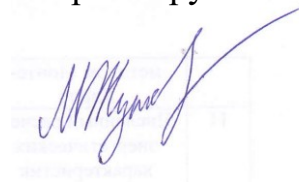


На правах рукописи

Жуков Михаил Сергеевич



**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВРЕМЕННЫХ И
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ В
ХАОТИЧЕСКИХ СРЕДАХ И СИСТЕМАХ**

1.3.4 - радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гавриленко Владимир Георгиевич,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Канаков Владимир Анатольевич

кандидат технических наук
Дрёмин Виктор Владимирович
Орловский государственный университет
им. И.С. Тургенева

Ведущая организация: Автономная некоммерческая организация
высшего образования «Российский новый
университет»

Защита состоится: 16 ноября 2022г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 24.2.340.03 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: <https://diss.unn.ru/1265>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.2.340.03
д.ф.-м.н., доцент



А.В. Клюев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Исследованию статистических характеристик волновых полей различной физической природы в случаях, когда на пути распространения волн встречаются хаотические неоднородности параметров среды, приводящие к рассеянию волн, посвящена весьма обширная литература, например [1-3]). Это обусловлено тем, что такие ситуации часто встречаются как в естественных условиях, так и в искусственно созданных практически важных системах. В настоящее время разработан целый ряд аналитических методов решения таких задач. Большинство из них являются приближёнными, и позволяют получить достаточно хорошо согласующиеся с опытом результаты либо когда усреднённые характеристики среды однородны в пространстве, либо когда можно ограничиться приближением однократно рассеянных волн. В случаях, когда практически важное значение имеет корректный учёт многократного рассеяния волн на большие углы в статистически неоднородных системах, получение аналитических решений весьма затруднено. При этом на первый план выступают численные методы анализа, среди которых важное место занимает корпускулярный метод статистического моделирования Монте-Карло [4]. В последние годы данный метод используется, например, при теоретическом рассмотрении различных вопросов рассеяния оптического излучения в биологических тканях, в частности с учётом флуоресценции [5]. В диссертации этот метод развивается и применяется при решении всех рассматриваемых в ней вопросов. К ним относятся:

- расчёт статистических характеристик импульсного оптического излучения видимого и ближнего ИК диапазонов, рассеянного в оптически толстых образцах неоднородных биологических тканей, важный для развития метода оптической диффузионной рефлектометрии, который может успешно применяться для неинвазивного мониторинга динамики кровенаполнения различных участков коры головного мозга;

- анализ усреднённых энергетических и временных характеристик принимаемых сигналов при распространении волн в плоских волноводах с шероховатыми границами, моделирующих условия распространения радиоволн в области между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы, канализацию микроволнового электромагнитного излучения в планарных структурах и прохождение звука через подводный звуковой канал между поверхностью водоёма и его дном.

- расчёт изменения формы короткого радиоимпульса при рассеянии в городских условиях на основе статистической модели больших районов городской застройки, важный для анализа искажений кодированных сигналов, используемых при мобильной связи.

Во всех, указанных выше случаях корпускулярный метод Монте-Карло представляет собой по существу единственный относительно простой способ

корректного расчёта многократного рассеяния волн, позволяющий получить физически интересные и практически важные результаты.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является анализ временных и энергетических характеристик сигналов при многократном рассеянии в хаотических средах и системах численным методом на основе корпускулярного статистического моделирования Монте-Карло.

Для достижения этой цели решены следующие задачи.

1. Для мутной среды с неоднородным распределением показателя поглощения выполнено численное моделирование методом Монте-Карло формы первоначально короткого оптического импульса и функции пространственного распределения траекторий фотонов в этой среде, излучённых источником и попавших в приёмник.

2. Произведено численное восстановление эффективных оптических параметров неоднородной рассеивающей среды.

3. Предложена схема диагностики распределения в пространстве показателя поглощения биологической рассеивающей среды по данным времяразрешенной диффузионной рефлектометрии.

4. Выполнен численный расчёт корпускулярным методом Монте-Карло средней плотности энергии волнового поля в плоском волноводе, образованном горизонтальными шероховатыми отражающими поверхностями, в зависимости от горизонтального расстояния между источником и областью регистрации при различных параметрах системы.

5. Тем же методом проанализировано распределение усреднённой плотности энергии излучения по высоте внутри волновода на заданном горизонтальном расстоянии от источника.

6. Произведено численное моделирование модифицированным корпускулярным методом Монте-Карло распространения первоначально короткого импульса в плоском волноводе с плавными шероховатыми границами при бистатистическом зондировании. Проанализированы временные характеристики принимаемого сигнала при многократном отражении и скользящем распространении.

7. Выполнено статистическое моделирование корпускулярным методом Монте-Карло энергетического спектра задержек принимаемого сигнала в случае распространения первоначально короткого радиоимпульса в городских условиях при учёте многократных отражений от стен зданий и дифракции волн на их крышах.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались аналитические методы расчёта и численное статистическое моделирование корпускулярным методом Монте-Карло.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в постановке ряда нерешенных ранее задач, разработке методов численного анализа и в полученных оригинальных результатах.

1. Впервые проведено Монте-Карло моделирование формирования сигнала в системе оптической диффузионной рефлектометрии, использующей импульсное зондирующее излучение, из среды со слоистым распределением показателя поглощения.

2. Предложен оригинальный корпускулярный алгоритм численного расчета энергетических характеристик волнового поля, позволяющий промоделировать распространение некогерентных волн в плоском волноводе с шероховатыми границами методом Монте-Карло и впервые учесть влияние многократных отражений, случайных затенений участков граничных поверхностей неровностями и дифракции волн на вершинах неоднородностей.

3. Впервые численно проанализированы временные характеристики принимаемого сигнала при распространении первоначально короткого импульса в плоском волноводе с шероховатыми границами в случае многократного отражения и скользящего распространения.

4. С помощью корпускулярного метода Монте-Карло впервые выполнен численный расчёт формы рассеянного в городских условиях первоначально короткого радиоимпульса с учётом многократных отражений и дифракции волн на крышах городских строений.

Научная и практическая значимость

Полученные в диссертации результаты показывают, что метод статистического моделирования Монте-Карло, основанный на корпускулярном представлении волнового поля, позволяет корректно выполнить численный расчёт различных статистических характеристик некогерентного излучения, при многократном рассеянии в различных хаотических средах и системах.

Рассчитанные в диссертации статистические характеристики оптического излучения в мутной среде с неоднородным распределением показателя поглощения могут быть полезны для совершенствования оптической диффузионной рефлектометрии с целью диагностики областей с повышенным кровенаполнением биологических тканей.

Выполненный в диссертации анализ энергетических и временных характеристик сигналов в плоском волноводе с шероховатыми границами важен для расчёта и диагностики подводных звуковых каналов.

Расчет зависимости энергетического спектра задержек радиосигнала от условий распространения в городе и усреднённых параметров городской застройки полезен для оценки характеристик каналов передачи в системах мобильной связи.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных численных результатов подтверждается совпадением в частных случаях с известными в литературе теоретическими зависимостями, а также с выведенными в диссертации аналитическими формулами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Численное статистическое моделирование методом Монте-Карло, основанное на корпускулярном подходе, даёт возможность исследовать влияние слоистых неоднородностей показателя поглощения в мутной среде на форму принимаемого первоначально короткого зондирующего импульса и траекторию движения фотонов от источника к приёмнику.

2. Полученные результаты численных расчётов формы зондирующего импульса позволяют восстановить при помощи теоретических формул эффективные (усреднённые) значения показателей поглощения и транспортного рассеяния неоднородной среды.

3. Разработанный алгоритм численного анализа методом Монте-Карло позволяет рассчитать зависимость пространственно усреднённой плотности энергии волнового поля в плоском волноводе с шероховатыми границами от расположения источника и приёмника с учётом многократных отражений от границ, дифракции волн на вершинах неоднородностей и затенения области регистрации от источника.

4. Выполненные аналитические и численные расчёты показали, что предложенный алгоритм численного моделирования методом Монте-Карло даёт возможность правильно рассчитать форму принимаемого сигнала при некогерентном многократном отражении короткого импульса в плоском волноводе с плавными шероховатыми границами.

5. Предложенный способ численного расчёта корпускулярным методом Монте-Карло позволяет корректно проанализировать энергетический спектр задержек в области наблюдения при распространении первоначально короткого радиоимпульса в городских условиях и выяснить влияние таких важных факторов, как положение источника и области регистрации, расстояние между ними, случайность размеров зданий и дифракция волн на их крышах.

Апробация результатов работы и публикации

Диссертационная работа выполнена на кафедре распространения радиоволн и радиоастрономии радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Её основные результаты опубликованы в 14 работах [A1-A14], приведенных в разделе автореферата «Список работ по теме диссертации». Материалы диссертации докладывались: на XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX научных конференциях по радиофизике на базе радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, 2010-2016г.),

XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн» (г. Томск, 2016 г.), VIII Всероссийских Армандовских чтениях (г. Муром, 2018 г.).

Результаты работы получены при финансовой поддержке: Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 8741), грантом Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук (МК - 1652.2012.2), грантом Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-02-97064-р_поволжье_a), а также в соответствии с госзаданием № 3.1252.2014/К.

Личный вклад автора

Диссертант принимал участие в постановке задач, выполнении аналитических расчётов, разработке алгоритмов статистического моделирования методом Монте-Карло. Им выполнены все численные расчёты. Он также принимал участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 133 страниц. В диссертации 62 рисунка, 41 формул, 1 таблица. Количество цитированных источников – 106, в том числе публикаций диссертанта – 14.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируется её цель, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведена количественная оценка методом Монте-Карло [4] показателей поглощения и рассеяния биологических тканей, по оптическим сигналам, рассеянным стохастической средой.

В **разделе 1.1** описан метод оптической диффузионной рефлектометрии [6-8] применяемый для неинвазивной функциональной диагностики биологических тканей.

В **разделе 1.1.1** рассмотрен диапазон длин волн излучений, используемый для биомедицинской диагностики [9, 10], виды взаимодействия лазерного излучения с биотканью и определены основные свойства, определяющие распространение пучка света в рассеивающей среде.

В **разделе 1.1.2** описаны основные принципы метода ОДР, варианты экспериментальной реализации метода ОДР [11-14].

В **разделе 1.1.3** показана возможность применения метода ОДР для функционального имиджинга головного мозга [15].

В **разделе 1.1.4** обозначены проблемы метода ОДР такие как: корректное восстановление параметров поглощения по зарегистрированному сигналу диффузного рассеяния, определение независимого определения показателей поглощения и рассеяния [16, 17]. Представлены способы решения данных проблем.

В **разделе 1.2** проведен теоретический анализ распространения оптического излучения в сильно рассеивающей и поглощающей среде с целью решения задачи определения параметров этой среды.

В **разделе 1.2.1** приведено нестационарное уравнение переноса излучения [16] с граничными условиями на поверхности, указано на то, что для описания нестационарного распределения излучения в среде вместо уравнения переноса излучения используется приближенное уравнение, имеющее вид уравнения диффузии [17].

В **разделе 1.2.2** описано диффузионное приближение теории переноса излучения для стационарных и импульсных источников [18], сделан вывод о применимости диффузионного приближения для решения поставленной задачи.

В **разделе 1.2.3** показано, что совокупность фотонов, формирующих сигнал ОДР, можно характеризовать функцией распределения по оптическим путям распространения. При заданных условиях эта функция представляет собой линию наиболее вероятных значений в области, имеющих форму банана (в иностранной литературе «banana shape zone») [19-20].

В **разделе 1.2.4** для импульсного источника аналитически получены выражения для параметров однородной среды:
$$\mu_a = \frac{\langle t \rangle^3}{2c \cdot (\sigma_t^2 + \langle t \rangle^2) \sigma_t^2},$$

$$\mu_s' = \frac{2c}{3d^2} \left(1 + \frac{\langle t \rangle^2}{\sigma_t^2} \right) - \mu_a, \text{ где } \mu_a - \text{показатель поглощения и } \mu_s' - \text{транспортный}$$

показатель рассеяния, c - скорость света в среде, d - расстояние между источником и приемником, $\langle t \rangle$ - время распространения импульса $\langle \sigma_t^2 \rangle$ - дисперсия размытия формы импульса. Указано, что при наличии выраженных неоднородностей, например, слоистой структуры, формулы позволяют рассчитать только «эффективные» параметры, усредненные по тому объему среды. Таким образом показано, что в присутствии даже самых простых неоднородностей эта задача может быть решена только численными методами.

В разделе 1.3 описан метод Монте-Карло [21, 22] для численного моделирования изменения профилей импульса и функций распределения фотонов, зарегистрированных системой ОДР из плоско-слоистой стохастической среды, с меняющимся показателем поглощения.

В разделе 1.4 приведены результаты расчетов зависимости усредненной интенсивности принимаемого сигнала от длины траектории фотонов (форма импульса) для однородной и неоднородной сред с целью сопоставления результатов моделирования с профилем импульса, рассчитанным из аналитической формулы (рисунок 1). Цифрами на графике обозначены: 1 – однородная среда (теория) для $d=10$ мм; 2 – однородная среда

(моделирование) для $d=10$ мм; 3 – неоднородная среда (моделирование) для $d=10$ мм; 4 – однородная среда (теория) для $d=28$ мм; 5 – однородная среда (моделирование) для $d=28$ мм; 6 – неоднородная среда (моделирование) для $d=28$ мм; 7 – однородная среда (теория) для $d=40$ мм; 8 – однородная среда (моделирование) для $d=40$ мм; 9 – неоднородная среда (моделирование) для $d=40$ мм. Временные профили принимаемого сигнала ОДР, рассчитаны для

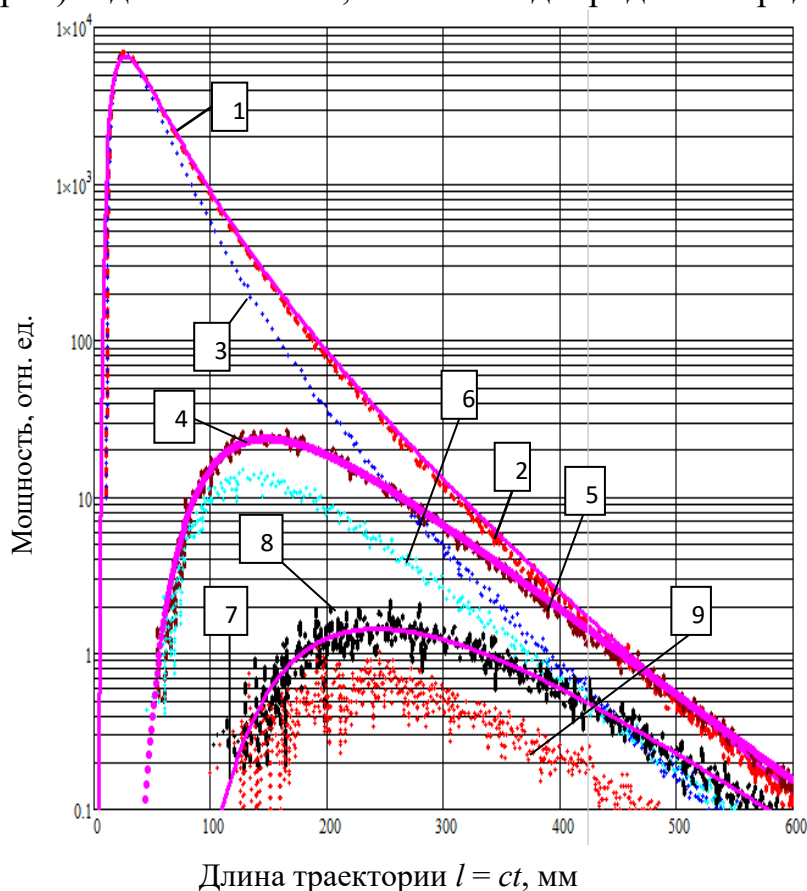


Рисунок 1. Зависимость усредненной интенсивности принимаемого сигнала от длины траектории фотонов (форма импульса).

неоднородной среды с глубиной залегания поглощающего слоя $z_l=5$ мм. Сравнение с профилем импульса, рассеянного однородной средой, показывает, что неоднородное распределение поглощения существенно влияет на форму принимаемого импульса: из-за повышенного поглощения импульс становится менее размытым. При $d=10$ мм наличие сильно поглощающего слоя приводит изменению только заднего фронта импульса. При $d=28$ мм уменьшается мощность в максимуме и на заднем фронте, а сам максимум смещается влево, то есть происходит наиболее сильное искажение формы импульса. При $d=40$ мм снижается общий уровень сигнала. Это может объясняться тем, что при $d=10$ мм основная часть траекторий фотонов не проникает в сильно поглощающий слой, и только самые длинные траектории испытывают на себе повышенное поглощение, при $d=28$ мм средняя часть банановидной области чувствительности попадает в поглощающий слой, а при $d=40$ мм через этот слой проходят начальные и конечные участки практически всех траекторий.

При этом численный расчет функции распределения по глубине z в неоднородной среде показывает, что искажение ее формы по сравнению с однородной средой максимально тогда, когда её максимум лежит именно на глубине залегания поглощающего слоя.

В **разделе 1.5** выполнена оценка эффективных (усредненных) показателей поглощения и транспортного рассеяния неоднородной среды в зависимости от расстояния. Изменяя расстояние между импульсным источником и приемником, можно по форме принимаемого импульса оценить эффективные параметры рассеивающей среды с помощью формул получаемых из [16]. В заключительном **разделе 1.6** первой главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого исследования.

Во **второй главе** проведено исследование энергетических характеристик сигналов в плоском волноводе с шероховатыми границами. Численное моделирование в данном случае также проводилось методом Монте-Карло.

В **разделе 2.1** описаны условия, параметры и геометрия задачи распространения сигналов в плоском волноводе. Описан алгоритм моделирования численным методом Монте-Карло для данной задачи [23-25]. Показано, что предлагаемая методика дает возможность численно рассчитать среднее значение плотности энергии излучения в окрестности точки наблюдения.

В разделе 2.2 представлены результаты численного счета. Параметры волновода были выбраны соответствующими распространению высокочастотного звука в мелком море. Проведено сравнение результатов точного расчёта методом мнимых источников с учётом интерференции прямой и отражённых волн с полученными в корпускулярном приближении методом Монте-Карло для гладкого волновода. Сравнение показало, метод численного расчёта может быть успешно применён и для расчёта пространственно усреднённых энергетических характеристик волнового поля в волноводе с шероховатыми границами. Рассчитана зависимость средней плотности энергии от расстояния в волноводе с различной степенью шероховатости границ. На рисунке 2 приведена зависимость от нормированного на $\langle l \rangle$ - среднюю длину свободного пробега горизонтального расстояния d между источником и точкой наблюдения, величины, пропорциональной пространственно усреднённой плотности энергии w . В данной модели предполагается, что средняя горизонтальная длина свободного пробега приближенно равна среднему горизонтальному размеру неровностей и значительно превосходит длину волны излучения.

Выполненные численные расчёты показывают наличие ослабляющего влияния неоднородностей границ на усреднённое значение плотности энергии излучения в волноводе.

Получено распределение средней плотности энергии в поперечном сечении волновода для различных расстояний между источником и приемником. Пунктирными линиями отображены зависимости, полученные при $\lambda=0.001\langle l \rangle$, а сплошными без учёта дифракции ($\lambda \rightarrow 0$). (рисунок 3).

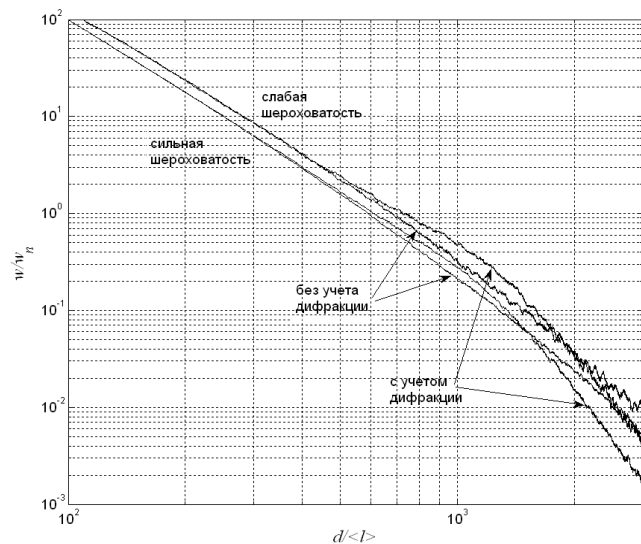


Рисунок 2. Зависимость средней плотности энергии от расстояния в волноводе с различной степенью шероховатости границ.

Видно, что распределение по высоте средней плотности энергии является заметно неравномерным. Для него характерно вызванное затенениями уменьшение энергии излучения при приближении области регистрации к границам волновода.

В заключительном разделе 2.3 второй главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого исследования.

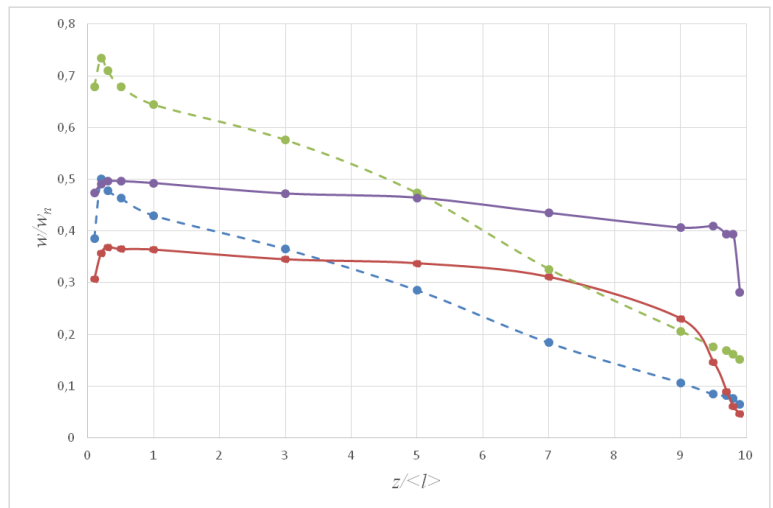


Рисунок 3. Распределение средней плотности энергии в поперечном сечении волновода на расстоянии $d=1000\langle l \rangle$.

В третьей главе проведено исследование мощности (формы) принимаемых импульсов от времени при распространении импульсного излучения внутри плоского волновода с шероховатыми границами. Предлагается численный алгоритм расчета зависимости от времени принимаемой энергии первоначально короткого импульса при некогерентном отражении от шероховатых стенок плоского волновода методом Монте-Карло.

В разделе 3.1 приведена постановка задачи, проведён теоретический анализ и уточнен алгоритм численного расчета. Выполнен численный расчет формы однократно отраженного импульса.

В разделе 3.2 приведены результаты численного моделирования для данной задачи. Выявлено хорошее соответствие выполненного численного расчета формы однократно отраженного импульса с полученной теоретической зависимостью [26] (рисунок 4). По горизонтальной оси отложена величина $ct/\langle l \rangle$, где $\langle l \rangle$ определяется, как в главе 2, а по вертикальной — в логарифмическом масштабе принимаемая энергия,

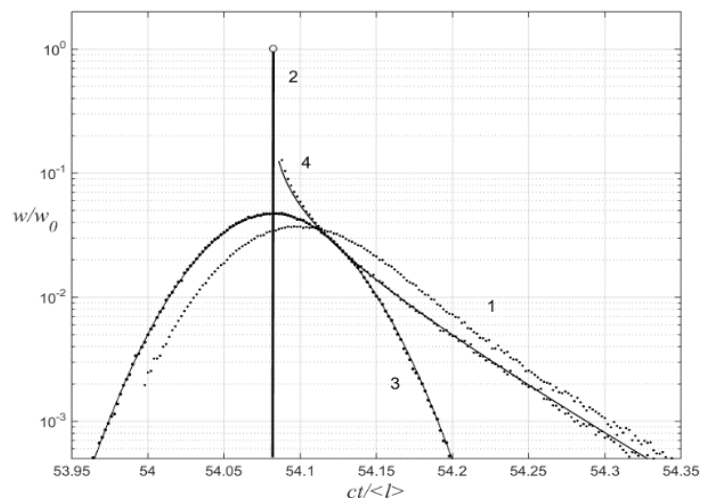


Рисунок 4. Форма однократно отраженного импульса.

нормированная на значение, соответствующее гладкому плоскому волноводу. Источник и область наблюдения расположены на одинаковом расстоянии $h = 15<l>$ от одной из границ волновода на расстоянии $d = 45<l>$ друг от друга (в соответствии с рисунком 4). Кривая 1 соответствует разбросу по высоте неоднородностей $\sigma_h = 0.035<l>$, и разбросу по углу в вертикальной плоскости $\sigma_\alpha = 0.035$, 2 – гладкой поверхности волновода, кривые 3 и 4 – $\sigma_\alpha = 0$ и $\sigma_h = 0$ соответственно. Из рисунка 4 видно хорошее соответствие теоретических (сплошные линии) и численных (точки) результатов, что позволяет сделать вывод о правильности выбора алгоритма расчета методом Монте-Карло.

На рисунке 5 приведен результат численного расчета принимаемого сигнала в случае горизонтального удаления приёмника от источника на расстояние $200<l>$. При расчете выбраны следующие значения параметров задачи: высота волновода

– $30<l>$, источник расположен в середине, приёмник сдвинут к одной из границ на $5<l>$, $\sigma_h = 0.035<l>$, $\sigma_\alpha = 0.035$, излучаемая мощность равномерно распределена по углу в вертикальной плоскости в интервале 0.6 радиан от горизонта. По вертикальной оси отложена плотность энергии в точке

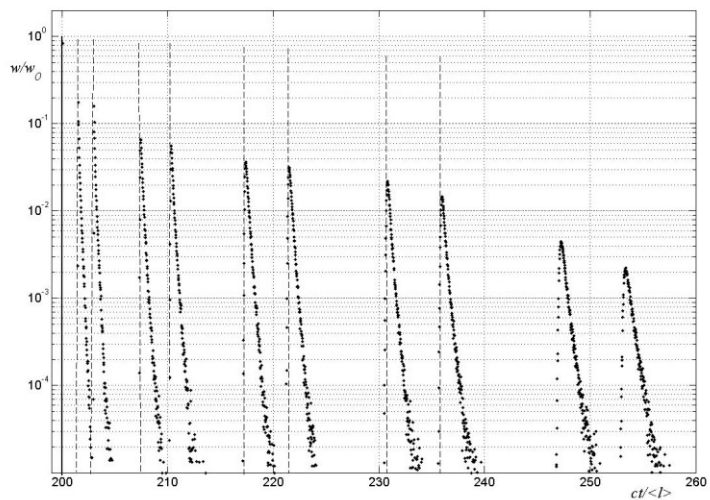


Рисунок 5. Многократно отраженные импульсы.

наблюдения, нормированная на значение для прямой волны в середине волновода на том же горизонтальном расстоянии от источника. Как видно из рисунка 5 принимаемый сигнал состоит из прямой волны ($ct \approx 200<l>$) и пяти пар отраженных импульсов. Время прихода передних фронтов первых четырех близко к времени прихода импульсов в гладком волновод. Первая пара соответствует однократно отраженным импульсам, вторая – двукратно и т.д. Различие времён прихода импульсов в паре обусловлено смещением приёмника относительно центральной плоскости волновода. Ограничение числа принимаемых импульсов в гладком волновод определяется шириной диаграммы направленности излучателя в вертикальной плоскости. Флуктуации углов отражения от шероховатых стенок приводят к эффективному расширению диаграммы направленности излучателя и появлению «дополнительных» пар импульсов с большей кратностью отражения и с большими запаздываниями, два из которых видны на рисунке 5.

Полученные результаты при многократно отраженном импульсе показали влияние затенения приёмника от источника неровностями близко расположенной к приёмнику границы. Подробно проанализирован эффект

влияния затенений в зависимости расстояния точки наблюдения от средней плоскости границы волновода.

В четвертой главе проведен анализ энергетического спектра задержек для радиоволн, распространяющихся в городской среде. Для теоретического расчёта усреднённых по достаточно большому району города характеристик принимаемого сигнала можно использовать статистическую модель городской застройки [27].

В разделе 4.1 проведен точный аналитический расчёт энергетического спектра задержек однократно отражённых волн в рамках упрощённой двумерной статистической модели городской застройки.

В разделе 4.2 описаны особенности алгоритма численного метода Монте-Карло, разработанного для численного расчета энергетического спектра задержек. Приведена оценка адекватности алгоритма, для чего приведены результаты численного расчёта по полной (трёхмерной) программе в ситуации, максимально приближенной к рассмотренному выше двумерному случаю.

В разделе 4.3 проведено исследование влияния многократно отраженных волн на энергетический спектр задержек для случая низко расположенного источника ($z_{ист}=0.02$).

В разделе 4.3.1 проведено сравнение рассчитанные формы импульсов при двух расстояниях d между источником и приёмником: $d=3\langle l \rangle$ и $d=9\langle l \rangle$, где $\langle l \rangle = l/\gamma_0$ - длина свободного пробега соответствующая в данном случае средней дальности прямой видимости, γ_0 - декремент затухания, обусловленный затенениями. В процессе численных расчётов полагается $\langle l \rangle = 1$, а все остальные расстояния выражаются в единицах длин свободного пробега. В качестве аргумента удобно выбрать величину $Z = \xi/\langle l \rangle$, где $\xi = r + \tilde{r} - d$ - разность хода между прямым сигналом r и отражённым сигналом $\tilde{r}$. Для каждого расстояния расчёты выполнялись в двух случаях: при одинаковых размерах городских зданий, указанных выше, и при случайном распределении высот и толщин зданий с теми же средними значениями и со стандартами $\sigma_h=0.07$ и $\sigma_w=0.02$. Полученный энергетический спектр задержек w , нормирован на значение w_0 в его максимуме. Кроме того, при расчётах рассматривались две длины волны радиоизлучения: $\lambda=0.002$ ($kl_B=20$) – дециметровый диапазон, и $\lambda=0.0003$ ($kl_B=140$) – сантиметровый диапазон. На расстоянии 3 длины свободного пробега вид энергетического спектра задержек одинаков для двух рассматриваемых длин волн и не зависит от флуктуаций высоты и толщины зданий (синяя линия на рисунке 6). На расстоянии 9 длин свободного пробега результаты в сантиметровом диапазоне также не зависят от флуктуаций высоты и толщины зданий и практически совпадают с результатами дециметрового диапазона при одинаковых зданиях (оранжевая линия на рисунке 6). Флуктуации высоты и толщины зданий приводят в дециметровом диапазоне к расширению принимаемого импульса (точки и линия розового цвета на рисунке 6). Для сравнения на этом рисунке

чёрным пунктиром показан энергетический спектр задержек, рассчитанный при учёте только однократно отражённых частиц в случае одинаковых зданий.

Сравнение графиков на рисунке 6 показывает, что при прочих равных условиях усреднённый принимаемый импульс расширяется с увеличением расстояния между приёмником и областью регистрации. Влияние флуктуаций высоты и толщины зданий усиливается с увеличением длины волны за счёт увеличения влияния дифракции на крыше при случайном уменьшении высоты зданий. При учёте многократных отражений энергетический спектр задержек заметно расширяется.

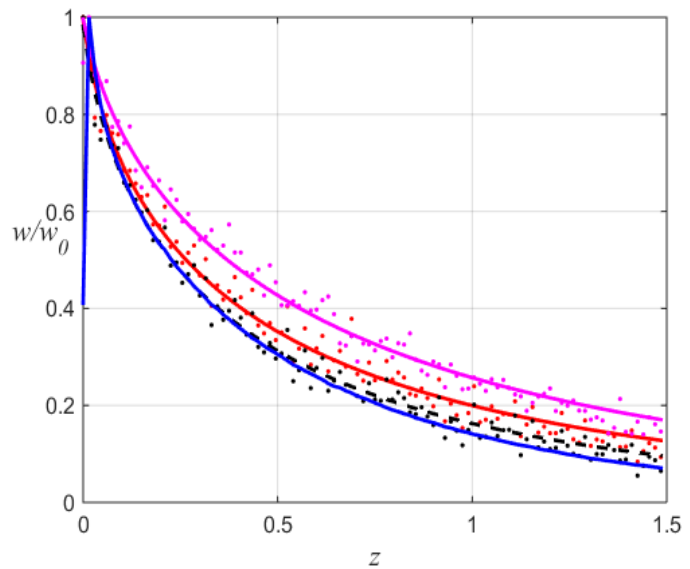
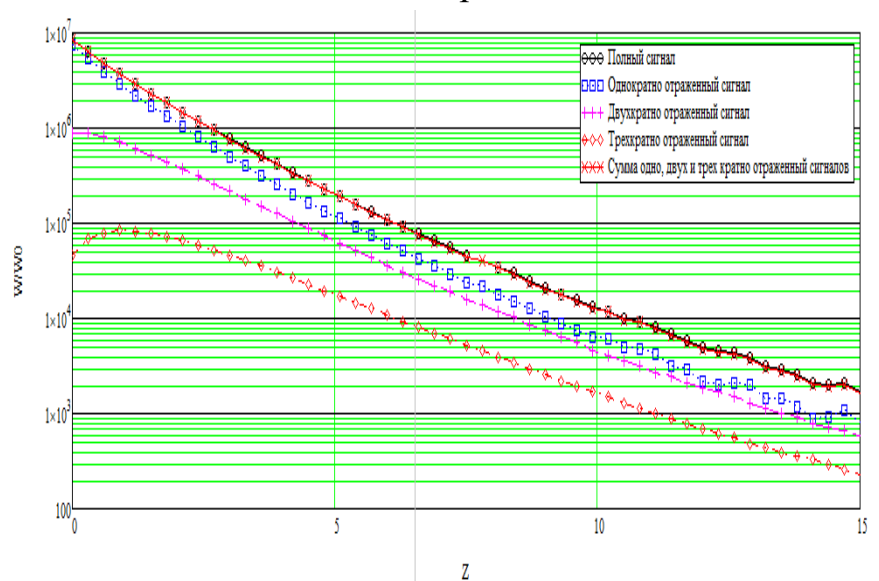


Рисунок 6. Энергетический спектр задержек при низко расположенных источнике и приёмнике.

В разделе 4.3.2 проведен анализ вклада в принимаемый сигнал частиц, отраженных разное количество раз. На рисунке 7 изображены: полный сигнал и сигналы, учитывающие только однократно, двукратно и трехкратно отраженные частицы на входе приемника для длины волны $\lambda=0.002$ ($kl_B=20$) при коэффициенте отражения от стен по мощности, равном 0.1.

Из рисунка видно, что полный сигнал и сумма одно-, двух- и трехкратно отраженных сигналов практически полностью совпадают. Это означает, что вклад отраженных более трёх раз сигналов незначителен.



В разделе 4.3.3 проанализировано влияние многократно отраженных волн на ширину сигнала в

Рисунок 7. Полный сигнал однократно, двукратно и трехкратно отраженные сигналы и их сумма для $d=8$ $\sigma_h=0.05$.

зависимости от расстояния между источником и приемником. Из расчетов следует, что количество двукратно и трехкратно отраженных волн существенно превосходит число однократно отраженных волн.

Рассмотрена зависимость ширины энергетического спектра задержек от расстояния между пунктами связи. Получено, что при увеличении d результаты вычислений приближаются к экспоненциальным зависимостям, кроме того проявляется эффект «насыщения», то есть. при увеличении расстояния скорость расширения импульса сильно уменьшается.

Так же показано достаточно хорошее совпадения двумерной теории и трёхмерного расчёта при $d=8$. При увеличении расстояния d трёхмерный расчет и двумерная модель дают сильно отличающиеся результаты. Это связано, видимо, с влиянием шероховатости стен зданий и явлением дифракции волн на крышах городских строений конечной высоты, что приводит к значительному расширению импульса.

В разделе 4.3.4 проведено исследование влияния случайных отклонений высоты зданий от среднего значения для случая низко расположенного источника. Подтверждено, что энергетический спектр задержек расширяется с увеличением расстояния между источником и приемником

В разделе 4.3.5 проведено исследование влияния коэффициента отражений от стен зданий на ширину энергетического спектра задержек. Получено, что при увеличении коэффициента отражения от зданий энергетический спектр задержек уширяется из-за увеличения вклада двукратно и трехкратно отраженных частиц, максимумы энергетических спектров которых смещены в сторону больших задержек.

В разделе 4.4 проведено исследование ширины энергетического спектра задержек для случая высоко расположенного источника. Расчёты показывают, что при подъёме источника выше крыш городских зданий при прочих равных условиях энергетический спектр задержек заметно расширяется. При этом расчёты показали, что в случае высокорасположенного источника зависимости энергетического спектра задержек от расстояния между источником и приемником, от отклонения зданий по высоте и от коэффициента отражения от зданий демонстрируют качественно такие же закономерности, как и в случае низкорасположенного источника.

Для проведения оценки ширины энергетического спектра задержки на уровне 0.5 в зависимости от расстояния между источником и приемником построены энергетические спектры задержек (рисунок 8) при положении источника $z_{ист}=0.3$, длина волны $\lambda=0.002$, высота зданий $h=0.2$, отклонения зданий по высоте $\sigma_h=0.000005$. Для расстояний $d=8$ и $d=16$ такую оценку можно провести, используя результаты численного расчёта, а для остальных кривых $d=24$, $d=32$, $d=40$ проведена аппроксимация методом наименьших квадратов.

На рисунке 9 приведена оценка ширины энергетического спектра на уровне 0.5 от расстояния между источником и приемником. График показывает, что в данном случае, как и при низко расположенном источнике, ширина энергетического спектра задержек монотонно возрастает с ростом расстояния. При этом скорость роста довольно быстро убывает, и кривая зависимости приближается к горизонтальной линии.

В разделе 4.5 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого исследования.

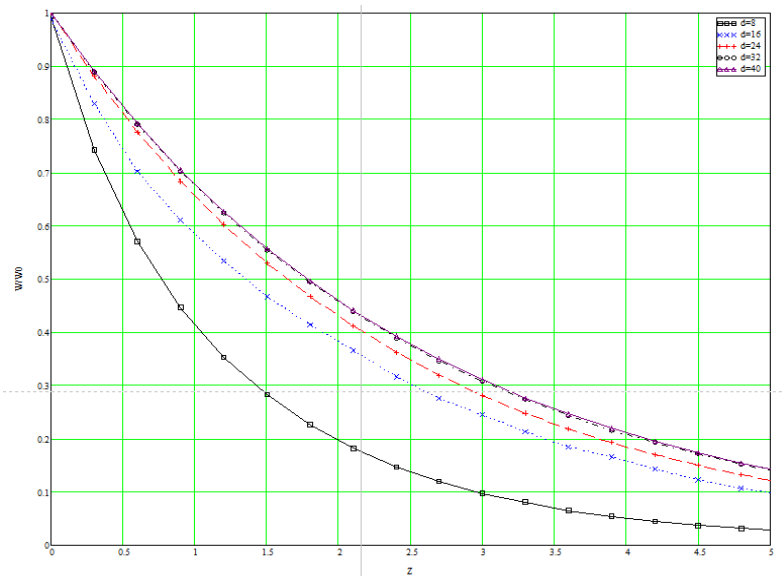


Рисунок 8. Энергетический спектр задержек.

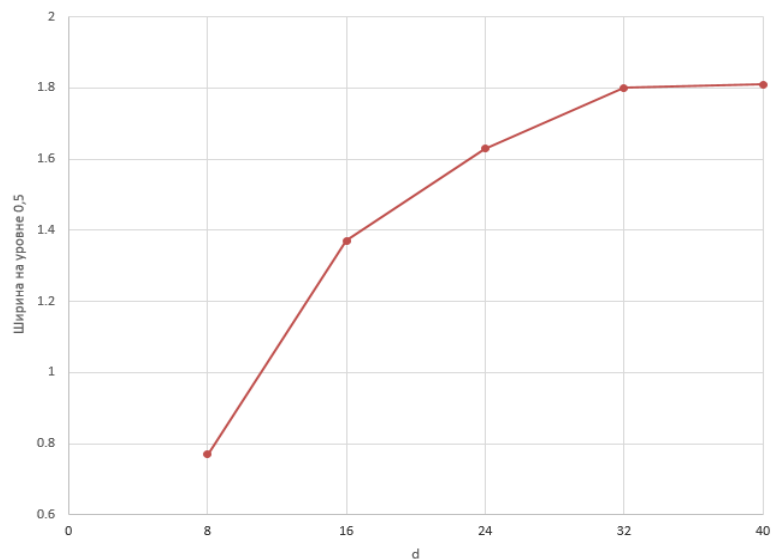


Рисунок 9. Зависимость ширины энергетического спектра на уровне 0.5 от расстояния между источником и приемником.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В диссертации предложен и апробирован при решении различных задач метод численного расчёта временных и энергетических характеристик сигналов при многократном рассеянии волн в хаотических средах и системах, основанный на статистическом моделировании Монте-Карло с использованием корпускулярного представления волнового поля.

2. Выполненное численное моделирование позволяет выяснить, что при освещении сильно рассеивающей среды со слоисто неоднородным распределением показателя поглощения направленным пучком света форма принимаемого первоначально короткого зондирующего импульса сильнее всего искажается по сравнению с однородным случаем тогда, когда наиболее вероятные траектории фотонов, формирующих принимаемый сигнал, проходят внутри слоя с повышенным поглощением. В результате чего удаётся предложить схему диагностики областей биологических тканей с повышенным кровенаполнением по данным времяразрешенной диффузионной рефлектометрии.

3. Наличие шероховатостей граничных поверхностей плоского волновода приводит к заметному ослаблению пространственно усреднённого по области регистрации принимаемого сигнала на достаточно больших расстояниях от источника, обусловленному расширением углового спектра отражённого от границ излучения и следующего из этого увеличения кратности отражения волн, пришедших в область регистрации и испытавших потери энергии при каждом отражении. Кроме того, увеличиваются объёмные потери энергии в среде, заполняющей волновод, при возрастании пути, пройденного многократно отражёнными волнами.

4. При распространении короткого импульса в плоском волноводе с плавно шероховатыми границами принимаемый сигнал на достаточно большом расстоянии от источника представляет собой серию импульсов различной кратности отражения. Их ширина возрастает с увеличением флуктуаций высот и углов наклона неровностей границ волновода. Флуктуации углов отражения волн от шероховатых стенок приводят к эффективному расширению диаграммы направленности излучателя и появлению вследствие этого «дополнительных» по сравнению с гладким волноводом принимаемых импульсов с более большой кратностью отражения и более большим запаздыванием. С увеличением кратности отражения форма заднего фронта импульса приближается к экспоненциальной и ширина импульса возрастает, причём для дополнительных импульсов это происходит быстрее.

5. При распространении радиоволн в городских условиях многократные отражения от стен зданий приводят к расширению усреднённого энергетического спектра задержек первоначально короткого импульса, принимаемого мобильным устройством. Ширина энергетического спектра задержек увеличивается при подъёме передатчика над крышами домов, при

увеличении горизонтального расстояния между пунктами связи, при усилении флуктуаций высоты зданий и при увеличении коэффициента отражения от стен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. Ч.2. - М.: Наука, 1978 463 с.
2. Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. - М.: Наука, 1977 170 с.
3. Кляцкин В.И. Стохастические уравнения и волны в случайно неоднородных средах. М: Наука, 1980, с. 337.
4. Кандидов В.П. Метод Монте-Карло в нелинейной статистической оптике // УФН. 1996. Том. 166.
5. Dremir V. V., Dunaev A. V. How the melanin concentration in the skin affects the fluorescence-spectroscopy signal formation // J. Opt. Technol. 2016. T. 83. № 1. с. 43.
6. Kinnunen M.T., Popov A.P., Plucinski J., Myllyla R.A., Priezzhev A.V. Measurements of glucose content in scattering media with time-of-flight technique: comparison with Monte Carlo simulations // SPIE Proc. 2004. Vol. 5474. pp. 181-191.
7. Torricelli A., Pifferi A., Taroni P., Giambattistelli E., Cubeddu R. In vivo optical characterization of human tissues from 610 to 1010 nm by time-resolved reflectance spectroscopy // Phys. Med. Biol. 2001. Vol. 46. pp. 2227-2237.
8. Kienle A., Linge L., Patterson M.S., Hibst R., Steiner R., Wilson B.C. Spatially resolved absolute diffuse reflectance measurements for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue // Appl. Opt. 1996. Vol. 35. pp. 2304-2314.
9. Hillman E.M. Optical brain imaging in vivo: techniques and applications from animal to man // J Biomed Opt. 2007. Vol. 12.
10. Obrig H., Villringer A. Beyond the Visible—Imaging the Human Brain With Light // J Cereb Blood Flow Metab. 2013. Vol. 23.
11. Chance B., et al. Comparison of time-resolved and -unresolved measurement of deoxyhemoglobin in brain // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1988. Vol. 85. pp. 4971-4975.
12. Welch A.J., J.C. van Gemert, Star W.M., Witson B.C. Definitions and Overview of Tissue Optics // In: Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue / Ed. by A. J. Welch M.J.C.V.G. New York: Plenum Press, 1995. pp. 15-46.
13. Yoo K.M., Liu F., Alfano R.R. Biological materials probed by the temporal and angular profiles of the backscattered ultrafast laser pulses // J. Opt. Soc. Am. B. 1990. Vol. 7. pp. 1685-1693.
14. Twersky V. Absorption and multiple scattering by biological suspensions // J. Opt. Soc. Am. 1970. Vol. 60. pp. 1084-1093.
15. Kumar D., Srinivasan R., Singh M. Optical characterization of mammalian tissues by laser reflectometry and Monte Carlo simulation // Medical Engineering & Physics. 2004. Vol. 26. pp. 363-369.
16. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Москва: Мир, 1981.

17. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985.
18. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. Саратов: Саратовский университет, 1998.
19. Тучин В.В. Импульсная и частотно-фазовая аппаратура для спектроскопии и imaging ткани. Москва: Физматлит, 2004.
20. Luo Q., Nioka B., Chance B. Functional Near-Infrared Imager. In: Chance B, Alfano R (eds) Optical tomography and spectroscopy of tissue: theory, instrumentation, model, and human studies II // SPIE Proc. 1997. No. 2979. pp.84-93.
21. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1976.
22. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. Москва: Наука, 1982.
23. Белоногов С.Ю., Гавриленко В.Г., Джандиери Г.В., Джандиери В.Г. Численное моделирование рассеяния волн на объектах конечной высоты, хаотически распределенных по плоскости // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Vol. 14. No. 8. pp. 27-33.
24. Белоногов С.Ю., Гавриленко В.Г., Котельникова М.В., Яшнов В.А. Моделирование распространения радиоволн в городских условиях методом Моте-Карло с учетом эффектов дифракции // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Vol. 15. No. 8. pp. 16-20.
25. Белоногов С.Ю., Гавриленко В.Г., Котельникова М.В., Яшнов В.А. Моделирование методом Монте-Карло многократного рассеяния волн на шероховатой поверхности при скользящем распространении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Vol. 16. No. 8. pp. 26-32.
26. Караев В.Ю., Мешков Е.М. Измерение высоты значительного волнения в широкой полосе обзора радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны // Исследования Земли из космоса. 2012. No. 8. pp. 8-18.
27. Пономарев Г.А., Куликов А.М., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе. 1991. Томск: Радио.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. Белоногов С. Ю., Гавриленко В. Г., Жуков М. С., Яшнов В. А. «Моделирование методом Монте-Карло распространения волн в плоском волноводе с шероховатыми границами» // Журнал «Электромагнитные волны и электронные системы» №8 2013г. с.24-29.

А2. Гавриленко В. Г., Жуков М. С., Сергеева Е. А. «Восстановление оптических характеристик неоднородной мутной среды на основании данных времязрешенной диффузионной рефлектометрии: исследование методом Монте-Карло» // Журнал «Оптика и спектроскопия» т.116, С-Петербург, 2014г. №1, с.157-164.

А3. Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Жуков С.Н., Яшнов В.А. «Численный расчет временных характеристик импульсного сигнала в плоском волноводе с шероховатыми границами» // Журнал Известия высших учебных заведений. Физика, раздел Распространение радиоволн, Томск, 2016г. том 59, №12/3 с. 148-152.

А4. Гавриленко В.Г., Жуков С.Н., Жуков М.С., Яшнов В.А. «Аналитический расчёт и численное моделирование временных характеристик короткого импульса при его распространении в плоском волноводе с шероховатыми границами» // Известия вузов. Радиофизика, Том LX, № 7 2017г. с 609-616.

А5. Гавриленко В.Г., Жуков С.Н., Жуков М.С., Яшнов В.А. «Аналитический расчёт и Монте-Карло моделирование изменения формы короткого радиоимпульса при рассеянии в городских условиях» // Известия вузов. Радиофизика, Том LXII, № 4 2019г. с 297-308.

А6. Жуков М.С., Сергеева Е.А. «Численное моделирование оптической диффузионной рефлектометрии для задач функционального имиджинга живых объектов» // Труды XIV научной конференции по радиофизике, посвященная 80-й годовщине со дня рождения Ю.Н. Бабанова, Нижний Новгород, 2010г., с.175-176.

А7. Гавриленко В.Г., Жуков М.С. Численный анализ характеристик многократного рассеяния сигнала в хаотической среде с неоднородным поглощением // Труды XV научной конференции по радиофизике, посвященная 110-й годовщине со дня рождения А.А. Андропова, Нижний Новгород, 2011 г., с. 49-50.

А8. Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Сергеева Е.А. «Исследование влияния неоднородностей поглощения на форму импульса и траектории движения фотонов в мутной среде методом Монте-Карло» // Труды XVI научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А. Н. Бархатова, Нижний Новгород, 2012г., с. 72-73.

А9. Белоногов С.Ю., Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Яшнов В.А. «Численный расчет энергетических характеристик излучения источника в плоском волноводе с шероховатыми границами» // Труды XVII научной

конференции по радиофизике, посвященная 100-летию со дня рождения В. С. Троицкого, Нижний Новгород, 2013г., с. 66-67.

А10. Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Яшнов В.А. «Распространение импульсного сигнала в плоском волноводе с шероховатыми границами» // Труды XVIII научной конференции по радиофизике, посвященная Дню радио, Нижний Новгород, 2014г., с.62-63.

А11. Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Яшнов В.А. «Анализ многократной дифракции волн методом Монте-Карло» // Труды XVIII научной конференции по радиофизике, посвященная Дню радио, Нижний Новгород, 2014г., с. 64-65.

А12. Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Жуков С.Н., Яшнов В.А. «Численное моделирование распространения короткого импульса в городской застройке» // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород 2016, с.76-77

А13. Гавриленко В.Г., Жуков М.С., Жуков С.Н., Яшнов В.А. «Моделирование распространения импульсного сигнала в плоском волноводе с шероховатыми границами методом Монте-карло» // Доклад на XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований, 3-9 июля 2016 года, Томск

А14. В.Г. Гавриленко, С.Н. Жуков, М.С. Жуков, В.А. Яшнов «Моделирование методом Монте-Карло распространения короткого радиоимпульса в городских условиях» // VIII Всероссийские Армандовские чтения, Секция «Теоретические и прикладные вопросы распространения и дифракции волн» г. Муром, 2018г.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1 Восстановление оптических характеристик неоднородной мутной среды на основании данных времяразрешенной диффузионной рефлектометрии

Введение к главе 1

1.1 Метод оптической диффузионной рефлектометрии для неинвазивной функциональной диагностики биологических тканей

1.1.1 Особенности распространения оптического излучения в биотканях

1.1.2 Метод оптической диффузионной рефлектометрии. Основные принципы

1.1.3 Применение метода ОДР для функционального имиджинга биотканей

1.1.4 Проблемы метода ОДР и способы их решения

1.2 Теоретический анализ распространения оптического излучения в сильно рассеивающей и поглощающей среде

1.2.1 Теория переноса излучения

1.2.2 Диффузионное приближение теории переноса излучения для стационарных и импульсных источников

1.2.3 ОДР с непрерывным источником. Область наиболее вероятных траекторий

1.2.4 ОДР с импульсным источником. Характеристики рассеянного импульса

1.3 Монте-Карло моделирование сигналов ОДР из среды с неоднородным по глубине поглощением

1.4 Результаты численного расчета формы импульса и функции распределения

1.5 Восстановление эффективных оптических параметров неоднородной среды

1.6 Выводы по главе 1

Глава 2 Исследование методом Монте-Карло энергетических характеристик сигналов в плоском волноводе с шероховатыми границами.

Введение к главе 2

2.1 Статистическое моделирование рассеяния сигналов в плоском волноводе с шероховатыми границами

2.2 Результаты численного счета в плоском волноводе с шероховатыми границами

2.3 Выводы по главе 2

Глава 3. Аналитический расчет и численное моделирование временных характеристик короткого импульса при распространении в плоском волноводе с шероховатыми границами

Введение к главе 3

3.1 Постановка задачи, теоретический анализ и алгоритм численного расчета характеристик короткого импульса при распространении в плоском волноводе с шероховатыми границами

3.2 Результаты численных расчетов характеристик короткого импульса при распространении в плоском волноводе с шероховатыми границами

Глава 4 Численное моделирование распространения импульсного сигнала в условиях городской застройки

Введение к главе 4

4.1 Постановка задачи и теоретический анализ

4.2 Алгоритм численного моделирования и проверка его адекватности

4.3 Численный расчет энергетического спектра задержек для случая низко расположенного источника

4.3.1 Исследование влияния многократно отраженных волн на энергетический спектр задержек

4.3.2 Анализ вклада многократно отраженных волн в полный сигнал

4.3.3 Анализ количества многократно отраженных волн и их влияние на ширину полного сигнала в зависимости от расстояния между источником и приемником

4.3.4 Исследование влияния случайных отклонений высоты зданий от среднего значения для случая низко расположенного источника

4.3.5 Исследование влияния коэффициента отражений от стен зданий на ширину энергетического спектра задержек

4.4 Исследование ширины энергетического спектра задержек для случая высоко расположенного источника

4.5 Выводы по главе 4

Заключение

Список литературы