

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

## Интегральные распределения флуктуаций лазерного излучения в условиях перемежаемости атмосферной турбулентности

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 1.02.2001 г.

Рассматриваются интегральные функции распределения локальных флуктуаций интенсивности и флуктуаций положения центра тяжести лазерного пучка на приземных трассах в условиях перемежаемости мелкомасштабной турбулентности. Показано, что существенные различия в структуре флуктуационных процессов при трансформации пучка из квазирегулярного в стохастическое состояние присущи прежде всего локальным флуктуациям интенсивности, независимо от того, регистрируются эти флуктуации в центре тяжести пучка или в фиксированной точке приемной апертуры. Установлено, что интегральные распределения флуктуаций локальной интенсивности как в квазирегулярном, так и в стохастическом состояниях пучка удовлетворительно описываются нормально-логарифмическим законом.

Вопросы, связанные с поведением функций распределения флуктуаций интенсивности излучения в различных условиях распространения, рассматривались во многих работах [1–6]. Однако они остались неисследованными для узких коллимированных лазерных пучков в условиях перемежаемости мелкомасштабной турбулентности приземной атмосферы.

Перемежаемость мелкомасштабной турбулентности оказывает существенное влияние на структуру излучения, распространяющегося по приземным трассам [7–10]. Оно проявляется в чередовании двух структурных состояний узких коллимированных пучков. Одно из них – квазирегулярное – характеризуется слабыми искажениями первоначального амплитудно-фазового профиля. Второе – стохастическое – имеет в поперечном сечении спеклоподобное распределение интенсивности. Переход из одного состояния в другое осуществляется скачкообразно и носит квазипериодический характер; при этом длительность каждого состояния может меняться от секунд до нескольких десятков секунд.

В данной статье представлен сравнительный анализ интегральных функций распределения локальных флуктуаций интенсивности и флуктуаций положения центра тяжести узкого коллимированного пучка, регистрируемых при переходе из одного структурного состояния в другое.

Горизонтальная атмосферная трасса локационного типа, на которой проводились исследования, действовала в условиях городской застройки. Ее длина (в одном направлении) составляла 280 м, а высота над поверхностью Земли – 25 м. Подробное описание основных узлов приемопередающей и контрольно-измерительной аппаратуры, а также используемых для обработки экспериментальных данных компьютерных технологий приведено в работах [8–10]. 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 однодольный гелий-неоновый лазер на длине волны 0,63 мкм. Регистрация изображений происходила с трассы пучков про-

водилась с помощью видеокамеры. Видеосигналы в телевизионном стандарте затем направлялись в компьютер для последующей обработки. Специально разработанное программное обеспечение позволяло осуществлять многопараметрический анализ последовательностей изображений пучков из видеозаписей, длительность которых варьировалась от нескольких секунд до нескольких минут.

На первом этапе был проведен анализ статистики флуктуаций интенсивности в центре тяжести пучка в квазирегулярном и стохастическом состояниях. Из видеозаписи изображения узкого коллимированного пучка выбирались последовательности кадров, соответствующие переходу пучка из квазирегулярного состояния в стохастическое. Примеры таких видеок кадров приведены на рис. 1, кадры *a* – *в* предшествуют моменту стохастизации, кадры *г* – *е* характеризуют структуру уже стохастизированного пучка. Последовательности видеок кадров, включающие десятки и сотни изображений пучков, вводились в компьютер. Для каждого изображения программным способом определялись координаты центра тяжести пучка и значения соответствующей этим координатам интенсивности. Интенсивность определялась путем усреднения яркости четырех соседних пикселей при общем размере изображения пучка 320 × 320 пикселей.

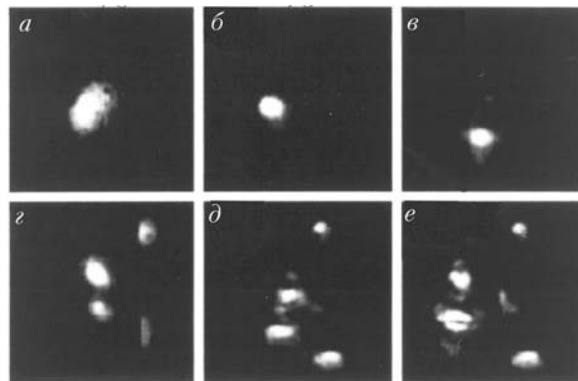


Рис. 1. Структуры лазерного пучка в квазирегулярном и стохастическом состояниях

На следующем этапе значения интенсивности оценивались для фиксированной точки приемной апертуры. В качестве таковой выбиралась точка, положение которой соответствовало среднему положению центра тяжести пучка за время измерений. Полученные в результате обработки одной из последовательностей изображений, включающей переход «квазирегулярное состояние пучка – стохастическое», экспериментальные кривые приведены на рис. 2.

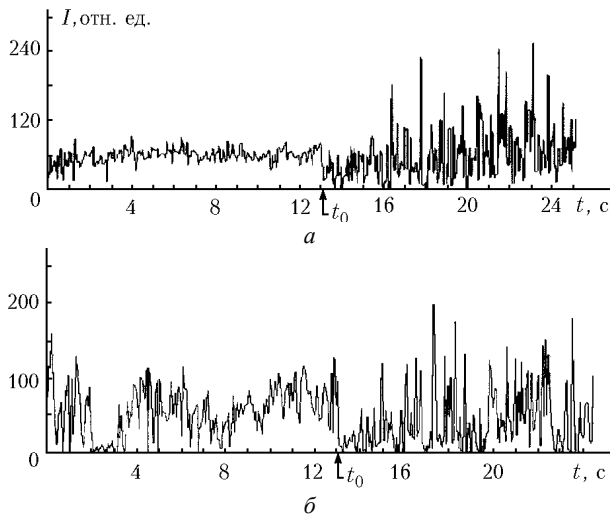


Рис. 2. Флуктуации интенсивности в центре тяжести пучка (а) и в фиксированной точке приемной апертуры (б)

На каждом из рисунков участок графика, соответствующий интервалу времени  $t < t_0$ , относится к квазирегулярному, а участок  $t > t_0$  – к стохастическому состоянию пучка. Эти кривые были получены в вечернее время 02.11.99 г., когда метеобстановка на трассе характеризовалась температурой на высоте трассы порядка  $8^\circ\text{C}$ , а скорость ветра составляла примерно 1 м/с.

Уже из вида приведенных кривых можно заключить, что имеются существенные различия в поведении флуктуаций интенсивности в центре тяжести пучка для квазирегулярного и стохастического состояний. Различия проявляются в резком увеличении дисперсии флуктуаций при переходе к стохастическому состоянию, а также в появлении асимметрии отклонений значений интенсивности от среднего уровня. Флуктуации в фиксированной точке экрана обладают более выраженными низкочастотными составляющими. Последнее различие в поведении сигналов обусловлено тем, что флуктуации в фиксированной точке экрана определяются эффектами, связанными с искажениями амплитудно-фазового профиля и со смещениями пучка как целого.

Для флуктуаций интенсивности в центре пучка вычисление нормированного на среднее значение интенсивности среднеквадратического отклонения  $\sigma'$  дает для квазирегулярного состояния величину  $\sigma' = 0,37 \pm 0,07$ , а для стохастического  $\sigma' = 0,78 \pm 0,12$ . Для флуктуаций интенсивности в фиксированной точке приемной апертуры усредненные по ряду реализаций значения среднеквадратического отклонения соответственно равны  $\sigma' = 0,42 \pm 0,04$  и  $\sigma' = 0,85 \pm 0,11$ . Анализ Фурье-спектров флуктуаций интенсивности для стохастического и квазирегулярного состояний пучка показал, что колебания интенсивности в обоих случаях не обладают характерными частотами.

Для анализа интегральных распределений флуктуаций интенсивности в пучках при их различных состояниях использовались следующие формулы [4, 5, 11]:

$$F_1 = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{I_{\min}}^I \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{I - \langle I \rangle}{\tilde{\sigma}} \right)^2 \right] dI, \quad (1)$$

$$F_2 = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{I}{\langle I \rangle} \right) \right], \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{I_{\min}}^I \frac{1}{I} \exp \left[ -\left( \ln \frac{I}{\langle I \rangle} + \frac{\tilde{\sigma}^2}{2} \right)^2 (2\tilde{\sigma}^2)^{-1} \right] dI. \quad (3)$$

Здесь  $\tilde{\sigma} = \ln(1 + \sigma'^2)$ ;  $I$  – локальная интенсивность;  $\langle I \rangle$  – среднее по времени значение локальной интенсивности;  $\sigma'^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle$ . Формулы (1)–(3) задают интегральные вероятности распределений флуктуаций интенсивности, подчиняющихся соответственно нормальному, экспоненциальному (рэлеевскому для амплитуды) и нормально-логарифмическому законам.

На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные данные об интегральных распределениях флуктуаций интенсивности в центре тяжести пучка и в фиксированной точке приемной апертуры для случаев, отраженных на рис. 2, а также и для других реализаций.

Экспериментальные данные, относящиеся к флуктуациям в фиксированной точке приемной апертуры, обрабатывались после фильтрации низкочастотной составляющей. Оценка интегральных распределений  $F$  флуктуаций интенсивности в центре пучка на основе экспериментальных данных показала, что статистика флуктуаций в квазирегулярном состоянии пучка с хорошим приближением при указанных значениях  $\sigma$  может быть описана нормальным или нормально-логарифмическим распределением (см. рис. 3).

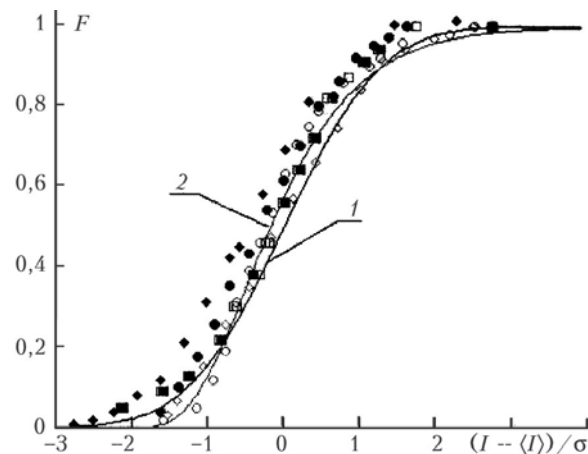


Рис. 3. Интегральные распределения значений интенсивности для квазирегулярного состояния пучка:  $\square \diamond$  – точки, относящиеся к различным реализациям, для флуктуаций в центре тяжести пучка;  $\blacksquare \blacklozenge$  – то же для фиксированной точки приемной апертуры;  $\diamond \blacklozenge$  – точки, относящиеся к приведенным на рис. 2 реализациям. 1, 2 – теоретические распределения: 1 – нормальное, 2 – нормально-логарифмическое

Флуктуации интенсивности в стохастическом состоянии могут быть описаны как нормально-логарифмическим, так и экспоненциальным законами. Однако нормально-логарифмический закон описывает экспериментальные данные несколько лучше (см. рис. 4).

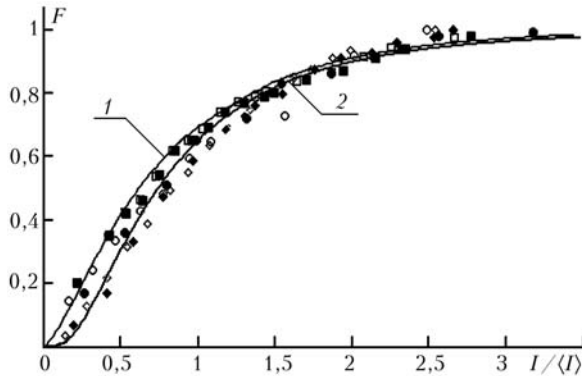


Рис. 4. Интегральные распределения значений интенсивности для стохастического состояния пучка:  $\circ\phi$  – точки, относящиеся к различным реализациям, для флуктуаций в центре тяжести пучка;  $\blacksquare\blacklozenge$  – то же для фиксированной точки приемной апертуры;  $\diamond\blacklozenge$  – точки, относящиеся к приведенным на рис. 2 реализациям. 1, 2 – теоретические распределения: 1 – экспоненциальное, 2 – логарифмически-нормальное

В ходе экспериментов исследовались также флуктуации положения центра тяжести пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях. Анализ этих флуктуаций не обнаружил заметных отличий в поведении центра тяжести при смене состояний пучка, а также в его смещениях по вертикальной и горизонтальной осям. Это подтвердила и оценка среднеквадратического значения отклонения центра пучка. При вертикальных смещениях для квазирегулярного состояния значение  $\sigma = (1,75 \pm 0,25)$  см, для стохастического  $(1,90 \pm 0,35)$  см. При горизонтальных смещениях значение  $\sigma = (1,80 \pm 0,25)$  см для квазирегулярного состояния и  $\sigma = (2,05 \pm 0,30)$  см для стохастического состояния.

Не обнаруживают заметных отличий и спектры флуктуаций смещений центра тяжести по горизонтали и вертикали для стохастического и квазирегулярного состояний пучка. Анализ спектров показал, что колебания пучка во всех случаях носят хаотический характер. Заметим, что в ранее проведенной серии экспериментов [10] наблюдалось некоторое уменьшение дисперсии смещений при переходе к стохастическому состоянию. Можно предположить, что такое расхождение в экспериментальных данных связано с различием метеосостояний трассы в периоды проведения измерений. Расчет интегральной вероятности изменения положения центра тяжести показал, что его блуждание с хорошим приближением подчиняется нормальному закону.

*T.I. Arsenyan, A.M. Zotov, P.V. Korolenko, M.S. Maganova, V.G. Makarov. Integral distributions of laser beam fluctuations under the intermittence of the atmospheric turbulence.*

The integral distributions of the local intensity fluctuations and the displacements of the beam «center of gravity» under the conditions of fine-scale turbulence intermittence are studied. The differences in the structure of the fluctuation processes when the beam is transforming from quasiregular state to stochastic one are peculiar to the local intensity fluctuations regardless of the fact whether these fluctuations are registered: at the beam «center of gravity» or at a fixed point of the receiving aperture. It is found out that the integral distributions of the local intensity fluctuations in both the quasiregular beam state and in the stochastic state satisfy the log-normal law.

Таким образом, проведенные измерения показывают, что существенные различия в структуре флуктуационных процессов при трансформации пучка из квазирегулярного в стохастическое состояние присущи, прежде всего, локальным флуктуациям интенсивности, независимо от того, регистрируются ли эти флуктуации в центре тяжести пучка или в фиксированной точке приемной апертуры.

Рассмотренные особенности статистической структуры флуктуаций лазерного излучения в условиях перемежающейся турбулентности следует учитывать при оптимизации характеристик разнообразных метрологических устройств, систем дистанционного зондирования и оптических линий связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Минобрнауки «Университеты России – фундаментальные исследования» (проект № 992317), а также программы поддержки ведущих научных школ (гранты РФФИ № 00-15-96561 и № 00-15-96679).

1. Прохоров А.М., Бункин Ф.В., Гочелашивили 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. Грачева М.Е., Гурвич А.С., Ломадзе С.О., Покасов В.В., Хрутин А.С. Распределение вероятностей «сильных» флуктуаций интенсивности света в атмосфере // Изв. вуз. Радиофиз. 1974. Т. 17. № 1. С. 106–111.
6. Патрушев Г.Я., Рубцова О.А. Плотность вероятностей флуктуаций интенсивности и светового потока при распространении и отражении излучения в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 11. С. 1333–1349.
7. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Кулягина Е.А., Петрова Г.В., Федотов Н.Н. Перемежаемость структурных состояний лазерных пучков на приземных трассах // Вестн. МГУ. Сер. 3. 1997. Т. 38. № 1. С. 26–29.
8. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Кулягина Е.А., Ляш А.Н., Першин С.М., Одинцов А.И., Федотов Н.Н. Перемежаемость флуктуационных процессов в тропосферных каналах распространения лазерного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 1. С. 1–7.
9. Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Петрова Г.В., Эмбаухов С.В. Флуктуации лазерного излучения в атмосфере в свете новых данных о структуре турбулентности. Препр. / Физ. фак. МГУ. (М.). 1997. №20/1997. 18 с.
10. Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Макаров В.Г. Влияние перемежаемости внутреннего масштаба турбулентности на характеристики узких коллимированных лазерных пучков // Изв. РАН. Сер. Физ. 1999. Т. 63. № 10. С. 2019–2023.
11. Wolf D.A., de. Saturation of irradiance fluctuations due to turbulent atmosphere // J. Opt. Soc. Amer. 1968. V. 58. № 4. P. 461–465.