

На правах рукописи

Кузнецов Юрий Владимирович

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ
ЦЕЛЕЙ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2004

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Воскресенский Дмитрий Иванович.

Официальные оппоненты:

член-корреспондента РАН,

доктор технических наук, профессор Бахрах Лев Давидович

доктор технических наук, доцент Башкиров Леонид Григорьевич

доктор технических наук, профессор Гринёв Александр Юрьевич

Ведущая организация: ОАО «Центральное конструкторское
бюро «Алмаз»

Защита диссертации состоится « 28 » сентября 2004 г. в 14 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 « ____ » _____ 2004 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.125.03, к.т.н., доцент

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Развитие авиационной и космической техники приводит к совершенствованию летательных аппаратов, улучшению их технических характеристик и появлению новых типов, в том числе беспилотных летательных аппаратов. Несмотря на то, что наметилась четкая тенденция к стабилизации максимальных скоростей и высот полёта, современные военные самолеты и вертолёты обладают значительно более высокими маневренными качествами по сравнению с моделями, выпущенными несколько десятков лет назад. Кроме того, военные летательные аппараты стали оснащаться мощными системами создания помех, существенно уменьшилась их эффективная поверхность рассеяния (ЭПР). Так, например, малозаметный тактический ударный самолет F-117 «Найтхок» (США), использующий технику «Стэлз», обладает ЭПР от 0,025 до 0,1 кв. м. при различных ракурсах облучения. Радиооборудование этого самолета выполнено таким образом, чтобы исключить любые источники излучения, которые могли бы облегчить обнаружение самолета и повысить уровень демаскирующих его признаков, а навигация и поиск целей осуществляются с применением только пассивных средств.

Улучшение технических характеристик летательных аппаратов требует адекватной реакции со стороны радиолокационных средств обнаружения и распознавания целей. Одним из основных направлений современного развития радиолокационных станций (РЛС) является расширение полосы частот зондирующего сигнала и совершенствование системы обработки сигналов, рассеянных радиолокационной целью.

Разрабатываемые сверхширокополосные (СШП) радиолокаторы обладают очень высокими потенциальными возможностями обнаружения и распознавания целей в сочетании с высокой скрытностью. Осо-

бенностью СШП сигналов является их малая длительность по сравнению со временем, требуемым для распространения сигнала вдоль радиолокационной цели. Например, импульс длительность 1 нс позволяет разрешить по дальности две точки, находящиеся вдоль направления облучения на расстоянии порядка 12 см. Другим важным свойством СШП сигналов является отсутствие высокочастотного заполнения импульсов, т.е. отсутствие несущей частоты. Такие сигналы обладают равномерным спектром в широкой полосе частот вплоть до сотен мегагерц.

СШП радиолокационные эхо-сигналы, рассеиваемые целью, обладают целым рядом новых свойств. Во-первых, длительность эхо-сигналов во много раз превышает длительность зондирующего сигнала, а форма эхо-сигнала очень сильно зависит от ракурса цели относительно РЛС. Во-вторых, спектр зондирующего СШП сигнала содержит энергию, способную возбудить собственные резонансные частоты цели, определяемые ее геометрическими размерами, формой и материалом, из которого выполнена цель. Таким образом, в эхо-сигнале содержится информация, позволяющая распознавать различные объекты. В-третьих, значения собственных частот, характеризующих рассеивающий объект, практически не зависят от ракурса цели, а поэтому они могут быть использованы в качестве информационных признаков для распознавания радиолокационных целей.

Экспериментальные и теоретические исследования свойств рассеивания электромагнитного поля в широком диапазоне частот показали существенное различие спектральных и временных характеристик сигналов, рассеиваемых телами различной геометрической формы. Это подтверждает факт наличия информации в эхо-сигнале СШП радиолокатора о геометрических размерах и форме распознаваемых объектов. Для извлечения этой информации необходимо провести оценку им-

пульсной или частотной характеристик рассеяния объекта в широкой полосе частот, включающей резонансную область частот объекта.

Согласно методу сингулярных разложений импульсная характеристика радиолокационного объекта в СШП радиолокации представляет собой суперпозицию затухающих гармонических колебаний, причём резонансные частоты и постоянные времени затухающих экспонент соответствуют собственным частотам объекта и практически не зависят от его ракурса, а начальные фазы и амплитуды гармонических колебаний определяются ракурсом объекта относительно РЛС.

Традиционные методы подавления шумов и помех в эхо-сигналах радиолокационных объектов основываются на использовании статистики второго порядка, т.е. автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности. Однако при такой обработке в СШП эхо-сигналах теряется информация, содержащаяся в отклике, например, фазовая информация. Одним из способов повышения точности оценки параметров СШП радиолокационных сигналов является использование кумулянтной обработки или вычисление статистик высокого порядка (СВП). Методы на основе СВП эффективно применяются в таких отраслях, как геофизика, обработка речи и изображений, телекоммуникациях. Кроме того, известно, что кумулянты выше второго порядка для гауссовских процессов равны нулю, что может быть использовано для подавления гауссовских шумов в тракте обработки и оценки параметров импульсной характеристики радиолокационной цели.

Распознавание целей по информации, содержащейся в СШП эхо-сигнале, рассеянном объектом, является основным преимуществом разрабатываемых СШП радиолокаторов по сравнению с традиционными РЛС. Выделение этой информации требует разработки специальных алгоритмов распознавания, использующих оценки параметров полюсов, полученных при обработке эхо-сигналов. Одним из возможных алгоритмов может быть сигнатурное распознавание целей. При этом

необходимо обеспечить эффективное формирование сигнатур объектов, разработать критерий отнесения принятого сигнала к одному из классов целей. В качестве показателя качества распознавания целей можно использовать вероятность правильного распознавания, которая, в частности, позволяет связать точность оценки параметров различных полюсов объектов с качеством распознавания. Это позволяет обоснованно выбрать алфавит признаков или сигнатур, используемых при построении алгоритма распознавания целей.

Совершенно очевидно, что СШП радиолокационные системы обладают целым рядом новых свойств, позволяющих существенно повысить технические характеристики традиционных РЛС, особенно при решении задачи распознавания радиолокационных целей, а также для селекции целей на фоне мешающих отражений от местных предметов. Однако широкое внедрение в практику СШП РЛС требует не только новых подходов и технологий при создании антенных систем, мощных коротко-импульсных генераторов, но и приёмных систем с цифровой обработкой эхо-сигналов, а также эффективных алгоритмов обнаружения и распознавания целей. Колоссальные материальные вложения в разработку новых СШП технологий требуют очень серьёзного обоснования тех преимуществ, которые дают СШП радиолокаторы.

Разработан алгоритм идентификации объектов СШП радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка, основанный на основе алгоритмов распознавания радиолокационных объектов, а также оценка влияния частотно-временной обработки СШП сигналов на характеристики сверхширокополосных радиолокаторов является весьма актуальной и важной задачей.

Цели и задачи диссертации.

Целью работы является развитие теории частотно-временной обработки, опирающейся на характерные особенности, присущие объек-

там при облучении их СШП сигналами, с целью выявления устойчивых признаков, свойственных СШП сигналам, отражённым от объектов, для решения задачи обнаружения-распознавания целей в сверхширокополосной радиолокации, в том числе при наличии мешающих отражений от местных предметов и подстилающей поверхности.

Основные задачи диссертации:

- анализ СШП сигналов, отражённых от объектов с целью выявления устойчивых и инвариантных по отношению к ракурсу и дальности до объекта признаков распознавания целей в СШП радиолокации;
- разработка полюсной модели сигналов, рассеиваемых радиолокационными объектами в сверх широкой полосе частот;
- исследование и разработка методики выделения импульсной характеристики объекта из принятого радиолокационного эхо-сигнала;
- разработка и исследование методов оценки параметров признаков для распознавания целей с использованием статистик высокого порядка;
- построение процедур распознавания объектов на основе сигнатур целей и модифицированного метода Е-импульса;
- оценка влияния помехоустойчивости алгоритмов распознавания целей на характеристики СШП радиолокаторов;
- экспериментальное исследование полученных алгоритмов при моделировании реальных радиолокационных задач.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методы и аналитические соотношения выявления параметров полюсов импульсной характеристики радиолокационных объектов, используемых в качестве устойчивых и инвариантных по отношению к ракурсу и дальности признаков для распознавания целей.

2. Оценка ранга плохо обусловленных матриц данных при выделении импульсной характеристики объектов из принятого эхо-сигнала

радиолокатора проводится с использованием сингулярного разложения по критерию соответствия спектрального состава сигналов.

3. Использование метода матричных пучков в сочетании с кумулянтной обработкой четвертого порядка позволяет сохранить фазовую информацию в сигналах и повысить помехоустойчивость алгоритма и точность оценки параметров сигналов по сравнению с традиционными методиками.

4. Формирование сигнатур радиолокационных целей на основе плюсов импульсной характеристики объектов позволяет построить процедуры эффективного и надежного распознавания целей при учете тепловых шумов и отражений от местных предметов.

5. Модифицированный метод Е-импульса с использованием посекционных полиномиальных базовых функций позволяет проводить устойчивое распознавание радиолокационных целей в сложной помеховой обстановке практически независимо от ракурса объекта.

Методы исследований.

Для решения поставленных задач используются методы теории вероятностей, в частности, теории проверки статистических гипотез, метод статистических испытаний, матричный анализ, в том числе сингулярное разложение, а также теория цифрового спектрального анализа и его приложений, методы статистической радиотехники и теории анализа линейных цепей и сигналов.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического и статистического аппаратов, компьютерных программ и логической обоснованностью выводов. Полученные результаты подтверждены физическими и вычислительными экспериментами и не противоречат сложившимся представлениям в современной радиотехнике.

Научная новизна результатов исследований состоит в следующем:

- разработан метод выделения импульсной характеристики объекта из принятого эхо-сигнала на основе сингулярного разложения плохо обусловленных матриц цифровых СШП сигналов;
- предложен критерий редуцирования ранга плохо обусловленной матрицы данных, учитывающий спектральный состав сигналов в системе цифровой обработки;
- развиты методы оценки параметров импульсных характеристик радиолокационных объектов, основанные на теории матричных пучков в сочетании с кумулянтной обработкой четвертого порядка, позволившие повысить точность и помехозащищенность алгоритмов цифровой обработки;
- развитие теории частотно-временной обработки, позволяющей проводить распознавание радиолокационных целей на основе анализа сигнатур объектов и использования метода Е-импульса в сложной помеховой обстановке.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что разработанные в диссертации методы и алгоритмы могут быть использованы в различных практических задачах, связанных с оцениванием параметров линейных систем и распознаванием сигналов. Редуцирование ранга матриц данных на основе предложенного спектрального критерия может быть использовано при моделировании сложных микроволновых структур во временной области, а также при обработке сверхширокополосных сигналов, излучаемых при функционировании различных электронных устройств, при решении задач, связанных с электромагнитной совместимостью. Алгоритмы оценки параметров полюсов передаточных функций на основании метода матричных пучков в сочетании с кумулянтной обработкой высокого порядка могут быть использованы при решении задач идентификации линейных сис-

тем, причём они могут быть применены при обработке негауссовских процессов, поскольку не связаны с ограничениями на стационарность моделей. В виду этого методы могут непосредственно применяться для исследования объектов с меняющимися в процессе наблюдения параметрами. Разработанная методика оценки характеристик СШП радиолокаторов может быть использована при практической реализации алгоритмов обработки сигналов, она позволяет оценить их влияние на максимальную дальность функционирования СШП РЛС. Это даёт возможность приступить к формированию технического облика системы распознавания целей в СШП радиолокации, а также сформулировать тактико-технические требования к её составным частям.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы использованы в ряде научно-исследовательских работ, проводимых в Межотраслевом НТЦ «Радинтех», Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «ГАММА», ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» и Московском авиационном институте (государственном техническом университете). Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные оценки 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, 2003 гг.); 29-й, 30-й, 31-й и 33-й Европейских Микроволновых Конференциях, Мюнхен (1999 г.), Париж (2000 г.), Лондон (2001 г.), Мюнхен (2003 г.).

Международных научно-технических семинарах: «4, 5, 6, 7 и 8-й научный обменный семинар. Радиотехнические устройства СВЧ диапазона», г. Москва: МАИ (1996, 1999 и 2003 гг.), г. Мюнхен: MTU (1997, 2000 гг.).

1-я Всероссийская научно-техническая конференция по проблемам создания перспективной авионики, г. Москва: «Фазотрон-НИИР» (2002г.).

Публикации. По теме диссертации общее число публикаций 47, в том числе тезисов докладов – 26, научных статей – 11, 1 монография, 6 учебных пособий, 3 авторских свидетельств на изобретения. Кроме того, результаты диссертации использованы в 25 отчетах о НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 229 машинописных страницах и состоит из 7 глав, введения и заключения. Иллюстративный материал представлен в виде 100 рисунков и 2 таблиц. Список использованных источников включает 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации. Представлен краткий обзор научных результатов, данные о научной новизне и практической значимости работы. Дана характеристика работы по главам.

В **первой главе** проведен анализ методов расчёта эффективной поверхности рассеяния радиолокационных целей в широкой полосе частот. Под ЭПР понимается отношение квадратов амплитуд электрических составляющих падающего E_n и рассеянного целью стационарного гармонического электромагнитного поля E_p на частоте f , измеренного в точке наблюдения на расстоянии R от цели. Если выполняется условие дальней зоны, то можно считать, что $R \rightarrow \infty$. При изменении частоты

электромагнитного поля f или облучении цели стационарным полем, обладающим энергетическим спектром $E_p^2(f)$, получим зависимость ЭПР от частоты f :

$$\sigma(f) = 4\pi R^2 \frac{E_p^2(f)}{E_n^2(f)}, \quad (1)$$

где $E_p^2(f)$ - энергетический спектр рассеянного поля, множитель $4\pi R^2$ вводится для компенсации затухания рассеянного поля E_p в дальней зоне.

Зависимость ЭПР от частоты в дальнейшем будем называть энергетической частотной характеристикой, или энергетическим спектром радиолокационной цели и обозначать через $\sigma(f)$. Обратное преобразование Фурье от энергетического спектра дает автокорреляционную функцию (АКФ) импульсной характеристики цели:

$$R_\sigma(t) = 2 \int_0^{+\infty} \sigma(f) \exp(j2\pi f t) df. \quad (2)$$

Что касается самой импульсной характеристики цели $h_\sigma(t)$, то однозначно определить ее по энергетическому спектру или автокорреляционной функции удастся не всегда, поскольку процедура факторизации $\sigma(f)$ требует введения некоторых предположений о характере поведения и свойствах $\sigma(f)$. Тем не менее, поскольку выполняется равенство

$$R_\sigma(t) = h_\sigma(t) * h_\sigma(-t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_\sigma(\tau) h_\sigma(t + \tau) d\tau, \quad (3)$$

где «*» означает операцию свертки, в АКФ содержится полезная информация об импульсной характеристике цели: эффективная длительность, скорость затухания огибающей, доминирующие частоты колебаний и т.д.

Временной метод расчета ЭПР заключается в решении уравнений Максвелла для граничных условий, определяемых материалом и геометрической формой объекта. В частности предположим, что объект имеет абсолютно проводящую поверхность S . Пусть он облучается нестационарным электромагнитным импульсом (см. рис. 1), электрическое поле которого на поверхности объекта описывается выражением:

$$\mathbf{e}_n(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{r}', t) = \boldsymbol{\xi} \cdot e_n(t) * \delta\left(t - \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'}{c}\right) = \boldsymbol{\xi} \cdot e_n\left(t - \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'}{c}\right), \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\xi}$ – вектор, определяющий поляризацию падающей волны, $\mathbf{k}$ – вектор единичной длины, определяющий направление распространения волны, $\mathbf{r}'$ – вектор, определяющий положение точки на объекте в системе координат, связанной с объектом, c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме, $e_n(t)$ – временная функция падающего электромагнитного импульса. Важно отметить, что облучающий импульс не имеет несущей частоты и обладает достаточно короткой длительностью, т.е. является нестационарным сверхширокополосным сигналом.

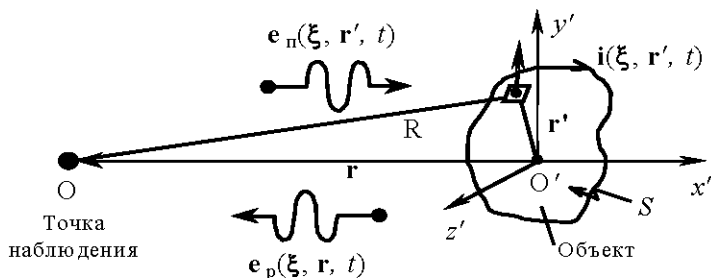


Рис. 1. Рассеяние электромагнитной волны объектом произвольной формы

Падающее электромагнитное поле возбудит ток, плотность которого на поверхности объекта $\mathbf{i}(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{r}', t)$. Он формирует рассеянное электромагнитное поле, электрическая компонента которого в точке на-

блюдения $\mathbf{r}$ (см. рис. 1) $\mathbf{e}_p(\xi, \mathbf{r}, t)$ определяется производной по времени векторного потенциала поля и градиентом скалярного потенциала.

Поведен анализ характеристик рассеяния проводящих тел простой геометрической формы: шар, цилиндр, плоская прямоугольная поверхность. В результате выявлены общие закономерности, которые можно использовать при распознавании объектов в СШП радиолокации. Вся область частот, в которой рассматривается энергетический спектр радиолокационных объектов, может быть условно разбита на три части: релеевская (низкие частоты), резонансная и оптическая (высокие частоты). Границы между областями условны, но они определяются максимальной протяжённостью объекта в пространстве. По положению резонансных максимумов в частотной характеристике и по форме импульсной характеристики можно приближённо оценить характерные размеры объекта. С другой стороны, зная характерные размеры радиолокационного объекта, можно приближённо сформулировать требования к ширине спектра и длительности импульса, облучающего цель. Так, например, для распознавания шара радиусом 1 м можно использовать гауссовский импульс длительностью порядка 10 нс и эффективной шириной спектра около 100 МГц.

Во **второй главе** рассмотрены модели рассеяния электромагнитных волн телами произвольной формы в широкой полосе частот. Диапазон частот определяется соотношением максимального и минимального характерных размеров рассеивающей радиолокационной цели. Весьма популярным и практически полезным с точки зрения распознавания целей подходом к описанию рассеянного объектом эхо-сигнала даёт метод сингулярных разложений, сформулированный К. Баумом в 1971 году.

Согласно методу сингулярных разложений отклик от радиолокационного объекта может быть разбит на две части: ранневременную и поздневременную реакции. Ранневременная часть содержит вынуж-

денную реакцию, зависящую от формы возбуждающего сигнала. Протяжённость ранневременной части реакции зависит от линейных размеров объекта и длительности зондирующего импульса. Поздневременная часть реакции объекта содержит только собственные колебания, она определяется исключительно геометрической формой и размерами объекта, а также ракурсом цели. Поскольку поздневременная часть реакции объекта является суммой затухающих гармонических колебаний, можно каждое из этих колебаний в частотной области представить в виде пары комплексно сопряжённых полюсов. Показано, что положение этих полюсов практически не зависит от ракурса цели, т.е. начальных условий возбуждения поля, рассеиваемого объектом. Таким образом, взаимодействие возбуждающего поля с радиолокационным объектом может быть приближённо описано с помощью передаточной функции или импульсной характеристики объекта, описываемой полюсной или резонансной моделью.

Разделение общей реакции цели на две части и использование для моделирования только поздневременной части имеет существенный недостаток. Он заключается в том, что основная энергия отклика сосредоточена в ранневременной части, а поздневременная реакция имеет относительно низкую энергию и потому подвержена серьёзному влиянию шумов. Вместе с тем собственные колебания существуют и в ранневременной части реакции цели. Для использования этой части реакции при моделировании объекта передаточной функцией необходимо исключить вынужденную часть реакции. Это можно сделать с помощью деления частотных характеристик общей реакции и воздействия в спектральной области или обращения свёртки во временной области.

Операцию обращения свёртки во временной области можно свести к операции обращения матрицы, причём обрабатываемая матрица содержит не только воздействие, но учитывает и влияние приёмной, передающей

антенн и приёмного тракта на общую реакцию радиолокационной цели. Основной проблемой при проведении обращения матрицы данных является её плохая обусловленность. Для редуцирования ранга матрицы предложено воспользоваться спектральным критерием, требующим учёта только тех составляющих, спектр которых сосредоточен в рабочей области частот измерительной системы.

Разработанная методика выделения импульсной характеристики из отклика объекта на короткий возбуждающий импульс продемонстрирована на примере определения импульсной характеристики прямоугольной микрополосковой антенны. После выделения импульсной характеристики была проведена её аппроксимация полюсной моделью, порядок которой определялся также с использованием разработанного спектрального критерия. Результат аппроксимации не только близок к реальной импульсной характеристике, но и к измеренной частотной характеристике антенны, что подтверждает адекватность предложенной полюсной или резонансной модели радиолокационных целей.

Представлена резонансная модель рассеяния целей в сверхширокополосной радиолокации, которая использована в дальнейшем для оценки параметров этих объектов и решения задачи их распознавания. Модель сигналов, рассеянных объектами в сверхширокополосной радиолокации можно представить в следующем виде:

$$y[n] = x[n] + w[n] = \sum_{k=1}^K A_k e^{-\alpha_k n T_0} \cos(2\pi f_k n T_0 + \varphi_k) + w[n], \quad (5)$$

где $n = 0, 1, \dots, N-1$ – номера отсчетов сигнала $y[n]$; 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. Полюса z_k и вычеты b_k

$$z_k = \exp\{(\alpha_k + j2\pi f_k)T_o\}, \quad b_k = A_k \exp(j\varphi_k) \quad (6)$$

существуют комплексно-сопряженными парами, поскольку значения отсчетов сигнала, – действительные числа.

Отношение сигнал/шум в резонансной модели оценивалось по формуле:

$$q = 10 \lg \left\{ \frac{1}{N \cdot \sigma_w^2} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n] \right\}, \quad (7)$$

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

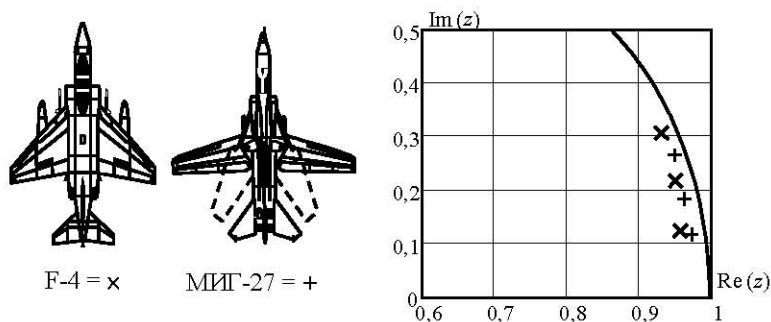


Рис. 2. Первый квадрант диаграммы полюсов на z -плоскости резонансных моделей самолетов

Опираясь на резонансную модель, был проведён синтез откликов объектов сверхширокополосной радиолокации на импульсное возбуждающее воздействие. Синтез произведен на основании экспериментально измеренных резонансных частот масштабных моделей самолетов F-4 и МИГ-27. Диаграмма полюсов резонансных моделей самолетов на z -плоскости представлена на рис. 2.

В **третьей главе** проведен анализ методов цифровой обработки сигналов в сверхширокополосной радиолокации. 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 ковариационного алгоритма Прони линейного предсказания вперед и назад, а также нелинейного метода матричных пучков (Matrix Pencil Method) и их сравнительный анализ.

Процедуру алгоритма Прони для оценки информационных параметров в анализируемой последовательности данных можно представить в виде следующих трех этапов. На первом этапе с помощью отсчетов анализируемой последовательности данных (5) резонансного излучения радиолокационных объектов получается решение уравнения

$$y[n] = \sum_{k=1}^K a_k y[n-k] \quad (8)$$

для коэффициентов линейного предсказания a_k . На втором этапе вычисляются корни полинома, определяемого уравнением

$$\gamma(z) = \sum_{k=0}^K a_k z^{K-k}. \quad (9)$$

Используя корни полинома z_k , можно с помощью соотношения (6) определить коэффициенты затухания α_k и резонансные частоты f_k комплексных экспонент, присутствующих в анализируемой последовательности данных. Для завершения процедуры Прони корни полинома, вычисленные на втором этапе, используются для формирования элементов матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdots & z_K^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_K^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{K-1} & z_2^{K-1} & \cdots & z_K^{K-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[1] \\ y[2] \\ \vdots \\ y[K] \end{bmatrix}, \quad (10)$$

которое затем решается относительно комплексных параметров $b_1, \dots, b_K$. Каждый параметр b_k используется далее для определения амплитуды A_k и начальной фазы φ_k k -й гармоники резонансной модели сигнала с помощью (6).

Отметим, что классический метод Прони подгоняет экспоненты к любому аддитивному шуму, присутствующему в данных, поскольку экспоненциальная модель не позволяет получать отдельную оценку этого шумового процесса. Именно по этой причине классический метод Прони часто не обеспечивает удовлетворительных результатов при значительном уровне аддитивного шума, поскольку не позволяет учесть наличие шума в анализируемом процессе. Для повышения точности оценки полюсов резонансной модели объектов в сверхширокополосной радиолокации можно, например, использовать значения K , превышающие число действительно имеющихся полюсов.

Метод матричных пучков использует специальные матрицы, составленные из отсчетов принятого сигнала, а также 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 $\mathbf{Y}_1 - z\mathbf{Y}_0$ (собственное число матрицы), где z – полюс резонансной модели, $\mathbf{Y}_0, \mathbf{Y}_1$ – матрицы, составленные из отсчетов исследуемого сигнала (5):

$$\mathbf{Y}_0 = \begin{pmatrix} y[M-1] & \dots & y[0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y[N-2] & \dots & y[N-M-1] \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} y[M] & \dots & y[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y[N-1] & \dots & y[N-M] \end{pmatrix}, \quad (11)$$

M – параметр метода матричных пучков.

Показано, что критерием сравнения качества работы методов, используемых для оценки параметров резонансной модели объектов, может являться величина дисперсии полюсов, зависящая от отношения сигнал/шум. Использование этого критерия позволяет проводить оценку аб-

солютной точности методов при сравнении результатов обработки с границей Рао-Крамера.

Представлены результаты сравнительного анализа методов цифровой обработки сигналов в сверхширокополосной радиолокации, согласно которым установлено, что метод матричных пучков позволяет получить наиболее точные оценки параметров собственных электромагнитных излучений объектов в сверхширокополосной радиолокации.

В **четвертой главе** на примере резонансной модели объектов в СШП радиолокации рассмотрены основные свойства статистик высокого порядка случайных процессов, детерминированных импульсных и периодических сигналов. Рассмотрены методы, позволяющие повысить точность оценки информативных параметров модели собственных электромагнитных излучений радиолокационных целей за счет применения предварительной кумулянтной обработки.

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

$$\begin{aligned} m_1 \{x[k], x[k + \tau_1], \dots, x[k + \tau_{n-1}]\} = \\ = M\{x[k] \cdot x[k + \tau_1] \cdot \dots \cdot x[k + \tau_{n-1}]\} = m_n^x[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}], \end{aligned} \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} c_2^x[\tau_1] &= m_2^x[\tau_1]; \quad c_3^x[\tau_1, \tau_2] = m_3^x[\tau_1, \tau_2]; \\ c_4^x[\tau_1, \tau_2, \tau_3] &= m_4^x[\tau_1, \tau_2, \tau_3] - m_2^x[\tau_1]m_2^x[\tau_3 - \tau_2] - \\ &- m_2^x[\tau_2]m_2^x[\tau_3 - \tau_1] - m_2^x[\tau_3]m_2^x[\tau_2 - \tau_1]. \end{aligned} \quad (13)$$

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 дли-

тельности (импульсные сигналы), значения которых равны нулю вне интервала времени, равного длительности сигнала. Такие сигналы называют детерминированными в противовес стохастическим сигналам, значения которых в каждый момент времени неизвестны. 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, приведённой в главе 2.

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

$$m_n^y[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y[k]y[k+\tau_1] \dots y[k+\tau_{n-1}]. \quad (14)$$

Помимо традиционного определения кумулянтных последовательностей высокого порядка сигналов по формуле (13) на практике удобно применять альтернативный способ определения кумулянтов через их спектры. Так, кумулянтный спектр n -го порядка определяется выражением:

$$\begin{aligned} C_n^x[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}] &= \\ &= \frac{1}{N^{n-1}} \sum_{\tau_1=0}^{N-1} \dots \sum_{\tau_{n-1}=0}^{N-1} c_n^x[\tau_1, \dots, \tau_{n-1}] e^{-j \frac{2\pi}{N} (\lambda_1 \tau_1 + \dots + \lambda_{n-1} \tau_{n-1})} = \\ &= Y[\lambda_1] Y[\lambda_2] \dots Y[\lambda_{n-1}] Y^*[\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{n-1}], \end{aligned} \quad (15)$$

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 анализируемой последовательности данных, что при использовании быстрого преобразования Фурье может значительно уменьшить

время обработки. Характерные сечения кумулянтов третьего и четвертого порядков резонансной модели самолета F-4 при отношении сигнал/шум $q = 0$ дБ показаны на рис. 3.

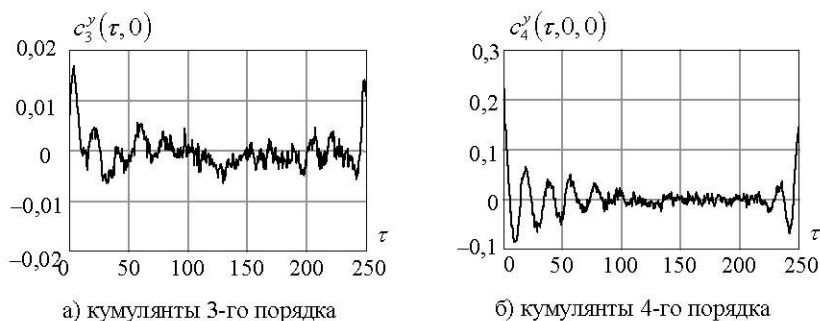


Рис. 3. Одномерные сечения кумулянтов высокого порядка резонансной модели самолета F-4

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 модели, описывающей резонансные излучения объектов сверхширокополосной радиолокации.

В **пятой главе** представлены результаты экспериментального исследования методов, используемых для оценки информационных параметров

моделей собственных излучений объектов в СШП радиолокации. Основное внимание сосредоточено на методе матричных пучков с использованием статистик высокого порядка.

Произведен выбор наиболее информативных одномерных сечений кумулянтных последовательностей третьего и четвертого порядков резонансной модели объектов в 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.

Количественное сравнение точности оценки полюсов резонансной модели с использованием статистик высокого порядка проводилось с помощью дисперсии оценок полюсов

$$\Phi z_k = 10 \cdot \lg \left\{ \frac{1}{N_{on}} \sum_{i=1}^{N_{on}} \left| \frac{z_{i,k} - z_k}{\alpha_k} \right|^2 \right\}, \quad (16)$$

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

По величине дисперсии полюсов можно судить о точности оценки параметров резонансной модели объектов в 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 возможно правильное различение полюсов, поэтому граничное значение отношения сигнал/шум оценивалось по дисперсии полюсов, равной нулю децибел.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости дисперсии первого (низкочастотного) полюса резонансных моделей самолетов F-4 и МИГ-27 от отношения сигнал/шум для исходной импульсной характеристики, автокорреляционной последовательности, кумулянтных последовательностей высокого порядка.

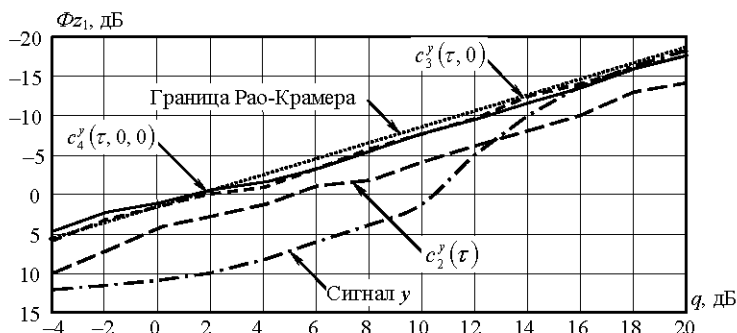


Рис. 4. Зависимость дисперсии первого полюса резонансной модели самолета F-4 от отношения сигнал/шум

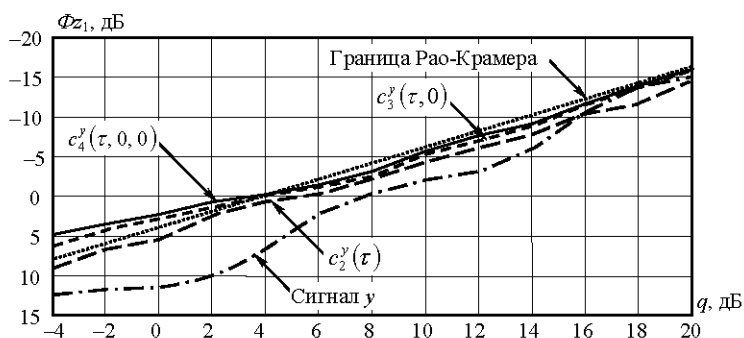


Рис. 5. Зависимость дисперсии первого полюса резонансной модели самолета МИГ-27 от отношения сигнал/шум

Из рисунков видно, что практически для всех отношений сигнал/шум точность оценки полюсов по одномерному сечению кумулянтной последовательности четвертого порядка $c_4^x(\tau, 0, 0)$ наилучшая.

Это подтверждает то, что статистики высокого порядка для гауссовских процессов тождественно равны нулю и что они могут использоваться для подавления шума, присутствующего в данных. При этом информация о полюсах резонансной модели в выбранных сечениях кумулянтов высокого порядка не искажается.

Предложенная методика оценки полюсов резонансной модели объектов в 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 в 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, является метод матричных пучков совместно с кумулянтами четвертого порядка.

Проведено исследование зависимости дисперсии полюсов резонансной модели объектов от их добротности. Показано, что при больших отношениях сигнал/шум дисперсия оценок полюсов практически не зависит от добротности полюсов. При малых отношениях сигнал/шум оценка параметров резонансных моделей возможна только при использовании кумулянтов четвертого порядка, показывающих приемлемые результаты даже для полюсов 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 **шестой главе** представлены методы распознавания радиолокационных целей в сверхширокополосной радиолокации, основанные на резонансных частотах объектов, которые практически не зависят от ракурса. В

качестве сигнатур радиолокационных объектов было предложено использовать точки в многомерном пространстве, соответствующие полюсам объектов на комплексной плоскости. Этот подход позволяет создать автоматизированную систему распознавания радиолокационных объектов. Представлены результаты распознавания целей по сигналам, рассеянными масштабированными моделями самолетов, с использованием сигнатурного алгоритма.

К сигнатурным методам распознавания целей относятся методы, заключающиеся в формировании определенного набора признаков распознаваемых объектов. При этом совокупность этих признаков называется сигнатурой. Если в качестве сигнатуры объекта выбрать совокупность наиболее «значимых» полюсов, то она может быть представлена точкой в многомерном пространстве признаков объекта.

Рассматривается следующая постановка задачи. Необходимо различить заданное число радиолокационных объектов с использованием измеренных сверхширокополосных откликов от целей. Предполагается, что все объекты априорно разделены на C классов. В качестве признаков выбранных классов объектов, т.е. словаря признаков, используется набор измеренных резонансных частот $z_1, z_2, \dots, z_M$.

Количество признаков M (размерность словаря признаков) определяется заданным набором классов и зависит от используемого алгоритма идентификации. Каждый класс идентифицируемых объектов отображается точкой в C -мерном пространстве признаков

$$\mathbf{S}_j = \{S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jM}\}, \quad (17)$$

где S_{ji} – соответствующая координата в пространстве признаков, $j = 1, \dots, C$.

Измеренная совокупность признаков реального принятого отклика от радиолокационного объекта отличается от совокупности признаков клас-

сов, поскольку сигнал искажен шумами:

$$\mathbf{Y}_j = \mathbf{S}_j + \mathbf{w}, \quad (18)$$

где $\mathbf{Y}_j$ – совокупность измеренных признаков $\mathbf{Y}_j = \{Y_{j1}, Y_{j2}, \dots, Y_{jM}\}$, $\mathbf{w}$ – ошибка оценки признаков из-за наличия шума в принятом сигнале.

Критерий отнесения измеренной совокупности признаков $\mathbf{Y}_j$ к одному из заданных классов целей $\mathbf{S}_j$ заключается в следующем. Пространство признаков разбивается на C непересекающихся областей, соответствующих выбранным классам целей. Границы областей определяются путем решения оптимизационной задачи: решение Γ_j об идентификации j -го класса целей принимается по совокупности измеренных параметров $\mathbf{Y}_i$ в том случае, если расстояния R_i между $\mathbf{Y}_i$ и $\mathbf{S}_j$ в пространстве признаков минимально по сравнению с расстояниями до всех остальных сигнатур:

$$R_i = |\mathbf{Y}_i - \mathbf{S}_j|, \quad j = 1, \dots, C. \quad (19)$$

Качество алгоритма идентификации объектов в сверхширокополосной радиолокации оценивается вероятностью правильного различения целей всех классов:

$$P_{\text{прав}} = \sum_{j=1}^C P_j \cdot P(\Gamma_j / H_j), \quad (20)$$

где P_j – априорная вероятность j -го класса, $P(\Gamma_j / H_j)$ – условная вероятность принятия решения Γ_j при условии, что выдвинута гипотеза H_j об идентификации j -ой цели.

Вероятность правильного различения определяется размерностью словаря признаков, т.е. количеством измеренных полюсов цели, и зависит от уровня шума $\mathbf{w}$, присутствующего в данных.

В результате проведенных исследований установлено:

– для выбранных резонансных моделей самолетов F-4 и МИГ-27 увеличение размерности пространства признаков приводит к ухудшению ве-

роятности правильного различения. Так, при отношении сигнал/шум $q = 10$ дБ уменьшение M с 6 до 2 увеличивает $P_{\text{прав}}$ с 0,88 до 0,92;

– при заданном количестве информационных признаков $C = 2$ вероятность правильного различения зависит от выбранного полюса. Так, при отношении сигнал/шум $q = 10$ дБ выигрыш в вероятности правильного различения за счет корректного выбора полюса может достигать 0,33;

– исследована зависимость вероятности правильного различения от добротности полюсов резонансной модели. Полученные соотношения позволяют оценить минимальное значение добротности полюсов резонансной модели, обеспечивающее заданную вероятность правильного различения при конкретных значениях отношения сигнал/шум.

Представлен метод Е-импульса, являющийся весьма привлекательным алгоритмом распознавания радиолокационных целей в сверхширокополосной радиолокации. Это объясняется удобством формирования опорного сигнала, называемого Е-импульсом (“extinction-pulse” – гасящий импульс), соответствующего заданной радиолокационной цели, а также слабой зависимостью результата распознавания от ракурса цели.

Суть метода Е-импульса заключается в подборе такого возбуждающего сигнала для радиолокационных объектов, который бы минимизировал поле обратного рассеяния, существующее во время переходного процесса. Это значит, что отклик цели, для которой подобран импульс, на такое возбуждающее воздействие, начиная с некоторого момента времени, будет существенно меньшим, чем отклик любой другой цели на это воздействие. Исходя из этого, при подборе Е-импульса для произвольной цели необходимо выполнить условие:

$$c(t) = e(t) * h(t) = 0, \quad t > T_L, \quad (21)$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика цели, $e(t)$ – Е-импульс, подобранный к цели, $c(t)$ – отклик цели, T_L – некоторый момент времени, определяемый

длительностью сигнала $e(t)$.

Для формирования сигнала Е-импульса $e(t)$ использовались посекционные полиномиальные базисные функции, представляющие собой полиномы по степеням переменной времени, взвешенные прямоугольным окном в пределах интервала, равного длительности одной секции.

Исследования алгоритма различения объектов на основе метода Е-импульса заключались в изучении эффективности его работы при изменении ракурса цели и изменении отношения сигнал/шум. По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что исследуемый метод Е-импульса является достаточно эффективным способом распознавания объектов по их собственным электромагнитным излучениям. Метод является инвариантным по отношению к ракурсу цели, позволяя успешно проводить распознавание объектов в сложной помеховой обстановке. Введённый дискриминационный параметр является достаточно информативным и даёт возможность проводить распознавание объектов в сверхширокополосной радиолокации.

В **седьмой главе** рассмотрены теоретические основы временной селекции при обработке сверхширокополосных сигналов с использованием частотно-временного анализа, основанного на преобразовании Габора и интегральном вейвлет-преобразовании. Временная локализация сигнала с помощью функции окна Габора позволяет получать спектральную информацию о СШП сигнале, причём форма и размеры частотно-временного окна Габора остаётся неизменной во всём диапазоне анализа, а перемещать это окно можно во всей области анализа произвольно. Главным недостатком такого анализа является именно неизменность формы и размеров окна Габора, поскольку для анализа низких частот желательно иметь более широкое по времени окно, а для анализа высоких частот временную ширину окна желательно уменьшать.

Интегральное вейвлет-преобразование наиболее удобно для частотно-

временной локализации сигналов в СШП радиолокации, поскольку имеет гибкое частотно-временное окно, которое автоматически сужается при рассмотрении высокочастотных колебаний и расширяется при изучении низкочастотных областей спектра сигнала. Важным свойством окна вейвлет-преобразования в частотной области является независимость его добротности от центральной частоты, а также неизменность площади окна при изменении его положения в области анализа. При перемещении окна необходимо учитывать влияние изменения параметров масштабирования базового вейвлета на траекторию движения окна в частотно-временной области.

Сигналы, несущие информацию о форме и размерах цели в СШП радиолокации, можно считать случайными нестационарными процессами, искажёнными стационарными шумовыми сигналами, соответствующими тепловому шуму. После временной селекции и обнаружения эхо-сигналов извлечение информации о цели можно проводить с помощью спектрального анализа на основе автокорреляции, а также обработки с помощью кумулянтов высокого порядка. При этом важно, чтобы обработка сигнала не разрушала тонкую структуру рассеянного сигнала, поскольку она используется для распознавания радиолокационных целей.

Распознавание целей в СШП радиолокации предусматривает предварительное обнаружение сигнала, рассеянного объектом. Обнаружение СШП сигнала может сопровождаться искажением тонкой структуры сигнала, тогда оно должно проводиться параллельно с обработкой, предназначенной для распознавания целей. Система распознавания целей может функционировать автономно от системы обнаружения, используя информацию о временной локализации обнаруженного эхо-сигнала. Система распознавания может быть выполнена в цифровом виде, поскольку современная техника позволяет проводить дискретизацию аналоговых сигналов с частотами до десятков гигагерц. В этом случае система распознавания

будет основана на совокупности взаимодействующих алгоритмов извлечения информации о параметрах сигналов, рассеянных целями, а также алгоритмах распознавания объектов на основе предложенной методики сигнатурного распознавания или метода Е-импульса.

Оценка дальности действия СШП радиолокатора при распознавании целей имеет ряд специфических особенностей по сравнению с традиционным уравнением дальности узкополосной радиолокации. К ним относится существующая зависимость от частоты всех параметров, входящих в уравнение дальности, а также влияние временной селекции принятого сигнала с помощью правильно выбранного частотно-временного окна. Кроме того, физический смысл и методы оценки всех параметров, включаемых в уравнение дальности, определяются спецификой реализации компонентов СШП радиолокатора: приёмной и передающей антенн, системы цифровой обработки, а также формой зондирующего сигнала.

Экспериментальное исследование алгоритмов распознавания объектов в СШП радиолокации проведено на основе сигналов, полученных от носимого портативного геолокатора «НПП-РА», предоставленных АО «Радиоавионика» г. Санкт-Петербурга. Кроме того, проведена соответствующая обработка сигналов активного сверхширокополосного радиолокатора, созданного в ОАО «Центральное конструкторское бюро «Алмаз» г. Москвы, при распознавании легкомоторного самолёта на фоне интенсивных отражений от местных предметов. Целью исследований была проверка работоспособности разработанных алгоритмов распознавания целей в СШП радиолокации, а также подтверждение адекватности полюсных моделей импульсных характеристик объектов и сделанных предположений о независимости собственных частот целей от ракурса и дальности от объекта.

Заключение

В работе решена важная научно-техническая проблема по развитию теории частотно-временной обработки СШП сигналов в части выявления и формирования устойчивых признаков, обеспечивающих решение задачи обнаружения-распознавания целей в сверхширокополосной радиолокации, позволившая разработать эффективные и помехоустойчивые алгоритмы надёжного распознавания объектов на основе статистик высокого порядка и анализа сигнатур целей.

По результатам исследований, проведенных в рамках данной диссертации, получены следующие основные результаты и сделаны следующие выводы.

1. Развита теория частотно-временной обработки СШП сигналов в части выявления устойчивых и инвариантных по отношению к ракурсу и дальности до объекта признаков распознавания целей в сверхширокополосной радиолокации, в качестве которых использованы параметры полюсов импульсной характеристики радиолокационного объекта.

2. Установлено, что электромагнитное поле, рассеянное радиолокационным объектом, содержит компоненты, которые можно представить в виде суммы комплексных экспонент, параметры которых определяются собственными частотами цели. На основании этого произведен синтез резонансной модели излучений радиолокационных объектов в СШП радиолокации, учитывающей изменения ракурса радиолокационными объектами и основанной на экспериментальных данных рассеяния масштабных макетов самолетов F-4 и МИГ-27.

3. Разработана методика выделения импульсной характеристики радиолокационной цели из принятого отклика объекта на короткий возбуждающий импульс с учётом влияния измерительной системы, основанная на обращении матрицы, составленной из отсчётов сигнала измерительной системы.

4. Предложен спектральный критерий редуцирования ранга плохо обусловленных матриц измеренных сигналов, позволивший оценить максимальный номер сингулярного числа, учитываемого при обращении матрицы, включающий спектральный анализ сигналов, образованных столбцами ортогональной матрицы, получаемой в результате сингулярного разложения исходной матрицы измеренного сигнала. Разработанный критерий использован также для оценки порядка методов определения параметров полюсов, учитываемых при аппроксимации выделенной импульсной характеристики моделью, содержащей суперпозицию затухающих колебаний.

5. Разработан критерий оценки качества работы методов и алгоритмов определения параметров резонансной модели объектов, учитывающий величину дисперсии оценок полюсов. Использование этого критерия позволило провести оценку точности методов при сравнении результатов обработки с границей Рао-Крамера.

6. Развита оценка параметров импульсных характеристик радиолокационных объектов, основанные на теории матричных пучков в сочетании с кумулянтной обработкой четвертого порядка, позволившие сохранить фазовую информацию в сигналах и повысить помехоустойчивость алгоритмов цифровой обработки, а также увеличить точность оценки параметров сигналов по сравнению с традиционными методиками на 5-10 дБ.

7. На основании анализа статистик высокого порядка резонансных излучений объектов в сверхширокополосной радиолокации определены одномерные сечения кумулянтных последовательностей третьего и четвертого порядков, несущие в себе информацию о полюсах резонансных моделей объектов. Установлено, что при большой добротности полюсов резонансной модели кумулянты третьего порядка устремляются к нулю, что приводит к невозможности их использования для оценки полюсов радио-

локационных объектов. Показано, что при малых отношениях сигнал/шум оценка параметров резонансных моделей возможна только при использовании кумулянтов четвертого порядка, показывающих приемлемые результаты даже для полюсов с низкой добротностью.

8. Разработан алгоритм распознавания объектов в СШП радиолокации с использованием кумулянтов четвертого порядка на основе формирования сигнатур целей. В качестве сигнатур радиолокационных объектов предложено использовать точки в M -мерном пространстве, каждая из координат которых соответствует положению полюса на комплексной z -плоскости для данного объекта. Расстояние между оценкой точки в пространстве сигнатур для распознаваемого объекта и сигнатурами радиолокационных объектов, хранящимися в банке данных, является критерием для его распознавания. Такой подход позволяет создать автоматизированную радиолокационную систему распознавания объектов при учёте тепловых шумов и отражений от местных предметов.

9. Разработана методика оптимизации характеристик системы сигнатурного распознавания радиолокационных объектов, основанная на определении зависимости вероятности правильного распознавания от набора информационных признаков и параметров собственных частот резонансной модели объектов, что позволило выбрать наилучшее сочетание признаков для заданного набора классов объектов при заданном отношении сигнал/шум.

10. Предложен модифицированный метод Е-импульса с использованием посекционных полиномиальных базовых функций, позволяющий проводить устойчивое распознавание радиолокационных целей в сложной помеховой обстановке практически независимо от ракурса объекта.

11. Проведена оценка дальности действия сверхширокополосного радиолокатора с учётом особенностей системы распознавания целей, включающей цифровую обработку принятых эхо-сигналов. Показано, что сни-

жение минимального отношения сигнал/шум на 10 дБ приводит к увеличению дальности действия радиолокатора примерно в 2 раза, а временная селекция принятого сигнала может увеличить дальность действия за счёт временного разрешения элементарных рассеивателей цели.

12. На конкретных примерах локационных задач продемонстрирована эффективность разработанной методики распознавания целей в сверхширокополосной радиолокации, подтверждена адекватность полюсных моделей импульсных и частотных характеристик объектов, а также сделанных предположений об инвариантности собственных частот радиолокационных целей относительно ракурса и дальности.

Разработанная методика оценки характеристик СШП радиолокаторов может быть использована при практической реализации системы распознавания целей и позволяет предсказать влияние частотно-временной обработки на максимальную дальность действия радиолокационных станций. Это даёт возможность приступить к формированию технического облика системы распознавания целей в СШП радиолокации, а также сформулировать тактико-технические требования к её составным частям.

Публикации по теме диссертации.

1. Кузнецов Ю.В., Распознавание целей в сверхширокополосной радиолокации, Глава 9 в кн. «Активные фазированные антенные решётки» под ред. Д.И. Воскресенского, М.: Радиотехника, 2004, с.
2. Кузнецов Ю.В., «Выделение импульсных характеристик рассеяния объектов в сверхширокополосной радиолокации», *Антенны*, № 6, 2004 г.
3. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Щекатуров В.Ю., «Применение метода расщепления функции для распознавания объектов по собственным электромагнитным колебаниям», *52-я международная научная сессия, посвященная Дню Радио*, М.: РНТО РЭС имени Попова А.С., с. 121-122, май 1997 г.

4. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, Vitali Chtchekatourov, "Using Special Window for Determination of Frequencies of Resonant Model," in *Fifth Scientific Exchange Seminar*, Munich: MTU, pp. 39-44, Sep. 1997.

5. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Щекатуров В.Ю., «Использование предварительной обработки данных при оценке параметров резонансной модели объектов», *Радиотехнические тетради*, № 14, М.: Изд-во МЭИ, с. 72-78, 1998 г.

6. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Щекатуров В.Ю., «Сравнительная характеристика алгоритмов оценки параметров резонансной модели объектов», *Вестник МАИ*, том 4, № 2, М.: Изд-во МАИ, с. 70-77, 1998 г.

7. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, "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.

8. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, Sergey Kluev, "Radar Target Discrimination Using the E-pulse Technique," in *Sixth Scientific Exchange Seminar*, Moscow: MAI, pp. 58-62, Apr. 1999.

9. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., «Использование статистик высокого порядка при цифровой обработке сигналов сверхширокополосной радиолокации», *2-я Международная Конференция и Выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применения»*, М.: МЦНТИ, с. 599-607, сентябрь 1999 г.

10. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Ключев С.Ю., «Использование метода Е-импульса для различения сигналов сверхширокополосной радиолокации», *2-я Международная Конференция и Выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применения»*, М.: МЦНТИ, с. 268-275, сентябрь 1999 г.

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

12. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, "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.

13. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, "Application of E-pulse Method for the Signals, Scattered by the Arbitrary Shaped Objects," in *Seventh Scientific Exchange Seminar*, Munich: MTU, pp. 67-72, Oct. 2000.

14. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, Rudolf Sedletskiy, "Application of E-pulse Method for Remote Sensing Arbitrary Shaped Objects in Lossy Media," in *30th European Microwave Conference*, Paris, pp. 255-258, Oct. 2000.

15. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., «Теоретическое и экспериментальное исследование алгоритма идентификации летательных аппаратов на основе метода Е-импульса», *Радиотехника*, № 3, М., стр. 28-36, март 2001 г.

16. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, Mikhail Cherniakov, "Identification of Air Targets by Using Secondary Application of Terrestrial TV," in *31th European Microwave Conference*, London, pp. 137-140, Sep. 2001.

17. Кузнецов Ю.В., Александров А.В., Баев А.Б., «Кумулянтная обработка сигналов сверхширокополосной радиолокации», *Цифровая обработка сигналов и ее применения*, М.: МЦНТИ, с. 266-269, февраль 2002 г.

18. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Ноздрин В.В., Шевгунов Т.Я., «Исследование алгоритма обнаружения побочного электромагнитного излучения компьютеров», *Цифровая обработка сигналов и ее применения*, М.: МЦНТИ, с. 326-329, февраль 2002 г.

19. Кузнецов Ю.В., Александров А.В., Баев А.Б., «Идентификация объектов в сверхкороткоимпульсной радиолокации с использованием статистик высокого порядка», *Радиотехника, «Радиотехнические комплексы»*, № 2, с. 63-70, 2002 г.

20. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Александров А.В., «Сигнатурная идентификация объектов в сверхширокополосной радиолокации», *Цифровая обработка сигналов и ее применения*, М.: МЦНТИ, с.249-252, март 2003 г.

21. Yury Kuznetsov, Andrey Aleksandrov, Andrey Baev, «Discrimination of Ultra Wideband Radar Targets Based on the Signatures Algorithm», in *Eighth Scientific Exchange Seminar*, Moscow: MAI, pp. 51-55, Sept. 2003.

22. Yury Kuznetsov, Andrey Aleksandrov, Timopheyy Shevgunov, "Radar Targets Identification by Using Frequency Domain E-pulse Method," in *Eighth Scientific Exchange Seminar*, Moscow: MAI, pp. 74-78, Sept. 2003.

23. Yury Kuznetsov, Andrey Aleksandrov, Andrey Baev, "Ultra Wideband Radar Target Discrimination Using the Signatures Algorithm," in *33th European Microwave Conference*, pp. 987-990, Oct. 2003.

24. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, "Technique of Ultra Wideband Radar Target Discrimination Using Natural Frequencies," in *15th International Conference on Microwaves Radar and Wireless Communications, Poland, Warszawa*, pp. 905-908, May 2004.

25. Yury Kuznetsov, Andrey Baev, Fabio Coccetti, and Peter Russer, "The Transient Impulse Response Representation of Complex Three-Dimensional Electromagnetic Structures," in *East-West Workshop on Advanced Techniques in Electromagnetic, Poland, Warszawa*, May 2004.