

Флуктуации лазерных пучков на приземной городской трассе

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

Проведен сравнительный анализ флуктуационной структуры лазерного излучения на городской приземной трассе при различных состояниях турбулентности. Полученные экспериментальные данные позволяют сопоставить изменения статистических характеристик лазерных пучков, происходящие вследствие апертурных эффектов и смены состояний турбулентности в среде распространения. Рассмотрено влияние перемежаемости мелкомасштабной турбулентности на характеристики излучения. Установлено, что перемежаемость, слабо влияя на среднеквадратичные смещения «центров тяжести» пучков, оказывает заметное воздействие на пространственные и временные флуктуации интенсивности.

Ключевые слова: лазерные пучки, турбулентность, приземная атмосфера, флуктуации излучения.

1. Введение

Проблема распространения волновых пучков в приземной атмосфере тесно связана с исследованиями в области физики лазеров и лазерной техники. Без ее решения невозможно дальнейшее совершенствование навигационных, метрологических, локационных устройств и систем передачи информации [1–4]. Актуальность исследований особенностей распространения излучения в турбулентной атмосфере в последнее время существенно возросла из-за широко развернувшихся на коммерческой основе работ по созданию городских оптических систем связи, использующих открытые каналы распространения излучения [5].

Для открытых каналов характерно возникновение различного рода неустойчивостей, существенным образом сказывающихся на поведении лазерного пучка. Часто такие неустойчивости проявляются в виде перемежаемости мелкомасштабной турбулентности (ММТ) [6]. Перемежаемость ММТ, которая обычно наблюдается в условиях значительных вертикальных температурных градиентов, ведёт к усложнению пространственно-временной структуры излучения, становясь причиной спорадической стохастизации пучка, и, следовательно, негативно влияет на объем и качество передаваемой информации.

Существенные трудности в оптимизации характеристик оптических устройств, использующих приземные каналы в условиях большого города, объясняются недостатком экспериментально-теоретических сведений об особенностях флуктуаций лазерных пучков именно в случае городских приземных трасс. Цель данной работы – сравнительный анализ флуктуационной структуры излучения на городской приземной трассе при различных со-

стояниях турбулентности. Она является продолжением серии работ [6–9], выполненных в последние годы на физическом факультете МГУ им. М.В.Ломоносова. В отличие от полученных ранее результатов приводимые данные позволяют сопоставить изменения статистических характеристик излучения, происходящие вследствие как апертурных эффектов, так и смены состояний турбулентности в среде распространения.

2. Постановка эксперимента. Результаты измерений

В экспериментах использовалась горизонтальная трасса, типичная для систем передачи информации в условиях большого города. Трасса была построена в Москве (использовались здания МГУ на Воробьевых горах) и работала в локационном режиме, ее длина в одном направлении составляла 280 м. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 0.63$ мкм, приемно-передающие устройства размещались на высоте 25 м. Излучение могло распространяться по трассе в виде одного или двух разнесенных на небольшое расстояние пучков с изменяющимися диаметрами. В процессе экспериментов, которые проводились в различных метеословиях, осуществлялась видеозапись изображений прошедших трассу пучков. Обычно длительность сеанса записи составляла 5–8 мин. Затем из записи удалялись участки, соответствующие заметным изменениям метеословий (резкие порывы ветра, спорадическая экранировка солнца облаками при переменной облачности и т. п.). При последующей компьютерной обработке изображений статистические характеристики вычислялись путем усреднения параметров по оставшимся участкам видеозаписи. Как правило, эти участки (реализации процесса) включали в себя от несколько сотен до несколько тысяч видеокадров.

2.1. Характеристики пучков в условиях стационарной турбулентности

На первом этапе исследований изучались флуктуации параметров лазерных пучков различного диаметра в ус-

Т.И.Арсеньян, П.В.Короленко, М.С.Маганова, В.Г.Ломоносов, И.А.Таначев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: korolenko@optics.npi.msu.su

Поступила в редакцию 15 сентября 2004 г., после доработки – 23 ноября 2004 г.

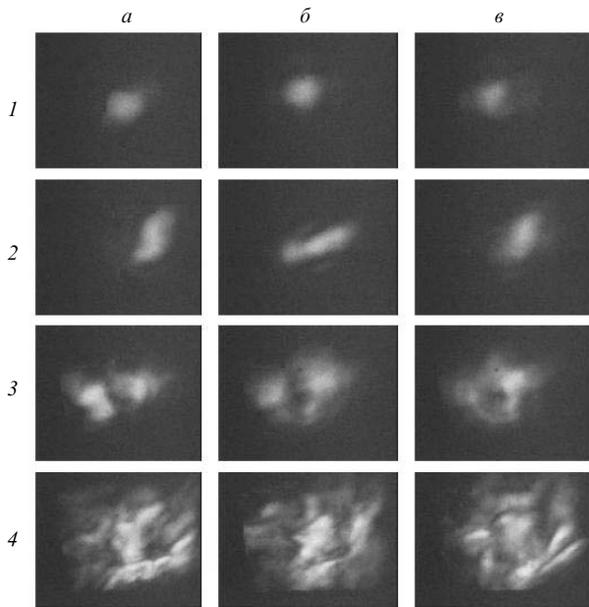


Рис.1. Последовательные изображения (а–в) прошедших атмосферную трассу лазерных пучков с диаметрами 3 (1), 3.5 (2), 7 (3) и 10 см (4).

ловиях, когда состояние турбулентности близко к стационарному (переменяемость турбулентности отсутствует). На рис.1 представлены характерные для этих условий последовательные видеоизображения коллимированных лазерных выходных пучков, диаметры которых D менялись от 3 до 10 см. Они были зарегистрированы в зимний период при скорости ветра 1.8 м/с и температуре -0.6°C (время съемок 17.00–18.00).

Из рис.1 хорошо видно, что с ростом диаметра выходного пучка структура прошедшего трассу излучения усложняется из-за увеличения числа различных по форме и интенсивности фрагментов поперечной структуры. Оценка флуктуаций интенсивности в пучках показала, что при росте диаметра изменение радиусов корреляции интенсивности для пучков различных диаметров с учетом ошибок измерений невелико. Так, при $D = 7$ см радиус корреляции в горизонтальной плоскости $r_c = 3.1 \pm 0.7$ см, а при $D = 10$ см радиус $r_c = 4.0 \pm 0.4$ см.

Возмущения в структуре пучков, возникающие при увеличении их апертуры, существенно влияют на форму распределения плотности вероятностей флуктуаций интенсивности. На рис.2 представлены гистограммы пространственных флуктуаций интенсивности пучков с диаметрами 3, 7 и 10 см. Хорошо видно, что с увеличением диаметра максимум распределения из центральной области смещается влево, что свидетельствует о тенденции к переходу к логарифмически-нормальному закону распределения флуктуаций интенсивности [9].

В ходе экспериментов с пучками разных диаметров вычислялись среднеквадратичные отклонения «центров тяжести» (ЦТ) пучков σ . Результаты, характеризующие эти отклонения в горизонтальном и вертикальном направлениях и полученные за один сеанс измерений, представлены на рис.3. Хотя различия в поведении отклонений в разных плоскостях невелики, тем не менее в случае колебаний ЦТ пучка в горизонтальной плоскости просматривается тенденция к снижению значений σ с увеличением апертуры пучка. При колебаниях в вертикальной плоскости эта тенденция проявляется менее отчетливо.

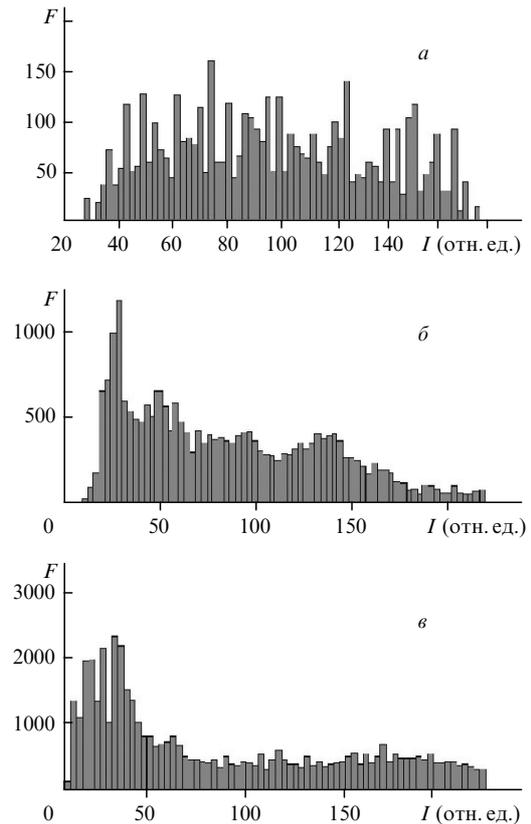


Рис.2. Гистограммы распределений интенсивности в пучках с диаметрами 3 (а), 7 (б) и 10 см (в) (F – частота регистрации значений интенсивности I).

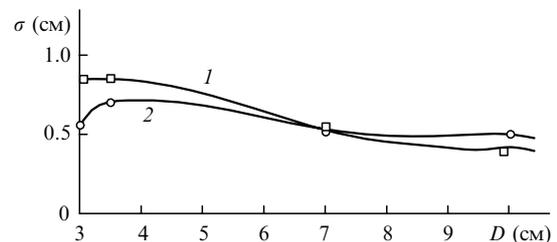


Рис.3. Зависимости среднеквадратичных отклонений σ ЦТ выходных пучков в горизонтальной (1) и вертикальной (2) плоскостях от их диаметров D .

Чтобы охарактеризовать случайные смещения ЦТ пучков, на основе данных эксперимента рассчитывалась также корреляция R распределения интенсивности в изображениях пучков между первым и последующими кадрами случайных выборок видеозаписи. Поведение этой величины для одной из реализаций видеозаписи отражено на рис.4. При малой апертуре пучка корреляция испытывает значительные переколебания. В пучках с большой апертурой она более стабильна. Такое поведение корреляции объясняется тем, что при малых апертурах пучка смещения его ЦТ сопоставимы с поперечными размерами пучка, а при больших они существенно уступают размерам пучка (это хорошо видно по расположению последовательных изображений пучков на рис.1).

2.2. Характеристики пучков в условиях перемежаемости ММТ

На втором этапе исследований изучались особенности смещений пучков разных диаметров в условиях спорадического развития мелкомасштабной турбулентно-

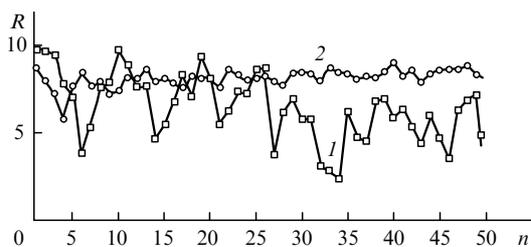


Рис.4. Корреляция R распределения интенсивности в изображениях пучков между различными кадрами (n – номер кадра) при $D = 3$ (1) и 10 см (2).

сти. Более ранние эксперименты [6, 7] проводились, как правило, с узкими коллимированными пучками и не позволяли корректно сопоставить влияние ММТ на пучки разных диаметров. В ходе этих экспериментов было установлено, что узкий коллимированный пучок в условиях перемежаемости ММТ попеременно переходит из квазирегулярного состояния с близким к гауссовому профилем интенсивности в стохастическое спеклоподобное состояние. Именно поэтому такой пучок в описываемых ниже экспериментах был использован в качестве опорного, играющего роль индикатора изменений в структуре атмосферной турбулентности. Он распространялся по трассе на небольшом расстоянии (несколько сантиметров) от исследуемого пучка. В условиях развитой ММТ этот пучок, имевший выходной диаметр 1 см, оказывался в стохастическом состоянии. И исследуемый, и опорный пучки формировались из расширенного пучка одного и того же гелий-неонового лазера с помощью двух диафрагм с перфорированными краями.

Примеры распределения интенсивности в пучке большого диаметра и в опорном пучке показаны на рис.5 в условиях слабо- и сильноразвитой ММТ. Отсутствие сильноразвитой ММТ (рис.5,а) подтверждается незначительной деформацией распределения интенсивности в опорном пучке. В условиях сильноразвитой ММТ (рис.5,б) распределение интенсивности как в широком, так и в узком опорном пучке приобретает спеклоподобный характер.

Оценки среднеквадратичных смещений σ узкого опорного пучка и распространяющегося рядом с ним широкого пучка диаметром $D = 2.4$ см в горизонтальной и вертикальной плоскостях приведены в табл.1. Эти данные были получены в тот же день, что и результаты, представленные на рис.1–4, однако измерения проводились в более позднее время (19.00–20.00), когда в условиях снижения температуры состояние турбулентности становилось менее устойчивым и наблюдалась перемежаемость ММТ. В проводимых экспериментах в условиях перемежаемости ММТ узкий пучок после пребывания в квазирегулярном состоянии в течение 10–15 с скачкообразно переходил в стохастическое состояние, в котором находился примерно такое же время.

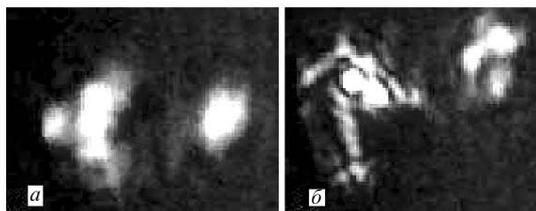


Рис.5. Распределение интенсивности в пучке большого диаметра и в опорном пучке (левое и правое изображения в каждом из кадров соответственно) для условий слабо- (а) и сильноразвитой (б) ММТ.

Табл.1. Смещение ЦТ узкого (1 см) и широкого (2.4 см) пучков.

ММТ	σ (см), горизонтальная плоскость		σ (см), вертикальная плоскость	
	Узкий пучок	Широкий пучок	Узкий пучок	Широкий пучок
Слаборазвитая	0.32	0.35	0.31	0.29
Сильноразвитая	0.42	0.30	0.46	0.33

В табл.1 приведены усредненные по ряду реализаций видеозаписи среднеквадратичные отклонения σ ЦТ пучков. Сравнение значений σ показывает, что с учетом ошибки измерений ($\sim 10\%$) при слаборазвитой ММТ для широкого и узкого пучков они практически совпадают. В условиях развитой ММТ смещения ЦТ узкого пучка заметно (но не кардинально) увеличиваются. При этом существенных различий в динамике смещений ЦТ пучков в вертикальной плоскости при спорадическом возникновении ММТ не наблюдается.

Анализ корреляции смещений пучков, распространяющихся по близким траекториям, позволил обнаружить, что коэффициент корреляции вертикальных смещений ЦТ пучков, распространяющихся по близким траекториям, может достигать ~ 0.4 . Коэффициент же корреляции смещений в горизонтальном направлении близок к нулю, т. е. корреляция практически отсутствует. Эти данные указывают на наличие определенной анизотропии в структуре турбулентности приземной атмосферы [4].

Представляет также интерес оценка влияния перемежаемости турбулентности на флуктуации интенсивности в ЦТ пучков. Трансформация структуры флуктуаций интенсивности при развитии ММТ для узкого опорного пучка и пучка диаметром 2.4 см отражена в табл.2. Приведены усредненные по реализациям значения среднеквадратичных отклонений интенсивности σ_I , нормированные на средние значения интенсивности для соответствующего состояния турбулентности. Видно, что сильноразвитая ММТ значительно увеличивает флуктуации интенсивности пучков, причем структура флуктуаций пучка малого диаметра испытывает более значительные изменения. Объяснить это можно тем, что пучок малого диаметра при развитии ММТ переходит из квазирегулярного состояния в стохастическое, тогда как пучок большего диаметра стохастизован вне зависимости от степени развития ММТ.

Анализ экспериментальных данных показывает, что перемежаемость ММТ проявляется и в поведении флуктуаций интенсивности в фиксированной точке приемной апертуры. За неё принималась точка, определяющая среднее положение ЦТ пучка в обрабатываемой последовательности видеок кадров. Из эксперимента следует, что при возникновении ММТ значение σ_I для опорного пучка возрастает от 0.24 ± 0.04 до 0.61 ± 0.05 , а для широкого пучка – от 0.54 ± 0.05 до 0.8 ± 0.05 , что значительно больше аналогичных значений среднеквадратичных отклонений для ЦТ пучка. Объясняется это тем, что флук-

Табл.2. Среднеквадратичные отклонения флуктуаций интенсивности в ЦТ узкого (1 см) и широкого (2.4 см) пучков.

ММТ	σ_I	
	Узкий пучок	Широкий пучок
Слаборазвитая	0.08	0.12
Сильноразвитая	0.26	0.22

туации в фиксированной точке приёмной апертуры обусловлены как изменением профиля интенсивности в пучке, так и смещениями пучка как целого.

3. Теоретические оценки

Рассмотрим вопрос о том, в какой степени экспериментальные данные могут быть описаны в рамках теоретической модели, построенной для однородной изотропной турбулентности [3, 10, 11]. Сделаем это на примере анализа случайного блуждания ЦТ светового пучка, воспользовавшись соотношениями

$$\sigma^2 = 2.19C_n^2 l_0^{-1/3} L^3, \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{0.132\pi^2 \Gamma(1/6)}{3 \times 2^{5/6}} C_n^2 L^3 a^{-1/3}. \quad (2)$$

Здесь C_n^2 – структурная характеристика флуктуаций показателя преломления; l_0 – внутренний масштаб турбулентности; L – длина трассы; a – радиус пучка. Выражение (1), полученное в приближении геометрической оптики, позволяет оценивать величину смещений пучков, когда развитая ММТ отсутствует и профиль интенсивности пучка претерпевает лишь слабые искажения. Выражение (2) характеризует поведение пучков в случае, когда существенны эффекты дифракции на неоднородностях, по размерам уступающих пучку. Входящий в (1) и (2) параметр C_n^2 для слабых флуктуаций может быть приближенно определен из выражения

$$C_n^2 = \frac{\sigma_I^2}{1.23k^{7/6} L^{11/6}}, \quad (3)$$

где σ_I^2 – нормированная дисперсия флуктуаций интенсивности пучка; k – волновое число. Для рассмотренного выше случая стационарной турбулентности C_n^2 можно оценить исходя из данных о флуктуациях интенсивности в фиксированной точке входной апертуры для пучка диаметром $D = 3$ см, который испытывает самые малые искажения. Подставляя в (3) экспериментально зарегистрированное для этого пучка значение $\sigma_I^2 = 0.49$, находим, что $C_n^2 = 0.6 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$. Для данного значения C_n^2 из (2) получаем $\sigma = 0.4$ см. Это значение достаточно близко к экспериментально определенному (см. рис.3). Формула (2), так же как и проведенные измерения, указывает на весьма слабую зависимость σ от радиуса пучка ($\sigma^2 \sim a^{-1/3}$).

Для случая перемежающейся ММТ, рассмотренного на втором этапе измерений, оценка σ требует совместного использования выражений (1) и (2). Как известно, внутренний масштаб турбулентности l_0 может меняться от 0.1 до 1 см. Будем считать, что в отсутствие ММТ значение l_0 находится вблизи верхнего предела указанного интервала, а при развитии ММТ, приводящей к стохастизации узкого пучка, – вблизи нижнего предела. Исходя из этого выражение (1) описывает поведение узкого пучка, когда в отсутствие ММТ его искажения невелики. Выражение (2) характеризует величину σ узкого пучка при развитии ММТ. Это же выражение может быть использовано для приближенной оценки σ и широкого пучка (как в присутствии, так и в отсутствие ММТ).

При оценке σ в условиях перемежаемости турбулентности будем исходить из предположения, что определяющее влияние на эту величину оказывает изменение l_0 [6].

При этом значение C_n^2 можно считать постоянным, определяемым с помощью соотношения (3) для параметров узкого пучка в отсутствие ММТ (для экспериментально определенной величины $\sigma_I^2 = 0.18$ структурная характеристика флуктуаций показателя преломления $C_n^2 = 0.42 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$). Тогда оценка среднеквадратичного отклонения пучка по формуле (1) дает $\sigma = 0.39$ см, а оценка по формуле (2) дает $\sigma \approx 0.33$ см (для узкого пучка) и $\sigma \approx 0.28$ см (для широкого пучка). Эти оценки по абсолютной величине достаточно близки к данным эксперимента. В то же время из-за своего приближенного характера они не описывают всех особенностей поведения пучков на трассе и могут служить лишь ориентиром при предварительном анализе флуктуаций излучения в турбулентной среде.

4. Заключение

В настоящей работе представлены экспериментальные данные, относящиеся, в основном, к одной серии измерений. Однако такого рода измерения неоднократно воспроизводились в разные сезоны и в разных метеословиях. Полученные результаты в целом подтвердили основные закономерности, связанные с изменением статистических характеристик лазерного излучения для пучков разных диаметров при различных состояниях турбулентности.

Важным с практической точки зрения результатом является слабое влияние на среднеквадратичные смещения пучка апертурных эффектов и эффектов, связанных со спорадическим развитием ММТ. В то же время указанные эффекты оказывают заметное воздействие на флуктуации интенсивности.

Некоторые важные характеристики флуктуационной структуры излучения могут быть объяснены на основе теоретической модели распространения пространственно ограниченных пучков в однородной изотропной турбулентной атмосфере. При ряде дополнительных предположений эта модель дает возможность получать согласующиеся с данными эксперимента оценки параметров излучения на городских атмосферных трассах.

Работа выполнена при содействии программы «Университеты России» (грант № УР.01.03.072) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант № НШ-1949.2003.2).

1. Прохоров А.М., Бункин Ф.В., Гочелашвили К.С., Шишов В.И. *УФН*, **114**, 415 (1974).
2. Зуев В.Е. *Распространение лазерного излучения в атмосфере* (М.: Радио и связь, 1981).
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. *Лазерное излучение в турбулентной атмосфере* (М.: Наука, 1976).
4. Семенов А.А., Арсеньян Т.И. *Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах* (М.: Наука, 1978).
5. Willebrand H.A., Ghuman B.S. *IEEE Spectrum*, **38**, 41 (2001).
6. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Макаров В.Г. *Вестник Моск. ун-та. Сер. Физика, Астрономия*, **2**, 32 (2000).
7. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Макаров В.Г. *Известия РАН. Сер. физич.*, **63**, 2019 (1999).
8. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. *Оптика атмосферы и океана*, **14**, 894 (2001).
9. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Макаров В.Г. *Оптика атмосферы и океана*, **14**, 677 (2001).
10. Фейзулин З.И., Кравцов Ю.А. *Радиофизика*, **10**, 68 (1967).
11. Миронов В.Л. *Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере* (Новосибирск: Наука, 1981).