

А.П. Иванов, Г.Я. Патрушев, А.П. Ростов

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ПЛОСКОГО ЗЕРКАЛА

Представлены результаты экспериментального исследования пространственно-временной структуры сферической волны при отражении от плоского зеркала в турбулентной атмосфере. Обнаружен сдвиг временных спектров сильных флуктуации интенсивности в низкочастотную область при удалении точки наблюдения от направления строго назад, зависящий от соотношения между флуктуационной и средней компонентами поперечной к трассе составляющей скорости ветра. Установлена неоднородность пространственной корреляции сильных флуктуации интенсивности в приемной плоскости. Проведен анализ временных взаимных корреляционных функций при разных значениях отношения флуктуационной компоненты поперечной к трассе составляющей скорости ветра к ее среднему значению.

Пространственно-временная структура оптических волн при распространении на прямых трассах через турбулентный слой атмосферы достаточно широко исследовалась как теоретически, так и экспериментально. Подробный обзор этих исследований представлен в [1]. Распространение излучения на трассах с отражением характеризуется появлением ряда специфических эффектов, обусловленных двукратным прохождением одних и тех же неоднородностей среды в прямом и обратном направлениях. В определенных ситуациях наблюдается увеличение средней интенсивности отраженного излучения вблизи направления строго назад [1, 2,3], усиление флуктуации интенсивности, изменение пространственно-временной структуры [1, 2, 4].

В данной статье описано экспериментальное исследование пространственно-временной структуры сферической волны при отражении от плоской зеркальной поверхности в турбулентной атмосфере. Эксперимент проводился на реальных атмосферных трассах протяженностью  $L = 400$  и  $800$  м с ровной подстилающей поверхностью. Установка и методика измерений подробно изложены в [3]. В процессе измерений регистрировались сигналы отраженного излучения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения вблизи оптической оси источника. Запись электрических сигналов фотоприемников на кодовый магнитный накопитель (КМН) осуществлялась с помощью комплекса аппаратуры цифровой регистрации [5], позволяющей записывать до восьми аналоговых сигналов с максимальной частотой дискретизации  $20$  кГц и динамическим диапазоном  $72$  дБ ( $12$  разрядов двоичного кода). Оперативная обработка записанных реализаций с вычислением среднего значения и дисперсии в каждом канале проводилась в процессе измерений, а полный статистический анализ – на стационарном комплексе в лабораторных условиях.

Синхронно с регистрацией на КМН проводились измерения давления, влажности, температуры на трассе, а также средней  $V_{\perp}$  и флуктуационной  $\sigma_{\perp}$  составляющих перпендикулярной по отношению к трассе распространения компоненты скорости ветра с помощью акустического анемометра [8], расположенного на расстоянии  $100$  м от измерительного павильона. Параллельно с основной трассой была организована дополнительная трасса для определения структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$  и дальнейшего вычисления параметра  $\beta_0 = [1,23 C_n^2 k^{7/6} (2L)^{11/6}]^{1/2}$ , характеризующего интенсивность турбулентности на трассе  $2L$ , где  $k = 2\pi\lambda$  – волновое число.

Временные спектры флуктуации интенсивности рассчитывались с использованием быстрого преобразования Фурье. Сглаживание проводилось по отрезкам реализаций и по соседним частотам так, чтобы число степеней свободы было не менее  $700$ , что обеспечивало дисперсию оценки спектра ( $\approx 4\%$ ) во всем спектральном интервале [6].

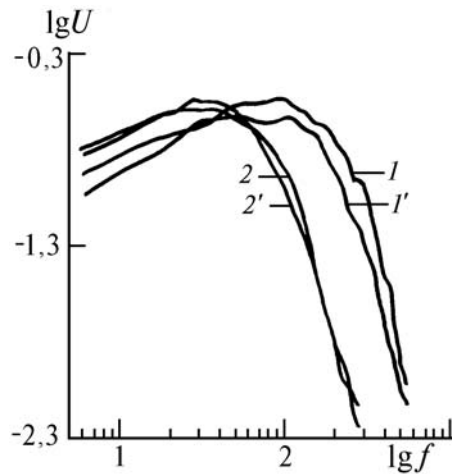


Рис. 1. Нормированный спектр  $U(f)$  сильных флуктуации интенсивности отраженной от зеркала сферической волны в зависимости от частоты  $f$  ( $1, 1' - \sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 0,3$ ;  $2, 2' - 4$ )

Результаты экспериментальных оценок временных спектров флуктуации интенсивности для двух предельных значений отношения  $\sigma_{\perp} / V_{\perp}$  в данных измерениях представлены на рис. 1.

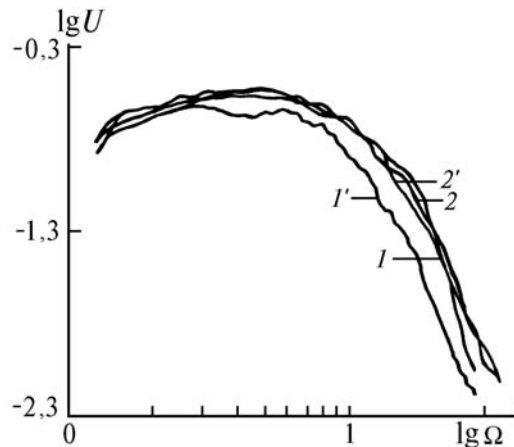


Рис. 2. Нормированный спектр  $U(\Omega)$  сильных флуктуации интенсивности отраженной от зеркала сферической волны в зависимости от безразмерной частоты  $\Omega$  ( $1, 1' - \sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 0,3$ ;  $2, 2' - 4$ )

По оси абсцисс отложен логарифм частоты  $f$  (Гц), а по оси ординат – логарифм безразмерного спектра  $U = W(f) f / \sigma_I^2$ ; ( $W(f)$  – частотный спектр флуктуации интенсивности,  $\sigma_I^2$  – дисперсия флуктуации интенсивности). Приведенные оценки получены в условиях сильных флуктуации интенсивности на трассе при значениях ( $\beta_0 \approx 3,8 \div 4,2$ ). Анализ полученных данных показывает различие спектров флуктуации интенсивности при разном положении точки наблюдения в приемной плоскости. Так, на рис. 1 видно, что при удалении точки наблюдения от оптической оси источника (кривая  $1, \rho = 0,1 \sqrt{2\lambda L}$ ), совпадающей в данном случае с направлением строго назад, происходит сдвиг спектра в низкочастотную область (кривая  $1', \rho = 0,7 \sqrt{2\lambda L}$ ). В [4] ранее указывалось на существование сдвига спектров в условиях слабых флуктуации интенсивности, и давалась физическая интерпретация наблюдаемого эффекта. Необходимо отметить зависимость сдвига от отношения  $\sigma_{\perp} / V_{\perp}$ . Кривые  $2$  и  $2'$  получены при таком же положении приемников и одинаковом значении  $\beta_0$ . Однако видно, что увеличение флуктуационной компоненты  $\sigma_{\perp}$  поперечной к трассе составляющей скорости ветра по отношению к ее среднему значению  $V_{\perp}$  приводит к «замыванию» эффекта сдвига спектра и при  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 4$  (кривые  $2$  и  $2'$ ) различие спектров

находится в пределах статистической погрешности измерений. Различное положение на оси частот спектров  $I$ ,  $I'$  и  $2$ ,  $2'$  объясняется разными в период измерений значениями  $\sigma_{\perp}$  и  $V_{\perp}$ . Введение по аналогии с [7] безразмерной частоты  $\Omega = f/f_{0\text{эф}} = f/(\sqrt{\sigma_{\perp} + V_{\perp}}/\sqrt{2\lambda L})$  приводит к сближению оценок временных спектров флуктуации интенсивности отраженной волны (рис. 2). При этом низкочастотный сдвиг спектра  $I'$  относительно спектра  $I$  сохраняется и в данном масштабе.

Результаты экспериментального исследования структуры пространственной корреляции сильных флуктуации интенсивности отраженной от зеркала сферической волны представлены на рис. 3 (кривые  $1$ ,  $2$ ) для значения  $\beta_0 \approx 4,6$ . Поведение коэффициента корреляции  $b_{I,R}(\mathbf{R}, \rho)$  зависит от расположения точек наблюдения  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  относительно оптической оси источника, где  $\mathbf{R} = (\rho_1 + \rho_2)/2$ ,  $\rho = \rho_1 - \rho_2$ ,  $\rho = |\rho|$ . Кривая  $1$  соответствует несимметричному положению точек наблюдения относительно оптической оси источника  $\mathbf{R} = \rho/2$ , а  $2$  – симметричному  $\mathbf{R} = 0$ . Стандартная ошибка экспериментальной оценки коэффициента корреляции определялась по методике, описанной в [6], и находилась в пределах 5–10% в зависимости от значения величины коэффициента корреляции. Для сравнения на рисунке представлены результаты численного расчета  $b_{I,R}(\mathbf{R}, \rho)$  (кривые  $1'$ ,  $2'$ ) по формулам, приведенным в [1, 2]. В случае осесимметричного расположения приемников при  $\mathbf{R} = 0$  формула для расчета имела вид

$$b_{I,R}(\mathbf{R}, \rho) = [\alpha(\rho/2)]^{-1} [\exp \{-4(\rho/\rho_s)^{5/3}\} + \exp \{-2(\rho/2\rho_s)^{5/3}\} + 2 \exp \{-2(\rho/\rho_s)^{5/3}\} + \exp \{-16/3(\rho/2\rho_s)^{5/3}\}],$$

а для несимметричного положения приемников, когда один находился около оптической оси источника, при  $\mathbf{R} = \rho/2$

$$b_{I,R}(\mathbf{R}, \rho) = [2\sqrt{\alpha(\rho)}]^{-1} [3 \exp \{-4(\rho/\rho_s)^{5/3}\} + \exp \{-2(\rho/\rho_s)^{5/3}\}],$$

где  $\alpha(\rho) = 1 + \exp \{-4(\rho/\rho_s)^{5/3}\} + 2 \exp \{-2(\rho/\rho_s)^{5/3}\}$ . Радиус когерентности  $\rho_s$  рассчитывался для условий эксперимента по формуле  $\rho_s = 1,6(1,45 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$  [1, 2].

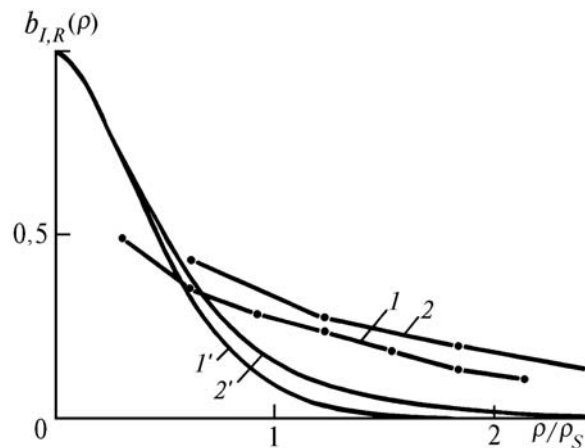


Рис. 3. Коэффициент пространственной корреляции  $b_{I,R}(\rho)$  сильных флуктуации интенсивности сферической волны при отражении от плоского зеркала ( $1$ ,  $2$  - эксперимент,  $1'$ ,  $2'$  - теоретический расчет)

Как видно из рис. 3, уровень корреляции сильных флуктуации интенсивности отраженной от зеркала сферической волны при осесимметричном ( $\mathbf{R} = 0$ ) разное приемников выше как в экспериментальных (кривая  $2$ ), так и в расчетных данных (кривая  $2'$ ). Однако величина коэффициента корреляции по данным эксперимента значительно превышает расчетные значения при разное  $\rho/\rho_s > 1$ , где они фактически равны нулю.

Вероятно, причина расхождения связана с тем, что теоретический анализ пространственной корреляции проводился с учетом только главных членов асимптотического разложения функции когерентности флуктуации интенсивности отраженной от зеркала сферической волны [2]. Такой подход обоснован при строгом выполнении условия  $\beta_0 > 1$ , что не реализуется в эксперименте, а теоретический анализ, соответствующий условиям эксперимента, для конечных значений  $\beta_0$  нам не известен.

На рис. 4 приведены экспериментальные оценки временных взаимных корреляционных функций (кривые 1, 2) для различных значений отношения  $\sigma_{\perp} / V_{\perp}$  и величины разноса между приемниками  $\rho = 0,8 \sqrt{2\lambda L}$ . По оси абсцисс отложено значение безразмерной задержки  $\tau_{\text{эф}} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + V_{\perp}^2} \tau / \sqrt{2\lambda L}$ , где  $\tau$  – временная задержка.

Как видно из рисунка, увеличение  $\sigma_{\perp} / V_{\perp}$  от 0,2 (кривая 1) до 2,2 (кривая 2) приводит к уменьшению корреляции и сдвигу максимума в сторону меньших значений задержек. Для качественного сравнения на рис. 4 приведены временные взаимные корреляционные функции, соответствующие теоретическому расчету, выполненному в первом приближении метода плавных возмущений, для близкого разноса  $\rho = 0,7 \sqrt{2\lambda L}$  и значений  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} = 0,25$  (кривая 3) и  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} = 4$  (кривая 4) [9]. Различное положение максимумов на теоретических и экспериментальных кривых объясняется различной величиной разноса приемников.

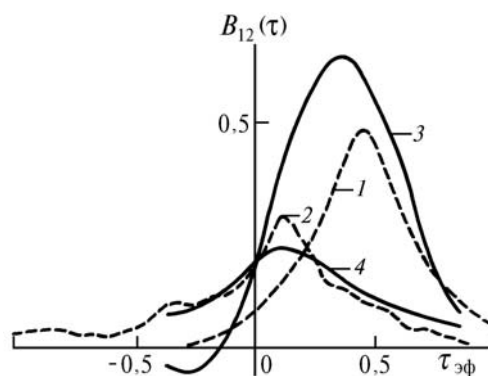


Рис. 4. Взаимные корреляционные функции  $B_{12}(\tau)$  флуктуаций интенсивности сферической волны при отражении от плоского зеркала в зависимости от безразмерной задержки  $\tau_{\text{эф}}$  (1, 2 – эксперимент, 3, 4 – теоретический расчет [9], 1 –  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 0,2$ ; 2 –  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 2,2$ ; 3 –  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 0,25$ ; 4 –  $\sigma_{\perp} / V_{\perp} \approx 4$ )

Проведенный анализ показывает, что использование масштаба подобия  $\tau_{\text{эф}}$  при рассмотрении временных взаимных корреляционных функций сильных флуктуации интенсивности приводит к тому, что все кривые располагаются между граничными зависимостями, соответствующими значениям  $\sigma_{\perp} = 0$  и  $V_{\perp} = 0$ .

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показали существование сдвига спектров сильных флуктуации интенсивности сферической волны при отражении от плоского зеркала в турбулентной атмосфере в низкочастотную область при удалении точки наблюдения в приемной плоскости от направления строго назад, зависящего от соотношения между флуктуационной и средней компонентами поперечной к трассе составляющей скорости ветра. Получены результаты, показывающие неоднородность пространственной корреляции сильных флуктуации интенсивности в картинной плоскости, что качественно подтверждает результаты теоретического расчета [1, 2]. Показано, что поведение временных взаимных корреляционных функций сильных флуктуаций интенсивности сферической волны, отраженной от плоского зеркала, при использовании масштаба подобия  $\tau_{\text{эф}}$  аналогично поведению корреляционных функций в случае распространения волны на прямой трассе [9].

1. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
2. Банах В. А., Миронов В. Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Паука, 1986 173 с.
3. Гурвич А. С., Иванов А. П., Кашкаров С. С. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т.5. N.1. С.44. 526

А.П. Иванов, Г.Я. Патрушев, А.П. Ростов

4. Иванов А.П., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N. 9. С. 923.
5. Ростов А.П. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N. 3. С. 125
6. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных процессов / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
7. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Покасов В.В. // Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 56. Вып. 1. С. 41.
8. Анисимов М.В., Монастырный Е.Л., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. N. 4. С. 196-199.
9. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. Вып. 10. С. 2183.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
г. Томск

Поступила в редакцию  
29 февраля 1992 г.

A. D. Ivanov, G. Ya. Patrushev, A. P. Rostov. Experimental Study of the Spatio-Temporal Structure of a Spherical Wave Reflected from a Plane Mirror.

Some results of the experimental study of the spatio-temporal structure of a spherical wave reflected from a plane mirror in a turbulent atmosphere are presented. A shift of time spectra of strong fluctuations of intensity towards low frequencies has been revealed at observations from points off the backward direction. The shift value is shown to be dependent on the ratio of fluctuation and mean components of the transverse (with respect to the path) wind velocity components. Inhomogeneity of the spatial correlation of strong intensity fluctuations in the plane of reception is revealed. Analysis of temporal cross correlation functions has been carried out at different ratios of fluctuation to mean component of the transverse wind velocity.