

На правах рукописи

КОНОВАЛЮК МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
КОМПЛЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МНОГОТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юрий Владимирович Кузнецов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Игорь Яковлевич Иммореев

кандидат технических наук, профессор
Валентин Сергеевич Сперанский

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственная
корпорация «Системы прецизионного
приборостроения» ОАО «НПК «СПП»

Защита диссертации состоится «27» сентября 2011 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при 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 «22» июня 2011 года.

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

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современные активные широкополосные системы радиовидения позволяют получать изображение объектов с высоким разрешением, которое обеспечивается полосой частот от 100 МГц до 500 МГц. Расширение полосы частот увеличивает возможности системы получать больше информации о форме и геометрических размерах наблюдаемых радиоконтрастных объектов. Следует отметить, что изображения одних и тех же объектов в радиодиапазоне отличаются от их изображений в оптическом диапазоне. Описание радиолокационных изображений основывается на теории рассеяния электромагнитных волн. Физическими механизмами взаимодействия объекта и электромагнитных полей являются дифракция и интерференция. В широкой полосе частот рассеяние приближенно описывается геометрической теорией дифракции. Наблюдаемый объект может быть представлен совокупностью рассеивателей, которые являются источниками вторичного излучения электромагнитных волн.

В теории рассеяния электромагнитного излучения обычно считается, что отдельные элементы объекта рассеивают энергию падающей электромагнитной волны независимо друг от друга и объект рассматривается как совокупность набора центров рассеяния, каждый из которых является независимой «блестящей» точкой. Так, в простейшем случае центр рассеяния объекта может представлять собой точечный отражатель. Математическая модель, описывающая электромагнитное рассеяние совокупностью «блестящих» точек объекта в ограниченной полосе частот является упрощенной.

Существует ряд факторов, определяющих преобразование электромагнитного сигнала при его рассеянии физическим объектом. Во-первых, в зависимости от геометрии и ориентации объекта один возбуждающий электромагнитный импульс преобразуется в совокупность взвешенных и задержанных импульсов, отраженных от каждого центра рассеяния этого объекта. Во-вторых, характер поведения центра рассеяния в частотной области в пределах полосы частот зондирующего импульса может повлиять на форму отраженного импульса.

Наиболее сложную частотную зависимость центров рассеяния можно наблюдать при сверхширокополосном облучении объекта. Вследствие широкой полосы частот зондирующего сигнала, центр рассеяния может по-

разному вести себя на отдельных участках спектра сигнала. При описании влияния отдельных рассеивающих элементов на форму отраженных сигналов во временной области прибегают к использованию импульсных характеристик центров рассеяния объекта. В таком случае сохраняется характер линейного взаимодействия возбуждающего сигнала и рассеивающего элемента физического объекта.

Для упрощения анализа процессов рассеяния электромагнитного поля сложными объектами применяется широко используемый подход, основанный на модели эффективных точечных центров рассеяния объектов. В сантиметровом диапазоне длин волн амплитуда отраженной волны каждой «блестящей» точкой объекта в полосе частот зондирующего сигнала широкополосного радиолокатора может быть принята постоянной. Основным механизмом взаимодействия электромагнитных полей в присутствии нескольких центров рассеяния объекта является интерференция. Принятый сигнал от интерферирующих центров рассеяния объекта может быть рассмотрен как суперпозиция сигналов, отраженных каждой «блестящей» точкой.

Информация о наблюдаемом объекте заключена в амплитуде и фазе принятого радиосигнала. На современном этапе цифровые комплексные изображения радиоконтрастных объектов, полученные с использованием широкополосных радиолокаторов, могут быть использованы для идентификации и распознавания объектов в режиме реального времени. Факторами, затрудняющими решение данных задач, являются шумы наблюдения и недостаточная детальность полученных изображений.

В работе решается задача повышения детальности изображений сложных объектов. В пределах размеров этих объектов может укладываться несколько элементов разрешения по дальности (от 30 см до 1,5 м) широкополосного радиолокатора. Наблюдения осуществляются при типовых отношениях сигнал-шум (5 – 15 дБ). При этом используется информация о форме зондирующего сигнала и характеристике направленности антенны, которые применяются в когерентной короткоимпульсной системе радиовидения. Для повышения детальности изображения используется определение положений эффективных точечных центров рассеяния объекта, при отражении зондирующего сигнала от которых формируются наиболее интенсивные отклики в принятом сигнале.

Известны методы определения положений рассеивателей по результатам корреляционной и инверсной обработки изображений. Выполнение этих процедур осуществляется в предположении известной формы двумерного сигнала. Обработка заключается в линейном преобразовании, а ее результатом является выходной отклик, имеющий особую форму, например, двумерной корреляционной функции или двумерной функции sinc. Анализ результата обработки в пространственной области требует учета как характеристик шума (закона распределения, спектральной плотности мощности и др.), так и формы выходного отклика (ширина главного лепестка, уровень боковых лепестков). Анализ параметров выходного отклика позволяет получить оценки положений рассеивателей.

Рассмотренные процедуры можно отметить рядом особенностей. Корреляционная обработка для простых сигналов характеризуется ухудшением разрешения в результате уменьшения эффективной ширины спектра. При этом повышается отношение сигнал-шум в выходном отклике. Инверсная обработка позволяет повышать разрешение за счет увеличения эффективной ширины спектра при снижении отношения сигнал-шум на выходе. Кроме того, для этих методов является характерным значительный уровень боковых лепестков.

Указанные методы не позволяют существенно повысить детальность портрета объекта при простой форме сигнала и типовых отношениях сигнал-шум, поскольку не обеспечивается достаточная точность определения параметров, зависящая как от выходного отношения сигнал-шум, так и от разрешения изображения после обработки.

В качестве альтернативного подхода можно воспользоваться процедурой анализа спектра изображения, полученного преобразованием Фурье. Задержка одиночного сигнала определяет в частотной области экспоненциальный фазовый множитель спектра этого сигнала. Суперпозиция конечного числа отраженных сигналов известной формы с неизвестными параметрами: комплексными амплитудами и задержками, определяет сумму комплексных экспонент, взвешенных спектром зондирующего сигнала.

Анализ результата инверсной обработки в пространственной области затруднен шумами и значительным уровнем боковых лепестков. В частотной области он может быть проведен в пределах эффективной ширины спектра. Эта процедура эквивалентна спектральному оцениванию, используемому для

определения количества и параметров экспонент. При этом оценивание является инвариантным к форме выходных откликов и требует учета только характеристик шума.

Дополнение инверсной обработки процедурой параметрического спектрального анализа позволяет расширить возможности по повышению разрешения изображения при исходных требованиях. Это позволяет решить задачу определения взаимного положения рассеивателей, расположенных на расстоянии, меньшем размеров элемента разрешения. Также предлагаемая процедура обработки имеет следующие преимущества перед аналогами: увеличение разрешения, высокая точность, отсутствие боковых лепестков и шума. Недостатком является ограниченность применения модели, используемой для аппроксимации данных, и процедуры обработки данных, разработанной на основе этой модели.

С одной стороны, ширина спектра сигнала должна быть достаточной для обеспечения высокого разрешения. С другой стороны, описание объекта независимыми точечными рассеивателями с постоянными по частоте комплексными коэффициентами отражения должно быть адекватным в пределах этой ширины.

Таким образом, задача разработки методики определения многоточечного портрета наблюдаемого объекта в широкополосных системах радиовидения с использованием цифровой обработки сигналов и изображений является актуальной.

Целью работы является разработка алгоритма цифровой двумерной спектральной обработки комплексного изображения для определения портрета многоточечного объекта в широкой полосе частот, обеспечивающего увеличение разрешения и повышение точности оценивания параметров модели изображения в присутствии шумов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Разработка модели дискретного комплексного изображения, полученного с помощью широкополосной системы радиовидения в предположении многоточечного рассеяния зондирующего сигнала сложным физическим объектом.

2. Разработка алгоритма идентификации параметров модели комплексного изображения, использующего инверсную и параметрическую

обработку одномерных и двумерных дискретных сигналов в частотной области.

3. Аналитическое описание этапов преобразования дискретных последовательностей, наблюдаемых в присутствии шума, с целью выбора параметров алгоритма.

4. Определение характеристик точности оценки параметров модели комплексного изображения.

5. Экспериментальное исследование и анализ результатов обработки комплексных радиолокационных изображений.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы методы идентификации систем и спектрального оценивания, методы цифровой обработки сигналов и изображений, математический анализ, математический аппарат линейной алгебры, математическое и статистическое моделирование.

Научная новизна:

1. Предложена методика извлечения портрета рассеяния сложного многоточечного объекта в широкой полосе частот по его комплексному изображению на основе использования априорных сведений о форме характеристики направленности антенны и комплексной огибающей зондирующего сигнала, а также применения параметрической обработки в спектральной области.

2. Получены аналитическое описание и характеристики точности разработанного алгоритма, реализующего предложенный метод определения параметров комплексного изображения в спектральной области, обладающего свойствами увеличения разрешения изображения и повышения точности оценок параметров каждого из рассеивателей за счет разделения подпространства сигнала и шума.

3. Проведена верификация предложенной методики обработки комплексного изображения по результатам имитационного компьютерного моделирования и экспериментального исследования цифровых радиолокационных изображений сложных объектов, полученных с помощью опытного образца сверхкороткоимпульсного радиолокатора.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что на основе предложенного алгоритма разработано и реализовано средство программной обработки «СКРЛИ» цифровых квадратурных сигналов, полу-

ченных с помощью сверхкороткоимпульсной радиолокационной системы. Среди функций, выполняемых «СКРЛИ», можно перечислить:

- отображение комплексного радиолокационного изображения;
- отображение и анализ квадратурных данных в дальностных и азимутальных сечениях;
- одномерный и двумерный спектральный анализ;
- инверсная обработка комплексного радиолокационного изображения;
- параметрическая обработка комплексного радиолокационного изображения и его сечений;
- сохранение результатов обработки и сравнение с предыдущими результатами.

Разработанное средство программной обработки «СКРЛИ» было использовано для анализа возможностей параметрической идентификации в ходе полигонных испытаний опытного образца сверхкороткоимпульсного радиолокатора. Используемые в работе методы цифровой обработки могут эффективно использоваться в различных областях современной радиотехники. Реализованные средства визуализации анализа и обработки радиолокационных данных могут быть использованы в учебном процессе как в традиционных дисциплинах кафедры «Теоретическая радиотехника» МАИ, так и в дисциплинах специализации.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены в Научно-исследовательском институте «Радиоэлектронной техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Данные результаты позволили расширить функциональные возможности системы обработки сигналов и изображений сложных объектов в радиолокаторах со сверхкороткими зондирующими радиоимпульсами, а также повысить детализацию двумерных и дальностных портретов в данных радиолокаторах при типовых значениях отношения сигнал/шум. Акт о внедрении приведен в приложении к диссертации.

Научные и практические результаты работы использованы в процессе выполнения научно-исследовательских работ и отражены в отчетах по нескольким хоздоговорным НИР и государственному контракту («Цифровая обработка и параметрическая идентификация радиолокационных изображений и сигналов в системах широкополосной радиолокации», № П1041 от 20 августа 2009 г.).

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.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные оценки на:

Международных научно-технических конференциях: 12-я, 11-я, 10-я и 9-я международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2010, 2008, 2007), 17-я и 18-я международная конференция по микроволновым устройствам, радарам и беспроводной связи (International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications MIKON, г. Вроцлав, Польша, 2008, г. Вильнюс, Литва, 2010), 3-я международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP, г. Суздаль, 2009), международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и ученых «Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006» (г. Севастополь, Украина, 2006), 12-я ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2006).

Российских научно-технических конференциях: 4-я и 3-я всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (г. Москва, 2010, 2009), научно-технические конференции молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы» (г. Москва, 2010, 2008, 2007, 2006), Юбилейная научно-техническая конференция «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях» (г. Москва, 2006).

Публикации. По основным результатам выполненных исследований опубликовано 17 печатных работ, из них 3 научные статьи в журналах, определенных перечнем ВАК, 14 тезисов докладов научных конференций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение точности определения параметров модели комплексного изображения примерно в 10 раз достигнуто за счет применения методов па-

раметрической идентификации в спектральной области, разделяющих подпространство сигнала и шума.

2. Увеличение разрешения цифрового комплексного радиолокационного изображения в 2 – 3 раза по сравнению с исходным разрешением достигается за счёт учёта формы характеристики направленности антенны по азимуту и комплексной огибающей зондирующего сигнала.

3. Выигрыш в разрешении изображения объекта, достигаемый при одинаковой точности оценки параметров с использованием разработанного алгоритма, увеличивается на 10% с ростом отношения сигнал-шум на 3 дБ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 150 машинописных страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 62 рисунков и 3 таблиц. Список литературы включает 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки алгоритма идентификации параметров модели комплексного изображения, полученного с помощью широкополосной РЛС, сформулированы цель и задачи исследований, представлена научная новизна и практическая значимость работы, раскрыта структура диссертации.

В **главе 1** выполнен обзор литературы по материалам отечественных и зарубежных источников в области применения методов цифровой обработки в широкополосной радиолокации с целью увеличения разрешения изображения. В главе рассмотрена феноменологическая модель рассеяния электромагнитных волн сложными объектами при широкополосном облучении, основанная на результатах геометрической теории дифракции. Рассмотрены особенности описания, а также анализ радиолокационных эхо-сигналов и их спектральных характеристик. В главе представлен способ определения параметров точечных рассеивателей радиолокационного объекта в спектральной области в ограниченной полосе частот.

Под параметрической идентификацией предлагается понимать определение параметров модели радиолокационных сигналов и изображений высокого разрешения, несущих информацию о размерах и геометрической форме наблюдаемых объектов, с целью распознавания этих объектов по дальностным или двумерным портретам. Радиолокационные двумерные портреты целей являются обобщением дальностных портретов и могут быть сформированы для профилей объектов вдоль двух пространственных координат, например, дальности и угла азимута. При этом многоточечные портреты объектов являются их характеристиками рассеяния в предположении о суперпозиции откликов от точечных центров рассеяния объектов.

В **главе 2** решена задача математического описания формирования, приема и обработки эхо-сигналов многоточечного объекта при когерентном импульсном излучении радиолокатора в режиме обзора. Представлена модель принятого пространственно-временного сигнала (рис. 1) и аналитическое описание комплексного радиолокационного изображения. Модель комплексного радиолокационного изображения (РЛИ) учитывает форму комплексной огибающей $\dot{s}(t)$ зондирующего сигнала, форму характеристики направленности антенной системы радиолокатора $f_A^2(\theta)$, количество P и значения координат

(r_p, φ_p) точечных рассеивателей радиолокационного объекта на плоскости дальность ρ и угла азимута θ , а также параметры комплексного белого гауссовского шума $\dot{w}(\rho, \theta)$ в полосе приемного устройства радиолокатора:

$$\dot{x}(\rho, \theta) = \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot \dot{s}_R(\rho - r_p) \cdot f_A^2(\theta - \varphi_p) + \dot{w}(\rho, \theta) \quad (1)$$

где $\dot{s}_R(\rho) = \dot{s}(2\rho/c)$ – сечение комплексного РЛИ вдоль дальности, повторяющее форму комплексной огибающей зондирующего импульса; \dot{a}_p – комплексная амплитуда сигнала, отраженная от p -го рассеивателя.

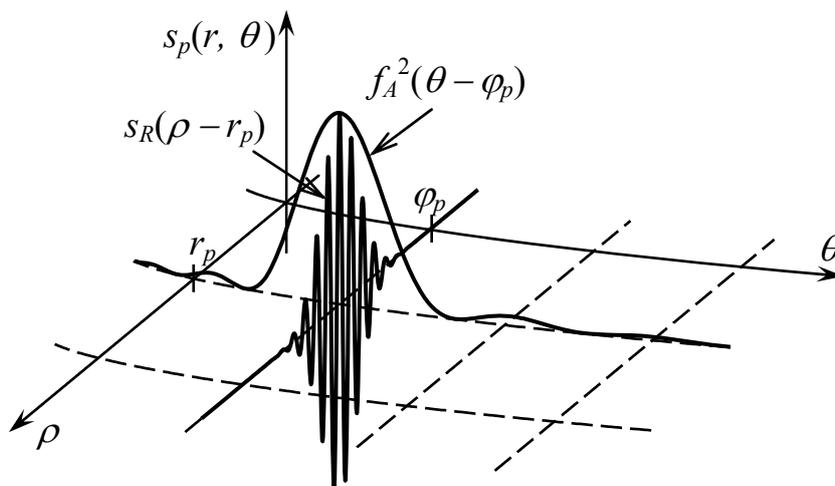


Рис. 1. Радиолокационный сигнал, сформированный при сканировании антенной по углу азимута одиночного точечного отражателя.

В заключение рассмотрены характеристики комплексного радиолокационного изображения на примере численной модели комплексного радиолокационного изображения трехточечной цели сверхкороткоимпульсного радиолокатора.

В главе 3 рассмотрено применение метода инверсной фильтрации изображения для определения двумерного портрета объекта.

Двумерный портрет объекта может быть получен путем обращения свертки:

$$\dot{y}(\rho, \theta) = \{\dot{x} * \dot{s}_0\}^{-1}(\rho, \theta) = \{\dot{x}(\rho, \theta) * \dot{s}_R(\rho)\}^{-1} \cdot \{\dot{x}(\rho, \theta) * f_A^2(\theta)\}^{-1}, \quad (2)$$

где $\dot{s}_0(\rho, \theta) = \dot{s}_R(\rho) \cdot f_A^2(\theta)$ – двумерный отклик от точечного отражателя; $*$ – символ операции свертки; $\{\bullet\}^{-1}$ – символ обращения операции свертки.

Инверсная обработка дискретного комплексного изображения $N \times M$ отсчетов проводится в спектральной области. Дискретные последовательности спектральных данных являются результатом быстрого преобразования Фурье двумерного сигнала на выходе инверсного фильтра. Двумерное преобразование Фурье представляет собой сумму двумерных комплексных экспонент на плоскости относительных пространственных частот ν и μ в присутствии комплексного гауссовского шума $\tilde{W}(\nu, \mu)$:

$$\begin{aligned} \dot{Y}(\nu, \mu) &= \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot \dot{E}_p(\nu, \mu) + \tilde{W}(\nu, \mu) = \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot e^{-j2\pi(\nu \cdot r_p + \mu \cdot \varphi_p)} + \tilde{W}(\nu, \mu) = \\ &= \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot (\dot{q}_{\rho_p})^\nu \cdot (\dot{q}_{\theta_p})^\mu + \tilde{W}(\nu, \mu), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{q}_{\rho_p} = e^{-j2\pi r_p}$ – основание p -й экспоненты в области пространственной частоты, соответствующей дальности ρ ; $\dot{q}_{\theta_p} = e^{-j2\pi \varphi_p}$ – основание p -й экспоненты в области пространственной частоты, соответствующей углу азимута θ . Длина последовательностей ограничена эффективной шириной пространственного спектра.

Представлены методы параметрического анализа дискретных последовательностей, позволяющих определить значения информативных параметров модели комплексного РЛИ многоточечного объекта. Среди рассмотренных методов параметрического анализа следует отметить: информационные критерии определения порядка модели, метод матричных пучков спектрального оценивания, а также его обобщенный аналог для двумерного случая.

Для определения количества центров рассеяния объекта использован информационный критерий выбора порядка модели дискретных последовательностей спектральных данных $\dot{Y}(\nu, \mu)$:

$$\hat{P} = \arg \min_p \{-2 \max_{\Theta} [\ln L(\dot{Y}, \Theta^{(p)})] + k \cdot f(p, K)\}, \quad (4)$$

где p – текущее значение порядка модели; $L(\dot{Y}, \Theta^{(p)})$ – функция правдоподобия; $f(p, K)$ – функция риска; k – число независимых оцениваемых параметров; $\Theta^{(p)} = (\dot{a}_1, \dots, \dot{a}_p, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_p, \sigma_{\tilde{W}}^2)^T$ – вектор параметров; K – количество отсчетов анализируемой последовательности.

С помощью метода матричных пучков могут быть получены оценки оснований $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_P$ комплексных экспонент в виде собственных значений выражения, представляющего собой матричный пучок:

$$\mathbf{D}_2 - \lambda \cdot \mathbf{D}_1 = \mathbf{Q}_L \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{Q} - \lambda \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{Q}_R, \quad (5)$$

где $\mathbf{D}_1 = \mathbf{Q}_L \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{Q}_R$ и $\mathbf{D}_2 = \mathbf{Q}_L \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}_R$ – матрицы Ханкеля $(K-L) \times L$, имеющие разные первый и последний столбцы; \mathbf{Q}_L и \mathbf{Q}_R – левая $P \times (K-L)$ и правая $L \times P$ матрицы Вандермонда, определяемые вектором оснований комплексных экспонент $(\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_P)^T$; $\mathbf{Q} = \text{diag}(\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_P)$, $\mathbf{A} = \text{diag}(\dot{a}_1 \ \dot{a}_2 \ \dots \ \dot{a}_P)$ – диагональные матрицы оснований и комплексных амплитуд экспонент соответственно; $L \leq K/2$ – параметр матричного пучка.

Оценки комплексных амплитуд определяются путем решения методом наименьших квадратов системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\left\{ \sum_{p=1}^P \hat{a}_p \cdot e^{k \cdot j \arg \hat{q}_p} = \dot{Y}[k], \quad k = 0, 1, \dots, K-1, \right. \quad (6)$$

На примере сигналов с разными порядками и значениями параметров модели рассмотрено применение методов параметрической обработки и проведен анализ результатов обработки. Рассмотрено влияние отношения сигнал/шум на характеристики информационных критериев для одной и той же модели сигнала.

В **главе 4** проведено аналитическое описание предлагаемого алгоритма обработки дискретного комплексного радиолокационного изображения в двух ортогональных сечениях пространственного спектра. Показаны аналитические связи между результатами обработки и параметрами модели. Так оценки собственных значений матричного пучка спектральных данных оказываются связанными с координатами рассеивателей объекта следующими соотношениями:

$$\hat{r}_p = -\frac{\arg \hat{q}_{\rho p}}{2\pi} \cdot (\rho_1 - \rho_N) + \rho_1, \quad \hat{\varphi}_p = -\frac{\arg \hat{q}_{\theta p}}{2\pi} \cdot (\theta_1 - \theta_M) + \theta_1, \quad (7)$$

$$p = 1, 2, \dots, P,$$

где $\hat{q}_{\rho p}$ – оценка основания p -й комплексной экспоненты, составляющей модель последовательности $\dot{Y}[k] = \dot{Y}(v_k, \mu = 0)$ в области пространственной частоты, соответствующей дальности ρ ; $\hat{q}_{\theta p}$ – параметр p -й комплексной экс-

поненты, составляющей модель последовательности $\dot{Y}[k] = \dot{Y}(v=0, \mu_k)$ в области пространственной частоты, соответствующей углу азимута.

На рис. 2 представлен предложенный алгоритм обработки РЛИ.

В результате выполнения предложенного алгоритма идентификации в спектральной области будут определены параметры центров рассеяния объекта и построен его многоточечный портрет. При этом неизвестные координаты и неизвестное число эффективных центров рассеяния определяются по одномерным сечениям вдоль пространственных частот сектора РЛИ.

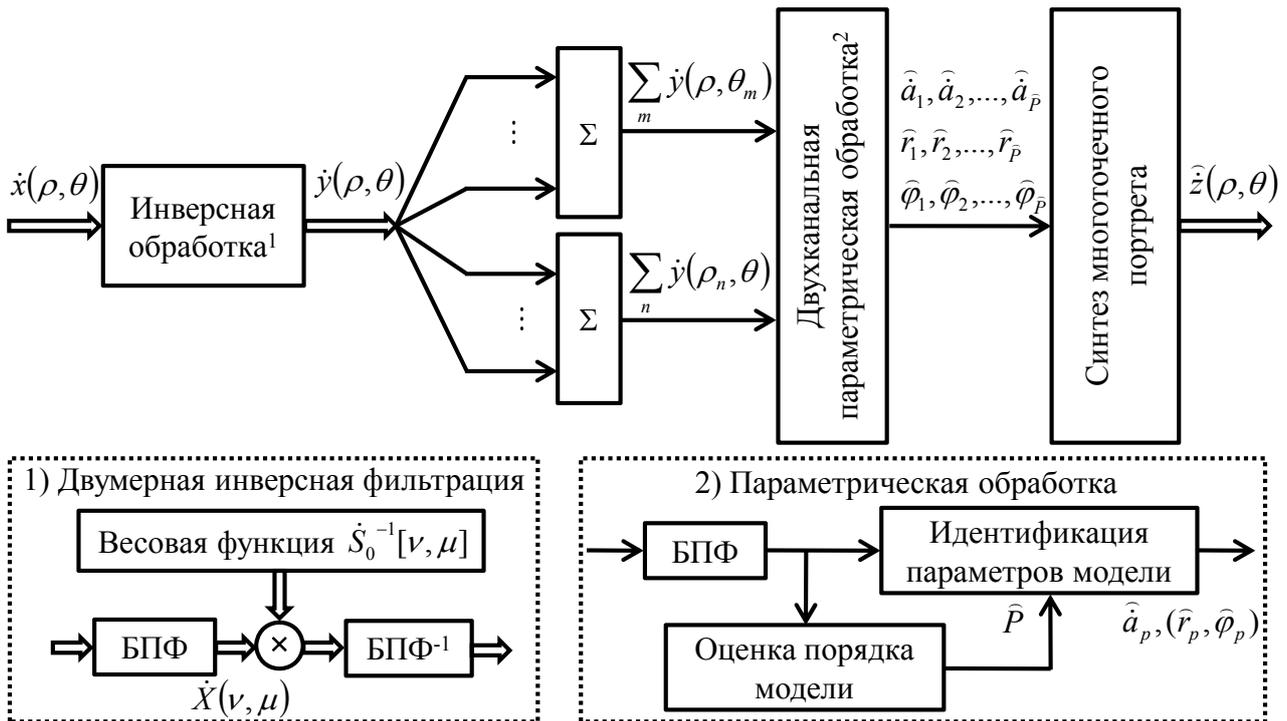


Рис. 2. Алгоритм обработки комплексного изображения.

В главе проведено статистическое моделирование параметрической идентификации, которое показало высокую точность определения координат положения двух центров рассеяния, расположенных внутри элемента разрешения изображения. Была проанализирована зависимость среднеквадратической ошибки (СКО) определения координат от отношения сигнал-шум q и расстояния между центрами рассеяния δ . Расстояние между рассеивателями определялось с использованием относительной величины:

$$\delta = \sqrt{[(\rho_2 - \rho_1)/\Delta_\rho]^2 + [(\theta_2 - \theta_1)/\Delta_\theta]^2}, \quad (8)$$

где $\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2$ – координаты дальности и угла азимута рассеивателей соответственно;

$$\Delta_\rho = 3 \text{ м}, \Delta_\theta = 1^\circ \quad (9)$$

– размеры элемента разрешения по дальности и углу азимута, соответствующие РЛС, рассмотренной в **главе 2**.

Для анализа ошибок определения координат была построена двумерная характеристика, выраженная в относительных значениях СКО в зависимости от отношения сигнал/шум q и относительного расстояния δ . В серии из K испытаний СКО по каждой координате рассчитывается по следующим формулам:

$$\varepsilon_{\rho,2} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |\rho_{1,2} - \tilde{\rho}_{1,2 i}|^2}, \quad \varepsilon_{\theta,2} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |\theta_{1,2} - \tilde{\theta}_{1,2 i}|^2}. \quad (10)$$

Величина относительной СКО положения на плоскости каждого рассеивателя определяется следующим выражением:

$$\varepsilon_{1,2} = \sqrt{(\varepsilon_{\rho,2}/\Delta_\rho)^2 + (\varepsilon_{\theta,2}/\Delta_\theta)^2}. \quad (11)$$

Отношение сигнал-шум изменялось от 5 до 30 дБ, а относительное расстояние между рассеивателями – от 0,3 до 1. В ходе исследования были проведены серии из $K = 200$ испытаний. Результаты исследования в виде двумерных характеристик приведены на рис. 3.

Сделан вывод о возможности увеличения разрешения комплексного радиолокационного изображения в 2 – 3 раза.

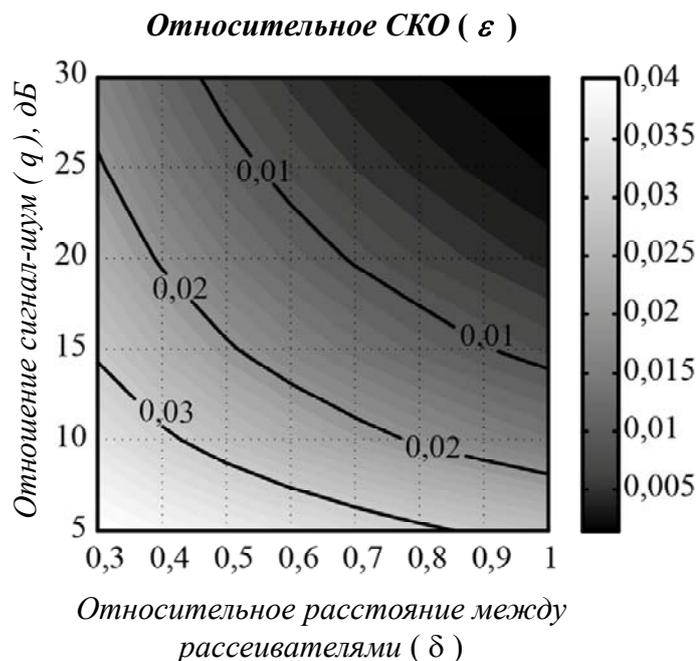


Рис. 3. СКО оценок положения рассеивателя на плоскости.

В главе 5 представлены результаты моделирования комплексного радиолокационного изображения многоточечных объектов и их обработки с помощью предложенного алгоритма, анализ которой показал: возможность определения параметров большого количества точечных рассеивателей объектов; увеличение разрешения на 50% при типовых отношениях сигнал/шум (от 5 до 15 дБ) по сравнению с традиционной инверсной обработкой изображения; возможность восстановления двумерного портрета радиолокационного объекта в отсутствие сигналов отраженных от подстилающей поверхности.

Представлены результаты обработки экспериментально полученных с помощью опытного образца сверхкороткоимпульсного радиолокатора комплексных радиолокационных сигналов и изображений сложного объекта.

Для применения обработки на основе предложенного алгоритма были использованы комплексные РЛИ, полученные с помощью сверхкороткоимпульсной РЛС. РЛС излучает когерентные импульсы длительностью порядка 10 нс, что соответствует разрешению по дальности порядка 1,5 м.

Основные технические характеристики РЛС:

- мощность излучаемых колебаний – 40 Вт;
- частота несущей – 10 ГГц;
- полоса пропускания приемника – 200 МГц;
- ширина диаграммы направленности:
 - в азимутальной плоскости – $1,1^\circ$;
 - в угломестной плоскости – $2,2^\circ$.

Аналого-цифровое преобразование квадратурных составляющих принятого радиолокационного сигнала с выхода синхронного детектора осуществляется с частотой дискретизации 400 МГц, что интервалу между отсчетами по дальности 0,375 м. При импульсном излучении антенная система РЛС вращается в азимутальной плоскости, обеспечивая сканирование и обзор по углу азимута. За время обзора в секторе сканирования по углу азимута 90° излучается 2024 импульса, что определяет интервал между отсчетами по азимуту $0,05^\circ$.

На рис. 4 представлен фрагмент амплитудного распределения комплексного РЛИ самолета Ил-38. Неподвижный самолет наблюдался на аэродроме на дальности 225 м. Размер фрагмента изображения – 100×140 отсчетов.

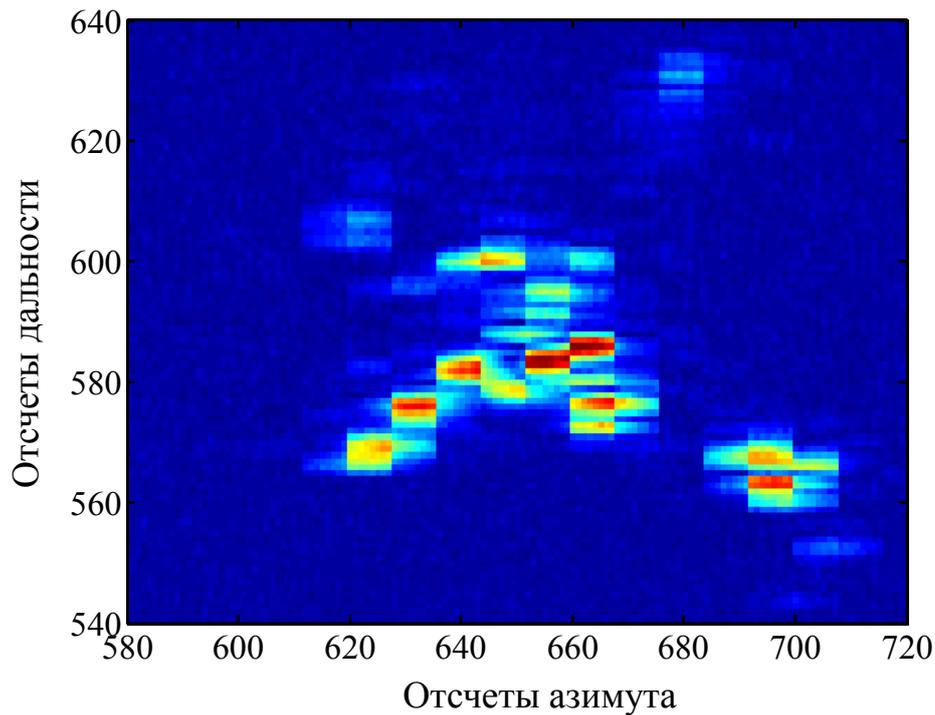


Рис. 4. Амплитудное распределение комплексного РЛИ самолета Ил-38.

Анализ реализаций дальностных сечений РЛИ и спектров, а также результатов их инверсной обработки показал необходимость ограничить спектральные данные шириной диапазона 200 МГц. Схожими оказываются результаты анализа и для азимутальных сечений.

Результат инверсной обработки с ограниченным пространственным спектром рассматриваемого фрагмента РЛИ приведен на рис. 5. Полученное изображение содержит большее количество деталей, чем исходное за счет уменьшения размера элемента разрешения изображения достигнутое в результате обработки.

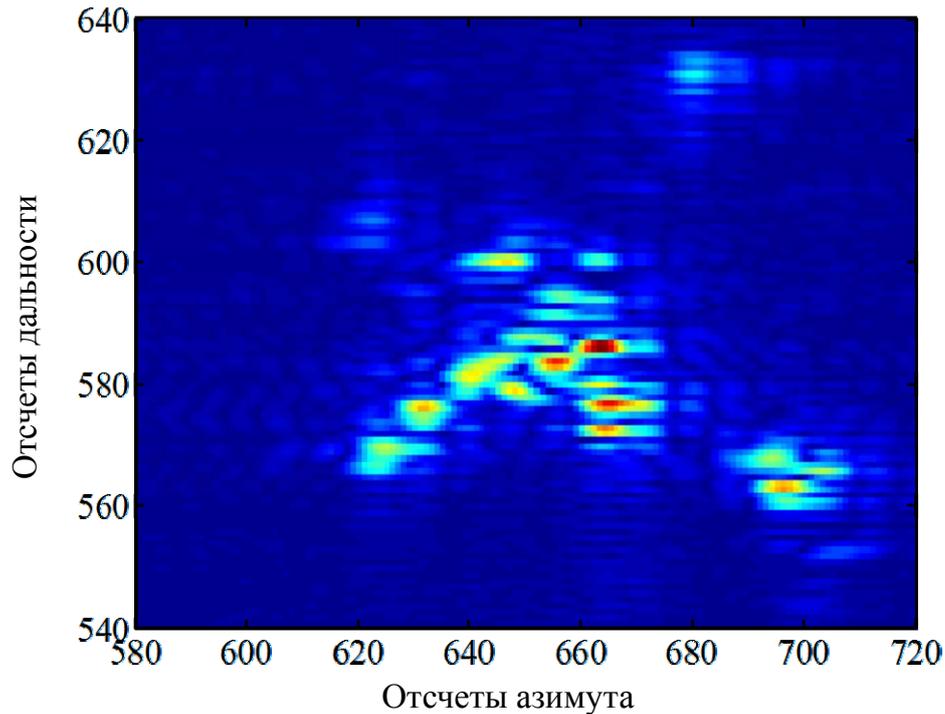


Рис. 5. Амплитудное распределение комплексного РЛИ самолета Ил-38, полученное после инверсной обработки.

При этом следует отметить ярко выраженные боковые лепестки, которые появились на изображении вследствие ограничения спектра.

Проведенная дальнейшая параметрическая обработка в спектральной области позволила выявить большое количество центров рассеяния, показанных точками на рис. 6. Размер точек характеризует интенсивность отражений. Их расположение на плоскости изображения характеризует геометрическую форму наблюдаемого объекта, в данном примере – самолета.

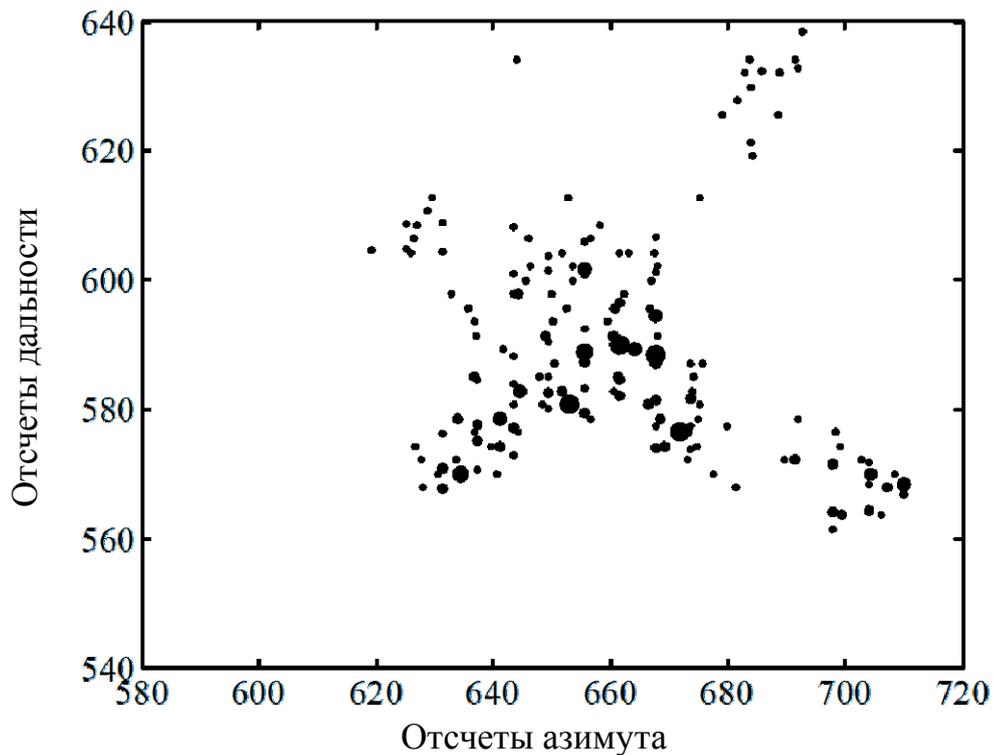


Рис. 6. Расположение эффективных центров рассеяния, полученное в результате параметрической обработки. Размером точек показана интенсивность отражений от центров рассеяния.

Заключение

Диссертационная работа посвящена разработке алгоритма параметрической идентификации, позволяющего определить положения близкорасположенных центров рассеяния объекта с использованием его комплексного изображения.

Проведенный обзор по материалам отечественных и зарубежных источников в области распознавания радиолокационных объектов, цифровой обработки сигналов и изображений с целью повышения разрешения, параметрической обработки сигналов показал, что выбранное направление исследований является востребованным, актуальным и перспективным.

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

1. Представлена феноменологическая модель рассеяния в широкой полосе частот, описывающая объект набором «блестящих» точек, которая ха-

рактирует процесс формирования отраженного сигнала РЛС с достаточной точностью.

2. Предложен подход к обработке сигналов и изображений, заключающийся в параметрическом анализе в спектральной области результата инверсной обработки комплексного изображения с целью определения количества и координат точечных центров рассеяния объекта.

3. Разработан алгоритм обработки комплексного изображения. Проведено аналитическое описание процедур преобразования дискретного изображения в спектральной области с целью выбора параметров алгоритма, позволяющего обеспечить робастные свойства параметрического анализа структуры пространственного спектра изображения.

4. Выполнен анализ точности определения координат центров рассеяния с использованием разработанного алгоритма на примере модели комплексного РЛИ двухточечного объекта. Анализ показал возможность увеличения разрешения изображения в присутствии аддитивного белого гауссовского шума при расстоянии между центрами рассеяния в 2 – 3 раза меньше размера элемента разрешения.

5. Анализ результатов обработки РЛИ многоточечного объекта показал, что выбор критерия определения порядка модели оказывает существенное влияние на результат параметрической обработки. При этом предпочтение следует отдать критерию, для которого риск переоценки порядка модели окажется наименьшим. В связи с этим, из рассмотренных критериев в работе отдано предпочтение критерию минимальной длины описания.

6. Проанализировано качество инверсной обработки, которая с одной стороны позволяет увеличить разрешение, а с другой стороны характеризуется недостатками, связанными с высоким уровнем боковых лепестков и искажениями портрета объекта шумом. Представление портрета объекта в виде расположения эффективных центров рассеяния выигрывает перед результатом простой инверсной обработки. Приведенные расположения рассеивателей многоточечных объектов имеют более четко очерченный контур в отсутствии боковых лепестков и шума.

7. Анализ результатов проведенной обработки экспериментальных данных, полученных с помощью опытного образца сверхкороткоимпульсного радиолокатора, подтвердил сделанные выводы для модели комплексного РЛИ.

Публикации по теме диссертации:

1. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Определение параметров многоточечных целей по спектру радиолокационного изображения Вестник МАИ, том 17, № 3 193-198 2010 г.
2. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Параметрическая идентификации точечных центров рассеяния радиолокационных объектов в частотной области Труды МАИ, № 38, 2010 г.
3. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Параметрическая идентификации точечных центров рассеяния радиолокационных объектов в частотной области Информационно-измерительные и управляющие системы, том 8, № 3 15-19 2010 г.
4. Коновалюк М.А., Горбунова А.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Алгоритм извлечения информации из комплексного радиолокационного изображения сложной цели, 4-я всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», Москва, ИРЭ им. ак. В.А. Котельникова РАН, декабрь 2010 г.
5. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Определение геометрической формы объектов по комплексному радиолокационному изображению Научно-техническая конференция молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы», Москва, МАИ, с. 79-80, апрель 2010 г.
6. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Moving Multy-Scatterer Target Parametric Identification Using Radar Image, *18th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2010*, Vilnius, Lithuania, pp. 524-527, June 14-16, 2010
7. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Коновалюк М.А., Идентификация объектов сложной формы в сверхкороткоимпульсной радиолокации, 3-я всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. ак. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, с. 175-179, октябрь, 2009
8. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Идентификация параметров многоточечной цели по комплексному радиолокационному изображению в широкополосной радиолокации, 3-я международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2009), 22-24, г. Суздаль, с. 48-52, сентябрь 2009 г.
9. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Коновалюк М.А., Оценивание параметров радиолокационных сигналов в сверхкороткоимпульсной радиолокации, 10-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, с. 374-377, март 2008 г.
10. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Определение положения точечных центров рассеяния объектов по радиолокационному изображению. Научно-техническая конференция молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы», посвященная 80-летию профессора П.А. Бакулева, Москва, МАИ, апрель 2008 г.
11. Maxim Konovaluk, Yury Kuznetsov, Andrey Baev, Point scatterers target identification using frequency domain signal processing in *9th International radar symposium IRS 2008*, Wrocław, Poland, 21-23 May, 2008

12. Коновалюк М.А., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Скосырев В.Н., Применение параметрической идентификации в сверхкороткоимпульсной радиолокации. 9-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, с. 247-251, март 2007 г.

13. Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Коновалюк М.А., Большаков Д.В., Применение параметрической идентификации целей в сверхкороткоимпульсном радиолокаторе. Научно-техническая конференция молодых ученых факультета «Радиоэлектроники летательных аппаратов», Москва, МАИ, с. 157-162, апрель 2007 г.

14. Коновалюк М.А., Большаков Д.В., Баев А.Б., Разработка и исследование алгоритма идентификации радиолокационных объектов на основе моментов Зернике. 12-я ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”, Москва, МЭИ, 2006 г.

15. Коновалюк М.А., Большаков Д.В., Баев А.Б., Процедура идентификации объектов в сверхкороткоимпульсной радиолокации, Международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и ученых “Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006”, Севастополь, апрель 2006 г.

16. Коновалюк М.А., Большаков Д.В., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Разработка методики анализа радиолокационного изображения сверхкороткоимпульсного радиолокатора при идентификации объектов, Юбилейная научно-техническая конференция молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы», Москва, МАИ, май 2006 г.

17. Коновалюк М.А., Большаков Д.В., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Разработка методики анализа радиолокационного изображения сверхкороткоимпульсного радиолокатора при идентификации объектов, Юбилейная научно-техническая конференция «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», Москва, МАИ, октябрь 2006 г.