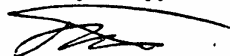


На правах рукописи



ТИУНОВ Павел Сергеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Гладышев Владимир Олегович

Официальные оппоненты: **Измайлов Георгий Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры физики

Левин Сергей Федорович,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Московский институт экспертизы и испытаний», проректор по учебной и научной работе

Ведущая организация: Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в __ час. 00 ми заседании диссертационного совета Д212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: Мс Рубцовская наб., 2/18, ауд. 1006 л.

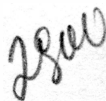
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Аттетков



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования в области оптики движущихся сред берут свое начало более века назад. За это время были открыты эффекты К. Доплера, Г. Саньяка, Л. Физо и Э. Ферми. Опыты по обнаружению эффектов оптики движущихся сред неоднократно повторялись в работах А.А. Белопольского, Г.Р. Билгера, В.К. Стовела, О.Г. Загороднова, Я.Б. Файнберга и др. На эффектах оптики движущихся сред основывается работа устройств по измерению относительной скорости движения макроскопических тел и движущихся сред, температуры различных газов, углов поворота и угловых скоростей движения и др. Эффекты оптики движущихся сред необходимо учитывать в задачах регистрации гравитационных волн, локации, навигации и передачи данных для различных летательных аппаратов, проектирования лазерных гироскопов и др.

Основой для математического моделирования оптических систем с движущимися элементами на данный момент является аппарат электродинамики движущихся сред, предложенный А. Эйнштейном и развитый в работах Д.И. Еропкина, К. Ландекера, Б.М. Болотовского и С.Н. Столярова. В работе используются результаты, полученные А.Н. Морозовым по математическому моделированию процесса распространения электромагнитного излучения в оптических системах. Вследствие повышения точности измерения оптическими устройствами возникает необходимость более точного учета эффектов оптики движущихся сред при их математическом моделировании. Для этого часто ограничиваются приближением постоянства скорости движения среды вдоль всей траектории волнового вектора электромагнитного излучения. Причем для многих оптических устройств данное условие не выполняется. Также важно отметить, что современный аппарат электродинамики движущихся сред экспериментально подтвержден лишь в частных случаях для относительно простых конфигураций оптических систем с относительно простыми законами движения, что приводит к необходимости более детального исследования эффектов оптики движущихся сред в сложных случаях движения среды и при сложных конфигурациях оптических систем. Экспериментальные данные, подтверждающие корректность аппарата электродинамики движущихся сред в общем трехмерном случае, на данный момент отсутствуют.

В связи с развитием метрологических процедур, используемых в оптических устройствах, основанных на эффектах оптики движущихся сред, возникают новые задачи, связанные с обработкой экспериментального сигнала. Рост степени стандартизации измерительных устройств в совокупности с ростом числа вариаций измерительных процедур приводит к необходимости создания новых математических методов для выделения измеряемого сигнала из экспериментально полученных данных. Наличие движущихся оптических элементов в интерферометре при выполнении пространственных измерений сдвига интерференционной картины приводит к ухудшению контраста интерференционной картины вследствие движения элементов и, следовательно, к снижению точности измерений. Временные измерения в таком случае помогают избежать потери контраста интерференционной картины и точности определения ее сдвига. Использование таких комплексных подходов к измерению увеличивает сложность задач выделения измеряемого сигнала. Для их решения привлекаются математические методы фильтрации, оптимизации, преобразований функций и статистики. Точность косвенных измерений напрямую зависит от выбранного метода обработки данных. Требования к высокой точности измерений сдвига интерференционной картины приводят к необходимости использования численных методов для обработки сигнала, например, метода Якоби-Ангера.

Цель проведенных исследований – разработка математической модели и комплекса программ для расчета процесса распространения электромагнитного излучения в оптических системах, содержащих движущиеся элементы с заданными распределениями скорости и показателя преломления среды.

Задачи исследования:

1. Разработка математической модели процесса распространения электромагнитного излучения в движущейся среде с трехмерным полем скоростей среды и программного комплекса на ее основе.
2. Проведение вычислительных экспериментов для различных оптических схем и сравнение результатов вычислительных и натурных экспериментов.

3. Разработка метода обработки временных интерферограмм и программного комплекса на основе разработанного метода, работающего в режиме реального времени.

Методы исследования. При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертационной работы, использовались различные математические методы: трассировки лучей, оптимизации, выделения полезного сигнала, интегральных преобразований и вычислительной математики.

Достоверность результатов проведенных исследований гарантируется строгостью используемого математического аппарата и сравнением результатов вычислительных экспериментов с известными результатами других авторов в частных случаях, полученными в рамках исследования оптики движущихся сред и физики атмосферы. Достоверность результатов обработки экспериментальных данных с помощью метода, основанного на разложении Якоби-Ангера, подтверждается выполнением калибровки интерферометра по исследованию трехмерного эффекта Физо с помощью данного метода и сравнением зависимости сдвига интерференционных полос от скорости вращения диска с теоретическими оценками. Полученные экспериментальные результаты и их анализ свидетельствуют о том, что теоретический аппарат электродинамики движущихся сред имеет высокую степень точности.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработанная математическая модель, позволяющая рассчитывать характеристики электромагнитного излучения, распространяющегося в оптических системах с заданием поля скоростей среды и распределения диэлектрической проницаемости оптических элементов.

2. Результаты вычислительных экспериментов, устанавливающие специфические особенности процесса распространения электромагнитного излучения в атмосфере Земли с учетом ее движения и наличия турбулентностей.

3. Разработанные методы обработки сигналов, полученных в интерферометрах с движущимися элементами, позволяющие увеличить отношение «сигнал-шум» при измерении сдвига интерференционной картины.

Практическая значимость настоящего исследования состоит в том, что разработанная математическая модель позволяет оптимизировать схемы интерферометров с различными оптическими элементами, учитывая заданные распределения диэлектрической проницаемости и поля скоростей среды. Разработанный программный комплекс может быть использован как при математическом моделировании фундаментальных физических экспериментов, так и при решении прикладных задач, связанных с проектированием оптических устройств, содержащих движущиеся оптические элементы или среды.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на XV, XVII и XIX Международных конференциях «Physical Interpretation of Relativity Theory», (Москва, 2009, 2011, 2013), V-VII Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2010-2012), Всероссийской конференции-конкурса молодых физиков (Москва, 2010), общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна» (Москва, 2009, 2010), Международной конференции «Современные проблемы гравитации, космологии и релятивистской астрофизики» (Москва, 2010), Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное навигационное обеспечение» (Санкт-Петербург, 2011, 2013), III Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов» (Таруса, 2012), Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2012).

Результаты диссертации были использованы в НИР, проводимых в рамках тематических планов: «Разработка теоретических основ математического моделирования процессов синхронной регистрации сигналов детекторами, движущимися в различных квазиинерциальных системах отсчета» (2009), «Теоретическое исследование явления низкочастотного оптического резонанса в многолучевом интерферометре Фабри-Перо» (2010-2011), «Экспериментальные исследования процессов распространения электромагнитного излучения в среде с трехмерным полем скоростей» Министерства образования и науки РФ (2012).

Диссертация является составной частью фундаментальных исследований, проводимых в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-02-12157).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 23 научных работах, в том числе в 6 статьях из Перечня российских рецензируемых научных журналов и изданий, 9 материалах всероссийских и международных конференций и 7 тезисах докладов.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, которые непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 134 страницах, содержит 49 иллюстраций. Библиография включает 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

Первая глава посвящена описанию разработанной математической модели процесса распространения электромагнитного излучения. Рассмотрены исходные положения и приведен вывод основных уравнений математической модели изучаемого процесса, дополненных условиями на границе раздела сред и соотношениями из геометрической оптики.

В разделе 1.1 рассмотрены наиболее значимые эффекты оптики движущихся сред. Приведен литературный обзор экспериментальных работ по оптике движущихся сред. Представлены основные результаты работ, подтверждающие достоверность теоретического аппарата оптики движущихся сред.

В разделе 1.2, используя волновое уравнение для электромагнитной волны и приближение плоской монохроматической волны, рассмотрен вы-

вод дисперсионного уравнения для случая распространения электромагнитной волны в движущейся среде

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\varepsilon\mu - 1}{c^2} \frac{(\omega - kv)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0. \quad (1)$$

В общем случае распространения электромагнитного излучения в среде с дисперсией, уравнение (1) не имеет аналитического решения, но может быть использовано в общей математической модели. Уравнение (1) описывает процесс распространения электромагнитного излучения на границе двух сред с различными постоянными скоростями движения среды и показателями преломления по обе стороны от границы, а также с заданной скоростью движения границы раздела сред. Аналитическое решение уравнения (1) без учета дисперсии было получено Б.М. Болотовским и С.Н. Столяровым (1989):

$$(\omega_2)_{1,2} = -I \frac{[1 + \kappa_2 \gamma_2^2 (\beta - \beta_{2n})(\beta_{2n} + \beta(\beta_{2t}, \mathbf{d}))] \pm \beta Q^{1/2}}{[(1 - \beta^2) - \kappa_2 \gamma_2^2 (\beta - \beta_{2n})^2]}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (k_{2n})_{1,2} &= ((\omega_2)_{1,2} + I)u^{-1} = \\ &= \frac{-I [\beta + \kappa_2 \gamma_2^2 (\beta - \beta_{2n})(1 + (\beta_{2t}, \mathbf{d}))] \pm Q^{1/2}}{c [(1 - \beta^2) - \kappa_2 \gamma_2^2 (\beta - \beta_{2n})^2]}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q &= ([1 + \kappa_2 \gamma_2^2 (1 - \beta_{2n}^2)] - \mathbf{d}^2 [(1 - \beta^2) - \kappa_2 \gamma_2^2 (\beta - \beta_{2n})^2] + \\ &+ \kappa_2 \gamma_2^2 (\mathbf{d}, \beta_{2t}) [2(1 - \beta\beta_{2n}) + (1 - \beta^2)(\mathbf{d}, \beta_{2t})]). \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения (2) и (3) являются основными уравнениями математической модели распространения электромагнитного излучения в движущейся среде.

В разделе 1.3 рассмотрен подход к математическому моделированию распространения электромагнитного излучения в оптических элементах с заданными распределениями показателя преломления и скорости среды. Представлены уравнения для нахождения точки взаимодействия электромагнитного излучения с материальной средой в приближении геометрической оптики и расчета интенсивности электромагнитного излучения в заданной точке пространства.

В разделе 1.4 разработана математическая модель процесса распространения электромагнитного излучения в движущейся среде, представляющая собой рекуррентную систему уравнений, которая включает условия на

границе раздела сред для расчета тангенциальных и нормальных компонент волновых векторов и интенсивности в плоскости локализации интерференционной картины. Показано, что представление излучения в виде пучка лучей, позволяет рассчитывать траектории волновых векторов для всех лучей, входящих в пучок, и различные функциональные зависимости физических параметров, характеризующих процесс распространения электромагнитного излучения в движущейся среде.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса распространения электромагнитного излучения в различных оптических системах с помощью разработанной математической модели распространения электромагнитного излучения в движущейся среде. Рассмотрены основные алгоритмы расчета процесса распространения электромагнитного излучения в движущейся среде, а также приведены результаты вычислительных экспериментов конкретных оптических схем, выполненные с помощью разработанного программного комплекса.

В разделе 2.1 приведены Unified Modeling Language (далее – UML) диаграммы последовательности основных расчетных операций. Диаграмма последовательности процесса расчета оптической системы приведена на рис. 1. Представлен двухмерный вид уравнений математической модели процесса распространения электромагнитного излучения, используемый в программном комплексе.

В разделе 2.2 исследованы специфические особенности процесса распространения электромагнитного излучения в интерферометре Физо. Приведены теоретические оценки эффекта увлечения света в интерферометре Физо без учета и с учетом релятивистских членов. Рассмотрены зависимости сдвига интерференционной картины от скорости движения среды и показателя преломления. Получены результаты вычислительных экспериментов, которые не дают отличий от аналитической оценки с учетом релятивистских членов, что, в свою очередь, свидетельствует о достоверности полученных результатов для параметров данного конкретного эксперимента.

В разделе 2.3 методами математического моделирования исследован процесс распространения электромагнитного излучения в движущейся атмосфере по оптической трассе Земля-Спутник. Оптическая схема задачи представлена на рис. 2. В качестве функций распределения показателя пре-



Рис. 1. Диаграмма последовательности процесса расчета оптической системы на языке UML

ломления и распределения поля скоростей движения атмосферы используются нелинейные зависимости. При выполнении вычислительного эксперимента был получен классический результат оценки величины отклонения луча света от прямолинейного распространения в атмосфере, что указывает на корректность математической модели при данных параметрах проведения вычислительного эксперимента. Приведена полученная автором оценка оптической разности хода для двух электромагнитных волн, распространяющихся в движущейся и неподвижной атмосфере. Показано, что эффект увлечения света движущейся атмосферой необходимо учитывать для задач локации, навигации и передачи данных в атмосфере Земли.

В разделе 2.4 исследован процесс распространения электромагнитного излучения в турбулентной области атмосферы. Представлен обзор современного статистического подхода к описанию процесса распространения электромагнитного излучения в турбулентной атмосфере. Разработана детерминированная модель турбулентной области, которая удовлетворяет статистическим соотношениям для турбулентности в атмосфере. В результате проведения вычислительного эксперимента получена теоретическая оценка оптической разности хода для двух лучей в случае движущейся и неподвижной турбулентных областях.

Третья глава посвящена исследованию трехмерного эффекта Физо с помощью дискового оптического интерферометра. Представлена оптическая схема дискового оптического интерферометра. Получены экспериментальные данные на установке по исследованию трехмерного эффекта Физо, основой которой является дисковый оптический интерферометр.

В разделе 3.1 приведен обзор современных экспериментальных и теоретических работ в области оптики движущихся сред. Рассмотрено устройство экспериментальных установок и основные результаты, представленные в работах. Отмечена значимость полученных экспериментальных результатов с точки зрения их согласования с теоретическим аппаратом электродинамики движущихся сред.

В разделе 3.2 рассматривается устройство экспериментальной установки дискового оптического интерферометра для исследования трехмерного эффекта Физо. Представлена оптическая схема установки, изображенная на рис. 2. Предложены теоретические оценки продольного и поперечного эффекта Физо в оптическом диске при вращении с учетом параметров этого диска.

В разделе 3.3 рассмотрена задача о математическом моделировании процесса распространения электромагнитного излучения в оптическом диске. При математическом моделировании используется оптическая схема, близкая к схеме дискового оптического интерферометра для исследования трехмерного эффекта Физо. Выполнено сравнение теоретической оценки и результатов вычислительного эксперимента.

В разделе 3.4 описан получаемый сигнал в эксперименте по исследованию трехмерного эффекта Физо. На основе предположения о гармоническом

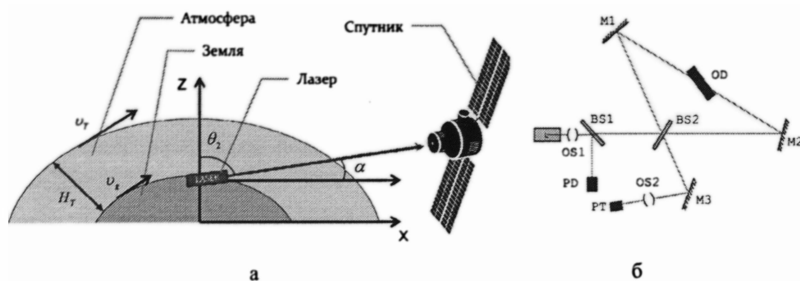


Рис. 2. Оптические схемы задачи распространения света в атмосфере (а) и экспериментальной установки по исследованию трехмерного эффекта Физо (б)

колебании диска вследствие наличия клиновидного дефекта разработана математическая модель экспериментального сигнала. Представлена теоретическая оценка чувствительности интерферометра для случая измерений сдвига интерференционной картины методом временных интервалов.

Четвертая глава посвящена описанию методов обработки сигнала. Разработан метод обработки интерферограмм на основе разложения Якоби-Ангера и его программная реализация. Представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных на экспериментальной установке по исследованию трехмерного эффекта Физо с помощью разработанного программного комплекса. Проведен сравнительный анализ экспериментально полученных данных с результатами вычислительных экспериментов.

В разделе 4.1 рассмотрен метод обработки временных интерферограмм, основанный на анализе временного интервала. Предложен подход к измерению сдвига интерференционной картины через временной интервал; проанализирован метод нахождения локальных экстремумов сигнала временных интерферограмм, используемых при вычислении временного интервала. Показано, что метод обработки временных интерферограмм, основанный на обработке временного интервала, вносит искажения в измеряемый сигнал. Для нахождения сдвига интерференционной картины предложено использовать методы оптимизации.

В разделе 4.2 представлена теоретическая зависимость напряжения на фотодетекторе от времени. Рассмотрена задача о нахождении сдвига интер-

ференционной картины как параметра априорной аналитической функции. Обоснована возможность решения данной задачи с помощью методов оптимизации в частотном пространстве. Основываясь на разложении Якоби-Ангера, получено выражение для разложения в ряд Фурье априорной аналитической зависимости временной интерферограммы.

В разделе 4.3 рассмотрена задача определения параметра сдвига интерференционной картины. Рассмотрены алгоритмы определения и уточнения фундаментальной частоты сигнала. Получено выражение для целевой функции

$$E(\delta, \Omega, \varphi) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (F_k(\delta, \Omega, \varphi) - U_k) \overline{(F_k(\delta, \Omega, \varphi) - U_k)}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} F_k(\delta, \Omega, \varphi) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-ikx} dx = \\ &= \frac{1}{2} e^{i\delta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\Omega \cos \varphi) J_{k-n}(-\Omega \sin \varphi) + \\ &+ \frac{1}{2} e^{-i\delta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(-\Omega \cos \varphi) J_{k-n}(\Omega \sin \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

$$U_k = \sum_{n=0}^{N-1} u_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}. \quad (7)$$

Исследован периодический характер целевой функции при фиксировании параметра Ω , которая изображена на рис. 3. Получены выражения частных производных целевой функции, используемые в программном комплексе для численного решения задачи оптимизации.

В разделе 4.4 представлены результаты сравнительного анализа скорости сходимости различных методов оптимизации. Исследована сходимость методов дихотомии, градиентного спуска с применением алгоритмов постоянного шага и наискорейшего спуска (рис.5). На основе результатов сравнения выбран наилучший метод оптимизации по критериям скорости сходимости для использования в лабораторном программном комплексе. На рис.4 представлены экспериментальная и выделенная обработчиком зависимости

напряжения от времени на фотодетекторе, которая была получена в результате решения задачи оптимизации

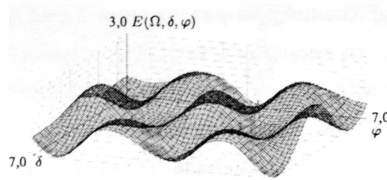


Рис. 3. Зависимость целевой функции от δ и φ при $\Omega = \Omega_0$

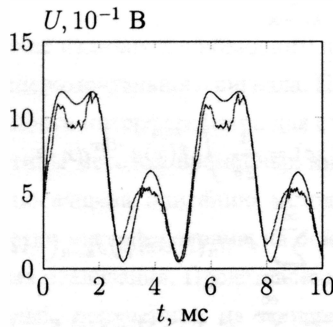


Рис. 4. Экспериментальная и выделенная обработчиком зависимости напряжения от времени на фотодетекторе

В разделе 4.5 рассмотрена задача обработки экспериментальных данных по исследованию трехмерного эффекта Физо. Приведен объем записываемых экспериментальных данных и вычислительных затрат на обработку одного эксперимента. Сформулирована необходимость распределенной обработки данных. Представлена архитектура программного комплекса для распределенной обработки интерферограмм. Представлены результаты испытаний распределенного программного комплекса на кластере IBM МГТУ им. Баумана.

В разделе 4.6 с помощью разработанного программного комплекса получена экспериментальная зависимость сдвига интерференционной картины от частоты вращения диска. Проведен сравнительный анализ

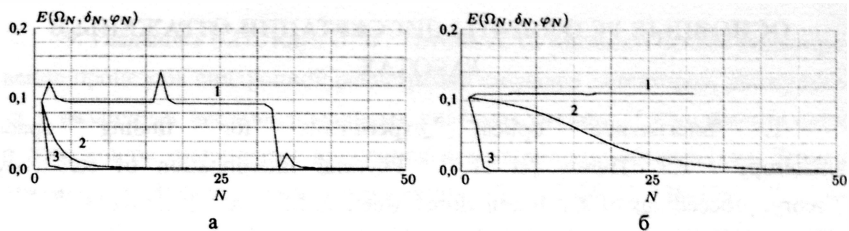


Рис. 5. Зависимость значения функции ошибки от числа шагов при решении задачи оптимизации для метода дихотомии (1), метода градиентного спуска с применением алгоритмов постоянного шага (2) и наискорейшего спуска (3) при начальных приближениях $\Omega = 2,9$, $\delta = 0,3$, $\varphi = 0,5$ (а), $\Omega = 2,5$, $\delta = 1,5$, $\varphi = 1,5$ (б) и при координатах искомого минимума, равных $\Omega = 3,0$, $\delta = 0,4$, $\varphi = 0,7$

полученной экспериментальной зависимости с результатами математического моделирования. Показано, что экспериментальная зависимость имеет малое отличие от теоретических оценок и зависимостей, базирующихся на результатах вычислительных экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель, на базе которой создан программный комплекс, позволяющий исследовать процессы распространения электромагнитного излучения в оптических системах с движущимися элементами с заданием зависимостей показателя преломления и скорости среды.

2. Методами математического моделирования исследован эффект увлечения света в движущейся атмосфере при использовании нелинейных распределений показателя преломления и скорости среды для атмосферы.

3. Разработан метод обработки временных интерферограмм на основе разложения Якоби-Ангера и программный комплекс для проведения экспериментов по исследованию трехмерного эффекта Физо с последующим выделением полезного сигнала сдвига интерференционной картины.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Interference optical experiments for finding space anisotropy / P.S. Tiunov [et al.] // Physical Interpretation of Relativity Theory: proceedings of XV International Meeting. M., 2009. P. 215-223.

2. Тиунов П.С. Математическая модель интерферометра для исследования эффекта Физо в движущихся нелинейных средах // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции. М., 2009. Т. 8, Ч. 2. С. 173-175.

3. Тиунов П.С. Математическая модель интерферометра для исследования эффекта Физо в движущихся нелинейных средах // Необратимые процессы в природе и технике: Труды V Всероссийской конференции. М., 2009. Ч. 3. С. 74-76.

4. Гладышев В.О., Тиунов П.С. Математическое моделирование процессов синхронной регистрации сигналов детекторами, движущимися в различных квазиинерциальных системах отсчета // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э.Баумана. Сер.: Естественные науки. 2010. №2. С. 16-30.

5. Тиунов П.С. Обработка результатов эксперимента по исследованию 3-х мерного эффекта Физо при использовании технологии Windows Azure // Физическое образование в вузах. 2010. Т.16, №1. С. 46. (Труды конференции-конкурса молодых физиков.)

6. Space anisotropy detection experiment (SADE) / P.S. Tiunov [et al.] // Современные проблемы гравитации, космологии и релятивистской астрофизики: Тезисы докладов Международной конференции. М., 2010. С. 139-140.

7. О новом проекте гравитационно-волнового детектора в МГТУ им. Н.Э.Баумана / П.С. Тиунов [и др.] // Современные проблемы гравитации, космологии и релятивистской астрофизики: Тезисы докладов Международной конференции. М., 2010. С. 140-141.

8. Поиск анизотропии пространства на основе результатов эксперимента SADE / П.С. Тиунов [и др.] // Вестн Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э.Баумана. Сер.: Естественные науки. Спец. выпуск – Физические интерпретации теории относительности. 2011. С. 94-109.

9. Гладышев В.О., Кауц В. Л., Тиунов П. С. Математическое моделирование процессов синхронной регистрации сигналов детекторов, движущихся в различных квазиинерциальных системах отсчета // Фундаментальное и прикладное координатно-временное навигационное обеспечение: Тезисы докладов IV Всероссийской конференции. СПб., 2011. С. 138-139.

10. Интерферометр для исследования оптической анизотропии в движущейся среде: продольное и поперечное увлечение света в движущейся среде / П.С. Тиунов [и др.] // Необратимые процессы в природе и технике: Труды VI Всероссийской конференции. М., 2011. Ч. 3. С. 112-116.

11. Оценка оптической анизотропии пространства в галактических координатах на основе результатов эксперимента SADE / П.С. Тиунов [и др.] // Необратимые процессы в природе и технике: Труды VI Всероссийской конференции. М., 2011. Ч. 3. С. 117-118.

12. Тиунов П.С. Проведение и обработка результатов эксперимента по исследованию 3-х мерного эффекта Физо // Наука и Образование. Электронный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. №4. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/324148.html> (дата обращения 04.11.2013).

13. Тиунов П.С. Разработка и исследование метода обработки временных интерферограмм на основе эксперимента по исследованию трехмерного эффекта Физо // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э.Баумана. Сер.: Естественные науки. Спец. выпуск №5 – Необратимые процессы в природе и технике. 2012. С. 86-95.

14. Исследование анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения в движущейся среде / П.С. Тиунов [и др.] // Журнал технической физики. 2012. Т. 82, № 10. С. 54-63.

15. О влиянии вращения атмосфер Земли и Солнца на распространение электромагнитного излучения / П.С. Тиунов [и др.] // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э.Баумана. Сер.: Естественные науки. Спец. выпуск №5 – Необратимые процессы в природе и технике. 2012. С. 153-166.

16. Estimation of space-time variations in the position of the interference picture in SADE / P. Tiunov [et al.] // Physical Interpretation of Relativity Theory: proceedings of XVII International Meeting. M., 2012. P. 88-96.

17. Гладышев В.О., Кауц В.Л., Тиунов П.С. Автономная система ориентации на принципах измерения параметров анизотропии пространства // Со-

временные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов: Тезисы докладов III Всероссийской научно-технической конференции. Таруса, 2012. С. 18-19.

18. Экспериментальные исследования оптической анизотропии в движущейся среде / П.С. Тиунов [и др.] // Фундаментальные проблемы оптики: Труды Международной конференции. СПб., 2012. С. 49-50.

19. Гладышев В.О., Кауц В.Л., Тиунов П.С. Математическое моделирование процессов синхронной регистрации сигналов детекторов, движущихся в различных квазиинерциальных системах отсчета // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 23. С. 213-217.

20. Поворот плоскости поляризации электромагнитного излучения во вращающемся оптическом диске / П.С. Тиунов [и др.] // Необратимые процессы в природе и технике: Труды VII Всероссийской конференции. М., 2013. Ч. 3. С. 98-101.

21. Тиунов П.С. Влияние различных методов выделения сигнала на точность обработки временных интерферограмм, полученных в эксперименте по исследованию трехмерного эффекта Физо // Необратимые процессы в природе и технике: Труды VII Всероссийской конференции. М., 2013. Ч. 3. С. 95-98.

22. Гладышев В.О., Кауц В.Л., Тиунов П.С. Автономная система ориентации на принципах измерения параметров анизотропии пространства. // Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов. Сер.: Механика, управление и информатика: Труды III Всероссийской научно-технической конференции. М., 2013. С. 146-151.

23. Устройство измерения анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения: RU 2498214 / П.С. Тиунов [и др.]. // Изобретения. Полезные модели. 2013. Бюлл. №31. Заявл. 22.03.2012.