

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Кубанова Рустама Татархановича
на тему: «Фурье-оптика фрактальных структур»
по специальности 1.3.6 – «оптика»

В настоящее время фрактальная оптика находит практическое применение при оптической диагностике качества промышленных изделий, в информационных системах, в медицине для арт-терапии и выявления злокачественных образований, в ряде других областей. Общим подходом для исследования получаемых регулярных и стохастических фракталов является аппарат фурье-оптики, позволяющий при анализе пространственных спектров определить особенности скейлинга фрактальных структур и указать область и границы их практического использования. Возможность практического применения результатов работы во многих областях свидетельствует о междисциплинарном характере материала диссертации и несомненной **актуальности** темы работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, и списка литературы.

Во введении сформулирована цель работы, описана методология исследования, приводится научная новизна, актуальность, теоретическая и практическая значимость работы, защищаемые положения. Отражена степень достоверности полученных результатов и личный вклад соискателя. Даны сведения об апробации работы, ее структуре и объеме. Информация о кратком содержании глав диссертации дает достаточное представление о решаемых научных задачах в ходе выполнения работы.

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации. Даются примеры различных типов фрактальных структур. Некоторые из них имеют аналоги в процессе самосборки белков, в ряде химических

технологий, при проектировании современных строительных конструкций. Отмечены перспективы использования фрактальных спеклоподобных световых пучков в системах оптической связи. Уделяется внимание использованию спеклов в медико-биологической диагностике. Основной направленностью литературного обзора является анализ процессов воздействия на человека при созерцании фрактальных изображений. Воздействие основано на связи спектров фрактальных структур с пространственно-частотными каналами зрительной системы.

Вторая глава посвящена вычислению фурье-спектров некоторых фрактальных структур и их сопоставлению с формой этих структур. Использовались структуры двух типов: одномерные структуры с действительным представлением чисел (канторово множество, последовательность Фибоначчи и одномерная функция Вейерштрасса) и двумерные структуры с комплексным представлением с помощью функции Мандельброта-Вейерштрасса. Для структур первого типа обнаружено четкое соответствие между формой структуры и ее спектром в виде одинакового скейлинга их характеристик. Причем это соответствие справедливо и для структур со скрытым самоподобием, каковым является числовая последовательность Фибоначчи, для которой скейлинг с увеличением уровня структуры приближается к величине золотого сечения. Для структур второго типа как амплитудные, так и фазовые спектры, в отличие от изображений, не обладают центральной симметрией, а структура спектров по фазе не имеет дискретных максимумов. Асимметрия спектров связана с разной четностью действительной и мнимой частей комплексной функции Мандельброта-Вейерштрасса.

В третьей главе представлены результаты исследований особенностей распространения фрактальных световых пучков в оптических системах и в свободном пространстве. При распространении пучка с вогнутым волновым фронтом, моделирующим распространение за фокусирующей линзой, было показано, что фрактальные размерности изначального пучка и пучка в

плоскости изображения совпадают с точностью 5%. В фокальной плоскости наблюдается уменьшение размерности, коррелирующее с уменьшением среднего размера спеклов, а распределение интенсивности полностью соответствует фурье-спектру изначального пучка. Для пучка с плоским волновым фронтом размерность спеклового поля также не претерпевает существенных изменений из-за дифракции при распространении, что свидетельствует об устойчивости этой важной характеристики излучения. Часть материала данной главы посвящена исследованию распространения фрактальных вихревых пучков в свободном пространстве и в турбулентной атмосфере, моделируемой с помощью фазового экрана. Показанное слабое влияние турбулентности на распределение интенсивности и фазы пучка имеет важное практическое значение. При описании распространения фрактальных световых пучков сквозь оптическую систему общего вида учитывалось влияние передаточной функции системы. Показано, что контраст пространственных спектров заметно уменьшается при небольшом увеличении ширины переходной функции. Приводится описание созданной экспериментальной установки для получения фрактальных световых полей с необходимым амплитудным профилем при модуляции лазерного излучения с помощью жидкокристаллической матрицы дисплея персонального компьютера. В заключение главы представлен материал по управлению статистикой спекловых фрактальных полей. Показанная возможность управления максимумом в распределении интенсивности поля может быть использована, в частности, в офтальмологии.

В четвертой главе рассмотрена возможность применения световых пучков с фрактальными свойствами в офтальмологии и арт-терапии. Основанием для этого являются результаты исследований других групп по лечению ряда патологий оптическим излучением со сложной структурой, в том числе и спекловой. Причиной положительного результата при лечении считается наличие скейлинга у пространственных спектров фрактальных пучков, что обеспечивает быстрое восприятие информации корой головного

мозга, передаваемой по частотно селективным каналам зрительной системы. Для моделирования фрактальных пучков применялись модифицированные двумерные функции Вейерштрасса со случайными фазами и постоянной или переменной размерностью, приводящей к формированию монофрактального или мультифрактального распределения поля, а также полиномиальный аттрактор с заданными коэффициентами. Установлено, что двумерные спектры монофрактального и мультифрактального распределений имеют одинаковый скейлинг, а амплитуда дополнительных максимумов в мультифрактальном распределении может быть уменьшена до 15% при соответствующем выборе постоянной и переменной части размерности. Показано также, что скейлинг существует и в спектре выбранного полиномиального аттрактора, хотя такие структуры по своей форме и отличаются от обычных спекловых распределений.

В основных результатах и выводах подводится общий итог выполненной работы.

В заключение анализа представленного в диссертации материала отметим следующее.

Основная **новизна** исследований состоит в расширении типоряда фрактальных оптических полей на основе полиномиальных аттракторов и мультифрактальных распределений, формируемых двумерной функцией Вейерштрасса, скейлинговый характер пространственных спектров которых представляет интерес для применения в медицине. **Впервые** создан макет пространственного модулятора света на основе дисплея ноутбука для формирования фрактальных лазерных пучков с заданными свойствами.

Достоверность полученных результатов определяется обоснованными теоретическими моделями и методами расчетов, а также согласием с результатами работ других авторов, выполненных по близкой тематике.

Результаты исследований прошли **апробацию** на 7 Всероссийских и Международных конференциях и опубликованы в виде 5 статей в

рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Вынесенные на защиту положения и выводы диссертации **хорошо обоснованы.**

Аннотация в полном объеме и с правильной расстановкой акцентов отражает содержание диссертации.

Личный вклад соискателя вполне достаточен. Все представленные результаты получены им лично или при его определяющем участии.

Хотелось бы отметить также высокую научную квалификацию автора и его умение владеть вычислительными средствами.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания.**

1. Во все выражения для функции Вейерштрасса (формулы (2.2), (2.3), (3.1), (3.10), (3.13), (4.1)) уже входит величина фрактальной размерности. И в то же время, например, на стр. 47, говорится о ее вычислении методом покрытий. Необходимо пояснение, с чем связано изменение принятой в расчетах величины размерности.
2. Требуется объяснения ход кривой на рис. 3.4. характеризующей изменение размеров спеклов, в частности, вблизи фокальной плоскости.
3. Из сравнения рисунков 3.1 и 3.8 можно увидеть, что для пучка с вогнутым волновым фронтом (рисунок 3.1) структура пучка на расстоянии $Z = 2R = 3$ м подобна исходной. А для пучка с плоским волновым фронтом (рисунок 3.8) структура пучка на заметно меньшем расстоянии $z_l = 0.0001d^2/\lambda \approx 10^{-1}$ м ($\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6}$ м – длина волны, $d = 0.02$ м – размер рабочего поля) заметно отличается от исходной. Причина такого отличия не объясняется.
4. Замечание по оформлению. В конце каждой главы желательно было бы привести отдельным пунктом краткие выводы. В работе на русском языке надписи на рисунках лучше приводить также на русском языке (рисунки 1.11 и 1.12).

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки и научной значимости представленной диссертационной работы. Диссертация

соответствует специальности 1.3.6 – «Оптика» (по физико-математическим наукам) и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, оформлена согласно приложениям № 8, 9 «Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Таким образом, соискатель Кубанов Рустам Татарханович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

Официальный оппонент:

Ученая степень, ученое звание – д.ф.-м.н., профессор,
главный научный сотрудник
лаборатории перспективных лазеров
АО «Государственный научный центр Российской
Федерации Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований»

Глова Александр Федорович

11.02.2025

Контактные данные:

тел.: +7(495)8518359, e-mail: afglova@trinti.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12,
АО «Государственный научный центр Российской
Федерации Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований»
тел.: +7(495)8415309, e-mail: liner@triniti.ru

Подпись главного научного сотрудника

АО «Государственный научный центр Российской

Федерации Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований» А.Ф. Гловы удостоверяю:

Ученый секретарь
АО «Государственный научный центр Российской
Федерации Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований»,
кандидат физ.-мат. наук

А.А. Ежов

11.02.2025