

На правах рукописи



Бородин Михаил Анатольевич

**АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ
ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ЗНАКОВ НАВИГАЦИОННОГО
ОГРАЖДЕНИЯ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ТРЕНАЖЕРЕ**

Специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Леонтьев Виктор Валентинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Бескид Павел Павлович

кандидат технических наук, доцент Ефимов Виктор Владимирович

Ведущая организация: ФГУП "ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова", г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «___» 2011 г. в _____ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций **Д.212.238.03** в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В целях повышения безопасности мореплавания Международной морской организацией (ММО) предприняты активные организационные меры, в числе которых широкое оснащение судов средствами радиолокационной техники, организация специального обучения судоводителей на тренажерных комплексах. В соответствии с требованиями Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС – 74) штурманский состав, капитаны и лоцманы судов должны проходить обучение на тренажерных комплексах.

Одним из основных элементов тренажерных комплексов является радиолокационный тренажер (РЛТ), имитирующий работу и органы управления судовой радиолокационной станции (РЛС) и системы автоматической радиолокационной прокладки (САРП).

Важным аспектом работы судовой РЛС для обеспечения безопасности плавания является обнаружение знаков навигационного ограждения (ЗНО). Требования к судовой навигационной РЛС по обнаружению ЗНО регламентируются в нормативных документах ММО. В соответствии с требованиями ММО ставится задача моделирования радиолокационных сцен, соответствующих акваториям реальных проливов, портов и т.д. Это требует разработки новых математических моделей, устанавливающих взаимосвязь между параметрами РЛС, объектами радиолокационных сцен и условиями их наблюдения.

Для выполнения имитации в РЛТ радиолокационной сцены, элементом которой является ЗНО, необходимо иметь сведения о флуктуациях эффективной площади рассеяния (ЭПР) ЗНО во времени. В настоящее время используются модели флуктуаций ЭПР ЗНО не учитывающие или приближенно учитывающие процессы распространения и рассеяния радиоволн в системе «РЛС – ЗНО – морская поверхность». В результате имитируемая радиолокационная сцена лишь приближенно соответствует реальной, и будет неверно моделировать работу судовой РЛС (например, могут быть искажены дальности обнаружения ЗНО). Вследствие чего, обучаемый судоводитель, оказавшийся в реальной ситуации, не может правильно управлять судном.

Для получения сведений о ЭПР ЗНО требуется разработка соответствующих алгоритмов, позволяющих моделировать флуктуации ЭПР ЗНО во времени с учетом процессов распространения и рассеяния радиоволн при характерных для морской радиолокации скользких углах облучения. Таким образом, задача разработки алгоритмов моделирования ЭПР ЗНО в РЛТ является актуальной.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов моделирования флуктуаций эффективной площади рассеяния (ЭПР) знаков навигационного ограждения (ЗНО), с учетом параметров РЛС, морской поверхности, собст-

венно ЗНО и условий его наблюдения. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе предстояло решить следующие задачи:

1. Проанализировать модели ЭПР ЗНО, а также существующие модели компонент комплексного коэффициента отражения радиоволн от морской поверхности при скользких углах облучения.
2. Проанализировать существующие методы решения задачи рассеяния радиоволн на морской поверхности при скользких углах облучения.
3. Разработать новый метод решения задачи рассеяния радиоволн при скользких углах облучения для морской поверхности, протяженность которой практически не ограничена.
4. Выполнить теоретический и численный анализ точности получаемого решения в задаче рассеяния радиоволн на морской поверхности.
5. Разработать новые модели компонент комплексного коэффициента отражения радиоволн от морской поверхности при скользких углах облучения для использования в четырехлучевой модели, учитывающей многолучевое распространение радиоволн в системе «РЛС-ЗНО».
6. Разработать метод моделирования флуктуаций ЭПР ЗНО с учетом подстилающей морской поверхности, диаграммы направленности антенны РЛС и ракурса облучения ЗНО.

Методы исследования. Для решения поставленной в диссертационной работе задачи были использованы: метод интегрального уравнения, методы теории вероятности и математической статистики, статистической радиотехники, векторного и спектрального анализа, численные методы и методы математического моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный итерационный метод позволяет осуществить решение задачи рассеяния радиоволн в широком диапазоне значений параметра Рэлея при скользких углах облучения для морской поверхности, размеры которой неограничены.
2. Для оценки погрешности решения задачи рассеяния радиоволн на взволнованной морской поверхности необходимо использовать закон сохранения энергии, а также бистатистическую диаграмму рассеяния.
3. Вид бистатистической диаграммы рассеяния в широком диапазоне значений параметра Рэлея согласуется с физическими закономерностями рассеяния радиоволн на шероховатых поверхностях.
4. Сформированные модели когерентной и некогерентной компонент комплексного коэффициента отражения согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

5. Реализованный метод моделирования флуктуаций ЭПР ЗНО позволяет учитывать параметры РЛС, морской поверхности, а также ЗНО и условий его наблюдения.

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен метод поиска освещенных зон на шероховатой поверхности при скользящих углах облучения, позволяющий уточнить известную оценку Исаковича-Амента когерентной компоненты комплексного коэффициента отражения (учесть эффект затенения радиоволн элементами морской поверхности), базирующуюся на приближенных методах геометрической оптики.

2. Разработан новый итерационный метод, базирующийся на решении интегрального уравнения Фредгольма второго рода, который позволяет оценивать рассеивающие свойства морской поверхности не только при параметре Рэлея больше или меньше 1 (как в известных методах - касательной плоскости, малых возмущений и др.), но и при параметре Рэлея равном 1 или близком к 1. Указанный метод использован для выполнения моделирования отражения радиоволн от подстилающей морской поверхности при скользящих углах облучения.

3. Разработаны новые модели когерентной и некогерентной компонент комплексного коэффициента отражения электромагнитного поля от морской поверхности при скользящих углах облучения, которые, в отличие от имеющихся (Исаковича-Амента, Миллера-Брауна и др.), базируются на основе строгого метода решения задачи рассеяния (метода интегрального уравнения).

4. Разработан новый метод моделирования флуктуаций ЭПР ЗНО, позволяющий учитывать параметры РЛС, морской поверхности, собственно ЗНО и условий его наблюдения. На основе разработанного метода реализован соответствующий численный алгоритм.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный метод моделирования флуктуаций ЭПР ЗНО позволяет получать сведения о флуктуациях ЭПР ЗНО с учетом параметров РЛС, морской поверхности, ЗНО и условий его наблюдении, необходимые для воспроизведения радиолокационных сцен в РЛТ, соответствующих акваториям реальных проливов и портов. Разработанный метод можно также использовать для выбора высоты установки пассивного радиолокационного отражателя – элемента ЗНО, обеспечивающей максимальную дальность обнаружения ЗНО навигационной РЛС.

Достоверность результатов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается теоретическими доказательствами и согласием результатов эксперимента с данными математического моделирования.

Внедрение результатов работы. Внедрение результатов работы осуществлено в разработках НИИ радиоэлектронных систем прогнозирования чрезвычайных ситуаций «Прогноз» (г. Санкт-Петербург), а также в учебном процессе кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», что подтверждается двумя актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на:

– научно-практической конференции "Научоёмкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий", СПб, 2008 г.

– научно-практической конференции "Транспортно-коммуникационная система Арктики в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в условиях чрезвычайных ситуаций", СПб, 2009 г.

– XXVI Всероссийском симпозиуме "Радиолокационное исследование природных сред", СПб, 2009 г.

– научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2008, 2009, 2010 гг.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 11 статьях и докладах, среди которых 8 публикаций в рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 3 всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Она изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков, 7 таблиц, приложения и содержит список используемых источников из 84 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели, направления исследований и основные научные положения, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен обзор современного состояния проблемы моделирования ЭПР ЗНО.

Рассмотрены существующие подходы к моделированию ЭПР знаков ограждения. Приведены сведения о существующих видах ЗНО, представлена их классификация, рассмотрены ЭПР ЗНО. Обосновано использование четырехлучевой модели для задачи моделирования флуктуаций ЭПР ЗНО в РЛТ, позволяющей учитывать многолучевое распро-

странение радиоволн в системе «ЗНО – морская поверхность», а также отражение радиоволн от границы раздела «воздух - морская поверхность». Представлена статистическая векторная модель комплексного коэффициента отражения (ККО) радиоволн от морской поверхности, в рамках которой выделяют когерентную (детерминированную) и некогерентную (случайную) компоненты ККО.

Рассмотрены существующие модели когерентной и некогерентной компонент ККО. Предложен метод поиска освещенных зон для приближенного решения задачи рассеяния радиоволн на морской поверхности. Указанный метод позволяет осуществлять численные расчеты когерентной компоненты ККО для любых ПРВ ординат морской поверхности с учетом эффекта затенения радиоволн участками морской поверхности при скользящем облучении. Рассмотрены недостатки существующих моделей компонент ККО, и обоснована необходимость создания новых моделей компонент ККО с помощью строгого метода решения задачи рассеяния радиоволн на морской поверхности, позволяющего учитывать явления затенения и переотражения радиоволн участками морской поверхности.

Вторая глава посвящена разработке строгого метода решения задачи рассеяния радиоволн при скользящем облучении на детерминированной взволнованной морской поверхности. Рассмотрен случай горизонтальной поляризации облучающего электромагнитного поля для двухмерной задачи рассеяния. Предложена концепция оценки погрешности вычисления поля, рассеянного детерминированной шероховатой поверхностью, базирующаяся на законе сохранения энергии и физических закономерностях отражения поля в зеркальном направлении при скользящем облучении.

Показано, что при скользящих углах облучения, характерных для морской радиолокации, единственный путь получения информации о рассеянном в направлении ЗНО поле – решение интегрального уравнения Фредгольма первого или второго рода. Известные алгоритмы решения указанных интегральных уравнений позволяют исследовать рассеивающие свойства поверхностей, протяженность которых не превышает нескольких тысяч длин волн излученного РЛС электромагнитного поля. При моделировании флуктуаций ЭПР ЗНО требуется информация о характеристиках рассеяния участков возмущенной морской поверхности, протяженность которых изменяется от десятков тысяч до сотен тысяч длин волн электромагнитного поля.

Разработан новый итерационный алгоритм оценки плотности поверхностного тока на детерминированной шероховатой поверхности (представляющей собой реализацию возмущенной морской поверхности), базирующийся на решении интегрального уравнения

Фредгольма второго рода. Алгоритм основан на представлении рассеянного поля в каждой точке поверхности в виде суммы двух полей: поля \mathbf{H}_p^+ , распространяющегося по поверхности в сторону положительного направления оси Ox , и поля \mathbf{H}_p^- , распространяющегося по поверхности в противоположную сторону (см. рис. 1).

Детерминированная реализация морской поверхности S разбивается на N точек, координаты которых известны. При расчетах использовано приближение идеально проводящей поверхности.

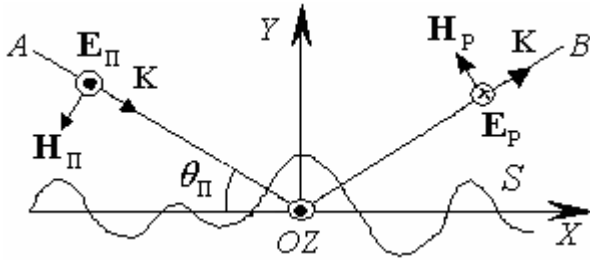


Рисунок 1

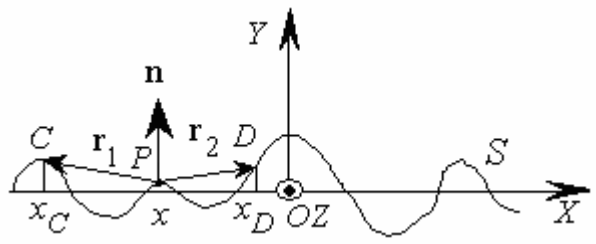


Рисунок 2

Плотность поверхностного тока в некоторой точке $P(x, y)$ поверхности определяется интегральным уравнением:

$$\mathbf{j}(x) = 2[\mathbf{n}(x), \mathbf{H}_\Pi(x)] + \mathbf{j}^+(x) + \mathbf{j}^-(x),$$

где $\mathbf{n}(x)$ – нормаль к поверхности; $\mathbf{H}_\Pi(x)$ – падающее поле; \mathbf{r}_1^0 и \mathbf{r}_2^0 – единичные векторы, определяющие направления из точки $P(x, y)$ в точки $C(x_C, y_C)$ и $D(x_D, y_D)$, со-

ответственно; $\mathbf{j}^+(x) = i \frac{k}{2} \int_{-\infty}^x j(x') [\mathbf{n}(x), [\mathbf{r}_1^0(x', x), \mathbf{z}^0]] H_1^{(1)}[k r_1(x', x)] dS(x')$ и

$\mathbf{j}^-(x) = i \frac{k}{2} \int_x^{+\infty} j(x') [\mathbf{n}(x), [\mathbf{r}_2^0(x', x), \mathbf{z}^0]] H_1^{(1)}[k r_2(x', x)] dS(x')$ – плотности поверхностного

тока, порожденные, соответственно, полями \mathbf{H}_p^+ и \mathbf{H}_p^- ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В отличие от известных алгоритмов, осуществляющих оценку плотности поверхностного тока параллельно в N точках поверхности, в предложенном алгоритме указанная оценка формируется последовательно от 1-ой до N -ой точки поверхности за две итерации, что позволяет отказаться от операций с матрицами. Это, в свою очередь, позволяет исследовать рассеивающие свойства поверхностей практически неограниченной длины, в то время как в известных алгоритмах длина рассматриваемой поверхности ограничена. На первой итерации алгоритма учитываются компоненты плотности поверхностного тока

$2[\mathbf{n}(x), \mathbf{H}_\Pi(x)]$ и $\mathbf{j}^+(x)$, на второй итерации учитывается компонента $\mathbf{j}^-(x)$, как некоторая добавка к уже имеющемуся решению.

Предложенный итерационный алгоритм является единственным алгоритмом, позволяющим осуществлять оценку плотности поверхностного тока при скользких углах облучения и изменении параметра Рэлея в широком диапазоне значений не только больше или меньше 1, но и при параметре Рэлея близком к 1. Известные алгоритмы хорошо работают только при параметре Рэлея либо больше 1, либо меньше 1.

Определив плотность тока на поверхности, можно вычислить поле, рассеянное поверхностью. Поле в точке наблюдения B от элемента dS поверхности имеет вид:

$$d\mathbf{H}_B = i \frac{j_2(x)}{4} [\mathbf{r}_B^0, \mathbf{z}^0] k H_1^{(1)}[kr_B(x, x_B)] dS,$$

где \mathbf{r}_B^0 – единичный вектор, направленный из точки наблюдения B в текущую точку поверхности; $r_B(\cdot)$ – расстояние от точки B до этой точки поверхности, $j_2(x)$ – плотность поверхностного тока после второй итерации.

Поле в точке наблюдения B , рассеянное всей шероховатой поверхностью, будет иметь вид:

$$\mathbf{H}_B = \int_{R_1}^{R_2} d\mathbf{H}_B = H_{Bx} \mathbf{x}^0 + H_{By} \mathbf{y}^0,$$

где R_1 и R_2 – соответственно, координаты начала и конца детерминированной реализации морской поверхности.

Разработан алгоритм оценки бистатической диаграммы рассеяния детерминированной шероховатой поверхности при скользких углах облучения, позволяющий осуществлять исследование характеристик рассеянного поля во всей верхней полуплоскости над границей раздела двух сред воздух – морская поверхность.

Введено понятие бистатической диаграммы рассеяния (БДР), которая представляет собой зависимость бистатического коэффициента рассеяния от одного угла рассеяния θ_p , отсчитываемого от оси OY , при фиксированном угле скольжения θ_Π .

Бистатический коэффициент рассеяния определяется по формуле:

$$\Gamma_w(\theta_\Pi, \theta_p) = |\Pi(\theta_p)| / P_\Pi(\theta_\Pi),$$

где $P_\Pi(\theta_\Pi)$ – мощность падающего на поверхность излучения, $|\Pi(\theta_p)|$ – модуль вектора Умова – Пойнтинга.

Разработана новая методика обобщенной оценки точностных характеристик итерационного алгоритма расчета рассеянного поля, базирующаяся на использовании бистатистической диаграммы рассеяния и физических закономерностей явления рассеяния радиоволн, позволяющая получать итоговую погрешность расчета рассеянного поля.

В соответствии с законом сохранения энергии при отсутствии потерь мощность поля, рассеянного поверхностью, должна быть равна мощности падающего поля. Тогда должно выполняться равенство:

$$P_P/P_{\Pi} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Gamma_w(\theta_P) d\theta_P = 1,$$

где P_{Π} и P_P - мощности падающего и рассеянного полей, соответственно.

Степень отклонения от 1 служит совокупной мерой погрешности всех вычислений при решении рассмотренной задачи рассеяния на шероховатой поверхности и рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_p = [1 - (P_P/P_{\Pi})] \cdot 100\% .$$

Установлено, что выполнение равенства $P_P/P_{\Pi} = 1$ является необходимым, но не достаточным. Достаточность определяется физическими закономерностями процесса рассеяния, которые характеризуются видом БДР.

Проведен расчет БДР для трех видов поверхностей с разной степенью шероховатости, при этом значения параметра Рэлея составили: $P_R \ll 1$, $P_R = 1$, $P_R > 1$ соответственно. Для слабощероховатой поверхности (параметр Рэлея $P_R \ll 1$) малой протяженности выполнено сравнение точностных характеристик предложенных алгоритмов и алгоритма Боголюбова – Крылова. Для предложенного итерационного алгоритма средняя по 100 реализациям поверхности погрешность расчета составила 0.4%, для алгоритма Боголюбова – Крылова – 1.11%.

На рис. 3, 5, 7 представлены реализации трех видов поверхностей, а на рис. 4, 6, 8 – соответственно БДР, усредненные по 100 реализациям. Анализ полученных БДР показал, что при увеличении степени шероховатости поверхности, определяемой параметром Рэлея, преобладание зеркального отражения над рассеянием по другим направлениям уменьшается, что согласуется с физическими закономерностями процесса рассеяния радиоволн.

Для поверхностей с параметрами Рэлея $P_R = 1$ и $P_R > 1$ усредненные по 100 реализациям погрешности расчета по БДР составили 1.1% и 1.9% соответственно.

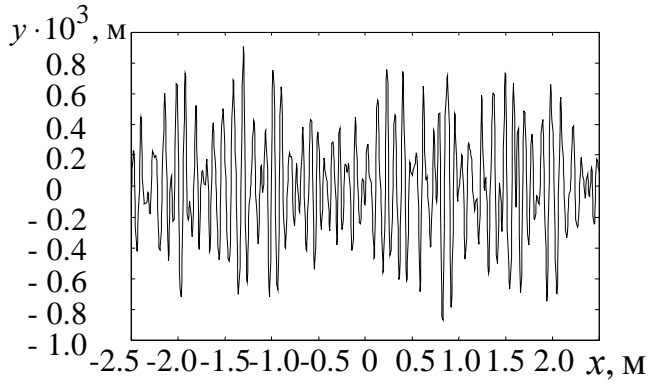


Рисунок 3

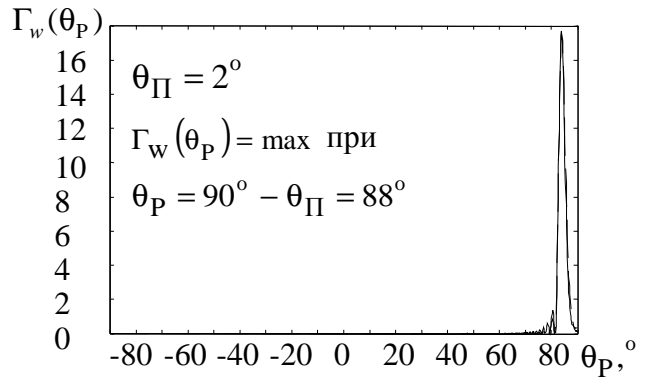


Рисунок 4

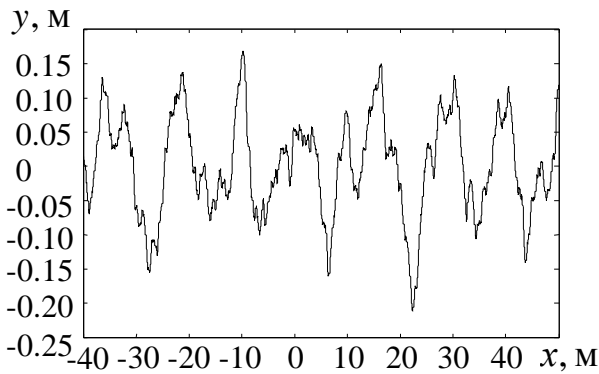


Рисунок 5

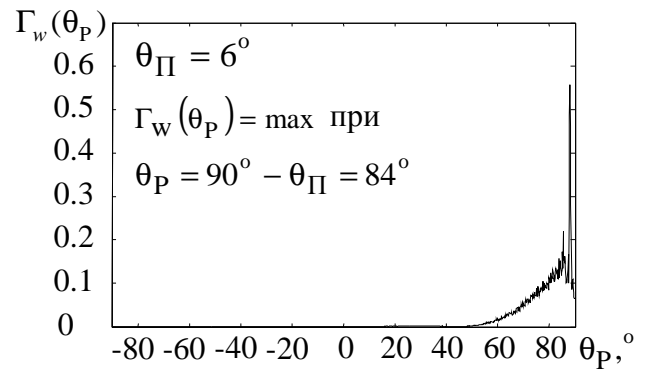


Рисунок 6

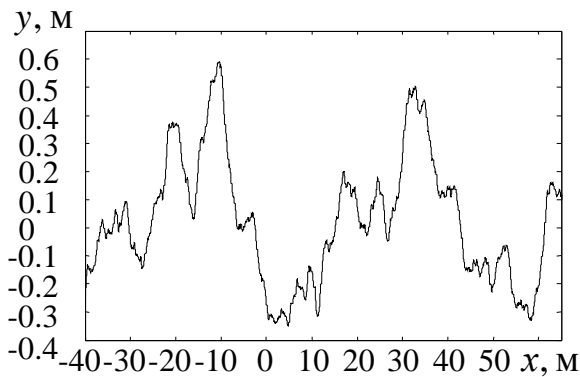


Рисунок 7

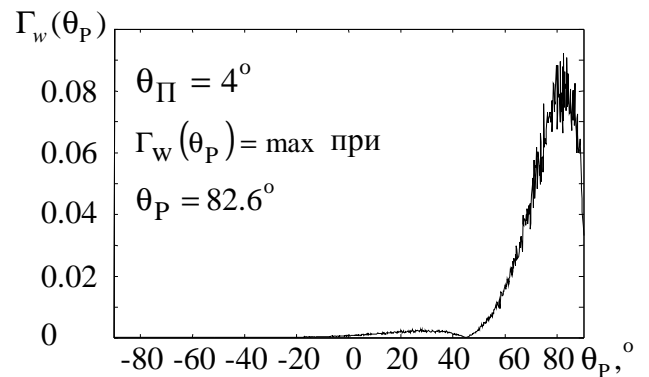


Рисунок 8

Таким образом, погрешность расчета, выполненного с помощью итерационного алгоритма, не превышает 1.9% в широком диапазоне значений параметра Рэлея, что свидетельствует о высоких точностных характеристиках предложенного алгоритма.

Выполнено исследование погрешности расчета рассеянного поля для трех разных видов поверхностей (усреднение по 100 реализациям) по каждому из этапов итерационного алгоритма. Результаты расчета погрешности представлены в таблице 1.

Установлено, что погрешность расчета с ростом числа итераций уменьшается и достигает значений, приемлемых для численного решения, к концу второй итерации.

Таблица 1

Этап алгоритма	Погрешность расчета ε_p , %		
	$P_R \ll 1$	$P_R = 1$	$P_R > 1$
Начальное приближение	6.5	78	75
Первая итерация	1.4	2.5	2.7
Вторая итерация	0.4	1.1	1.9

В **третьей главе** рассмотрена математическая модель морской поверхности, а также представлены результаты математического моделирования, проведенного методом статистических испытаний (Монте-Карло) – сформированные модели когерентной и некогерентной компонент ККО.

Показано, что одной из важнейших характеристик, описывающих состояние морской поверхности, является спектр морского волнения. Приведен широко применяемый в задачах моделирования морской поверхности спектр Пирсона-Московитца, который определяется только один параметром – скоростью ветра на высоте 19.5 м.

Рассмотрена линейная математическая модель морской поверхности, согласно которой морская поверхность представляет собой суперпозицию пространственных гармоник, распространяющихся независимо друг от друга.

Рассмотрен спектральный метод генерации реализаций морской поверхности. Представлены рекомендации по выбору параметров модели морской поверхности для выполнения математического моделирования.

Предложен алгоритм формирования моделей компонент ККО для скользких углов облучения. Проведено математическое моделирование, общее время выполнения которого составило 180 дней. В результате сформированы новые модели компонент ККО:
- математическая модель модуля когерентной компоненты ККО:

$$|\Gamma_K| = |\Gamma_\Phi(\theta_\Pi)| \xi_K(\theta_\Pi, \sigma_y),$$

где $\Gamma_\Phi(\theta_\Pi)$ - коэффициент отражения Френеля для угла скольжения θ_Π ; σ_y - средне-квадратическое отклонение ординат морской поверхности. Функция $\xi_K(\theta_\Pi, \sigma_y)$ описывается формулой:

$$\begin{aligned} \xi_K(\theta_\Pi, \sigma_y) = & a_{10}(\theta_\Pi) + a_{11}(\theta_\Pi)\sigma_y + a_{12}(\theta_\Pi)\sigma_y^2 + a_{13}(\theta_\Pi)\sigma_y^3 + \\ & + a_{14}(\theta_\Pi)\sigma_y^4 + a_{15}(\theta_\Pi)\sigma_y^5 + a_{16}(\theta_\Pi)\sigma_y^6. \end{aligned}$$

Коэффициенты $a_{1i}(\theta_\Pi)$ определены при моделировании и представлены в таблице 2.

Таблица 2

θ_{Π} , град	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}
2.0	1.004	-1.792	-152.22	1837.60	-9725	25122	-25288
2.5	1.007	-3.080	-173.11	2224.70	-11977	32134	-35651
3.0	1.009	-3.968	-198.84	2456.37	-10348	14208	2847
3.5	1.005	-2.986	-330.76	4875.20	-28025	72335	-68897
4.0	1.000	-2.170	-477.40	7993.33	-54006	168612	-201467

- математическая модель некогерентной компоненты ККО:

$$\Gamma_H = |\Gamma_{\Phi}| \sqrt{2} (F_1 + iF_2),$$

где ξ_H - среднеквадратическое отклонение (СКО) составляющей некогерентной компоненты, F_1 и F_2 - гауссовские случайные процессы - $F_1 = N(0, \xi_H)$ и $F_2 = N(0, \xi_H)$.

СКО составляющей некогерентной компоненты ККО определяется выражением:

$$\begin{aligned} \xi_H(\theta_{\Pi}, \sigma_y) = & a_{20}(\theta_{\Pi}) + a_{21}(\theta_{\Pi})\sigma_y + a_{22}(\theta_{\Pi})\sigma_y^2 + a_{23}(\theta_{\Pi})\sigma_y^3 + \\ & + a_{24}(\theta_{\Pi})\sigma_y^4 + a_{25}(\theta_{\Pi})\sigma_y^5 + a_{26}(\theta_{\Pi})\sigma_y^6. \end{aligned}$$

Коэффициенты $a_{2i}(\theta_{\Pi})$ определены при моделировании и представлены в таблице 3.

Таблица 3

θ_{Π} , град	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}
2.0	$652 \cdot 10^{-6}$	-0.099	22.083	-276.15	1621.1	-4644.4	5104
2.5	$298 \cdot 10^{-6}$	-0.081	24.214	-331.76	2276.6	-8069.3	11301
3.0	$-432 \cdot 10^{-6}$	0.170	16.828	-212.90	1426.7	-5688.5	9383
3.5	$-8 \cdot 10^{-6}$	0.007	30.367	-441.51	2836.3	-9121.2	11841
4.0	$948 \cdot 10^{-6}$	-0.338	56.243	-922.98	6399.8	-20662	25513

Полученные зависимости $\xi_K(\theta_{\Pi}, \sigma_y)$ и $\xi_H(\theta_{\Pi}, \sigma_y)$ представлены на рис. 9 и 10 соответственно.

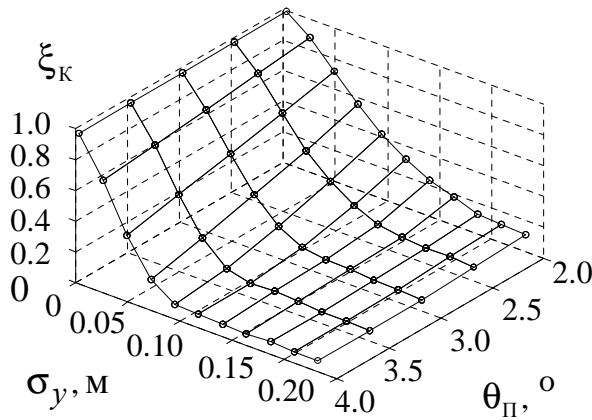


Рисунок 9

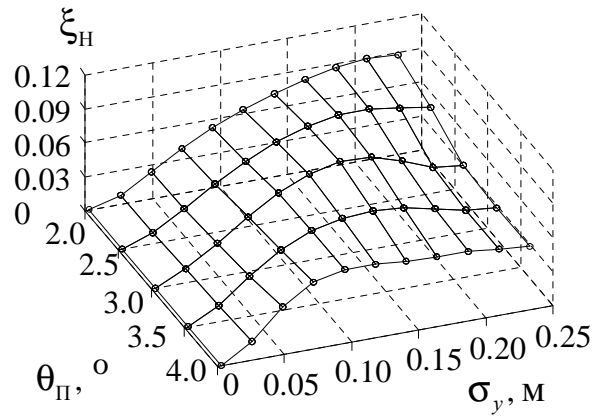


Рисунок 10

- математическая модель автокорреляционной функции (АКФ) составляющей некогерентной компоненты ККО

$$R(\tau) = [\xi_H(\theta_{\Pi}, \sigma_y)]^2 \exp(-|\tau|/\tau_0) \cos(b\tau),$$

где τ - временной сдвиг; b и τ_0 - параметры, представленные в таблице 4.

Проведено сравнение сформированных моделей компонент ККО с имеющимися экспериментальными данными, установлено их согласие.

Таблица 4

$\sigma_y \cdot 10^3, \text{м}$	τ_0, b				
	$\theta_{\Pi}=2.0^\circ$	$\theta_{\Pi}=2.5^\circ$	$\theta_{\Pi}=3.0^\circ$	$\theta_{\Pi}=3.5^\circ$	$\theta_{\Pi}=4.0^\circ$
2.87	1, 7.9	3.1, 6.3	1.3, 6.15	1, 1.75	1, 4.55
25.8	4.7, 4.1	4.5, 4.1	2.7, 2.2	1, 7.5	1, 5.8
48.72	2.3, 2.05	2.5, 4.25	2.7, 8.35	1.1, 4.8	1, 7.6
71.65	1.5, 3.9	1.3, 8.75	2, 8.6	3, 2.55	2.2, 8.8
94.58	2.1, 3.75	1, 3.15	1.1, 3.15	1, 3.15	1, 4.65
117.5	1, 9.15	1, 1.6	1, 7.75	1, 8.85	1, 4.85
140.4	1, 8.4	1, 4.6	1, 8.85	1, 8.7	1.1, 4.7
163.4	1, 4.45	1, 1.95	1, 2.45	1, 4.45	1.1, 1.3
186.3	1.8, 1.95	1, 4.8	1, 1.25	3.9, 2.65	4.2, 3.7
209.3	1.8, 1.85	1, 1.65	1, 8.05	2.6, 8.75	3.3, 3.85
231.5	2.3, 4.5	1, 4.3	1.5, 8.7	1.4, 2.25	1, 6.9

В четвертой главе предложен метод моделирования ЭПР ЗНО, который позволяет учитывать многолучевые механизмы распространения радиоволн на трассе «РЛС-ЗНО», изменения положения антенны РЛС и ЗНО во времени, обусловленные волнением мор-

ской поверхности, влиянием диаграммы направленности (ДН) антенны навигационной РЛС, движением судна. Предложенный метод реализует соответствующий алгоритм.

Представлены модификации алгоритма моделирования ЭПР ЗНО для трех характерных для судовождения ситуаций:

1. Судно стоит на якорной стоянке при незначительном морском волнении. Положения антенны навигационной РЛС и ЗНО зафиксированы в пространстве и не меняются во времени.

2. Судно стоит на якорной стоянке при наличии морского волнения. Положения антенны навигационной РЛС и ЗНО изменяются во времени.

3. Судно движется с постоянной скоростью в направлении к ЗНО при наличии морского волнения. Положения антенны навигационной РЛС и ЗНО изменяются во времени.

Моделирование ЭПР ЗНО в каждый момент времени t выполняется по формуле:

$$\sigma(t) = \left| D^2(\beta_1) A(\theta_1) \exp(-i 2k h \sin \theta) + \Gamma_{\text{отр}}^2(\theta_{\text{П}}, t) A(\theta_{\text{П}}) \times \right. \\ \left. \times \exp(i 2k h \sin \theta) + 2\Gamma_{\text{отр}}(\theta_{\text{П}}, t) D(\beta_1) A(\theta_1, \theta_{\text{П}}) \right|^2.$$

где h - высота расположения ЗНО, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, $D(\beta_1)$ - множитель, учитывающий ДН антенны РЛС, $\Gamma_{\text{отр}}(\theta_{\text{П}}, t)$ - комплексный коэффициент отражения, A - комплексный коэффициент рассеяния ЗНО, λ - длина волны электромагнитного поля, θ_1 - угол облучения ЗНО, θ - угол под основание ЗНО.

С помощью разработанного алгоритма выполнено моделирование флуктуаций ЭПР ЗНО во времени для трех рассмотренных ситуаций. Результаты моделирования – зависимости ЭПР ЗНО от времени представлены на рис. 11-13 соответственно. На рис. 12 и 13 пунктирной линией показано значение ЭПР ЗНО в свободном пространстве.

Установлено, что изменения положения антенны РЛС и ЗНО в пространстве, обусловленные морским волнением, приводят к нестационарности флуктуаций ЭПР ЗНО, особенно для ситуации, когда судно движется относительно ЗНО. При этом отклонения ЭПР ЗНО по сравнению со значением ЭПР ЗНО в свободном пространстве могут достигать до 8 дБ. Приведены гистограммы флуктуаций ЭПР для каждой из рассмотренных ситуаций.

Проведено сравнение результатов, полученных с помощью разработанного алгоритма моделирования флуктуаций ЭПР ЗНО с экспериментальными данными – зависимостью ЭПР ЗНО от высоты.

В результате проведенного сравнения установлено хорошее совпадение данных моделирования флуктуаций ЭПР отражателя с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность как разработанного в целом алгоритма, так и его отдельных частей.

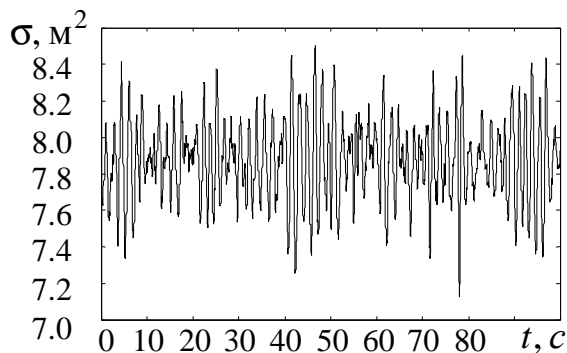


Рисунок 10

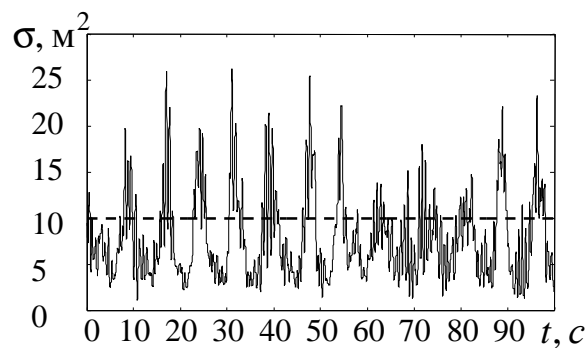


Рисунок 11

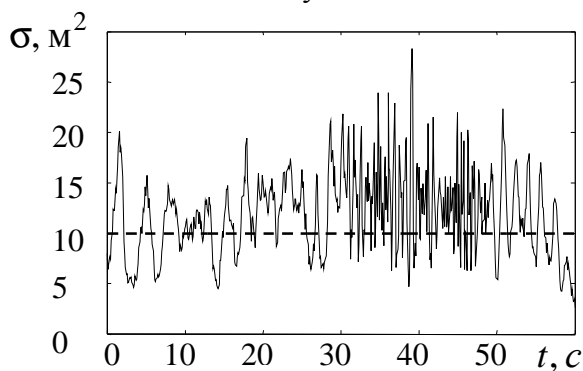


Рисунок 12

В **заключении** дается перечень основных результатов диссертационной работы, а также рекомендации по практическому использованию полученных результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработан метод поиска освещенных зон для приближенного определения когерентной компоненты электромагнитного поля, рассеянного шероховатой поверхностью в зеркальном направлении при скользящих углах облучения.

2. Разработан итерационный метод оценки плотности поверхностного тока на детерминированной шероховатой поверхности (представляющей собой реализацию возмущенной морской поверхности), базирующийся на решении интегрального уравнения Фредгольма второго рода.

3. Предложена концепция оценки погрешности вычисления поля, рассеянного детерминированной шероховатой поверхностью, базирующаяся на законе сохранения энергии и физических закономерностях отражения поля в зеркальном направлении при скользящем облучении.

4. Разработан алгоритм оценки бистатической диаграммы рассеяния детерминированной шероховатой поверхности при скользких углах облучения, позволяющий осуществлять исследования характеристик рассеянного поля во всей верхней полуплоскости над границей раздела двух сред воздух – морская поверхность.

5. Разработаны модели комплексного коэффициента отражения (ККО) от взволнованной морской поверхности для скользких углов облучения.

6. Предложен метод моделирования эффективной площади рассеяния (ЭПР) знака навигационного ограждения (ЗНО), который позволяет учитывать многолучевые механизмы распространения радиоволн на трассе «РЛС-ЗНО», изменение положения антенны РЛС и ЗНО во времени, обусловленное волнением морской поверхности, диаграммой направленности антенны навигационной РЛС и движением судна.

7. Выполнено математическое моделирование, в ходе которого показано согласие полученной зависимости ЭПР уголкового отражателя, имитирующего ЗНО, с экспериментальными данными.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных трудах.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Бородин, М.А. Итерационный алгоритм расчета поля, рассеянного шероховатой поверхностью [Текст] / В.В. Леонтьев, М.А. Бородин, Л.И. Богин // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т.53, №5. – С. 537–544.

2. Бородин, М.А. Оценка точности итерационного алгоритма вычисления поля, рассеянного шероховатой поверхностью [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 3. – С. 54–60.

3. Бородин, М.А. Алгоритм поиска освещенных зон для приближенного решения задачи зеркального отражения радиоволн при скользком облучении шероховатой поверхности [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 6. – С. 41–46.

4. Бородин, М.А. Анализ точностных характеристик итерационного алгоритма вычисления поля, рассеянного шероховатой поверхностью [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т.54, №9. – С. 1043–1048.

5. Бородин, М.А. Когерентное поле, рассеянное шероховатой поверхностью в зеркальном направлении при скользких углах облучения [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – Вып. 6. – С. 41–46.

6. Бородин, М.А. Модели флуктуаций эффективной площади рассеяния знаков навигационного ограждения в радиолокационном тренажере [Текст] / А.Ю. Андреев, М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 1. – С. 67–72.

7. Бородин, М.А. Моделирование флуктуаций эффективной площади рассеяния знаков навигационного ограждения [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 4. – С. 54–60.

8. Бородин, М.А. Рассеяние вертикально поляризованной электромагнитной волны шероховатой поверхностью при скользящем облучении [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев, О.А. Третьякова // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 5. – С. 33–46.

Публикации в сборниках трудов конференций

9. Бородин, М.А. Радиолокационные тренажеры и обеспечение безопасности судовождения [Текст] / В.В. Леонтьев, М.А. Бородин // Научно-технические и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий: материалы научно-практической конференции. – СПб.: [б.и.], 2008 (ЗАО «Инсанта»). – С. 76–80.

10. Бородин, М.А. Модели рассеяния радиоволн морской поверхностью [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Транспортно-коммуникационная система Арктики в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в условиях чрезвычайных ситуаций: материалы научно-практической конференции. – СПб.: ООО «ПИФ. СОМ», 2009. – С. 73–77.

11. Бородин, М.А. Алгоритмы моделирования флуктуаций эффективной площади рассеяния знаков навигационного ограждения в радиолокационном тренажере [Текст] / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // 63 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – С.3–7.