

УДК 535.3:681.3

Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, Л.Н. Лавринова, В.П. Лукин

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Описан дифференциальный оптический измеритель параметров турбулентности, позволяющий уменьшить вклад в погрешность их определения относительных смещений источника излучения и приемной системы. Способ определения структурной постоянной показателя преломления и радиуса Фрида основан на регистрации случайных дрожаний изображения, обусловленных атмосферной турбулентностью.

Оценена степень подавления угловых смещений источника в спектре разностного сигнала относительно этой же составляющей в спектре сигнала с выхода одноканального измерителя.

Измерены значения  $C_n^2$  при угловых смещениях источника в диапазоне частот 0–130 Гц по одноканальной и дифференциальной методикам. Показано, что вклад таких смещений в погрешность определения  $C_n^2$  из дифференциальных измерений уменьшается примерно в 50 раз при амплитуде угловых колебаний источника 3 угл. с.

#### Введение

Для оценки влияния турбулентности атмосферы на качество видения через атмосферу внеатмосферных источников при выборе места установки астрономических инструментов, минимизации искажающего воздействия турбулентности на работу сложных оптических систем используются компактные мобильные измерители параметров турбулентности атмосферы. Среднее по трассе распространения излучения значение структурной постоянной показателя преломления  $C_n^2$  и радиус Фрида плоской волны  $r_0$  можно определить из измерений дисперсии случайных смещений энергетического центра тяжести (ЭЦТ) изображения источника света [1]. В таких измерителях в погрешность определения параметров турбулентности существенный вклад вносят различного рода вибрации конструкций передатчика и приемника. От этого недостатка свободны дифференциальные измерители дрожания изображения [2].

#### Описание прибора и методика измерений

В предлагаемой работе описан дифференциальный оптический измеритель параметров турбулентности с лазерным источником излучения, созданный на базе зеркально-линзового телескопа системы Максудова типа АЗТ-7 и IBM-совместимого компьютера.

Принципиальная схема измерителя приведена на рис. 1. В качестве источника излучения используется He-Ne-лазер 1. На передатчике с помощью малогабаритной (что немаловажно при создании передвижных установок) оптики 2 формируется расходящийся пучок, диаметр которого в конце трассы превышает диаметр входной линзы телескопа. Управляемое по углу зеркало 3 с известной угловой чувствительностью используется для калибровки измерителя. Излучение распространяется по атмосферной трассе 4 протяженностью  $L$ .

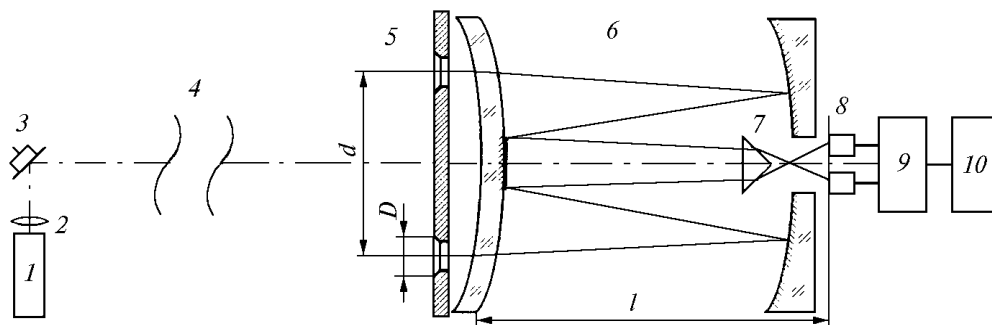


Рис. 1. Принципиальная схема дифференциального измерителя

Перед входной линзой телескопа 6 устанавливаются сменные маски 5 с двумя отверстиями (суб-

апертурами), расположенными симметрично относительно оптической оси приемной системы. Диаметр

субапертур  $D$  равен 4 мм, расстояние между центрами отверстий  $d$  может варьироваться от 68 до 90 мм. С помощью бипризмы Френеля 7 два изображения источника, сформированные оптической системой телескопа и входными субапертурами, пространственно разносятся в плоскости резкого изображения.

Смещения изображений регистрируются двумя квадрантными координатно-чувствительными приемниками 8 типа ФД-19КК. Сигналы с приемников подаются на входы двухкоординатных измерителей 9 угловых смещений энергетического центра тяжести изображения [3].

Запись и обработка аналоговых сигналов с измерителей осуществляются с помощью программно-аппаратного комплекса 10, включающего в себя IBM-совместимый компьютер, 8-канальную систему ввода аналоговой информации, 12-разрядный АЦП, специализированный пакет программ [4].

Конструкция приемной части измерителя обеспечивает достаточную жесткость элементов юстировочных узлов, что является определяющим для дифференциальных измерений.

Методика измерений заключается в следующем: измеряется дисперсия разности угловых смещений ЭЦТ изображений от двух субапертур и вычисляются параметры атмосферной турбулентности.

Для определения структурной постоянной показателя преломления и радиуса Фрида воспользуемся схемой вычислений, предложенной в работе [2], но расчеты проведем для расходящегося лазерного пучка.

Запишем дисперсию разности угловых смещений ЭЦТ  $\sigma_{a_1-a_2}^2$  через дисперсию угловых смещений ЭЦТ каждого изображения  $\sigma_{a_1}^2$ ,  $\sigma_{a_2}^2$  и функцию взаимной корреляции  $B_\alpha$  при условии, что  $\sigma_{a_1}^2 = \sigma_{a_2}^2 = \sigma_a^2$ :

$$\sigma_{a_1-a_2}^2 = 2(\sigma_a^2 - B_\alpha); \quad (1)$$

$$B_\alpha = \langle \alpha_1 \alpha_2 \rangle = \langle \alpha(x, y) \alpha(x + \xi, y + \eta) \rangle, \quad (2)$$

где  $\alpha(x, y)$ ,  $\alpha(x + \xi, y + \eta)$  – флуктуации углов прихода в центре входных субапертур.

Воспользуемся выражениями для корреляционной функции флуктуаций углов прихода  $B_{\alpha_x}$ , корреляционной функции  $B_\varphi$  и структурной функции флуктуаций фазы  $D_\varphi$  в следующем виде:

$$B_{\alpha_x}(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} B_\varphi(\xi, \eta), \quad (3)$$

$$B_\varphi(\xi, \eta) = -\frac{D_\varphi(\xi, \eta)}{2} + \sigma_\varphi^2; \quad (4)$$

$$D_\varphi = 6,88 \left( \frac{r}{r_c} \right)^{5/3}, \quad (5)$$

где  $\alpha_x$  –  $X$ -я составляющая флуктуационной части углов прихода излучения с длиной волны  $\lambda$ ,  $\sigma_j^2$  – дисперсия флуктуаций фазы;  $r^2 = \xi^2 + \eta^2$ ;  $r_c$  – радиус Фрида пучка. Отсюда корреляционная функция флуктуаций углов прихода при совпадении направлений разноса точек наблюдения и наклонов волнового фронта ( $\xi = d$ ,  $\eta = 0$  – продольная корреляция) –

$$B_{\alpha_x} = 0,097 \left( \frac{\lambda}{r_c} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

при перпендикулярных направлениях разноса точек наблюдения и наклонов волнового фронта в этих точках ( $\xi = 0$ ,  $\eta = d$  – поперечная корреляция) –

$$B_{\alpha_x} = 0,145 \left( \frac{\lambda}{r_c} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{1/3}. \quad (7)$$

Используя общее выражение для дисперсии смещений ЭЦТ изображения [5], получаем формулу для дисперсии угловых смещений ЭЦТ в плоскости резкого изображения при колмогоровской турбулентности и конкретных параметрах пучка ( $\Omega = ka^2/L = 4,90$ ;  $F = -4,5$  м, где  $k$  – волновое число;  $a$  – радиус пучка;  $F$  – кривизна волнового фронта) и приемной системы ( $\Omega_t = ka_t^2/L = 0,1$ , где  $a_t$  – эффективный радиус входной апертуры):

$$\sigma_a^2 = 2,187 C_n^2 L D^{-1/3} = 0,314 r_c^{-5/3} \lambda^2 D^{-1/3}, \quad (8)$$

где

$$r_c = 1,69 r_0 = 1,69 [0,423 k^2 C_n^2 L]^{-3/5}; \quad (9)$$

$r_0$  – радиус Фрида плоской волны. Коэффициент 1,69 получен на основе анализа выражения для радиуса когерентности лазерного пучка [6].

Без учета анизотропии ( $\sigma_{\alpha_x}^2 = \sigma_{\alpha_y}^2$ ) из (8) следует, что

$$\sigma_{\alpha_x}^2 = 0,157 r_c^{-5/3} \lambda^2 D^{-1/3}. \quad (10)$$

Подставив последовательно (6), (10) и (7), (10) в (1), получаем дисперсию разности угловых смещений изображений:

– в направлении разноса входных субапертур:

$$\sigma_l^2 = 2r_c^{-5/3} \lambda^2 [0,157 D^{-1/3} - 0,097 d^{-1/3}]; \quad (11)$$

– в перпендикулярном направлении:

$$\sigma_t^2 = 2r_c^{-5/3} \lambda^2 [0,157 D^{-1/3} - 0,145 d^{-1/3}]. \quad (12)$$

$$r_c = \left\{ \frac{\sigma_l^2}{2\lambda^2 [0,157 D^{-1/3} - 0,097 d^{-1/3}]} \right\}^{-3/5}. \quad (13)$$

С учетом (9) имеем

$$r_0 = 0,592 \left\{ \frac{\sigma_t^2}{2\lambda^2 [0,157D^{-1/3} - 0,097d^{-1/3}]} \right\}^{-3/5}; \quad (14)$$

$$C_n^2 = \frac{\sigma_t^2}{1,411\pi^2 L [0,157D^{-1/3} - 0,097d^{-1/3}]}; \quad (15)$$

Аналогично из (12) и (9) следует

$$r_c = \left\{ \frac{\sigma_t^2}{2\lambda^2 [0,157D^{-1/3} - 0,145d^{-1/3}]} \right\}^{-3/5}, \quad (16)$$

$$r_0 = 0,592 \left\{ \frac{\sigma_t^2}{2\lambda^2 [0,157D^{-1/3} - 0,145d^{-1/3}]} \right\}^{-3/5}; \quad (17)$$

$$C_n^2 = \frac{\sigma_t^2}{1,411\pi^2 L (0,157D^{-1/3} - 0,145d^{-1/3})}; \quad (18)$$

При определении  $C_n^2$  из измерений по одноканальной схеме, используя формулу (8) и условие изотропности, получаем

$$C_n^2 = \sigma_{\alpha_x}^2 / (1,094 LD^{-1/3}). \quad (19)$$

### Испытания дифференциального измерителя

Испытания дифференциального измерителя проводились в октябре 1997 г. на горизонтальной трассе длиной 100 м между корпусами Института оптики атмосферы. Трасса проходила на высоте 10 м над подстилающей поверхностью.

Для калибровки измерителя лазерный пучок на входе в турбулентную среду отклонялся управляемым зеркалом в направлении разнаса входных субапертур и в перпендикулярном направлении с частотой 700 Гц, значительно превышающей верхнюю границу временного спектра флуктуаций углов прихода, обусловленных турбулентностью. С учетом геометрии эксперимента из сопоставления амплитуды колебаний зеркала и амплитуды выходных сигналов с одноканальными измерителями определялась чувствительность измерителя.

Чтобы обеспечить работу квадрантных приемников измерителя в линейном участке позиционной характеристики, случайные смещения изображения не должны превышать 1/3 радиуса дифракционного изображения. При диаметре входной апертуры 4 мм максимально допустимые угловые смещения ЭЦТ составляют  $6,4 \cdot 10^{-5}$  рад, следовательно, дисперсия угловых смещений не должна превышать  $4,0 \cdot 10^{-10}$  рад<sup>2</sup>. Этим условием определяются предельные значения измеряемых параметров турбулентности. Для трассы 100 м предельное значение  $C_n^2$  равно  $6,3 \cdot 10^{-13}$  м<sup>-2/3</sup>, минимальный радиус Фрида плоской волны 9 мм.

Минимальные значения  $C_n^2$  определяются шумами измерительной системы. При соотношении сигнал-шум равном 3 пороговое значение  $C_n^2$  равно  $1,4 \cdot 10^{-15}$  м<sup>-2/3</sup>.

Одновременные измерения параметров турбулентности по дифференциальной методике и по одноканальной схеме показали хорошее совпадение результатов. Измерения проводились при различных условиях атмосферной турбулентности в различное время суток. На рис. 2 приведен фрагмент данных, полученных 16 октября 1997 г.

Наблюдаемое превышение значений  $C_n^2$ , измеренных по дифференциальной методике, можно объяснить тем, что коэффициенты взаимной корреляции, полученные из измерений смещений ЭЦТ изображений, отличаются от значений, рассчитанных по формуле  $b_{\alpha_1 \alpha_2} = 0,618 (d/D)^{-1/3}$ , следующей из выражения (11), что связано, вероятно, с особенностями трассы распространения излучения – наличием близко расположенных зданий.

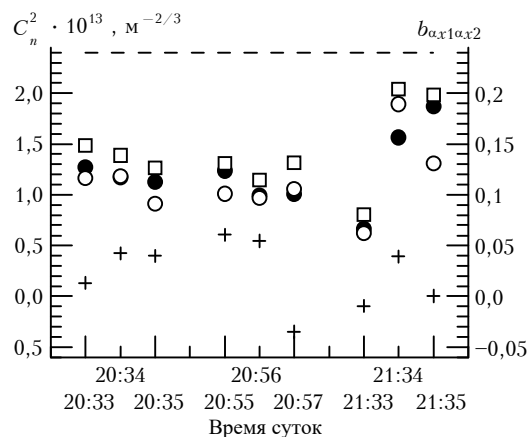


Рис. 2. Сравнение измеренных значений  $C_n^2$  по одноканальной схеме и по дифференциальной методике: □ – измерения по дифференциальной схеме; ●, ○ – одновременные измерения I и II измерителями; + – значения коэффициентов взаимной корреляции сигналов с I и II измерителя угловых смещений изображения (пунктирной линией показано расчетное значение). Длина реализации 40 с. Разнос субапертур по оси X равен 68 мм

Относительная ошибка измерений  $C_n^2$  определяется в основном систематической ошибкой и составляет 55% при измерении по дифференциальной методике и 35% – по одноканальной схеме.

Проведено испытание дифференциального измерителя на помехоустойчивость в условиях значительных вибраций оснований передатчика и приемника. Световой пучок на входе в турбулентную атмосферу отклонялся управляемым зеркалом 3, на которое подавался переменный сигнал. Помехоустойчивость дифференциального измерителя оценивалась по степени подавления колебаний управляемого зеркала в спектре разностного сигнала. Сравнивались спектры сигналов с дифференциального измерителя и с измерителя смещений ЭЦТ изображения от одной субапертуры (одноканальная схема измерений).

На рис. 3 приведены энергетические спектры сигналов в окрестности частоты колебаний управляемого зеркала (амплитуда угловых смещений источника равна 3 угл. с). Для сравнения спектров одновременно набирались реализации по трем каналам: сигналы с выходов измерителей смещений изображения от каждой из апертур и разностный сигнал. Объем вводимых данных по каждому из каналов составляет  $2^{14}$  значений, частота дискретизации – 390 Гц. Расстояние между центрами субапертур – 90 мм.

Степень подавления, определяемая как относительное уменьшение спектральной составляющей на частоте колебаний зеркала в сравниваемых спектрах, для приведенного случая равна 0,9948.

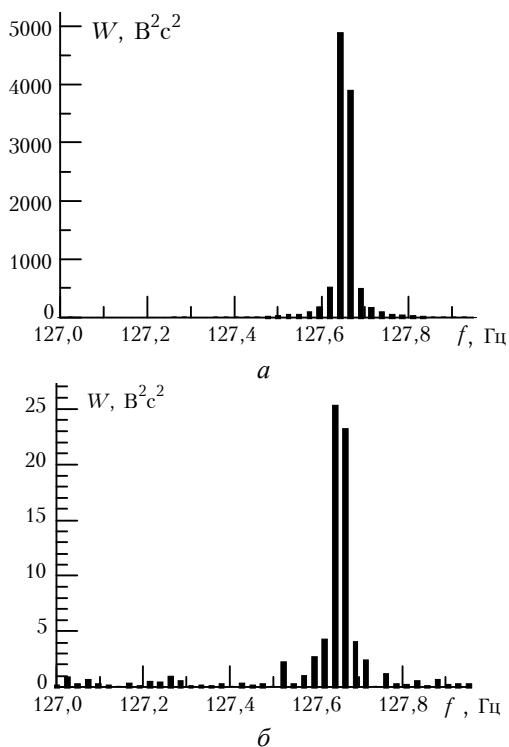


Рис. 3. Энергетические спектры сигналов вблизи частоты колебаний управляемого зеркала: а – с одноканального измерителя дрожания изображения; б – с выхода дифференциального измерителя

Для иллюстрации преимущества метода дифференциальных измерений в условиях, когда происходят относительные смещения источника и приемника, в

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
3 августа 1998 г.

*L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, L.N. Lavrinova, V.P. Lukin. Differential Optical Monitor of Atmospheric Turbulence Parameters.*

A differential optical monitor is described which allows a decrease of a contribution of the radiation source and receiver relative shifts into the error of the turbulence parameters determination. The method for determination of the structural constant of the refractive index and Frid radius is based on recording of the image random jittering caused by atmospheric turbulence.

A degree of the source angular shifts in the difference signal spectrum relative to the same component in the spectrum of the signal from single-channel meter output is estimated.

The magnitudes of  $C_n^2$  are measured at angular shifts of the source within frequency range from 0 to 130 Hz using both the single-channel and differential methods. It is shown that a contribution of such shifts into the  $C_n^2$  differential error decreases approximately by a factor of 50 at the source angular oscillations amplitude of 3".

таблице приведены значения структурной постоянной показателя преломления, полученные из одновременных измерений дрожания изображения по одной координате и измерений разности смещений изображений в направлении разноса входных апертур.

Из таблицы следует, что в условиях эксперимента (амплитуда угловых смещений равна 3 угл. с) вклад относительных смещений источника и приемника в погрешность определения  $C_n^2$  уменьшается приблизительно в 50 раз при дифференциальной методике измерений.

Частота колебаний зеркала, Гц	$C_n^2, \text{м}^{-2/3}$ , из измерений $\sigma_{\alpha_x}^2$	$C_n^2, \text{м}^{-2/3}$ , из измерений $\sigma_l^2$
130	$6,88 \cdot 10^{-13}$	$1,45 \cdot 10^{-13}$
30	$6,30 \cdot 10^{-13}$	$1,14 \cdot 10^{-13}$
10	$6,18 \cdot 10^{-13}$	$1,05 \cdot 10^{-13}$
1,5	$6,88 \cdot 10^{-13}$	$1,20 \cdot 10^{-13}$
Неподвижный источник	$1,06 \cdot 10^{-13}$	$1,16 \cdot 10^{-13}$

Испытания показали хорошую устойчивость метода дифференциальных измерений к относительным смещениям источника и приемника.

**Заключение**

Разработанный дифференциальный измеритель параметров турбулентности может быть использован в качестве мобильного средства для определения параметров турбулентности на атмосферных трассах, для оперативной оценки вклада оптического состояния атмосферы в погрешность измерения различных оптических систем, работающих в турбулентной атмосфере.

1. Гурвич А.С., Миронов В.Л. // Распространение оптических волн в неоднородных средах. Томск, 1976. С. 5–37.
2. Sarazin M. and Roddier F. // Astron. and Astrophys. 1990. № 227. Р. 294–300.
3. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Потанин С.Ф. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 6. С. 621–627.
4. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Лавринова Л.Н., Федоров В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 11. С. 1535–1538.
5. Чен Бен-Нам. Флуктуации оптических изображений источников света и лоцируемых объектов в турбулентной атмосфере: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО АН СССР, 1986.
6. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.