

На правах рукописи

БАЕВ АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ
РАДИОЛОКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУМУЛЯНТОВ
ВЫСОКОГО ПОРЯДКА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2002

Работа выполнена на кафедре теоретической радиотехники Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Ю.В. Кузнецов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.Ю. Гринев
кандидат технических наук, доцент
Б.М. Вовшин

Ведущая организация: ОАО «Центральное конструкторское
бюро «Алмаз»

Защита диссертации состоится « 29 » октября 2002 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2002 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, к.т.н., доцент

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Традиционные радиолокационные системы используют узкополосные сигналы, полоса частот которых составляет менее 10% от средней частоты диапазона. В результате отражения таких сигналов от радиолокационных объектов они изменяют свои параметры (задержку, доплеровский сдвиг, и т.д.), но практически сохраняют свою форму, поэтому можно проводить их оптимальную обработку в корреляторе или в согласованном фильтре.

Современная тенденция развития радиолокационных систем распознавания объектов заключается в расширении полосы частот в спектре зондирующих сигналов. Расширение полосы используемых частот позволяет получить дополнительную информацию о цели, что улучшает качество идентификации радиолокационных объектов. В сверхширокополосной (СШП) радиолокации используются зондирующие сигналы с длительностью порядка единиц наносекунд. При этом полоса частот этих сигналов составляет сотни мегагерц и перекрывает резонансную область физических объектов с характерными размерами от долей до десятков метров.

Под резонансной областью понимается диапазон частот, соответствующий геометрическим размерам и форме объектов, рассматриваемых в качестве рассеивателей электромагнитной энергии. Рассеяние радиолокационных объектов в резонансной области частот также называется собственным электромагнитным излучением.

Особый интерес вызывает применение результатов анализа собственных электромагнитных излучений для решения задачи идентификации радиолокационных объектов. Открывается возможность распознавания летательных аппаратов, представляющих собой групповую цель и неразрешимых обычным способом, обнаружения объектов заданного типа и классификации объектов по параметрам, связанным непосредственно с типом

объекта. При этом необходимо организовать обработку откликов радиолокационных объектов на сверхширокополосные зондирующие сигналы таким образом, чтобы с максимальной точностью оценить параметры полезного сигнала на фоне шумов и помех.

Основными преимуществами применения сверхширокополосных сигналов в радиолокации являются возможность их проникновения в различные среды, более низкая вероятность перехвата радиолокационных сигналов противником по сравнению с узкополосными сигналами, а также большая информативность, т.е. наличие информационных параметров, позволяющих классифицировать цели по большему числу признаков. Сверхширокополосная радиолокация является одним из перспективных направлений развития радиосистем в условиях радиоэлектронной войны.

При формировании модели рассеяния электромагнитного поля объектами СШП радиолокации делается допущение о линейности этого процесса, что чаще всего выполняется на практике. Согласно принятому допущению поздневременную часть отклика радиолокационного объекта на зондирующий сигнал можно представить в виде произведения передаточной функции объекта и преобразования Лапласа от возбуждающего воздействия.

Метод сингулярных разложений, предложенный Баумом, позволяет оценить передаточную функцию (ПФ) радиолокационного объекта в форме преобразования Лапласа. ПФ состоит из двух слагаемых: целой функции, описывающей ранневременную компоненту отклика радиолокационного объекта, и рациональной функции, определяющей поздневременную компоненту сигнала. Таким образом, поздневременная часть передаточной функции объекта может быть описана его комплексными резонансами (полюсами) и нулями, причем положение полюсов практически инвариантно по отношению к ракурсу объекта, что дает возможность использовать их в качестве параметров идентификации.

Одним из способов повышения точности оценки параметров собственных электромагнитных излучений объектов СШП радиолокации при высоком уровне шума является использование статистик высокого порядка, являющихся областью цифрового спектрального анализа, которая в последнее время интенсивно развивается. Методы на основе статистик высокого порядка эффективно применяются во многих областях науки и техники: телекоммуникации, радиолокации, геофизике, обработке изображений и речи, медицине, физике плазмы и других.

Традиционные методы подавления шумов и помех в откликах радиолокационных объектов основываются на использовании статистик второго порядка (автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности), которые статистически полностью описывают только гауссовские процессы. На практике часто встречаются ситуации, когда необходимо иметь информацию, которая заключена в статистиках высокого порядка, например, для извлечения фазовой информации, установления отличия от гауссовского распределения, наличия нелинейностей.

Использование кумулянтов высокого порядка при обработке сигналов СШП радиолокации может привести к значительному подавлению гауссовского шума, присутствующего в данных, поскольку для гауссовских процессов кумулянты выше второго порядка равны нулю. Это может позволить значительно увеличить точность оценки параметров резонансных моделей радиолокационных объектов при малых отношениях сигнал/шум, а значит, и увеличить достоверность идентификации.

Таким образом, задача идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации (самолетов, танков, ракет, мин и др.) по их собственным резонансным электромагнитным излучениям с использованием кумулянтов высокого порядка является актуальной.

Целью работы является разработка и исследование помехоустойчивого алгоритма идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка на основе формирования сигнатур целей, а также выработка рекомендаций по его практическому применению.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Разработана и исследована модель собственных электромагнитных излучений объектов СШП радиолокации, описываемых расположением особых точек (полюсов) на комплексной плоскости.

2. Определена потенциальная точность оценки информационных параметров резонансной модели объектов СШП радиолокации по критерию максимума функционала правдоподобия, позволившая оценить границу Рао-Крамера при выбранных параметрах модели.

3. Разработаны и исследованы методы оценки параметров модели собственных электромагнитных излучений объектов СШП радиолокации с использованием кумулянтов до четвертого порядка включительно, обеспечивающие точность, близкую к максимально возможной величине при малых отношениях сигнал/шум.

4. На основе статистического моделирования и экспериментальных исследований показана более высокая эффективность разработанных методов цифровой обработки сигналов СШП радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка по сравнению с традиционной корреляционной обработкой.

5. Разработан алгоритм идентификации объектов СШП радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка, основанный на формировании сигнатур целей по их полюсам, а также предложен технический облик системы идентификации радиолокационных объектов.

Методы исследований основываются на использовании теории вероятностей, статистик высокого порядка, линейной алгебры и теории матричных преобразований, математического анализа, цифрового спектрального анализа и его приложений, методов анализа линейных радиоустройств, методов математического и статистического моделирования, а также теоретических основ статистической радиотехники.

Научная новизна:

1. Обоснована и разработана гибкая математическая модель собственных излучений объектов с учетом воздействия белого гауссовского шума, основанная на методе сингулярных разложений.

2. Проведено сравнительное исследование методов оценки параметров резонансной модели объектов СШП радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка и выявлен наилучший из них.

3. Предложен новый, основанный на резонансных свойствах объектов, алгоритм формирования сигнатур целей СШП радиолокации, позволяющий производить их идентификацию при малом отношении сигнал/шум с использованием кумулянтов четвертого порядка.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что они позволили приступить к разработке технического облика системы идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка и сформулировать основные тактико-технические требования к ней. Экспериментально обоснована возможность создания устройства идентификации объектов СШП радиолокации с использованием их резонансного излучения.

Разработанные методы цифровой обработки сигналов сверхширокополосной радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка могут быть эффективно применены в системах неразрушающего контроля и диагностики крупных промышленных конструкций сложной геометриче-

ской формы (металлических ферм, вышек и перекрытий), а также в экологических службах при дистанционном зондировании атмосферы, контроле водных бассейнов. Кроме того, они достаточно универсальны и могут быть использованы в учебном процессе как в традиционных дисциплинах кафедры 405, так и в дисциплинах специализации.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены в Межотраслевом НТЦ «Радинтех» при выполнении договорных работ по теме «Конек». Акт о внедрении приведен в приложении к диссертации.

Научные и практические результаты работы использованы в процессе выполнения научно-исследовательских работ по гранту Минобрнауки Российской Федерации, государственная регистрация № 01990012073, а также отражены в отчетах по нескольким хоздоговорным и госбюджетным НИР.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического и статистического аппарата, компьютерных программ и логической обоснованностью выводов. Полученные результаты многократно подтверждены физическими и вычислительными экспериментами.

Апробация результатов работы:

Результаты исследования докладывались и обсуждались на:

Международных научно-технических конференциях: «52-я международная научная сессия, посвященная Дню Радио», г. Москва: РНТО РЭС имени Попова А.С. (1997 г.); «Цифровая обработка сигналов и ее применения», г. Москва: МЦНТИ (1999, 2002 гг.); «29-ая Европейская Микроволновая Конференция», Мюнхен (1999 г.); «30-ая Европейская Микроволно-

вая Конференция», Париж (2000 г.); «31-ая Европейская Микроволновая Конференция», Лондон (2001 г.); «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Москва: МЭИ (2002 г.).

Международных научно-технических семинарах: «4, 5, 6 и 7-й научный обменный семинар. Радиотехнические устройства СВЧ диапазона», г. Москва: МАИ (1996, 1999 гг.), г. Мюнхен: MTU (1997, 2000 гг.).

Всероссийских научно-технических конференциях: «Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве», г. Москва: МЭИ (1997, 1998 гг.); 1-я Всероссийская научно-техническая конференция по проблемам создания перспективной авионики, г. Москва: Фазотрон-НИИР (2002 г.).

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, из них 5 научных статей, 8 текстов докладов на английском языке, 11 текстов докладов на русском языке.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Синтезированная математическая модель собственных электромагнитных излучений объектов сверхширокополосной радиолокации позволила разработать эффективный алгоритм идентификации радиолокационных объектов на основе измерения параметров модели, аппроксимирующей сигнал, рассеянный целью.

2. Учет зависимости вычетов резонансной модели от ракурса цели в качестве дополнительной информации об идентифицируемых объектах при формировании банка данных позволяет увеличить достоверность идентификации.

3. Увеличение точности оценки параметров моделей собственных резонансных излучений объектов СШП радиолокации и уменьшение шумовой границы работоспособности алгоритма идентификации достигнуто за

счет правильного выбора одномерных сечений кумулянтных последовательностей высокого порядка.

4. Формирование сигнатур радиолокационных целей на основе использования информации об их резонансных частотах позволило автоматизировать процесс идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации.

5. Результаты цифровой обработки сигналов реального активного сверхширокополосного радиолокатора и портативного носимого геолокатора подтвердили эффективность разработанного алгоритма идентификации радиолокационных объектов.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа изложена на 152 машинописных страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 58 рисунков и 3 таблиц. Список литературы включает 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки новых методов идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации, сформулирована цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации.

В **первой главе** выполнен обзор литературы по материалам отечественных и зарубежных источников по тематике исследования. Показано, что сверхширокополосные радиолокационные системы используются в различных отраслях науки и техники: при обнаружении и распознавании космических аппаратов, ракет и самолетов, надводных кораблей и подводных лодок, мин, археологических, геологических и других подповерхностных объектов и т.д.

Установлено, что основными перспективными направлениями исследований в области сверхширокополосной радиолокации на сегодняшний день являются:

- радиолокационные системы ближнего радиуса действия, предназначенные для обнаружения перемещающихся объектов, скрытых стенами или листвой;

- бортовые радиолокационные системы ближнего радиуса действия, предназначенные для обнаружения военных целей под навесом или в лесистом ландшафте;

- воздушные радиолокационные системы защиты среднего радиуса действия (до 20 км), предназначенные для обнаружения и несовместной идентификации воздушных целей, включая вертолеты на линии деревьев;

- морские радиолокационные системы среднего радиуса действия (до 20 км), предназначенные для обнаружения ракет, движущихся над морской поверхностью.

Рассмотрены вопросы рассеяния электромагнитной энергии объектами произвольной формы, дано понятие эффективной площади рассеяния. Показана ее связь с характеристиками рассеяния радиолокационных объектов в зависимости от соотношения их размеров и длины волны возбуждающего электромагнитного поля. Показано, что рассеяние радиолокационных объектов в резонансной области частот, когда длина волны возбуждающего излучения соизмерима с характерными размерами цели, носит осциллирующий характер. В этом случае рассеянное объектом электромагнитное поле может быть представлено в виде суммы затухающих гармонических колебаний, параметры которых определяются размерами и геометрической формой этого объекта.

Приведены основные положения метода сингулярных разложений Баума. Согласно этому методу модель рассеяния объектов СШП радиолокации содержит в себе параметры двух типов: зависящие от параметров

возбуждающего сигнала (поляризации, формы, направления облучения) и не зависящие от них. Использование параметров первого типа позволяет решать задачи определения ракурса цели, селекции геометрически подобных целей и другие. В то же время, применение для описания цели параметров второго типа, – собственных комплексных резонансных частот рассеяния (полюсов), – позволяет существенно уменьшить число используемых признаков распознавания и тем самым частично решить проблему снижения размерности банка данных. Каждому радиолокационному объекту ставится в соответствие свой уникальный ряд полюсов, которые практически не изменяется от ракурса наблюдения и определяется геометрией объекта. Для распознавания целей в условиях недостаточной априорной информации об их геометрической форме и материале могут быть использованы данные о резонансных частотах рассеяния отдельных элементов конструкции.

Согласно методу сингулярных разложений резонансную модель позднеременной компоненты отклика объектов сверхширокополосной радиолокации можно представить в следующем виде:

$$y[n] = x[n] + w[n] = \sum_{k=1}^K A_k e^{-\alpha_k n T_0} \cos(2\pi f_k n T_0 + \varphi_k) + w[n], \quad (1)$$

где $n = 0, \dots, N-1$, N – число отсчетов данных; K – число гармонических составляющих сигнала; $w[n]$ – отсчеты шума; A_k , α_k , f_k и φ_k – значения амплитуд, коэффициентов затухания, частот и начальных фаз компонент сигнала соответственно; T_0 – период дискретизации.

В главе произведен синтез резонансной модели рассеяния радиолокационных объектов сверхширокополосной радиолокации, основанной на экспериментальных данных откликов масштабных макетов самолетов F-4 и МИГ-27, которая использовалась для сравнительного анализа методов оценки параметров резонансной модели объектов. Синтез резонансной мо-

дели выполнен с учетом возможности изменения ракурса радиолокационными объектами. Это позволит более гибко формировать банк данных идентифицируемых объектов с учетом априорной информации о зависимости амплитуд вычетов от угла наблюдения.

Во **второй главе** проведен обзор существующих методов оценки параметров резонансной модели объектов. Сформулированы основные требования к алгоритмам обработки: высокая вычислительная эффективность, максимальная автоматизация, низкая чувствительность результатов к шумам экспериментальных данных и априорной оценке числа резонансных частот.

Представлены теоретические аспекты работы нелинейного метода матричных пучков (Pencil-of-Function Method). На основании проведенных нами ранее исследований установлено, что этот метод позволяет получить наиболее точные оценки параметров собственных электромагнитных излучений объектов сверхширокополосной радиолокации. Метод использует специальные матрицы, составленные из отсчетов принятого сигнала, операции псевдоинверсии и сингулярного разложения. Показано, что каждый из полюсов резонансной модели $\{z_k = \exp(\alpha_k + j2\pi f_k), k = 1, \dots, K\}$ есть число, понижающее ранг матрицы $\mathbf{Y}_1 - z\mathbf{Y}_0$ (ее собственное число), где \mathbf{Y}_0 , \mathbf{Y}_1 – матрицы, составленные из отсчетов исследуемого сигнала (1), z – полюс резонансной модели.

Показано, что предпочтительным критерием сравнения качества работы методов оценки параметров резонансной модели объектов является величина дисперсии полюсов, зависящая от отношения сигнал/шум. Использование этого критерия позволяет проводить оценку абсолютной точности методов при сравнении результатов обработки с границей Рао-Крамера.

В главе также представлен алгоритм определения потенциальной точности оценки информационных параметров резонансной модели объектов

сверхширокополосной радиолокации по критерию максимума функционала правдоподобия, позволивший определить нижнюю границу Рао-Крамера для выбранной модели сигналов при разных значениях отношения сигнал/шум.

Отношение сигнал/шум резонансной модели объектов оценивалось по формуле:

$$q = 10 \lg \left\{ \frac{1}{N \cdot y_w^2} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n] \right\}, \quad (2)$$

где y_w^2 – дисперсия шума; N – число отсчетов сигнала.

В **третьей главе** на примере резонансной модели объектов СШП радиолокации рассмотрены основные свойства статистик высокого порядка случайных процессов, детерминированных импульсных и периодических сигналов. Определены основные способы повышения точности оценки информативных параметров модели собственных электромагнитных излучений объектов за счет применения предварительной кумулянтной обработки.

Последовательность моментов n -го порядка вещественного стационарного случайного процесса (ССП) с нулевым средним $\{x[k]\}$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ определяется по формуле:

$$\begin{aligned} m_1 \{x[k], x[k + \tau_1], \dots, x[k + \tau_{n-1}]\} = \\ = M\{x[k] \cdot x[k + \tau_1] \cdot \dots \cdot x[k + \tau_{n-1}]\} = m_n^x[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}], \end{aligned} \quad (3)$$

где $M\{ \}$ обозначает математическое ожидание. Исходя из этого, можно определить кумулянтные последовательности СПП $\{x[k]\}$:

$$\begin{aligned} c_2^x[\tau_1] &= m_2^x[\tau_1]; \\ c_3^x[\tau_1, \tau_2] &= m_3^x[\tau_1, \tau_2]; \\ c_4^x[\tau_1, \tau_2, \tau_3] &= m_4^x[\tau_1, \tau_2, \tau_3] - m_2^x[\tau_1] m_2^x[\tau_3 - \tau_2] - \\ &\quad - m_2^x[\tau_2] m_2^x[\tau_3 - \tau_1] - m_2^x[\tau_3] m_2^x[\tau_2 - \tau_1]. \end{aligned} \quad (4)$$

При обработке сигналов на практике часто возникают ситуации, когда значения сигнала известны только в определенные моменты времени. К числу таких сигналов можно отнести, например, сигналы конечной длительности (импульсные сигналы), значения которых принимаются равными нулю вне интервала времени, равного длительности сигнала. Такие сигналы называют детерминированными в противовес стохастическим сигналам (случайным процессам), значения которых точно неизвестны в каждый момент времени. В главе приведены основные определения и свойства статистик высокого порядка детерминированных сигналов. В частности рассмотрены кумулянты и кумулянтные спектры сигналов на примере модели резонансных излучений радиолокационных объектов, рассмотренных в главе 1.

В общем случае моменты n -го порядка детерминированных сигналов могут быть определены по формуле:

$$m_n^x[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k]x[k+\tau_1] \dots x[k+\tau_{n-1}]. \quad (5)$$

Помимо традиционного способа оценки кумулянтных последовательностей высокого порядка сигналов по формуле (4) на практике удобно применять альтернативный способ определения кумулянтов через их спектры. Так, кумулянтный спектр n -го порядка определяется выражением:

$$\begin{aligned} C_n^x[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}] &= \frac{1}{N^{n-1}} \sum_{\tau_1=0}^{N-1} \dots \sum_{\tau_{n-1}=0}^{N-1} c_n^x[\tau_1, \dots, \tau_{n-1}] e^{-j\frac{2\pi}{N}(\lambda_1\tau_1 + \dots + \lambda_{n-1}\tau_{n-1})} = \\ &= Y[\lambda_1]Y[\lambda_2] \dots Y[\lambda_{n-1}]Y^*[\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{n-1}], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\frac{2\pi}{N}\lambda_i$, $i = 1, \dots, N-1$ – дискретные значения частот, $\lambda_i = 1, \dots, N-1$; $Y[\lambda]$ – спектр анализируемой последовательности $y[n]$; «*» – операция комплексного сопряжения. Обратное преобразование Фурье от кумулянтных спектров высокого порядка позволяет оценить кумулянтные последовательности ана-

лизируемой последовательности данных, что при использовании быстрого преобразования Фурье может значительно уменьшить время обработки.

Проведенный сравнительный анализ статистик высокого порядка резонансных моделей самолетов показал, что:

– кумулянты второго порядка (автокорреляция) резонансной модели объектов сверхширокополосной радиолокации позволяют уменьшить уровень шума в данных по сравнению с исходным сигналом;

– в кумулянтной последовательности третьего порядка наряду с уменьшением мощности шума происходит значительное уменьшение уровня сигнала, поскольку кумулянты третьего порядка для симметричных сигналов тождественно равны нулю;

– в одномерном сечении последовательности кумулянтов четвертого порядка произошло значительное уменьшение уровня шума при сохранении уровня сигнала, что позволило увеличить точность оценки параметров резонансных излучений объектов сверхширокополосной радиолокации, благодаря чему возможно увеличение дальности действия системы идентификации.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований методов оценки информационных параметров моделей собственных излучений объектов СШП радиолокации, основанных на методе матричных пучков с использованием статистик высокого порядка.

Произведен выбор наиболее информативных одномерных сечений кумулянтных последовательностей третьего и четвертого порядков резонансной модели объектов сверхширокополосной радиолокации, позволивших приблизить точность оценки информационных параметров модели к границе Рао-Крамера при малых отношениях сигнал/шум. Использование этих сечений позволило значительно подавить аддитивный гауссовский шум, присутствующий в данных.

С целью количественного сравнения точности оценки полюсов резонансной модели объектов СШП радиолокации использовалась дисперсия полюсов

$$\Phi z_k = 10 \lg Dz_k = 10 \cdot \lg \left\{ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{z_{i,k} - z_k}{\alpha_k} \right|^2 \right\}, \quad (7)$$

где z_k – k -й полюс сигнала; $z_{i,k}$ – оценка k -го полюса сигнала, определенная в результате i -го опыта; M – число независимых опытов; α_k – коэффициент затухания k -го полюса.

По величине дисперсии полюсов можно судить о точности оценки параметров резонансной модели объектов сверхширокополосной радиолокации. Чем величина дисперсии Φz меньше, тем выше точность. Значение параметра $\Phi z = 0$ дБ соответствует случаю, когда дисперсия полюса равна квадрату расстояния от его истинного положения на z -плоскости до окружности единичного радиуса. Это максимальное значение дисперсии, при котором возможна правильная идентификация цели, поэтому граничное значение отношения сигнал/шум оценивалось по дисперсии полюсов, равной нулю децибел.

Предложенный подход оценки полюсов резонансной модели объектов сверхширокополосной радиолокации с использованием кумулянтов четвертого порядка позволяет увеличить точность оценки параметров моделей на 5-10 дБ по сравнению с традиционной корреляционной обработкой. При этом метод обеспечивают требуемую точность оценки параметров резонансной модели объектов сверхширокополосной радиолокации при отношении сигнал/шум больше 0 дБ. В результате проведенного сравнительного анализа сделан вывод о том, что при выбранных моделях полезного сигнала и шума, наиболее перспективным методом, обеспечивающим наивысшую точность

при одинаковых аппаратно-временных затратах, является метод матричных пучков совместно с кумулянтами четвертого порядка.

Кроме того, в главе проведено исследование зависимости дисперсии полосов резонансной модели объектов от их добротности. Показано, что при больших отношениях сигнал/шум дисперсия оценок полосов практически не зависит от добротности полосов. При малых отношениях сигнал/шум оценка параметров резонансных моделей возможна только при использовании кумулянтов четвертого порядка, показывающих приемлемые результаты даже для полосов с единичной добротностью. Использование кумулянтов третьего порядка для оценки параметров сигналов с высокой добротностью нецелесообразно, поскольку кумулянты третьего порядка для симметричных сигналов устремляются к нулю.

В **пятой главе** произведен обзор технических средств обнаружения и измерения параметров собственных излучений объектов сверхширокополосной радиолокации. Показано, что в литературе отсутствует описание реального устройства, решающего задачу идентификации объектов по их резонансным излучениям. Вместе с тем возможно применение традиционных радиотехнических средств или их частей (сверхширокополосных измерительно-вычислительных комплексов, приемных частей активных РЛС), но в силу своей универсальности их использование при решении поставленной задачи оказывается нецелесообразным и малоэффективным.

Предложена и обоснована структурная схема системы идентификации объектов с использованием кумулянтов четвертого порядка со следующими основными техническими характеристиками: число каналов приема – 1; ширина полосы приемных и усилительных трактов – до 500 МГц; динамический диапазон входного сигнала – 40 дБ; чувствительность не менее 10^{-10} Вт.

Также в главе приведена разработанная автором структурная схема алгоритма идентификации объектов СШП радиолокации с использованием

кумулянтов четвертого порядка на основе формирования сигнатур целей. Предложено в качестве сигнатур идентифицируемых объектов использовать точки в K -мерном пространстве, каждая из координат которого соответствует истинному значению полюса цели. Расстояние между оценкой точки в пространстве сигнатур для идентифицируемого объекта и сигнатурами радиолокационных объектов, хранящимися в банке данных, является критерием для идентификации цели.

Приведены результаты оценки полюсов макетов металлических и диэлектрических мин, находящихся в сухом песке, расположенных на небольшой глубине, а также легкомоторного самолета на фоне мощных отражений от местных предметов, подтвердившие возможность создания системы идентификации объектов СШП радиолокации по их полюсам на комплексной z -плоскости.

Заключение:

Данная работа посвящена разработке и исследованию помехоустойчивого алгоритма идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка на основе формирования сигнатур целей.

Проведенный обзор по материалам отечественных и зарубежных источников в области сверхширокополосной радиолокации и статистик высокого порядка показал, что выбранное направление исследований является актуальным и перспективным. Одним из наиболее важных вопросов в сверхширокополосной радиолокации является борьба с аддитивным гауссовским шумом, присутствующим в данных. Для борьбы с шумами предложено использовать кумулянты высокого порядка, которые равны нулю для гауссовских процессов.

Произведен синтез резонансной модели излучений радиолокационных объектов СШП радиолокации, основанной на экспериментальных данных рассеяния масштабных макетов самолетов F-4 и МИГ-27.

Проведенный анализ статистик высокого порядка случайных процессов и детерминированных импульсных и периодических сигналов показал, что кумулянты выше второго порядка для гауссовского случайного процесса тождественно равны нулю, что может позволить значительно уменьшить уровень шума в данных при обработке сигналов сверхширокополосного радиолокатора. Анализ статистик высокого порядка резонансной модели самолетов позволил установить, что в одномерном сечении последовательности кумулянтов четвертого порядка происходит значительное уменьшение уровня шума при сохранении уровня сигнала, что приводит к увеличению точности оценки параметров резонансных излучений объектов сверхширокополосной радиолокации и позволяет увеличить дальность действия системы идентификации.

Установлено, что метод матричных пучков совместно с кумулянтами высокого порядка обеспечивают требуемую точность оценки параметров резонансной модели объектов сверхширокополосной радиолокации при отношении сигнал/шум больше 0 дБ. В результате проведенного сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что при выбранных моделях полезного сигнала и шума, наиболее перспективным методом, обеспечивающим наивысшую точность при одинаковых аппаратно-временных затратах, является метод матричных пучков совместно с кумулянтами четвертого порядка.

Разработан алгоритм идентификации объектов СШП радиолокации с использованием кумулянтов четвертого порядка на основе формирования сигнатур целей. В качестве сигнатур идентифицируемых объектов предложено использовать точки в K -мерном пространстве, каждая из координат которого соответствует истинному значению полюса на комплексной z -

плоскости цели. Расстояние между оценкой точки в пространстве сигнатур для идентифицируемого объекта и сигнатурами объектов, хранящимися в банке данных, будет являться критерием для его идентификации. Такой подход позволяет создать автоматизированную систему идентификации объектов СШП радиолокации.

Приведены результаты экспериментальной оценки полюсов объектов подповерхностной и воздушной радиолокации, подтвердившие возможность создания системы идентификации объектов сверхширокополосной радиолокации по их полюсам на комплексной z -плоскости.

Публикации по теме диссертации:

1. Andrey Baev, Yury Kuznetsov, Vitali Chtchekatourov, "Identification of the Natural Frequencies of an Object by Using the Processing of Target – Signature Data in the Presence of Noise," in *Fourth Scientific Exchange Seminar*, Moscow: MAI, pp. 45-49, Sep. 1996.

2. А.Б. Баев, Ю.В. Кузнецов, В.Ю. Щекатуров, «Использование предварительной обработки данных при оценке параметров резонансной модели объектов», *Радиотехнические тетради*, № 14, М.: МЭИ, стр. 72-77, 1998 г.

3. А.Б. Баев, Ю.В. Кузнецов, В.Ю. Щекатуров, «Сравнительная характеристика алгоритмов оценки параметров резонансной модели объектов», *Вестник МАИ*, том 4, № 2, М.: МАИ, стр. 70-76, 1998 г.

4. А.Б. Баев, Ю.В. Кузнецов, «Использование метода Прони и его модификаций при оценке параметров резонансной модели», *Будущее авиации и космонавтики*, М.: МАИ, стр. 46-49, 1998 г.

5. А.Б. Баев, Ю.В. Кузнецов, «Разработка и исследование метода оценки параметров резонансной модели объектов, основанного на статистиках высокого порядка», *Будущее авиации и космонавтики*, М.: МАИ, стр. 47-49, 1999 г.

6. Andrey Baev, Yury Kuznetsov, "Parameter Estimation of Exponentially Damped Sinusoids by Prony's Method Using Higher Order Statistics," in *Sixth Scientific Exchange Seminar*, Moscow: MAI, pp. 52-57, Apr. 1999.

7. А.Б. Баев, Ю.В. Кузнецов, «Использование статистик высокого порядка при цифровой обработке сигналов сверхширокополосной радиолокации», *Цифровая обработка сигналов и ее применения*, М.: МЦНТИ, стр. 599-607, сентябрь 1999 г.

8. Andrey Baev, Yury Kuznetsov, Vitali Chtchekatourov, "Parameter Estimation of the Resonant Model in Passive and Active Radar Systems by Using Third-Order Statistics," in *29th European Microwave Conference*, pp. 395-398, Oct. 1999.

9. А.Б. Баев, Ю.В. Кузнецов, Щекатуров В.Ю., «Исследование методов спектрального оценивания параметров собственных электромагнитных излучений объектов», отчет по гранту Минобразования РФ, государственная регистрация № 01990012073, М.: МАИ, 1999 г.

10. Andrey Baev, Yury Kuznetsov, "Digital Processing of the Super-Wide Band Radar Signals by Using Higher-Order Statistics," in *Seventh Scientific Exchange Seminar*, Munich: MTU, pp. 35-40, Oct. 2000.

11. А.Б. Баев, А.В. Александров, Ю.В. Кузнецов, «Кумулянтная обработка сигналов сверхширокополосной радиолокации», *Цифровая обработка сигналов и ее применения*, М.: МЦНТИ, февраль 2002 г.

12. А.Б. Баев, А.В. Александров, Ю.В. Кузнецов, «Идентификация объектов сверхкороткоимпульсной радиолокации с использованием статистик высокого порядка», *1-я Всероссийская научно-техническая конференция по проблемам создания перспективной авионики*, М.: Фазотрон-НИИР, март 2002 г.