

УДК 621.371:551.510

АПЕРТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКАХ НА ТРАССАХ С ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЙСЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

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

(кафедра радиофизики; кафедра оптики и спектроскопии)

E-mail: korolenko@optics.npi.msu.su

Экспериментально исследовано влияние апертуры коллимированных лазерных пучков, распространяющихся по атмосферным каналам в условиях перемежающейся турбулентности, на преобразование их пространственно-временной структуры. Установлено, что существует критическое значение выходной апертуры пучка, близкое к размеру первой зоны Френеля трассы, превышение которого приводит к стохастизации излучения. Рассмотрено изменение статистических характеристик излучения при значении апертуры, близком к критическому.

Распространение лазерного излучения на приземных трассах имеет ряд особенностей, значительная часть которых обусловлена неустойчивостью процессов развития мелкомасштабной турбулентности. Эксперименты показывают [1–5], что изменение состояния мелкомасштабной турбулентности, происходящее чаще всего в условиях высоких температурных градиентов, приводит к чередованию двух структурных состояний светового пучка. Одно из них — квазирегулярное — соответствует слабозмущенной трассе и характеризуется большим радиусом корреляции флуктуаций интенсивности, близким к радиусу пучка, и бездислокационной структурой волнового фронта. Второму — стохастическому — свойственно спеклоподобное распределение интенсивности в поперечном сечении пучка с многочисленными винтовыми дислокациями на волновом фронте. Чередование состояний носит квазипериодический характер и осуществляется скачкообразно. При этом длительность каждого состояния может меняться от секунд до нескольких десятков секунд. Все экспериментальные и теоретические данные, содержащиеся в указанных работах, получены для узких коллимированных пучков, числа Френеля которых близки к единице. В публикациях отсутствуют сведения о поведении в атмосфере пучков с другими значениями чисел Френеля. Настоящая работа восполняет этот пробел. Здесь рассматриваются статистические характеристики лазерных пучков с различной апертурой в условиях структурной перемежаемости.

Экспериментальный стенд был построен с использованием зданий Московского государственного университета на Воробьевых горах. Подробное описание основных узлов приемно-передающей и контрольно-измерительной аппаратуры, а также компьютерных технологий, применяемых для обработки экспериментальных данных, приведено в работах [1–3]. В настоящей работе была использована горизонтальная трасса локационного типа, длина которой (в одном направлении) составляла

280 м, а высота над поверхностью Земли — 25 м. Эксперименты проводились в 1999 г. в осенне-зимний период. Для этого времени года характерно наиболее интенсивное развитие неустойчивостей в приземном слое атмосферы.

В качестве источника излучения применялся одномодовый гелий-неоновый лазер на длине волны 0.63 мкм. Формирующая оптика позволяла менять размеры выходного лазерного пучка в широких пределах. В тех случаях, когда возникала необходимость проводить одновременную регистрацию характеристик излучения на близко расположенных горизонтальных трассах, максимально расширенный пучок направлялся на два отверстия в непрозрачном экране. Диаметры отверстий и расстояние между ними могли варьироваться. Выходящие из отверстий пучки распространялись по траекториям, близким к параллельным. Изображения пришедших с трассы пучков регистрировались с помощью ПЗС-матрицы или видеокамеры. Затем видеосигналы в телевизионном стандарте направлялись в компьютер для последующей обработки. Специально разработанное программное обеспечение позволяло осуществлять многопараметрический анализ как отдельных снимков изображений пучков, так и длинных «протяжек», включающих десятки и сотни последовательных видеок кадров.

Регистрация поведения пучков разных диаметров осуществлялась последовательно, при этом состояние атмосферной трассы за период измерений оставалось квазистационарным (весь цикл измерений занимал примерно 20 мин). Эксперименты, проведенные в разных метеоусловиях, показали, что при числах Френеля пучков, близких к единице (узкий коллимированный пучок), распределение интенсивности излучения на входной апертуре спорадически менялось, скачкообразно переходя от квазирегулярного к стохастическому.

Характерные примеры трех последовательных видеок кадров, относящихся к квазирегулярному (*a*) и стохастическому (*b*) состояниям пучка, приведены

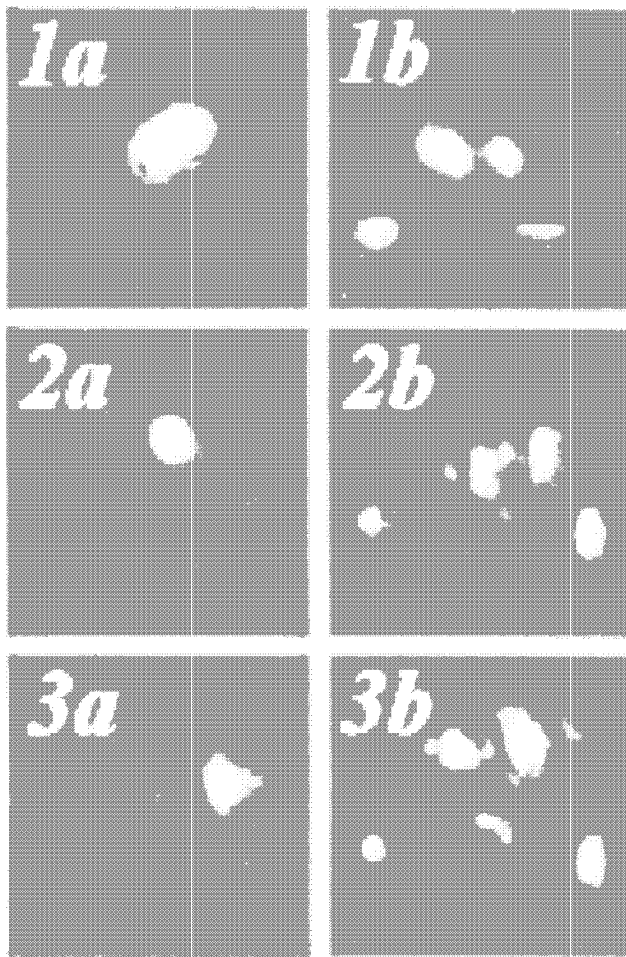


Рис. 1. Структура лазерного пучка в квазирегулярном (последовательность кадров 1а–3а) и стохастическом (последовательность кадров 1б–3б) состояниях

на рис. 1. Кадры 1а–3а непосредственно предшествуют моменту стохастизации, кадры 1б–3б соответствуют стохастизированному состоянию пучка. Временной интервал между кадрами 0.04 с. При переходе от узких коллимированных к коллимированным пучкам с увеличенным поперечным размером возрастает длительность стохастического состояния пучка. Одновременно пространственная структура излучения в стохастическом состоянии становится все более сложной (рис. 2, а–в). Экспериментальные точки на рис. 2 получены в разные дни и относятся к разным метеоусловиям. Дата измерений, метеоусловия (температура T и скорость ветра V) и используемые на рис. 2 обозначения приведены в таблице.

Дата измерений	$T, ^\circ\text{C}$		Скорость ветра $V, \text{ м/с}$ на высоте 25 м	Обозначения на рисунках
	на высоте 25 м	на высоте 2.5 м		
02.11.99	8	8.5	1	---□---
15.11.99	-1.5	-0.5	1	—△—
25.11.99	-13	-13.5	1.2	---○---
09.12.99	-2.6	-2.7	1.6	---◇---

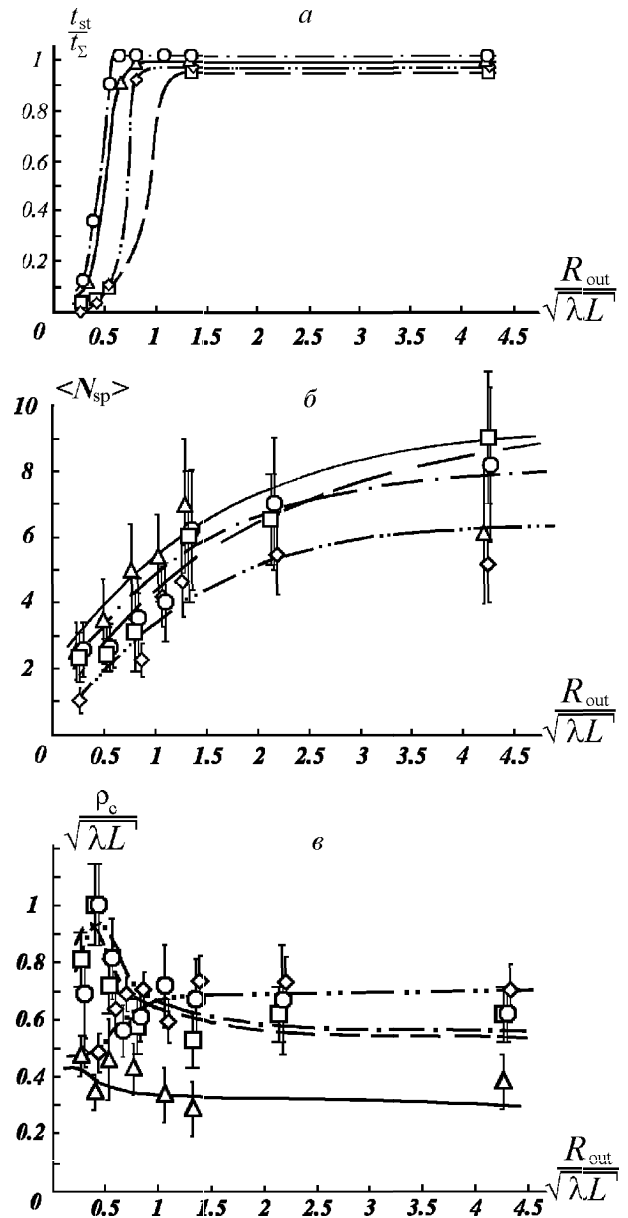


Рис. 2. Зависимость отношения полного времени пребывания пучка в стохастическом состоянии t_{st} к полному времени измерения t_Σ (а), среднего количества спеклов $\langle N_{sp} \rangle$ (б) и радиуса корреляции флуктуаций интенсивности ρ_c (в) от размера выходной диафрагмы (R_{out} — радиус выходной апертуры, λ — длина волны, L — длина трассы)

Зависимость относительного времени пребывания пучка в стохастическом состоянии t_{st}/t_Σ от размера выходной апертуры (t_{st} — полное время пребывания пучка в стохастическом состоянии, t_Σ — полное время измерения) показана на рис. 2, а. Обычно t_Σ составляло несколько минут, что намного превосходит характерный период изменения состояния пучка. Видно, что относительное время пребывания пучка в стохастическом состоянии имеет ярко выраженную зависимость от величины выходной апертуры. При достижении некоторого критического значения радиуса выходной апертуры происходит практически полная стохастизация пучка. Это значение слабо зависит от метеоусловий и

соответствует числам Френеля, лежащим в области 0.5–1.5.

Зависимости числа спеклов в поперечном сечении и радиуса корреляции флуктуаций интенсивности от размеров выходной апертуры приведены соответственно на рис. 2, б и в. Количество спеклов определялось на основе процедуры бинаризации поперечной структуры пучка. Уровень бинаризации задавался в пределах 0.1–0.8 от максимального значения интенсивности. Фиксировалось максимальное количество спеклов, соответствующее указанному пределу. Радиус корреляции флуктуаций интенсивности оценивался по стандартной процедуре [3]. Как видно из рис. 2, б, число спеклов в поперечном сечении излучения монотонно возрастает по мере увеличения размеров выходной апертуры. Ход кривых, относящихся к процессу изменения радиуса корреляции флуктуаций интенсивности, несколько более сложен (рис. 2, в). Если в закритической области изменения апертуры, соответствующей стохастическому состоянию, радиус корреляции меняется незначительно, то в докритической области он обнаруживает заметные изменения, не воспроизводимые при разных метеоусловиях. По всей вероятности, это связано со статистической неоднородностью процесса деформации амплитудно-фазового профиля пучка, происходящего вследствие неустойчивости внутреннего масштаба турбулентности [5].

Отметим, что слабая зависимость радиуса корреляции от числа Френеля в области его значений, близких к единице, характерна для режима сильных флуктуаций. Использование соотношений, полученных в рамках модели однородной изотропной турбулентности [6] в случае ограниченных пучков, приводит к следующей зависимости для радиуса когерентности:

$$\rho_c = \rho_0 \left(\frac{1 + \Omega^{-2} + \frac{4}{3} \frac{q}{\Omega}}{1 + \frac{1}{3} \Omega^{-2} + \frac{1}{3} \frac{q}{\Omega}} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 — радиус когерентности плоской безграничной волны, связанный со структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления C_n^2 и длиной трассы L соотношением

$$\rho_0 = (1.48 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}, \quad (2)$$

Ω — число Френеля трассы, $q = L/k\rho_0^2$ — волновой параметр.

При значениях q порядка 10^2 , характерных для режима сильных флуктуаций, в области $0.5 < \Omega < 5$ значение ρ_c совпадает с радиусом флуктуаций интенсивности и, как показывает анализ формулы (1), остается практически постоянным. Тем самым в

условиях проводимого эксперимента поведение радиуса корреляции флуктуаций интенсивности для пучков с большой апертурой можно оценивать на основе модели развитой однородной турбулентности [6].

Влияние апертуры выходных пучков на перемежаемость структуры излучения было рассмотрено также в ходе экспериментов с коллимированными пучками, которые распространялись на трассе по близким параллельным траекториям. При этом, в отличие от описанных выше исследований, появилась возможность сопоставлять характеристики пучков с разными выходными диаметрами для одних и тех же моментов времени.

Синхронная регистрация структуры параллельных пучков подтвердила полученные ранее данные о роли апертурных эффектов (рис. 3). Правое изображение на каждом кадре соответствует узкому коллимированному пучку, левое — пучку с большим диаметром. Последовательные видеокadres 1а–3а относятся к слабо развитой мелкомасштабной турбулентности (что следует из квазирегулярного состояния узкого коллимированного пучка). Кадры 1б–3б зарегистрированы в условиях развитой мелкомасштабной турбулентности. Видно, что пучки с увеличенным диаметром даже в условиях слабой турбулентности могут в отдельные промежутки времени приобретать стохастическую структуру (левое изображение на кадре 3а). В условиях развитой

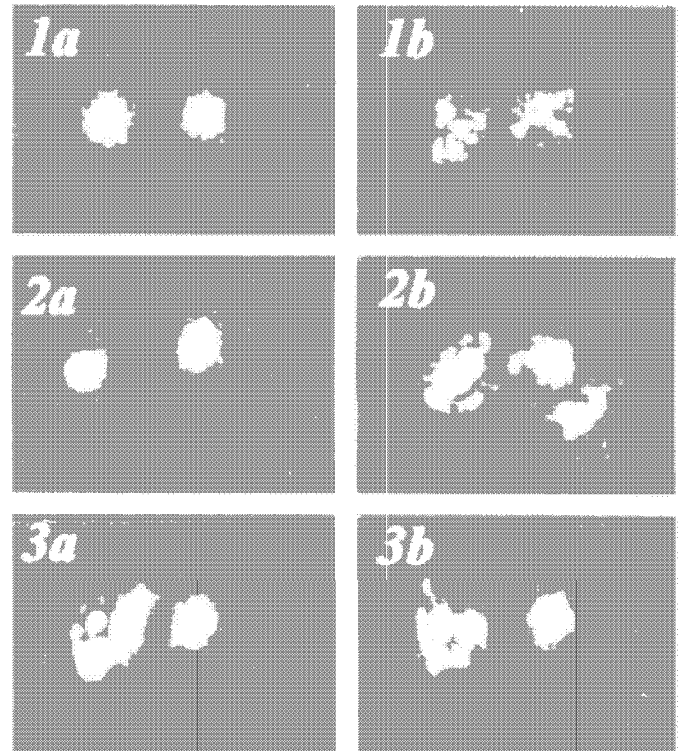


Рис. 3. Влияние атмосферной турбулентности на структуру параллельных лазерных пучков. Расстояние между центрами пучков 4.5 см, диаметр правого пучка на всех кадрах 1 см, диаметр левого — 1 (1), 1.6 (2) и 2.0 см (3): слабо развитая (а) и сильно развитая (б) мелкомасштабная турбулентность

мелкомасштабной турбулентности их амплитудно-фазовый профиль усложняется по мере роста выходной апертуры (левые изображения на кадрах *1b-3b*). Трансформация изображений узкого коллимированного пучка свидетельствует о том, что спорадическое усиление или ослабление мелкомасштабной турбулентности вызывает кардинальные изменения его структуры, причем эти изменения происходят в форме перемежаемости двух структурных состояний: квазирегулярного и стохастического. Даже небольшое увеличение числа Френеля пучка часто приводит к ситуации, когда время пребывания его в стохастическом состоянии становится преобладающим.

Таким образом, полученные в ходе натуральных экспериментов результаты свидетельствуют, что стохастизация пучка в условиях перемежающейся мелкомасштабной турбулентности на приземных трассах носит пороговый характер. Существует критическое значение выходной апертуры пучка, превышение которого приводит к кардинальному усложнению его поперечной структуры. Это значение близко к размеру первой зоны Френеля трассы и слабо зависит от метеоусловий. В докритической области значений апертур статистические параметры излучения меняются сложным неупорядоченным образом, в закритической области они могут быть описаны соотношениями, справедливыми для модели однородной изотропной турбулентности.

Рассмотренные в данной работе апертурные эффекты необходимо учитывать при оптимизации

характеристик разнообразных метрологических устройств, систем дистанционного зондирования и оптических линий связи.

Работа выполнена при поддержке государственной научно-технической программы «Физика квантовых и волновых процессов» (грант 1.61), физического учебно-научного центра «Фундаментальная оптика и спектроскопия», а также программы поддержки ведущих научных школ (гранты РФФИ 00-15-96679 и 00-15-96561).

Литература

1. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Кулягина Е.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 1. С. 27 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 1. P. 38).
2. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Кулягина Е.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1997. **10**, № 1. С. 1.
3. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Петрова Г.В., Эмбаухов С.В. Флуктуации лазерного излучения в атмосфере в свете новых данных о структуре турбулентности: Препринт физ. ф-та МГУ. 1997, № 20/1997.
4. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 1999. **63**, № 10. С. 2019.
5. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 2. С. 32 (Moscow University Phys. Bull. 2000. No. 2. P. 41).
6. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981.

Поступила в редакцию
07.12.00