

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Блинкова Юрия Анатольевича

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

Актуальность исследования обусловлена отсутствием универсального метода расчёта оптических систем (линз, дифракционных решёток). Индивидуальный подход к каждой задаче осложняет моделирование и оптимизацию, что критично в эпоху технологического развития, требующего высокоточных расчётов.

Дифракционные решётки — ключевые элементы спектральных приборов, лазеров и сенсоров, но отсутствует метод, сочетающий точность электродинамических моделей и простоту лучевой оптики.

Прогресс в машинном обучении (особенно Physics-Informed Neural Networks, PINN) позволяет встраивать физические законы в оптимизацию, дополняя классическую лучевую оптику и создавая эффективные инструменты для моделирования трансформирующих сред.

Существующие решения либо узкоспециализированы, либо ресурсоёмки. Комбинирование нейросетевых и классических численных методов поможет создать универсальные адаптивные инструменты для оптики и фотоники.

Цель работы — разработать гибридный мультимодельный подход, объединяющий численные методы и машинное обучение, для оптимизации характеристик трансформирующих сред через анализ моделей распространения лучей.

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. Описаны разработка и анализ методов математического моделирования дифракционных систем в трансформирующих средах. В фокусе — сочетание классических схем геометрической оптики с современными вычислительными и нейросетевыми подходами. Цель работы — создать и обосновать мультимодельный подход, объединяющий численные и нейросетевые методы, и продемонстрировать его эффективность на типовых трансформирующих средах.

Первая глава закладывает теоретические и методологические основы моделирования дифракционных систем. В ней раскрыты физические принципы распространения электромагнитных волн. Показано, как в рамках геометрической оптики упрощаются исходные уравнения — это позволяет перейти к расчёту траекторий лучей и формы волновых фронтов. Установлена связь между распределением показателя преломления и геометрией волнового фронта: траектории лучей интерпретируются как геодезические линии в оптическом пространстве. Для проверки алгоритмов использованы базовые модели трансформирующих сред: линза Люнеберга и линза Максвелла. Их аналитическое описание служит эталоном: по нему верифицируют численные решения. Проанализированы ключевые численные методы решения задачи.

Вторая глава посвящена методам решения уравнения эйконала для моделирования распространения излучения в трансформирующих средах. Основное внимание уделено методу быстрого распространения фронта (Fast Sweeping Method, FSM) и его реализации. Доказаны две теоремы.

FSM — эффективный численный метод: обеспечивает высокую скорость сходимости и точность за счёт последовательных проходов по вычислительной сетке в разных направлениях. Метод учитывает влияние соседних узлов, устойчив для широкого класса профилей и применим к неоднородным средам. Вычислительная сложность линейно зависит от числа узлов сетки — это делает FSM удобным для двумерных и трёхмерных задач на персональных компьютерах.

Метод реализован в среде Julia в пакете Eikonal.jl (поддерживает схемы Fast Sweeping и Fast Marching). Разработаны модули для: задания расчётной области и граничных условий; построения волновых фронтов и траекторий лучей; визуализации результатов (карты оптической длины, геометрия фронтов). На примерах линз Люнеберга и Максвелла подтверждено, что FSM корректно воспроизводит: форму волновых фронтов (изохрон); направления лучей (ортогональных фронтам). Время вычислений растёт линейно с увеличением числа узлов. Реализация на Julia демонстрирует высокую эффективность.

Третья глава посвящена нейросетевому подходу к задачам геометрической и волновой оптики на основе Physics-Informed Neural Networks (PINN). Основное внимание — применению пакета NeuralPDE.jl (экосистема SciML, язык Julia) для решения уравнения Эйконала. Физические законы интегрируются непосредственно в процесс обучения сети через функцию потерь (с учётом невязок уравнения и граничных условий). Метод не требует построения расчётной сетки: решение аппроксимируется обучаемой функцией. Автоматическое дифференцирование упрощает учёт сложных распределений показателя преломления.

Исследования выполнены в среде Julia с пакетом NeuralPDE.jl. Модель включает нейросеть с несколькими скрытыми слоями. Обучение ведётся методом градиентного спуска до стабилизации функции потерь. Большое число

символьных выражений замедляет компиляцию. Для ускорения ограничено их количество при генерации данных.

Тестирование на профилях линз Люнеберга и Максвелла подтвердило: PINN корректно воспроизводит форму волновых фронтов и качественно согласуется с результатами FSM. Преимущества PINN: гибкость при моделировании сложных распределений; устойчивость к зашумлённым данным; возможность повторного использования обученной сети для разных параметров (выгодно для параметрических расчётов). Преимущества FSM: более высокая скорость вычислений; детерминированная сходимость.

PINN — перспективный инструмент для моделирования дифракционных систем: решает уравнения без сетки; сохраняет физическую согласованность; дополняет классические методы при учёте дополнительных условий. Гибридный подход (FSM + PINN) открывает возможности для ускоренного моделирования и оптимизации оптических структур.

В заключении приведены основные результаты исследования.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность результатов обусловлена корректностью выбранных методов; взаимной верификацией (перекрёстной проверкой) данных; серией численных экспериментов с детальным анализом. Основные выводы работы были представлены на широком спектре научных площадок. Результаты опубликованы в высокоуровневых изданиях.

Научная новизна обусловлена тем, что в работе разработан мультимодельный подход к моделированию дифракционных систем в трансформирующих средах. Этот подход объединяет два метода решения уравнения эйконала: FSM (Fast Sweeping Method) — численный метод быстрого «подметания» и PINN (Physics-Informed Neural Networks) — физически информированные нейронные сети, реализованные в инфраструктуре SciML/NeuralPDE.jl. Созданы две взаимодополняющие вычислительные схемы (FSM и PINN) для решения уравнения эйконала в трансформирующих средах. Для обеих схем разработана единая система визуализации волновых фронтов и лучей — её работоспособность проверена на классических тестовых моделях (линзы Люнеберга и Максвелла). Выполнена адаптация PINN для решения задач геометрической оптики с переменным показателем преломления. Проведён сравнительный анализ FSM и PINN. Установлены сценарии, где каждый метод демонстрирует преимущества. Подтверждена воспроизводимость расчётов и визуализаций в открытой среде Julia/SciML.

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

В рамках диссертационного исследования выводы сформированы на базе строгого математического обоснования. Автор последовательно проанализировал каждый этап численного решения, что позволило выстроить

надёжную и верифицируемую теоретическую базу, подкреплённую серией тщательно проведённых численных экспериментов. Ключевым практическим аспектом работы является:

- формулировка конкретных рекомендаций по использованию разработанного метода;
- детальная проработка алгоритмов практической реализации, что критически важно для инженеров и исследователей, занимающихся математическим моделированием физических систем.

Особую роль в подтверждении достоверности результатов сыграл сравнительный анализ с альтернативными численными методами — в том числе подходами, основанными на применении нейронных сетей. Такой подход:

- демонстрирует конкурентоспособность предложенного метода в сравнении с существующими решениями;
- обеспечивает объективную проверку корректности полученных результатов;
- усиливает аргументацию в пользу сформулированных выводов и практических рекомендаций.

Таким образом, сочетание строгой математической проработки, экспериментальной верификации и сравнительного анализа с альтернативными методами (включая нейросетевые) гарантирует высокую степень обоснованности итоговых выводов и рекомендаций работы.

Ценность для науки и практики результатов работы

Практическая ценность проведённого исследования заключается в применимости разработанных алгоритмов для решения актуальных инженерных задач. Помимо прикладного потенциала, результаты работы обладают высокой дидактической ценностью. Они могут быть использованы при создании учебных пособий и лабораторных работ по дисциплинам численные методы и математическое моделирование. Материал исследования способен стать основой или дополнением к учебным курсам, нацеленным на подготовку квалифицированных кадров в сфере математического моделирования.

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. Формулы, в большинстве своём, не пронумерованы, что осложняет рецензирование работы.
2. В формуле на странице 85 приведена функция $\log$ без указания основания. Скорее всего это натуральный логарифм, поэтому более привычнее было бы использовать обозначение $\ln$, тем более что именно такое обозначение для натурального логарифма применяется в других формулах данной диссертации.
3. В списке литературы источник под номером 14 оформлен некорректно, скорее всего произошел технический сбой при верстке. Также недочеты в оформлении источников 8, 25, 47, 64.
4. Плохо читаются надписи на рисунках 2.9–2.15
5. 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:

доктор физико-математических наук

(специальность 05.13.18 —

Математическое моделирование,

численные методы и комплексы

программ), доцент, заведующий

кафедрой математического и

компьютерного моделирования

Федеральное государственное

бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Саратовский

национальный исследовательский

государственный университет имени Н.Г.

Чернышевского»

Блинков Юрий Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»,

410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

e-mail: blinkovua@info.sgu.ru,

Тел.: +7 (8452) 51-84-80.

