

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Представлены результаты экспериментального исследования флуктуаций интенсивности сферической волны при отражении от зеркального диска в турбулентной атмосфере. Показано существование усиления флуктуаций интенсивности и низкочастотного сдвига их временных спектров при увеличении расстояния между приемником и источником как в области слабых флуктуаций, так и при переходе к сильным флуктуациям. Дана простая физическая интерпретация исследуемых эффектов.

Распространение лазерного излучения на локационных трассах приводит к появлению ряда эффектов, не наблюдающихся на прямых трассах [1]. Корреляция флуктуаций поля оптической волны, распространяющейся по одним и тем же неоднородностям в прямом и обратном направлении, приводит в определенных ситуациях к усилению обратного рассеяния (увеличение средней интенсивности) [1], усилению флуктуаций интенсивности [2], изменению временной структуры флуктуаций [3]. Эти эффекты весьма подробно изучены теоретически для случаев так называемых слабых и насыщенных флуктуаций интенсивности; то есть, по существу, для асимптотически предельных условий распространения в турбулентной атмосфере. Экспериментальное исследование эффекта усиления обратного рассеяния при отражении от шероховатой поверхности проводилось в [4], эффекта усиления флуктуаций интенсивности в [5], где определена область его пространственной локализации для слабых флуктуаций.

В данной работе продолжены эти исследования для условий распространения, соответствующих переходу от слабых флуктуаций к сильным, и изучены особенности поведения временных спектров флуктуации интенсивности. Показано, что временной спектр отраженного сигнала сдвинут в область низких частот, а величина сдвига зависит от уровня флуктуаций интенсивности и расстояния от источника излучения. Дается простая качественная интерпретация наблюдаемых эффектов

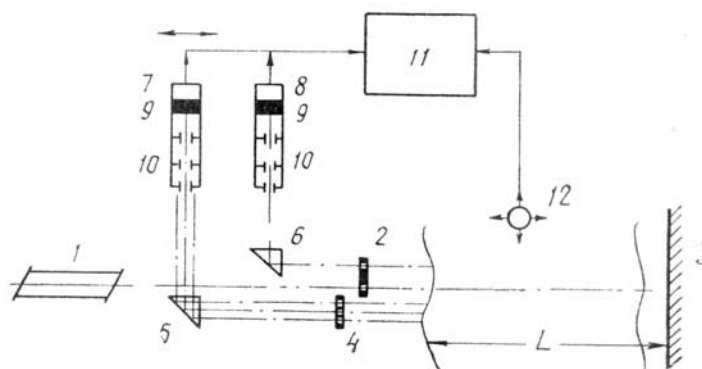


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Обобщенная схема установки, на которой проводились измерения, приведена на рис. 1. Луч лазера 1 через диафрагму в пластине 2 направлялся в атмосферу, где на расстоянии 400 м был установлен отражатель 3. Пластина 2 имела две круглых диафрагмы диаметром 1,2 мм, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга, одна из которых служила для получения квазисферической волны от лазера (волновой параметр излучателя > 100), вторая формировала опорный канал отраженной волны. В качестве отражателя в измерениях использовался высококачественный зеркальный диск диаметром 500 мм, что позволяло осуществить полный перехват падающего излучения. Приемный тракт отраженной волны состоял из опорного и сигнального каналов. Сигнальный канал был сформирован пластиной 4 и содержал ряд лучей, образованных эквидистантно расположенными в пластине круглыми диафрагмами одинакового диаметра 0,9 мм. Расстояние между диафрагмами и расстояние между первой и оптической осью лазерного пучка были равны 3 мм. Образованный посредством отражающей призмы 5 ряд пучков направлялся на фотоприемник 7, который имел возможность перемещаться в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучков. Таким образом, при перемещении

приемника поочередно получались сигналы отраженной волны для различных расстояний от оптической оси источника. Аналогично посредством отражающей призмы 6 на фотоприемник 8 направлялся пучок опорного канала. Фотоприемниками в обоих каналах служили фотоэлектронные умножители ФЭУ-79 с блендами 10 и интерференционными фильтрами 9 с полосой пропускания $\approx 30^\circ\text{A}$.

Электрические сигналы с выходных усилителей ФЭУ поступали на аппаратно-программный комплекс 11 [6], где после низкочастотной фильтрации оцифровывались и регистрировались кодовым магнитным накопителем (КМН) со следующими характеристиками: динамический диапазон — 72 дБ, частота дискретизации по каждому каналу — 10 кГц. Обработка записанных реализаций частично проводилась на комплексе, а спектральный анализ на стационарной ЭВМ по программе [7].

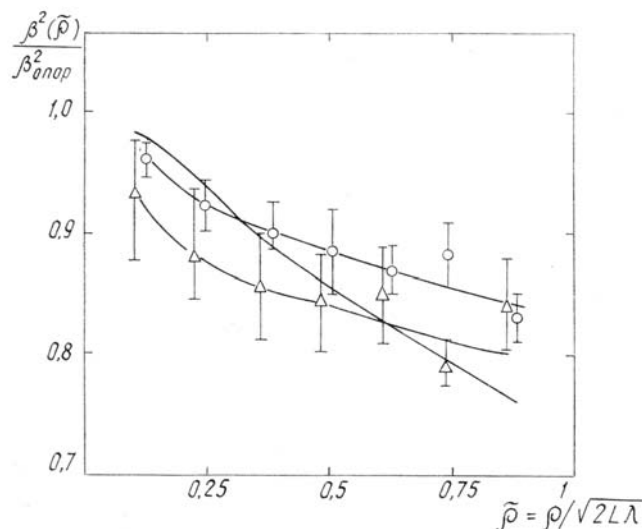


Рис. 2

Измерения проводились в октябре 1988 г. на горизонтальном участке местности с относительно ровной подстилающей поверхностью. Трасса проходила на высоте 2,2 м. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГН-215 (длина волны $\lambda = 0,63$ мкм, мощность 55 мВт). Всего за время эксперимента было записано и обработано более ста 50-секундных реализаций.

На протяжении всего эксперимента синхронно с регистрацией на КМН проводились измерения средней v_v и флуктуационной σ_1 составляющих перпендикулярной по отношению к трассе распространения компоненты скорости ветра с помощью акустического анемометра 12 [8], расположенного на расстоянии 100 м от измерительного павильона.

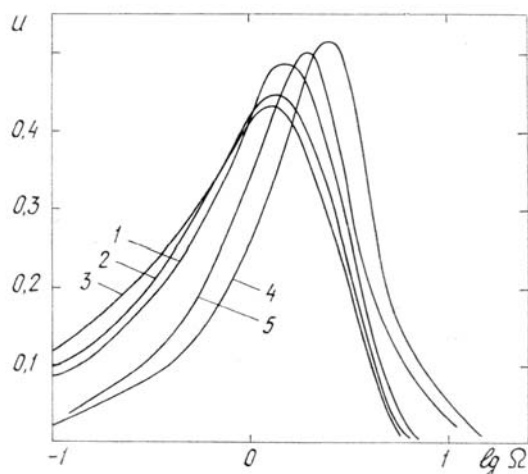


Рис. 3. Нормированный спектр флуктуаций интенсивности $U = fW(f, \bar{\rho}) / \sigma_v^2$. $v_v = 3,4-3,9$ м/с. $\sigma_v = 0,4 \pm 0,7$. При $\beta_0 < 1$ эксперимент: $\bar{\rho} = 0,1(1)$; $\bar{\rho} = 0,4(2)$; $\bar{\rho} = 0,9(3)$; теория: $\bar{\rho} = 0(4)$; $\bar{\rho} = 0,6(5)$

На рис. 2 приведены результаты измерений по эффекту усиления флуктуаций интенсивности. По оси абсцисс отложено расстояние $\bar{\rho}$ между источником и приемником в плоскости, перпендикулярной распространению волны, нормированное на радиус первой зоны Френеля $\sqrt{2\lambda L}$ для трассы $2L$. Результаты представлены для двух различных атмосферных ситуаций при значениях $\beta_0 = 0,5 \div 1,0$ (кружки) и

$\beta_0 = 1,1 \div 1,5$ (треугольники). $\beta_0 = [1,23 \times C_n^2 k^{7/6} (2L)^{11/6}]^{1/2}$ — параметр, характеризующий степень турбулентности [1], где C_n^2 — структурная характеристика флуктуаций показателя преломления среды, которая оценивалась по относительной дисперсии флуктуаций интенсивности отраженной волны $\beta_{\text{опор}}^2$ в опорном канале; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Вертикальными скобками обозначен разброс экспериментальных данных. Сплошная кривая соответствует теоретическому расчету в приближении МПВ [2].

Как видно из рисунка, эффект усиления флуктуаций интенсивности отчетливо проявляется в пределах первой зоны Френеля и существует как в области слабых флуктуаций интенсивности, что согласуется с результатами предшествующих исследований [5], так и при переходе к сильным флуктуациям интенсивности, что ранее не исследовалось.

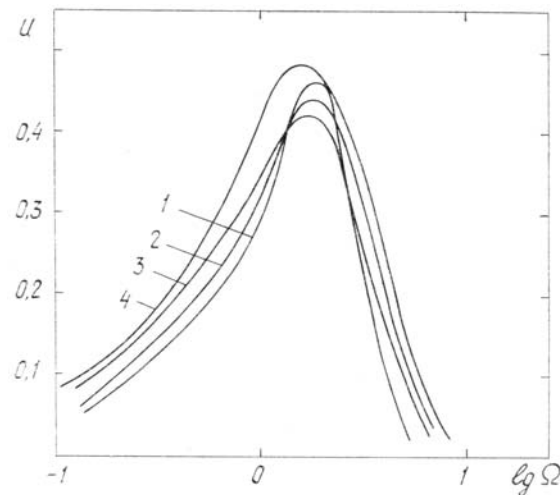


Рис. 4. Нормированный спектр флуктуаций интенсивности $U = fW(f, \bar{\rho}) / \sigma_I^2$. $v_{\perp} = 3,4 - 3,9$ м/с, $\sigma_v = 0,4 - 0,7$. При $\beta_0 > 1$ $\bar{\rho} = 0,1(1)$; $\bar{\rho} = 0,6(2)$; $\bar{\rho} = 0,9(3)$; при $\beta_0 < 1$ $\bar{\rho} = 0,1(4)$

Полученные временные спектры флуктуаций интенсивности отраженной волны представлены на рис. 3, 4, где по оси абсцисс отложено значение логарифма безразмерной частоты $\Omega = f/f_0$ (f — частота; $f_0 = v_{\perp} / \sqrt{2\pi\lambda 2L}$ — характерная частота, связанная с временем переноса неоднородностей порядка $\sqrt{\lambda L}$ через пучок со скоростью v_{\perp}), а по оси ординат нормированный спектр $U = fW(f, \bar{\rho}) / \sigma_I^2$ ($W(f, \bar{\rho})$ — спектральная плотность флуктуаций интенсивности; σ_I^2 — дисперсия флуктуаций интенсивности).

Расчет спектров проводился по методу быстрого преобразования Фурье с последующим сглаживанием по отрезкам реализации и по частотам. Общее число степеней свободы было около 1000, что обеспечивало 1–2%-ную погрешность оценки спектра по всей шкале частот. На рис. 3 отражено характерное поведение спектров для $\beta_0 < 1$ (кривые 1, 2, 3) и виден низкочастотный сдвиг спектра отраженной волны при увеличении расстояния между источником и приемником. При сравнении с теорией необходимо отметить несовпадение полученных в эксперименте временных спектров со спектрами, рассчитанными в приближении МПВ (кривые 4, 5) в работе [3]. Видно, что экспериментальные спектры сдвинуты в низкочастотную область относительно расчетных. Расхождение положений теоретических и экспериментальных спектров на шкале безразмерной частоты объясняется неоднородностью профиля средней скорости ветра на трассе. Специальные измерения, проведенные с двумя акустическими анемометрами, показали возможность различия перпендикулярных к трассе компонент скорости ветра на 30% при расстоянии между ними 200 м.

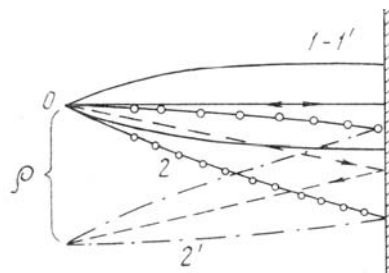


Рис. 5. Интерпретация эффекта усиления флуктуаций интенсивности и сдвига временного спектра при отражении от зеркальной поверхности

Для случая перехода в область сильных флуктуаций ($\beta_0 > 1$) результаты представлены на рис. 4 (1, 2, 3). Как видно из рисунка, низкочастотный сдвиг наблюдается и в этой ситуации. Однако необходимо отметить, что вся картина сдвинута в высокочастотную область по сравнению со случаем на рис. 3. Это хорошо видно при сравнении спектров 1 и 4 на рис. 4, где спектр 4 взят из рис. 3.

Низкочастотному сдвигу временного спектра и уменьшению флуктуаций интенсивности при смещении точки наблюдения относительно источника излучения O можно дать следующую интерпретацию. В рассматриваемом случае слабых флуктуаций, как известно, основной вклад в них вносят пространственные неоднородности показателя преломления, расположенные в области, соответствующей первой пространственной зоне Френеля. Для колмогоровского спектра атмосферной турбулентности размер таких неоднородностей примерно равен радиусу первой зоны. Для точки наблюдения, совмещенной с источником O , первая 1 и вторая 1' половины параболоида Френеля, соответствующие прямой и отраженной волнам совпадают (рис. 5), следовательно, волна при прямом и обратном распространении проходит одни и те же пространственные неоднородности поля показателя преломления (скорость света намного больше скорости переноса оптических неоднородностей поперек трассы). При смещении точки наблюдения на расстояние ρ от источника половинки параболоида Френеля, соответствующие прямому 2 и обратному 2' прохождению волны, также смещаются. При этом вершины половинок параболоида, сдвинутые на ρ , опираются на общее основание, расположенное на зеркале, где поперечные размеры их максимальные. Прямая и отраженные волны проходят только часть пути, прилегающую к зеркалу, по одним и тем же неоднородностям показателя преломления. Это приводит к уменьшению флуктуаций интенсивности до значения, соответствующего предельному случаю распространения излучения на удвоенное расстояние $2L$. Как видно из рис. 5, на участке трассы, прилегающей к зеркалу, суммарный поперечный размер области, вносящей существенный вклад во флуктуации интенсивности, изменяется на величину $\rho/2L$ ($\rho \ll L$), что приводит к низкочастотному сдвигу временного спектра флуктуации интенсивности при увеличении ρ по сравнению с $\rho = 0$ или с прямым распространением на расстояние $2L$.

Авторы выражают признательность М.Г. Бондаренко и А.В. Носкову за помощь в проведении измерений и в обработке экспериментальных данных.

1. Банах В.А., Миронов В.Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1986. 170 с.
2. Коваль С.О., Патрушев Г.Я., Петров А.И., Покасов В.В. //Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 3. С. 326.
3. Патрушев Г.Я., Покасов В.В. //Проблемы оптики атмосферы. Новосибирск: Наука. 1983. С. 108–115.
4. Гурвич А.С., Кашкаров С.С. //Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 5. С. 794–796.
5. Патрушев Г.Я., Петров А.И., Покасов В.В. //Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 7. С. 823–831.
6. Ростов А.П. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 125–126.
7. Патрушев Г.Я., Печеркина Т.П. //Алгоритмы и программы. 1987. № 7. С. 20.
8. Анисимов М.В., Монастырский Е.А., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. //Приборы и техника эксперимента. 1988. № 4. С. 196–199.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
2 июня 1989 г.

A. P. Ivanov, G. Ya. Patrushev, A. P. Rostov. Experimental Investigation of Spherical Wave Fluctuations at Reflection from Mirror Surface in a Turbulent Atmosphere.

The results of experimental investigation of intensity fluctuations of spherical wave reflected from a mirror infinite disk in a turbulent atmosphere are presented. The existence of intensity fluctuations amplification and low frequency shift of their temporal spectra is shown when the distance between the receiver and the transmitter increases. A simple physical interpretation for the effects observed is given.