

На правах рукописи

Шавров Андрей Викторович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ
РАДИОМОНИТОРИНГА НА ОСНОВАНИИ МЕТОДОВ АНАЛИЗА
СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МАТРИЦ
ДААННЫХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, доцент Аникин Алексей Павлович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, Бескид Павел Павлович

Кандидат технических наук, Нилов Михаил Александрович

Ведущая организация ФГУП «НИИ «Вектор»

Защита состоится «__» 20__ г. в _____ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.212.238.03 в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат диссертации разослан «27» января 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите

Докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В связи с тенденциями к усложнению электромагнитной обстановки возрастает необходимость в радиомониторинге как в деятельности по обеспечению её контроля. Среди задач радиомониторинга центральное место занимает пеленгация источников радиоизлучения. При проектировании мобильных комплексов радиомониторинга существует задача повышения качества обработки принимаемой информации при сокращении вычислительной сложности метода обработки. В отличие от стационарных систем при проектировании мобильных комплексов массогабаритные характеристики и количество аппаратного обеспечения имеют существенные ограничения. Поэтому в данной области актуально наиболее рациональное использование вычислительной мощности аппаратной базы, при улучшении показателей точности и разрешения. Этим объясняется актуальность разработки новых алгоритмов обработки информации для систем радиомониторинга.

Цели и задачи работы.

Основной целью работы является разработка алгоритма пеленгации источников радиоизлучения, для улучшения качества обработки информации в системах радиомониторинга. Исходя из цели работы, можно выделить следующие задачи:

1. Разработка алгоритма пеленгации ИРИ.
2. Разработка и обоснование решающих статистик алгоритма.
3. Исследование рабочих характеристик алгоритма: характеристик обнаружения, разрешения и точности оценивания параметров.
4. Анализ вычислительной сложности и оценка аппаратной реализуемости алгоритма.
5. Экспериментальная проверка работоспособности алгоритма.

Методы исследования.

Для решения поставленной в диссертационной работе задачи были использованы: методы теории вероятности и математической статистики, статистической радиотехники, спектрального анализа и математического моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предложенный алгоритм пеленгации ИРИ, основанный на применении метода анализа собственных значений с последующим разделением пространства наблюдений на шумовое и сигнальное подпространства позволяет обеспечить выигрыш в вычислительной сложности относительно прочих алгоритмов анализа собственных значений, при достижении аналогичных показателей точности и разрешения.
2. Разработан способ расчета порога обнаружения, обеспечивающего уровень вероятности ложной тревоги не более заданного значения.
3. Разработан способ расчета рабочих характеристик алгоритма на основании экспериментальных данных о распределениях собственных чисел, позволяющий получить выражения для рабочих характеристик в аналитическом виде.

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Даны рекомендации для расчета параметров распределений собственных чисел в зависимости от уровня шума. Получено аналитическое выражение для порога обнаружения, обеспечивающее уровень вероятности ложной тревоги не более заданного значения.
2. Предложена аппроксимация параметров распределения собственных чисел полиномами 3-й степени, позволяющая определить теоретические характеристики обнаружения. Показано, что ошибка

определения теоретической характеристики обнаружения составляет не более 0,5дБ при вероятности обнаружения 0,9.

3. Проведено сравнение характеристик обнаружения предложенного алгоритма и алгоритма, основанного на применении согласованного фильтра. Показано, что проигрыш предложенного алгоритма относительно согласованной фильтрации составляет не более 3дБ.
4. Проведено сравнение разрешающей способности предложенного алгоритма и алгоритма, основанного на БПФ. Показано, что разработанный алгоритм позволяет разрешать сигналы с большим перекрытием спектров.
5. Установлено, что разработанный алгоритм позволяет разрешать источники с равными значениями угловых координат при условии неравенства частот.
6. На основании данных о распределениях собственных значений корреляционной матрицы получено аналитическое выражение для разрешающей способности алгоритма. Полученное выражение проверено на соответствие характеристике, полученной моделированием. Ошибка несоответствия составляет не более 0,1дБ.
7. Произведен анализ влияния параметра временного сглаживания матрицы наблюдений на качество работы алгоритма. Показано, что увеличение параметра сглаживания приводит к увеличению разрешающей способности и одновременно к увеличению дисперсий оценок.

Практическая ценность работы состоит в том, что применение разработанного алгоритма пеленгации в системах радиомониторинга позволяет совместить такие достоинства методов анализа собственных значений как высокая разрешающая способность и помехоустойчивость с меньшей вычислительной сложностью.

Достоверность результатов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается теоретическими доказательствами и соответствием результатов эксперимента с данными математического моделирования.

Внедрение результатов работы. Внедрение результатов работы осуществлено в разработках ОАО «Микротехника», что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

Теоретические результаты диссертационной работы использованы в НИР, выполненной по государственному контракту № 14.740.110530 от 1.10.2010г. в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. «Разработка и исследование алгоритмов для обработки информации в радиоастрономических комплексах, использующих метод разнесенного приема».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на:

-65-й Научной конференции СПбНТОРЭС, посвященной Дню Радио, СПб, 2010г.

- Научно-технической конференции «Методы и средства измерения физических величин», Нижний Новгород, 2009.

Публикации.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 6 статьях и докладах, среди которых 3 публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 публикация в издании, не включенном в действующий перечень ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 2 научно-технических конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Она изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и список используемых источников из 45 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, решаемые в её рамках задачи и основные научные положения.

В первой главе проведен обзор алгоритмов пеленгации источников радиоизлучения. Рассмотрены основные недостатки существующих на данный момент алгоритмов. Обоснован выбор фазового интерферометрического измерителя в качестве основы для алгоритма пеленгации. Данная структура построения пеленгационной системы позволяет обеспечить возможность применения любых известных методов цифровой обработки сигналов, а также более широкие возможности при последующей модернизации системы.

В рамках структуры фазового интерферометра ключевое значение имеет применяемый метод обработки информации, так как от него зависят рабочие характеристики системы в целом. Рассмотрены возможности применения различных методов обработки информации в выбранной структуре алгоритма. Обоснован выбор метода ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Techniques) как одного из наиболее перспективных с точки зрения компромисса между качеством обработки и вычислительной сложностью.

Во второй главе приведено описание метода обработки для антенной решетки минимальной размерности (3 элемента). Применяемый метод основан на анализе собственных значений корреляционной матрицы данных измерений с последующим разделением пространства наблюдений на сигнальное и шумовое подпространства. Для решения проблемы неоднозначного разделения подпространств, возникающей при применении данного метода, было выполнено исследование собственных значений корреляционной матрицы.

Установлено, что d наибольших собственных значений корреляционной матрицы имеют выраженную зависимость от уровня сигнала. Что позволяет сделать вывод об их соответствии d действующим источникам радиоизлучения (ИРИ). Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности обнаружения и разрешения ИРИ на основании сравнения собственных значений с порогом, зависящим от уровня шума и требуемой вероятности ложной тревоги. Таким образом, решающее правило для обнаружения: $\lambda_{3n} \lessgtr Z_{\Pi}$

Для разрешения: $\lambda_{3n-1} \langle Z \rangle_{\Pi}$

Для определения уровня порога требуется информация о распределении собственных чисел. На основании статистического моделирования были получены экспериментальные гистограммы собственных значений, анализ которых позволяет сделать вывод об их соответствии распределению Фишера-Типпета. (рисунок 1)

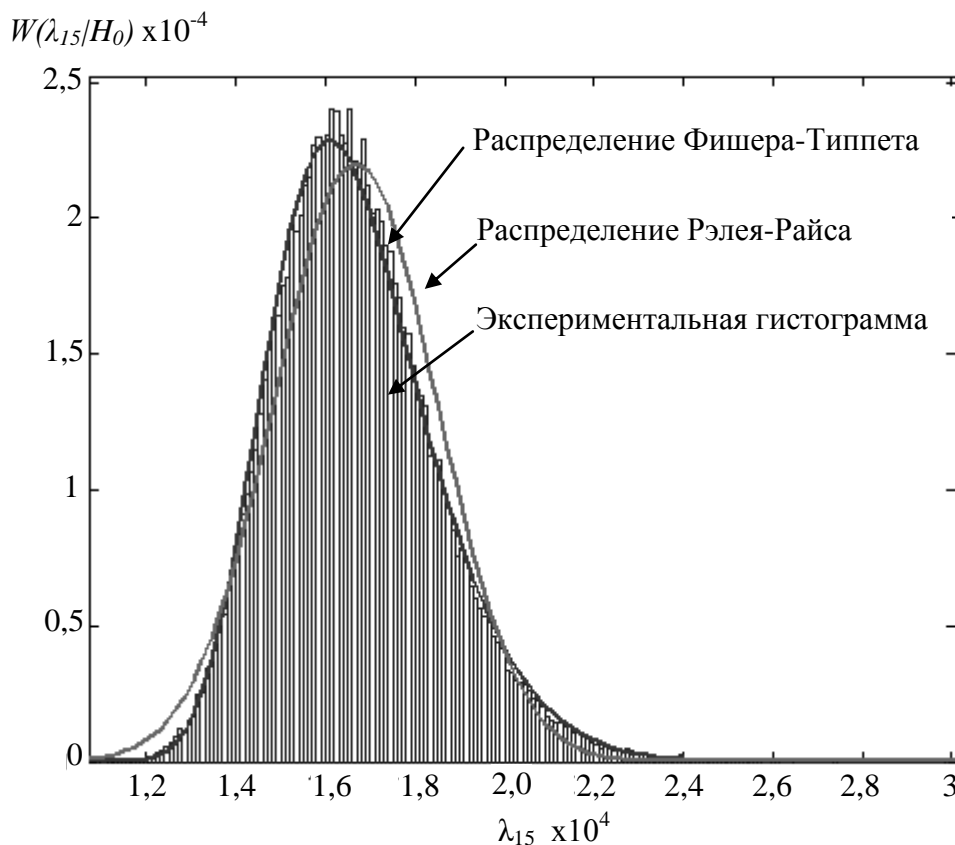


Рисунок. 1. Гистограмма распределения наибольшего шумового собственного числа и варианты модели распределения.

Применение данной модели распределения позволяет воспользоваться выражением для вероятности ложной тревоги для расчета порога обнаружения.

Третья глава посвящена исследованию рабочих характеристик разработанного алгоритма. Полученные в предыдущей главе данные о распределениях собственных чисел и решающие правила, позволяют произвести вывод выражения для вероятности обнаружения и порога в аналитическом виде. Модель распределения собственных чисел определяется тремя параметрами (μ – параметр смещения, ε – параметр формы, σ –

параметр масштаба), поэтому для её применения требуется исследовать зависимости этих параметров от текущей сигнально-помеховой обстановки.

Было произведено исследование параметров распределений собственных чисел в зависимости от значений уровней сигнала и шума. Полученные зависимости были аппроксимированы и на основании этих данных были рассчитаны значения для порога обнаружения и вероятности обнаружения.

Сравнение характеристики обнаружения, полученной в результате эксперимента и характеристики полученной методом расчета на основании аппроксимированных значений параметров распределения, позволяет сделать вывод об адекватности подобного метода расчета. (рисунок 2)

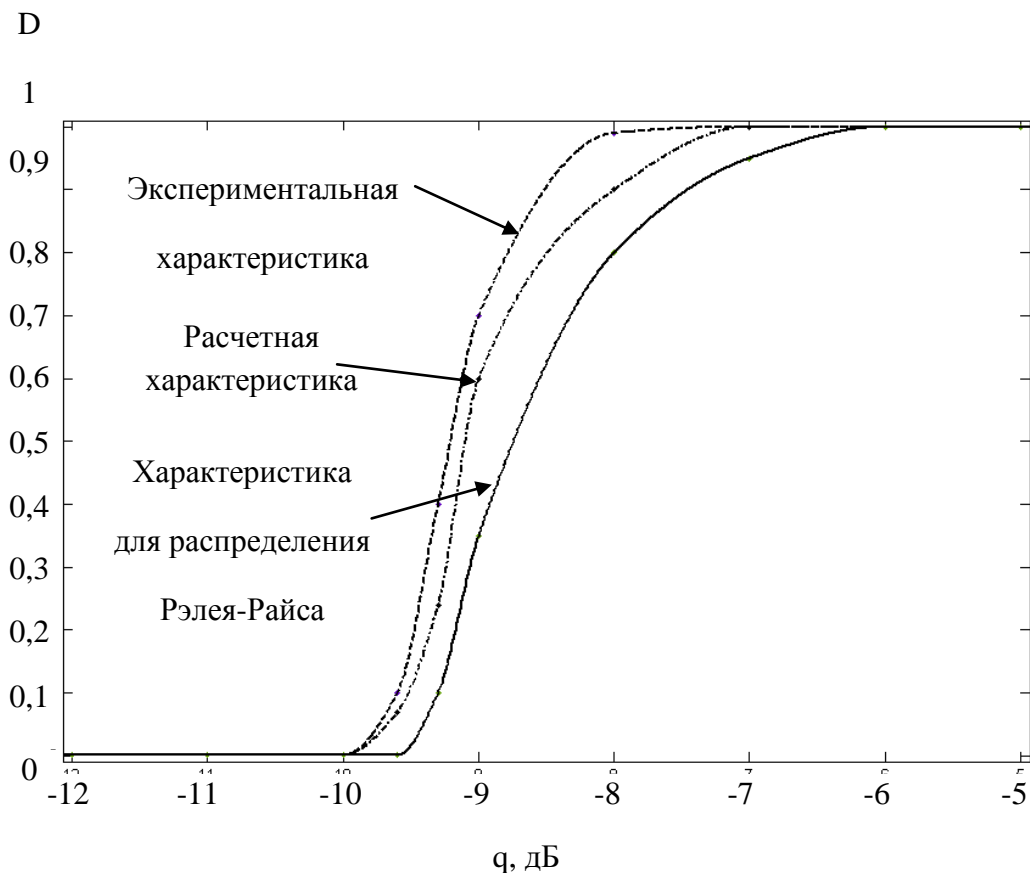


Рисунок 2. Сравнение характеристик обнаружения

Выполнен анализ точности расчета характеристики обнаружения предложенным способом, в зависимости от порядка аппроксимирующих полиномов. Полученные в результате этого анализа зависимости позволяют выбрать порядок аппроксимирующих полиномов в зависимости от требуемой точности расчета характеристики обнаружения. Выполнен

сравнительный анализ характеристик обнаружения разработанного алгоритма и алгоритма на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Установлено, что разработанный алгоритм проигрывает не более 3дБ БПФ. (рисунок 3)

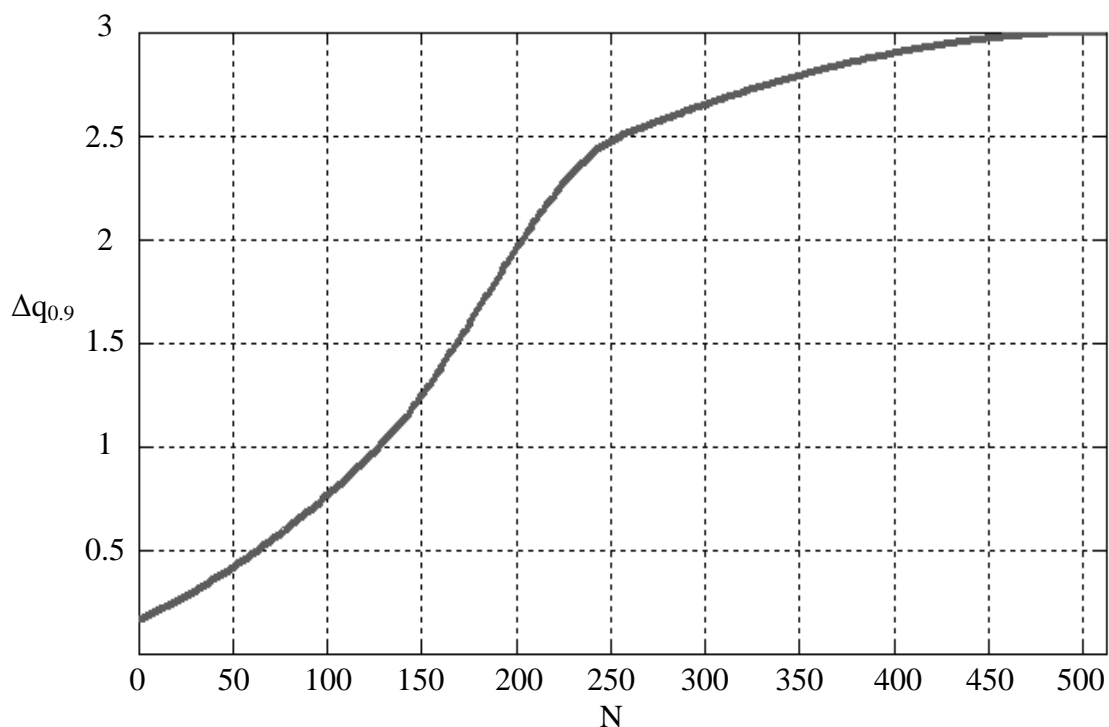


Рисунок 3. Сравнительная характеристика разработанного алгоритма и алгоритма БПФ по обнаружению.

Исследование характеристик разрешения разработанного алгоритма показывает, что алгоритм позволяет разрешать источники с равными значениями угловых координат при условии неравенства их частот. Показана возможность алгоритма разрешать ИРИ с перекрывающимися спектрами сигналов, что является его преимуществом перед обработкой, основанной на применении БПФ. (рисунок 4)

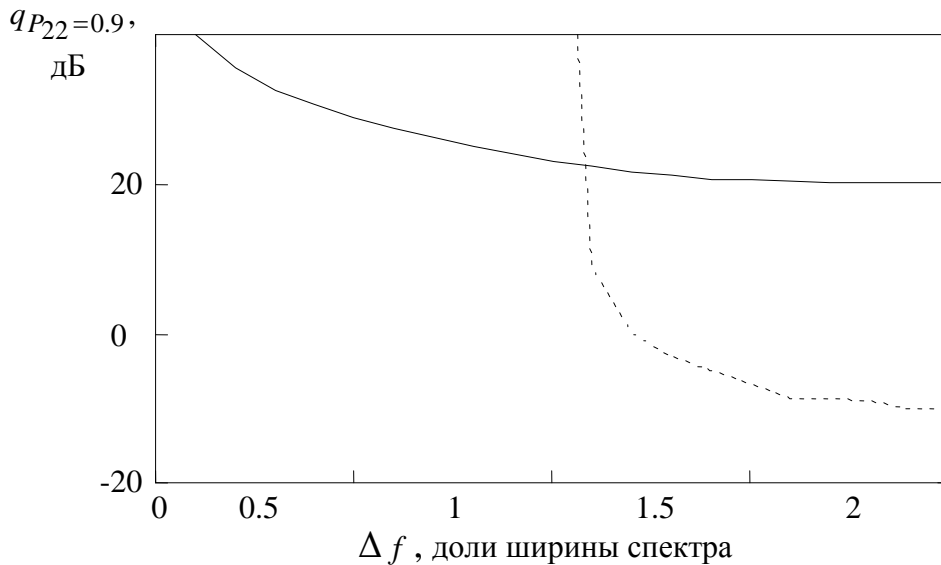


Рисунок 4. Сравнение статистических характеристик разрешения для разработанного алгоритма и БПФ.

Также в рамках главы было проведено исследование качества оценок параметров, формируемых алгоритмом. Установлено, что оценки частот, пеленгов и углов места ИРИ являются асимптотически несмещенными при увеличении отношения сигнал-шум. При исследовании влияния длины выборки на точность формируемых оценок было обнаружено проявление эффекта «малых выборок», которое заключается в приближении точности оценки к границе Крамера-Рао по мере уменьшения длины выборки. Данный эффект связан с тем фактом, что для малых выборок граница Крамера-Рао не является границей минимальной дисперсии. Также в процессе исследования была обнаружена зависимость точности оценивания пеленга от значения угла места. Наибольшую точность оценивания пеленга разработанный алгоритм показывает для околоризонтных ИРИ.

В четвертой главе описываются вопросы, связанные с практической реализацией разработанного алгоритма. Приведены результаты анализа вычислительной сложности алгоритма. Показано его вычислительное преимущество перед одним из наиболее точных методов в классе методов анализа собственных значений – MUSIC (Multiple Signal Classification). (рисунок 5)

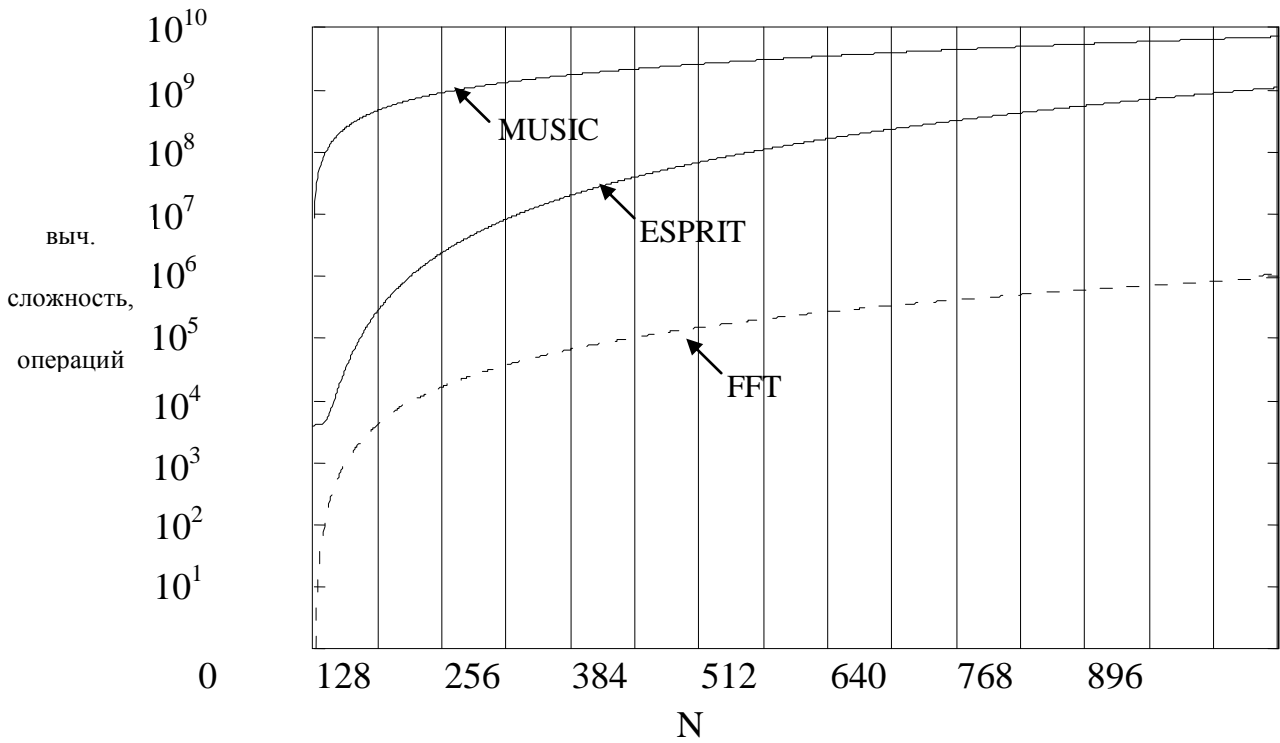


Рисунок 5. Зависимость вычислительной сложности от объема анализируемой выборки данных для алгоритмов MUSIC, ESPRIT и БПФ.

Оценено время выполнения алгоритма для систем с различной производительностью процессора. Полученные данные позволяют судить об аппаратной реализуемости алгоритма.

Проведено исследование влияния эффектов связанных с аналого-цифровым преобразованием на качество работы алгоритма. Исследование показывает, что для данной системы целесообразно применение АЦП с разрядностью не более 16, так как дальнейшее увеличение разрядности улучшает качество обнаружения и разрешения лишь незначительно.

При проектировании системы пеленгации, основанной на разработанном алгоритме, существуют потенциальные источники погрешностей, связанные с точностью синхронизации приемных трактов каждого из каналов и с точностью размещения элементов антенной системы. На основании исследования влияния этих факторов были разработаны рекомендации по определению требуемой точности синхронизации и допуска на местоположение антенных элементов в зависимости от частотного диапазона и требуемой точности пеленгации.

Частотный диапазон пеленгационной системы, основанной на структуре фазового интерферометра связан с обеспечением выполнения

условий фазовой однозначности для сигналов всех частот из заданного диапазона, что означает, что шаг антенной решетки не должен превышать значения половины длины волны, для сигналов с наибольшей частотой из интересующего диапазона. В результате исследования выявлено, что уменьшение шага антенной решетки приводит к ухудшению характеристик точности. Наличие данного факта определяет нижнюю рабочую частоту системы, в зависимости от требуемой точности пеленгации.

Также в рамках главы была проведена экспериментальная проверка алгоритма, подтверждающая его работоспособность и возможность его реализации на современной элементной базе.

В заключении дается перечень основных результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм пеленгации ИРИ на базе структуры интерферометрического измерителя и метода обработки принимаемой информации, основанном на анализе собственных значений выборочной корреляционной матрицы данных с последующим разделением пространства наблюдений на сигнальное и шумовое подпространства.
2. Разработаны и исследованы решающие статистики обнаружения и разрешения, обеспечивающие уровень вероятности ложных тревог не выше заданного значения.
3. На основании анализа распределений собственных значений выборочной корреляционной матрицы данных получены аналитические выражения для значения порога обнаружения, характеристик обнаружения и разрешения.
4. Произведен анализ влияния временного сглаживания матрицы наблюдений на рабочие характеристики алгоритма.
5. Произведен анализ характеристик обнаружения. Установлено, что проигрыш по обнаружению относительно согласованной фильтрации составляет не более 3дБ и уменьшается при сокращении длины обрабатываемой выборки данных.

6. Произведен анализ разрешающей способности. Алгоритм имеет возможность разрешать источники при перекрытии спектров меньше полосы сигналов.
7. Произведен анализ точности оценивания параметров. Установлено, что оценки формируемые алгоритмом являются асимптотически несмещенными и эффективными.
8. Осуществлено моделирование алгоритма с применением реальных записей шума. Выполнен анализ соответствия принятой модели реальным процессам.
9. Выполнено моделирование эффектов связанных с влиянием АЦП при приеме и обработке сигналов. Оценено влияние разрядности и динамического диапазона АЦП на рабочие характеристики алгоритма. Предложено оптимальное значение разрядности АЦП для решаемой задачи.
10. Произведен анализ вычислительной сложности и аппаратной реализуемости алгоритма. Подтверждено преимущество в быстродействии перед алгоритмом MUSIC. Рассмотрена возможность реализации алгоритма на процессорах BlackFin
11. Выполнено исследование влияния точности синхронизации приемных каналов, а также точности установки элементов антенной системы на погрешности определения угловых координат ИРИ. Получены зависимости, позволяющие при заданном значении погрешности оценивания пеленгов и углов места определять допуски на положение элементов антенной системы и рассинхронизацию каналов.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных трудах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Шавров, А.В. Частотно-временная обработка сложных сигналов алгоритмами на основе анализа собственных чисел матриц данных [Текст] / А.П. Аникин, А.В. Шавров // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2010. - Вып. 2 - С. 30-36
2. Шавров, А.В. Расчет порогового значения решающей статистики для алгоритма совместного обнаружения и оценивания параметров радиосигналов [Текст] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2011. - Вып. 1 - С. 3-7

3. Шавров, А.В. Анализ характеристик точности алгоритма совместного обнаружения и оценивания параметров радиосигналов [Текст] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2011. - Вып. 5 - С. 3-8

Публикации в сборниках трудов конференций

4. Шавров, А.В. Алгоритм совместного обнаружения и оценивания источников радиоизлучения [Текст] // 65-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2010. - С.46-47

5. Шавров, А.В. Алгоритм совместного обнаружения-оценивания источников радиоизлучения для систем радиомониторинга [Текст]// Научно-техническая конференция «Методы и средства измерения физических величин», Нижний Новгород, 2009.

Публикации в прочих изданиях

6. Шавров А.В. Алгоритм совместного обнаружения-оценивания источников радиосигналов для систем радиомониторинга [Текст] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2010. - Вып. 1 - С. 3-9