

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Дружининой Ольги Валентиновны

на диссертационную работу Штепа Кристины Александровны на тему «Моделирование трансформирующих сред средствами лучевой оптики», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы

Целью работы является разработка гибридного мультимодельного подхода, который объединит классические численные методы и методы машинного обучения для моделирования трансформирующих сред. В рамках исследования планируется провести комплексный анализ моделей распространения лучей, чтобы оптимизировать расчет характеристик трансформирующих сред, используя методы лучевой оптики и нейронные сети. Актуальность данного исследования обусловлена отсутствием универсального метода расчёта оптических систем (например, линз и дифракционных решёток). В современных условиях каждая специфическая задача требует уникального подхода, что существенно затрудняет моделирование и оптимизацию таких систем. Эта проблема особенно остро стоит в эпоху стремительного технологического развития, когда критически важны высокоточные расчёты для создания инновационных оптических элементов и совершенствования их характеристик.

Дифракционные решётки — важнейшие компоненты спектральных приборов, лазерных систем и сенсоров. Однако до сих пор не разработан единый метод их проектирования, который позволил бы совместить: - высокую точность электродинамических моделей; - инженерную простоту расчётов в рамках лучевой оптики.

Прогресс в сфере машинного обучения, в частности развитие Physics-Informed Neural Networks (PINN), открывает новые возможности. Эти технологии позволяют напрямую интегрировать физические законы в процессы оптимизации, а их сочетание с классическими методами геометрической (лучевой) оптики создаёт базу для разработки гибких и вычислительно эффективных инструментов моделирования трансформирующих сред нового поколения.

Существующие решения имеют два ключевых ограничения:

- узкая область применимости;
- высокие требования к вычислительным ресурсам.

Применение нейросетевых методов в сочетании с традиционными численными подходами способно преодолеть эти ограничения, обеспечив создание универсальных и адаптивных инструментов для решения задач в области оптики и фотоники.

Основная цель работы — разработать гибридный мультимодельный подход к моделированию трансформирующих сред. Этот подход будет сочетать:

- классические численные методы;
- современные методы машинного обучения.

В рамках исследования планируется провести комплексный анализ моделей распространения лучей, чтобы оптимизировать расчёт характеристик трансформирующих сред — с опорой на методы лучевой оптики и нейронные сети.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность исследования, раскрыта связь темы с современным состоянием науки и техники, определена цель и поставлены задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов. Даются характеристики исследования. Диссертация посвящена разработке методов математического моделирования дифракционных систем в трансформирующих средах — на базе принципов геометрической оптики и нейросетевых технологий. Ключевой подход — интеграция методов лучевой оптики с нейросетевыми технологиями (в том числе Physics-Informed Neural Networks, PINN) для создания гибридных моделей, учитывающих физические законы в алгоритмах оптимизации. Цель исследования: разработать мультимодельный подход, объединяющий численные и нейросетевые методы, и доказать его эффективность на примере типовых трансформирующих сред.

Первая глава посвящена теоретическим основам и методологическим подходам к моделированию дифракционных систем в трансформирующих средах. Рассмотрены:

- физические предпосылки распространения электромагнитных волн;
- принципы упрощения уравнений в рамках геометрической оптики для расчёта траекторий лучей и формы волновых фронтов;
- связь распределения показателя преломления со свойствами волнового фронта (траектории лучей трактуются как геодезические линии в оптическом пространстве).

Проанализированы базовые модели трансформирующих сред:

- линза Люнеберга (коллимация расходящихся пучков в параллельный пучок);
- линза Максвелла (фокусировка света в противоположной точке сферы).

Эти модели служат эталонами для проверки численных алгоритмов: их аналитическое описание позволяет сверять расчётные карты фронтов с точными решениями.

Также изучены методы решения ключевых задач:

- разностные схемы (ограничены точностью из-за аппроксимации производных);
- метод характеристик (чувствителен к граничным условиям);
- метод быстрого распространения фронта (FSM) — эффективен для моделирования гладких профилей, обеспечивает устойчивость и быструю сходимость.

Во второй главе рассмотрены математические и численные методы решения уравнения Эйконала — основы моделирования распространения излучения в трансформирующих средах. Изложена постановка задачи моделирования. Подробно описан метод быстрого распространения фронта (FSM): он обеспечивает высокую скорость сходимости и точность за счёт последовательных проходов по вычислительной сетке в разных направлениях. Численная реализация выполнена в среде Julia. На примерах линз Люнеберга и Максвелла продемонстрировано, что FSM корректно воспроизводит:

- форму волновых фронтов;

- направления лучей, ортогональные фронтам.

Результаты согласуются с физическим смыслом задачи. Доказаны две теоремы.

В третьей главе рассмотрен нейросетевой подход к решению задач геометрической и волновой оптики на базе Physics-Informed Neural Networks (PINN) с применением пакета NeuralPDE.jl (экосистема SciML, язык Julia) для решения уравнения эйконала. PINN интегрируют физические законы непосредственно в процесс обучения нейронной сети — через включение невязок уравнений и граничных условий в функцию потерь. В отличие от классических методов, не требуется явная сетка: решение аппроксимируется обучаемой функцией. Для вычисления производных используется автоматическое дифференцирование — это упрощает учёт сложных распределений показателя преломления.

Используется Julia и NeuralPDE.jl: заданы входные переменные, нейросеть с несколькими скрытыми слоями и функцией активации $\tanh$. Обучение ведётся методом градиентного спуска до стабилизации функции потерь. Выявлены особенности пакета: большое число символьных выражений замедляет компиляцию, поэтому для ускорения ограничено их количество.

Тестирование проведено на стандартных профилях (линзы Люнеберга и Максвелла). PINN корректно воспроизводит форму волновых фронтов, согласуясь с данными FSM. Преимущество PINN — гибкость при моделировании сложных распределений и работа с зашумленными данными. FSM выигрывает в скорости вычислений и детерминированной сходимости, но PINN лучше подходит для параметрических расчётов (одна обученная сеть используется многократно). Подбор весового коэффициента позволяет балансировать между точностью граничных условий и выполнением уравнения.

В областях с резкими изменениями показателя преломления FSM точнее передаёт границы, а PINN даёт более сглаженные решения. Это соответствует ожидаемому: сеточный FSM чувствителен к градиентам, а PINN сглаживает решение.

В заключении сформулированы основные результаты: разработан мультимодельный подход, объединивший FSM и PINN; показана сопоставимость их точности; проведён анализ устойчивости и вычислительной эффективности. Предложенные методы могут использоваться для проектирования оптических систем с трансформирующими свойствами.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Обоснованность методов, их взаимная верификация и серия численных экспериментов гарантируют достоверность полученных данных. Основные выводы работы были представлены на ряде конференций. Результаты опубликованы в ведущих научных изданиях.

Новизна работы заключается в разработке мультимодельного подхода к моделированию дифракционных систем в трансформирующих средах. Подход базируется на уравнении эйконала и объединяет два метода: численный метод быстрого распространения фронта (FSM, Fast Sweeping Method) и нейросетевой метод на основе физически информированных сетей (PINN, Physics-Informed Neural Networks), реализованный в экосистеме SciML/NeuralPDE.jl (язык Julia).

Созданы и программно реализованы две взаимодополняющие схемы (FSM и PINN) для решения уравнения Эйконала в трансформирующих средах. Для обеих схем разработана единая система визуализации волновых фронтов и лучей — тестирование проведено на классических моделях (линзы Люнеберга и Максвелла).

Адаптирован метод PINN для задач геометрической оптики с переменным показателем преломления. Решены практические ограничения Symbolics/NeuralPDE при моделировании кусочно-непрерывных профилей среды. Проведён сравнительный анализ FSM и PINN по ключевым параметрам. Подтверждена воспроизводимость расчётов и визуализаций в открытой среде Julia/SciML. Показана применимость подхода для типовых задач проектирования оптических систем.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертации выводы сформированы на базе строгого математического обоснования. Автор последовательно анализирует каждый этап численного решения, что позволяет выстроить проверенную теоретическую базу, подкреплённую серией численных экспериментов.

Практическая ценность работы заключается в следующих аспектах:

- сформулированы конкретные рекомендации по применению разработанного метода;
- представлена детальная реализация вычислительных алгоритмов, что критически важно для инженеров и исследователей в сфере математического моделирования.

Особую роль играет сравнительный анализ с альтернативными численными методами — в частности, с подходами на основе нейронных сетей. Это позволяет:

- подтвердить корректность полученных результатов;
- обосновать целесообразность использования предложенного метода в сравнении с существующими решениями.

Таким образом, сочетание строгой математической проработки, экспериментальной верификации и практической ориентированности обеспечивает высокую достоверность выводов и рекомендаций работы.

Ценность для науки и практики результатов работы

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные алгоритмы могут быть использованы для решения реальных инженерных задач. Также стоит отметить, что результаты работы могут быть полезны для разработки учебных пособий и лабораторных работ по дисциплинам «численные методы» и «математическое моделирование». Результаты работы могут стать частью учебных курсов, направленных на подготовку специалистов в области математических и инженерных наук.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертации изложены в 3 работах, напечатанных в изданиях, входящих в базу данных Scopus, Web of Science, в список ВАК категорий К-1, К-2 и в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Разделы автореферата строго соотносятся с аналогичными разделами и главами диссертации. Заголовки, нумерация и иерархия разделов в автореферате зеркально повторяют структуру полной работы.

Основные научные положения, выносимые на защиту в диссертации, чётко сформулированы в автореферате, не изменены по смыслу, подкреплены теми же аргументами и данными, что и в полном тексте.

В автореферате перечислены уникальные результаты, заявленные в диссертации, указаны отличия от предшествующих исследований, обоснована теоретическая и практическая ценность работы в том же объёме, что и в диссертации.

Выводы в автореферате логически вытекают из результатов, представленных в диссертации, практические рекомендации и перспективы разработки темы в автореферате соответствуют заключительным разделам полной работы, нет расхождений между итогами в автореферате и диссертационном тексте.

В автореферате не содержится информации, которая отсутствует в диссертации. Автореферат кратко резюмирует уже изложенные в полной работе материалы. Автореферат не перегружен второстепенными деталями, но при этом передаёт суть исследования.

Автореферат является надёжным и лаконичным изложением диссертационной работы, не умаляющим её научной ценности и не искажающим ключевые выводы.

Замечания по работе

1. В пункте 3.4 дается очень краткое сравнение метода FSM и PINN. Данный пункт следовало бы расширить и провести более детальное сравнение, в частности оценить производительность количественно, сравнив затрачиваемое на работу программ время.
2. На рисунке 3.7 показан фронт волны для линзы Максвелла, построенный на базе вычислений методом PINN. Следовало бы подробно описать методологию построения данной схемы, как это было сделано для метода FSM.
3. На странице 58 не пояснен смысл буквы g в формулах. Из контекста можно понять, что это определитель метрического тензора, однако правильнее было бы все же дать пояснение.
4. Из-за малого кегля шрифта с большим трудом читается блок-схема на странице 77 (в печатном варианте она не читается в принципе).

Приведённые замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на её положительную оценку.

Заключение

Диссертационное исследование Штепа Кристины Александровны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной

задачи, имеющей важное значение для разработки гибридного мультимодельного подхода к моделированию трансформирующих сред, использующего как классические численные методы, так и методы машинного обучения.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук согласно пункта 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утверждённого Учёным советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а её автор, Штепа Кристина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Дружинина Ольга Валентиновна, доктор физико-математических наук (01.03.01 — Астрометрия и небесная механика), профессор, главный научный сотрудник отдела 61 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук.



Дружинина Ольга Валентиновна

«22» января 2026 г.

Подпись Дружининой Ольги Валентиновны удостоверяю.

Ученый секретарь ФИЦ ИУ РАН

Доктор технических наук



В.Н. Захаров

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук

Адрес: 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44. корп. 2

Тел. +7 (499) 135-62-60, e-mail: frccsc@frccsc.ru

Страница в интернете: <http://frccsc.ru>