

Т.И. Арсеньян, А.М. Зотов, П.В. Короленко, М.С. Маганова, И.А. Таначев

Об устойчивости фрактальных свойств лазерного излучения в турбулентных средах

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

На модели турбулентной атмосферы проведено экспериментальное исследование фрактальных характеристик флуктуаций положения «центра тяжести» лазерного пучка. Установлено, что наиболее отчетливо фрактальные свойства излучения проявляются, когда размеры пучка уступают или сопоставимы с характерными размерами неоднородностей. Показано, что при неизменных статистических характеристиках турбулентной среды параметр Херста флуктуаций и, соответственно, фрактальная размерность характеризуются высокой степенью стабильности.

Изучению флуктуаций структуры лазерного излучения в турбулентной атмосфере посвящена обширная литература (см., например, [1–4]). Чаще всего в выполненных по этой теме работах для описания флуктуаций используются традиционные методы теории вероятностей и математической статистики. При этом, как правило, без внимания остается изучение скейлинга в структуре флуктуаций, характеризующего их фрактальные и мультифрактальные свойства.

В работах [5, 6] сообщалось об обнаружении и исследовании фрактальности во флуктуациях лазерного излучения, распространяющегося на приземных атмосферных трассах. Однако в упомянутых работах указывалось на неустойчивость регистрируемых характеристик фрактальности. При проведении экспериментов в приземной атмосфере отсутствие возможности полноценно контролировать состояние турбулентности по всей длине трассы не позволяло однозначно связать изменения фрактальных свойств флуктуаций излучения с изменениями параметров среды распространения. Поэтому возникла необходимость дополнительных исследований особенностей структуры флуктуаций в лабораторных условиях, позволяющих осуществлять надежный контроль параметров турбулентности.

В данной работе такого рода исследование проведено с использованием модели турбулентной атмосферы. Модель представляла собой многоходовую кювету, в которой распространялся лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм (рис. 1).

Турбулентная среда формировалась путем смешивания нагретого воздуха с холодным, вводимым в кювету через форсунки. Регистрация флуктуаций центра тяжести осуществлялась путем компьютерной обработки видеоизображений прошедшего кювету лазерного пучка. Скорость регистрации изображений составляла 60 кадр./с.

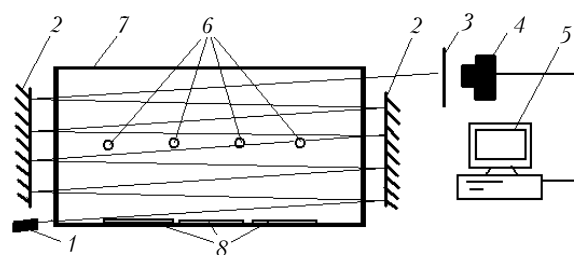


Рис. 1. Оптическая установка, моделирующей атмосферную турбулентность: 1 – лазер; 2 – «гонящие» зеркала; 3 – полупрозрачный экран; 4 – камера; 5 – персональный компьютер; 6 – форсунки; 7 – кювета; 8 – нагревательные элементы

В ходе экспериментов было установлено, что наиболее отчетливо фрактальные свойства излучения проявляются, когда размеры пучка уступают или сопоставимы с характерными размерами неоднородностей. Обычно этот режим соответствовал разности температур горячего и холодного воздуха, равной примерно 60 °С. Характерные размеры неоднородностей определялись с помощью интерферометра Юнга, на который подавался дополнительный расширенный световой пучок после однократного прохождения через турбулентную среду. Проведенные оценки структурной характеристики флуктуаций показателя преломления C_n^2 для оптимального режима регистрации фрактальных характеристик в турбулентной среде дают значение порядка $10^{-8} \text{ см}^{-2/3}$.

Зарегистрированные в эксперименте горизонтальные флуктуации положения X_c центра тяжести коллимированного пучка диаметром 5 мм для разного числа проходов по кювете представлены на рис. 2.

Из приведенных данных видно, что с уменьшением числа проходов дисперсия флуктуаций падает.

Скейлинг во флуктуациях положения центра тяжести пучка определялся с помощью метода, основанного

на изучении поведения структурной функции S_n первого порядка [7, 8]:

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

Здесь X — исследуемый сигнал; $k, k+n$ — номер значащих точек; K — количество значащих точек; $0 < n < K$. Если график структурной функции, построенный в двойном логарифмическом масштабе, в определенной области изменения n близок к прямой линии, то можно говорить о наличии в сигнале фрактальных свойств. По углу наклона прямой оценивается параметр Херста H , связанный с фрактальной размерностью D соотношением $D = 2 - H$.

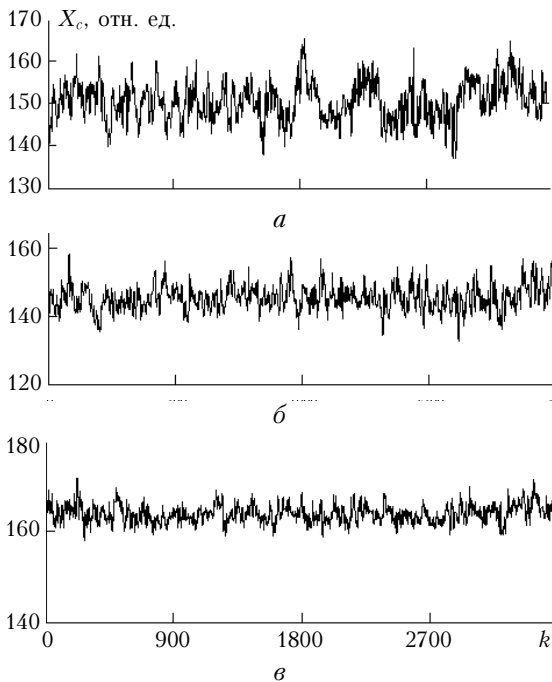


Рис. 2. Флуктуации центра тяжести лазерного пучка для 8 (а), 6 (б) и 4 (в) проходов пучка по кювете. (Временной интервал между значащими точками по оси абсцисс составляет 1/60 с)

На рис. 3 приведены графики структурных функций для случаев, представленных на рис. 2. Видно, что область скейлинга, в которой устойчиво проявляется тенденция к росту структурной функции,

составляет величину около 32 значащих точек, что примерно в 3 раза превосходит размер зоны корреляции флуктуаций.

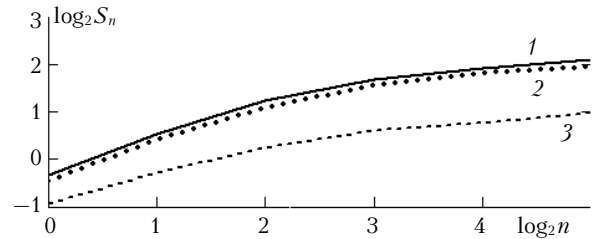


Рис. 3. Графики структурных функций флуктуаций центра тяжести лазерного пучка для 8 (1), 6 (2) и 4 (3) проходов по кювете

Измерения показали, что при определенном числе проходов через кювету и фиксированных значениях термических и газодинамических параметров турбулентной среды параметр Херста характеризуется высокой степенью устойчивости. Его отклонения от средних по реализациям значений не превышали 0,04. При этом обнаруживается тенденция к увеличению параметра Херста с ростом числа проходов и увеличением ширины пучка, что связано с усреднением влияния мелкомасштабных неоднородностей.

Зарегистрированные в эксперименте конкретные значения параметров для пучков диаметром 5 и 15 мм как для горизонтального, так и для вертикального направлений смещений приведены в таблице.

Характеристики этих колебаний различны, поскольку турбулентность в кювете не является изотропной. Анизотропия обусловлена тем, что направленное движение вверх нагретого электрическими элементами воздуха не в полной мере устраняется его смещением с холодным воздухом, который вводится в кювету в горизонтальном направлении.

Если интенсивность турбулентных процессов в кювете усиливалась за счет увеличения разности температур горячего и холодного воздуха, то значения параметра Херста уменьшались. Однако в результате роста зашумленности регистрируемых сигналов точность определения параметров Херста значительно снижалась. Эффективный анализ фрактальности в таких условиях возможен, видимо, лишь при использовании более быстродействующих регистрирующих устройств.

Число проходов	Среднеквадратические смещения, отн. ед.	Параметр Херста	Среднеквадратические смещения, отн. ед.	Параметр Херста
	Ширина пучка, мм			
	5		15	
	<i>Смещения в горизонтальном направлении</i>			
8	5,11	0,37	4,45	0,48
6	3,56	0,35	3,52	0,48
4	1,59	0,27	1,90	0,38
	<i>Смещения в вертикальном направлении</i>			
8	9,38	0,35	7,06	0,39
6	4,89	0,29	5,61	0,38
4	1,94	0,18	2,24	0,26

Параллельно с проведением экспериментов было осуществлено численное моделирование эффектов дрожания пучка при прохождении через кювету на основе метода случайных экранов. Рассматривались два одномерных фазовых экрана, располагающихся вблизи отражающих поверхностей плоских зеркал многоходовой кюветы и двигающихся в направлении, перпендикулярном оси кюветы. Их корреляционные функции задавались выражением [9]:

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

где n_1 – величина, характеризующая интенсивность флуктуаций показателя преломления в кювете; r – база разнесения; l – размер неоднородности.

В ходе численного моделирования было установлено, что наилучшее соответствие результатам эксперимента достигалось, если показатель степени q равнялся 1,75. По корреляционной функции на основании теоремы Винера–Хинчина определялась мощность спектра флуктуаций фазы и генерировались отдельные реализации структуры фазовых экранов. Затем последовательно рассматривалась дифракция лазерного пучка на каждом из экранов. Смоделированные таким способом применительно к условиям эксперимента флуктуации центра тяжести пучка показаны на рис. 4.

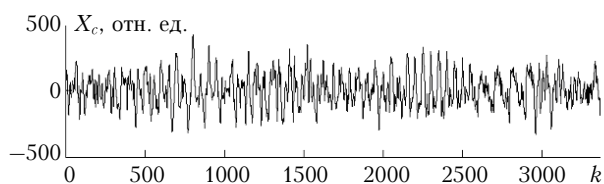


Рис. 4. Смоделированные флуктуации центра тяжести лазерного пучка

Анализ этих флуктуаций показал, что их структура, так же как и структура наблюдаемых в эксперименте колебаний пучков, обладает фрактальными свойствами. Оценка параметра Херста для флуктуаций пучка дала значение $H = 0,56$, что несколько превосходит зарегистрированное в эксперименте.

Имеющееся расхождение, по всей вероятности, связано с приближенным характером используемой модели флуктуаций показателя преломления.

Таким образом, экспериментальные данные, подтвержденные результатами численного моделирования, свидетельствуют о том, что обнаруженные ранее 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 фрактальной структурой неоднородностей и фрактальностью флуктуаций излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 050208244, офи-а), Совета по грантам Президента РФ (грант МК-2496.2005.2) и Программы поддержки ведущих научных школ (проект НШ-4870.2006.2).

1. Прохоров А.М., Бункин Ф.В., Гочелаишвили К.С., Шишов В.И. Распространение лазерного излучения в случайно-неоднородных средах // Успехи физ. наук. 1974. Т. 114. Вып. 3. С. 415–456.
2. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
4. Семенов А.А., Арсеньян Т.И. Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах. М.: Наука, 1978. 272 с.
5. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. Характеристики лазерных пучков в условиях перемежаемости мелкомасштабной атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 10. С. 894–899.
6. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Ломоносов В.Г., Таначев И.А. Стохастизация лазерных пучков на приземной трассе // Радиотехника. 2005. № 1. С. 30–35.
7. Кроневер Р. М. Фракталы и хаос динамических систем. М.: Постмаркет, 2000. 464 с.
8. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. М.: Изд-во УНЦ ДО, 2004. 81 с.
9. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2. М.: Мир, 1981. 319 с.

T.I. Arsenyan, A.M. Zotov, P.V. Korolenko, M.S. Maganova, I.A. Tanachev. On stability of fractal properties of laser radiation turbulent media.

Experimental investigation of the fractality of the beam center of gravity displacements was carried out using the model of the turbulent media. These fractal properties manifest themselves more distinctly when the beam diameter is smaller or near the characteristic dimensions of the turbulent inhomogeneities. It is shown that under the fixed statistical characteristics of the turbulent media the Hirst parameter of fluctuations and the fractal dimension, respectively, are characterized by a high degree of stability.