

УДК 621.391.519.27(024)

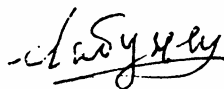
ЛАБУНЕЦ Леонид Витальевич

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПОЛЕЙ ЦЕЛЕЙ И СИГНАЛОВ
В ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность: 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения;
05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 2001

Работа выполнена в
Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана
на кафедре "Автономные информационные и управляющие системы"

Официальные оппоненты: Доктор физ. - мат. наук, профессор
Кравченко В. Ф.;
Доктор технических наук, профессор
Пахомов И. И.;
Доктор технических наук, профессор
Чесноков Ю. С.;

1583065

Лагунина
И. В.

Теория и методы
цифрового моделиро-
вания систем с сигна-
лом в дискретном и не-
прерывном времени
и пространстве

2001

НПП «Дельта», г. Москва

02 года в 10 часов

Совета Д 212.141.11 в Московском
университете им. Н.Э. Баумана
Бауманская, д. 5, ауд. 316.

экземплярах, заверенные печатью,
Бауманская, д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
по Совету Д 212.141.11

библиотеке МГТУ им. Н

1583065

вета

Власов И. Б.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Формулировка проблемы и ее актуальность. Современный этап развития теории синтеза и анализа функционирования автономных информационных систем дистанционного зондирования характеризуется интенсивным развитием методов автоматизированного проектирования оптико-электронных и радиолокационных устройств ближнего действия. Компьютерные и информационные технологии являются естественной и неотъемлемой средой их эволюции. Краеугольным камнем в фундаменте систем автоматизированного проектирования (САПР) является наличие завершенной теории и методологии математического моделирования (ММ) полей целей и входных сигналов, учитывающих специфику функционирования локационных устройств в ближней зоне. Закономерным в связи с этим представляется возрастающая потребность в проведении подобного рода разработок.

Научная проблема, решению которой посвящена диссертация, формулируется следующим образом:

- разработка целостной теории, формулировка и практическая реализация методологии цифрового моделирования полей рассеяния электромагнитных волн оптического (видимого, ближнего ИК) и радио (миллиметрового, сантиметрового) диапазонов спектра на объектах локации естественного и антропогенного происхождения, учитывающих распределенный характер рассеивающих свойств целей в ближней зоне.

Актуальность этой проблемы обусловлена следующими причинами:

- В современных САПР цифровое моделирование занимает главенствующие позиции по отношению к натурным измерениям и физическому моделированию. Цифровые модели предоставляют совершенно новые уникальные возможности по совершенствованию и оптимизации всей процедуры извлечения полезной информации о цели. Это обуславливает необходимость разработки новых вычислительных и статистических методов моделирования полей различной физической природы.

- Существующие в настоящее время цифровые модели характеристик отражения объектов сложной формы имеют ряд ограничений, связанных с упрощающими допущениями относительно геометрии цели или физико-математической модели рассеяния излучения участками ее поверхности. Их преодоление в направлении совершенствования системы геометрического моделирования, адаптированной к решению задач физической теории дифракции (ФТД) и построения на этой основе эффективных вычислительных методов и программных комплексов, адекватно воспроизводящих электродинамические процессы рассеяния излучения трехмерными объектами, представляется важным.

- Необходимостью развития теории и методов статистического модели-

рования случайных полей, свободных от ограничений размерности и способа дискретизации поля, функционального вида его энергетического спектра и типа поля в направлении создания новых моделей и эффективных алгоритмов синтеза изображений фонов и подстилающих поверхностей (ПП) с корреляционно - спектральными свойствами идентичными экспериментальным данным.

- Потребностью применения методов теории адаптации и обучения для формирования новых подходов к рандомизации многомерных распределений (в том числе и вероятностных) с целью синтеза классификационных правил и создания статистических моделей реального времени, свободных от априорных упрощающих допущений относительно стационарности сигналов и помех и нормальности их распределений.

Цель исследований. Эффективный путь решения задач ММ входных воздействий систем состоит в применении фундаментальных асимптотических методов ФТД волн. Разумное сочетание методов геометрической оптики (приближения Кирхгофа) и краевых волн (приближения Уфимцева), а также теории резонансного рассеяния (приближения малых возмущений) представляет собой методическую основу построения аппаратно - программных комплексов цифрового моделирования сигналов и полей локационных систем. Однако эффективная алгоритмическая реализация асимптотических методов электродинамики предполагает далеко не формальное применение и адаптацию современных методов вычислительной математики, компьютерной графики и искусства программирования.

По определению, имитационные цифровые модели входных воздействий систем, воспроизводящие физику процесса взаимодействия излучения с объектом, не являются моделями реального времени. Вместе с тем, решение практических задач анализа систем требует сжатия информации, полученной с помощью имитационных моделей, и ее извлечения в режиме реального времени. Компактное хранение результатов моделирования возможно на основе исследования обобщенных статистических свойств характеристик отражения зондирующего излучения целями. Очевидно, что такого рода статистики представляют собой надежный фундамент для решения задач заметности объектов, а также формирования информативного признакового пространства и правил классификации целей. Методы статистической радиофизики, математической статистики, фрактальной геометрии и прикладной нелинейной динамики, применяемые к имитационным моделям, являются методической основой создания моделей реального времени.

Таким образом, целью работы является создание на основе теоретических и прикладных исследований концептуальных, методических и программных средств надежного ММ входных воздействий локационных систем, реализованных в виде эффективных алгоритмов цифровой генерации сигналов и полей, адекватно воспроизводящих статистические свойства и физи-

ческие закономерности отражения излучения от объектов сложной электрофизической структуры и формы для дальнейшего решения практических задач анализа заметности целей, выделения их информативных признаков, синтеза классификационных правил и анализа систем.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач, составляющих основные этапы исследования:

- разработка методов рандомизации и на их основе нового семейства алгоритмов обучения без поощрения широкого класса параметрических и полупараметрических моделей многомерных распределений;

- развитие метода кумулянтного описания многомерных вероятностных распределений и исследование свойств ковариационных приближений негауссовых многомерных плотностей распределений вероятностей и вероятностных интегралов;

- создание новых приближенных методов оценки характеристик выбросов негауссовых нестационарных случайных процессов (СП) и решение на их основе специальных задач статистической радиофизики;

- развитие методов статистического моделирования многомерных случайных полей с корреляционно - спектральными свойствами общего вида. Разработка на этой основе методик и алгоритмов цифрового синтеза изображений различных классов фонов и ПП;

- разработка системы трехмерного геометрического моделирования объектов сложной конфигурации, адаптированной к решению задач энергетической фотометрии и ФТД;

- создание фотометрической модели рассеяния оптического излучения шероховатой поверхностью покрытия цели, обеспечивающей приемлемые вычислительные затраты и точность моделирования сигналов и полей локационных систем;

- разработка эффективных вычислительных методов и алгоритмов приближенного решения задач энергетической фотометрии и ФТД зондирующего излучения на телах сложной формы для анализа заметности целей и выделения их информативных признаков, а также синтеза и анализа функционирования систем;

- анализ обобщенных статистических свойств характеристик отражения излучения объектами локации и создание на этой основе моделей реального времени сигналов и полей локационных систем.

Методы исследований. Методической основой развиваемых методов, математических моделей и алгоритмов служат:

- теория адаптации и обучения, алгоритмический подход к синтезу обучающих правил; теория распознавания образов, семейство ЕМ- алгоритмов классификации без поощрения;

- кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований; теория выбросов случайных процессов;
- теория статистического моделирования, параметрические спектральные модели многомерных случайных полей; современные методы многомерного спектрального оценивания;
- методы ФТД коротких волн; теоретическая фотометрия, гониофотометрические исследования индикатрис рассеяния оптического излучения шероховатыми поверхностями;
- компьютерная графика, системы геометрического моделирования, вычислительная геометрия;
- методы теории вероятностей и математической статистики, параметрические, непараметрические и полупараметрические оценки многомерных распределений.

Научная новизна и вклад исследования в разработку проблемы. Научная новизна работы состоит в создании новых теоретических и вычислительных методов ММ сигналов и полей автономных локационных систем, адаптированных к их цифровой реализации для адекватного воспроизведения физических закономерностей рассеяния излучения на телах сложной формы и статистических свойств фонов и ПП. Она включает в себя:

- распространение теории адаптации и обучения на формирование новой методологии построения рандомизированных моделей многомерных распределений и синтезу *W*- взвешенных алгоритмов обучения без поощрения по исходным данным в регулярной или выборочной форме. Обоснование комбинированных функционалов качества, обеспечивающих разумный компромисс между дисперсиями оценок и скоростью сходимости процедур обучения;
- развитие метода кумулянтного описания вероятностных распределений негауссовых нестационарных СП. Обоснование адекватности и исследование свойств сходимости ковариационных приближений многомерных плотностей распределений вероятностей и вероятностных интегралов;
- разработку нового интерполяционного метода для оценки характеристик выбросов негауссовых нестационарных СП. Синтез и анализ сходимости полупараметрических оценок распределения длительностей выбросов СП. Получение аналитических оценок старших членов ряда Райса;
- развитие теории и метода параметрического моделирования многомерных случайных полей различной физической природы. Обоснование и оптимизацию параметров рандомизированных моделей энергетических спектров изотропных и анизотропных полей. Синтез многомерных фильтров прямого и обратного линейных прогнозов по экспериментальным данным малых выборочных объемов;

- получение уточненных лучевых моделей рассеяния оптического излучения шероховатыми поверхностями, обеспечивающих приемлемые вычислительные затраты и адекватность воспроизведения физических закономерностей процесса отражения;

- разработку кусочно-аналитической модели геометрического образа цели со сложной пространственной конфигурацией и объектно-ориентированной библиотеки геометрического моделирования, адаптированной для решения практических задач теоретической фотометрии и ФТД.

На защиту выносятся следующие новые положения и результаты диссертационной работы:

- метод рандомизации многомерных распределений и реализующий его SWM - алгоритм, демонстрирующий улучшенные свойства сходимости процедуры обучения без поощрения;

- ковариационное приближение многомерных негауссовых вероятностных распределений и интегралов в виде разложения в степенной ряд по элементам ковариационной матрицы и производным одномерных распределений;

- интерполяционный метод и реализующие его полупараметрические оценки характеристик выбросов негауссовых нестационарных СП, аналитические оценки старших членов ряда Райса;

- полупараметрические оценки вероятности затенений и маскировки лучей микрогранями негауссовой неоднородной шероховатой поверхностью;

- рандомизированные модели энергетических спектров многомерных случайных полей и полученные на их основе алгоритмы цифрового синтеза изотропных и анизотропных изображений фонов и ПП;

- аппаратно-программный комплекс экспериментального исследования, цифрового моделирования и база данных характеристик рассеяния оптического излучения образцами покрытий конструкционных материалов целей;

- система геометрического моделирования и база данных геометрических образов антропогенных объектов локации;

- обобщенные статистические модели характеристик заметности целей в одно- и двухпозиционных оптических и радиолокационных системах; методология и алгоритмы формирования информативного признакового пространства и правил классификации объектов в однопозиционных системах локации.

Практическая ценность и область применения результатов исследования. Практическая ценность работы состоит в замене дорогостоящих полигонных измерений адекватным универсальным и гибким вычислительным экспериментом, а также в решении совокупности важных научно-технических задач цифрового синтеза и анализа оптических и радиолокационных систем.

Область практического применения. Представленные в диссертации методы, алгоритмы и программное обеспечение (ПО) применяются для:

- анализа характеристик заметности целей и формулировки статистических критериев их оптимизации;
- анализа эффективности функционирования и обоснования выбора основных параметров одно- и двухпозиционных систем оптической локации;
- цифровой обработки функций изменения блеска космических объектов, измеряемых наземными средствами слежения в аппаратно-программном комплексе контроля космического пространства;
- формирования информативного признакового пространства и синтеза правил классификации целей в однопозиционных системах оптической локации.

Внедрение. Результаты диссертационной работы внедрены в 1980 - 2000 гг. в техническое и ПО бортовых систем и измерительных комплексов на предприятиях:

- НПО "Импульс", ЦНИИХМ, ГИПО в НИР и ОКР одно- и двухпозиционных систем оптической локации;
- НИИАС, ВИАМ, ММЗ им. Микояна, ЛИИ им. Громова, ГОИ им. Вавилова в методики цифрового моделирования и экспериментального исследования оптических и радиолокационных характеристик заметности летательных аппаратов;
- РНИИ КП в части методов цифровой обработки результатов оптических измерений средств слежения и формирования информативного признакового пространства для классификации космических объектов;
- в/ч 41513 в эскизный проект системы контроля космического пространства.

Реализация результатов работы подтверждается соответствующими актами о внедрении и использовании, приложенными к диссертации.

Материалы работы используются в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э. Баумана по курсам "Основы теории обработки сигналов систем ближней локации" и "Моделирование систем ближней локации".

Апробация работы. Основные результаты диссертации обсуждались и получили одобрение на Всесоюзных семинарах "Статистические методы обработки сигналов и их применения" ЦП НТО РЭС им. А.С. Попова (Туапсе, 1985), "Волновые явления в неоднородных средах" (Москва, ИРЭ РАН, 2000); на Всесоюзных научно - технических конференциях: "Проектирование систем" (Москва, МГТУ, 1988, 1990); на заседаниях Научного Совета по проблемам управления и навигации (Ленинград, ЛМИ 1985); МНТКС по теоретическим и экспериментальным исследованиям целей и фонов (Ленинград, ГОИ им. Вавилова, 1988, 1989); на отраслевых научно-технических совещаниях (Москва,

НПО "Импульс", 1980; НПО "Дельта", 1982; ЦНИИХМ, 1985, 1987) и межведомственной конференции "Научно-техническое обеспечение деятельности спецслужб" (Москва, Академия ФСБ, ИКСИ, 2000). При этом основные положения диссертации опубликованы в научно - технических журналах и сборниках (более 20 работ, из них 11 в академических журналах принадлежат лично автору), а также в 19-и отчетах по НИР и ОКР.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Диссертация содержит 333 страницы машинописного текста, 184 рисунка (на 94 листах) и 35 таблиц; состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы (включающего 212 наименований отечественных и зарубежных источников, в том числе 19 работ автора) на 20 страницах, приложения на 37 страницах.

Во введении дано обоснование актуальности проблемы и краткая характеристика нового научного направления для ее решения, формулируется цель работы и основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, формы апробации и внедрения ее результатов.

В первой главе представлен метод рандомизации многомерных распределений [15], основой которого является семейство ЕМ алгоритмов. В качестве модели N - мерных данных $\vec{X} = (x_1, \dots, x_N)^T \in R^N$ анализируется кластерная, т. е. K "сгустков" случайных точек или K модальных значений исходного распределения $\phi(\vec{X})$. Число K парциальных плотностей распределений в смеси

$$(1) \quad \hat{\phi}(\vec{X}|\vec{\theta}) = \sum_{k=1}^K p_k \hat{\phi}_k(\vec{X}|\vec{\theta}_k); \quad \hat{\phi}_k(\vec{X}|\vec{\theta}_k) = S_1^{-1} v_{N-1}^{-1} (\det B_k)^{-\frac{1}{2}} f(D_0^2(\vec{X}|\vec{\theta}_k)),$$

а также начальное приближение вектора параметров смеси $\vec{\theta}^{(0)}$ считаются известными. Кластерная структура описывается эллипсоидально симметричными плотностями $\hat{\phi}_k(\vec{X}|\vec{\theta}_k)$ в метрике $D_0^2(\vec{X}|\vec{\theta}_k) = (\vec{X} - \vec{M}_k)^T B_k^{-1} (\vec{X} - \vec{M}_k)$ Махаланобиса. Здесь S_1 - площадь поверхности единичной сферы в R^N ; $f(y^2)$ - одномерное радиальное распределение с конечным $(N-1)$ -м моментом v_{N-1} . В качестве целей обучения анализируются функционалы правдоподобия Фишера, расстояния Бхатачария и дивергенции Кульбака. Экстремумы последних обеспечивают оптимальное значение вектора параметров смеси $\vec{\theta}$, компоненты которого p_k - априорные вероятности, а $\vec{\theta}_k = (\vec{M}_k, B_k)$ - характеристики положения и масштаба классов. Аналитическое решение задачи условной оптимизации получено в виде модифицированной системы нелинейных нормальных уравнений. Ее последующее итерационное решение реализует **SWM** алгоритм рандомизации исходного распределения. Алгоритм предусматривает выполнение следующих процедур:

S шаг : статистическое моделирование обучающих выборок стандартных случайных векторов из генеральных совокупностей, имеющих распределения $\phi_k(\tilde{X}|\delta_k)$ ($k = 1, \dots, K$);

W шаг : оценивание весовых функций классов и w- взвешенных начальных моментов парциальных распределений;

M шаг : оценивание оптимального (в смысле выбранного функционала качества обучения) вектора параметров смеси.

Применение на S- шаге алгоритма коррелирующего - декоррелирующего преобразований, основанных на разложении ковариационных матриц классов по собственным значениям и векторам, позволяет алгоритму работать с вырожденными парциальными распределениями и снизить вычислительные затраты при оценке матрицы расстояний Махаланобиса. Предложена полупараметрическая адаптивная фильтрационная ядерная оценка ближайших соседей исходного распределения. Ее применение на W шаге алгоритма существенно снижает требования к объему исходной выборки данных. Реализация w- взвешенных (в смысле Л. Д. Мешалкина) оценок параметров парциальных распределений и сглаживающих (по выборке) операторов позволяет алгоритму эффективно работать с малыми межклассовыми расстояниями и малыми выборками. Процедура адаптирована как к выборочной, так и к регулярной форме задания исходной информации.

Методами цифрового моделирования исследованы свойства сходимости алгоритма для различных функционалов качества обучения. Предложена комбинированная цель обучения, обеспечивающая разумный компромисс между скоростью сходимости алгоритма и значениями дисперсий оценок параметров конечной смеси (рис. 1).

Получил дальнейшее развитие метод кумулянтного представления вероятностных распределений А.Н. Малахова. Представлено [5] ковариационное приближение многомерных плотностей и интегралов вероятностей в виде степенного ряда

$$\Phi_N^{(2)}(\tilde{X}) = \sum_{k_{1,2}} \dots \sum_{k_{(N-1),N}} \frac{b_{1,2}^{k_{1,2}} \dots b_{(N-1),N}^{k_{(N-1),N}}}{k_{1,2}! \dots k_{(N-1),N}!} \prod_{v=1}^N \frac{d^{k_v+1}}{dx_v^{k_v+1}} \left\{ \Phi_1^{x_v}(x_v) \right\}$$

по элементам $\{b_{n,m}\}_{n=1, (N-1)}^{m=(n+1), N}$ ковариационной матрицы случайных величин $X_1, \dots, X_N$ и производным их одномерных интегральных функций распределения $\Phi_1^{x_v}(x_v)$. Исследованы необходимые и достаточные условия, при которых характеристическая функция ковариационного приближения $\Phi_N^{(2)}(\tilde{X})$ положительно определена. Показано, что эти условия рационально формулировать в терминах поиска решения задачи условной оптимизации в пространстве параметров сужения одномерных плотностей $\phi_1^{x_v}(x_v)$ при наличии бесконечномер-

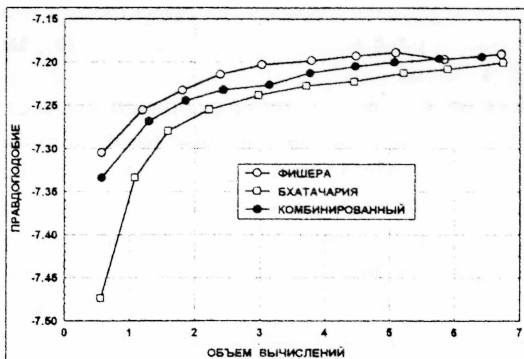


Рис. 1. Функционалы качества обучения *SVM* алгоритма.

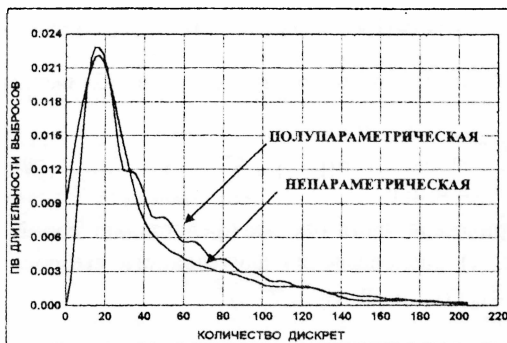


Рис. 2. Оценки распределения длительности выборов.

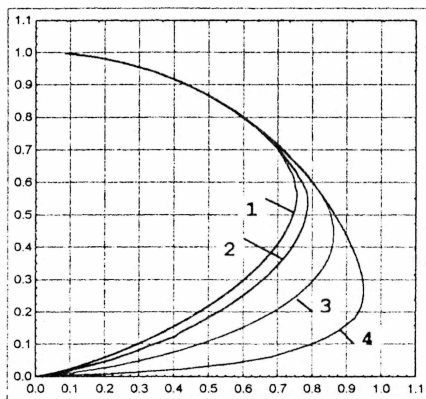


Рис. 3. Индикатрисы вероятности $q_{\infty}(0, \tilde{y}_0 | \alpha)$ не затенения луча:

(1) - $\tilde{y}_0 = -1$; (2) - $\tilde{y}_0 = -0,5$; (3) - $\tilde{y}_0 = 0$; (4) - $\tilde{y}_0 = 0,5$.

ной системы ограничений типа неравенств. Эффективные квази-ньютоновские методы решения такого рода задач математического программирования предложены Тапия (R.A. Taria).

Во второй главе предложен метод оценивания и соответствующее ему полупараметрическое представление распределения длительности выбросов СП общего вида [3, 4, 16]. Метод основан на кусочно-линейной интерполяции СП по его отсчетам в дискретные моменты времени t_n ($n = \dots, -1, 0, 1, 2, \dots$) и является развитием метода временной дискретизации, предложенного Лонге Хиггинс (M.S. Longuet-Higgins), Б.Р. Левиным и Я.А. Фоминым. Параметрическая часть оценки опирается на систему гипотез относительно попадания длительности выбросов СП над пороговой функцией $x_n = x(t_n)$ во временные интервалы $[(t_{n-1} - t_0), (t_n - t_{-1})]$, ($n = 1, 2, \dots$). Вероятности этих гипотез

$$p_1(t_0) = 1 - P\{C_1\} / P\{C_0\}; \quad p_{n+1}(t_0) = 1 - \sum_{m=1}^n p_m(t_0) - P\{C_{n+1}\} / P\{C_0\}$$

рассчитываются с помощью ковариационного приближения интеграла вероятностей

$$P\{C_{n+1}\} = P\{C_n\} \frac{P\{E_{(n+1-M), M}\}}{P\{E_{(n+1-M), (M-1)}\}}; \quad P\{E_{n, m}\} \approx \sum_{k_{0,1}} \dots \sum_{k_{(m-1), m}} \frac{b_{0,1}^{k_{0,1}} \dots b_{(m-1), m}^{k_{(m-1), m}}}{k_{0,1}! \dots k_{(m-1), m}!} \prod_{v=0}^m G_{k_v}(x_{n+v}).$$

Непараметрическая часть оценки представляет собой смесь плотностей вероятности $\theta_n(t_0, \tau)$ распределения длительности выброса τ во временных интервалах $[(t_{n-1} - t_0), (t_n - t_{-1})]$, ($n = 1, 2, \dots$)

$$\delta(t_0, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n(t_0) \cdot \theta_n(t_0, \tau).$$

В качестве параметров сглаживания оценки предложено применять размеры интервалов интерполяции $(t_n - t_{n-1})$ и связность M дискретных отсчетов временного ряда по критерию ковариации ($b_{i,j} \leq \epsilon$, как только $|i - j| > M$). На основе полигауссовской модели конечномерной плотности вероятности СП и разложения интеграла вероятностей в ряд по тетрагорическим функциям получены аналитические выражения для старших членов ряда Райса [16]. Указанные оценки обобщают результаты исследований Датта (J.E. Dutt) и В.И. Тихонова и обеспечивают приемлемые вычислительные затраты для достижения заданной точности расчета распределения длительности выбросов широкого класса негауссовых, нестационарных СП. Приведено сопоставление непараметрической и полупараметрической оценок распределений длительности выбросов по экспериментальным данным (рис. 2).

Полученные результаты позволили решить задачу вычисления вероятности затенений луча случайным профилем негауссовой неоднородной шероховатой поверхностью [17]. В развитие оценок Ф.Г. Басса и И.М. Фукса, представ-

лен анализ случаев слабых, средних и сильных затенений луча неоднородными негауссовыми шероховатыми поверхностями (рис. 3).

В третьей главе получил дальнейшее развитие спектральный метод параметрического моделирования случайных полей [1, 2, 7, 10, 11 - 14], представленный в работах А.С. Шалыгина и Ю.И. Палагина. Размерность данных, с которыми приходится иметь дело, нередко больше двух, а их записи настолько короткие, что стандартное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) не обеспечивает разумного баланса между дисперсией спектральной оценки и ее частотным разрешением. В работе представлена [10, 11] процедура синтеза многомерных цифровых фильтров прямого и обратного линейных прогнозов, функционирующих в двух различных режимах - расширения измеренных данных малого объема и их спектрального оценивания. Результаты ее работы предоставляют надежную информацию для построения модельных полей и оценки их адекватности экспериментальным данным.

Параметрическая модель N - мерного гауссовского поля $z(\vec{V})$ с нулевым средним, единичной дисперсией и спектральной плотностью мощности (СПМ) $\phi_N(\vec{U})$ представлена в виде суммы статистически независимых пространственных гармоник $y_m(\vec{V})$

$$(2) \quad z(\vec{V}) = M^{-1/2} \sum_{m=1}^M y_m(\vec{V}); \quad y_m(\vec{V}) = \sqrt{2} x_m \sin \{ \vec{\Omega}_m^T (\vec{V} + \vec{V}_0) + \pi/4 \},$$

где $\vec{V}$ и $\vec{U}$ - векторы аргументов в пространственной и частотной областях; $\vec{\Omega}_1, \dots, \vec{\Omega}_M$ и $x_1, \dots, x_M$ - выборки совместно независимых M реализаций случайных вектора частот $\vec{\Omega}$ и амплитуды x , полученных из генеральных совокупностей, характеризуемых, соответственно, плотностью вероятности $\phi_N(\vec{U})$ и симметричным распределением Релея; $\vec{V}_0$ - вектор начального смещения. Представлены методики статистического моделирования выборочного спектра и сглаженной периодограммы В.Г. Алексеева. Результатом их работы является выборка $\vec{\Omega}_1, \dots, \vec{\Omega}_M$ и соответствующая процедура цифрового синтеза изображений поля, свободная от ограничений размерности, функционального вида СПМ, способа дискретизации данных и, в значительной степени, от их объема [12].

В рамках модели (2) СПМ $\phi_N(\vec{U})$ предложено аппроксимировать конечной смесью $\phi_N(\vec{U}|\vec{\theta})$ вида (1) из набора типовых спектральных плотностей $\phi_{N,k}(\vec{U}|\vec{\theta}_k)$, заданных с точностью до конечного числа своих параметров $\vec{\theta} = (p_1, \dots, p_K, \vec{a}_1, \dots, \vec{a}_K, B_1, \dots, B_K)$. Каждая спектральная составляющая представлена, в свою очередь, двухкомпонентной смесью $\phi_{N,k}(\vec{U}|\vec{\theta}_k) = \{ \phi_{N,k}(\vec{U}|\vec{\theta}_k^+) + \phi_{N,k}(\vec{U}|\vec{\theta}_k^-) \} / 2$ стандартных СПМ, совпадающих

между собой с точностью до векторов средних пространственных частот $\pm \vec{a}_k$, где параметры $\vec{\theta}_k^+ = (+\vec{a}_k, B_k)$ и $\vec{\theta}_k^- = (-\vec{a}_k, B_k)$ характеризуют положение и масштаб парциальных спектров. Такого рода погружение удобно для описания спектральных свойств анизотропных экспериментальных изображений и их последующего цифрового синтеза, а также позволяет применять эффективный метод рандомизации многомерных распределений, представленный в первой главе. Рассмотрен обширный класс описаний энергетических спектров [7] $\phi_{N,k}(\vec{U}|\vec{\theta}_k) = S_1^{-1} v_{N-1}^{-1} (\det B_k)^{-1/2} \times [f\{D_0^2(\vec{U}|\vec{\theta}_k^+)\} + f\{D_0^2(\vec{U}|\vec{\theta}_k^-)\}]/2$ в метрике Махаланобиса и соответствующий ему *SWM* - алгоритм идентификации параметров спектральной модели [13, 14], *S* - шаг которого предоставляет выборку частот $\vec{\Omega}_1, \dots, \vec{\Omega}_M$ для дальнейшего моделирования поля (2). На рис. 4 и 5 представлены модельное радио-изображение взволнованной поверхности моря и его рандомизированная СПМ.

С помощью пары интегральных преобразований Ганкеля предложены [1, 2] удобные для цифрового моделирования параметрические модели радиального спектра изотропного поля и его ковариационной функции (КФ). Спектр представлен конечной смесью обобщенных распределений модуля *N*-мерного вектора, а КФ соответствующим отрезком ряда Фурье-Бесселя. На рис. 6 и 7 представлены модельное оптическое изображение кустарника и его рандомизированная КФ. Важно отметить, что все представленные в работе модели хорошо согласуются с оценками экспериментальных данных, полученными А.А. Загородниковым, Г.А. Сергеевым и Д.А. Янутшем. Результаты их обработки и параметры соответствующих моделей сведены в базу данных.

В заключение главы предложена методика моделирования негауссовского поля с помощью нелинейного безинерционного преобразования гауссовского поля [1]. Основная проблема такого рода моделирующего алгоритма, связанная с необходимостью получения явной зависимости КФ формирующего и целевого полей, решена методом кумулянтных уравнений А.Н. Малахова.

Четвертая глава посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям индикатрис рассеяния оптического излучения шероховатыми поверхностями. Представлен информационно-измерительный комплекс в составе прецизионной гониофотометрической установки, контрольно-измерительной аппаратуры и сопряженного с ними персонального компьютера. Установка обладает высоким угловым разрешением ($\approx 10'$), позволяет анализировать поляризационные и спектральные свойства отражательных характеристик покрытий целей. Она удовлетворяет всем основным техническим характеристикам такого рода установок, представленных в работах М.М. Гуревича, А.С. Топорца, Н.А. Непогодина, Торенса (К.Е. Torrance), Спароу (Е.М. Sparrow) и Биркебака (R.C. Birkebak). Результаты измерений индикатрис отражения излучения образцами ПП, а также покрытиями наземных, воздушных и косми-



Рис. 4. Радио-изображение моря.

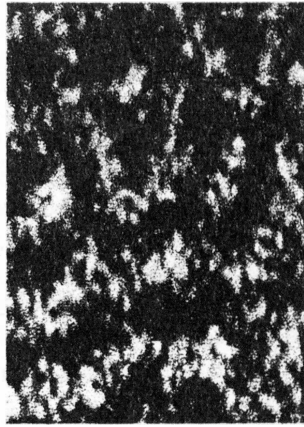


Рис. 6. Поле яркости ольшаника серого.

МОДЕЛЬ КОНЕЧНОЙ СМЕСИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

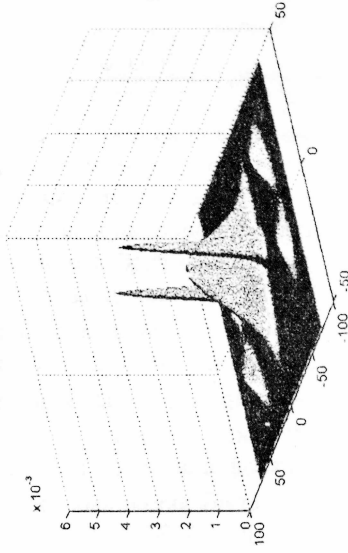


Рис. 5. СПМ радио-изображения моря.

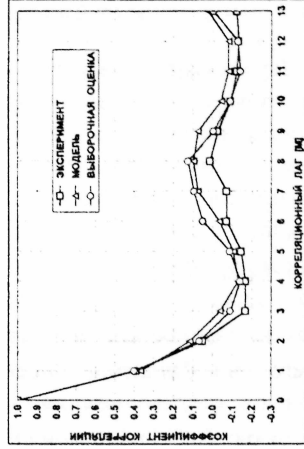


Рис. 7. АКФ поля яркости ольшаника.

ческих объектов в спектральном диапазоне 0,44 - 1,06 мкм позволили обосновать структуру лучевой модели двунаправленного коэффициента яркости дифференциально малого участка поверхности цели

$$(3) \quad r_{\lambda}(\psi, \theta, \varphi) = k_B \frac{k_R^2 \cos \alpha}{1 + (k_R^2 - 1) \cos^2 \alpha} R_0(\gamma) \frac{G(\psi, \theta, \varphi)}{\cos \psi \cos \theta} + k_D.$$

Первое слагаемое в этой модели описывает (в приближении Бугера) рассеяние излучения на совокупности микро-площадок шероховатой поверхности, нормали которых случайно ориентированы в пространстве. Функция распределения микро-площадей по направлениям аппроксимирована эллипсоидом вращения, степень сжатия которого относительно глобальной нормали к макроплоскости управляется параметром k_R . Поляризационные свойства отраженного излучения учитываются относительным коэффициентом отражения микроплощадки $R_0(\gamma)$, выраженным, в свою очередь, через амплитудные коэффициенты отражения Френеля для s- и p- поляризационных компонент падающего поля. Затенение и маскировку лучей микро-гранями при больших углах падения ψ и наблюдения (θ, φ) учитывает коэффициент ослабления потока $G(\psi, \theta, \varphi)$ равный совместной вероятности отсутствия указанных событий [17]. Здесь используются оценки, полученные в третьей главе диссертации.

Второе слагаемое в модели коэффициента яркости учитывает (в приближении Ламберта) перенос излучения и его рассеяние в приповерхностном слое покрытия. Такая двухкомпонентная модель направленной и диффузной составляющих коэффициента яркости, прежде всего, учитывает все закономерности трансформации пространственной индикатрисы, наблюдаемые в эксперименте при изменении углов ψ, θ, φ . Это, в свою очередь, позволило методами нелинейного программирования оптимизировать параметры модели k_B, k_D, k_R по данным измерений во всем диапазоне углов падения и наблюдения. Представлена методика выбора физически обоснованных начальных приближений параметров $k_B^{(0)}, k_D^{(0)}, k_R^{(0)}$, а также двухшаговая процедура поиска глобального минимума среднеквадратичной ошибки методом Дэвидона - Флетчера - Пауэла. Результаты эксперимента и оптимизации параметров модели (3) сведены в базу данных.

В заключение главы предложена параметрическая модель направленной спектральной степени черноты образца покрытия

$$\varepsilon_{\lambda}(T_s, \theta, \varphi) = \varepsilon_{\lambda 0}(T_s) \cdot \rho(\theta, \varphi); \quad \rho(\theta, \varphi) = \left\{ k_D + (1 - k_D) k_R^2 \cos \theta / \left[1 - (1 - k_R^2) \cos^2 \theta \right] \right\}.$$

Сомножитель $\rho(\theta, \varphi)$ учитывает распределение радиационных свойств по направлениям наблюдения (θ, φ) и в большей степени определяется шероховатостью и состоянием поверхности вещества. Сомножитель $\varepsilon_{\lambda 0}(T_s)$ учитывает спектральную и температурную зависимость степени черноты в направлении

нормали идеально гладкой поверхности вещества. На основании двухпоточного приближения теории рассеяния света в сильно мутных средах Гуревича - Кубелки - Мунка представлен теоретический анализ зависимости $\varepsilon_{\lambda 0}(T_s)$ от оптических показателей (преломления, поглощения, рассеяния) вещества. Спектральную и температурную зависимости оптических постоянных, в свою очередь, описывает мультипереносная модель Робертса (S. Roberts).

В пятой главе представлена система геометрического моделирования цели со сложной пространственной конфигурацией [6]. В отличие от известных систем геометрического моделирования (AUTOCAD, BECAD, CATIA, Pro/ENGINEER, 3D STUDIO MAX), данная система в большей степени удовлетворяет специфическим требованиям, предъявляемым задачами цифрового моделирования оптических и радиолокационных полей рассеяния антропогенных объектов. Эти требования связаны, прежде всего, с ограничениями оперативной памяти, резервируемой для хранения геометрического образа и времени его обработки в соответствии с основными процедурами быстрых топологических преобразований. Кроме того, система должна формировать удобный геометрический базис для идентификации положения "ярких" областей на поверхности цели, а также генерации адаптивных сеток численного интегрирования источников дифракционных полей рассеяния на гладкой части объекта, его острыми гранями и переотражающими вогнутыми структурами.

В системе реализован способ конструктивно - геометрического моделирования (КГМ) твердых тел, основанный на конечном множестве примитивов и конструкторе - бинарном дереве построения модели из примитивов с использованием теоретико-множественных операций. Множество примитивов включает в себя базовые пространственные элементы (БПЭ) трех типов. Первые два типа БПЭ - суть участки плоскостей. Плоские БПЭ первого типа ограничены выпуклыми многоугольниками с числом вершин не более пяти. Второй тип плоских БПЭ включает в качестве одной (или только одной) из сторон ограничивающего контура кривую второго порядка. Третий тип БПЭ - суть участки поверхностей второго порядка, проекции которых на одну из координатных плоскостей системы главных осей ограничены выпуклыми четырехугольниками. Каждый БПЭ модели может находиться в двух состояниях - реальном и экранирующем. В первом случае элемент описывает действительный участок поверхности цели, во втором - изымает участок поверхности, формируя, таким образом, на объекте выемки (отверстия) сложной конфигурации.

Принцип граничного представления (ГП) в системе реализован в виде явного математического описания множества БПЭ модели, связанных отношениями инцидентности в определенный граф смежности. Переход от КГМ к ГП трехмерного объекта осуществляется с помощью библиотеки геометрического моделирования. Ее процедуры и процедуры-функции (написанные на языке высокого уровня C/C++ или FORTRAN) выполняют все необходимые

топологические преобразования над БПЭ. В итоге у разработчика имеется возможность программировать геометрическую модель цели на языке высокого уровня. Результатом компиляции, компоновки и выполнения соответствующего программного модуля является текстовый файл, формат записей которого содержит параметры модели. Помимо библиотеки геометрического моделирования ПО системы включает в себя набор алгоритмов анализа затенений - маскировки точек на поверхности объекта локации, поиска и идентификации параметров геометрических мест точек в виде действительных ребер, вершин и многогранных вогнутых структур цели, а также ее визуализации с любого наперед заданного ракурса [6]. Последнее позволяет разработчику в интерактивном режиме добавлять или удалять БПЭ модели и корректировать их параметры. Результаты проектирования геометрических образов наземных, воздушных и космических объектов локации сведены в базу данных.

В шестой главе представлены методики, алгоритмы и результаты цифрового моделирования переходных характеристик (ПХ) объектов, а также эффективной площади рассеяния (ЭПР) и интегрального коэффициента яркости (ИКЯ) целей соответственно в одно- и двухпозиционных оптических и радиолокационных системах. Под ПХ обычно понимают сигнал, отраженный объектом при его облучении функцией Хевисайда. Эта характеристика содержит информацию об энергетических свойствах цели, ее размерах и форме и поэтому весьма полезна для решения задач заметности и классификации объектов.

В приближении геометрической оптики, для случая некогерентного приема получены интегральные представления ПХ в виде поверхностных интегралов по облучаемой и наблюдаемой части поверхности цели, а также их преобразования к двойным интегралам от двумерной функции яркости объекта в пределах его проекции на картинную плоскость (плоскость, перпендикулярную линии визирования цель - излучатель). Численные оценки этих интегралов реализуют соответствующие методики поэтапных расчетов. Первые два этапа связаны с необходимостью определения параметров модели геометрического образа объекта и коэффициента яркости элемента его поверхности. Здесь применяются результаты, полученные в двух предшествующих главах диссертации. Для двухпозиционной системы, в которой зондирующий луч захватывает участки ПП, предложена аддитивно - мультипликативная модель ПП в виде плоскости со случайным по ее координатам коэффициентом яркости. Здесь применяются модели случайных полей, представленные в третьей главе диссертации. В качестве примеров на рис. 8 и 9 представлены синтезированные изображения объектов МИГ-23 и Space Shuttle на случайных изотропных фонах. Третий расчетный этап связан с реализацией кубатурных процедур численного интегрирования двумерных функций яркости целей. Для однопозиционной системы предложен адаптивный алгоритм численного интегрирования, реализующий кубатурную формулу Симпсона. На основе стратегии



Рис. 8. МИГ-23.

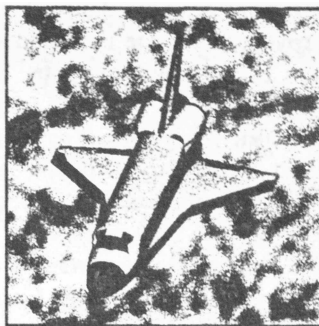
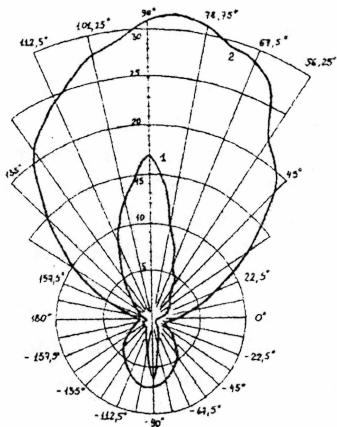
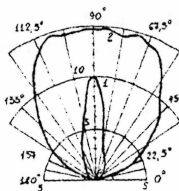


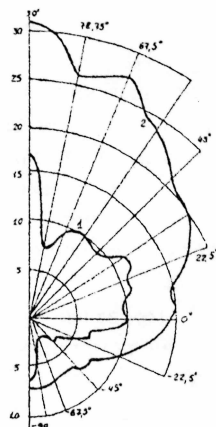
Рис. 9. Space Shuttle.



а) тангаж



б) курс



в) крен

Рис. 10. Сечения пространственной диаграммы ЭПР Space Shuttle.

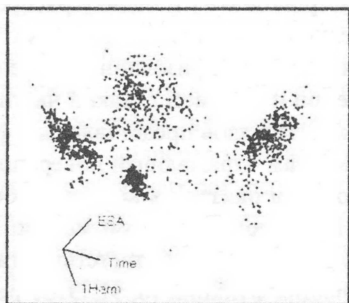


Рис. 11. Кластеры объектов.

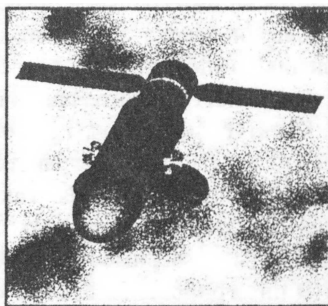


Рис. 12. Lasr.

половинного деления Варнока алгоритм синтезирует сетку с переменным шагом, грубую там, где двумерная функция яркости цели изменяется плавно и мелкую в противном случае. Это позволяет идентифицировать положение "ярких" локальных областей на поверхности объекта с минимальными вычислительными затратами. Получены критерии сходимости алгоритма, что обеспечивает возможность пошагового контроля абсолютной и относительной точности интегрирования. Представлены результаты тестирования адаптивного алгоритма по результатам аналитических оценок ЭПР простейших объектов в виде сферы, цилиндра и конуса. Для двухпозиционной системы реализована кубатурная формула Симпсона с фиксированным шагом. Важно отметить, что применение именно параметрических моделей случайных полей позволило в этом случае эффективно применить алгоритмы численного интегрирования поля яркости ПП.

Получены выражения и проведены исследования временных профилей ЭПР и ИКЯ целей при их облучении короткими импульсами. Рассмотрен приближенный интегральный метод анализа такого рода характеристик заметности, при котором сложные по форме отраженные импульсы заменяются эквивалентными (по критериям равенства площадей и энергий сигналов) прямоугольными, параметры которых - суть обобщенные амплитуда и длительность. На рис. 10 представлены сечения пространственной диаграммы ЭПР транспортного корабля Space Shuttle при его импульсном (1) и стационарном (2) облучении.

Проведен теоретический анализ полей рассеяния (ПР) коротких радиоволн антропогенными объектами локации. На основе применения асимптотических методов ФТД предложена модель радиолокационных характеристик (РЛХ) в виде когерентной композиции ПР пространственно распределенных вторичных источников излучения. Ее три основные аддитивные компоненты - суть поля, рассеянные гладкой частью, острыми кромками и двугранными вогнутыми структурами (ДВС) цели. Описание первой составляющей модели опирается на интегральное представление Стреттона-Чу и оценку распределения поверхностного тока методом касательной плоскости. Получено представление компонент поля в апертуре линейно - поляризованной антенны в виде поверхностных интегралов по облучаемой и видимой гладкой части объекта. Кубатурные формулы для оценки этих интегралов представлены в форме двумерного ДПФ по пространственным частотам отражающей поверхности в узлах сетки интегрирования. Такого рода оценки оказались весьма удобными при расчете полей, рассеянных плоскими БПЭ геометрической модели цели. Предложены двумерные кубатурные формулы Филона и соответствующий алгоритм интегрирования быстро осциллирующих функций [8, 9]. Этот результат позволил уточнить выражения для коэффициентов ДПФ в случае квадратичных БПЭ.

Компонента поля, рассеянного острыми кромками представлена в виде суперпозиции парциальных краевых волн, формируемых локально - линейными участками ребер цели. Получена расчетная формула, связывающая оценку напряженности парциальной краевой волны с угловыми функциями ракурса и токами локального возбуждения. Последние удобно определять через коэффициенты дифракции в форме Уфимцева для однопозиционных систем.

Компонента поля, многократно рассеянного ДВС основана на интегральном представлении Фукса, а именно, его конкретной реализации в форме метода эквивалентных синфазных апертур для случая учета лишь двукратных переломлений.

В седьмой главе представлены методики, алгоритмы и результаты имитационного моделирования изображений целей и реализаций сигналов в одно- и двухпозиционных локационных системах в процессе их наведения на объект.

В первой части главы представлена методика цифрового моделирования радио-изображений трехмерных антропогенных шероховатых объектов в радиолокационной станции с синтезированной апертурой (РСА). Теоретический анализ корреляционно-спектральных свойств поля, рассеянного шероховатой поверхностью с малыми пологими неровностями проведен в приближении теории резонансного рассеяния. Получено интегральное представление для составляющих поля возмущения в любой точке пространства. Показано, что компоненты поля пропорциональны спектральным отсчетам поля белого шума в фиксированной точке частотного пространства. Радиус-вектор пространственной частоты этого спектрального отсчета равен проекции суммарного волнового вектора на среднюю плоскость шероховатой поверхности. В результате получены аналитические выражения для корреляционной матрицы поля возмущения в единицах ЭПР элемента поверхности [18]. Оценка некогерентной составляющей интенсивности выходного сигнала РСА представлена в инвариантной интегральной форме для заданных состояний поляризации приемной и передающей антенн. Описание когерентной составляющей поля рассеяния цели основано на цифровых моделях, представленных в шестой главе. В мало-угловом приближении предложены кубатурные формулы для оценки интегралов от быстро осциллирующих функций и соответствующая им процедура цифрового синтеза радио-изображения цели [19].

Рассмотрена задача синтеза оптического изображения трехмерного объекта с любого наперед заданного ракурса по набору (как правило малому) его снимков с заданных ракурсов при условии, что геометрический образ цели априори известен. Эта обратная задача решена методами реконструктивной вычислительной томографии на основе двухшаговой вычислительной процедуры. Ее первый этап реализован в виде системы уравнений энергетического баланса (СУЭБ), устанавливающей зависимости ракурсных изображений объекта от его оптических параметров. Второй этап связан с построением эффек-

тивных вычислительных алгоритмов восстановления оптических параметров цели на основе решения СУЭБ. Он приведен в восьмой главе диссертации. Модель изображения в ИК- спектральном диапазоне получена в приближении диффузных отражателей, равно как и диффузных и серых излучателей элементов поверхности цели. Эти допущения позволили объединить отраженное и собственное излучение в одно эффективное излучение и получить СУЭБ методом сальдо в линеаризованной форме по оптическим параметрам.

Во второй части главы рассмотрены решения (типичных для имитационного подхода) задач цифрового моделирования относительного сближения с целью и прохождения отраженных импульсов через фотоприемное устройство (ФПУ) оптической локационной системы.

Для однопозиционной лазерной локационной системы получено интегральное представление амплитуд последовательностей отраженных импульсов в каналах приемного тракта изделия при его пролете вблизи цели. Рассмотрена методология преобразования поверхностных интегралов по облучаемой поверхности объекта к двойным в локальном базисе лучевой системы координат, образованного меридианальной и сигитальной плоскостями фиксированного сектора излучения. Соответствующие кубатурные формулы Симпсона, реализующие оценки указанных интегралов, позволяют рассчитывать ансамбль реализаций отраженных импульсов для различных условий встречи и, таким образом, анализировать эффективность функционирования лазерной системы расчетными методами.

С учетом динамических ошибок слежения за целью получены интегральные представления временного профиля импульсного ИКЯ объекта на входе ФПУ оптического дальномера. Рассмотрена пошаговая цифровая процедура формирования и анализа прохождения отраженного импульса по приемному тракту системы. Эта процедура позволяет расчетными методами исследовать точностные характеристики дальномера.

В терминах временного профиля ИКЯ объекта также предложена пошаговая процедура цифрового моделирования последовательности отраженных импульсов в двухпозиционной оптической системе наведения. Особенностью этой процедуры является учет вклада ПП в отраженный сигнал при частичном попадании зондирующего луча на цель.

Важно отметить, что основным результатом практического применения представленных в шестой и седьмой главах методик, алгоритмов и ПО явился обширный статистический материал относительно характеристик заметности целей, а также реализаций сигналов и изображений в оптических и радиолокационных системах различного назначения. Такого рода информация явилась надежной основой для построения статистических моделей реального времени перечисленных выше характеристик.

Восьмая глава посвящена цифровым моделям реального времени характеристик отражения зондирующего излучения в системах оптической локации. Методами теории функций случайных аргументов исследованы временной профиль $\tilde{h}(\tau) = \langle h(\tau|\alpha, \beta) \rangle$ и автокорреляционная функция (АКФ) $R(\tau_1, \tau_2) = \langle h(\tau_1|\alpha, \beta) \cdot h(\tau_2|\alpha, \beta) \rangle$ нормированной ПХ $h(\tau|\alpha, \beta)$, усредненные по распределению вероятности $W(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$ ракурсов объекта (α, β) в однопозиционной системе. Также анализировались средние, дисперсии, асимметрии и эксцессы пространственных диаграмм ЭПР $A(\alpha, \beta)$ и размера $T(\alpha, \beta)$ цели. Проблема сводится к четырехкратному интегрированию в гиперкубе (y, z, α, β) сначала двумерной функции яркости по координатам (y, z) проекции цели на картинную плоскость, а затем по вероятным ракурсам (α, β) . Эта не тривиальная задача решена последовательным применением адаптивных кубатурных алгоритмов, рассмотренных в шестой главе.

Методом главных компонент получен оптимальный ортонормированный базис разложения $\tilde{h}(\tau|\alpha, \beta) = \varphi_1(\tau)x_1(\alpha, \beta) + \dots + \varphi_M(\tau)x_M(\alpha, \beta)$ ПХ в ряд по их собственным временным функциям $\varphi_1(\tau), \dots, \varphi_M(\tau)$. Последние инвариантны к ракурсам (α, β) и содержат информацию о форме объектов. Ее количественным выражением является небольшой набор ($M \leq 10$) пространственных диаграмм $x_1(\alpha, \beta), \dots, x_M(\alpha, \beta)$ или гармоник указанного ряда. Применение релаксационных методов решения систем линейных неравенств (СЛН) позволило получить оптимальные оценки гармоник разложения Карунена - Лоева с учетом специфики поведения ПХ (не убывающая функция). Важно отметить, что в силу линейности модели $\tilde{h}(\tau|\alpha, \beta)$ СЛН, как правило, не совместна. Поэтому предложение реализовать компромиссное решение, параметром релаксации которого является абсолютная ошибка аппроксимации $\epsilon = |\tilde{h}(\tau|\alpha, \beta) - h(\tau|\alpha, \beta)|$ (возможно фрактальной) временной функции $h(\tau|\alpha, \beta)$, является принципиально важным. В итоге получено оригинальное решение трех задач синтеза и анализа однопозиционных систем: сжатия информации и компактного хранения в базе данных результатов цифрового моделирования ПХ, расчета их временных профилей в режиме реального времени и, наконец, формирования признакового пространства, содержащего информацию об энергетических свойствах цели, ее размерах и форме. В качестве примера на рис. 11 представлены не перекрывающиеся кластеры космических объектов Space Shuttle и Lasp в простейшем трехмерном пространстве признаков: $A(\alpha, \beta)$, $T(\alpha, \beta)$ и $x_1(\alpha, \beta)$. Синтезированное изображение объекта Lasp представлено на рис. 12.

Анализ коэффициентов асимметрии γ_3 и эксцесса γ_4 распределений ЭПР и ИКЯ различных типов космических, воздушных и наземных объектов выявил устойчивую статистику поведения параметров Пирсона $\beta_1 = \gamma_3^2$ и $\beta_2 = \gamma_4 + 3$ в

одно- и двухпозиционных системах, а именно $\beta_1 + 1 \leq \beta_2 \leq 6 + 3\beta_1/2$. Этот факт свидетельствует о близости плотности вероятности ЭПР и ИКЯ к классу бета-распределений, что позволяет предложить в качестве унифицированной статистической модели обобщенных амплитуд временных профилей импульсных ЭПР и ИКЯ целей систему модифицированных бета-распределений $F_A(a) = F_B\{\varphi[(a - A_{\min})/(A_{\max} - A_{\min})]\}$. Здесь $\varphi(u)$, $0 \leq u \leq 1$ - дифференцируемая, неубывающая формирующая функция, реализующая, по сути, нелинейное преобразование стандартного бета-распределения $F_B(u)$ в распределение соответствующей характеристики заметности цели. Представлена методика оценки параметров стандартного распределения $F_B(u)$ и построения интерполяционного приближения формирующей функции.

Методами цифрового моделирования исследовались статистики обобщенных амплитуды $a_{\alpha_s}(\alpha, \beta)$ и длительности $t_{\alpha_s}(\alpha, \beta)$ временного профиля импульсной ЭПР широкого класса целей в однопозиционной системе. Система распределений обобщенной амплитуды временного профиля импульсной ЭПР аэрокосмического корабля Space Shuttle для длительностей зондирующего импульса $t_s = 10; 50$ и 200 нс приведена на рис. 13. Представлены нелинейные регрессионные зависимости такого рода статистик от длительности зондирующего импульса t_s . Эти результаты позволили, в свою очередь, предложить интегральную модель реального времени импульсной ЭПР объекта локации в виде ковариационного приближения двумерной функции распределения обобщенной амплитуды импульсной ЭПР и ее значения для стационарных условий облучения цели

$$F_2^{(2)}(a, A | t_s) = \sum_{n=0}^N \frac{\rho_{AA}^n(t_s)}{n!} \left(\frac{d^n}{da^n} F_B^{(a)}\{\varphi(u_a)\} | t_s \right) \left(\frac{d^n}{dA^n} F_B^{(A)}\{\varphi(u_A)\} \right); \quad \tau = \frac{A}{a} \cdot \int_0^{t_s} i_s(t) dt.$$

Здесь $u_a = \{a - a_{\min}(t_s)\} / \{a_{\max}(t_s) - a_{\min}(t_s)\}$ и $u_A = \{A - A_{\min}\} / \{A_{\max} - A_{\min}\}$ - нормированные аргументы, а τ и $i_s(t)$ - обобщенная длительность импульсной ЭПР и временной профиль зондирующего импульса.

Проведено теоретическое исследование статистик временного профиля импульсного ИКЯ цели на выходе ФПУ оптического дальномера. В результате усреднения по динамическим ошибкам слежения за объектом получены аналитические выражения среднего импульса и его АКФ в виде отрезков ряда Фурье-Бесселя, коэффициентами которого являются модифицированные импульсные ЭПР, приведенные к выходу ФПУ. Последующее усреднение этих выражений по вероятным ракурсам цели с помощью адаптивных кубатурных алгоритмов позволило получить окончательные оценки среднего импульса и его АКФ. Такого рода статистики явились исходными для построения моделей реального времени импульса на выходе ФПУ методом канонических разложений В.С. Пугачева.

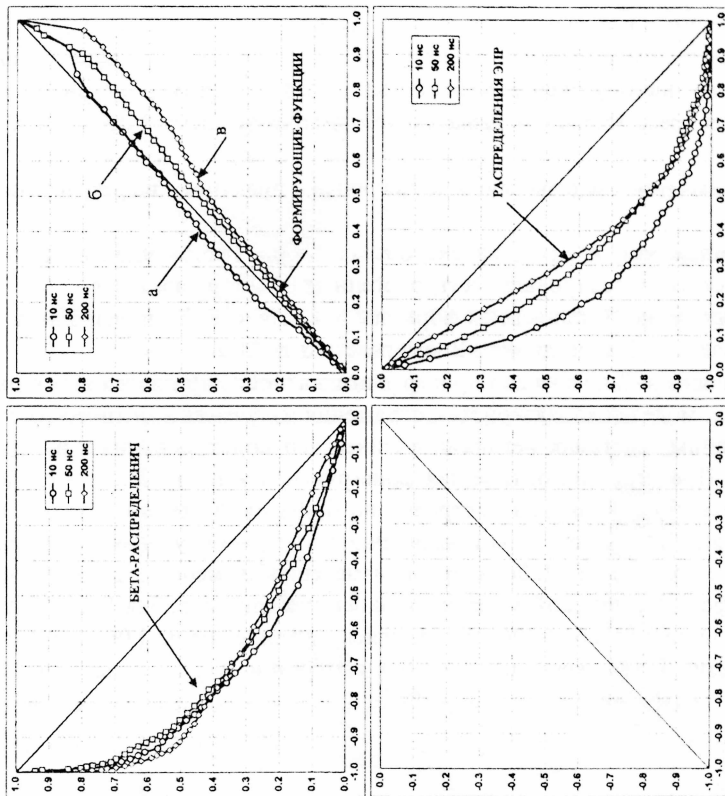


Рис. 13. Система распределений обобщенной амплитуды
ЭПР Space Shuttle: а) - 10 нс; б) - 50 нс; в) - 200 нс.

Методом статистического моделирования проведено исследование среднего, дисперсии, асимметрии и эксцесса амплитуд импульсных ИКЯ, а также их АКФ в двухпозиционной оптической системе наведения. Показано, что с учетом влияния ПП распределение амплитуды импульсного ИКЯ хорошо описывается модифицированным бета-распределением, а интервал корреляции амплитуд определяется, в основном, интервалом корреляции ошибок слежения за объектом.

В заключение главы предложен эффективный итерационный алгоритм решения СУЭБ. Он реализует метод последовательного учета столбцов Сенсора (Y. Sensor) и позволяет синтезировать изображение цели в излучательном или отражательном диапазонах спектра для любого наперед заданного ракурса по малому набору экспериментальных снимков. Пример реконструкции изображения Space Shuttle в отражательном диапазоне спектра представлен на рис. 14.

В заключение сведены основные научные и практические результаты исследования.

В приложении А представлена объектно-ориентированная библиотека геометрического моделирования антропогенных объектов локации.

В приложении Б приведены формулы для вычисления производных системы распределений характеристик заметности целей.

Приложение В посвящено проверке адекватности предложенных в работе цифровых моделей характеристик отражения излучения в оптических и радиолокационных системах методами физического моделирования и натурных измерений. Представлена оптическая сканирующая установка для исследования ПХ объектов. Установка построена по безбазовой схеме и обеспечивает наличие равносигнальной зоны и идентичность углов облучения и приема по сравнению с локатором. Лабораторные измерения двумерных функций яркости и ПХ фотометрической модели аэрокосмического корабля Space Shuttle, выполненной в масштабе 1:100, проводились на длине волны 1,06 мкм. Сопоставление результатов экспериментальных измерений $A_{\text{ЭКСП}}$ и расчетных значений $A_{\text{РАС}}$ ЭПР корабля в плоскостях тангажа и курса показало их хорошую корреляцию. Невязка $100\% \cdot |A_{\text{ЭКС}} - A_{\text{РАС}}| / \sqrt{A_{\text{ЭКС}} \cdot A_{\text{РАС}}}$ не превышала 7% во всех случаях.

Дифференциальным способом также проводились натурные измерения ЭПР самолета МИГ-23 на длине волны 1,06 мкм в горизонтальной плоскости. Телескопическая насадка, установленная на выходном окне дальномера, позволяла регулировать расходимость луча лазера в диапазоне от 2,5 до 180 угловых минут и формировать на объекте пятно подсвета необходимого размера. Сканирование осуществлялось с помощью угломерного устройства наведения луча на цель. Измерения диаграмм обратного рассеяния (ДОР) прово-

Координаты точки наблюдения	-634.15	631.18	632.22
Координаты центра картинной пл-ти ...	-1.63	-1.33	-.29
Alpha, Beta, Gamma	-135.80	35.26	.00
Дальность и смещение центра	1895.55	-1.36	-1.63
1Помощь 2Вх/Вык 3Грубо 4Тонко 5Контур 6М.Крем 7Сдвиг 8Ракурс 9Сохранить 10Выход			

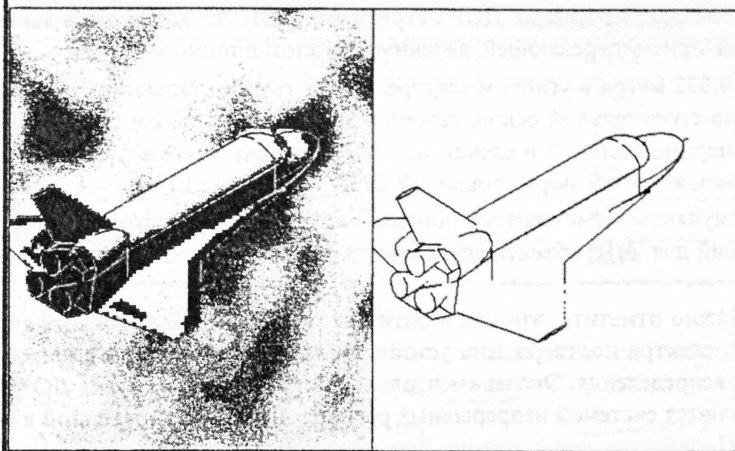


Рис. 14.а. Снимок Space Shuttle (вид сзади - сбоку) и совмещенная с ним модель геометрического образа.

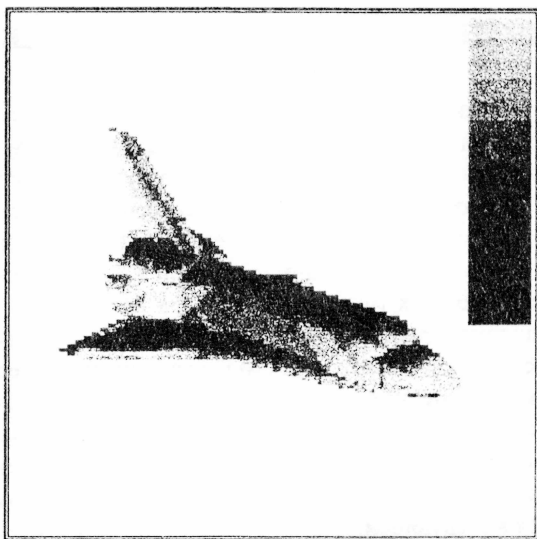


Рис. 14.б. Реконструированное изображение (инвертировано) объекта Space Shuttle.

дильсь методом сравнения с плоским диффузным эталоном. Сопоставление результатов натурных измерений и расчетных значений ЭПР истребителя в плоскости курса показали, что их относительная невязка не превышала 12%.

На поворотном круге радиолокационного полигона проводились стандартизованные измерения ДОР истребителя МИГ-23 для вертикальной поляризации приемопередающей антенны однопозиционного локатора на длине волны 0,032 метра в угловом секторе $\pm 60^\circ$ в горизонтальной плоскости относительно строительной оси со стороны носа. В качестве критериев адекватности экспериментальных и расчетных ДОР анализировались функции распределения вероятностей нормированной ЭПР $u = (a - A_{\min}) / (A_{\max} - A_{\min})$ самолета и их кумулянты до четвертого порядка включительно. Расхождение средних и дисперсий для ЭПР объекта составляет 3.6 дБ и 6 дБ соответственно (таблица 1).

Важно отметить, что как в оптическом, так и в радиолокационном диапазонах спектра подтверждена устойчивость статистики модифицированного бета - распределения. Экспериментальные и расчетные значения ДОР хорошо описываются системой непрерывных распределений, рассмотренной в восьмой главе. Параметры стандартного бета- распределения $F_\beta(u)$ и формирующая функция $\phi(u)$ демонстрируют расхождения для измеренных и расчетных данных в пределах погрешностей эксперимента (рис. 15).

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

На основе многолетних экспериментальных и теоретических исследований решена важная научно-техническая проблема разработки целостной теории цифрового моделирования полей рассеяния электромагнитных волн оптического и радио диапазонов спектра на объектах сложной электрофизической структуры и формы, учитывающих распределенный характер отражающих свойств целей в ближней зоне. Сформулирована и практически реализована методология имитационных моделей сигналов в автономных информационных системах ближнего действия. Логически связанная последовательность новых теоретических и вычислительных методов учитывает жесткие ограничения малых объемов экспериментальных данных, нестационарности входных воздействий и негауссовского характера распределений сигналов. Разработаны перспективные направления и методы решения задач снижения заметности целей, а также синтеза и анализа систем нового поколения. Основные результаты заключаются в следующем:

- Предложен метод рандомизации многомерных распределений. Реализующий его алгоритм обучения без поощрения демонстрирует улучшенные свойства сходимости для малых объемов обучающей выборки, малых меж-

Таблица 1.

Моменты и параметры распределения нормированной
ЭПР самолета МИГ-23.

Статистики	Расчет	Эксперимент
m_U	0.09338	0.112
σ_U	0.11759	0.0457
γ_{3A}	1.94	1.97
γ_{4A}	3.76	4.01
g_{A1}	-0.481	-0.078
g_{A2}	1.657	1.604

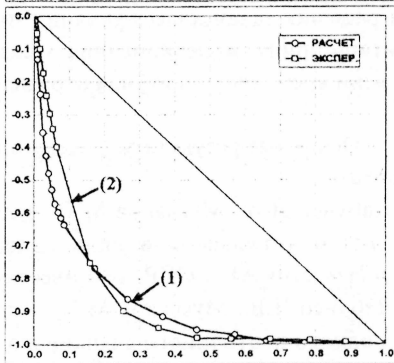
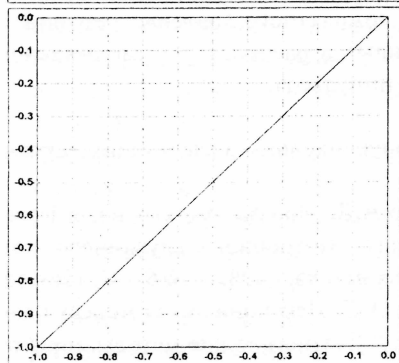
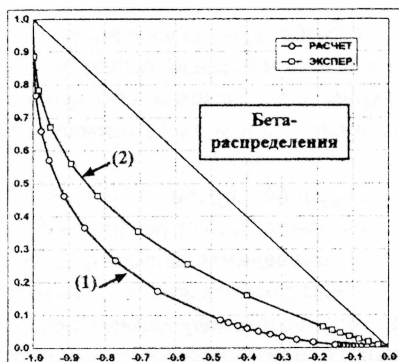


Рис. 15. Распределение нормированной ЭПР самолета МИГ-23
в горизонтальной плоскости: (1) - расчет; (2) - эксперимент.

классовых расстояний и вырожденных распределений.

- Разработан интерполяционный метод оценки характеристик выбросов нестационарных, негауссовых СП. Представлено решение задачи расчета вероятностей затенений и маскировки лучей микро-гранями шероховатой поверхности во всем диапазоне возможных углов падения и наблюдения.

- Развита теория параметрического моделирования многомерных одно-родных случайных полей с корреляционно - спектральными свойствами общего вида. Предложены рандомизированные модели энергетических спектров изотропных и анизотропных данных и отвечающие им алгоритмы цифрового синтеза изображений фонов и ПП. Алгоритмы свободны от упрощающих допущений относительно функционального вида энергетического спектра, способ дискретизации поля и объема экспериментальных данных.

- Разработан аппаратно - программный комплекс имитационного цифрового моделирования характеристик заметности и изображений целей, а также реализаций сигналов одно- и двухпозиционных оптических и радиолокационных системах. Комплекс гарантирует требуемую адекватность получаемых данных и заменяет дорогостоящие полигонные измерения, универсальным и гибким вычислительным экспериментом. Решена совокупность важных научно-технических задач цифрового синтеза и анализа оптических и радиолокационных систем.

- Разработан программный комплекс цифровой обработки результатов имитационного моделирования характеристик заметности и реализаций сигналов локационных систем. Предложена унифицированная система распределений характеристик заметности широкого класса космических, воздушных и наземных объектов при их стационарном и импульсном облучении. Представлена методология построения информативного признакового пространства для решения задач классификации целей, компактного хранения результатов имитационного моделирования в базе данных и расчета в режиме реального времени временного профиля отраженных импульсов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных работах:

1. Лабунец Л.В., Мусьяков М.П., Решетко А.Д. Модель входных воздействий систем управления в виде однородного изотропного случайного поля // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. - 1985. - № 6. - С. 156-165.
2. Лабунец Л.В., Мусьяков М.П., Решетко А.Д. Неканоническая модель однородного изотропного случайного поля // Статистические методы обработки сигналов и их практические применения: Тез. докл. девятого выездного Всесоюзного семинара, г. Туапсе, 17-18 октября 1985 г. - Харьков, 1985. - С. 94-95.

3. Лабунец Л.В. Распределение длительности выбросов нестационарного нормального случайного процесса // Радиотехника. - 1985. - № 11. - С. 47-50.
4. Лабунец Л.В. Оценка распределения длительности выбросов одного класса негауссовских случайных процессов // Радиотехника. - 1986. - № 9. - С. 64-67.
5. Лабунец Л.В. Корреляционное приближение многомерных вероятностных распределений // Труды МВТУ. - 1987.- Вып. 493 - Вопросы проектирования кибернетических устройств. - С. 3-12.
6. Лабунец Л.В., Решетко А.Д. Программа для разработки и отображения геометрической модели внешней поверхности цели // Справочно-информационный бюллетень об алгоритмах и программах САПР: Информационный фонд ОФАП САПР Министерства машиностроения. - 1988. - Вып. 36. (Программа № 17208 СТУ).
7. Лабунец Л.В., Мусьяков М.П. Параметрическая модель однородных анизотропных случайных полей // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. - 1988. - № 3. - С. 191-199.
8. Лабунец Л.В., Борзов А.Б., Решетко А.Д. Адаптивный алгоритм вычисления двумерных интегралов Фурье по произвольной области // Тез. докл. Всесоюзной 20 (юбилейной) конф. МВТУ. - М., 1988. - С. 85.
9. Лабунец Л.В., Борзов А.Б., Решетко А.Д. Кубатурная формула Филона вычисления осциллирующих интегралов // Электронное моделирование. - 1989. - Т. 11, № 2. - С. 102-104.
10. Лабунец Л.В. Моделирование случайного поля методом прямого и обратного линейного предсказания // Электронное моделирование. - 1989. - Т. 11, № 6. - С. 98-100.
11. Лабунец Л.В. Параметрическая модель однородных анизотропных случайных полей // Тез. докл. Всесоюзной 23 конф. МГТУ. - М., 1990. - С. 5-6.
12. Лабунец Л.В. Параметрическое моделирование однородных случайных полей, измеренных на дискретном растре // Электронное моделирование. - 1991. - Т. 13, № 3. - С. 10-13.
13. Лабунец Л.В., Шахтарин Б.И. Цифровое моделирование однородных случайных полей с заданными корреляционно-спектральными свойствами // Научно техническое обеспечение деятельности спецслужб: Тез. докл. третьей межведомственной конференции. - М., 2000. - С. 213-215.
14. Лабунец Л.В., Шахтарин Б.И. Цифровое моделирование однородных случайных полей с заданными корреляционно-спектральными свойствами // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. - 2000. - № 24. - С. 28-37.

15. Лабунец Л.В. Рандомизация многомерных распределений в метрике Махаланобиса // Радиотехника и электроника. - 2000. - Т. 45, № 10. - С. 1214-1225.
16. Лабунец Л.В. Интерполяционное приближение распределения длительности выбросов случайного процесса // Радиотехника и электроника. - 2000. - Т. 45, № 12. - С. 1459-1469.
17. Лабунец Л.В. Интерполяционное приближение вероятности затенений луча шероховатой поверхностью // Радиотехника и электроника. - 2001. - Т. 46, № 4. - С. 464-470.
18. Лабунец Л.В., Решетко А.Д. Корреляционно-спектральные характеристики поля, рассеянного шероховатой поверхностью в приближении метода малых возмущений // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. - 2001. - № 39. - С. 55-64.
19. Лабунец Л.В., Решетко А.Д. Цифровое моделирование радиоизображений объектов локации с шероховатой поверхностью // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. - 2001. - № 39. - С. 45-54.