**Макаров Евгений Сергеевич. Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.03 / Макаров Евгений Сергеевич; [Место защиты: Воронеж. гос. ун-т].- Воронеж, 2009.- 167 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-1/516**

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



04200953812

Макаров Евгений Сергеевич

Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель — Заслуженный деятель науки РФ доктор физико-математических наук профессор Нечаев Юрий Борисович

Воронеж - 2009

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark1)

1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕЛИНЕЙНОМ СПЕКТРАЛЬНОМ

АНАЛИЗЕ 17

* 1. [.Постановка задачи разрешения 17](#bookmark2)

1. Методы оценки угловых координат со сверхразрешением, основанные на сканировании по пространству 19
2. [Методы параллельного обзора, основанные на разделении сигнального и шумового подпространств 21](#bookmark4)
3. [Алгоритмы оценки числа источников электромагнитного поля 25](#bookmark9)
4. [Сравнительный анализ современных сверхразрешающих методов оценки угловых координат 28](#bookmark13)
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК 34

1. Влияние отношения сигнал/шум и времени накопления сигнала на

характеристики по точности и разрешающей способности 35

[2.2.3ависимосгь точности оценки угловых координат и разрешающей способности от радиуса кольцевой антенной решетки 40](#bookmark17)

1. [Сравнительный анализ кольцевых антенных решеток и кольцевых антенных решеток с центральным элементом 45](#bookmark18)
2. Исследование устойчивости собственноструктурных алгоритмов MUSIC и EV к ошибкам в оценивании размерности сигнального и шумового подпространств при наличии амплитудно-фазовых ошибок каналов приема 47
3. Точность оценки угловых координат при различных уровнях мощностей принимаемых сигналов 50

з

2.6.Оценка времени, требуемого на обработку сигнально-помеховой смеси

современными методами оценки угловых координат 52

2.7.Выбор антенной системы приемопередающей ФАР при использовании

методов высокого разрешения 54

Выводы к главе 2 58

1. ОЦЕНКА УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В АПРИОРНО ИЗВЕСТНОМ СЕКТОРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОЦЕДУРЫ РАСШИРЕНИЯ МАТРИЦЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ 61
2. [Применение алгоритмов параллельного обзора для оценки угловых координат в априорно известном секторе с использованием линейных эквидистантных антенных решеток 62](#bookmark24)

3.2.Оценивание угловых координат сигнала при использовании процедуры построения расширенной корреляционной матрицы 66

1. [Разрешающая способность систем оценки угловых координат, использующих расширение корреляционной матрицы 74](#bookmark25)
2. Локально-оптимальная оценка расширенной теплицевой матрицы для антенных решеток с минимальной избыточностью 77

Выводы к главе 3 79

1. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ РАЗРЕШЕНИЯ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО

ПОЛЯ 81

* 1. .Процедуры декорреляции принимаемого поля 82

1. [Исследование алгоритмов пространственного сглаживания и усреднения «вперед-назад» 87](#bookmark33)
2. [Разработка и исследование комбинированной методики декорреляции сигнальной смеси 91](#bookmark34)

[4.4.0ценка количества источников электромагнитного поля в случае когерентных сигналов 94](#bookmark35)

1. [Способ выбора проектора в задаче разрешения при априорном знании угла прихода помехи, использующий регуляризацию пространственной корреляционной матрицы 99](#bookmark36)
2. Разработка и исследование двухэтапного метода оценки угловых координат, основанного на попарном объединении антенных элементов в подрешетки 103

Выводы к главе 4 109

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРЕШЕНИЮ

БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО

ПОЛЯ 111

1. Методика коррекции амплитудно-фазового распределения поля, основанная на интерполяции отклика антенной системы на сигнал от выносного генератора, располагаемого в опорных точках 112
2. [Инженерная методика коррекции амплитудно-фазового распределения 116](#bookmark39)
3. Двухэтапная методика устранения амплитудно-фазовых искажений.... 119
4. Результаты эксперимента по коррекции амплитудно-фазового распределения принимаемого поля в односигналйном случае 122
5. [Результаты эксперимента по разрешению двух источников электромагнитного поля 125](#bookmark44)

Выводы к главе 5 129

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 131](#bookmark45)

ЛИТЕРАТУРА 134

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Описание программного продукта Pelengator 1.0 154

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Описание программного продукта Компенсатор 1.0 162

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акты об использовании диссертационных материалов

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение числа радиосредств как гражданского так и военного назначения, наблюдающееся в настоящее время, привело к сильной загруженности радиодиапазонов [1,2].

Особенно остро эта проблема стоит в коротковолновом диапазоне длин волн, где в настоящее время практически не осталось частот, свободных от источников сигналов. Применение подвижных систем пассивной радиолокации, использующих классические методы оценки углов прихода [3- 5], при наличии нескольких источников приводит к аномальным ошибкам, так как амплитудно-фазовое распределение (АФР) электромагнитного поля в раскрыве антенной решетки представляет собой суперпозицию нескольких волн. Разделение источников оказывается невозможным в силу малости апертуры антенной системы.

Одним из ресурсов увеличения пропускной способности информационных систем передачи данных является использование степени свободы, связанной с пространственным управлением диаграммой направленности [6-8]. При этом зачастую необходима априорная информация о местоположении абонентов и помеховых источников поля. От точности этой информации зависит корректность установки нулей и максимумов диаграммы направленности антенной системы, а следовательно, и отношение сигнал/шум для принимаемых абонентом и базовой станцией сигналов [9].

В силу указанных обстоятельств в настоящее время наблюдается интенсивное развитие теории адаптивной пространственной обработки сигналов в многоканальных антенных системах. Областью приложения таких систем являются подвижные комплексы пассивной локации с малоапертурными антенными решетками, а также системы радиосвязи, использующие пространственное разделение пользователей.

Применение современных методов нелинейного спектрального анализа [10-18] позволяет решать задачу углового разрешения источников, разнесенных на сколь угодно малое угловое расстояние, при условии, что отношение сигнал/шум велико, а отклонение амплитудно-фазового распределения в раскрыве реальной антенной системы от модельного пренебрежимо мало. Это обстоятельство делает их привлекательными для использования как в малоапертурных радиопеленгаторах, так и в системах связи, использующих пространственное разделение пользователей.

Однако при попытке практического воплощения этих методов в реальных системах возникает ряд задач, связанных с коррекцией искажений принимаемого поля, обработкой коррелированных сигналов, выбором геометрии антенной системы, уменьшением среднеквадратической ошибки пеленга и т.д.

Таким образом, актуальным представляется развитие методов адаптивной пространственной обработки сигналов применительно к задаче разрешения источников электромагнитного поля в условиях сложной помеховой обстановки.

**Состояние вопроса.** Основные результаты в теории сверхразрешения **в** нашей стране были получены следующими учеными: В.В. Сазонов, А.Б. Гершман, О.П. Черемисин, Ю.И. Абрамович, В.В. Караваев, Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос, Д.И. Леховицкий. За рубежом авторами, внесшими наибольший вклад **в** разработку нелинейных алгоритмов пространственного спектрального анализа, являются J. Capon, P. Stoica, В. Ottersten, L. Swindlehurst, М. Viberg, Т. Kailath, A. Barabell, М. Kaveh, A. Nehorai, В. Friedlander, A. Weiss, G. Xu, K.M. Buckley, J. Bohme, M. Haardt, B.D. Rao, K.V.S. Hari, X. Mestre, A. Manikas, T. Sarkar, U. Pilllai, M. Wax, M. Zoltowski и др.

Появление теории квазистатистического сверхразрешения принято относить к 1967 г., когда J. Capon с коллегами опубликовали работы [19, 20], посвященные пространственно-временному анализу сейсмических данных и предложили метод их обработки, отличающийся повышенной разрешающей способностью по сравнению с традиционным формированием диаграммы направленности по методу Фурье.

Это направление вызвало значительный интерес у исследователей [например, 21-27], и, после появления ряда работ, посвященных в основном адаптации методов оценки параметров синусоид в шуме к задаче оценки угловых координат, D.H. Johnson опубликовал работу [16], обобщившую достижения в области разработки сверхразрешающих алгоритмов для оценивания пеленгов.

Среди множества исследований следует выделить идею Schmidt [26,27], который предложил алгоритм сверхразрешения MUSIC, основанный на разделении сигнального и шумового подпространств. Этот алгоритм дал толчок к развитию собственноструктурных алгоритмов обработки многоканальных данных, к числу которых следует отнести MUSIC,ROOT-MUSIC [28], ESPRIT [29,30], TLS-ESPRIT [31], а также различные модификации метода проецирования подпространств: WSF [32], SSF [33], MODE [34]. Использование собственноструктурных методов обработки предполагает либо априорное знание числа источников сигнала, присутствующих в поле наблюдения, либо предварительную оценку их количества. Решению этой задачи посвящены работы [35-45].

Существует большое число работ, направленных на разработку и исследование сверхразрешающих алгоритмов (см. например, [46-73]). Эффекты конечного времени накопления сигнала рассматривались в [74, 75]. Методы регуляризации, позволяющие проводить пеленгование при числе снимков сигнала, меньшем количества антенных элементов, предложены и исследованы в [75-79]. Вопросы устойчивости алгоритмов к амплитудно-фазовым ошибкам каналов приема освещены в [80-85].

Методы высокого разрешения, за исключением требующих многомерной оптимизации [32-34] и метода максимального правдоподобия [54-56], теряют свои качества при попытке оценивать углы прихода коррелированных сигналов [50]. Процедуры пространственного сглаживания, позволяющие избежать этого недостатка, предложены и исследованы в работах [85-92], а в работах [93, 94] предложены субоптимальные методы пеленгации, сохраняющие работоспособность при решении задачи разделения коррелированных сигналов.

Новым направлением исследований нелинейных алгоритмов пространственного анализа является задача разрешения при использовании неэквидистантных антенных решеток [13], например, решеток с минимальной избыточностью, впервые предложенных в [95]. Вопросы разрешения при использовании таких решеток освещались в [96-100].

Обобщение методов сверхразрешения на двумерный случай, когда требуется оценка одновременно и азимута, и угла места источника радиоизлучения, приводит к вычислительно сложным алгоритмам [101-102], поэтому в этой части усилия исследователей в основном были направлены на снижение временных затрат при расчете оценок угла прихода волн [103-108]. Особенно здесь следует отметить работы [109-110], в которых предложен алгоритм UCA-ESPRIT, дающий оценки угла места и азимута, автоматически соотносящиеся друг с другом.

Методы пространственного анализа с высоким разрешением требуют точного знания комплексных диаграмм направленности антенных элементов, входящих в состав антенной системы. На практике это условие не выполняется в силу различных факторов. Вопросы коррекции амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля в раскрыве антенной системы рассматривались в [111-120].

Несмотря на обилие работ, в которых проведены исследования пеленгаторов, использующих сверхразрешающие алгоритмы, некоторые вопросы по-прежнему являются недостаточно освещенными. К их числу следует отнести исследование точности оценки угловых координат в системах, использующих плоские антенные решетки, особенно при малых отношениях сигнал/шум и малом числе антенных элементов, когда получение аналитических выражений наталкивается на значительные трудности. Практически не является изученным вопрос использования разреженных антенных решеток для целей пространственного анализа, единственной известной нам работой является [98], но в ней оценка точности пеленгации проводилась для линейного измерителя угловых координат. Работы, посвященные процедурам декорреляции поля, хотя и достаточно многочисленны, однако до сих пор не освещают вопросы их сравнительного анализа. Также малоизученной представляется зависимость эффективности декорреляции от фазы коэффициента взаимной корреляции сигналов, хотя граница Крамера-Рао для такой ситуации получена в [46]. Значительный интерес для практики представляет применение многошаговых методов, например, [121, 122], и исследование возможностей по уменьшению ошибок в оценивании углов прихода, предоставляемых ими. Наконец, многочисленные методики калибровки антенной решетки ([111-120]), требуют модификации при использовании их в'антенных системах с малой апертурой, так как искажения амплитудно-фазового распределения в таких решетках могут быть значительными, что вынуждает максимально тщательно проводить коррекцию. **Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является исследование возможностей углового сверхразрешения в многоканальных системах пассивной радиолокации с малой апертурой.

**Задачи исследования:**

* Определение влияния геометрии антенной решетки на характеристики разрешения малоапертурных систем
* Проведение сравнительного анализа методов высокого разрешения в условиях малых отношений сигнал/шум и наличия амплитудно-фазовых ошибок каналов приема
* Разработка и исследование методов предварительной обработки сигнально-помеховой смеси в многоканальных системах пассивной радиолокации с малой апертурой, направленных на декорреляцию поля и снижение ошибки измерений
* Разработка методик коррекции амплитудно-фазовых искажений поля в раскрыве антенной решетки малобазовых радиопеленгаторов
* Определение реальных возможностей малобазовых радиопеленгаторов, использующих сверхразрешающие алгоритмы обработки сигнала, на основе полевых испытаний.

**Методы исследования.** В работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, физическое моделирование, численные методы расчета и анализа, математический аппарат теории матриц, натурные испытания. Значительная часть результатов работы получена на основе компьютерного моделирования с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных на ПК на языках C++ и Delphi, а также в среде Matlab 6.5. **Научная новизна работы** В процессе диссертационного исследования впервые проведен статистический анализ методов высокого разрешения в системах пассивной локации, построенных на базе малоапертурных кольцевых и линейных неэквидистантных антенных решеток, учитывающий геометрию антенной системы. Впервые определены сравнительные характеристики сверхразрешающих методов при малых отношениях сигнал/шум и наличии амплитудно-фазовых ошибок каналов приема. Предложены новые алгоритмы предварительной обработки сигналов, направленные на повышение разрешающей способности, декорреляцию поля в раскрыве антенной решетки, а также на устранение искажений АФР электромагнитного поля. Проведены экспериментальные исследования, показавшие возможность достижения на практике углового сверхразрешения.

**Практическая ценность.** Проведенные модельные исследования дают возможность оценить эффективность многоканальных малоапертурных измерителей угловых координат с кольцевыми, линейными эквидистантными и неэквидистантными антенными решетками, функционирующих при малых отношениях сигнал/шум. Предложенный двухэтапный алгоритм обработки сигналов позволяет в 2-4 раза повысить точность оценки угловых координат и разрешающую способность системы. Разработанные методики коррекции амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля позволяют на практике добиться характеристик по разрешению и точности, сравнимых с характеристиками, получаемыми в модельном эксперименте. Разработанные программы моделирования могут быть использованы при разработке многоканальных высокоточных пеленгационных систем.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использовались в НИР «Диоптрия», НИР «Палантин», ОКР «Борисоглебск-2», выполненных в ОАО «Концерн «Созвездие», ,а также в учебном процессе на кафедре «Электроника» Воронежского государственного университета и кафедре телекоммуникационных систем Воронежского института МВД России.

Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Основные результаты работы опубликованы в [124-152].

**Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего *165* наименований, и трех приложений. Объём диссертации составляет 164 страницы, включая 40 рисунков и 12 таблиц.

В **Главе 1** сформулирована задача углового разрешения в многоканальных системах. Проведен обзор существующей литературы по применению следующих методов нелинейного спектрального анализа сигналов в задаче оценки угловых координат: Кейпона, Борджотти-Лагунаса, теплового шума, MUSIC, EV, ROOT-MUSIC, ESPRIT, TLS-ESPRIT. На основе опубликованных к настоящему времени результатов сформулированы присущие каждому алгоритму преимущества и недостатки, проведен сравнительный анализ алгоритмов. Рассмотрены вопросы оценки числа источников сигналов.

На основе обзора сформулированы научные проблемы, решение которых представляет интерес для разработчиков систем оценки угловых координат. Такими проблемами являются: разрешение коррелированных сигналов,

сравнительный анализ методов сверхразрешения при наличии амплитудно­фазовых ошибок каналов приема, влияние геометрии антенной системы на характеристики систем оценки угловых координат, устранение систематических ошибок обработки.

**Глава 2** представляет результаты статистического анализа методов сверхразрешения при использовании их в системах оценки угловых координат с кольцевыми антенными решетками (КАР) и кольцевыми решетками с центральным элементом (КАРЦ).. В ней получены зависимости смещения и СКО оценок для различных алгоритмов обработки и геометрий антенных систем, в том числе в пороговой области. Проведен сравнительный анализ алгоритмов пространственного анализа, основанный на методе статистических испытаний, а также сравнительный анализ структур антенных систем. Оценено число операций цифрового сигнального процессора, затрачиваемое им на определение пеленгов при использовании сверхразрешающих алгоритмов. Предложена конфигурация приемопередающей антенной системы, в которой наилучшим образом сочетаются преимущества пятиэлементной кольцевой антенной решетки и линейной эквидистантной.

**Глава 3** представляет результаты статистического анализа сверхразрешающих алгоритмов параллельного обзора ROOT-MUSIC и ESPRIT при использовании их в системах оценки угловых координат диапазона 1,5 -30 МГц, число приемных каналов в которых уменьшено за счет применения неэквидистантного размещения антенных элементов. В главе проведен сравнительный анализ измерителей угловых координат, построенных на основе линейных эквидистантных (ЛЭАР) и неэквидистантных, а также кольцевых антенных решеток. Проведен сравнительный анализ таких систем с традиционно применяемыми эквидистантными АР, указано на то, что при использовании разреженных антенных систем происходит обмен апертуры на требуемое отношение сигнал/шум (либо время накопления). Исследованы возможности измерителей угловых координат с разреженными решетками по разрешению некоррелированных источников сигнала. Рассмотрена процедура локально-оптимальной оценки расширенной теплицевой корреляционной матрицы.

**Глава 4** посвящена алгоритмам предварительной обработки сигналов в многоканальных системах оценки угловых координат, построенных на базе линейных антенных решеток. Для задачи разрешения сигналов двух когерентных источников исследованы методики декорреляции поля пространственного сглаживания и усреднения «вперед-назад», получены характеристики точности оценки угловых координат. Исследована эффективность процедур оценки числа сигналов при использовании процедур декорреляции. Предложена комбинированная методика декорреляции электромагнитного поля. Предложены и исследованы алгоритмы предварительной обработки сигналов, направленные на повышение разрешающей способности методов высокого разрешения. Повышение разрешающей способности реализовано за счет применения двухпроходного режима с предварительным формированием нулей диаграммы направленности.

В **Главе** 5 приведены результаты полевых испытаний, проведенных автором совместно с С.А. Зотовым. Исследованы вопросы коррекции амплитудно-фазовых ошибок антенной системы малобазовых радиопеленгаторов диапазона 30-100 МГц. Получены экспериментальные зависимости разности фаз между антенными элементами от угла прихода сигнала. Предложены методики устранения искажений фронта плоской волны, позволившие на практике добиться сверхрэлеевского разрешения некоррелированных сигналов. Получены количественные результаты,

характеризующие точность оценки угловых координат малобазовым

радиопеленгатором в одно- и двухсигнальной ситуациях.

**В Заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы

В **Приложении 1** приведено описание программного продукта

Pelengator 1.0 [151], предназначенного для моделирования процесса

пеленгования.

В **Приложении** 2 приведено описание программного продукта

Компенсатор 1.0 [152], предназначенного для моделирования процесса компенсации помехового сигнала

В **Приложении 3** помещены акты внедрения результатов диссертационной работы

**Основные положения, выносимые на защиту.**

* Результаты статистического анализа методов сверхразрешающей обработки сигналов в малоапертурных системах пассивной локации, построенных на базе кольцевых, линейных и разреженных антенных решеток, учитывающего геометрию антенной системы.
* Двухэтапный алгоритм обработки сигналов, который позволяет за счет повышения отношения сигнал/(помеха+шум) существенно повысить точность оценки угловых координат и разрешающую способность; алгоритм отличается тем, что сигналы с выходов предварительно сформированных подрешеток формируются по методу Фроста с защитой главного направления прихода сигнала.
* Методика декорреляции электромагнитного поля в раскрыве линейной антенной решетки, отличающаяся тем, что в ней последовательно применены процедура пространственного сглаживания и процедура усреднения «вперед-назад».
* Методики коррекции АФР электромагнитного поля в раскрыве антенной системы, основанные на априорном знании отклика антенной решетки для некоторых углов прихода; методики отличаются использованием эффекта кажущегося увеличения апертуры антенной системы, вызванного взаимным влиянием антенных элементов, а также последовательным применением интерполяции амплитудно-фазовых соотношений и аппроксимации по методу наименьших квадратов.
* Результаты экспериментальных исследований углового сверхразрешения при использовании антенных решеток с малой апертурой, показывающие возможность разрешения источников электромагнитного поля, разнесенных на доли рэлеевского предела.

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

* Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2007, 2008 гг.
* Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», — 2006-2008 гг.
* Международная XI школа-семинар «Электродинамика, техника СВЧ и оптических диапазонов волн». — Фрязино, 2007
* 7 Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии 21 века». — Воронеж, 2006.
* Международная научно-практическая конференция "СВЯЗЬ-ПРОМ 2007" в рамках IV Евро-Азиатского форума "СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007". — Екатеринбург, 2007
* «Информатика: проблемы, методология, технологии»: седьмая научно- методическая конференция. — Воронеж, 2007.
* Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: IX Международная научно-техническая конференция ПТиТТ-2008. —Казань, 2008
* Международная научно-техническая конференция «Компьютерные технологии в технике и экономике». — Воронеж, 2007.
* Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы борьбы с преступностью». — Воронеж, 2005-2006 гг.
* Всероссийская научно-практическая конференция «Охрана, безопасность и связь». — Воронеж, 2008
* Всероссийская научно-практическая конференция курсантов, слушателей, студентов, адъюнктов и молодых специалистов «Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем». — Воронеж, 2007.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 29 работ, из них 9 — в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ, 5 работ в материалах конференций, тезисы 12 докладов, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Основные результаты работы получены лично Е.С. Макаровым и опубликованы в соавторстве с научным руководителем Ю.Б. Нечаевым В совместных работах научному руководителю принадлежит постановка задачи и определение направления исследований. Подробное проведение рассуждений, расчетов, анализ и интерпретация полученных результатов выполнены Е.С. Макаровым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью диссертационной работы являлось исследование возможностей углового сверхразрешения в многоканальных системах пассивной радиолокации с малой апертурой.

В процессе достижения цели решены следующие задачи:

* Определены характеристики малоапертурных систем пассивной локации по разрешению и точности с учетом геометрии антенной решетки на

—- Проведен сравнительный анализ методов высокого разрешения в условиях малых отношений сигнал/шум и наличия амплитудно-фазовых ошибок каналов приема

* Разработаны и исследованы методы предварительной обработки сигнально-помеховой смеси в многоканальных системах пассивной радиолокации с малой апертурой, направленные на декорреляцию поля и уменьшение ошибки измерений
* Разработаны методики коррекции амплитудно-фазовых искажений поля в раскрыве антенной решетки малоапертурного радиопеленгатора

-—На основе полевых испытаний определены реальные возможности малоапертурных радиопеленгаторов, использующих сверхразрешающие алгоритмы обработки сигнала.

Основные научные и прикладные результаты работы состоят в следующем.

1. Кольцевые антенные решётки с числом АЭ *N >5* (независимо от того, присутствует центральный элемент или нет), обладают значительной широкополосностью — радиус таких решёток может достигать десяти длин волн. КАР и КАРЦ при равном количестве антенных элементов на окружности и радиусе решетки имеют схожие характеристики. Характеристики по разрешению, смещению и СКО обратно пропорциональны радиусу КАР.
2. Зависимости разрешения, смещения и СКО оценки от отношения сигнал/шум для интервала значений ОСШ 15-^40 дБ хорошо аппроксимируется зависимостью *SNR* -і?06 = *С*, где *SNR* — отношение сигнал/шум, выраженное в децибелах, *R* -— разрешение, смещение или СКО, *С* — константа.
3. Собственноструктурные методы превосходят по точности оценки угла прихода любой из несобственноструктурных. Метод MUSIC незначительно превосходит EV по точности и разрешающей способности, и более устойчив к ошибкам каналов приема. Переоценка размерности сигнального подпространства на единицу практически не влияет на точность определения пеленга методами MUSIC и EV. Недооценка размерности сигнального подпространства приводит к неспособности MUSIC верно находить пеленги, метод EV при этом остается работоспособным.
4. Использование ЛНЭАР позволяет повысить широкополосность антенных решеток, не приводя к аномальным ошибкам оценки угловых параметров сигналов. Разрешающая способность ЛНЭАР хуже, чем у кольцевой решетки той же апертуры.
5. Проведен сравнительный анализ методов оценки числа источников радиоизлучения, получены зависимости вероятностей правильного обнаружения от отношения сигнал/шум и рабочей частоты, установлено, что метод AIC имеет преимущество перед остальными при малых отношениях сигнал/шум. Показано, что ограничение методов AIC, MDL и EDC по «разрешающей способности» мало влияет на характеристики метода ROOT-MUSIC.
6. Предложена методика декорреляции, основанная на комбинированном использовании процедур пространственного сглаживания и усреднения «вперед-назад», которая приводит к повышению разрешающей способности на 3-5° по сравнению с существующими методиками.
7. Предложен двухэтапный алгоритм тщательного анализа выходной

характеристики, который позволяет за счет повышения отношения

сигнал/(помеха+шум) в 2-4 раза повысить разрешающую способность алгоритмов высокого разрешения и уменьшить смещения оценок.

1. Предложена двухэтапная методика коррекции АФР, позволяющая снизить смещение оценок пеленгов до 3° при разносе источников на 0,2 ширины ДН.
2. Предложена инженерная методика коррекции АФР, позволяющая

использовать малое количество точек размещения известного генератора

(от одной до трех).

Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены

соответствующими актами об использовании.

Литература

1. Rappaport Т. S. Wireless Communications: Principles and Practice. — Prentice Hall, 2001. —707 p.
2. Zigangirov K. Theory of Code Division Multiple Access Communication. — Wiley & Sons, Inc., 2004. — 399 p.
3. Кукес И.С. Основы радиопеленгации / И.С. Кукес, М.Е. Старик. — М.: Сов. радио, 1964. — 640 с.
4. Саидов А.С. Проектирование автоматических радиопеленгаторов /

А.С. Саидов [и др.]. — М.: Радио и связь, 1997. —160 с.

1. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. — Томск, 2002. — 251 с.
2. Godara L.C. Smart Antennas. CRC Press, 2004. — 457 p.
3. Litva J. Digital Beamforming in Wireless Communications / J. Litva, T. K.-Y. Lo // Artech House, Boston, 1996. — 301 p.
4. Tsoulos G. V. Application of Adaptive Antenna Technology to Third Generation Mixed Cell Radio Architectures / M. A. Beach, S. C. Swales, G. V. Tsoulos // 44th IEEE Vehicular Technology Conference. — 1994. —Vol. 1. — pp. 615-619.
5. Nickel U. Principles of Adaptive Array Processing / In Advanced Radar Signal and Data Processing (pp. 5-1 - 5-20). Educational Notes RTO-EN-SET-O86, Paper 5. Neuilly-sur-Seine, France: RTO.

rhttD://ftp.rta.nato.intypublic//PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-SET-Q86/EN-SET-

086-05.pdf)