

А.С. Гурвич, А.П. Иванов, С.С. Кашкаров, Г.Я. Патрушев, А.П. Ростов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ И УСИЛЕНИЯ ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Представлены результаты экспериментального исследования эффекта усиления обратного рассеяния и усиления флуктуаций интенсивности при отражении сферической волны от плоского зеркала. Обнаружено усиление средней интенсивности отраженной волны в области сильных флуктуаций и проведено сравнение с теоретическими расчетами. Показано, что усиление флуктуаций устойчиво проявляется как в области слабых, так и в области перехода от слабых к сильным флуктуациям.

При отражении волн от объектов, расположенных в случайно-неоднородной среде, возникает усиление обратного рассеяния в направлении строго назад [1–3] и увеличение относительных флуктуаций интенсивности [2, 3]. Степень проявления этих эффектов зависит от уровня турбулентности, дифракционных характеристик оптической волны и отражателя, от соотношения между временем переноса оптических неоднородностей поперек трассы и временем распространения в прямом и обратном направлениях.

В турбулентной атмосфере усиление обратного рассеяния наблюдалось при отражении сферической волны от шероховатой поверхности [4]; для плоской волны – при наличии фазового экрана вблизи зеркальной поверхности [5]. Экспериментальное подтверждение предсказанного усиления при отражении сферической волны от зеркального диска [3] до настоящего времени не получено. При этом следует отметить, что теоретические расчеты носят асимптотический характер; строго говоря, они должны хорошо описывать эффект при слабых, либо «насыщенных» флуктуациях интенсивности. Пространственная локализация эффекта усиления флуктуаций интенсивности исследована лишь при слабых флуктуациях интенсивности [6].

С целью установления эффекта усиления обратного рассеяния при отражении от плоского безграничного зеркального диска были проведены эксперименты в условиях реальной атмосферы. Следует отметить, что в случайно-неоднородной среде возможно проявление как «абсолютного» усиления обратного рассеяния (увеличение интенсивности по сравнению со средой без флуктуаций показателя преломления), так и «относительного» (увеличение интенсивности при отражении строго назад по сравнению с отражением вбок). Так как на приземных атмосферных трассах всегда присутствует турбулентность, количественное исследование более удобно проводить для «относительного» усиления.

Эксперимент проводился в летний период 1989 и 1990 гг. на горизонтальной трассе с ровной подстилающей поверхностью. Длина трассы на первом этапе в 1989 г. была 400 м и в процессе работы на втором этапе в 1990 г. была увеличена до 800 м. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

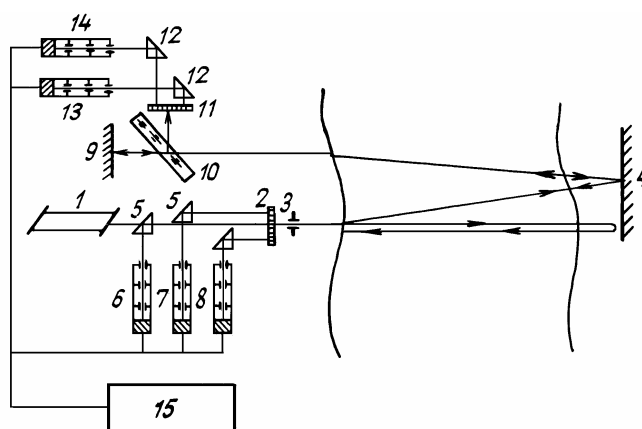


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Излучение He–Ne-лазера 1 с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм и мощностью $P = 50$ мВт через диафрагму в пластине 2 и формирующую диафрагму 3 направлялось в атмосферу. Диафрагма 3 диамет-

ром $a = 1,0$ мм устанавливалась для получения квазисферической волны от лазера (волновой параметр излучателя больше 100). После прохождения через турбулентный слой атмосферы излучение попадало на отражатель 4, который был установлен на массивной опоре на расстоянии $L_1 = 400$ м от измерительного павильона. Конструкция опоры и держателя исключала возможные колебания отражателя из-за сильных порывов ветра и ударных колебаний земной поверхности. В измерениях отражателем служил высококачественный плоский зеркальный диск диаметром 500 мм, что позволяло осуществить полный перехват падающего излучения.

Эксперимент проводился по двум схемам. В первом случае в 1989 г. отраженное от зеркала 4 излучение направлялось в приемный тракт и длина прямой трассы составляла $L = 400$ м. Во втором случае в 1990 г. использовалась V-образная трасса и отраженное от зеркала 4 излучение направлялось, на зеркало 9 диаметром 300 мм, установленное в измерительном павильоне. Перед зеркалом 9 помещалась полупрозрачная пластина 10 для регистрации сигналов для расчета взаимно-корреляционной функции $B_1(\rho)$ падающего излучения на прямой трассе, где ρ — расстояние между фотоприемниками в горизонтальной плоскости. Для этой цели устанавливались два фотоприемника 13, 14, расстояние между которыми изменялось в процессе измерений. Сигналы для фотоприемников формировались системой горизонтально расположенных диафрагм диаметром 0,8 мм в пластине 11 с шагом 3 мм и зеркальными призмами 12. Измерение расстояния проводилось перемещением фотоприемника 14.

Как в первом варианте, так и во втором после отражения от зеркала 4 излучение попадало в приемный тракт, состоящий из пластины 2, зеркальных призм 5 и фотоприемников 6, 7, 8. Пластина 2 содержала ряд эквидистантно расположенных отверстий диаметром 0,8 мм для получения сигналов на различных расстояниях от оптической оси источника. Центральная диафрагма диаметром 2 мм предназначалась для прохождения излучения в прямом направлении. Диафрагма, расположенная ниже, формировала сигнал для неподвижно закрепленного фотоприемника 6, который в процессе эксперимента был опорным. Диафрагмы, находящиеся справа и слева от центральной, формировали сигналы для фотоприемников 7, 8. Настройка на определенное расстояние от оси проводилась перемещением фотоприемников 7, 8, закрепленных на столиках с микрометрическими винтами. Для снижения уровня фоновой засветки фотоприемники были снабжены блендами с входными диафрагмами. На всех фотоприемниках перед входными окнами устанавливались диффузные рассеиватели для избежания возможного изменения чувствительности при перемещении в процессе измерений.

Таким образом, при изменении положения фотоприемников 7, 8, 12, регистрировалась картина распределения сигналов в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, а также сигналы, несущие информацию о взаимно-корреляционной функции флуктуаций интенсивности на прямой трассе, с дискретным шагом 3 мм. Минимальное расстояние от оптической оси источника было 3 мм, максимальное — 21 мм. Опорный приемник регистрировал сигнал на расстоянии 3 мм от оптической оси волны. В эксперименте в качестве фотоприемников использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-79.

Электрические сигналы с выходных усилителей ФЭУ поступали в аппаратно-программный комплекс 15 [7], где после низкочастотной фильтрации (частота среза 2,5 кГц) оцифровывались и записывались на ленту кодовым магнитным накопителем КМН со следующими характеристиками: динамический диапазон — 72 дБ, частота дискретизации по каждому каналу 4 кГц. 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. Всего за период измерений было записано и обработано более ста 50-секундных и ста 30-секундных реализаций.

Синхронно с регистрацией на КМН проводились измерения давления, влажности, температуры на трассе, а также средней и флуктуационной составляющих перпендикулярной по отношению к трассе распространения компоненты скорости ветра с помощью акустического анемометра метра [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 $\beta_0 = [1,23C_n^2k^{7/6}(2L_2)^{1/6}]^{1/2}$, характеризующего степень турбулентности на трассе $2L_2$, где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

На рис. 2, 3 приведены результаты измерений относительного усиления средней интенсивности $I(\rho)$ и усиления флуктуаций интенсивности $\beta^2(\rho)$ сферической волны для различных значений параметра β_0 , где ρ — расстояние между точкой приема и оптической осью волны в картинной плоскости. L — расстояние от излучателя до отражателя. Вертикальными отрезками на рисунках обозначен разброс экспериментальных данных. Нормировка средней интенсивности $I(\rho)$ и относительной дисперсии $\beta^2(\rho)$ в перемещаемых каналах производилась на соответствующие значения $I_{оп}$, $\beta_{оп}^2$ в опорном канале.

Как видно из рис. 2, фактор усиления средней интенсивности $N(\rho) = I(\rho)/I_{оп}$ отчетливо проявляется в области сильных флуктуаций и зависит от β_0 . С ростом степени турбулентности на трассе $N(\rho)$ растет и при $\beta_0 \approx 5,0$ отношение $I(\rho)$ при $\rho = 3$ мм к соответствующему значению интенсивности на расстоянии первой зоны Френеля $\rho = (\lambda L)^{1/2}$ достигает 2,5.

На рис. 3 приведены графики экспериментального сравнения фактора усиления обратного рассеяния $N(\rho) = I(\rho)/I_{\text{он}}$ (сплошные кривые), где в качестве опорного значения взята величина средней интенсивности при $\rho = (\lambda L)^{1/2}$, и фактора усиления, который в соответствии с теорией описывается зависимостью $N(\rho) = \hat{B}_1(\rho) + 1$ [1] (штриховые кривые), где $\hat{B}_1(\rho)$ — корреляционная функция интенсивности прямой волны на отражателе, нормированная на среднее значение интенсивности на отражателе. Как видно из сравнения графиков, совпадение данных хорошее при $\beta_0 \approx 5,4 \div 5,7$ и несколько хуже при $\beta_0 \approx 3,0 \div 3,3$.

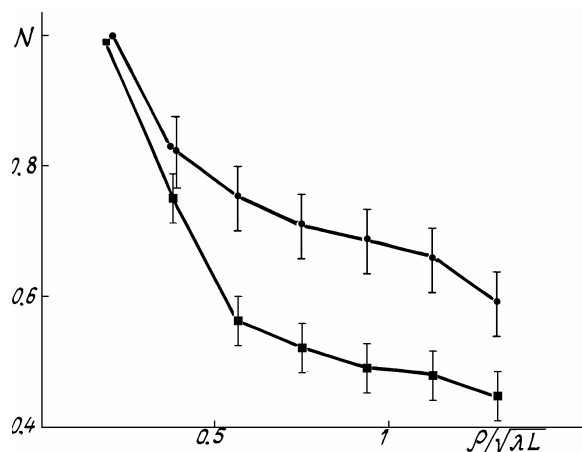


Рис. 2. Распределение нормированной интенсивности $N(\rho) = I(\rho)/I_{\text{он}}$ в приемной плоскости (точки — $\beta_0 \approx 2,0 \div 3,5$; квадраты — $\beta_0 \approx 4,0 \div 5,2$)

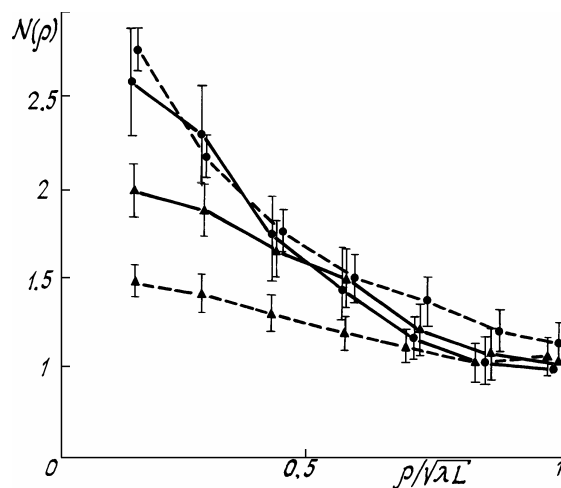


Рис. 3. Распределение фактора усиления $N(\rho)$ (треугольники — $\beta_0 \approx 3,0 \div 3,3$; точки — $\beta_0 \approx 5,4 \div 5,7$); штриховые кривые — $N(\rho) = \hat{B}_1(\rho) + 1$; сплошные — $N(\rho) = I(\rho)/I_{\text{он}}$

На рис. 4 приведено распределение нормированной относительной дисперсии флуктуаций интенсивности в картинной плоскости $\beta(\rho)/\beta_{\text{он}}$ (3 мм) при различных значениях параметра β_0 . Сплошная линия соответствует теоретическому расчету по методу плавных возмущений [6].

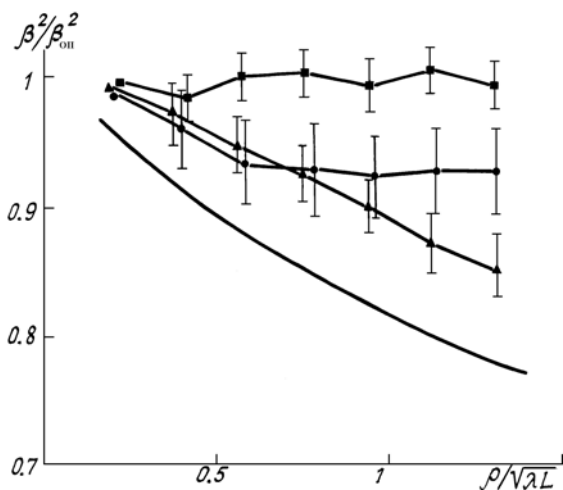


Рис. 4. Распределение нормированной относительной дисперсии $\beta^2(\rho)/\beta_{\text{он}}^2$ в приемной плоскости (треугольники — $\beta_0 \approx 0,7 \div 1,2$; точки — $\beta_0 \approx 2,0 \div 3,5$; квадраты — $\beta_0 \approx 4,0 \div 5,2$)

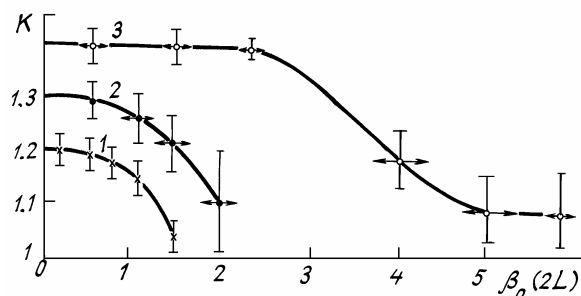


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления флуктуаций $K = \beta(0)/\beta_{\text{пр}}(2L)$ отраженной волны от параметра $\beta_0(2L)$; 1 — плоская волна; 2 — узкий коллимированный пучок; 3 — сферическая волна

Из рисунка видно, что эффект усиления флуктуаций в рассматриваемом случае имеет место лишь при слабых флуктуациях в пределах первой зоны Френеля и становится незначительным при $\beta_0 \approx 4,0 \div 5,2$. Этот результат хорошо согласуется с представленным на рис. 5 экспериментальным поведением коэффициента усиления флуктуаций интенсивности $K = \beta(0)/\beta_{\text{пр}}(2L)$, где $\beta_{\text{пр}}^2(2L)$ — относительная дисперсия флуктуаций интенсивности на прямой трассе. Результаты были получены по измерениям, аналогичным [6]. Из данных следует, что на трассе с отражением при значении $\beta_0 \approx 5,0$

усиление флуктуаций интенсивности в сферической волне становится малым. Таким образом, проведенные эксперименты указывают на существование эффектов усиления средней интенсивности и флуктуаций интенсивности при обратном отражении от зеркального диска большого диаметра. При этом эффект усиления средней интенсивности наиболее четко выражен при сильной турбулентности при значении параметров $\beta_0 \geq 2,0$, а усиление флуктуаций, наоборот, при слабой турбулентности при $\beta_0 < 1,0$.

1. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 270 с.
2. Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров С.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Закономерность увеличения обратного рассеяния волн. Диплом об открытии № 359.
3. Банах В.А., Миронов В.Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1986. 173 с.
4. Гурвич А.С., Кашкаров С.С. //Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 6. С. 794–796
5. Jakeman E. //J. Opt Soc. Amer. A5. 1988. V. 10. P. 1638–1648.
6. Патрушев Г.Я., Петров А.И., Покасов В.В. //Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 7. С. 823–831.
7. Исакова А.И., Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я. //Автоматика, 1987. № 4. С. 15–21.
8. Анисимов М.В., Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. //Приборы и техника эксперимента. 1988. № 4. С. 196–199.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
18 сентября 1991 г.

A.S. Gurvich, A.P. Ivanov, S.S. Kashkarov, G.Ya. Patrushev, A.P. Rostov.
An Experimental Study of the Effect of Enhancement of the Backscatter and Intensity Fluctuations of a Beam Reflected from a Specular Surface

This paper presents some experimental results on studying the effect of increased backscatter and intensity fluctuations of a spherical wave reflected from a plane mirror. It is found that an increase of the reflected wave mean intensity takes place in the range of strong intensity fluctuations. The experimental results are compared with theoretical calculations. It is shown that the enhancement of intensity fluctuations is stably observed both in the region of weak intensity fluctuations and in the transition range from weak to strong intensity fluctuations.