

Г.Я. Патрушев

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОТРАЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Анализируется временная структура флуктуаций интенсивности и потока излучения при отражении сферической волны от зеркального диска большого диаметра и пространственной решетки компактно расположенных призматических угловых отражателей в условиях сильных флуктуаций интенсивности. Экспериментально показано, что вариации временных характеристик интенсивности и потока излучения, обусловленные изменением средней и флуктуационной составляющих скорости ветра по трассе, можно учесть введением эффективной скорости переноса оптических неоднородностей поперек трассы распространения. При этом радиус временной корреляции флуктуаций при отражении от зеркального диска пропорционален \sqrt{D} (D – диаметр приемной апертуры), а положение максимума спектральной плотности обратно пропорционально этой величине. Временные спектры флуктуаций интенсивности при отражении от компактной решетки угловых отражателей менее чувствительны к интенсивности турбулентности на трассе и имеют более высокочастотный характер, чем при отражении от зеркального диска.

Временные спектры флуктуаций интенсивности и потока излучения на локационных трассах рассматривались в [1–4]. В них отмечено, что при отражении волны от зеркальных объектов наблюдается низкочастотный сдвиг временного спектра интенсивности по сравнению с соответствующим случаем прямого распространения. Масштабом подобия, учитывающим вариации средней перпендикулярной трассе скорости ветра V_{\perp} и флуктуационной составляющей σ_{\perp} , является характерная частота $f_0 = (V_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2) / (\lambda L)^{1/2}$, где λ – длина волны излучения; L – длина трассы [3, 4]. Экспериментальные спектры потока излучения, отраженного от зеркального диска в условиях слабых флуктуаций интенсивности, отклоняются от расчетных, в которых не учтены флуктуации скорости ветра σ_{\perp} [1].

Экспериментальное исследование временного спектра флуктуаций потока излучения на трассе с отражением от уголка, размер которого не указывается [2], проведено для слабых и сильных флуктуаций интенсивности. Из данных для сильных флуктуаций следует, что подобие временных спектров потока относительно перпендикулярной к трассе компоненты скорости ветра V_{\perp} не выполняется. Так, из рис. 2, б работы [2] следует, что изменение V_{\perp} в 10 раз от 0,2 до 2,4 м/с сдвигает высокочастотный участок нормированного спектра с 400 до 150 Гц, т.е. всего в 2,7 раза. Из рис. 3, а видно, что уменьшение скорости примерно в 7 раз (от 4,8 до 0,7 м/с) изменяет положение высокочастотного участка спектра на оси частот лишь в два раза при одном и том же уровне атмосферной турбулентности [2].

В настоящей статье рассматриваются временные спектры флуктуаций интенсивности и потока излучения на локационной трассе при отражении от зеркальных объектов (диск, матрица трехгранных угловых отражателей с гексагональным расположением элементов в двумерной пространственной решетке) в условиях сильных флуктуаций интенсивности при различных размерах диаметра приемника и отражателя. Эксперимент проводился на аппаратуре, подробно описанной в [5, 6], при этом в установку был добавлен канал измерения флуктуаций интенсивности отраженного излучения. Измерение горизонтальной компоненты скорости ветра относительно трассы распространения проводилось акустическим анемометром, структурная характеристика показателя преломления C_n^2 определялась оптическим способом.

Нам неизвестны расчеты временной структуры флуктуаций интенсивности и потока излучения, учитывающие совместное влияние таких факторов, как дифракционный размер излучателя и приемника, эффективной скорости ветра, интенсивности турбулентности, характеристика отражателя. В связи с этим при экспериментальном исследовании трудно выделить совокупное действие перечисленных факторов, поэтому внимание уделялось сравнительному влиянию некоторых из них.

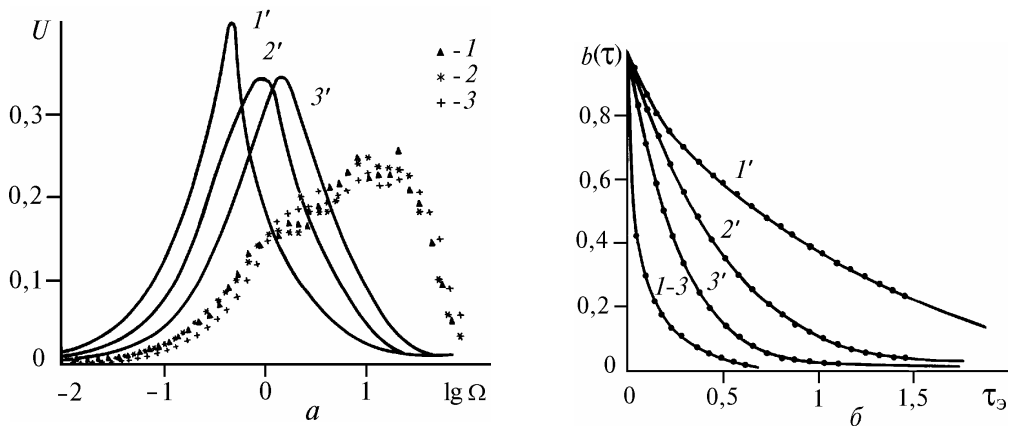


Рис. 1. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) интенсивности 1, 2, 3 и потока излучения 1', 2', 3' при различных скоростях ветра и диаметрах приемной апертуры: 1, 1' - \varnothing 500 мм, $\beta_0(2L) = 7$, $V_{\perp} = 1,08$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,55$ м/с; 2, 2' - \varnothing 62 мм; $\beta_0(2L) = 8$, $V_{\perp} = 2,23$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,65$ м/с; 3, 3' - \varnothing 31 мм; $\beta_0(2L) = 8$, $V_{\perp} = 1,46$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,38$ м/с

На рис. 1, а приведены безразмерные временные спектры U флуктуаций интенсивности и потока излучения при отражении квазисферической волны (волновой параметр ≈ 100) от зеркального диска диаметром 500 мм на трассе длиной $L = 1250$ м до отражателя в условиях сильных флуктуаций интенсивности значение параметра $\beta_0(2L) = [1,21 C_n^2 \kappa^{7/6} (2L)^{11/6}]^{1/2} \approx 7 \div 8$, где C_n^2 - структурная характеристика поля показателя преломления; $\kappa = 2\pi/\lambda$ - волновое число [8]. По оси абсцисс на рис. 1, а отложена безразмерная частота $\Omega = f/f_0$, f (Гц). На рис. 1, б приведены соответствующие этим спектрам нормированные временные автокорреляционные функции $b(\tau)$. По оси абсцисс здесь откладывается безразмерная временная задержка $\tau_3 = \tau V_{\perp} / (L\lambda)^{1/2}$, учитывающая истинную задержку τ и величину поперечной к трассе распространения средней V_{\perp} и флуктуационной σ_{\perp} компонент скорости ветра.

Из приведенных данных видно, что введение эффективной скорости $V_3^2 = (V_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2)$ позволяет единым образом учесть влияние скорости ветра на временные характеристики флуктуаций интенсивности (на рис. 1, б приведена одна $b(\tau)$ для интенсивности, остальные очень близки к ней). К сожалению, у нас не оказалось данных с одним и тем же значением диаметра приемной апертуры, но существенно различным значением средней скорости ветра. Такие данные оказались для случая пространственной решетки из 12 призматических угловых отражателей с гексагональным расположением элементов на площадке диаметром $\approx 12,5$ см. Здесь отличие в значениях регулярной составляющей V_{\perp} скорости ветра оказалось весьма существенным (рис. 2, а, б) и влияние флуктуаций скорости ветра σ_{\perp} при $\sigma_{\perp} \gtrsim V_{\perp}$ на движение неоднородностей поля показателя преломления становится определяющим. Из данных на рис. 2 видно, что гипотеза подобия выполняется и для флуктуаций потока излучения.

Имеющееся различие в спектрах интенсивности невелико, если учесть, что измерения проводились в разные дни, контроль скорости ветра проводился в одной точке, близкой к излучателю, а интенсивность турбулентности измерялась на вспомогательной V -образной трассе общей длиной 200 м. Заметим, что в измерениях [2] реализовывались случаи малых значений перпендикулярной к трассе средней скорости ветра V_{\perp} , а флуктуационная компонента σ_{\perp} , оказывающая в этом случае свое влияние на временной спектр, не измерялась. По-видимому, это явилось одной из причин отмеченного поведения спектров флуктуаций потока в [2].

Из приведенных на рис. 1 данных видно, что увеличение диаметра приемной апертуры приводит к низкочастотному сдвигу временного спектра потока излучения. При этом положение максимума безразмерного спектра на оси безразмерной частоты Ω в первом приближении обратно пропорционально корню квадратному из диаметра приемной апертуры (\sqrt{D}). Разумеется, радиус временной корреляции (на уровне $\approx 0,5$) будет в этом же приближении пропорционален \sqrt{D} (рис. 1, б).

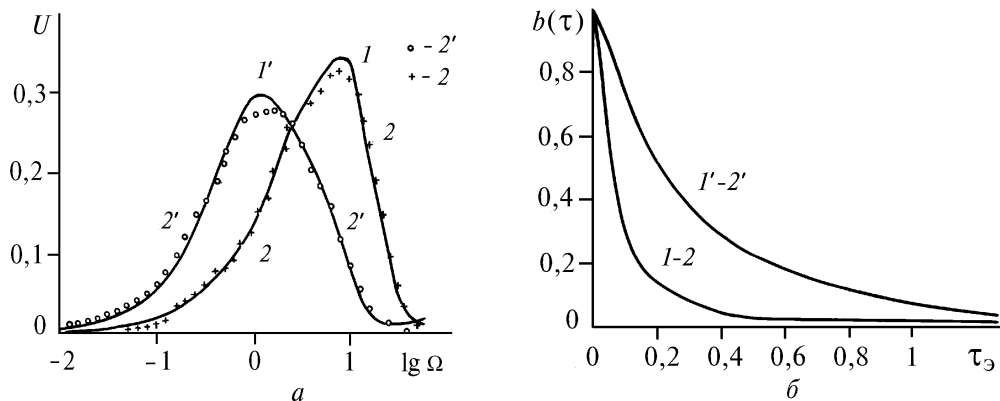


Рис. 2. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) интенсивности $I, 2$ и потока $I', 2'$ излучения при отражении от матрицы из 12 уголкового отражателей и диаметре приемника 500 мм: кривые $I, I' - \beta_0(2L) = 9,8, V_{\perp} = 1,17$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,38$ м/с; $2, 2' - \beta_0(2L) = 11, V_{\perp} = 0,27$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,47$ м/с

Естественно, такой зависимости от диаметра временных характеристик потока излучения не будет в случае матрицы уголкового отражателей, так как отражение от нее происходит по-другому, в результате чего система <сферическая волна – матрица уголков> становится самофокусирующим устройством [7].

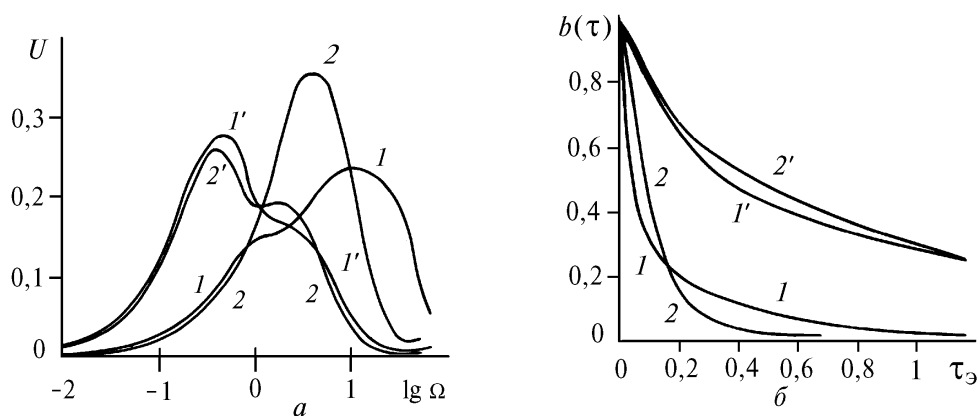


Рис. 3. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) интенсивности $I, 2$ и потока $I', 2'$ излучения при отражении от зеркала диаметром 500 мм и приеме излучения апертурой диаметром 250 мм для значений $\beta_0(2L) = 9, V_{\perp} = 2,60$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,62$ м/с – кривые I, I' ; $\beta_0(2L) = 3,3, V_{\perp} = 2,34$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,64$ м/с – $2, 2'$

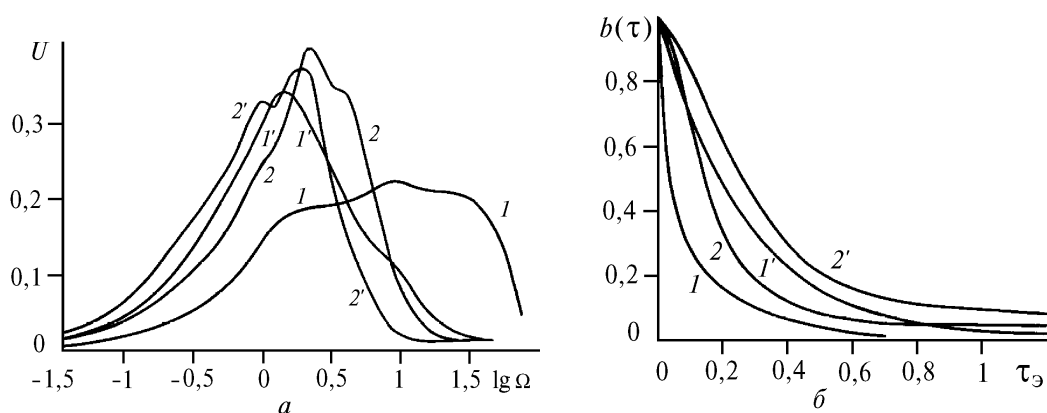


Рис. 4. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) интенсивности $I, 2$ и потока излучения $I', 2'$ при отражении от зеркала диаметром 500 мм и приеме излучения апертурой 31 мм: кривые $I, I' - \beta_0(2L) = 8, V_{\perp} = 1,46$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,38$ м/с; $2, 2' - \beta_0(2L) = 3, V_{\perp} = 2,58$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,82$ м/с

На рис. 3 и 4 показано сглаживающее действие больших (рис. 3) и малых (рис. 4) приемных апертур на временные характеристики принимаемых сигналов при существенно различных значениях параметра $\beta_0(2L)$ для сигналов, отраженных от зеркального диска диаметром 500 мм. Из приведенных данных видно, что как для больших, так и малых, но существенно больших радиуса когерентности [8] приемных апертур влияние интенсивности турбулентности невелико по сравнению с ее влиянием на временной спектр флуктуаций интенсивности.

На рис. 5 представлены временные спектры флуктуаций интенсивности ($I, 2$) и светового потока ($I', 2'$) при отражении излучения от пространственной решетки из 12 уголкового отражателей и приеме потока излучения апертурой диаметром 500 мм при близких значениях скорости ветра, но заметно различных значениях параметра $\beta_0(2L)$.

Из этих данных видно, что в области сильных флуктуаций интенсивности влияние турбулентности на временной спектр флуктуаций от уголков излучения существенно меньше, чем в случае зеркального диска при тех же условиях (сравните рис. 3, 4 и рис. 5). При этом видно, что в целом флуктуации интенсивности при отражении от уголков более высокочастотные, чем от плоского зеркала, особенно при $\beta_0(2L) = 3$ (см. зависимости 2 на рис. 3, 4, 5). При насыщенных флуктуациях вид временных спектров интенсивности заметно различается и от уголков он более узкополосный, чем от зеркального диска диаметром 500 мм. По-видимому, это связано с модуляцией отраженной интенсивности флуктуациями потока за счет апертуры матрицы уголкового отражателей. Однако, как можно увидеть из рис. 2, б и 3, б, масштабы их временной корреляции по уровню $\approx 0,2$ отличаются несущественно.

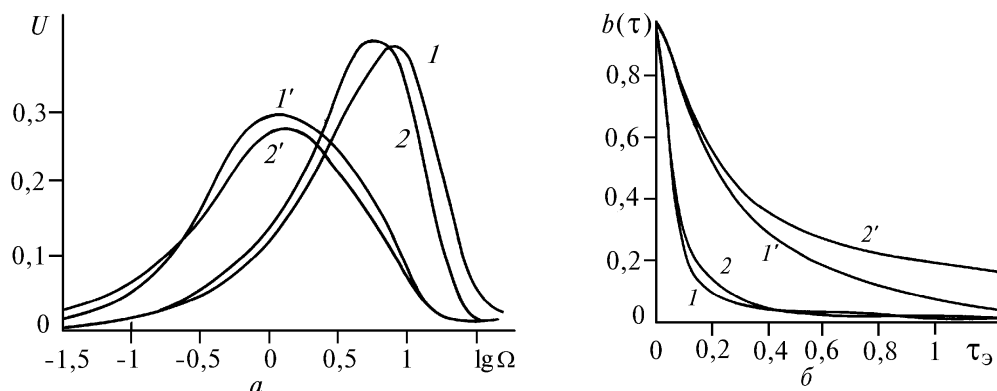


Рис. 5. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) интенсивности $I, 2$ и потока $I', 2'$ при отражении излучения от решетки уголкового отражателей при различных значениях интенсивности турбулентности: кривые $1, 1'$ – $\beta_0(2L) = 9,8, V_{\perp} = 1,17$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,38$ м/с; $2, 2'$ – $\beta_0(2L) = 3, V_{\perp} = 1,1$ м/с, $\sigma_{\perp} = 0,6$ м/с

Более корректное сравнение временных характеристик флуктуаций интенсивности и потока излучения проведено на рис. 6, где представлены данные при отражении от зеркального диска диаметром 12,5 см, т.е. примерно равные диаметру матрицы уголкового отражателей. Прием осуществлялся на одну и ту же апертуру диаметром 500 мм при близких значениях параметра $\beta_0(2L)$. Из рисунка видно, что спектр флуктуаций интенсивности от матрицы уголков более высокочастотный, а потока – более низкочастотный, чем при отражении от плоского зеркала. Такое поведение временных характеристик согласуется с тем, что сферическая волна вместе с матрицей из уголкового отражателей, каждый размер которого больше радиуса когерентности сферической волны у отражателя, образуют самофокусирующую систему [7].

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показали, что подобие временных характеристик флуктуаций интенсивности и потока излучения относительно эффективной скорости ветра соблюдается при отражении от зеркального диска и уголкового отражателей. Влияние вариаций турбулентности на временные спектры интенсивности и потока излучения значительно слабее влияния вариаций скорости ветра. При одних и тех же атмосферных и других условиях флуктуации интенсивности сферической волны при отражении от матрицы уголкового отражателей более высокочастотные, чем от эквивалентного по диаметру зеркального диска, а потока – более низкочастотные.

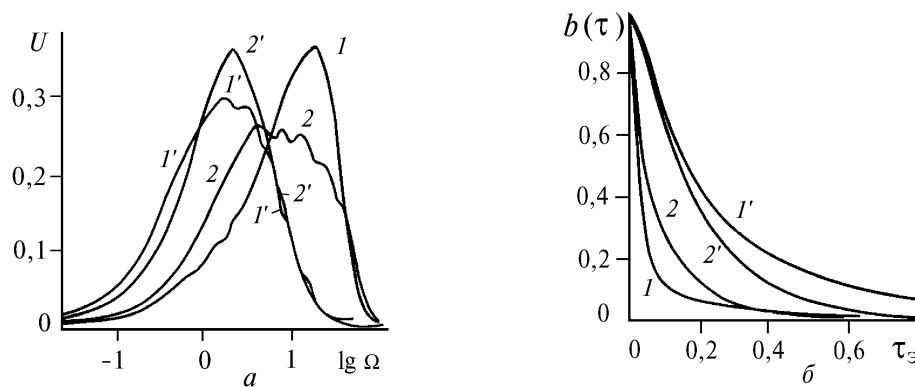


Рис. 6. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) интенсивности I , 2 и потока излучения I' , $2'$ при отражении от зеркала диаметром 12,5 см: кривые 2 , $2'$ – $\beta_0(2L) = 8,5$, $V = 1,91$ м/с, $\sigma = 0,46$ м/с и матрицы уголкового отражателя 1 , $1'$ – $\beta_0(2L) = 9,7$, $V_{\perp} = 0,39$ м/с, $\sigma = 0,5$ м/с

Приведенные результаты в целом дают представление о возможных вариациях временных характеристик флуктуаций интенсивности и потока излучения при отражении от зеркальных объектов в турбулентной атмосфере.

Проанализируем в свете изложенных результатов данные работы [2]. Отмеченное поведение спектров флуктуаций потока отраженного от одиночного уголка излучения относится к случаям малых значений перпендикулярной к трассе компоненты скорости ветра. При малых ветрах влияние флуктуационной компоненты на временной спектр становится существенным, и ее игнорирование приводит к большим отклонениям от гипотезы подобия спектров. Эта ситуация была проанализирована автором и отражена в монографии [8, с. 115–117]. Измерение ветра при малых скоростях анеморумбометром дает значительную погрешность, так как порог срабатывания серийных приборов примерно равен или больше 0,5 м/с, что, естественно, только по этой причине дает большую ошибку.

Еще одна причина может быть связана с временной и пространственной неоднородностью поля ветра. Влияние временной нестационарности на результаты измерения автоспектров продемонстрированы в [8, с. 117–118]. Необходимо также отметить, что в [2] данные получены усреднением по 10 реализациям, разброс низкочастотных оценок спектров в отдельных реализациях близок к одному порядку и, кроме того, нет оценок величины смещений спектра. Смещение зависит от относительной величины спектрального окна анализатора СКЧ-26 и оцениваемого спектра, ширина которого растет с изменением скорости ветра и интенсивности турбулентности.

Все эти факторы могут сильно сказаться на оценках спектров и их сравнении с результатами расчетов или гипотезой подобия спектров относительно скорости ветра. В то же время они учитывались в настоящей статье так же, как это описано в [8, 3]. Однако в работе [2] их влияние не оценивается, а сама гипотеза не проверяется. При слабых флуктуациях интенсивности и больших скоростях ветра $V_{\perp} = 14$ и 8 м/с, как отмечают авторы, расчеты с хорошей для практических целей точностью совпадают с экспериментом. При этом из рис. 2, а [2], на котором проведено сравнение, видно, что в низкочастотной области спектра различие между расчетом и экспериментом достигает полпорядка. По-видимому, это связано с мерцанием потока за счет конечности апертуры отражателя, которая не учитывается в теории, и с тем, что спектр флуктуаций интенсивности, отраженной от уголка, в целом более низкочастотный [4], чем на прямой трассе. Таким образом, результаты [2] не противоречат выводам настоящей статьи.

В заключение автор выражает глубокую признательность О.А. Рубцовой за большую помощь в анализе результатов измерений.

1. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Петров А.И., Покасов В.В. // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 7. С. 1580–1582.

2. Григорьевский В.И., Ломакин В.Н., Тараканов С.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 3. С. 364–366.

3. Иванов А.П., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 5. С. 523–528.

4. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Петров А.И., Покасов В.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 7. С. 907–912.

5. Патрушев Г.Я., Пелымский О.А., Петров А.И. // Изв. вузов. Радио-физика. 1989. Т. 32. № 6. С. 673–678.
6. Патрушев Г.Я., Рубцова О.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 11. С. 1333–1350.
7. Патрушев Г.Я., Петров А.И., Рубцова О.А. // Оптика атмосферы и океана. 1989. Т. 2. № 3. С. 277–282.
8. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы, Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию
26 ноября 1993 г.

G. A. Patrushev. Time Characteristics of the Intensity and Flux of a Spherical Radiation Wave Specularly Reflected from Objects in the Turbulent Atmosphere.

This paper deals with the analysis of time structure of the fluctuations of the intensity and flux of a spherical wave reflected from a disc mirror of large diameter as well as from a spatial grid of closely packed corner cube retroreflectors under conditions of strong intensity fluctuations. It is shown in the paper based on experimental data that variations in the intensity and the flux of radiation caused by variations in the mean and fluctuating components of the wind velocity along a sounding path can be accounted for by introducing an effective velocity of the optical inhomogeneities transport across the propagation path. In the case of reflection from a mirror disc the square root of D , where D is the diameter of receiving aperture, while the position of the spectral density maximum is inverse proportional to this square root. In the case of a wave reflection from a grid of corner cube retroreflectors the time spectra of the intensity fluctuations are less sensitive to the intensity of turbulence along the path and their high frequency portion is more powerful as compared to that in the case of reflection from a mirror disc.