

УДК 535.5 : 621.371.24

ИЗМЕРЕНИЯ МАСШТАБОВ КОРРЕЛЯЦИИ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И КОГЕРЕНТНОСТИ ПОЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

В. В. Бороноев, Н. Ц. Гомбоев, В. Л. Миронов, Э. А. Трубачев

Приводятся результаты синхронных измерений пространственных масштабов корреляции флуктуаций интенсивности и когерентности поля в одномодовых лазерных пучках в условиях сильных флуктуаций. Установлено, что характерным масштабом корреляции r_k флуктуаций интенсивности является величина порядка радиуса когерентности ρ_c исследуемого пучка. При этом между радиусом корреляции и радиусом когерентности выполняется соотношение $r_k \approx \rho_c / 2^{3/5}$.

Как следует из результатов асимптотической теории [1-4], наименьший масштаб пространственной корреляции сильных флуктуаций интенсивности r_k и радиус когерентности поля плоской и сферической волн ρ_c связаны соотношением $r_k = \rho_c / 2^{3/5}$. Аналогичный результат был получен в [5] для случая узкого коллимированного пучка.

Экспериментальные исследования пространственной корреляции сильных флуктуаций интенсивности плоской и сферической волн и узкого коллимированного пучка проводились в работах [6-11]. В [12] приведены результаты измерений пространственных масштабов когерентности в пучках различной геометрии в условиях сильных флуктуаций интенсивности. Однако данные об одновременных измерениях масштабов когерентности поля и корреляции флуктуаций интенсивности в литературе отсутствуют.

С целью проверки выводов приближенной теории [1-5] нами были проведены одновременные измерения пространственной корреляции флуктуаций интенсивности и когерентности поля в коллимированных лазерных пучках в условиях сильных флуктуаций интенсивности.

Радиус когерентности поля лазерного пучка и структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 определялись по распределению средней интенсивности в фокальной плоскости приемной линзы по методике [13] с использованием формулы из [14], принимающей вид

$$\rho_c = \left(\frac{ky_0^2}{4F^2} - \alpha \right)^{-1/2},$$

где $\alpha = \frac{\Omega_d}{8} \frac{\gamma^2}{kx^{-1}\rho_b^4(1+d^2/8\rho_b^2)}$ — параметр, учитывающий изменение

кривизны среднего волнового фронта в пределах линзы, F , d и $\Omega_d = kd^2/4x$ — соответственно фокусное расстояние, диаметр и дифракционный размер приемной линзы, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, x — дистанция распространения. y_0 — полуширина кривой распределения средней интенсивности на уровне $1/e$, $\gamma = \Omega^{-1}(1 + 2a^2/\rho_c^2)$,

$\rho_b^2 = a^2 [1 + \Omega^{-2}(1 + 4a^2/3\rho_0^2)]$, $\Omega = ka^2/x$ — дифракционный размер передатчика, a — радиус излучающей апертуры, $\rho_0 = (1,45 C_n^2 k^2 x)^{-3/5}$ — радиус когерентности плоской волны. Передающая и приемная аппаратура, а также методика, применяемые при измерении величин ρ_c и C_n^2 описаны в [12]. Погрешности измерений этих величин не превышали 25%.

Из-за технических трудностей осуществления малых пространственных разностей радиусы корреляции флуктуаций интенсивности определялись путем измерения усредняющего действия приемной апертуры и последующего восстановления из функций усреднения корреляционных функций по методике, предложенной в [15]. Функция усреднения $G(d) = \beta^2(d)/\beta^2(0)$ определялась путем последовательного попарного измерения относительных дисперсий флуктуаций интенсивности $\beta^2 = \frac{\bar{I}^2 - \overline{I^2}}{\overline{I^2}}$ при минимальном $\beta^2(0)$ ($d = 0,03 \text{ см} = 0,01 \sqrt{\lambda x}$) и переменных $\beta^2(d)$ ($0,03 \text{ см} = 0,01 \sqrt{\lambda x} \leq d \leq 3,32 \text{ см} = 1,0 \sqrt{\lambda x}$) значениях диаметра приемной апертуры d . Здесь \bar{I} — среднее, $\overline{I^2}$ — среднеквадратичное значение интенсивности света. Аппаратура и методика измерений дисперсии флуктуаций интенсивности света описаны в [16]. Погрешность измерений относительной дисперсии β^2 не превышала 25%.

Измерения проводились в июле 1977 г. на горизонтальной трассе длиной 1,8 км, расположенной в районе г. Улан-Удэ. Приемная система позволяла определять радиус когерентности ρ_c , структурную характеристику флуктуаций показателя преломления C_n^2 и усредняющее действие приемной апертуры $G(d)$ одновременно в двух одномодовых коллимированных лазерных пучках с числами Френеля Ω , равными 1 и 90. Всего получено по 29 функций усреднения $G(d)$ в широком ($\Omega = 90$) и узком ($\Omega = 1$) пучках в диапазоне изменения параметра турбулентности $\beta_0 = 4 \div 6$. Далее эти функции были усреднены отдельно для каждого из пучков, и по ним восстановлены корреляционные функции $b_I(\rho)$, которые приведены на рис. 1 в зависимости от величины разнеса ρ , выраженного в виде $2^{3/5} \rho/\rho_c$. При этом среднее значение радиуса когерентности ρ_c широкого пучка было равно 0,22 см, а узкого — 0,36 см. На этом же рисунке изображена функция $b_I = \exp \left[- \left(\frac{\rho}{r_k} \right)^{5/3} \right] = \exp \left[- 2 \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right)^{5/3} \right]$, которая в случае выполнения соотношения $r_k = \rho_c/2^{3/5}$ должна совпасть с экспериментальными корреляционными функциями $b_I(\rho)$.

Как видно из рис. 1, функция $b_I = \exp \left[- 2 \left(\rho/\rho_c \right)^{5/3} \right]$ удовлетворительно согласуется с коэффициентами корреляции $b_I(\rho)$ обоих пучков в области значений аргумента $2^{3/5} \rho/\rho_c \leq 1$. Этот факт указывает на то, что характерным масштабом коэффициента корреляции лазерного пучка в условиях сильных флуктуаций интенсивности является величина порядка радиуса когерентности этого пучка, а между масштабом корреляции r_k и масштабом когерентности ρ_c выполняется соотношение $r_k = \rho_c/2^{3/5}$, полученное теоретически в [1-5]. На то, что масштаб ρ_c может быть одним из возможных универсальных масштабов коэффициента корреляции, указывалось также в [17].

Отметим, что радиусы корреляции, полученные нами в широком ($\Omega = 90$) пучке, удовлетворительно согласуются по величине с радиусами корреляции, полученными ранее авторами работ [6, 7] в широком

($\Omega = 130$) коллимированном пучке при идентичных турбулентных условиях распространения, а измеренные радиусы когерентности удовлетворительно согласуются с расчетом [14]. Результаты нашего эксперимента и следующие из него выводы в части, относящейся к широкому коллимированному пучку, полностью согласуются с результатами и выводами, сделанными в работе [18].

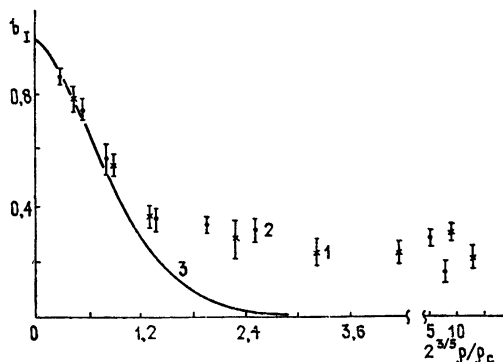


Рис. 1. Корреляционные функции b_l ($2^{3/5} \rho / \rho_c$) в широком ($\Omega=90$) и узком ($\Omega=1$) лазерных пучках. Вертикальными линиями указаны интервалы разброса экспериментальных точек:

1 — $\Omega = 90$, $\beta_0 = 4 \div 6$, $\rho_c = 0,22$ см; 2 — $\Omega = 1$, $\beta_0 = 4 \div 6$, $\rho_c = 0,36$ см; 3 — функция $b_l = \exp[-2(\rho/\rho_c)^{5/3}]$.

Авторы выражают признательность Ч. Ц. Цыдыпову за внимание к работе и М. С. Беленькому за предоставление программы восстановления корреляционных функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. С. Gochelashvily, V. I. Shishov, *Optica Acta*, **18**, № 10, 767 (1971).
2. К. С. Гочелашвили, В. И. Шишов, *ЖЭТФ*, **66**, вып. 4, 1237 (1974).
3. А. М. Прохоров, Ф. В. Бункин, К. С. Гочелашвили, В. И. Шишов, *УФН*, **114**, вып. 3, 415 (1974).
4. В. У. Заворотный, В. И. Кляцкин, В. И. Татарский, *ЖЭТФ*, **73**, вып. 2, 481 (1977).
5. И. Г. Якушкин, *Изв. вузов — Радиофизика*, **19**, № 3, 384 (1976).
6. М. Е. Грачева, А. С. Гурвич, С. С. Кашкаров, В. В. Покасов, Соотношения подобия и их экспериментальная проверка при сильных флуктуациях интенсивности лазерного излучения, Препринт ООФАГ АН СССР, М., 1973.
7. М. Е. Грачева, А. С. Гурвич, А. С. Хрупин, *Изв. вузов — Радиофизика*, **17**, № 1, 155 (1974).
8. G. R. Ochs, R. R. Bergman, J. R. Snyder, *J. Opt. Soc. Amer.*, **59**, № 2, 231 (1969).
9. А. С. Гурвич, С. С. Кашкаров, *Изв. вузов — Радиофизика*, **18**, № 1, 69 (1975).
10. Н. Ц. Гомбоев, Э. В. Зубрицкий, Г. Ф. Малыгина, В. Л. Миронов, С. С. Хмелевцов, *Изв. АН СССР, Квантовая электроника*, **2**, № 6, 1263 (1975).
11. В. В. Бороноев, Н. Ц. Гомбоев, Э. В. Зубрицкий, Г. Ф. Малыгина, В. Л. Миронов, С. С. Хмелевцов, III Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере, Тезисы докладов, Томск, 1975, стр. 170.
12. М. С. Беленький, В. В. Бороноев, Н. Ц. Гомбоев, В. Л. Миронов, IV Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере, Тезисы докладов, Томск, 1977, стр. 42.
13. А. В. Артемьев, А. С. Гурвич, *Изв. вузов — Радиофизика*, **14**, № 5, 734 (1971).
14. М. С. Беленький, А. И. Кон, В. Л. Миронов, *Изв. АН СССР, Квантовая электроника*, **4**, № 3, 517 (1977).

15. М. С. Беленький, В. Л. Миронов, Изв. вузов — Радиофизика, 17, № 7, 1950 (1974).
16. В. П. Аксенов, Н. Ц. Гомбоев, Э. В. Зубрицкий, Г. Ф. Малыгина, В. Л. Миронов, Э. А. Трубачеев, IV Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере, Тезисы докладов, Томск, 1977, стр. 139.
17. А. С. Гурвич, А. И. Кон, В. Л. Миронов, С. С. Хмелевцов, Лазерное излучение в турбулентной атмосфере, изд. Наука, М., 1976.
18. А. С. Гурвич, Б. С. Елепов, Вл. В. Покасов, К. К. Сабельфельд, В. И. Татарский, Изв. вузов — Радиофизика, 22, № 2, 192 (1979).

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР

Поступила в редакцию
12 апреля 1979 г.

MEASUREMENTS OF CORRELATION SCALES OF INTENSITY FLUCTUATIONS
AND THE FIELD COHERENCY OF LASER BEAMS IN THE TURBULENT
ATMOSPHERE

V. V. Boronoev, N. Ts. Gomboev, V. L. Mironov, E. A. Trubacheev

Synchronous measurement results are presented of space correlation scales of intensity fluctuations and the field coherency in one-mode laser beams under the condition of strong fluctuations. It is stated that the characteristic scale of correlation r_c of the intensity fluctuations is the value of the order of the coherency radius ρ_c of the investigated beam. The relation $r_c \approx \rho_c/2^{3/5}$ is fulfilled between the correlation radius and the radius of coherency
