) для N -элементной ФАР при действии одной АШП по основному лепестку ДН количество настраиваемых элементов можно уменьшить до 6, а при действии АШП по боковым лепесткам – до 4–6 в зависимости от относительной ширины углового спектра АШП; полученные результаты позволяют синтезировать алгоритм подавления АШП с адаптивным к помеховой обстановке выбором расположения настраиваемых элементов;

5) применение двухэтапного алгоритма помехозащиты в РЛС с ФАР с $N = 100$ позволяет сократить объем вычислительных операций по сравнению с оптимальным алгоритмом в 1,5–2 раза при непосредственном обращении КМ АШП и в 1,25–1,5 раза – при рекуррентном обращении; применение частичной адаптации с регулированием части элементов позволяет сократить количество вычислительных операций в 1,5–1,7 раза по сравнению с применением оптимального алгоритма и в 1,3–1,4 – по сравнению с двухэтапным алгоритмом адаптации ФАР.

В приложении приведены список условных обозначений и аббревиатур, встречающихся в тексте диссертации, а также копии актов внедрения результатов, полученных в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях из перечня ВАК:

1. Кошелев В.И., Штрунова Е.С. Повышение эффективности алгоритмов защиты РЛС от активных шумовых помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – Вып. 37. – С. 27-31.

2. Кошелев В.И., Холопов И.С., Штрунова Е.С. Чувствительность адаптивных алгоритмов подавления радиолокационных помех к ошибкам оценивания их корреляционных матриц // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – № 4. – С. 28-35;

в изданиях из перечня РИНЦ:

3. Кошелев В.И., Штрунова Е.С. Оценка вычислительных затрат при реализации алгоритма защиты радиолокационных систем от активных шумовых помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2011. – № 2. – С. 39-41.

Прочие публикации:

4. Штрунова Е.С. Алгоритмы пространственной обработки сигналов на фоне активных шумовых помех // Актуальные направления научных исследований: материа-

лы конференции молодых ученых ЦФО РФ. – Калуга, 2009. – С. 357-363.

5. Штрунова Е.С. Алгоритмы защиты РЛС от активных шумовых помех // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. научн. тр. Вып. 5. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 67-71.

6. Кошелев В.И., Штрунова Е.С. Модели сигнала и активной шумовой помехи для исследования алгоритмов пространственной селекции сигналов на фоне активных помех // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XV ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 126-128.

7. Кошелев В.И., Штрунова Е.С. Алгоритмы угловой селекции целей в радиолокационной системе на фоне активных шумовых помех // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 53-58.

8. Штрунова Е.С. Эффективность алгоритмов угловой селекции целей в радиолокационной станции в условиях действия нескольких источников активных шумовых помех // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ–2011»: материалы 7-й молодежной МНТК. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 258.

9. Кошелев В.И., Штрунова Е.С. Влияние ошибок оценивания корреляционных матриц активных шумовых помех на эффективность их подавления // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: труды МНК «Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ–2011». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 472-476.

10. Штрунова Е.С. Повышение быстродействия алгоритмов формирования диаграмм направленности антенной решетки РЛС при действии активных шумовых помех // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ–2011: материалы форума в 3-х томах. Том. 1. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии. Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 158-159.

11. Штрунова Е.С. Снижение вычислительной сложности алгоритма защиты радиолокационной системы от активных помех // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XVI ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2011. – С. 131-133.

12. Штрунова Е.С. Повышение устойчивости алгоритмов защиты РЛС от активных шумовых помех к ошибкам оценки их корреляционных матриц // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восемнадцатая МНТК студентов и аспирантов: тез. докл. в 4 т. Т1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 84.

13. Штрунова Е.С. Влияние расположения управляющих элементов частично адаптивной ФАР на эффективность алгоритмов защиты РЛС от активных шумовых помех // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 6. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 110-114.

14. Кошелев В.И., Штрунова Е.С. Исследование влияния пространственных параметров активных шумовых помех на расположение регулируемых элементов частично адаптивной фазированной антенной решетки радиолокационной системы // Современные телевидение и радиоэлектроника: труды 20-й МНТК. – М.: ФГУП МКБ «Электрон», 2012. – С. 159-161.

15. Штрунова Е.С. Оценка требований к быстродействию процессора, реализующего адаптивный алгоритм подавления активных шумовых помех // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. № XIV-1. – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 241-243.

16. Штрунова Е.С. Оптимальное расположение регулируемых элементов частично адаптивной фазированной антенной решетки РЛС в условиях радиопротиводействия // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ–2012»: материалы 8-й молодежной МНТК. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 47.

17. Штрунова Е.С. Исследование возможности реализации адаптивного алгоритм-

ма подавления активных шумовых помех на базе цифровых сигнальных процессоров // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: материалы форума. Т.3. – Харьков: ХНУРЭ. –2012. – С. 168-169.

18. Штрунова Е.С. Выбор расположения регулируемых элементов частично адаптивной плоской ФАР РЛС в условиях действия активных шумовых помех // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 17-й МНТК. – Рязань: РГРТУ, 2012. – Часть 2. – С. 28-30.

19. Штрунова Е.С. Снижение вычислительных затрат при использовании частичной адаптации фазированной антенной решетки РЛС // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XVII ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 58-60.

20. Штрунова Е.С. Применение экстраполяции для формирования оценочной межканальной корреляционной матрицы активных шумовых помех // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: сб. статей I международной заочной НТК. Ч. 2 / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2013. – С. 65-68.

21. Штрунова Е.С. Формирование межканальной корреляционной матрицы активной помехи при ограничении размерности выборочного вектора // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С. 99-103.

22. Штрунова Е.С. Применение частных производных функционала для определения расположения управляющих элементов в частично адаптивной фазированной антенной решетке // Современные телевидение и радиоэлектроника: труды 21-й МНТК. – М.: ФГУП МКБ «Электрон», 2013. –С. 131-133.

23. Штрунова Е.С. Повышение скорости адаптации ФАР РЛС в условиях радиоэлектронного подавления // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013»: Материалы 9-й молодежной МНТК. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 87.

24. Штрунова Е.С. Анализ эффективности алгоритмов формирования нулей диаграммы направленности ФАР при экстраполяции автокорреляционной последовательности активных шумовых помех // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 10-й МНТК. Т. 1. – Владимир: ВлГУ, 2013. – С. 68-70.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

25. Штрунова Е.С., Холопов И.С. Программа для определения эффективности алгоритмов защиты радиолокационной системы на фоне активных шумовых помех. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2013610095 от 09.01.2013 г.

ШТРУНОВА ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

Алгоритмы пространственного подавления активных шумовых помех
в радиотехнических системах с частично адаптивными ФАР

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.10.13. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 6113

ООО «НПЦ «Информационные технологии».
390035, Рязань, ул. Островского, 21/1