

На правах рукописи

Таначев Иван Александрович

**Фрактальные свойства лазерного
излучения в турбулентных средах**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2008

Работа выполнена на кафедре оптики и спектроскопии физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: Д.ф.-м.н., профессор
Короленко Павел Васильевич

Официальные оппоненты: Д.ф.-м.н., профессор
Каск Николай Евгеньевич
(НИИЯФ МГУ)
Д.ф.-м.н., профессор
Низьев Владимир Григорьевич
(ИПЛИТ РАН, Шатура Моск.обл.)

Ведущая организация: ФИАН им. П.Н. Лебедева

Защита состоится «20» марта 2008 г. в 16 часов на заседании Специализированного Совета Д.501.001.67 по специальности 01.04.05 – оптика в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан «19» февраля 2008 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета,
к.ф.-м.н.

А.Ф. Королев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Проблема распространения излучения через случайные среды и экраны давно находится в центре внимания исследователей. Это связано с большим разнообразием физических эффектов, вызванных случайными возмущениями, распространяющейся волны, а также с многочисленными вопросами прикладного характера. К последним следует отнести поиск возможностей повышения качества световых пучков, улучшения характеристик устройств видения через случайно-неоднородную атмосферу, совершенствования систем связи, использующих открытые каналы распространения излучения, улучшения методов диагностики случайно-неоднородных сред.

Несмотря на большое число монографических изданий и публикаций, посвященных указанной проблеме, целый ряд важных фундаментальных вопросов оказался неизученным, либо изученным не в полной мере. Среди них следует особым образом выделить актуальные на сегодняшний день вопросы, относящиеся к исследованиям прохождения светового излучения через объекты и среды с фрактальной и мультифрактальной структурой. Эти исследования позволили установить ряд физических закономерностей, связывающих статистические и фрактальные характеристики объектов с характеристиками световой волны. Однако, как правило, эти закономерности относятся к частным случаям и оказываются справедливыми лишь при определенных, весьма ограниченных условиях. Поэтому представляется целесообразным дополнить фрактальными представлениями ранее выполненные и ставшие уже классическими работы, в которых проблема взаимодействия излучения со случайными неоднородностями рассмотрена в общем виде на основе лишь статистических моделей. Нуждаются также в дополнении фрактальными моделями сложившиеся

концепции, описывающие распространение излучения в турбулентной среде, включая приземную атмосферу.

Цель работы

Цель данной работы предполагает решение двух групп вопросов:

1. Построение теоретических моделей, описывающих прохождение излучения через случайные фрактальные экраны, и установление на их основе физических закономерностей, связывающих скейлинговые характеристики экранов и дифрагировавших на них световых пучков.
2. Распространение фрактальных представлений на описание флуктуационной структуры излучения в турбулентной среде; экспериментальное определение на приземных трассах и моделях турбулентной атмосферы условий для устойчивого проявления скейлинга во флуктуациях излучения.

Положения, выносимые на защиту

1. При прохождении излучения через случайный фрактальный экран, независимо от того, является ли экран амплитудным, фазовым, монофрактальным или мультифрактальным, параметр Херста как для распределения интенсивности, так и для распределения фазы, претерпевает лишь слабые изменения и с хорошим приближением совпадает с параметром Херста функции пропускания экрана. В отличие от параметра Херста спектры сингулярностей амплитудно-фазовых распределений в процессе распространения волны не сохраняются и не воспроизводят спектр сингулярностей пропускания экрана.
2. При прохождении излучения через турбулентную среду фрактальность наиболее отчетливо наблюдается во флуктуациях положения «центра тяжести» светового пучка. Однако если на натуральных атмосферных трассах скейлинг во флуктуациях центра тяжести имеет нестабильный характер, то в лабораторных условиях при распространении излучения через турбулентную среду со стационарными

статистическими параметрами фрактальность флуктуаций характеризуется высокой степенью устойчивости.

3. Наилучшее приближение к идеальному скейлингу флуктуаций излучения в турбулентной среде наблюдается, если размеры пучка меньше характерных размеров турбулентных образований. Наблюдаемые отступления от идеальности связаны с сильным влиянием мелкомасштабных неоднородностей на отклонения пучка.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается тщательным изучением и тестированием методик расчетов и измерений, а также многократностью проведения экспериментов.

Практическая значимость

1. Установленная связь между фрактальными характеристиками случайных экранов и прошедших их световых пучков может быть использована при совершенствовании численных моделей распространения излучения в турбулентной среде и при экспериментальной фиксации изменений характеристик фазовых неоднородностей случайных сред.

2. Данные о фрактальной структуре флуктуаций лазерного излучения в атмосфере позволяют более полно учитывать особенности флуктуационной структуры излучения в системах оптической локации и связи.

Новизна работы

Впервые для общего случая прохождения плоской однородной волны через случайный фрактальный экран установлена связь между фрактальными характеристиками экрана и фрактальными свойствами дифрагировавшего излучения. Определены особенности прохождения через фрактальный экран пространственно ограниченных световых пучков.

Экспериментально обнаружены фрактальные признаки во флуктуационной структуре световой волны,

распространяющейся в случайно-неоднородной турбулентной среде. Рассмотрено влияние крупномасштабных и мелкомасштабных турбулентных образований на характер скейлинга во флуктуациях центра тяжести лазерных пучков.

Апробация работы и публикации

Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры оптики и спектроскопии физического факультета МГУ; а также на конференциях: IX Всероссийская школа – семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Моск. обл. (2004); Десятая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-10», Москва (2004); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам – «Ломоносов-2004», Москва (2004); 21-я всероссийская конференция по распространению радиоволн, Йошкар-Ола (2005); «Ломоносовские чтения», Москва (2006); Российский научный форум с международным участием «Демидовские чтения», Москва (2006); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам – «Ломоносов-2006», Москва (2006); XIII симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск (2006); EuCAP2007, Эдинбург (2007).

Основной материал диссертации, кроме тезисов докладов на научных конференциях, отражен в 7 научных статьях и одном препринте. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 125 страницах. Она состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 116 наименований, содержит 60 рисунков, 5 таблиц.

Краткое содержание диссертации

Введение

Во введении содержится обоснование актуальности выбранной темы, излагаются цели диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы и о публикациях автора.

Первая глава

В первой главе, представляющей литературный обзор по теме работы, рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований прохождения излучения через фрактальные экраны, объекты и среды. Учтены результаты исследования свойств излучения как в ближней, так и в дальней зонах дифракции. Описаны различные методы оценки фрактальности. Отмечается недостаточная освещенность в литературе скейлинговых свойств излучения, взаимодействовавшего с фрактальными объектами и средами. Проанализированы литературные сведения, относящиеся к фрактальным свойствам турбулентных сред. Рассмотрены общие подходы к теоретическому описанию взаимодействия излучения с фрактальными объектами и средами. Обсуждается согласованность теоретических представлений с результатами экспериментов.

Вторая глава

Во второй главе диссертации рассматриваются использованные в работе методы анализа излучения с фрактальной структурой. Основным методом, с помощью которого в данной работе проводился фрактальный анализ, является метод, основанный на анализе поведения структурной функции. Приведены теоретические обоснования этой методики и результаты ее тестирования с использованием различных функций, моделирующих фрактальный сигнал. Для тестирования использовались функция Вейерштрасса, функция броуновского

движения и функция, описывающая построение канторовских полос.

Описаны численные процедуры проведения фрактального и мультифрактального анализа, методика определения области скейлинга и параметра Херста из графика структурной функции S_n :

$$S_n = E \left[|X_{k+n} - X_k| \right] = \frac{1}{K-n} \sum_{k=1}^{K-n} |X_{k+n} - X_k| ,$$

где n – приращение аргумента функции сигнала X_k , K – количество значащих точек.

Обсуждаются ограничения и недостатки используемых методов и способы их устранения. Подробно изучены причины возможных искажений результатов. Приведены вспомогательные аппроксимационные функции, используемые на различных этапах вычислений.

Указаны величина и причины ошибок, возникающих при обработке сигналов. Основное внимание уделяется таким характеристикам сигнала как параметр Херста и ширина спектра фрактальных размерностей. Обосновано дальнейшее использование рассмотренных расчетных схем при решении физических задач, обозначенных в диссертации.

Отдельно рассмотрен вопрос о влиянии присутствующих в сигнале шумов на его скейлинговые свойства. Вычислены максимально допустимые уровни шумов, не искажающих скейлинговые свойства сигналов. Дополнительно рассмотрены возможности определения характеристик исследуемых стохастических сигналов на основе процедуры вейвлет-преобразований.

Третья глава

В третьей главе с теоретической точки зрения рассматривается дифракция излучения на фрактальных объектах. Подробно рассмотрен вопрос о прохождении через фрактальный экран плоской однородной волны и гауссова пучка.

Задача о дифракции волны на фрактальном экране решается в контексте хорошо освещенной в литературе проблемы о прохождении излучения через случайный экран. Однако в отличие от публикаций по этой проблеме, в которых, как правило, определяются традиционные статистические характеристики флуктуаций светового поля, в данной главе основное внимание уделено скейлинговым свойствам излучения. Расчет амплитудно-фазового профиля дифрагировавшей волны осуществлялся как для фазовых, так и для амплитудных экранов, отдельные реализации которых моделировались с помощью функции Вейерштрасса.

Показано, что форма функции плотности вероятности распределений возмущений на фрактальном экране близка к нормальной и соответствует изначальным положениям теории прохождения излучения через случайный экран.

Отмечается, что независимо от того, является ли экран амплитудным, фазовым, монофрактальным или мультифрактальным, при дифракции волны параметр Херста претерпевает лишь слабые изменения и с хорошим приближением совпадает как для распределения интенсивности, так и для распределения фазы с параметром Херста функции пропускания экрана (*рис. 1, 2*).

Установлено, что изменения параметра Херста для распределений интенсивности и фазы, происходящие вдоль направления распространения дифрагировавшей волны, практически совпадают с характером изменений корреляционной размерности для тех же самых распределений.

Среди особенностей распространения гауссова пучка, прошедшего фрактальный экран, отмечается увеличение гладкости пучка с расстоянием. При сглаживании профиля пучка наблюдается увеличение параметра Херста H распределений амплитуды и фазы, и соответствующее уменьшение фрактальной размерности D .

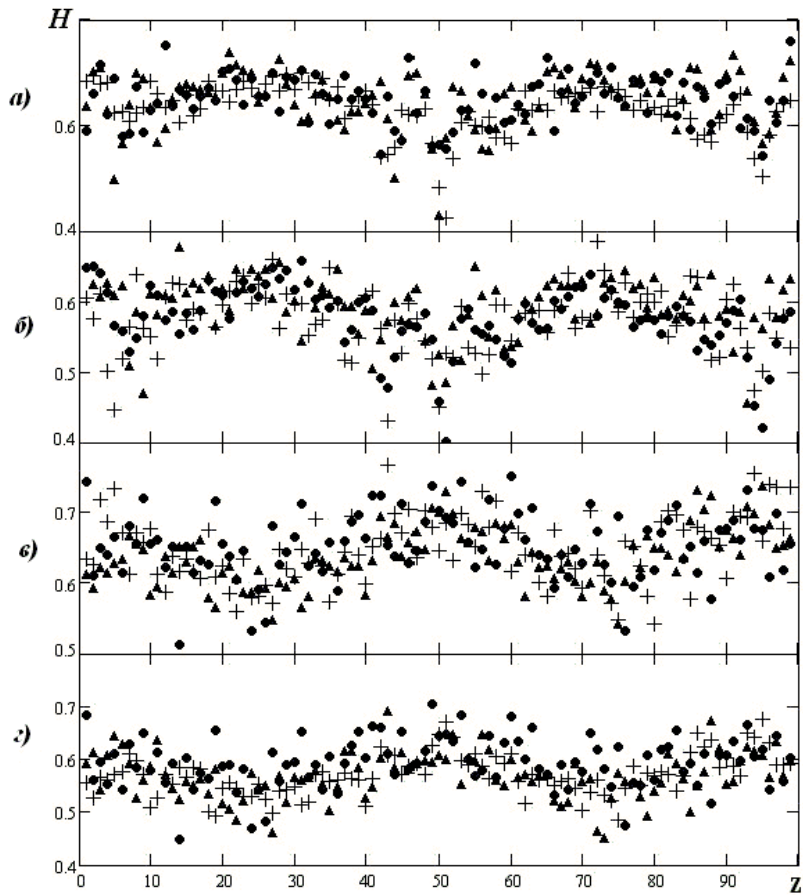


Рис. 1. Изменения параметра Херста H при распространении излучения, прошедшего амплитудный экран, для распределений фазы (а, б) и интенсивности (в, г); а, в – монофрактальный экран ($H=0,666$), б, г – мультифрактальный экран ($H=0,627$); $z=100$ соответствует расстоянию до первого изображения Тальбо – структуры, период которой равен периоду первой гармоники экрана. Идентичные по форме значащие точки относятся к различным реализациям фазового экрана. Первые значащие точки соответствуют расстоянию $z=1$.

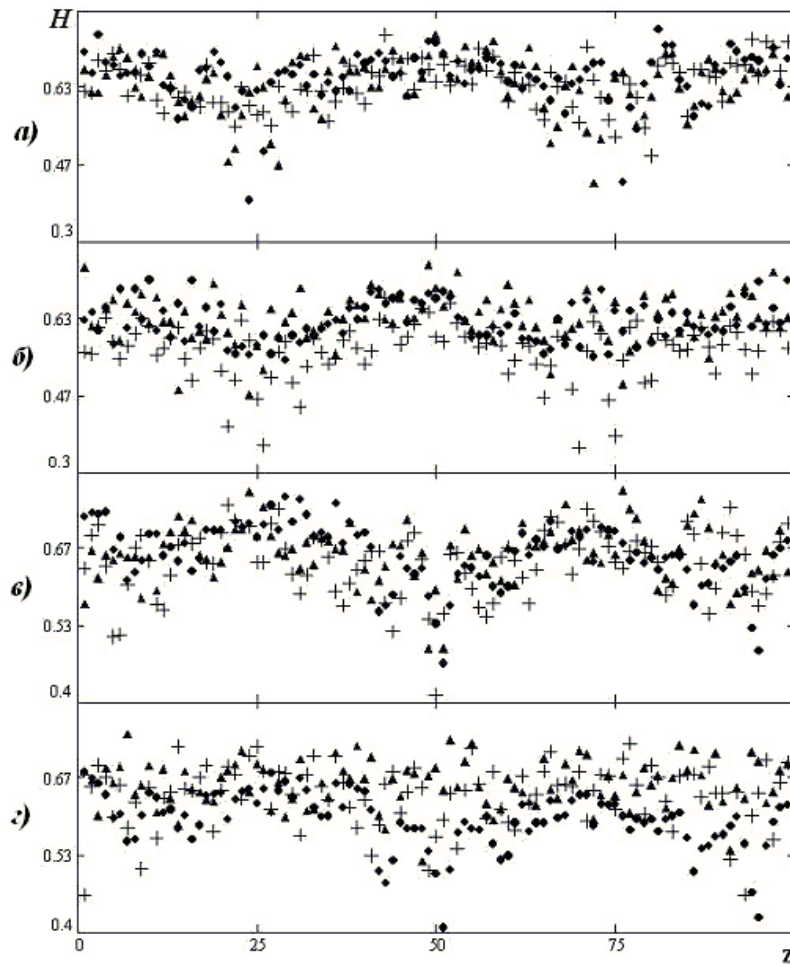


Рис. 2. Изменения параметра Херста H при распространении излучения, прошедшего фазовый экран, для распределений фазы (а, б) и интенсивности (в, г); а, в – монофрактальный экран ($H=0,67$), б, г – мультифрактальный экран ($H=0,65$).

Флуктуации амплитуды гауссова пучка, прошедшего фазовый экран, на некотором удалении от него также приобретают фрактальные признаки, как и в случае безграничной волны, однако менее четко выраженные.

Отмечается, что по мере увеличения расстояния начинают постепенно формироваться зоны фокусировки излучения, в

которых растет локальная интенсивность пучка. Этот процесс является доминирующим на первом этапе распространения пучка и обуславливает падение параметра Херста из-за усложнения флуктуационной структуры распределения интенсивности. Затем по мере распространения излучения волновой фронт сглаживается, фокусирующие свойства отдельных его участков падают, профиль интенсивности сглаживается, и параметр Херста по интенсивности увеличивается. Также показано, что с увеличением ширины пучков изменение скейлинговых характеристик осуществляется более медленно.

Четвертая глава

Четвертая глава диссертации посвящена описанию экспериментальных стендов и методики измерений. В работе использовались два экспериментальных стенда: натурная трасса и лабораторная модель турбулентности. Первая включает горизонтальную и наклонную атмосферные локационные трассы, построенные с использованием зданий МГУ на Воробьевых горах (см. *рис. 3*).

Приемная и передающая аппаратура размещены на высоте 25 м от поверхности Земли. На этой же высоте проходит горизонтальная трасса, которая наиболее часто использовалась в данной работе. Ее длина в одном направлении составляет 280 м.

В качестве источника непрерывного излучения использовался одномодовый гелий-неоновый лазер, работающий на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. Лазерный пучок попадал в атмосферу, пройдя формирующий телескоп, уменьшающий угловую расходимость излучения. Пучок, пришедший с трассы, через принимающий телескоп направлялся в устройство, обеспечивающее регистрацию амплитудно-фазовых характеристик светового поля.



Рис. 3. Расположение приземных лазерных локационных трасс (белые линии) в районе Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. a – входная и выходная апертуры; b_1 , b_2 – отражающие зеркала. ab_1 – горизонтальная, ab_2 – наклонная трассы.

Приемная и передающая апертуры горизонтальной и наклонной трасс были пространственно разнесены на 30 см. Это исключало перекрытие пучков на локационной трассе, распространяющихся в противоположных направлениях, и позволяло не учитывать эффект «усиления флуктуаций», возникающий в перекрывающихся световых полях.

Зарегистрированные аналоговые сигналы и видеоизображения оцифровывались и направлялись в компьютер для определения статистических и скейлинговых характеристик излучения.

Для получения статистических данных аналоговые и видеосигналы записывались в течение несколькими минут. Это

обеспечивало наличие в каждой записываемой «протяжке» несколько тысяч видеокадров и несколько десятков тысяч значащих точек оцифрованного аналогового сигнала.

Параллельно с регистрацией оптических характеристик оценивались метеорологические параметры трассы (температура, давление, влажность, скорость и направление ветра, дальность оптической видимости) в точках расположения приемо-передающей аппаратуры, отражательных зеркал и в непосредственной близости от подстилающей поверхности, а также проводилось определение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления C_n^2 . При определении C_n^2 использовались соотношения, связывающие величину C_n^2 со значениями метеопараметров, дисперсией флуктуаций интенсивности и количеством винтовых дислокаций, наблюдаемых на волновом фронте.

Исследование распространения пучка в условиях квазистационарной турбулентности проводилось с использованием лабораторной модели турбулентной атмосферы. Модель представляла собой многоходовую кювету, в которой распространялся лазерный пучок с длиной волны $\lambda=0,532$ мкм или $\lambda=0,650$ мкм (рис. 4).

С помощью установленных по краям кюветы «гонящих» зеркал, регулировалось число проходов пучка через кювету, позволяя тем самым измерять зависимости изменений характеристик лазерного пучка от длины оптического пути в турбулентной атмосфере.

Регистрация флуктуаций центра тяжести осуществлялась путем компьютерной обработки видеоизображений прошедшего кювету лазерного пучка. Скорость регистрации изображений составляла 60 кадров в секунду.

Турбулентная среда формировалась путем смешивания горячего воздуха, поднимающегося от расположенных снизу нагревательных элементов, с холодным, вводимым в кювету через расположенные сбоку форсунки. Для создания необходимых условий разность температур в кювете и скорость по-

дачи холодного воздуха регулировались путем изменения напряжения на нагревательных элементах и на компрессоре.

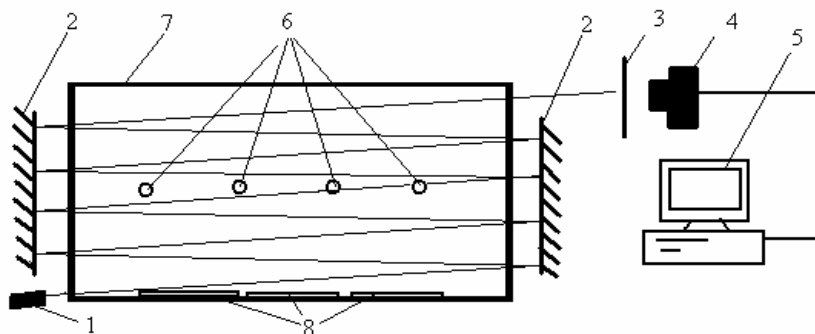


Рис. 4. Оптическая схема установки, моделирующей атмосферную турбулентность. 1 – лазер; 2 – «гоняющие» зеркала; 3 – полупрозрачный экран; 4 – камера; 5 – персональный компьютер; 6 – форсунки; 7 – кювета; 8 – нагревательные элементы.

Проводились отдельные эксперименты для оценки турбулентности среды. В этом варианте регистрировался широкий пучок диаметром около 5 см, прошедший кювету однократно. Его структура регистрировалась на большом расстоянии от кюветы для более яркого проявления каустик. Размеры неоднородностей оценивались при помощи интерферометра Юнга. Для этого на выходе из кюветы были установлены две горизонтальные щели длиной 3,5 см, на расстоянии 1 см друг от друга.

Пятая глава

Пятая глава описывает результаты экспериментов, проведенных на натурной трассе, на лабораторной модели, а также включает в себя их интерпретацию.

Особенности флуктуаций излучения на натурной трассе проиллюстрированы на основе двух серий измерений. Первая серия измерений характеризуется тем, что они проводились в летний период, в середине солнечного дня, при температуре воздуха 21 – 25 °С и слабом ветре (~ 1 м/с). В таких условиях турбулентные процессы приобретают до некоторой степени

стационарный характер. Измерения, относящиеся ко второй серии, осуществлялись в осенний период, когда наблюдалась перемежаемость мелкомасштабной турбулентности. Перемежаемость мелкомасштабной турбулентности приводила к спорадической стохастизации пучка, при которой его квазирегулярный профиль приобретал спеклоподобную форму.

Анализ функции плотности вероятности флуктуаций положения центра тяжести пучка показал, что статистика флуктуаций как для горизонтальных, так и для вертикальных смещений близка к нормальному закону. В летний период дисперсия смещений центра тяжести заметно уступает дисперсии смещений в осенний период. При этом наблюдаются определенные различия в структуре флуктуаций положения «центра тяжести» в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис. 5).

При анализе поведения структурных функций в двойном логарифмическом масштабе было установлено, что они обнаруживают устойчивую тенденцию к росту в интервале, определяемом примерно областью значений $0 < n < 8$ (рис. 6). Для рассмотрения мультифрактальных характеристик излучения был проведен расчет плотностей вероятностей распределения локальных параметров Херста. Эффективная ширина функций плотности вероятности значений локальных параметров Херста в первой серии измерений оказывается несколько больше, чем для второй. Во всех случаях максимумы плотности вероятностей для горизонтального и вертикального направлений смещены относительно друг друга, хотя для стохастизованного пучка эти смещения сравнительно невелики.

Однако значения параметра Херста, характеризующего фрактальность смещений лазерного пучка часто спорадически изменялись в диапазоне 0,05-0,25 и не позволяли выявить физические и метеорологические факторы, влияющие на фрактальную структуру излучения. Поэтому возникла необходимость проведения дополнительных исследований особенностей структуры флуктуаций в ла-

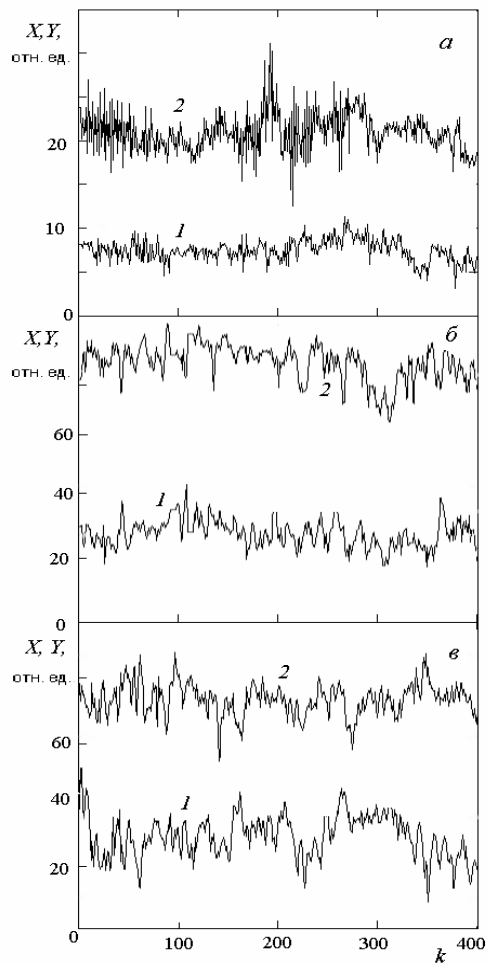


Рис. 5. Флуктуации положения центра тяжести в горизонтальном X (кривые 1) и вертикальном Y (кривые 2) направлениях для двух серий измерений. а – первая серия; б – вторая серия, квазирегулярный пучок; в – вторая серия, стохастизированный пучок. k – номер значащей точки.

бораторных условиях, позволяющих осуществлять надежный контроль параметров турбулентности.

Оценка степени воспроизведения процессов влияния турбулентной среды на скейлинг во флуктуационной структуре лазерных пучков проводилась для трех типов турбулентности: слабой, средней, сильной. Анализ степени воспроизведения результатов проводился на основе изучения смещения центра тяжести пучка.

Выполненные оценки по многочисленным реализациям показали, что стандартное отклонение параметра Херста от среднего значения для определенных условий “приготовления” турбулентной среды не превышает величину 0,06,

несмотря на заметное изменение стандартных отклонений положения центра тяжести пучка, что свидетельствует о достаточно высокой степени воспроизводимости результатов.

Сопоставление данных, полученных на атмосферных трассах и в лабораторном эксперименте, показало, что наиболее общие статистические характеристики флуктуаций, зарегистрированные в этих экспериментах, носят схожий характер. В частности, плотность вероятностей флуктуаций подчиняется нормальному закону. Были найдены режимы, в которых установка, моделирующая турбулентность,

позволяла получать результаты, аналогичные атмосферным.

В ходе экспериментов было установлено, что наиболее отчетливо фрактальные свойства излучения проявляются, когда размеры пучка уступают характерным размерам неоднородностей.

Выявлено, что параметр Херста стабильно увеличивается с ростом числа проходов (рис. 7) и увеличением ширины пучка. Обнаруженная тенденция к увеличению параметра Херста с ростом числа проходов и увеличением размера

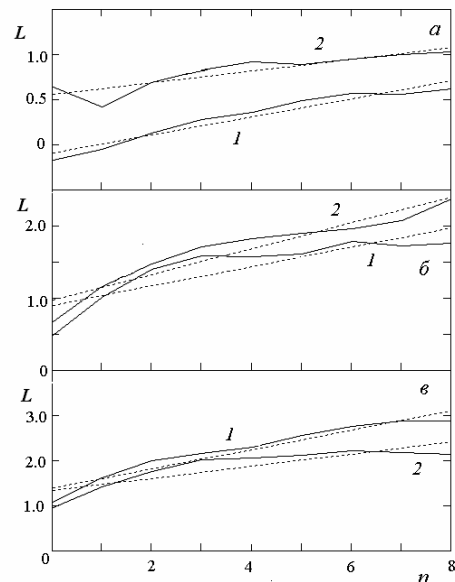


Рис. 6. Графики структурных функций флуктуаций положения центра тяжести в горизонтальном (кривые 1) и вертикальном (кривые 2) направлениях в двойном логарифмическом масштабе ($L = \log_2 S$, приращение аргумента функции $- 2^n$) для двух серий измерений. а – первая серия; б – вторая серия, квазирегулярный пучок; в – вторая серия, стохастизированный пучок.

пучка обусловлена усреднением влияния мелкомасштабных неоднородностей.

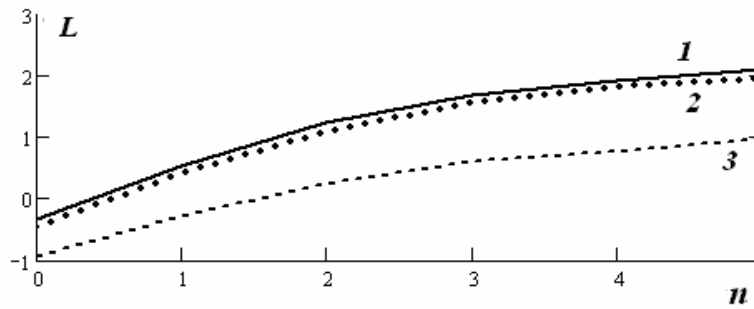


Рис. 7. Графики структурных функций флуктуаций центра тяжести лазерного пучка для 8 (1), 6 (2) и 4 (3) проходов по кювете.

Данные, полученные на лабораторной модели турбулентности, свидетельствуют также о том, что обнаруженные в ходе опытов на натуральных приземных трассах фрактальные признаки во флуктуациях лазерного излучения не являются результатом случайного стечения физических факторов, а отражают глубокую связь между фрактальной структурой неоднородностей и фрактальностью флуктуаций излучения.

Для теоретического определения уровня и характера флуктуаций лазерного пучка, прошедшего через многоходовую кювету, использовалась модель движущихся перпендикулярно направлению распространения излучения случайных фазовых экранов построенных по корреляционной функции типа

$$B(r) = \langle n_1^2 \rangle \exp(-|r/l|^q)$$

Наилучшее соответствие результатам эксперимента достиглось, если значение q имело величину $q=1,75$. При указанном значении q наиболее четко проявлялась фрактальность в рассчитанных графиках смещений центра тяжести пучка. Для 4-х двойных проходов пучка через кювету параметр Херста составлял величину $H=0,27$, весьма близкую к измеренной в эксперименте.

Выводы

1. Протестированы методы фрактального анализа случайных сигналов. Применительно к решаемым в диссертации задачам найдены оптимальные процедуры и приемы. Показано, что точность определения фрактальных характеристик заметным образом снижается при небольших значениях параметра Херста ($H \approx 0,1$), а также при наличии аддитивного шума, амплитуда которого сопоставима с амплитудой формирующих сигнал гармоник.

2. Рассмотрена задача о прохождении световой волны через случайный фрактальный экран. Показано, что статистические характеристики волны, прошедшей экран, находятся в соответствии с известными представлениями о прохождении излучения через случайные экраны. Проведенные расчеты показали, что независимо от того, является ли экран амплитудным, фазовым, монофрактальным или мультифрактальным, при распространении волны за экраном параметр Херста претерпевает лишь слабые изменения и с хорошим приближением совпадает как для распределения интенсивности, так и для распределения фазы с параметром Херста функции пропускания экрана. В то же время спектры сингулярностей пространственных флуктуаций излучения претерпевают в зависимости от расстояния до экрана значительные изменения.

3. Установлено, что дифракционное распространение гауссового пучка после фрактального экрана обладает рядом особенностей, отличающих его от распространения неограниченной волны. Основное отличие состоит в том, что параметр Херста амплитудных и фазовых распределений по мере распространения дифрагировавшей волны изменяется. Так, для фазового экрана параметр Херста распределений фазы имеет устойчивую тенденцию к увеличению; параметр Херста распределений амплитуды по мере распространения волны сначала уменьшается, а затем увеличивается.

4. Экспериментально показано, что флуктуации положения центра тяжести лазерного пучка, распространяющегося на

горизонтальной трассе в приземной тропосфере, обладают фрактальными признаками. Однако значения параметра Херста, характеризующего фрактальность смещений лазерного пучка, спорадически изменялись в диапазоне 0,05-0,25 и не позволяли выявить физические и метеорологические факторы, влияющие на фрактальную структуру излучения.

5. На лабораторной модели турбулентной среды получены экспериментальные данные, свидетельствующие, что обнаруженные в ходе опытов на натуральных приземных трассах фрактальные признаки во флуктуациях лазерного излучения не являются результатом случайного стечения различных физических факторов, а отражают глубокую связь между структурой неоднородностей и фрактальностью флуктуаций излучения. Эксперименты на модели атмосферы позволяли управлять величиной параметра Херста в диапазоне 0,05-0,4. Установлено, что параметр Херста колебаний центра тяжести пучка увеличивается с ростом оптического пути и апертуры пучка. Одновременно было обнаружено, что структура локальных флуктуаций интенсивности лазерного пучка не обладает фрактальными свойствами.

6. На основе численного моделирования с использованием метода фазовых экранов дана интерпретация зафиксированного в экспериментах поведения лазерных пучков. Расчеты подтвердили данные экспериментов о том, что наиболее отчетливо фрактальность в колебаниях лазерного пучка наблюдается, когда его размеры уступают характерным размерам неоднородностей среды распространения.

7. Обнаруженные и исследованные в работе фрактальные свойства флуктуационной структуры лазерных пучков могут быть использованы при контроле изменений состояния случайно-неоднородных сред; их следует учитывать при оптимизации характеристик разнообразных метрологических устройств, систем дистанционного зондирования и оптических линий связи.

Публикации по теме диссертации

1. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Ломоносов В.Г., Маганова М.С., Меснянкин А.В., Таначев И.А. *Сравнительный анализ флуктуаций лазерного излучения на приземных городских трассах при различных состояниях турбулентности* // Известия РАН. Серия физическая, т. 68, № 12, 2004, с. 1812-1815.
2. Ломоносов В.Г., Маганова М.С., Меснянкин А.В., Таначев И.А. *Сравнительный анализ флуктуаций лазерного излучения на приземных городских трассах при различных состояниях турбулентности*. // IX Всероссийская школа – семинар “Волновые явления в неоднородных средах”. Моск. обл. Пансионат “Университетский”. 24- 29 мая 2004 г. Сборник тезисов, с.5,6.(тезисы докладов)
3. Маганова М.С., Таначев И.А. Эффекты «дрожания» лазерных пучков на приземных атмосферных трассах. // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам – “Ломоносов-2004”, Секция “Физика”, физический факультет МГУ, 2004. Сборник тезисов, с. 185 – 186. (тезисы докладов)
4. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В., Таначев И.А. *Особенности флуктуационной структуры лазерных пучков на приземной трассе с перемежающейся турбулентностью*. // Сборник тезисов десятой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-10», ч.2, с. 682-683, Москва, 1-7 апреля 2004
5. Т.И. Арсеньян, П.В. Короленко, М.С. Маганова, В.Г. Ломоносов, И.А. Таначев *Флуктуации лазерных пучков на приземной городской трассе*. // Квантовая Электроника, 35, 119 (2005).
6. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Ломоносов В.Г., Таначев И.А. *Стохатизация лазерных пучков на приземной трассе*. // Радиотехника и Электроника № 1, 2005 г.
7. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Ломоносов В.Г., Таначев И.А. Смещения центра тяжести лазерных пучков на приземной трассе в условиях города // 21-я всероссийская конференция по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005. Сборник докладов, Йошкар-Ола, издательство МарГТУ, 2005, стр. 310-314
8. Короленко П.В., Мишин А.Ю., Родионова С.С. , Таначев И.А. Скейлинговые характеристики флуктуаций лазерного излучения // Сборник тезисов научной конференции «Ломоносовские чтения», Секция «Физика», стр.20-23, Москва, 17-27 апреля 2006.
9. Зотов А.М., Короленко П.В., Макаров В.Г., Таначев И.А, Цхай С.Н. *О применении многоходовых оптических элементов в прецизионных*

газовых // Препринт физического факультета МГУ, 2006. №1, Москва, 2006. 29с

10. Зотов А.М., Короленко П.В., Родионова С.С., Таначев И.А. Скейлинг во флуктуационной структуре лазерного излучения // Сборник тезисов российского научного форума с международным участием "Демидовские чтения", секция «Мощные газовые лазеры», 25.02-06.03.2006, Москва.
11. Зотов А.М., Таначев И.А. *Оптимизация оптических трактов прецизионных газовых анализаторов.* // Сборник тезисов международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам – "Ломоносов-2006", секция "Физика", 13-20 апреля 2006., с. 202, Москва, физический факультет МГУ.
12. T. Arsenyan, P. Korolenko, M. Maganova, I. Tanachev *Scaling in processes of laser radiation randomization* // Сборник трудов XIII симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», с. 64, Томск, 2-7 июля 2006.
13. A.I. Fedoseev, M.A. Gosteva, V.A. Gurashvily, P.V. Korolenko, A.I. Odintsov, N.E. Sarkarov, I.A.Tanachev *Self-pulsing fast flow laser with control lable depth of power modulation* // Proceeding SPIE, v. 6053, p. 123-127, 2005
14. Т.И. Арсеньян, А.М. Зотов, П.В. Короленко, М.С. Маганова, И.А. Таначев *Об устойчивости фрактальных свойств лазерного излучения в турбулентных средах* // Оптика океана и атмосферы Т.19, № 12, 2006. С. 1013-1015.
15. Arsenyan, P. Korolenko, M. Maganova, I. Tanachev *Scaling in processes of laser radiation randomization* // Proceedings of SPIE, 2006, v. 6522, 65220C, p. 10.
16. P. Korolenko, I. Tanachev, O.Vokhnik *Features in radiation diffraction on fractal screen* // Physics of Wave-phenomena, 2006, v. 14, № 4, p. 20-26.
17. Arsenyan T., Korolenko P., Maganova M., Tanachev I. *Electromagnetic Waves Fluctuations in Random Fractal Medium* // proceedings EuCap 2007, p 213.