

На правах рукописи

Сухов

Сухов Игорь Александрович

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК ИЗ НАПРАВЛЕННЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
д. ф.-м. н., проф.  
В. П. Акимов

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Акимов Валерий Петрович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Щесняк Сергей Степанович**  
генеральный директор ООО «Научный  
центр прикладной электродинамики»,  
г. Санкт-Петербург.

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
**Немов Андрей Васильевич**  
руководитель проектного направления  
ОАО «Российский институт радионавигации  
и времени», г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество  
"Центральное научно-производственное  
объединение "Ленинец", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «27» марта 2014 года в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.229.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 4, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2014 года

Ученый секретарь диссертационного совета  
Доктор технических наук, профессор



Коротков А. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время наблюдается тенденция усложнения радиоэлектронной обстановки, что заставляет сосредоточить основное внимание на вопросах повышения помехоустойчивости. Актуальным является направление разработки алгоритмов пространственной обработки сигналов, предназначенных для обеспечения максимального отношения сигнал/помеха. Неотъемлемой частью алгоритмов пространственной обработки сигналов является задача определения угловых координат полезных и помеховых сигналов, которая может быть решена применением современных сверхразрешающих алгоритмов.

Для улучшения характеристик определения направлений прихода сигналов перспективным подходом является применение цифровой пространственной фильтрации с использованием алгоритмов диаграммообразования и сверхразрешающих алгоритмов оценки угловых координат. Наблюдается интенсивное развитие теории адаптивной пространственной обработки сигналов, направленной на повышение точности оценки угловых координат и разрешающей способности в многоканальных антенных системах. Исследования алгоритмов обработки сигналов традиционно проводятся для антенных решёток из слабонаправленных элементов, что обусловлено стремлением упростить аналитические выражения и рассмотрением свойств разрабатываемых алгоритмов без учёта влияния геометрии антенной решётки.

Применение кольцевых антенных решёток из направленных элементов в сложной электромагнитной обстановке позволяет осуществить дополнительную пространственную фильтрацию принимаемых сигналов, что приводит к более устойчивой работе радиотехнических систем в условиях многолучевого распространения сигналов. Несмотря на значительное количество работ по алгоритмам обработки сигналов, эффективность применения алгоритмов к антенным решёткам из направленных элементов изучена недостаточно, а также нет конкретных рекомендаций по выбору параметров антенных элементов для повышения точности оценки угловых координат и разрешающей способности алгоритмов обработки сигналов. В связи с этим актуальным является вопрос применения сверхразрешающих алгоритмов в комплексах радиомониторинга с антенными решётками из направленных элементов.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов пространственной обработки сигналов для оценки угловых координат источников радиоизлучения в многосигнальной обстановке с учётом направленных свойств элементов кольцевой антенной решётки.

**Задачи исследования:**

- Сравнительный анализ перспективных алгоритмов оценки угловых координат в применении к кольцевой антенной решётке из направленных элементов
- Численная оценка и анализ точностных характеристик и характеристик разрешения алгоритмов пространственной обработки сигналов при различных параметрах антенной решётки
- Разработка алгоритма с повышенной разрешающей способностью на основе формирования цифровых диаграмм направленности и численное моделирование алгоритма путём вариации различных исходных параметров
- Разработка алгоритма определения угловых координат коррелированных сигналов на основе алгоритмов диаграммообразования
- Разработка математической модели антенной решётки для исследования алгоритмов оценки угловых координат источников радиоизлучения
- Исследование характеристик разработанных алгоритмов пространственной обработки сигналов на основе действующего лабораторного макета
- Определение ограничений и рекомендаций по применению разработанных алгоритмов

**Основные методы исследования.** В работе использованы методы цифровой обработки сигналов, математический аппарат теории матриц, численное моделирование и анализ результатов работы существующих и разработанных методов пространственной обработки сигналов. Проверка адекватности полученных при моделировании результатов осуществлялась путём сравнения с результатами экспериментов, полученных при реализации разработанных алгоритмов в созданных лабораторных макетах.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- Определены свойства алгоритмов сверхразрешения при использовании кольцевой антенной решётки из направленных элементов. Даны оценки ширины диаграмм направленности элементов кольцевой антенной решётки, позволяющие получить более высокие точностные характеристики и характеристики разрешения при использовании сверхразрешающего алгоритма оценки угловых координат источников радиоизлучения.
- Алгоритм оценки угловых координат, основанный на предварительной пространственной фильтрации, применён для обработки сигналов с выходов кольцевой антенной решётки из направленных элементов. Даны оценки влияния направлений, в которых формируются максимумы диаграмм направленности, и количества диаграмм направленности на точностные характеристики и характеристики разрешения алгоритма.
- Разработан алгоритм оценки угловых координат коррелированных сигналов, основанный на сканировании нулями цифровых диаграмм направленности в заданном диапазоне углов. В основе разработанного алгоритма лежит получение зависимости максимума пеленгационных

характеристик, связанного с сигналом, от положения нулей диаграмм направленности.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Разработанная программная модель позволяет определить точностные характеристики и разрешающую способность комплекса радиомониторинга с учётом направленных свойств антенных элементов в составе кольцевой антенной решётки.
- Алгоритм оценки количества сигналов, основанный на критерии Акаике, в случае применения к антенным решёткам из направленных элементов, имеет наибольшую вероятность правильной оценки количества сигналов по сравнению с другими известными алгоритмами.
- Алгоритм пространственной обработки сигналов BMUSIC является наиболее эффективным при определении угловых координат источников некоррелированных сигналов с помощью кольцевой решётки из направленных антенных элементов.
- Алгоритм пространственной обработки сигналов, основанный на сканировании нулями формируемых диаграмм направленности, наиболее эффективен при определении угловых координат источников пространственно коррелированных сигналов с помощью кольцевой решётки из направленных антенных элементов.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности использования разработанных алгоритмов в комплексах радиомониторинга, работающих в широком диапазоне частот, с антенными решётками из направленных элементов, что позволяет повысить точностные характеристики и характеристики разрешения комплексов радиомониторинга в случаях многолучевого распространения сигналов и перекрытия спектров сигналов при высокой загруженности частотного диапазона.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается использованием апробированного статистического аппарата, логической обоснованностью выводов и хорошим согласием результатов компьютерного моделирования и натуральных испытаний.

**Внедрение результатов работы** осуществлено на ОАО «НИИ «Вектор» (г. С-Петербург) в НИР «Тандем».

**Личный вклад автора.** Основные результаты работы получены лично автором и опубликованы в соавторстве с научным руководителем. Научному руководителю принадлежит постановка задачи и определение направления исследования. Анализ и интерпретация основных полученных результатов выполнены лично автором.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены на следующих конференциях:

- XXXIX Международная научно-практическая конференция “Неделя науки СПбГПУ” (Санкт-Петербург, 2010).
- XIV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 2010).
- 23 межвузовская научно-техническая конференция «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы, подготовка специалистов». – Петродворец, 2012.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 6 работ, в том числе 3 статьи в журналах перечня ВАК и научно-технический отчет о выполнении НИР.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 139 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 175 страницах машинописного текста. Работа содержит 102 рисунка и 4 таблицы.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, показана практическая значимость и научная новизна полученных результатов, определены основные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор и анализ наиболее широко распространенных на сегодняшний день методов определения направлений на источники радиоизлучений. Обозначены основные достоинства и недостатки существующих методов. Рассмотрены основные структурные схемы и принципы построения радиотехнических многоканальных приёмоизмерительных систем, предназначенных для оценки направлений приходящих сигналов, определены основные задачи пространственной селекции.

На основании имеющихся публикаций представлен обзор существующих алгоритмов пространственной обработки сигналов в радиотехнических системах. Алгоритмы разделяются по предназначению для адаптивной пространственной фильтрации и для определения направления прихода сигналов. Использование алгоритмов пространственной обработки сигналов позволяет увеличить отношение сигнал/шум и осуществить подавление мешающих сигналов за счёт их отличия от полезных сигналов по направлениям прихода. Метод неадаптивного формирователя луча, являясь одним из наиболее простых методов, не требует значительных вычислительных затрат для расчёта угловых координат и при этом позволяет оценивать направления на источники коррелированных сигналов. Его основным недостатком является низкая разрешающая способность. Алгоритм MUSIC, напротив, имеет высокую разрешающую способность, но является

неустойчивым при воздействии коррелированных сигналов. В данной работе исследована возможность совмещения достоинств рассмотренных алгоритмов с целью определения способов оценки направлений прихода коррелированных сигналов с высокой разрешающей способностью.

Рассмотрены достоинства и недостатки радиотехнических систем с цифровой обработкой сигналов по сравнению с аналоговыми устройствами. Обозначена тенденция построения современных систем определения направлений прихода сигналов по принципу корреляционного интерферометра, что связано с преимуществами систем с цифровой обработкой сигналов. Проведён обзор антенных систем, используемых в комплексах определения угловых координат источников радиоизлучения.

Согласно проведённому обзору, существует большое количество различных алгоритмов пространственной обработки сигналов, позволяющих решать основные задачи в радиотехнических комплексах, но эффективность работы данных алгоритмов с учётом направленных свойств антенных элементов в сложной электромагнитной обстановке изучена недостаточно широко. В связи с этим данная работа посвящена исследованию особенностей работы алгоритмов пространственной обработки сигналов в случае использования направленных антенных элементов, разработке новых алгоритмов и выработке рекомендаций по практическому применению рассмотренных методов.

**Во второй главе** поставлена задача по определению направлений прихода сигналов в многоканальных комплексах радиомониторинга. Применяемые алгоритмы пространственной обработки сигналов должны позволять определять направления прихода сигналов с высокой точностью и иметь высокую разрешающую способность при использовании антенных решёток из направленных элементов для получения отсчётов сигналов. Для оценки эффективности алгоритмов оценки угловых координат создана программная модель антенной решётки, и на её основе проведено сравнение рассматриваемых алгоритмов.

Матрица данных  $\mathbf{X}$  размером  $N \times K$  ( $N$  – количество элементов решётки,  $K$  – количество отсчётов сигналов), измеренная в разные моменты времени  $t_k$ ,  $k=1, \dots, K$  с выходов антенных элементов кольцевой решётки выглядит следующим образом:

$$\mathbf{X}_{n,k} = \sum_{m=1}^M \mathbf{a}(\varphi_m) \cdot \mathbf{S}_{m,k} + \mathbf{N}_{n,k}, \quad k=1, \dots, K \quad (1)$$

где  $\mathbf{a}(\varphi_m) = [F_1(\varphi_m) \cdot \exp(-j\psi_1(\varphi_m)), F_2(\varphi_m) \cdot \exp(-j\psi_2(\varphi_m)), \dots, F_N(\varphi_m) \cdot \exp(-j\psi_N(\varphi_m))]^T$  – управляющий вектор,  $\mathbf{S}_{m,k}$  – сигнал от  $m$ -ого источника радиоизлучения в момент времени  $t_k$ ,  $\mathbf{N}$  – аддитивный гауссовский шум,  $\varphi_m$  – направления прихода сигналов,  $M$  – количество сигналов,  $F_n(\varphi)$  – амплитудная диаграмма направленности,  $\psi_n(\varphi)$  – фазовая диаграмма направленности. Для программной модели выбран следующий вид управляющих векторов:

$$a_n(\phi) = \sqrt{\frac{34000}{\theta_{DN} \cdot \theta_{DN2}}} \cdot \exp \left( - \left( \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{\left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right)^2}{\theta_{DNRad}} + j\pi d \cos \left( \frac{2\pi n}{N} - \phi \right) \right) \right) \quad (2)$$

где  $\theta_{DN}$  и  $\theta_{DN2}$  – ширина диаграммы направленности по азимуту и углу места соответственно,  $\theta_{DNRad} = \theta_{DN} \cdot \pi/180$ ,  $d$  – диаметр решётки в длинах волн.

На основе программной модели рассмотрены различные сверхразрешающие алгоритмы пространственной обработки сигналов в применении к антенным решёткам из направленных элементов в случае малого количества отсчётов принимаемых сигналов. Показано, что алгоритм MUSIC обеспечивает наиболее низкое среднеквадратическое отклонение (СКО) при определении угловых координат источника сигнала при относительно невысоких вычислительных затратах.

При проектировании антенных систем важным вопросом является определение ширины диаграмм направленности антенных элементов, обеспечивающей наибольшую точность и разрешающую способность алгоритмов оценки угловых координат. В связи с этим, практический интерес представляет оценка влияния ширины диаграмм направленности на точность оценки угловых координат и разрешающую способность. Рассмотрены вопросы определения ширины диаграмм направленности антенных элементов, обеспечивающей наилучшие характеристики алгоритмов оценки угловых координат источников радиоизлучения. Приведён статистический анализ влияния ширины диаграмм направленности антенных элементов кольцевой решётки на СКО и разрешающую способность. Из результатов моделирования следует, что существует определённая ширина диаграмм направленности, обеспечивающая наиболее высокие характеристики алгоритмов оценки угловых координат. На рисунке 1 представлена зависимость СКО и разрешающей способности от ширины диаграмм направленности на примере девятиэлементной антенной решётки.

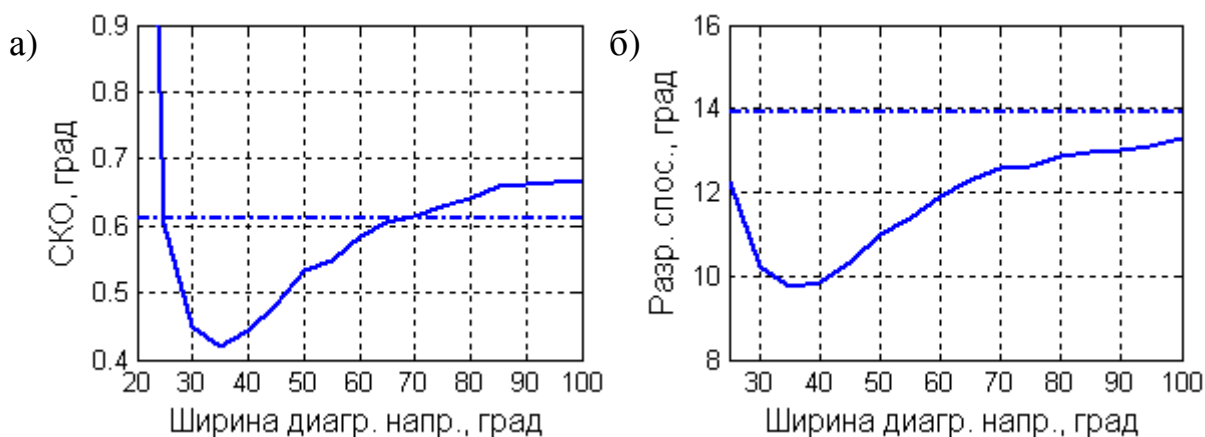


Рис. 1. Влияние ширины диаграмм направленности девятиэлементной кольцевой антенной решётки на а) СКО; б) разрешающую способность. Штрихпунктирной линией обозначены характеристики антенной решётки из ненаправленных антенных элементов.

Полученные зависимости демонстрируют наличие оптимальной ширины диаграмм направленности, для девятиэлементной антенной



решётки, ширина диаграмм направленности должна быть не уже  $30^\circ$ . Определена зависимость СКО оценки угловых координат и разрешающей способности от направления прихода сигнала. Наибольшая точность наблюдается в случае прихода сигнала в область между максимумами диаграмм направленности антенной решётки, в то время как наибольшая разрешающая способность наблюдается в случае прихода сигналов в область максимума одной из диаграмм направленности. Определены ширины диаграмм, позволяющие получить наиболее высокие характеристики алгоритмов оценки угловых координат для кольцевых антенных решёток с различным количеством элементов, наиболее высокие характеристики обеспечиваются антенными решётками из направленных элементов при количестве элементов семь и более.

Оценка количества сигналов, приходящих на кольцевую антенную решётку, является одним из этапов алгоритмов, использующих разложение корреляционной матрицы сигналов по собственным векторам и собственным числам. Верное определение количества приходящих сигналов позволяет правильно разделить пространство корреляционной матрицы сигналов на сигнальное и шумовое подпространства, что в свою очередь обеспечивает устойчивую работу алгоритма. Проведено сравнение трёх критериев оценки количества сигналов: критерия Акайке (AIC - Akaike Information Criterion), минимальной длины описания (MDL - Minimum Description Length) и EDC (Efficient Detection Criterion). На рисунке 2 приведён график зависимости вероятности правильной оценки количества сигналов от азимута сигнала 1, при этом положение сигнала 2 сохранялось равным  $60^\circ$ .

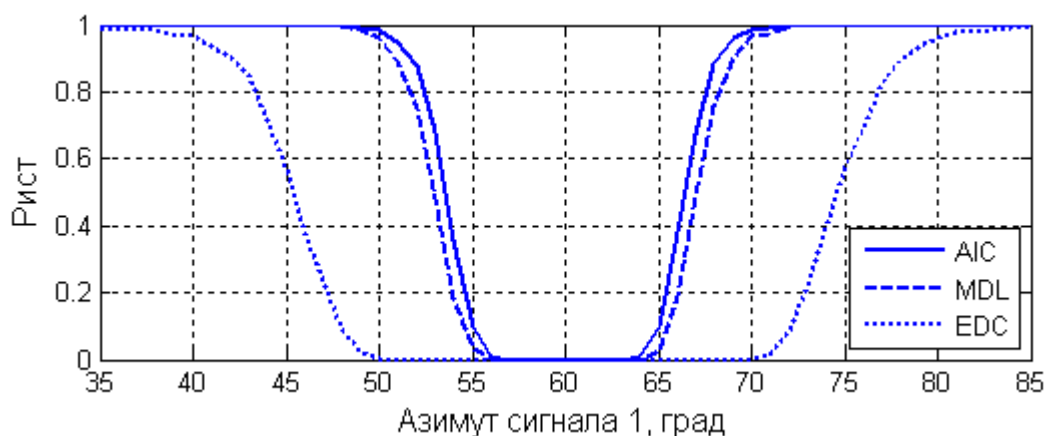


Рис. 2. Вероятность правильной оценки количества приходящих сигналов в зависимости от азимута сигнала 1.

Проведён ряд численных экспериментов при различных параметрах сигналов и антенной решётки. Из результатов моделирования следует, что критерий Акайке имеет наилучшие характеристики при оценке количества сигналов, приходящих на кольцевую антенную решётку из направленных элементов. При этом разрешающая способность алгоритма оценки количества сигналов, основанного на критерии Акайке, выше разрешающей способности алгоритма MUSIC. Данный факт является предпосылкой к возможности повышения разрешающей способности алгоритма оценки угловых координат.

В работе установлено, что характеристики разрешения прямопропорциональны количеству отсчётов, частоте сигналов и отношению сигнал/шум. При использовании информации от отсчётов только об амплитудах СКО оценки направления сигнала значительно выше случая совместного использования информации об амплитудах и фазах. При использовании только амплитуд также имеется значительная зависимость от азимута прихода сигнала. Проведено сравнение величины побочных максимумов пеленгационных характеристик алгоритма оценки направлений прихода сигналов на примере девятиэлементной антенной решётки из направленных и ненаправленных антенных элементов (рисунок 3).

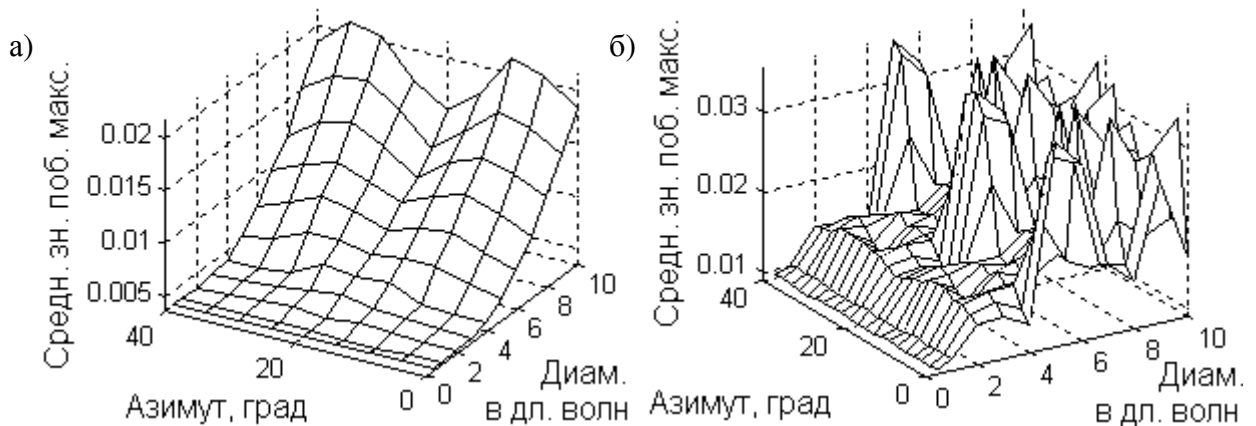


Рис. 3. Зависимость среднего значения побочного максимума от азимута сигнала и диаметра решётки из направленных (а) и ненаправленных (б) антенных элементов.

При увеличении частоты сигнала для антенной решётки из слабонаправленных антенных элементов наблюдается увеличение побочного максимума пеленгационной характеристики и появление значительной зависимости от угла прихода сигнала. Аналогичная зависимость для антенной решётки из направленных элементов не имеет подобных скачков среднего значения максимума в зависимости от частоты сигнала (диаметра антенной решётки), что делает их более предпочтительными при создании радиотехнических систем для оценки направлений прихода сигналов.

**Третья глава** посвящена алгоритмам пространственной обработки сигналов в многоканальных радиотехнических комплексах оценки угловых координат, построенных на базе кольцевых антенных решёток из направленных элементов. Проведено исследование разрешающей способности алгоритмов сверхразрешения при использовании предварительной пространственной обработки сигналов с помощью алгоритмов диаграммообразования.

Повышение разрешающей способности достигается благодаря использованию предварительной пространственной фильтрации перед применением алгоритма сверхразрешения. На первой стадии обработки данных проводится предварительная оценка угловых координат источников радиоизлучения с помощью алгоритма неадаптивного формирователя луча. После этого проводится предварительная пространственная фильтрация с помощью алгоритма диаграммообразования, основанного на неадаптивном формирователе луча. Формирование *B* диаграмм направленности

осуществляется путём умножения данных, полученных от антенной решётки на вектор весовых коэффициентов  $\mathbf{W}_b$ . Весовые коэффициенты, согласно выбранному алгоритму, определяются управляющими векторами.

$$\mathbf{W}_b = \mathbf{a}(\theta_b), \quad b = 1, \dots, B \quad (3)$$

Направления максимумов, формируемых цифровых диаграмм направленности  $\Theta \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_B\}$ , выбираются близкими к предварительной оценке угловых координат, полученной на первой стадии. Отсчёты сигналов  $\mathbf{Y} = [y_1(t_k), y_2(t_k), \dots, y_B(t_k)]^T$ ,  $k = 1, \dots, K$ , полученные в результате пространственной обработки сигналов, вычисляются по формуле:

$$y_b(t_k) = \mathbf{W}_b^H \cdot \mathbf{X}, \quad b = 1, \dots, B \quad (4)$$

По полученным данным вычисляется корреляционная матрица  $\mathbf{R}_B = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H$ , собственные векторы и собственные числа корреляционной матрицы. Проводится разделение пространства корреляционной матрицы по критерию Акайке на сигнальное и шумовое подпространства, составляется шумовая матрица  $\mathbf{Q}_{NB}$  из  $M$  собственных шумовых векторов-столбцов корреляционной матрицы  $\mathbf{R}_B$ . Вычисляется пеленгационная характеристика  $P_{BMUSIC}(\phi)$  по формуле:

$$P_{BMUSIC}(\phi) = \frac{1}{(\mathbf{W} \cdot \mathbf{a}_B(\phi))^H \cdot \mathbf{Q}_{NB} \cdot \mathbf{Q}_{NB}^H \cdot (\mathbf{W} \cdot \mathbf{a}_B(\phi))} \quad (5)$$

Наибольшие  $M$  локальных максимумов пеленгационной характеристики соответствуют оценкам направления прихода сигналов.

Проведено исследование зависимости разрешающей способности алгоритма пространственной обработки сигналов от направлений максимумов формируемых цифровых диаграмм направленности. Получены ограничения и выработаны рекомендации по выбору направлений максимумов цифровых диаграмм направленности. Данный алгоритм имеет высокую разрешающую способность, малые смещения и СКО оценки угловых координат. На рисунке 4 представлены зависимости разрешающей способности от отношения сигнал/шум на примере девятиэлементной антенной решётки. Направления для формирования цифровых диаграмм направленности для алгоритма BMUSIC выбирались с учётом проведённых в работе результатов исследований для кольцевой антенной решётки из направленных элементов.

Из графика видно, что алгоритм BMUSIC обеспечивает более высокую вероятность разрешения сигналов по сравнению с алгоритмом MUSIC, при этом критерий оценки количества сигналов Акайке (AIC) обеспечивает верное разделение пространства корреляционной матрицы для алгоритмов оценки угловых координат.

Предложен алгоритм, позволяющий определять направления прихода пространственно коррелированных сигналов при применении алгоритма диаграммообразования NSBF (Null-Steering Beam Former), основанного на управлении нулями формируемых диаграмм направленности. Данный алгоритм позволяет формировать диаграммы направленности с единичным

откликом и с  $N-1$  нулями в желаемых направлениях. Алгоритм позволяет вычислить вектор весовых коэффициентов для сигналов, принятых антенными элементами. Вектор весовых коэффициентов вычисляется по формуле:

$$\mathbf{W}^H = \mathbf{e}^T \mathbf{A}_S^H (\mathbf{A}_S \cdot \mathbf{A}_S^H)^{-1} \quad (6)$$

где  $\mathbf{e}^T = [1, 0, \dots, 0]$ ,  $\mathbf{A}_S = [\mathbf{a}(\theta_{n_1}), \mathbf{a}(\theta_{n_2}), \dots, \mathbf{a}(\theta_{n_{Nn}})]$ ,  $\theta_{n_1}$  – направление единичного отклика формируемой диаграммы направленности,  $\theta_{n_2}, \dots, \theta_{n_{Nn}}$  – направление нулей формируемой диаграммы направленности,  $Nn$  – величина на единицу большая, чем количество формируемых нулей диаграммы направленности,  $H$  – символ комплексного сопряжения и транспонирования,  $T$  – символ транспонирования.

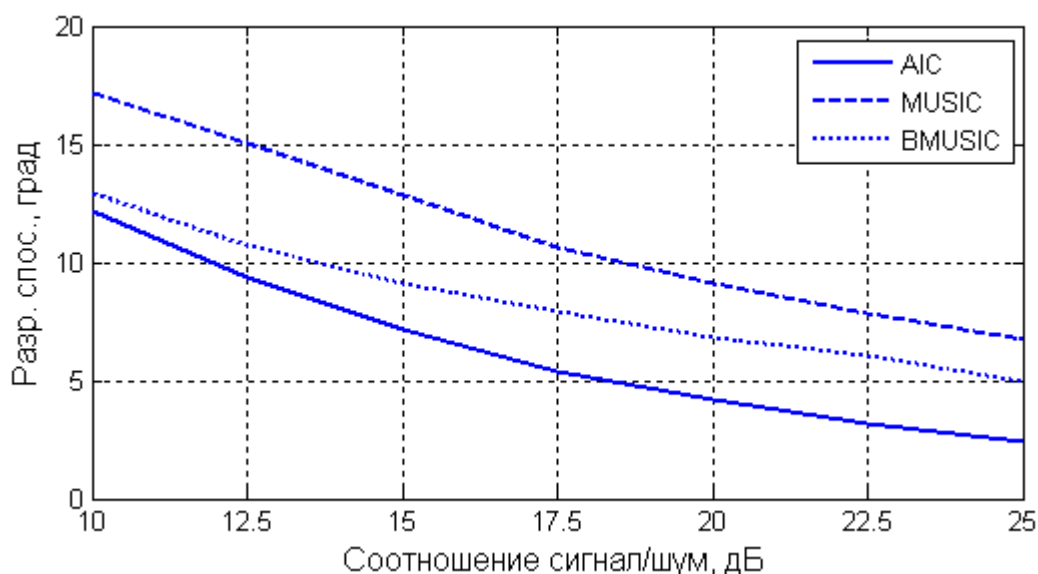


Рис. 4. График зависимости разрешающей способности от соотношения сигнал/шум.

Для оценки направлений прихода двух коррелированных сигналов предлагается следующая методика. На первой стадии проводится предварительная оценка направлений прихода сигналов методом неадаптивного формирователя луча и определяется диапазон углов предположительного нахождения сигналов. На второй стадии в указанный диапазон углов формируются цифровые диаграммы направленности методом NSBF с нулём всех диаграмм в направлении края диапазона углов, рассчитывается пеленгационная характеристика алгоритма MUSIC на основе сформированных диаграмм направленности. Определяется значение глобального максимума пеленгационной характеристики, связанного с сигналом, при формировании нулей диаграмм направленности во всём диапазоне углов предположительного нахождения коррелированных сигналов с заданным шагом по углу.

Локальные максимумы зависимости максимальных значений пеленгационных характеристик от положения нуля формируемых диаграмм направленности соответствуют предварительным оценкам угловых координат коррелированных сигналов. Для получения окончательных оценок угловых координат необходимо провести уточнение полученных значений.

Для этого необходимо сформировать диаграммы направленности с нулём в направлении одного из сигналов, рассчитанная на их основе пеленгационная характеристика будет иметь максимум в направлении второго сигнала.

Для уточнения оценки угловых координат второго сигнала необходимо сформировать диаграммы направленности с нулями в уточнённом направлении первого сигнала и на их основе рассчитать пеленгационную характеристику. Положение максимума пеленгационной характеристики будет соответствовать уточнённому значению угловых координат второго сигнала. В случае прихода более чем двух коррелированных сигналов необходимо формировать количество нулей диаграмм направленности на единицу меньше, чем количество сигналов. При этом необходимо проводить сканирование всеми нулями диаграмм направленности в области предположительного прихода сигналов. Предложенный алгоритм позволяет получить более высокие точностные характеристики и разрешение при использовании антенной решётки из направленных элементов.

К недостаткам предложенного алгоритма оценки угловых координат коррелированных сигналов, основанного на сканировании нулями формируемых диаграмм направленности, следует отнести высокие вычислительные затраты для расчёта пеленгационных характеристик с различным направлением нулей диаграмм направленности. Вычислительная сложность быстро возрастает с увеличением количества коррелированных сигналов, так как это приводит к увеличению количества нулей формируемых диаграмм направленности и увеличению размерности для поиска максимумов зависимости максимальных значений пеленгационных характеристик от направлений нулей диаграмм направленности.

Достоинством предложенного алгоритма является устойчивая работа в сложной электромагнитной обстановке и возможность оценки угловых координат коррелированных сигналов с высокой точностью. При вычислении угловых координат согласно предложенному алгоритму имеется возможность параллельного расчёта весовых коэффициентов и пеленгационных характеристик для разных направлений нулей диаграмм направленности, что может значительно ускорить получение оценок угловых координат.

**Четвёртая глава** диссертационной работы посвящена реализации методов пространственной обработки сигналов на лабораторном макете радиотехнического комплекса. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов в реальных условиях с учётом разброса параметров входящих узлов была проведена на основе макета радиопеленгатора. Для приёма сигналов использована кольцевая антенная решётка диаметром 1,5 м, содержащая антенные элементы двух частотных диапазонов, по восемь элементов на каждый частотный диапазон. Внешний вид антенной решётки представлен на рисунке 5.

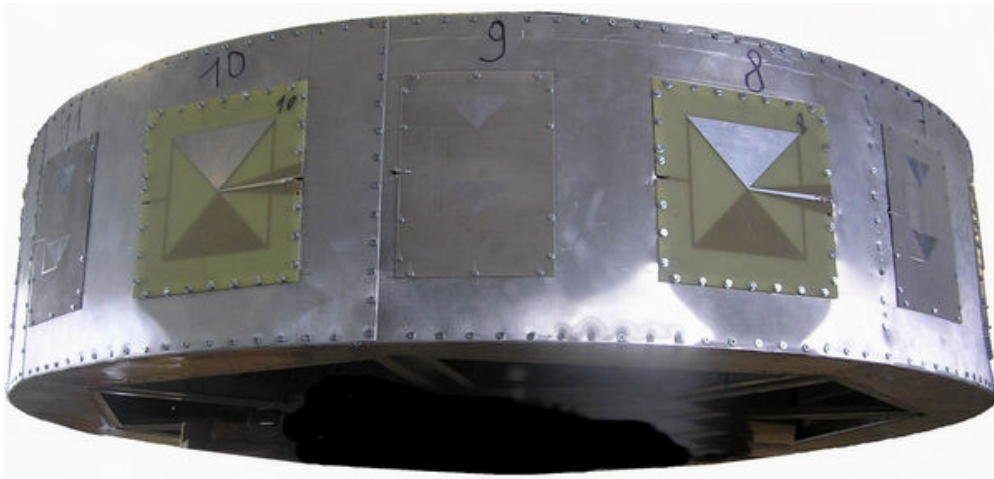


Рис. 5. Антенная решётка.

Антенные элементы нижнего диапазона предназначены для работы в диапазоне частот (500-1300) МГц. Антенные элементы верхнего диапазона предназначены для работы в диапазоне частот (1300-2500) МГц. В качестве элементов антенной решётки используются печатные вибраторы, расположенные в резонаторах.

В диссертационной работе представлены результаты измерения СКО определения направления прихода одного сигнала для исследуемого радиотехнического устройства во всём рабочем диапазоне частот. СКО не превышает  $0,25^\circ$  во всём диапазоне частот при исследуемых условиях. Показано, что в случае прихода одного сигнала использование антенной решётки из направленных элементов позволяет использовать меньшее количество антенных элементов для оценки направления прихода сигнала с сохранением точности при меньших вычислительных затратах. В результате натурных испытаний подтверждена работоспособность разработанных алгоритмов пространственной обработки сигналов и адекватность разработанной программной модели радиопеленгатора. Предложена методика устранения ложных максимумов пеленгационных характеристик.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

## Основные результаты диссертационной работы

1. Рассмотрены точностные характеристики и характеристики разрешения сверхразрешающих алгоритмов оценки угловых координат в применении к кольцевым антенным решёткам из направленных элементов. Показана возможность применения сверхразрешающих алгоритмов совместно с антенными решётками из направленных элементов в широком диапазоне частот.
2. Алгоритм MUSIC имеет более высокие точностные характеристики при обработке сигналов с антенной решётки из направленных элементов по сравнению с рассмотренными алгоритмами сверхразрешения в условиях малого количества отсчётов принимаемых сигналов.
3. Определена ширина диаграмм направленности антенных элементов, обеспечивающая высокие точностные характеристики и разрешение в широком диапазоне частот. Для девятиэлементной антенной решётки ширина диаграмм направленности должна составлять  $30^\circ$ . Наиболее высокая точность оценки угловых координат и наиболее низкая разрешающая способность наблюдаются в случае прихода одного из сигналов в равносигнальную область антенной решётки.
4. Алгоритм оценки количества сигналов, основанный на критерии Акаике, по сравнению с другими алгоритмами, имеет наибольшую вероятность правильной оценки количества сигналов в случае применения к антенным решёткам из направленных элементов. Машинное моделирование показывает, что критерий Акаике позволяет правильно оценивать количество сигналов при угловом расстоянии между ними в 1,15 раз меньшем, чем другие критерии при выбранных параметрах антенной решётки и сигналов.
5. При использовании антенной решётки с количеством элементов семь и более предпочтительным является применение направленных антенных элементов, так как при этом обеспечивается более высокая точность оценки угловых координат и разрешающая способность по сравнению с решёткой из ненаправленных антенных элементов.
6. Для антенных решёток из направленных элементов применение алгоритма VMUSIC с предварительным формированием диаграмм направленности позволяет увеличить разрешающую способность, уменьшить смещение оценок угловых координат близкорасположенных сигналов и уменьшить вычислительные затраты для расчёта направлений прихода сигналов. Из результатов моделирования следует, что применение указанного алгоритма к кольцевой антенной решётке из направленных элементов позволяет повысить разрешающую способность не менее чем в 1,3 раза по сравнению с алгоритмом MUSIC для выбранных параметров антенной решётки и сигналов.
7. Предложен алгоритм оценки угловых координат пространственно коррелированных сигналов, основанный на сканировании нулями формируемых диаграмм направленности.

8. По результатам экспериментальных исследований определено СКО оценки угловых координат источника сигнала для исследуемого радиотехнического устройства во всём рабочем диапазоне частот. СКО не превышает  $0,25^\circ$  во всём диапазоне частот в условиях проведения экспериментов, что находится в согласии с результатами машинного моделирования.

9. В результате натурных испытаний подтверждена работоспособность разработанных алгоритмов пространственной обработки сигналов и адекватность разработанной программной модели радиопеленгатора. Полученные результаты натурных испытаний находятся в хорошем согласии с результатами машинного моделирования.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сухов, И. А. Применение алгоритма MUSIC в пеленгаторах с кольцевыми антенными решетками из направленных элементов / И. А. Сухов, В. П. Акимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 5 (157). – С. 45-49.

2. Сухов, И. А. Метод повышения разрешающей способности пеленгатора с кольцевой антенной решёткой при использовании алгоритма MUSIC / И. А. Сухов, В. П. Акимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 3 (174). – С. 19-25.

3. Сухов, И. А. Применение алгоритмов «сверхразрешения» к радиопеленгаторной антенной решётке из направленных элементов / И. А. Сухов, В. П. Акимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 4 (175). – С. 41-46.

4. Сухов, И. А. Пеленгация на основе метода спектрального анализа MUSIC / И. А. Сухов, А. В. Харитонов, В. П. Акимов // В кн.: XIV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тез. докл. – СПб.: Изд-во «Соло». – 2010. – С. 88-89.

5. Сухов, И. А. Сверхразрешающий алгоритм MUSIC для кольцевой антенной решётки с малой базой / И. А. Сухов, А. В. Харитонов, В. П. Акимов // В кн.: XXXIX Неделя Науки СПбГПУ, Ч. IX, Материалы международной научно-практической конференции. Ч. IX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2010. – С. 13-15.

6. Сухов, И. А. Разработка антенной системы для широкополосного малогабаритного высокоточного пеленгатора / И. А. Сухов // В кн.: Сборник конкурсных научно-исследовательских работ магистров, аспирантов молодых учёных в области стратегического партнёрства вузов и предприятий радиоэлектронного комплекса СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. – С. 73-78.

Работы 1-3 опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ.