

П.А. Коняев, В.П. Лукин, Г.Я. Патрушев, С.Ю. Табакаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Приводятся результаты численного моделирования распространения отраженных волновых пучков в турбулентной атмосфере. Анализируются статистические характеристики волн, рассеянных зеркальными и уголковыми отражателями.

Адаптивная коррекция турбулентных искажений оптических пучков, как правило, происходит с использованием опорных волн [1], получаемых при рассеянии от специальных отражателей (бакенов), поэтому возникла необходимость исследовать статистические характеристики локационных сигналов [1, 2]. В случае, когда размер отражателя мал, в месте его расположения относительно приемника формируется опорная волна, близкая к сферической, статистические характеристики которой достаточно хорошо изучены. Иная ситуация получается при отражателе конечных размеров, который нельзя считать точечным или безграничным. Значительные трудности в расчетах связаны с исследованием статистических характеристик волн, рассеянных на ограниченных отражателях (даже зеркальных). Часто используемая в теории замена реального отражателя с «резкими» границами на «плавные», когда коэффициент отражения изменяется по гауссовскому закону, приводит к большому отличию рассчитанных и реальных характеристик [3]. Для преодоления возникающих трудностей мы предлагаем исследовать статистические характеристики оптических волн, рассеянных на существенно ограниченных отражателях (опорных бакенах), методом статистических испытаний, при котором процесс распространения волны в прямом и обратном направлениях моделируется путем ее прохождения (с учетом дифракции) через набор соответствующих фазовых экранов [4]. При наличии мощной ЭВМ такой подход является универсальным, позволяет не только корректно учесть дифракцию оптической волны на реальном отражателе, но и провести исследования в труднодоступной для аналитических расчетов области значений параметров турбулентности [6].

Процесс распространения волны до отражателя по оси  $z$  будем описывать в приближении скалярного параболического уравнения

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2k^2 n_1 \right) U, \quad (1)$$

где  $U(z, \rho)$  — комплексная амплитуда волны, имеющая на границе  $z = 0$  значение

$$U_0(\rho) = \exp \left[ -\frac{\rho^2}{2a_0^2} - ik \frac{\rho^2}{2F} \right],$$

$x, y$  — декартовы координаты в плоскости, перпендикулярной оси  $z$ ;  $a_0$  — эффективный радиус;  $F$  — радиус кривизны фазового фронта в центре излучающей апертуры;  $\rho^2 = x^2 + y^2$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $n_1$  — относительные флуктуации показателя преломления. Дифракцию на отражателе будем учитывать путем постановки граничного условия при  $z = L$  на конце трассы:

$$U_{\text{отр}}(\rho, L) = V(\rho) U(\rho, L), \quad (2)$$

в параболическом уравнении для отраженной волны:

$$-2ik \frac{\partial U_{\text{отр}}}{\partial z} + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2k^2 n_1 \right) U_{\text{отр}} = 0. \quad (3)$$

В граничном условии (2) коэффициент отражения  $V(\rho)$  является характеристикой используемого отражателя. Так, для реального зеркального диска диаметром  $d$  и уголкового отражателя с металлизированными задними отражающими гранями граничные условия будут следующие:

для зеркала

$$V(\rho, \rho') = A(\rho) \delta(\rho - \rho'), \quad A(\rho) = 1, \quad \rho \leq d,$$

для уголка

$$V(\rho, \rho') = A(\rho) \delta(\rho + \rho'), \quad A(\rho) = 1, \quad \rho \leq d.$$

При численном решении уравнения распространения волн на трассе с отражением турбулентные возмущения моделируются одними и теми же фазовыми экранами при прохождении волны в прямом и обратном направлении. Уровень турбулентности определяется интенсивностью турбулентности отдельного фазового экрана и количеством их (экранов) на трассе. Установление эквивалентности по возмущающему действию моделируемой среды распространения и реальной сплошной среды проводилось по равенству функции взаимной когерентности в обоих случаях на прямой трассе. Как известно, функция взаимной когерентности  $\rho_c$  гауссовского пучка и радиус когерентности плоской волны  $\rho_0$  связаны выражением

$$\frac{\rho_c}{\rho_0} = \frac{3(1+z'^2) + 4qz}{3+z'^2+qz}; \quad z' = \frac{L}{ka_0^2}, \quad q = \frac{L}{k\rho_0^2}. \quad (4)$$

Из решения биквадратного уравнения (4) нетрудно установить связь между параметром  $\beta_0^2 = 1,21 \cdot C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ , где  $C_n^2$  — структурная характеристика показателя преломления, характеризующего турбулентные условия распространения в сплошной среде, и радиусом когерентности  $\beta_0 = (q/1,22)^{5/12}$ ,  $q = z'a_0^2 / \rho_0^2$ . В расчетах радиус когерентности на прямой трассе определялся с точностью до второй значащей цифры после запятой. При моделировании использовались коллимированный ( $F = 0$ ) пучок излучения с числом Френеля

$$\Omega = ka_0^2/4L = 0,1$$

и отражатель размером в одну  $\Omega_r = \frac{ka^2}{4L} 1,7$  и две  $\Omega_r = 6,8$  зоны Френеля.

На рис. 1 приведена зависимость эффекта усиления флуктуации интенсивности  $N(0)$  на оси отраженного пучка излучения в зависимости от условий распространения по трассе  $\beta_0$ . Эффект усиления оценивался по формуле

$$N(R) = \langle I^R(x_0, R) \rangle / \langle I^R(x_0, R)_{\text{нк}} \rangle,$$

где  $\langle I^R(x_0, R)_{\text{нк}} \rangle$  среднее значение интенсивности излучения на трассе длиной  $2L$  (прямая и отраженная волны — некоррелированы), при этом распространяющийся пучок ограничивался диафрагмой, расположенной на расстоянии  $L$  от источника. Из приведенных на рисунке данных и их сравнения с [2] ( $\beta_0 = 0,4$ ) видно, что при слабой турбулентности наблюдается лишь их качественное совпадение; количественные же расхождения довольно значительны. При увеличении интенсивности турбулентности в случае зеркального диска коэффициент усиления обратного рассеяния на оси отраженного пучка  $N(0)$  изменяется незначительно, а в случае уголкового отражателя — монотонно возрастает до двух.

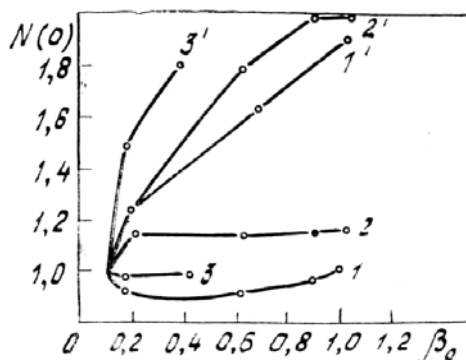


Рис. 1. Зависимость эффекта усиления обратного рассеяния  $N(0)$  на оси пучка от интенсивности турбулентности на трассе  $\beta_0(L)$  для зеркального диска 1, 2, 3 и уголкового отражателя 1', 2', 3': 1, 1' —  $\Omega_r = 1,7$ ; 2, 2' —  $\Omega_r = 6,8$ ; 3 —  $\Omega_r = 0$

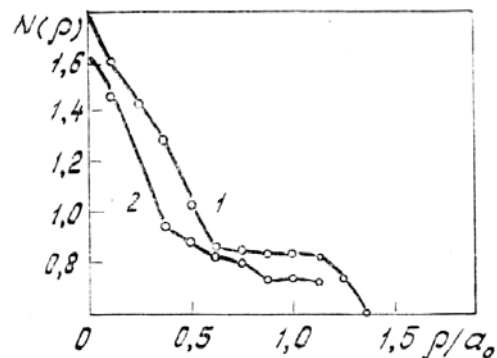


Рис. 2. Пространственное распределение эффекта усиления  $N(\rho)$  в картинной плоскости для зеркального диска: 1 —  $\Omega_r = 6,8$ ; 2 —  $\Omega_r = 1,7$ ,  $\beta_0 \approx 0,7$

Зависимость фактора усиления обратного рассеяния  $N(R)$  в картинной плоскости представлена на рис. 2, из которого видно, что в случае коллимированного пучка эффект усиления локализован в небольшой области  $R \lesssim a_0$ , примыкающей к оси пучка, а затем происходит ослабление излучения, т.е.

перераспределение интенсивности за счет двукратного прохождения отраженного излучения по одним и тем же неоднородностям среды распространения.

На рис. 3 приведена зависимость среднеквадратических значений флуктуаций интенсивности на оси пучка  $\beta(0)$  от уровня турбулентности  $\beta_0$  на трассе распространения. Видно, что в обоих случаях флуктуации излучения, отраженного от уголка, меньше, чем от зеркального диска аналогичного диаметра как при слабой, так и при сильной турбулентности. Динамика изменения уровня флуктуаций интенсивности отраженного от зеркального диска узкого пучка с близкими дифракционными параметрами в зависимости от  $\beta_0$  рассматривалась в [5] методом Гюйгенса—Кирхгофа, обобщенного на случай плавно неоднородной турбулентной атмосферы. При этом предполагалось, что коэффициент отражения зеркального диска имеет гауссово распределение коэффициента отражения  $V(\rho)$  в зависимости от расстояния до центра диска. Проведенное сравнение показывает, что метод Гюйгенса—Кирхгофа занижает флуктуации интенсивности при значениях  $0,18 \leq \beta_0 \leq 1,0$ .

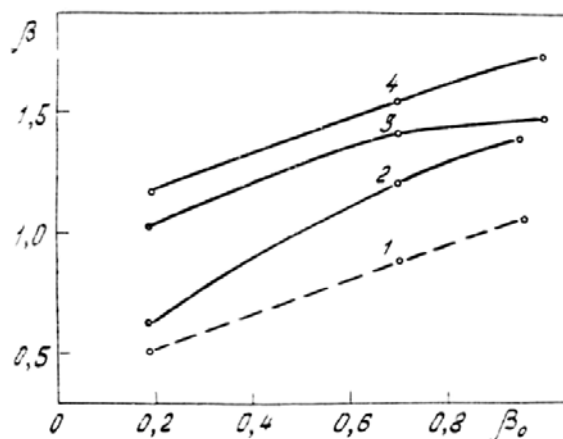


Рис. 3. Среднеквадратические значения флуктуаций интенсивности для зеркального диска (2, 4— $\Omega_r = 1,7$ ;  $\Omega_r = 6,8$ ) и уголкового отражателя (1, 1) в зависимости от интенсивности турбулентности

На рис. 4 приведено относительное поведение дисперсии флуктуаций интенсивности в картинной плоскости в зависимости от расстояния от оси пучка для плоского зеркала (рис. 4, а) и уголкового отражателя (рис. 4, б) с размерами, равными одной зоне Френеля, при различном уровне турбулентности. Из рисунков видно, что дисперсия флуктуации изменяется немонотонно из-за влияния дифракции на отражателе. По мере увеличения интенсивности турбулентности ( $\beta_0$ ) дифракционная картина становится все более замытой и при  $\beta_0 = 1$  возрастание дисперсии с увеличением расстояния от оси пучка становится более плавным. Аналогичная картина поведения дисперсии флуктуаций наблюдается в случае, когда размеры отражателей равны двум зонам Френеля.

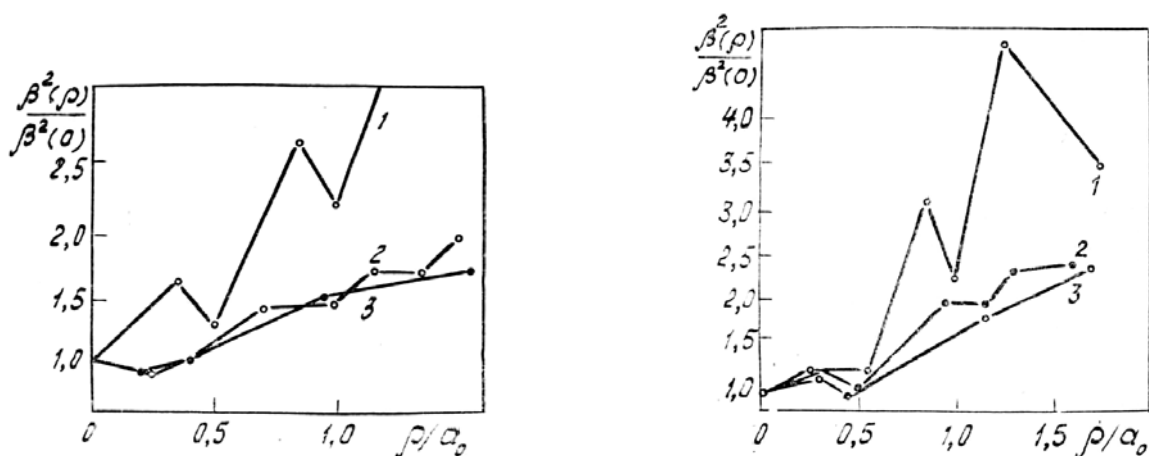


Рис. 4. Пространственное распределение дисперсии флуктуаций интенсивности  $\beta^2(\rho)/\beta^2(0)$  для зеркального диска (а) и уголкового отражателя (б) при различной интенсивности турбулентности: 1— $\beta_0 = 0,18$ ; 2— $\beta_0 = 0,7$ ; 3— $\beta_0 = 1,07$ ;  $\Omega_r = 1,7$

Приведенные результаты являются наглядным примером возможностей предложенного метода изучения конкретных характеристик отраженных волн в различных адаптивных и локационных сис-

темах в ситуациях, наиболее приближенных к реальным, когда другие методы расчета не дают надежных количественных результатов.

1. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
2. Банах В. А., Миронов В. Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1986. 174 с.
3. Патрушев Г. Я., Петрова А. И., Покасов В. В. // Оптика и спектроскопия, 1986. Т. 61. № 3. С. 587–590.
4. Коняев П. А. // 7 Всесоюз симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск, 1983. С. 104–106.
5. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1986. 246 с.
6. Martin J. M., Stanley M. Flatte. // Appl. Optics. 1988. V. 27. P. 2111–2120.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
21 сентября 1990 г.

**P. A. Konayev, V. P. Lukin, G. Ya. Patrushev, S. Yu. Tabakaev. Simulation of Reflected Beam Intensity Fluctuations in Turbulent Atmosphere by Statistical Test Method.**

The results obtained from numerical simulations of the wave beam propagation and reflection in a turbulent atmosphere are reported. Statistical properties of waves backscattered by mirror and corner reflectors are examined.