

УДК 621.371.22

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

*Р. А. Казарян, В. М. Джулакян*

Измерен коэффициент продольной корреляции лазерного пучка, распространяющегося в приземном слое турбулентной атмосферы. Значение длины продольной корреляции при  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$  оказалось порядка 300 м.

В литературе как теоретически, так и экспериментально довольно детально изучалась корреляция интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка. Из результатов этих работ видно, что при слабых флуктуациях ( $\beta_0^2 < 1$ , где  $\beta_0^2 = 1,23 k^{7/6} C_n^2 L^{11/6}$  — дисперсия флуктуации логарифма интенсивности, найденная в первом приближении МПВ) эксперимент хорошо совпадает с теорией. Размер поперечной корреляции имеет порядок радиуса первой зоны Френеля, равной  $\sqrt{\lambda L}$ . При больших значениях  $\beta_0^2$  масштаб корреляции уменьшается по сравнению с  $\sqrt{\lambda L}$ .

Корреляция флуктуаций интенсивности вдоль направления распространения излучения изучена недостаточно. В литературе [1] имеется лишь указание на то, что продольная длина корреляции при слабых флуктуациях имеет порядок длины трассы. Из результатов теории сильных флуктуаций [2] можно ожидать, что продольная длина корреляции будет порядка  $kl_c^2$ , где  $l_c$  — радиус когерентности поля.

Нами была поставлена задача измерения продольных значений корреляции интенсивности лазерного излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере при  $\beta_0^2 \leq 0,41$ .

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения были проведены осенью 1977 года на полигоне Института физических исследований АН Арм. ССР. Излучение He-Ne лазера с  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$  коллимировалось двухметровым коллиматором, входящим в комплект ОСК-2. С помощью диафрагмы из одномодового гауссова пучка вырезалась приосевая часть так, что на выходе из коллиматора получалось почти равномерное распределение интенсивности. До коллиматора был поставлен механический затвор, который открывал пучок в течение одной миллисекунды. Далее пучок с диаметром  $D = 15 \text{ см}$  распространялся по горизонтальной трассе на высоте порядка одного метра от поверхности земли. На расстоянии  $L = 650 \text{ м}$  пучок с помощью полупрозрачного зеркала делился на два, равных по интенсивности. Отраженный пучок попадал на экран и фотографировался. Прошедший — также фотографировался с идентичным масштабом на расстояниях  $L + L_1$ . Значения  $L_1$  равнялись 2, 50, 100, 150, 200 и 300 м. Как видно,  $\sqrt{\lambda L} \ll D/2$ .

Одновременно измерялись скорость и направление ветра, а также оценивалась структурная характеристика поля показателя преломле-

ния  $C_n^2$ . Для этой цели, параллельно с основным, излучался неколлимированный лазерный пучок, который с расстояния 200 см возвращался обратно. Точечным приемником ( $d = 0,8$  мм,  $d \ll \sqrt{\lambda L}$ ), отнесенным на 1,5 м от передатчика, измерялась дисперсия флуктуаций интенсивности. По ее значениям вычислялось  $C_n^2$  [3]. От трех до пяти пар синхронных снимков получались в течение измерения одного значения  $C_n^2$  (30 с). Поперечная компонента скорости ветра во время измерения не превышала 1 м/с. Выбранная длительность импульса лазерного пучка позволяла считать турбулентную среду «замороженной». Таким образом было получено 260 пар синхронных изображений (негативов) лазерного пучка при различных разнесениях  $L_1$ .

## 2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Произведение коэффициентов контрастности негатива  $\gamma_n$  и позитива  $\gamma_p$  равнялось двум. Поэтому измеренное на специально собранном оптическом коррелометре [4] максимальное значение смешанного момента для двух позитивов, соответствующих изображениям, снятым синхронно в различных точках трассы, давало коэффициент корреляции квадратов интенсивностей (для простоты они обозначены через  $I(x; y)$ ). Тогда

$$\overline{I_1(x; y)I_2(x; y)} = \frac{1}{S} \iint_S I_1(x; y)I_2(x; y) dx dy, \quad (1)$$

где  $S$  — сечение пучка. Измерялись также смешанные моменты каждого позитива со своей копией —  $\overline{I_1^2(x; y)}$ ,  $\overline{I_2^2(x; y)}$  и средние значения  $\overline{I_1(x; y)}$ ,  $\overline{I_2(x; y)}$ . После этого вычислялся коэффициент корреляции

$$R_1 = \frac{\overline{I_1(x; y)I_2(x; y)} - \overline{I_1(x; y)}\overline{I_2(x; y)}}{\{[\overline{I_1^2(x; y)} - \overline{I_1(x; y)}^2][\overline{I_2^2(x; y)} - \overline{I_2(x; y)}^2]\}^{1/2}}. \quad (2)$$

Таким способом было обработано 86 пар изображений из 260, соответствующих одинаковым значениям  $C_n^2$  при различных  $L_1$ .

Корреляция флуктуаций интенсивности  $R_2$  для нескольких пар изображений была определена на голографической установке [5], где для получения  $R_2$  в качестве фильтра использовалась фурье-голограмма одного из изображений данной пары.

Экспериментальные данные обрабатывались также на ЭВМ. При обработке на голографической установке и на ЭВМ учитывались характеристические кривые фотоматериалов и, таким образом, получались значения коэффициента корреляции для флуктуаций интенсивности. Для вводов данных в ЭВМ негативы отцифровывались на микроденситометре, управляемом от ЭВМ. Для каждого изображения вычислялись координаты «центра тяжести», после чего определялся коэффициент корреляции изображений при условии совмещенных «центров тяжести».

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На графике (рис. 1) показаны экспериментальные значения коэффициента продольной корреляции флуктуаций интенсивности лазерного излучения в турбулентной атмосфере и ее квадрата в зависимости от  $L_1$  — расстояния между точками наблюдения. Данные на графике представляют средние значения  $R_1$ , полученные из 6—15 измерений, соответствующих значениям  $C_n^2 = 1,5 \cdot 10^{-15}$ ,  $5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>-2/3</sup>. Знаками +, ·, × обозначены значения  $R_1$ , полученные на голографической установке,

оптическом коррелометре и на ЭВМ соответственно. При этом доверительные интервалы в первом и втором случаях не превосходили величины 0,1 от значения  $R$ . Уровни  $R = 0,22; 0,25; 0,38$  определяют шумы, т. е. корреляцию между несинхронными изображениями при различных методах обработки. Так как на голографической установке значения  $R_2$  определялись по максимальным значениям при совмещении пространственного спектра, то эти результаты несколько завышены по сравнению с данными, полученными на ЭВМ, где  $R_2$  находились при совмещенных «центрах тяжести». Как видно из графика, коэффициент продольной корреляции для интенсивности и для квадрата ее на расстоянии 300 м и  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$  падает почти в два раза. На этом же рисунке знаком « $\circ$ » представлена зависимость параметра  $\beta = \frac{\beta_{0L}^2}{\beta_{0(L+L_1)}^2} = (1 + L_1/L)^{-11/6}$  от  $L_1$ .

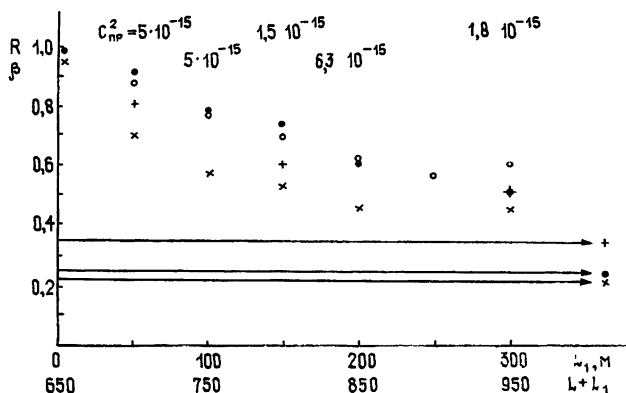


Рис. 1.

Авторы признательны А. С. Гурвичу за ценные обсуждения при выполнении работы, Д. С. Лебедеву и А. Н. Ушакову за составление программы и обработку на ЭВМ, а также коллегам по ИФИ, помогавшим выполнению измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Татарский, Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере, изд. АН СССР, М., 1959.
2. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский, Введение в статистическую радиофизику, изд. Наука, М., 1978.
3. А. С. Абрамян, Ученые записки Ереванского государственного университета, № 3, 48 (1975).
4. В. М. Джулакян, Простой оптический коррелометр, Изв. АН Арм. ССР, № 5, 1979.
5. А. С. Гурвич, В. М. Джулакян, Р. А. Казарян, Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере, Томск, 1977, с. 34.

Институт физических исследований  
АН Арм. ССР

Поступила в редакцию  
30 июля 1979 г.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LONGITUDINAL CORRELATION OF LASER RADIATION IN THE TURBULENT ATMOSPHERE

R A Kazaryan, V. M. Dzhulakyan

The coefficient of longitudinal correlation of a laser beam propagating in near-the-earth layer of the turbulent atmosphere is measured. The value of the length of the longitudinal correlation for  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{-2/3}$  is proved to be of the order of 300 m