

На правах рукописи



Фролов Игорь Иванович

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ
НА РАСКРЫВЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ**

Специальности

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения,

05.12.07 - Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель Паршин Юрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»

Официальные оппоненты Костров Виктор Васильевич, доктор
технических наук, профессор, Муром-
ский институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Владимирский государственный уни-
верситет имени Александра Григорье-
вича и Николая Григорьевича Столето-
вых», г. Муром, профессор

Курочкин Александр Петрович, доктор
технических наук, профессор, ОАО
«Концерн радиостроения «Вега»»,
г. Москва, начальник отдела

Ведущая организация ОАО «Радиофизика», г. Москва

Защита состоится 19 декабря 2014 года в 12 часов 00 минут на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005,
Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ауд. 235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязан-
ский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан 25 октября 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время предъявляются высокие требования к точности, функциональности, гибкости управления, технологичности радиотехнических систем. Многие из этих требований выполняются в результате применения антенных решеток (АР), обеспечивающих гибкость и высокую точность диаграммообразования, надежность. При этом точность формирования амплитудно-фазового распределения радиосигналов (АФРС) на раскрыве АР во многом определяет потенциальные характеристики всей радиотехнической системы. Поэтому оценивания АФРС имеет важное значение и является актуальной задачей.

Высокочастотные методы диагностики дают наиболее полную информацию о характеристиках АР, позволяют оценить амплитудные и фазовые ошибки в каждом из каналов АР и реальное АФРС всей АР в целом. Среди последних следует выделить амплифазометрический, метод, модуляционный метод поэлементного контроля, матрично-коммутационный метод. Несмотря на то, что ограничения методов дальней зоны могут быть значительно ослаблены путем использования коллиматоров, точностные характеристики остаются недостаточно высокими. Немаловажными являются эксплуатационные характеристики, отражающие возможность автоматического оценивания АФРС в составе радиотехнического комплекса.

Большой вклад в развитие теории оценивания параметров и фильтрации радиосигналов на фоне помех внесли отечественные и зарубежные ученые: Сосулин Ю.Г., Тихонов В.И., Ярлыков М.С., Сейдж Э., Трифонов А.П., Ван Трис Г., Костров В.В. В области оценивания параметров АФРС и диагностики антенных решеток известны своими работами Амигей Н., Андерсон А., Бахрах Л.Д., Воронин Е.Н., Воскресенский Д.И., Вендик О.Г., Гостюхин В.Л., Криштопов А.В., Курочкин А.П., Турчин В.И., Шифрин Я.С., Цейтлин Н.М.

Широкое распространение нашел амплифазометрический метод оценивания АФРС на раскрыве АР, что связано с применением коллиматоров для создания плоской волны. Данный метод эффективен как для сравнительно больших антенн, так и в случае малых антенн, где требуется более точный учет особенностей конструкции АР. Достоинством данного метода является его универсальность, что позволяет по оцениванию поля вблизи антенны рассчитывать диаграмму направленности антенны, АФРС с учетом пространственной структуры приемо-передающей системы, поляризации поля, особенностей поля в ближней и дальней зонах и т.п.

При оценивании АФРС решается обратная задача восстановления АФРС по измеренному радиосигналу на выходе диаграммообразующей схемы АР. Математическим методам решения обратной задачи посвящены работы следующих авторов: Алберт А., Загускин В.Л., Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Митра Р., Поповкин В.И., Стронгин Р.Г. Возможность

точного обращения матрицы непосредственно связана с ее обусловленностью. При оценивании АФРС матрица пространственного преобразования радиосигнала определяется пространственной структурой АР – расположением элементов АР, а также пространственной структурой приемо-передающей системы. Поэтому возникает задача согласования пространственной структуры АР с пространственной структурой приемо-передающей системы с целью уменьшения погрешности оценивания.

Так как оценивание параметров радиосигналов сопровождается ошибками и производится в присутствии шумов и помех, то методологической основой синтеза и анализа алгоритмов оценивания является теория случайных величин и случайных процессов, а также теория оптимальных статистических решений. Спецификой применения статистических методов при оценивании АФРС является возможная неустойчивость решения обратной задачи, что вызывает увеличение ошибок оценивания.

Большинство методов оценивания АФРС используют в том или ином виде данные о пространственном расположении элементов АР, а также о расположении в пространстве приемного зонда. Эти параметры, как отмечено выше, влияют на точность оценивания АФРС, а их рациональный выбор может существенно повысить эффективность диагностики. Оптимизации пространственной структуры при статистическом оценивании не уделялось должного внимания. Поэтому исследование влияния пространственной структуры на точность оценивания АФРС, разработка оптимальных алгоритмов оценивания при соответствующей оптимизации пространственной структуры приемо-передающей системы являются актуальной научно-технической задачей.

Цель и задачи работы. Целью исследований является повышение точности оценивания амплитудно-фазового распределения радиосигналов на раскрытие антенной решетки путем использования эффективных алгоритмов оценивания и оптимизации пространственной структуры приемо-передающей системы.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи:

1) синтеза и анализа алгоритма оценивания неизвестного АФРС методом максимального правдоподобия с учетом погрешностей позиционирования элементов АР и угловых положений передатчика радиосигнала;

2) разработки алгоритмов линейного и нелинейного итерационного оценивания АФРС и фазового распределения радиосигналов при известном амплитудном распределении;

3) оценивания АФРС при непрерывном сканировании и оптимальной пространственной структуре приемо-передающей системы;

4) анализа алгоритма оценивания фазового распределения двумерной АР при воздействии комплекса погрешностей поворотного устройства и шумов наблюдения;

5) оценивания АФРС с учетом взаимного влияния элементов АР и неопределенности положения оси вращения поворотного устройства.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе, основаны на статистической теории радиотехнических систем, параметрическом моделировании случайных процессов, численных алгоритмах поиска экстремума, математическом моделировании. Основные числовые результаты получены на основе аналитических и вычислительных математических методов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы оценивания параметров радиосигналов по критерию максимального правдоподобия, обеспечивающие дисперсию ошибки оценивания близкую к границе Рао – Крамера при оптимальной пространственной структуре приема-передающей системы.

2. Оптимальная пространственная структура углового расположения передатчика тестового радиосигнала при оценивании АФРС АР, позволяющая в 3...20 раз уменьшить дисперсию ошибки оценивания.

3. Алгоритмы итерационного оценивания АФРС при известном амплитудном распределении радиосигнала, позволяющие уменьшить дисперсию ошибки оценивания в 3...5 раз по сравнению с неитерационными алгоритмами.

4. Алгоритм оценивания АФРС в условиях априорной неопределенности относительно параметров поворотного устройства, позволяющий уменьшить ошибку оценивания и повысить эксплуатационные характеристики испытательного стенда.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1) впервые исследовано влияние пространственной структуры приема-передающей системы в широком диапазоне условий оценивания АФРС, что позволило улучшить обусловленность матрицы пространственного преобразования, особенно при большом числе элементов АР, и вследствие этого уменьшить дисперсию ошибки оценивания АФРС,

2) разработан новый алгоритм оптимального оценивания АФРС, учитывающий погрешности позиционирования элементов АР и угловых положений передатчика радиосигнала, что позволило уменьшить погрешность оценивания в 2..5 раз,

3) показано, что итерационные алгоритмы оценивания АФРС имеют более высокие точностные характеристики при оптимальной пространственной структуре приема-передающей системы по сравнению с неитерационными алгоритмами при одинаковом объеме наблюдаемых данных,

4) методом численного анализа установлено, что оптимальная по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценивания АФРС пространственная структура приема-передающей системы позволяет получить матрицу пространственного преобразования с минимальным числом

обусловленности.

Практическая значимость. Полученные алгоритмы оценивания АФРС с оптимизацией пространственной структуры приемо-передающей системы позволяют существенно уменьшить дисперсию ошибки оценивания. Применение алгоритмов оценивания АФРС, разработанных с учетом ошибок и шумов наблюдений, ошибок позиционирования, смещения оси вращения поворотного устройства, повышают точность и производительность испытаний АР в составе автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ТМСА-1.0-40.0К в коллиматорном зале №3 ОАО «Государственный Рязанский приборный завод».

Внедрение научных результатов. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в алгоритмическое и программное обеспечение испытательного стенда в ОАО «Государственный Рязанский приборный завод», а также в учебный процесс на кафедре радиотехнических устройств ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Апробация работы проведена в процессе научных дискуссий на следующих научно-технических конференциях: XIII, XV, XVI Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», г.Москва, 2011, 2013, 2014 г.г., международная научно-техническая конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», г.Таганрог, 2013 г., XXIII международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2013 г., «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы», научно-практическая конференция, г.Муром, 2004 г., XXIII, XXIV Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред», г.Санкт-Петербург, 2005, 2006 г.г., XIII, XVII, XIX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г.Воронеж, 2002, 2011, 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации научных результатов кандидатских диссертаций, 4 патента на изобретения, 1 статья в межвузовском сборнике научных трудов, 12 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и приложений. Диссертация содержит 175 с., в том числе 145 с. основного текста, 1 таблицу и 96 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и решаемые в работе задачи, изложены новые научные результаты, полученные в работе, показаны её практическая ценность, приведены сведения о публикациях и апробации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе освещено состояние вопроса, являющегося предметом исследования; рассмотрены методы оценивания параметров радиосигналов. Более подробно рассмотрены методы и алгоритмы оценивания АФРС на раскрыве антенной решетки. Отмечено, что наилучшие результаты могут быть получены путем анализа радиосигналов методами оптимальных статистических решений. В связи с этим оптимизация пространственной структуры приемо-передающей системы является одним из резервов повышения эффективности оценивания.

Во второй главе проводится анализ влияния погрешностей положения элементов антенной решетки, ошибок векторного анализатора и позиционирования поворотного устройства на точность оценивания амплитудно-фазового распределения коллиматорным методом при различных пространственных структурах приемо-передающей системы. Проводится синтез и анализ алгоритма оценивания неизвестного АФРС методом максимального правдоподобия.

Исследована линейная эквидистантная АР, содержащая N одинаковых элементов. Точки измерения - расположения источника тестового радиосигнала - располагаются равномерно в угловом секторе $\Delta\gamma$, который ориентирован под углом γ_0 к нормали антенной решетки. Для оценивания комплексного вектора АФРС $\underline{\mathbf{X}} = \{X_i, i = 1, \dots, N\}$ на раскрыве АР производится измерение радиосигнала на выходе диаграммообразующей схемы АР при различном положении источника тестового радиосигнала. Комплексная матрица пространственного преобразования тестового радиосигнала для линейной АР имеет вид

$$\underline{\mathbf{A}} = \left\{ A_{i,m} = \exp\left\{-\frac{2\pi}{\lambda} x_i \sin \gamma_m\right\}, i = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M \right\},$$

а наблюдаемые данные записываются в векторно-матричном виде

$$\underline{\mathbf{Y}} = \{Y_m, m = 1, \dots, M\} = \underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{X}} + \underline{\mathbf{N}},$$

где λ -длина волны, $\underline{\mathbf{N}}$ -вектор гауссовского шума с корреляционной матрицей $\underline{\mathbf{R}}_N = D_N \mathbf{I}$. Анализ зависимостей дисперсии \overline{D}_{err} ошибки АФРС от размера углового сектора $\Delta\gamma$ проведен путем расчета границы Рао – Крамера, а также методом статистического моделирования (рисунок 1).

В результате анализа получена оптимальная по критерию минимума среднего квадрата ошибки АФРС величина углового сектора измерений $\Delta\gamma = 120^\circ$, что можно трактовать как существование оптимальной пространственной структуры приемо-передающей системы. Увеличение

числа точек измерения M приводит к переопределенности матрицы \mathbf{A} и уменьшению вследствие этого ошибки измерения. Вместе с тем увеличение M снижает чувствительность дисперсии ошибки к значению ширины углового сектора $\Delta\gamma$ и, следовательно, упрощает техническую реализацию оптимальной пространственной структуры приемо-передающей системы. Увеличение числа элементов АР приводит к более резкой зависимости дисперсии ошибки от $\Delta\gamma$, что требует более точного установления величины углового сектора.

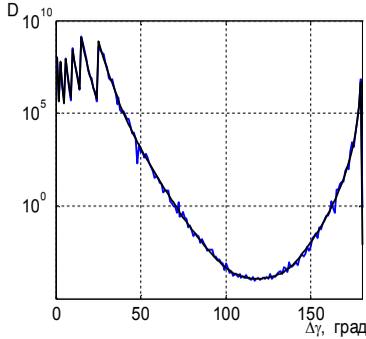


Рисунок 1

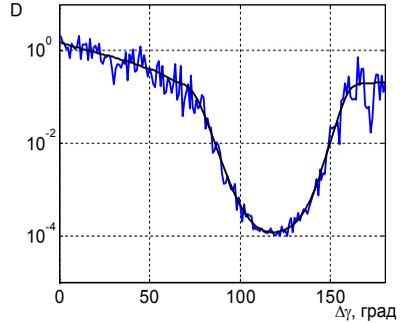


Рисунок 2

Рассмотрен случай, когда искомое АФРС является совокупностью гауссовских комплексных чисел

$$\underline{\mathbf{X}} = \{ \underline{X}_i = X_{Ri} + jX_{Ii}, i = 1, \dots, N \},$$

где X_{Ri} , X_{Ii} - независимые гауссовские случайные числа с дисперсией D_X , математическое ожидание вектора $\underline{\mathbf{X}}$ равно $\underline{\mathbf{X}}_0$, а корреляционная матрица $\underline{\mathbf{R}}_X = \overline{\underline{\mathbf{X}}\underline{\mathbf{X}}^H} = D_X \mathbf{I}$. Для оценивания АФРС использован известный оптимальный по критерию минимума среднего квадрата ошибки алгоритм:

$$\hat{\underline{\mathbf{X}}}_{MMSE} = \underline{\mathbf{X}}_0 + (\underline{\mathbf{R}}_X^{-1} + \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{R}}_N^{-1} \underline{\mathbf{A}})^{-1} \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{R}}_N^{-1} (\underline{\mathbf{Y}} - \underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{X}}_0).$$

Представим обработку в виде матричного фильтра с характеристикой $\underline{\mathbf{G}} = (\underline{\mathbf{R}}_X^{-1} + \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{R}}_N^{-1} \underline{\mathbf{A}})^{-1} \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{R}}_N^{-1}$. Дисперсионная матрица ошибок оцениваемого вектора АФРС равна

$$\underline{\mathbf{R}}_\varepsilon = \underline{\mathbf{R}}_X - \underline{\mathbf{R}}_X \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{G}}^H - \underline{\mathbf{G}} \underline{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{R}}_X + \underline{\mathbf{G}} (\underline{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{R}}_X \underline{\mathbf{A}}^H + \underline{\mathbf{R}}_N) \underline{\mathbf{G}}^H.$$

На рисунке 2 приведена зависимость дисперсии ошибки измерения случайного АФРС от углового сектора измерений. Расчеты дисперсии ошибки оценивания АФРС, а также моделирование при $N = 10$, $D_N = 2 \times 10^{-4}$, $D_X = 2$ показали, что при увеличении M оптимальная величина углового сектора увеличивается. Установлено, что при малых значениях $\Delta\gamma$ возникает сильная неравномерность зависимости дисперсии ошибки, что объясняется увеличением числа обусловленности матрицы $\underline{\mathbf{A}}$.

Анализ результатов аналитического исследования и вычислительного эксперимента (рисунок 2) позволяет установить следующие причины некорректности обратной задачи оценивания АФРС: 1) увеличение числа элементов АР; 2) уменьшение углового сектора измерений; 3) уменьшение расстояния между элементами АР. Для обеспечения устойчивого обращения матрицы $\underline{\mathbf{A}}$ и получения высокоточных оценок АФРС необходимо: 1) увеличивать отношение сигнал-шум; 2) выбирать оптимальную величину углового сектора расположения передатчика, то есть оптимальную пространственную структуру приемо-передающей системы; 3) согласовывать параметры алгоритма измерений с числом элементов АР и расстоянием между элементами АР, то есть с пространственной структурой АР; 4) увеличивать число точек измерения.

Методом максимального правдоподобия проведен синтез алгоритма оценивания АФРС при наличии ошибок позиционирования элементов АР и угловых положений точек измерения. В общем случае матрица $\underline{\mathbf{A}}$ задана неточно вследствие погрешностей в определении координат элементов АР δx_i , δy_i и угловых направлений на источник тестового радиосигнала $\delta\alpha_m$, $\delta\gamma_m$. Полагая компоненты вектора погрешностей $\delta\mathbf{p}$ независимыми гауссовскими величинами, рассчитаем погрешности элементов матрицы в линейном приближении и векторизованном виде :

$$\delta \underline{\mathbf{A}} \uparrow = \underline{\mathbf{A}} \uparrow - \underline{\mathbf{A}}_0 \uparrow = \frac{d \underline{\mathbf{A}}_0 \uparrow}{d \mathbf{p}} \delta \mathbf{p}.$$

Корреляционная матрица погрешностей $\mathbf{R}_{\delta A}$ зависит от дисперсий ошибок, а также от значений, характеризующих пространственной структуры АР x_i, y_i и измерений α_m, γ_m :

$$\mathbf{R}_{\delta A} = \frac{d \underline{\mathbf{A}}_0 \uparrow}{d \mathbf{p}} \delta \mathbf{p} \delta \mathbf{p}^T \left(\frac{d \underline{\mathbf{A}}_0 \uparrow}{d \mathbf{p}} \right)^H = \frac{d \underline{\mathbf{A}}_0 \uparrow}{d \mathbf{p}} \mathbf{R}_{\delta p} \left(\frac{d \underline{\mathbf{A}}_0 \uparrow}{d \mathbf{p}} \right)^H,$$

где $\mathbf{R}_{\delta p}$ - корреляционная матрица ошибок. Получено необходимое условие максимума отношения правдоподобия:

$$\left(2\mathbf{A}_0^H \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{Y} - 2\mathbf{A}_0^H \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{A}_0 \mathbf{X}\right) \times \left(1 - \mathbf{X}^H \mathbf{Q} \mathbf{X}\right) - \mathbf{Q}^H \mathbf{X} = 0,$$

что позволяет записать приближенное выражение для оценки АФРС:

$$\hat{\mathbf{X}}_{ML} = \left(2\mathbf{A}_0^H \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{A}_0 + \mathbf{Q}^H\right)^{-1} 2\mathbf{A}_0^H \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{Y}.$$

Более общее решение задачи оптимизации пространственной структуры получено с использованием условия ортогональности столбцов матрицы пространственного преобразования \mathbf{A} . При точном выполнении условия ортогональности оценка АФРС имеет вид $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}^H \mathbf{Y}$. При неточном выполнении условия ортогональности используется псевдообращение матрицы \mathbf{A} по Муру – Пенроузу, которое более устойчиво при оптимальной пространственной структуре. Использован критерий минимума коэффициентов корреляции столбцов матрицы \mathbf{A} , усредненной по вероятностной мере $w_\gamma(\gamma)$ угловых координат точек измерения:

$$w_{opt}(\gamma) = \arg \min_{w_\gamma(\gamma)} \bar{R} = \arg \min_{w_\gamma(\gamma)} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \left| \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \sin \gamma (x_n - x_k)\right\} w_\gamma(\gamma) d\gamma \right|^2.$$

Анализ на примере линейной АР показал, что минимальное значение корреляции $r_{nk} = 0$, при $n \neq j$ получается при условии, что комплексные векторы $a_{in}^* a_{ik}$ равномерно распределены в диапазоне углов $(-\pi, +\pi)$, что обеспечивается при выполнении условия

$$\frac{2\pi}{\lambda} (x_k - x_n) \sin \gamma_m = \frac{2\pi}{M} \left(m - \frac{M}{2}\right), \quad n, k = 1, \dots, N, \quad m = 1, \dots, M.$$

При решении оптимизационной задачи методом неопределенных множителей Лагранжа полагается, что расстояния между элементами АР имеют известное распределение вероятностей. Используются различные виды параметрической аппроксимации $w_\gamma(\gamma)$: семейство плотностей β -распределения, ступенчатой функцией. Оптимальные угловые координаты точек измерения определяются по положениям M максимумов функции $w_\gamma(\gamma)$.

В третьей главе диссертации проводится разработка алгоритмов линейного и нелинейного итерационного оценивания АФРС.

Разработан итерационный алгоритм решения обратной задачи на основе гипотезы квазиортогональности, основанный на предположении

малого отличия матрицы $\underline{\mathbf{A}}$ от ортогональной матрицы. Первое приближение искомой оценки получается в предположении полной ортогональности $\hat{\underline{\mathbf{X}}}_1 = \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{Y}}$. На основе полученной оценки $\hat{\underline{\mathbf{X}}}_1$ формируется восстановленный вектор наблюдаемых данных: $\underline{\mathbf{Y}}_1 = \underline{\mathbf{A}} \hat{\underline{\mathbf{X}}}_1$. Невязка исходных и восстановленных наблюдаемых данных имеет вид $\underline{\mathbf{D}}_2 = \underline{\mathbf{Y}} - \underline{\mathbf{Y}}_1$. Оценка разности между оценкой и точным значением АФРС на этом этапе равна $\hat{\underline{\mathbf{X}}}_2 = \underline{\mathbf{A}}^H \underline{\mathbf{D}}_2$. Данная процедура повторяется несколько раз до получения необходимой точности. Искомая оценка равна сумме оценки первого приближения и оценок всех невязок: $\hat{\underline{\mathbf{X}}} = \sum_{k=1}^m \hat{\underline{\mathbf{X}}}_k$.

Проведено сравнение предложенного алгоритма с известными итерационными алгоритмами псевдообращения по Муру – Пенроузу и алгоритмом Шульца. Получены зависимости времени выполнения одного измерения АФРС с помощью различных алгоритмов от числа итераций при $N=100$ при моделировании на ПК в среде MatLab и использовании процессора Intel® Core™2 Duo 2,81 ГГц. Показано, что предложенный алгоритм оценивания обладает значительной вычислительной эффективностью, превышающей вычислительную эффективность алгоритма псевдообращения более чем в 2...20 раз, в зависимости от числа итераций.

Проведен анализ рекуррентных линейных алгоритмов оценивания АФРС при оптимальной пространственной структуре приемопередающей системы. АФРС является гауссовским случайным процессом с корреляционной матрицей $\underline{\mathbf{R}}_X = D_X \mathbf{I}$, динамика состояния которого описывается уравнением вида: $\underline{\mathbf{X}}_{m+1} = \underline{\mathbf{X}}_m$ при $\underline{\mathbf{X}}(t_0) = \underline{\mathbf{X}}_0$. Измеренное m -е значение комплексного сигнала с выхода АР при различных угловых положениях поворотного устройства имеет вид

$$\underline{\mathbf{Y}}_m = \underline{\mathbf{A}}_m \underline{\mathbf{X}}_m + \underline{\mathbf{N}}_m, \quad m = 1, \dots, M.$$

Так как от момента m времени зависит угловое положение поворотного устройства, задаваемое матрицей пространственного преобразования $\underline{\mathbf{A}}$, а также значение шумов наблюдения $\underline{\mathbf{N}}_m$, то задача оценивания АФРС сформулирована как частный случай фильтрации гауссовского процесса $\underline{\mathbf{X}}_m = \underline{\mathbf{X}}$. Для оценивания АФРС использованы уравнения многомерной оптимальной линейной фильтрации комплексного случайного процесса по критерию минимума среднего квадрата ошибки:

$$\hat{\underline{\mathbf{X}}}_{m+1} = \hat{\underline{\mathbf{X}}}_m + \underline{\mathbf{K}}_m (\underline{\mathbf{Y}}_{m+1} - \underline{\mathbf{A}}_{m+1} \hat{\underline{\mathbf{X}}}_m), \quad \underline{\mathbf{P}}_{m+1} = (\underline{\mathbf{P}}_m^{-1} + \underline{\mathbf{A}}_{m+1}^H \underline{\mathbf{R}}_N^{-1} \underline{\mathbf{A}}_{m+1})^{-1},$$

$$\underline{\mathbf{K}}_{m+1} = \underline{\mathbf{P}}_{m+1} \underline{\mathbf{A}}_{m+1}^H \underline{\mathbf{R}}_N^{-1},$$

где $\hat{\underline{\mathbf{X}}}_{m+1}$ – комплексная оптимальная оценка АФРС; $\underline{\mathbf{K}}_{m+1}$ – комплексные оптимальные коэффициенты передачи; $\underline{\mathbf{P}}_{m+1}$ – матрица апостериорных

центральных моментов второго порядка.

Анализ линейного рекуррентного алгоритма оценивания АФРС проведен методом статистического моделирования на примере линейной эквидистантной АР для расстояния между элементами АР, равного $d = 0,5\lambda$, $M = N = 20$, отношения сигнал-шум $q = 20$ дБ. Начальные условия $\underline{\mathbf{X}}(t_0)$ при моделировании фильтра Калмана выбирались: а) случайными с вероятностными характеристиками как и в исходном АФРС; б) равными точному значению АФРС, в) равными нулю.

Установлено, что начальные условия рекуррентного алгоритма фильтрации Калмана существенно влияют на точность оценивания при неоптимальном угловом секторе измерений. Начальное условие $\underline{\mathbf{X}}(t_0) = 0$ не требует априорных сведений о статистике оцениваемых величин и позволяет получить наиболее точные оценки АФРС при оптимальных угловых секторах измерений. При малом числе элементов АР рекуррентный алгоритм уменьшает дисперсию ошибки до 4 раз по сравнению с нерекуррентным алгоритмом, если пространственная структура приемопередающей системы не оптимальная, и совпадает по эффективности с алгоритмом максимального правдоподобия при оптимальной пространственной структуре.

Для АР с фазовым управлением синтезирован нелинейный рекуррентный алгоритм оценивания фазового распределения $\Phi = \{\Phi_n, n = 1, \dots, N\}$ при известном амплитудном распределении на раскрыве АР. Вектор оцениваемых параметров задан в виде совокупности аргументов АФРС. Искомое фазовое распределение полагается гауссовским случайным процессом с корреляционной матрицей $\mathbf{R}_\Phi = \mathbf{M}\{\Phi\Phi^T\} = D_\Phi \mathbf{I}$, динамика вектора состояния которого описывается уравнением вида $\Phi_{m+1} = \Phi_m$, $\Phi(t_0) = \Phi_0$. Уравнения многомерной квазилинейной фильтрации по критерию максимума апостериорной вероятности конкретизированы применительно к решаемой задаче оценивания фазового распределения:

- алгоритма фильтрации $\hat{\Phi}_{m+1} = \hat{\Phi}_m + \mathbf{K}_{m+1} (\mathbf{Y}_{m+1} - \mathbf{H}_{m+1} (\hat{\Phi}_m))$,

- вычисления коэффициента усиления $\mathbf{K}_{m+1} = \mathbf{P}_{m+1} \left(\frac{\partial \mathbf{H}_m}{\partial \hat{\Phi}} \right)^T \mathbf{R}_N^{-1}$,

- вычисления ковариационной матрицы ошибок

$$\mathbf{P}_{m+1} = \mathbf{P}_m - \mathbf{P}_m \frac{\partial \mathbf{H}_{m+1}}{\partial \hat{\Phi}_m} \left(\frac{\partial \mathbf{H}_{m+1}}{\partial \hat{\Phi}_m} \mathbf{P}_m \frac{\partial \mathbf{H}_{m+1}}{\partial \hat{\Phi}_m} + \mathbf{R}_N \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}_{m+1}}{\partial \hat{\Phi}_m} \mathbf{P}_m,$$

где $\hat{\Phi}_{m+1}$ – оптимальная оценка фазового распределения, \mathbf{K}_{m+1} – оптимальные коэффициенты передачи фильтра, \mathbf{P}_{m+1} – матрица апостериор-

ных центральных моментов второго порядка.

Проведенный анализ свойств матрицы пространственного преобразования \underline{A} показал, что число обусловленности существенно зависит от пространственной структуры приемо-передающей системы. При оптимальной величине углового сектора расположения точек измерения обусловленность матрицы \underline{A} существенно улучшается и принимает значения $\mu(\underline{A})=0,5\dots 30$, что позволяет получить минимальную ошибку оценивания АФРС. Так как анализ обусловленности матрицы несложен и требует сравнительно небольших вычислительных затрат, то величина $\mu(\underline{A})$ представляет собой адекватный, универсальный и конструктивный показатель качества пространственной структуры.

В четвертой главе исследованы вопросы технической реализации алгоритмов оценивания АФРС.

С использованием предложенных алгоритмов оценивания АФРС с оптимизацией пространственной структуры приемо-передающей системы разработана структурная схема стенда на основе автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ТМСА-1.0-40.0К, а также методика проведения испытаний.

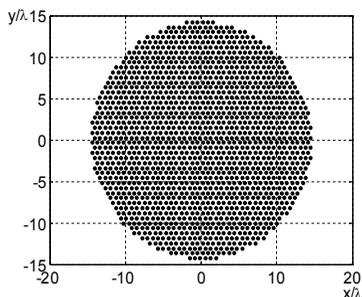


Рисунок 3

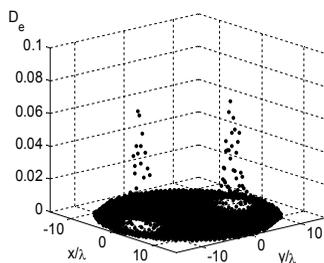


Рисунок 4

Исследованы особенности оценивания АФРС двумерной АР, геометрия расположения антенных элементов которой представлена на рисунке 3. Так как применяемое поворотное устройство имеет систему угловых координат, отличную от системы координат АР, произведен пересчет из системы координат поворотного устройства в систему координат АР. На рисунке 4 приведено распределение ошибки оценивания по раскрытию АР при $M = N$, $\Delta\gamma = 120^\circ$, которое определяется специфической геометрией расположения элементов АР. Определено оптимальное значение сектора измерений $120^\circ\dots 130^\circ$, при котором дисперсия ошибки уменьшается на несколько порядков по сравнению с неоптимальным значением. Увеличение числа точек измерения уменьшает величину ошибки, а также делает ее распределение по раскрытию более равномерным.

Проведена модификация предложенных алгоритмов, учитывающая взаимное влияние элементов АР $\underline{Y} = \underline{A}_e \underline{X}$, где $\underline{A}_e = \underline{A}(\underline{Z}^{-1})^T$ - эквивалентная матрица пространственного преобразования радиосигнала, \underline{Z} - матрица взаимных импедансов элементов АР в виде тонких вибраторов. Установлено, что обусловленность эквивалентной матрицы существенно улучшается при оптимальном значении углового сектора измерений, величина которого согласуется с ранее полученным значением.

Проведено моделирование алгоритма оценивания АФРС с учетом взаимного влияния элементов АР в следующих случаях: 1) наблюдения получены при взаимном влиянии элементов АР, а обработка производится без учета взаимного влияния элементов АР; 2) наблюдения получены при взаимном влиянии элементов АР, и обработка производится с учетом взаимного влияния элементов АР; 3) наблюдения и обработка моделируются без учета взаимного влияния элементов АР при $D_N = 10^{-4}$, $d = \lambda/2$, $N = M = 10$.

Результаты расчетов показали (рисунок 5), что взаимное влияние элементов АР существенно сказывается на результатах оценивания. При оптимальных значениях углового сектора измерений, когда дисперсия ошибки минимальна, наличие взаимного влияния резко увеличивает дисперсию ошибки оценивания даже при сравнительно больших расстояниях между элементами АР. При проведении коррекции матрицы пространственного преобразования в соответствии с взаимным влиянием элементов АР уменьшение дисперсии ошибки оценивания АФРС составляет 10 раз и более, в зависимости от числа точек измерения.

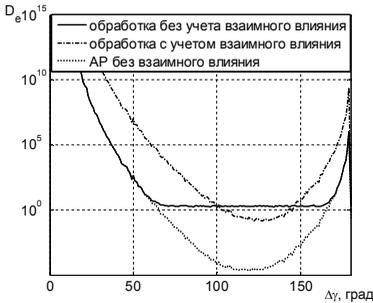


Рисунок 5

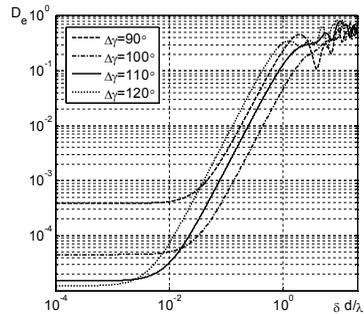


Рисунок 6

При практической реализации алгоритмов установлено сильное влияние неопределенности положения оси вращения поворотного устройства на дисперсию ошибки оценивания АФРС (рисунок 6). Поставлена и решена задача совместного оценивания АФРС и положения оси

вращения поворотного устройства на примере линейной АР методом максимального правдоподобия. Наличие ошибки в величине смещения приводит к неоптимальной весовой матрице

$$\mathbf{W}(\delta r) = \left(\mathbf{A}(\delta r)^H \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{A}(\delta r) \right)^{-1} \mathbf{A}(\delta r)^H \mathbf{R}_N^{-1}.$$

Разработан адаптивный алгоритм, производящий совместное оценивание АФРС и смещения оси вращения.

В заключении сформулированы научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Установлено определяющее влияние пространственной структуры приемо-передающей системы на величину ошибки оценивания АФРС методом максимального правдоподобия и минимума среднего квадрата ошибки. Оптимизация пространственной структуры позволяет повысить устойчивость решения обратной задачи, особенно при большом числе элементов АР.

2. При наличии неопределенности позиционирования элементов АР и пространственного положения точек измерения синтезирован алгоритм максимально правдоподобного оценивания АФРС.

3. Задача оптимизации пространственной структуры приемо-передающей системы АФРС решена с применением статистических моделей: расстояния между элементами АР представлены в виде случайных величин, оптимальная пространственная структура представлена в виде распределения вероятностей угловых координат. Полученное в результате оптимизации распределение вероятностей угловых координат точек измерения имеет преимущественно дискретный характер, что указывает на наличие счетного числа угловых координат, в которых необходимо расположить источник тестового радиосигнала.

4. Разработан итерационный алгоритм оценивания АФРС, использующий свойство квазиортогональности столбцов матрицы пространственного преобразования и обеспечивающий меньшую ошибку оценивания, а также при оптимальной пространственной структуре приемо-передающей системы на порядок и более уменьшающий вычислительные затраты по сравнению с общим случаем.

5. Исследован линейный итерационный алгоритм оценивания АФРС, не требующий хранения всех наблюдаемых данных и позволяющий получать текущую оценку АФРС до окончания всего цикла измерений. Установлено, что итерационный алгоритм является более предпочтительным при большом числе элементов АР, что дает выигрыш в дисперсии ошибки оценивания алгоритма около 4 раз при оптимальной пространственной структуре приемо-передающей системы по сравнению с оценкой максимального правдоподобия.

6. Синтезирован квазилинейный алгоритм фильтрации фазового распределения при известном значении амплитудного распределения, позволяющий уменьшить ошибку оценивания фазы в 5 раз за счет исполь-

зования информации об амплитудном распределении на раскрыве АР.

7. Разработан алгоритм оценивания АФРС при непрерывном сканировании АР, вызванном инерционностью поворотного устройства. Предложено уменьшить время измерений таким образом, чтобы вызванное этим увеличение ошибки наблюдений компенсировалось уменьшением ошибки вследствие непрерывности сканирования, а суммарная ошибка оценивания АФРС была минимальна.

8. Разработаны структура, состав измерительного стенда и методики измерения АФРС на основе автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ТМСА-1.0-40.0К, предназначенного для измерения радиотехнических характеристик антенных устройств в диапазоне частот 0,8...40 ГГц.

9. Доказано наличие оптимальной пространственной структуры приема-передающей системы для двумерных АР. Установлено, что при оптимальной пространственной структуре приема-передающей системы распределение ошибок по раскрыву двумерной АР более равномерно.

10. Проведен анализ погрешности оценивания фазового распределения двумерной АР при воздействии комплекса погрешностей векторного анализатора, поворотного устройства и погрешностей позиционирования элементов АР. Определено оптимальное значение уровня значимости сингулярных чисел, при котором ошибка оценивания минимальна.

11. Установлено, что при оптимальных значениях углового сектора измерений, когда дисперсия ошибки минимальна, наличие взаимного влияния элементов АР резко увеличивает дисперсию ошибки оценивания. Исследован алгоритм оценивания АФРС, учитывающий взаимное влияние элементов АР.

12. Исследовано влияние смещения оси вращения поворотного устройства относительно раскрыва антенной решетки на точность оценивания. В условиях неопределенности величины смещения оси вращения предложен алгоритм адаптивного оценивания амплитудно-фазового распределения, рассчитана ошибка оценивания и предложены пути ее уменьшения.

Список основных опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Фролов И.И. Оценивание амплитудно-фазового распределения при непрерывном сканировании антенной решетки // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - Рязань: РГРТУ, 2013. - №4. Вып. 46. Часть 2. - С.109-111.

2. Паршин Ю.Н., Фролов И.И. Рекуррентное оценивание амплитудно-фазового распределения при оптимальной пространственной структуре измерений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - Рязань: РГРТУ, 2014. - №2. Вып.48. - С. 35-41.

Патенты на изобретения

3. Патент № 2193262 Россия, МПК H01P1/19, G01R31/01. Способ контроля фазовременных характеристик ферромагнитных фазовращателей / И.И. Фролов, Ю.И. Зеленюк, Г.Н. Колодыко, А.В. Шестоपालов, В.И. Мойбенко, Ю.А. Никитин (Россия). - № 2001115333/09; Заявл. 06.06.01; Оpubл. 20.11.02.

4. Патент № 2244937 Россия, МПК G01R17/02, G01R25/02. Двухзондовый способ измерения фазовых сдвигов в балансном кольце / В.Ф. Винярский, В.А. Митин, А.И. Синани, Ю.И. Зеленюк, Г.Н. Колодыко, И.И. Фролов, В.Г. Соколов (Россия). - № 2003123565/09; Заявл. 24.07.03; Оpubл. 20.01.05.

5. Патент № 2276435 Россия, МПК H01Q3/26. Устройство управления фазовым распределением в фазированной антенной решетке / Ю.И. Зеленюк, Г.Н. Колодыко, И.И. Фролов, Ю.А. Никитин, О.А. Путков (Россия). - № 2004126050/09; Заявл. 27.08.04; Оpubл. 10.05.06.

6. Патент № 2275646 Россия, МПК G01R 29/10. Устройство для измерения амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве приемной антенны / Ю.Н. Паршин, И.И. Фролов, А.В. Брагин, Ю.И. Зеленюк, Г.Н. Колодыко (Россия). - № 2004132559/28; Заявл. 10.11.04; Оpubл. 27.04.06, БИ 12.

Статья в сборнике научных трудов и тезисы докладов на научно-технических конференциях

7. Паршин Ю.Н., Фролов И.И. Сравнительный анализ рекуррентных алгоритмов оценивания амплитудно-фазового распределения на основе гипотезы квазиортогональности // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. научн. тр. – Рязань, 2013. – С. 79-83.

8. Паршин Ю.Н., Фролов И.И. Оптимизация пространственной структуры измерений АФР методом ортогонального разложения на основе статистической модели // Труды НТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск: XIII-2- М.: НТОРЭС, 2011. – С. 232-235.

9. Фролов И.И. Синтез и анализ алгоритма оценивания АФР методом максимального правдоподобия с учетом погрешностей позиционирования // XV международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2013»: доклады. - Т.2. - М.: НТОРЭС, 2013. – С. 258-261.

10. Фролов И.И. Оценивание амплитудно-фазового распределения двумерной антенной решетки при оптимальной пространственной структуре измерений // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ - ИРЭМВ-2013». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. – 801 с. - С. 283-286.

11. Фролов И.И. Оценивание амплитудно-фазового распределения двумерной антенной решетки для оптимальной пространственной струк-

туры измерений // XXIII международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). Севастополь, 8-13 сентября 2012 г.: Материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. –1339 с. – Т.2. С. 640-641.

12. Фролов И.И. Свойства матрицы пространственного преобразования при оптимальной пространственной структуре измерений // XVI международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014»: доклады - Т.2. - М.: НТОРЭС, 2014. – С. 691-695.

13. Чалых А.Е., Колодько Г.Н., Фролов И.И., Брагин А.В., Поликашкин Р.В., Соколов В.Г. Метод бесфазовой диагностики ФАР в условиях серийного производства // XVII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 2. – Воронеж: ВГУ, 2002. – С.33-42.

14. Колодько Г.Н., Фролов И.И., Брагин А.В., Поликашкин Р.В., Соколов В.Г. Коммутационные методы настройки ФАР при неидентичных характеристиках фазовращателей // XVII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 2. – Воронеж: ВГУ, 2002. – С.43-49.

15. Паршин Ю.Н., Фролов И.И., Брагин А.В. Синтез пространственной структуры измерения фазового распределения антенной решетки методом ортогонального разложения // Радиолокационная техника: устройства, станции, системы. РЛС-2004. Научно-практическая конференция, посвященная 30-летию Отдела новых разработок Муромского завода радиоизмерительных приборов. Программа конференции и тезисы докладов. 1-3 июня 2004 г. –Муром. – С. 21.

16. Паршин Ю.Н., Зеленюк Ю.И., Колодько Г.Н., Фролов И.И., Брагин А.В. Установка для измерения АФР на раскрые ФАР с использованием оптимальной пространственной структуры измерений // XXIII Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб: ЦНИИ4 МО РФ, 2005. – С. 366-372.

17. Паршин Ю.Н., Брагин А.В., Фролов И.И. Оптимизация пространственной структуры для оценивания АФР в раскрые ФАР на основе последовательных выборок // XXIV Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб: ЦНИИ4 МО РФ, 2006. – С.151-153.

18. Паршин Ю.Н., Фролов И.И., Жариков П.В. Анализ точности измерения амплитудно-фазового распределения антенной решетки методом ортогонального разложения на основе статистической модели // XVII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 2. – Воронеж: ВГУ, 2011. – С. 1514-1521.

19. Фролов И.И. Оценивание амплитудно-фазового распределения на раскрые антенной решетки при наличии смещения оси вращения поворотного устройства // XIX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Т. 1. – Воронеж: ВГУ, 2013. – С. 78-82.

Фролов Игорь Иванович

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ НА РАСКРЫВЕ АНТЕННОЙ
РЕШЕТКИ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.10.14. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ .
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.