

На правах рукописи



АЛЕКСАНДРОВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА  
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ  
С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2017 г.

Работа выполнена на кафедре радиотехнических устройств в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: Паршин Юрий Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой радиотехнических устройств  
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные оппоненты: Костров Виктор Васильевич,  
доктор технических наук, профессор, про-  
фессор кафедры «Радиотехника»  
ФГБОУ ВО «Муромский институт (филиал)  
Владимирского государственного универси-  
тета имени Александра Григорьевича и Ни-  
колая Григорьевича Столетовых», г. Муром.

Кривченков Дмитрий Николаевич,  
кандидат технических наук, ведущий инже-  
нер АО «Государственный рязанский при-  
борный завод», г. Рязань.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информа-  
тики», г. Самара.

Защита диссертации состоится 15 декабря 2017 г. в 12 часов на засе-  
дании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский  
государственный радиотехнический университет» по адресу:  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ря-  
занский государственный радиотехнический университет» и на сайте  
[www.rsgeu.ru](http://www.rsgeu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, про-  
сим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.04

доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Измерители параметров сигнала источника радиоизлучения (ИРИ) находят применение в современных радиотехнических системах (РТС) информационного обмена с беспилотными аппаратами, что обусловлено наличием направленных антенных систем (АС), использование которых позволяет повысить пропускную способность каналов передачи данных. Таким образом, решение задачи определения направления на источник радиоизлучения и соответствующая ориентация антенны позволяет реализовать потенциальную энергетическую эффективность РТС.

Система определения направления на ИРИ может быть реализована на основе многоканальной приемной системы (ПрС) в виде АС с небольшим числом элементов. Преимуществом применения малоэлементных систем является возможность цифрового диаграммообразования (ЦДО), оптимальной пространственной обработки сигналов и компенсации помех при относительно простой технической реализации. Использование малоэлементной адаптивной цифровой ПрС позволяет получить потенциальную помехоустойчивость под воздействием пространственно-коррелированных помех в условиях статистической априорной неопределенности при компактных массогабаритных характеристиках системы.

Присутствие помех в наблюдаемом процессе затрудняет решение многих задач обработки сигналов: обнаружение и различение, а также измерение информационных параметров сигналов. Компенсация помех является составной частью оптимальных алгоритмов обработки, а ее применение позволяет существенно повысить эффективность радиосистем. Линейная оптимальная компенсация помех обеспечивается путем формирования глубоких нулей характеристики направленности (ХН) в направлении их действия, за счет чего происходит увеличение отношения сигнал-шум (ОСШ) на выходе ПрС. Вместе с тем изменение формы ХН ПрС искажает пеленгационную характеристику, ухудшая точность измерения направления на источник радиоизлучения.

Возможности многоканальной ПрС в части пространственной селекции сигналов существенно ограничены количеством элементов системы. Известные методы, обеспечивая заданное пространственное разрешение, обладают рядом существенных недостатков. Методы сверхрэлеевского разрешения приводят к значительным потерям в помехоустойчивости, а нелинейные алгоритмы обработки сложны при технической реализации, их применение ограничено случаем небольшого числа мощных помех.

Одной из возможностей использования линейной пространственной обработки, свободной от указанных выше ограничений, является оптимизация пространственного расположения элементов ПрС. Вопрос определения направления на ИРИ в сложных помеховых условиях с использованием пространственной реконфигурации ПрС исследован в настоящее время недостаточно, поэтому тема исследования является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в развитие методов оценивания параметров сигнала в условиях априорной неопределённости сигнально-помеховой обстановки (СПО) внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как Абрамович Ю.И., Бакулев П.А., Виноградов А.Д., Воскресенский Д.И., Ван Трис Г.Л., Денисов В.П., Костров В.В., Манжос В.Н., Миллер Т.У., Монзинго Р.А., Ратынский М.В., Сосулин Ю.Г., Тихонов В.И., Уидроу Б., Черемисин О.П., Ширман Я.Д., Ярлыков М.С., Паршин Ю.Н., Гусев С.И. и др.

Анализ проблемной области показывает, что задача помехоустойчивого оценивания направления на ИРИ методами статистической радиотехники активно разрабатывается с 60-х гг. прошлого столетия. Поиск путей решения задачи оптимизации пространственной структуры (ПС) системы, касающейся расположения и индивидуальной геометрии элементов ПрС, с целью улучшения помехоустойчивости РТС является востребованным и открытым для обсуждения. Существующие подходы к оптимизации ПС, как правило, ограничены достижением требуемых характеристик АС по частным критериям качества, например обеспечению ХН нужной формы. Более обобщенный подход к проблеме, отвечающий требованиям к современным РТС в части устойчивой работы при широкой гамме СПО, может быть реализован методами теории оптимальных статистических решений. Класс адаптивных приемных систем с реконфигурируемой ПС разработан сравнительно неглубоко, особенно в части применения малоэлементных АС. К настоящему моменту окончательно не решен вопрос преодоления снижения эффективности оценивания параметров радиоизлучения и скорости сходимости адаптивных алгоритмов оценивания, связанных с взаимным влиянием элементов ПрС.

**Целью диссертационной работы** является исследование повышения эффективности помехоустойчивого оценивания направления на ИРИ с использованием статистической оптимизации ПС малоэлементной ПрС и практической реализации алгоритмов.

**Задачи исследования** в рамках заданной цели формулируются следующим образом:

1. Разработка оптимального алгоритма оценивания направления на ИРИ с оптимизацией ПС малоэлементной приемной системы.
2. Анализ эффективности применения оптимальных ПС при оценивании направления на ИРИ в сложной помеховой обстановке.
3. Преодоление статистической априорной неопределенности относительно характеристик помех при оптимизации ПС и анализ алгоритма оценивания направления на ИРИ с адаптацией ПС.
4. Выработка рекомендаций по технической реализации алгоритма оценивания направления на ИРИ с оптимизацией ПС.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Исследовано влияние ПС малоэлементных одномерных и двумерных ПрС на погрешность оценивания направления на ИРИ по критерию мак-

симального правдоподобия (МП) в сложных помеховых условиях с помощью границы Рао-Крамера, а также с точки зрения формирования нулей ХН в направлении воздействия помех.

2. Разработан алгоритм оптимизации ПС малоэлементной ПрС на последовательных выборках наблюдаемых данных по методу МП. Рассмотрены варианты реализации алгоритма МП по всей совокупности выборок, а также с использованием полиномиальной аппроксимации отношения правдоподобия (ОП). Произведен сравнительный анализ указанных вариантов алгоритма с точки зрения дисперсии ошибки оценивания ПС.

3. Разработан алгоритм формирования весовых коэффициентов (ВК) на основе метода непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы с предварительной оптимизацией ПС. Произведен сравнительный анализ скорости сходимости алгоритмов с предварительной оптимизацией ПС и без таковой. Произведен анализ скорости сходимости алгоритма при наличии взаимного влияния элементов ПрС с использованием модели тонких вибраторов.

**Внедрение результатов диссертационного исследования.** Результаты диссертации внедрены в разработки АО «Научно-производственная корпорация «Конструкторское бюро машиностроения» (г. Коломна), а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», что подтверждено соответствующими актами.

**Методы проведения исследования.** В диссертационной работе при проведении исследования используются методы математической статистики, теории статистических решений, линейной и векторной алгебры, аналитической геометрии, теории матриц. Анализ получаемых результатов проводится с использованием численных методов многомерной оптимизации, методов статистического моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Эффективный алгоритм оценивания параметров направления прихода ИРИ за счет оптимизации ПС малоэлементной приемной системы обеспечивает инвариантное к способу оценивания уменьшение среднеквадратического отклонения (СКО) оценивания до 12 раз относительно эквидистантных систем с аналогичными числом элементов и апертурой.

2. Оптимизация ПС малоэлементной ПрС обеспечивает эффективное оценивание направления на ИРИ при воздействии пространственно протяженной помехи: в ряде СПО уменьшение СКО достигает 2,3 раз. Эффективность оценивания растет с увеличением числа реконфигурируемых элементов ПрС при постоянстве общего числа элементов, а также размера и геометрии апертуры.

3. Оптимизация ПС малоэлементной ПрС обеспечивает эффективное оценивание направления на источник радиоизлучения при воздействии широкополосной помехи: в случае относительной ширины полосы помехи 20% выигрыш в СКО оценивания при оптимизации ПС достигает 1,5 раз относительно эквидистантной системы. Увеличение степеней свободы системы поз-

воляет уменьшить СКО оценивания до 2,4 раз относительно эквидистантной системы.

4. Алгоритм формирования ВК адаптивного процессора при использовании предварительной оптимизации ПС приемной системы позволяет увеличить скорость сходимости процесса адаптации по методу непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы помех не менее чем в 3 раза относительно эквидистантной системы. При изменении пространственного распределения и мощности помех в широких пределах параметры алгоритма адаптивного оценивания изменяются не более чем на 10%.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается корректным применением элементов теории и математического аппарата, согласованностью результатов расчетов и моделирования с известными результатами.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании», г. Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014 г.

2. 16-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA-2014), г. Москва, 2014 г.

3. 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2014 г.

4. Третья всероссийская научно-практическая конференция РЛС-2015 «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы», г. Муром: АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», 2015.

5. 21-я Международная конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2015 г.

6. XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2015), г. Омск, 2015 г.

7. International Radar Symposium 2015 (IRS-2015), Dresden, Germany, 2015.

8. 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2015 г.

9. XXVIII международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-28), г. Рязань, 2015 г.

10. Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2017, пос. Дивноморское, 2017 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ. Из них 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 10 тезисов докладов на конференциях, в том числе 3 текста тезисов, включенных в международную реферативную базу данных «Scopus», 1 статья в прочих изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х разделов, заключения, библиографического списка из 138 наименований и 2 приложений. Диссертация содержит 167 страниц, в том числе 146 страниц основного текста, а также 2 таблицы и 75 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** показаны актуальность работы и степень разработанности темы, определены цель и задачи исследования, обоснована научная новизна полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы и публикациях, представлена структура и объем диссертации.

**В первом разделе** произведен обзор методов оптимального оценивания параметров сигнала, методов компенсации помех. Рассмотрены существующие методы оптимизации ПС как одного из способов расширения возможностей линейной пространственной обработки. Произведен обзор и классификация известных методов адаптации алгоритмов как способа преодоления априорной неопределенности СПО. Сформулирована задача оценивания направления на ИРИ в условиях воздействия помех. Обоснован выбор критерия оптимальности алгоритма по МП при измерении параметра сигнала  $\gamma_S$

ИРИ:  $\Lambda(\gamma_S) = w(\underline{\mathbf{X}} | \underline{\mathbf{S}}(\gamma_S)) / w(\underline{\mathbf{X}} | \underline{\mathbf{S}} = 0)$ , где  $w(\underline{\mathbf{X}} | \underline{\mathbf{S}}(\gamma_S))$ ,  $w(\underline{\mathbf{X}} | \underline{\mathbf{S}} = 0)$  – функции правдоподобия для гипотез о наличии в наблюдаемых данных  $\underline{\mathbf{X}}$  полезного сигнала  $\underline{\mathbf{S}}$  и его отсутствии соответственно. МП оценка направления на ИРИ имеет вид:  $\hat{\gamma}_S = \arg \max_{\gamma_S} \Lambda(\gamma_S)$ . Аналогичным образом введено ОП при определении параметров сигнала, характеризующих направление прихода ИРИ в двух плоскостях  $\alpha_S$  и  $\gamma_S$ :  $\Lambda(\alpha_S, \gamma_S) = w(\underline{\mathbf{X}} | \underline{\mathbf{S}}(\alpha_S, \gamma_S)) / w(\underline{\mathbf{X}} | \underline{\mathbf{S}} = 0)$ . МП оценки направления на ИРИ имеют вид:  $\hat{\alpha}_S = \arg \max_{\alpha_S} \Lambda(\alpha_S, \gamma_S)$ ,  $\hat{\gamma}_S = \arg \max_{\gamma_S} \Lambda(\alpha_S, \gamma_S)$ .

Выявлены ограничения известных подходов, не позволяющие достичь требуемой эффективности оценивания направления на ИРИ в малоэлементной ПрС. Сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, используемого статистический подход к оптимизации ПС.

**Во втором разделе** произведен анализ эффективности оценивания направления на ИРИ с точки зрения предельно достижимых точностных характеристик на примере наиболее часто используемых конструкций одномерных, двумерных и кольцевых ПрС в условиях воздействия мощных помех. Получены соотношения логарифма ОП для моделей сигнала  $\underline{\mathbf{S}} = \underline{\mathbf{V}}_S \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{V}}_S A e^{j\psi}$ , где  $\underline{\mathbf{V}}_S$  – направляющий вектор, определяющий амплитудно-фазовое распределение сигнала в элементах ПрС,  $A$  – амплитуда,  $\psi$  – фаза:

– для детерминированного сигнала с известными амплитудой и начальной фазой:

$$z(\gamma_S) = \ln \Lambda(\gamma_S) = 2\text{Re}(\underline{\mathbf{X}}^H \underline{\mathbf{R}}_J^{-1} \underline{\mathbf{S}}(\gamma_S)) - \underline{\mathbf{S}}^H(\gamma_S) \underline{\mathbf{R}}_J^{-1} \underline{\mathbf{S}}(\gamma_S), \quad (1)$$

где  $\underline{\mathbf{R}}_J = \underline{\mathbf{R}}_A + \underline{\mathbf{R}}_{III}$  – корреляционная матрица помех и шума.

– для квазидетерминированного сигнала со случайной начальной фазой, распределенной по равномерному закону:

$$z(\gamma_S) = -A^2 \underline{\mathbf{V}}_S^H(\gamma_S) \underline{\mathbf{R}}_J^{-1} \underline{\mathbf{V}}_S(\gamma_S) + \ln I_0 \left( 2A \left| \underline{\mathbf{X}}^H \underline{\mathbf{R}}_J^{-1} \underline{\mathbf{V}}_S(\gamma_S) \right| \right), \quad (2)$$

где  $I_0(\dots)$  – модифицированная функция Бесселя 1-го рода.

– для случайного гауссовского сигнала:

$$z(\gamma_S) = \ln \frac{\det(\underline{\mathbf{R}}_J)}{\det(\underline{\mathbf{R}}_S(\gamma_S) + \underline{\mathbf{R}}_J)} + \underline{\mathbf{X}}^H \left[ \underline{\mathbf{R}}_J^{-1} - (\underline{\mathbf{R}}_S(\gamma_S) + \underline{\mathbf{R}}_J)^{-1} \right] \underline{\mathbf{X}}, \quad (3)$$

где  $\underline{\mathbf{R}}_S$  – корреляционная матрица полезного сигнала.

Эффективность оценивания направления на ИРИ определяется дисперсией ошибки оценивания направления на ИРИ, нижняя граница которой задается неравенством Рао-Крамера. Проведено исследование зависимостей СКО  $\sigma = \sqrt{D_\gamma}$  оценки направления на ИРИ от пространственного положения единичной помехи применительно к количеству всенаправленных элементов эквидистантной ПрС  $N = 2, \dots, 5$  с межэлементным расстоянием  $d = \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения. Выявлено существенное влияние количества элементов на эффективность оценивания. Обнаружено снижение эффективности оценивания направления на ИРИ вследствие малых пространственных различий между полезным сигналом и помехой. Появление неизвестных параметров полезного сигнала снижает точность определения направления на ИРИ, при этом характер распределения СКО оценки инвариантен по отношению к способу оценивания.

Рассмотрена работа оптимального алгоритма с точки зрения преобразований ХН. Для одномерных ПрС выражение исходной ХН имеет вид:

$$G(\gamma) = \sum_{n=1}^N \exp(j2\pi(x_n / \lambda) \sin \gamma), \quad \text{где } x_n \text{ – координата элемента. При оптимизации по критерию МП преобразованная ХН имеет вид:}$$

$$G(\gamma) = \sum_{n=1}^N \underline{w}_n \exp(j2\pi(x_n / \lambda) \sin \gamma), \quad (4)$$

где  $\underline{\mathbf{W}} = \{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_N\}^T = (\underline{\mathbf{R}}_A + \underline{\mathbf{R}}_{III})^{-1} \underline{\mathbf{V}}_S / \underline{\mathbf{V}}_S^H (\underline{\mathbf{R}}_A + \underline{\mathbf{R}}_{III})^{-1} \underline{\mathbf{V}}_S$ .

Произведен расчет преобразованной ХН согласно (4) для произвольно заданного направления прихода помехи, достаточно удаленного от направления прихода полезного сигнала. Показано, что оптимальный алгоритм обеспечивает формирование нуля ХН в направлении воздействия помехи. Выявлен рост эффективности компенсации помехи с увеличением числа элементов ПрС как в части глубины подавления помехи, так и в части сохранения



формы и положения главного лепестка ХН. При ориентации помехи в пределах главного лепестка исходной ХН, показано формирование нуля ХН в направлении воздействия помехи ценой смещения главного максимума ХН. В случае приема помехи, пространственно совмещенной с полезным сигналом, оптимальный алгоритм формирует вектор равных вещественных ВК. Таким образом, происходит совместное ослабление и полезного сигнала, и помехи без существенных изменений исходных ХН, что приводит к увеличению СКО оценивания направления на ИРИ. Совместный анализ распределения СКО оценивания направления на ИРИ с исходными ХН ПрС показал, что ориентация помехи в окрестности нулей ХН приводит к ухудшению качества компенсации. В то же время ориентация помехи в окрестностях максимумов боковых лепестков, за исключением интерференционных максимумов на границах ХН, соответствует минимумам СКО оценивания направления на ИРИ. Таким образом, важным условием эффективной компенсации помехи является достаточно высокая мощность источников помех по сравнению с шумом, что связано с соотношением помеховых и шумовых собственных значений в спектре корреляционной матрицы. Произведен анализ результатов работы алгоритма при приеме полезного сигнала в зоне боковых лепестков исходной ХН. Алгоритм обеспечивает одновременное формирование нуля и максимума ХН в направлении прихода помехи и сигнала соответственно, причем имеет место значительная трансформация ХН с появлением нескольких главных максимумов. Результаты расчетов СКО оценивания направления на ИРИ при различных положениях помехи показали ухудшение точности, а также наличие максимумов СКО оценки в местах расположения помехи по главным лепесткам преобразованной ХН.

Для подавления  $M$  помех с помощью фиксированной ПС необходимо сформировать  $M$  независимых нулей в ХН ПрС, что требует  $N = M + 1$  элементов. Рассмотрен пример ПрС с  $N = 3$  и апертурой  $l = 2\lambda$  и переменным положением  $x_2$  центрального элемента в диапазоне  $x_1 < x_2 < x_3$ . Произведен расчет зависимостей СКО оценки направления на ИРИ от  $x_2$  при воздействии  $M = 3$  помех с произвольными направлениями прихода. Показано, что оптимальная ПС для рассматриваемой СПО с точки зрения СКО оценивания дает выигрыш примерно 7 раз для детерминированного сигнала, 5,3 раз для квазидетерминированного сигнала и 4,5 раз для случайного гауссовского сигнала относительно соответствующих величин для эквидистантной системы.

На примере воздействия  $M = 4$  помех на ПрС с  $N = 4$ ,  $l = 3\lambda$  и числом регулируемых элементов  $n_{reg} = 2$  показано, что совместная оптимизация положения двух элементов даст меньшее значение СКО, чем оптимизация положения одного из них. Выигрыш в величине СКО при  $n_{reg} = 2$  составляет примерно 2 раза относительно случая  $n_{reg} = 1$ . Таким образом, установле-

но, что увеличение числа степеней свободы ПрС способствует повышению точности оценивания направления на ИРИ на фоне узкополосных помех.

При рассмотрении оценивания параметров сигнала, характеризующих направление на источник ИРИ, с помощью двумерных ПрС, получены двухпараметрические аналоги выражений (1) – (3). Неравенство Рао-Крамера для двухпараметрической задачи имеет вид:  $\mathbf{D}_{\alpha, \gamma} \geq \mathbf{I}(\alpha_S, \gamma_S)^{-1} \Big|_{\alpha_0, \gamma_0}$ , где  $\alpha_0, \gamma_0$  – истинные направления на ИРИ,  $\mathbf{I}(\alpha_S, \gamma_S)$  – матрица информации Фишера. Получены выражения для вторых производных от статистики  $z(\alpha_S, \gamma_S)$ , входящих в матрицу  $\mathbf{I}(\alpha_S, \gamma_S)$ . Для определения точности решения двухпараметрической задачи использованы эллипсы равной плотности вероятности. Длины полуосей эллипса характеризуют среднеквадратические отклонения оценки направления на ИРИ, в качестве меры погрешности оценивания  $\sigma$  принята большая полуось единичного эллипса.

Рассмотрена  $N$ -элементная квадратная ПрС с расстоянием между всенаправленными элементами по вертикали и горизонтали  $d = \lambda$ . ХН подобных систем, определяется соотношением:

$$G(\alpha, \gamma) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_y} \exp(j(i-1)\psi_x) \exp(j(k-1)\psi_y), \quad (5)$$

где  $\psi_x = 2\pi(d_x/\lambda)\sin\gamma\cos\alpha$ ,  $\psi_y = 2\pi(d_y/\lambda)\sin\gamma\sin\alpha$ .

В соответствие с расчетами ХН выбрано положение ИРИ, соответствующее главному лепестку. Проведены расчеты эффективности оценивания направления на ИРИ для принятых моделей в зависимости от пространственного положения единичной помехи применительно к квадратным ПрС размерностью  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$  элемента, результаты которых согласуются с расчетами одномерных ПрС. Кроме того, показано, что существенным фактором снижения эффективности подавления помех является не только их количество, но и взаимное пространственное расположение их источников. Показано, что сокращение числа эффективных элементов ПрС при определенном положении источников помех характерно для плоских ПС с любым видом симметрии.

Рассмотрены различные подходы к оптимизации ПС двумерной приемной системы. Первое направление оптимизации ПС осуществляется за счет ориентации полотна системы относительно источников помех без изменения взаимного расположения элементов. Рассмотрен случай воздействия  $M = 4$  помех на квадратную ПрС  $2 \times 2$  элемента, которая может вращаться в азимутальной плоскости. Минимумы значений СКО, достигаемые при оптимальном положении полотна системы для конкретной помеховой обстановки, свидетельствуют об уменьшении погрешности оценивания направления на ИРИ до 3,7 раз для детерминированного сигнала, до 8,7 раз для квазидетерминированного сигнала и до 11,6 раз для случайного гауссовского сигнала относительно соответствующих величин для фиксированной ПрС. Несмотря

на существенный выигрыш, погрешность оценивания достаточно высока и составляет  $9,5^\circ$  для детерминированного сигнала,  $10,9^\circ$  для квазидетерминированного сигнала и  $11,9^\circ$  для гауссовского сигнала, что обусловлено неполным подавлением помех. Второе направление предполагает реконфигурацию ПС. Рассмотрен случай воздействия  $M = 9$  помех на ПрС  $3 \times 3$  с  $n_{reg} = 1$ . Результаты расчетов зависимости погрешности  $\sigma$  оценивания направления на ИРИ от положения регулируемого элемента показали уменьшение погрешности при оптимальной ПС примерно в 1,78 раз для детерминированного, в 3 раза для квазидетерминированного и в 3 раза для гауссовского сигналов относительно эквидистантной ПрС. Анализ характера распределения погрешности показал наличие нескольких удаленных друг от друга положений элемента, при которых достигаются близкие к минимуму значения погрешности. Это означает, что флуктуации параметров системы обработки и принимаемого излучения, сопутствующие практической реализации, могут приводить к скачкообразному изменению оптимального положения элемента ПрС в широких пределах, что снижает эффективность системы из-за инерционности узлов адаптивных систем.

Выражение (5) для ХН неэквидистантной двумерной ПрС имеет вид:

$$G(\alpha, \gamma) = \sum_{n=1}^N \exp(j(2\pi/\lambda) \text{sim}(x_n \cos \alpha + y_n \sin \alpha)), \text{ где } x_n, y_n - \text{координаты элементов ПрС.}$$

Для оптимальной обработки выражение имеет вид:

$$G(\alpha, \gamma) = \sum_{n=1}^N \underline{w}_n \exp(j(2\pi/\lambda) \text{sim}(x_n \cos \alpha + y_n \sin \alpha)), \text{ где } \underline{w}_n - \text{элементы вектора}$$

оптимальных ВК. Показано, что преобразованная ХН системы с оптимальной ПС формирует низкий коэффициент передачи в направлении действия помех, что обеспечивает достаточно высокую точность оценивания направления на ИРИ. На примере вращения группы помех в азимутальной плоскости показаны траектории перемещения центрального элемента, а также зависимости погрешности оценивания направления на ИРИ от приращения азимутальной координаты группы помех для системы с оптимальной ПС в сравнении с эквидистантной ПрС: оптимизация ПС обеспечивает лучшую или эквивалентную точность определения направления на ИРИ по сравнению с эквидистантной системой.

Показана зависимость СКО оценивания направления на ИРИ от  $n_{reg}$  для рассмотренного случая воздействия  $M = 9$  помех на ПрС  $3 \times 3$ . При этом точность оценивания значительно, почти в два раза, увеличивается с ростом числа регулируемых элементов от одного до пяти.

Анализ кольцевых ПрС произведен с использованием математических выражений для двумерных систем. В дополнение к результатам анализа двумерных ПрС выявлено, что величина погрешности оценивания направления на ИРИ при числе помех  $M \ll N$  в большей степени определяется аперту-

рой системы, нежели числом её элементов. Произведено количественное сравнение характеристик квадратной ПрС  $3 \times 3$  при  $d = \lambda$  и  $l = 2\lambda$  с двумя кольцевыми системами с  $N = 9$ , одна из которых соответствует квадратной по апертуре, а другая – по межэлементному расстоянию. Кольцевые ПрС характеризуются большей погрешностью по сравнению с квадратной. При равенстве апертур и числа элементов погрешность оценивания при использовании квадратной ПрС значительно, почти в полтора раза меньше, чем при использовании кольцевой. Разрежение элементов за счет увеличения размера апертуры кольца позволяет приблизиться к погрешности квадратной ПрС как в среднем, так и в минимумах.

Возможности кольцевых ПрС в части оптимального расположения элементов существенно ограничены тем, что фазовые центры регулируемых элементов могут находиться только на окружности апертуры. На примере воздействия  $M = 9$  помех на ПрС  $3 \times 3$  и кольцевые системы с  $N = 9$  показано, что минимальная погрешность оценивания направления на ИРИ с помощью кольцевой ПрС с меньшей апертурой уступает таковой для квадратной ПрС в 2,4 раза, в то время как система с большей апертурой демонстрирует близкую, но в 1,2 раза более высокую погрешность.

Исследован способ расширения возможностей кольцевых ПрС путем создания концентрических систем. Выявлено, что после введения дополнительной степени свободы зависимая оптимизация координат элементов ПрС, имеющая место при кольцевых структурах, в общем случае значительно уступает независимой оптимизации квадратных систем.

Анализ эффективности оценивания направления на ИРИ на фоне пространственно протяженной помехи рассмотрен для одномерной ПрС с  $N = 3$  и  $n_{reg} = 1$ . Один из сценариев СПО предполагает отсутствие помехи в направлении главного лепестка ХН. Зависимость погрешности оценивания направления на ИРИ от изменения ПС имеет минимум, который свидетельствует об уменьшении погрешности оценивания примерно в 2,3 раз для детерминированного сигнала относительно эквидистантной ПрС в заданной СПО. Снижение погрешности оценивания происходит при максимальном для данной системы размере элемента разрешения, что приводит к сокращению числа «блестящих точек», для которых необходимо сформировать независимые нули ХН. Воздействие протяженной помехи на всем диапазоне пространственного положения ИРИ приводит к общему увеличению погрешности оценивания положения направления на ИРИ при схожем с предыдущим результатом характере распределения погрешности. Ухудшение характеристики оценивания, во-первых, обусловлено возросшим числом разрешаемых точечных источников помех, а во-вторых, – наличием «блестящей точки» в окрестности истинного направления на ИРИ.

Увеличение числа степеней свободы ПрС положительно сказывается на эффективности оценивания направления на ИРИ в условиях воздействия протяженной помехи, что подтверждено на примере оценивания одного па-

раметра сигнала с помощью одномерной приемной системы с  $N = 4$ ,  $l = 3\lambda$  и  $n_{reg} = 2$ , а также на примере двухпараметрического оценивания с помощью квадратной ПрС  $3 \times 3$  при  $l = 2\lambda$  и  $n_{reg} = 3$ . В случае одномерной ПрС получен выигрыш в погрешности оценивания в 6 раз для первой СПО и до 2,1 раз для второй относительно структуры с  $n_{reg} = 1$ . В случае двумерной ПрС и воздействии протяженной помехи по боковым лепесткам получена погрешность оценивания  $\sigma_{\min} \approx 3,5^\circ$ , что в 52 раза меньше погрешности при одноэлементной оптимизации ПС.

Анализ эффективности оценивания направления на ИРИ на фоне единичной широкополосной помехи произведен для одномерной ПрС с  $N = 3$ ,  $l = 2\lambda$  и  $n_{reg} = 1$ . Показано, что оптимизация ПС снижает потерю точности оценивания, и при относительной ширине полосы помехи 20% СКО оценивания примерно в 1,5 раз меньше, чем при использовании эквидистантной ПрС. На примере оценивания параметра сигнала при воздействии трех помех на одномерную систему с  $N = 4$  и  $l = 3\lambda$  показано, что при максимальной относительной ширине полосы помех 20% СКО оценивания в случае  $n_{reg} = 1$  не дает значительного преимущества перед эквидистантной системой, но совместное регулирование положения двух элементов снижает СКО примерно в 2,4 раза. В случае оценивания двух параметров сигнала при воздействии  $M = 8$  широкополосных помех на квадратную ПрС  $3 \times 3$  при  $l = 2\lambda$  и  $n_{reg} = 2;3$  показано, что увеличение числа степеней свободы системы позволяет сократить погрешность оценивания при относительной ширине полосы помехи 20% примерно в 1,8 раз.

**В третьем разделе** проведена разработка алгоритма адаптации ПС при оценивании направления на ИРИ на основе последовательных выборок данных  $\underline{\mathbf{Y}}_k, k = 1, \dots, K$  о наблюдаемом поле, каждая из которых получается при уникальном значении координат элементов ПрС. Полагая выборки статистически независимыми, выражение плотности распределения вероятностей

(ПРВ) статистики для  $K$  выборок имеет вид:  $w(z | \mathbf{x}, \gamma_S) = \prod_{k=1}^K w(z_k(\mathbf{x}_k, \gamma_S))$ ,

где  $w(z_k(\mathbf{x}_k, \gamma_S))$  – ПРВ достаточной статистики  $k$ -й выборки. Применен адаптивный байесовский подход с использованием гауссовской аппроксимации апостериорной плотности распределения вероятностей:  $w(z(\gamma_S | \mathbf{x})) = (1/\sqrt{2\pi D_z(\mathbf{x})}) \exp(-(z(\gamma_S) - m_z(\mathbf{x}))^2 / 2D_z(\mathbf{x}))$ , зависимости математического ожидания  $m_z(\mathbf{x})$  и дисперсии  $D_z(\mathbf{x})$  аппроксимированы квадратичным полиномом:  $m_z(\mathbf{x}) = c^{(0)} + \mathbf{c}^{(1)} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{c}^{(2)} \mathbf{x}$ ,  $D_z(\mathbf{x}) = d^{(0)} + \mathbf{d}^{(1)} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{d}^{(2)} \mathbf{x}$ . Зависимость  $D_z(\mathbf{x})$  в дальнейшем считается известной, а в ограниченной области

изменения ПС принято, что дисперсия не зависит от ПС.

С точки зрения вычислительных затрат эффективным является подход, предполагающий обучение системы с помощью пилот-сигнала, имитирующего расположение ИРИ с параметром  $\gamma_0$ , при этом значение  $\hat{\mathbf{x}}$  не зависит от  $\gamma_0$ . При квадратичной аппроксимации оптимум ПС имеет вид:  $\hat{\mathbf{x}} = -(\mathbf{c}^{(2)} + \mathbf{c}^{(2)\top})^{-1} \mathbf{c}^{(1)\top}$ . Адаптивный алгоритм оценивания направления на ИРИ совместно с адаптацией ПС выглядит следующим образом:

$$(\hat{\mathbf{c}}, \hat{\mathbf{d}}) = \arg \max_{\mathbf{c}, \mathbf{d}} w(z(\gamma_0) | \mathbf{c}, \mathbf{d}), \hat{\mathbf{x}} = -(\mathbf{c}^{(2)} + \mathbf{c}^{(2)\top})^{-1} \mathbf{c}^{(1)\top}, \hat{\gamma}_S(\underline{\mathbf{Y}}_K) = \arg \max_{\gamma_S} z_{K+1}(\gamma_S) \Big|_{\hat{\mathbf{x}}}. \quad (6)$$

Выражение для МП оценки  $\hat{\mathbf{c}} = [\hat{\mathbf{c}}^{(0)}, \hat{\mathbf{c}}^{(1)}, \hat{\mathbf{c}}^{(2)}]$  может быть записано как решение системы дифференциальных уравнений:  $\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{F}^{-1} \times \mathbf{L}$ .

На примере одномерной ПрС с  $N=3$ ,  $l=2\lambda$  и  $n_{reg}=1$  произведен сравнительный анализ эффективности работы по детерминированному тестовому сигналу с использованием алгоритма (6) и алгоритма МП по каждой из последовательных выборок:

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} m_z(\mathbf{x}, \gamma_0). \quad (7)$$

Рассмотрены случаи  $M=3$  пространственно разнесенных и сосредоточенных источников помех по критерию ширины главного лепестка ХН. Показано, что дисперсия ошибки оценивания алгоритмом (6) меньше, чем алгоритмом (7): в случае разнесенных помех – до 3 раз, а в случае сосредоточенных помех – до 8 раз. Качество оценивания ПС увеличивается с ростом ОСШ. Показано, что значительный вклад в качество оценивания направления на ИРИ и ПС вносит значение априорного интервала аппроксимации, а также количество узлов внутри него.

Произведен анализ сходимости адаптивного алгоритма применительно к задаче оценивания направления на ИРИ. Применен метод вычисления адаптивных ВК, основанный на непосредственном обращении выборочной корреляционной матрицы входных сигналов (НОМ):  $\hat{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{r}}_{xd}^H \hat{\mathbf{R}}_X^{-1}$ , где

$$\hat{\mathbf{R}}_X = \frac{1}{C} \sum_{j=1}^C \mathbf{x}(j) \mathbf{x}^H(j), \hat{\mathbf{r}}_{xd} = \frac{1}{C} \sum_{j=1}^C \mathbf{x}(j) d^*(j) - \text{МП оценки матрицы } \mathbf{R}_X \text{ и вектора } \mathbf{r}_{xd}$$

соответственно,  $C$  – объем выборки наблюдаемых данных,  $d(t)$  – сигнал, связанный с полезным.

Произведен анализ скорости сходимости адаптивного алгоритма (6) в установившемся режиме на примере оценивания направления на ИРИ с помощью одномерной ПрС при  $N=3$ ,  $l=4\lambda$ ,  $n_{reg}=1$  с предварительной оптимизацией ПС и без таковой под воздействием  $M=2$  помех. Результаты моделирования единичной реализации алгоритмов в виде зависимости действительных значений ВК от объема временной выборки наблюдаемого про-

цесса показали, что, выигрыш в скорости сходимости алгоритма от применения оптимальной ПС в заданных условиях составляет не менее 3 раз. На примерах большой разницы мощностей помех и пространственной концентрации источников помех показана слабая чувствительность метода НОМ к распределению собственных чисел корреляционной матрицы.

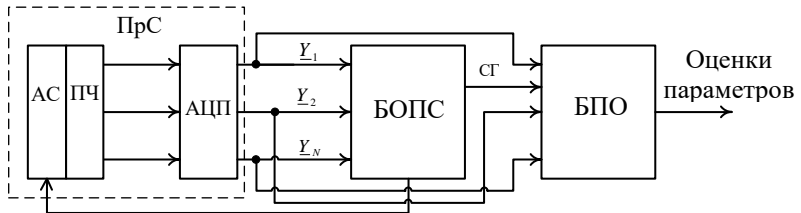
**В четвертом разделе** рассмотрены аспекты технической реализации алгоритмов оценивания направления на ИРИ и средств реконфигурации ПрС.

Поскольку при оптимизации ПС возможны ситуации с близким расположением элементов ПрС, их взаимное влияние может быть значительным, что накладывает ограничения на возможности оптимизации ПС и искажает ХН ПрС. Взаимное влияние элементов  $N$ -элементной ПрС определяется матрицей взаимных импедансов:  $\underline{\mathbf{Z}} = \{\underline{Z}_{mn}, m, n = 1, \dots, N\}$ , которая связывает напряженность электрического поля  $\underline{\mathbf{E}}$  с токами вибраторов  $\underline{\mathbf{I}}$  посредством системы уравнений Кирхгофа:  $\underline{\mathbf{I}} = \underline{\mathbf{Z}}^{-1} \underline{\mathbf{E}}$ . Выражение для корреляционной матрицы наблюдаемого процесса с взаимным влиянием элементов ПрС примет вид:  $\underline{\mathbf{R}}_I = \mathbf{M}(\underline{\mathbf{I}} \underline{\mathbf{I}}^H) = \underline{\mathbf{Z}}^{-1} \underline{\mathbf{R}}_E (\underline{\mathbf{Z}}^{-1})^H$ , где  $\underline{\mathbf{R}}_E = \mathbf{M}(\underline{\mathbf{E}} \underline{\mathbf{E}}^H)$  – исходная корреляционная матрица. Моделирование взаимного влияния элементов системы на алгоритмы (6), (7) оценивания ПС произведено для одномерной ПрС, состоящей из  $N = 3$  тонких полуволновых вибраторов, при  $l = 2\lambda$  и  $n_{reg} = 1$ . Зафиксировано увеличение дисперсии ошибки оценивания ПС при наличии взаимного влияния, причем алгоритм (6) эффективнее алгоритма (7).

Произведен анализ скорости сходимости адаптивного алгоритма (6) в установившемся режиме с предварительной оптимизацией ПС, на примере одномерной ПрС при  $N = 3$ ,  $l = 4\lambda$ ,  $n_{reg} = 1$ . Обнаружено уменьшение скорости сходимости при наличии взаимного влияния элементов ПрС в 2,3 раза.

Предложена структурная схема устройства оценивания направления на ИРИ с оптимизацией ПС (рисунок 1). Наблюдаемый процесс регистрируется с помощью цифровой ПрС, состоящей из АС, преобразователя частоты (ПЧ) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На выходе ПрС формируются вектор  $\underline{\mathbf{Y}} = \{\underline{Y}_n, n = 1, \dots, N\}$  отсчетов комплексных огибающих наблюдаемого процесса в  $N$  элементах. Блок оптимизации ПС (БОПС) осуществляет предварительную конфигурацию ПС по пилот-сигналу  $\underline{\mathbf{S}}_p$  на основе алгоритма (6) и формирует кодовое слово в цепи сигнала готовности (СГ). СГ управляет работой блока пространственной обработки (БПО), обеспечивающего подавление помех методом НОМ с использованием опорного сигнала  $\underline{\mathbf{d}}$ , формируемого РТС информационного обмена. После подавления помех БПО осуществляет оценивание направления на ИРИ классическим методом ЦДО на основе быстрого преобразования Фурье суммы отсчетов сигнала по каналам ПрС с использованием данных о ПС и последующим выделением оценки параметров, максимизирующей значение ХН. Предложены схемы

БОПС и БПО, которые содержат типовые арифметические блоки, позволяют провести распараллеливание вычислений и реализуемы на основе современных ПЛИС и сигнальных процессоров в реальном масштабе времени.



**Рисунок 1 – Структурная схема устройства**

**В заключении** описаны основные результаты диссертационного исследования, которые состоят в следующем:

1. Показано, что оптимизация ПС при решении задачи оценивания направления на ИРИ обеспечивает инвариантное к способу оценивания уменьшение СКО. На примере малоэлементных одномерных, двумерных и кольцевых ПрС показано, что в ряде случаев выигрыш в уменьшении СКО оценивания достигает 12 раз относительно эквидистантных систем с аналогичными числом элементов и апертурой.

2. Показано, что оптимизация ПС малоэлементной ПрС обеспечивает эффективное оценивание направления на ИРИ при воздействии пространственно протяженной помехи: в ряде СПО уменьшение СКО достигает 2,3 раз. Эффективность оценивания растет с увеличением числа реконфигурируемых элементов ПрС при постоянстве общего числа элементов, а также размера и геометрии апертуры.

3. Показано, что оптимизация ПС малоэлементной ПрС обеспечивает эффективное оценивание направления на ИРИ при воздействии широкополосной помехи: в случае относительной ширины полосы помехи 20% СКО оценивания при оптимизации ПС до 1,5 раз меньше, чем при использовании эквидистантной системы. Увеличение степеней свободы системы позволяет уменьшить СКО оценивания до 2,4 раз относительно эквидистантной ПрС.

4. Предложен алгоритм формирования ВК адаптивного процессора с использованием предварительной оптимизации ПС, который позволяет увеличить скорость сходимости процесса адаптации по методу НОМ не менее чем в 3 раза относительно эквидистантной системы. Показано, что при изменении пространственного распределения и мощности помех в широких пределах параметры алгоритма адаптивного оценивания изменяются не более чем на 10%. Моделирование алгоритма с учетом взаимного влияния элементов ПрС демонстрирует целесообразность предварительной оптимизации ПС несмотря на увеличение погрешности оценивания, а также падение скорости сходимости в 2,3 раза.

5. Предложен технически реализуемый алгоритм измерителя направления на ИРИ с предварительной оптимизацией ПС на основе методов ЦОС.



Произведена классификация современных методов и технологий реконфигурации параметров ПрС, которые могут быть использованы в дальнейшем при практическом исполнении подобных устройств.

## ПУБЛИКАЦИИ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

### **В изданиях из перечня ВАК:**

1. Паршин Ю.Н. Анализ эффективности определения направления на источник радиоизлучения в малоэлементной антенной решетке при действии пространственно коррелированных помех [Текст] / Ю.Н. Паршин, П.А. Александров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань: РГРТУ, 2014. – Вып. 50-1. – С. 34 – 40.

2. Паршин Ю.Н. Синтез и анализ алгоритма определения направления на источник радиоизлучения в системе слежения с двумерной малоэлементной антенной решеткой оптимальной пространственной структуры [Текст] / Ю.Н. Паршин, П.А. Александров // Радиотехника. – 2015. – №11. – С. 22 – 29.

3. Паршин Ю.Н. Оценка угловой координаты источника радиоизлучения на фоне помехи с использованием адаптации пространственной структуры малоэлементной антенной решетки [Текст] / Ю.Н. Паршин, П.А. Александров // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №11. – С. 39 – 44.

4. Паршин Ю.Н. Пеленгация источника сигнала на фоне пространственно коррелированных помех с помощью двумерной малоэлементной антенной решетки с оптимальной пространственной структурой [Текст] / Ю.Н. Паршин, П.А. Александров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – №3. – С. 83 – 93.

### **В изданиях, включенных в реферативную базу «Scopus»:**

1. Оптимальное оценивание угловой координаты источника сигнала в малоэлементной антенной решетке с оптимальной пространственной структурой [Текст] / Ю.Н. Паршин Ю.Н., П.А. Александров, И.О. Бессонов, В.В. Бочков // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7–13 сентября 2014 г. : материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т. 2. – С. 1175-1176.

2. Parshin Yu.N., Alexandrov P.A. Spatial Structure Optimization for a Signal Source Tracking System under Influence of Interfering // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7146971>.

3. Parshin Yu.N., Alexandrov P.A. An efficiency analysis of determining a signal source direction in a few-element antenna array under an influence of spatially correlated interference // International radar symposium - IRS 2015, Proceedings, volume I, II, Dresden, Germany. – German institute of navigation, 2015. – pp. 816–821.

### **В прочих изданиях:**

1. Александров П.А. Анализ пространственной компенсации активных помех в плоской пятиэлементной антенной решетке [Текст] / П.А. Александров // Доклады 16-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA-2014). Москва, 26–28 марта 2014 г. – М. : РНТОРЭС им. А.С. Попова. – Т. 1 – С. 348–351.

2. Александров П.А. Оптимальное оценивание угловой координаты источника сигнала в малоэлементной антенной решетке [Текст] / П.А. Александров // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: материалы

XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. – 2014. – С. 163 – 165.

3. Александров П.А. Синтез и анализ алгоритма определения направления на источник радиоизлучения в двумерной малоэлементной антенной решетке [Текст] / П.А. Александров, Ю.Н. Паршин // Труды XXI Международной Научно-Технической конференции "Радиолокация, Навигация, Связь" (RLNS\*2015). Воронеж, 14–16 апреля 2015 г. – Воронеж: НПФ «Саквоее», 2015. – С. 467 – 471.

4. Александров П.А. Анализ эффективности пеленгации источника сигнала на фоне пространственно коррелированных помех с помощью малоэлементных антенных решеток с оптимальной пространственной структурой [Текст] / П.А. Александров, Ю.Н. Паршин // Тезисы докладов третьей всероссийской научно-практической конференции РЛС-2015 «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы». – Муром: АО МЗ РИП, 2015. – С. 10–11.

5. Паршин Ю. Н. Синтез и анализ алгоритма определения направления на источник радиоизлучения в двумерной малоэлементной антенной решетке с оптимальной пространственной структурой [Текст] / Ю. Н. Паршин, П. А. Александров // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6—12 сентября 2015 г. : материалы конф. в 2 т. – Севастополь, 2015. – Т. 1. –С. 507 – 508.

6. Александров П.А. Анализ влияния пространственно коррелированных помех на эффективность пеленгации в системе слежения с двумерной малоэлементной антенной решеткой оптимальной пространственной структуры [Текст] / П.А. Александров // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. Ю.Н. Паршина. – Рязань: РГРТУ, 2015. – С. 17 – 21.

7. Александров П.А. Адаптация пространственной структуры радиопеленгатора на основе малоэлементной антенной решетки [Текст] / П.А. Александров, Ю.Н. Паршин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф. : в 12 т. Т.1. / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 24 – 29.

8. Parshin Yu., Gusev S., Kolesnikov S., Alexandrov P. Estimation-Correlation-Compensation Signal Processing with Optimization of Antenna Array Spatial Structure // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW-2017, June 26-30, Divnomorskoye, Russia, 2017. – pp. 1 – 4.

**Александров Павел Александрович**

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА  
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ  
С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.10.16. Формат бумаги 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 6186

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