

УДК 535 2

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА НА ОСИ И В ЦЕНТРЕ ТЯЖЕСТИ СФОКУСИРОВАННОГО СВЕТОВОГО ПУЧКА

Э. И. Гельфер, В. Б. Кравцов, С. Е. Финкельштейн

Описана методика измерения интенсивности сфокусированного светового пучка в точках, координаты которых определены относительно центра тяжести пучка, а также средней интенсивности в подвижной и неподвижной системах отсчета. Приведены результаты измерений и сравнение их с теоретическими значениями

В ряде работ проводились исследования распределения интенсивности в фокальной плоскости сфокусированного светового пучка, прошедшего через турбулентную атмосферу. Измерялись поперечный размер сфокусированного пучка [1, 2], выбросы интенсивности в фокальной плоскости [3, 4], флуктуации интенсивности в фокусе пучка [5, 6], смещение центра тяжести случайного распределения интенсивности в сечении пучка [7].

В настоящей статье описывается методика и приводятся результаты измерения интенсивности на оси фокусирующей системы и в центре тяжести пучка, а также профилей средней интенсивности в подвижной (связанной с центром тяжести пучка) и неподвижной системах координат.

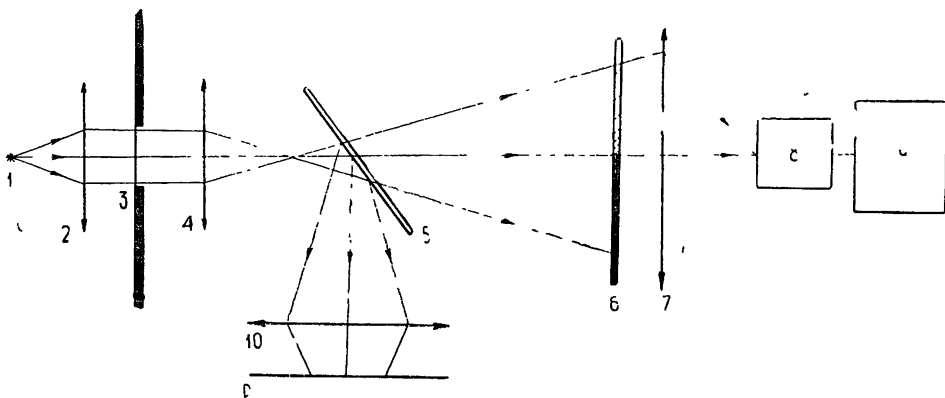


Рис. 1. Схема установки для измерения центра тяжести и распределения интенсивности света в сечении пучка:

1—источник света, 2, 7—конденсоры, 3—пленка, 4, 10—объектив, 5—полупрозрачное зеркало, 6—маска, 8—ФЭУ, 9—осциллограф.

В некоторых прикладных задачах, когда размеры приемника излучения сравнимы с сечением пучка, принятый сигнал определяется, очевидно, характеристиками распределения интенсивности в подвижной системе отсчета. При измерении распределения интенсивности в точках, координаты которых определены относительно центра тяжести пучка, исключается влияние блужданий пучка. Флуктуации интенсивности

в центре тяжести пучка меньше, а средняя интенсивность выше, чем на оси системы.

Сфокусированный световой пучок, прошедший путь L в приземном слое атмосферы, фиксировался на киноплёнку. Схемы фотографирования пучка на разных дистанциях описаны в [3, 4]. Контактным перепечатыванием первичной плёнки получали позитивные изображения пучка, причем режим перепечатывания с помощью сенситограммы плёнки подбирался так, чтобы прозрачность вторичных отпечатков τ была пропорциональна интенсивности в пучке J . Позитивные изображения пучка исследовались на установке для измерения центра тяжести двумерных структур переменной прозрачности, предложенной в [7]. Включение в установку ряда дополнительных элементов позволяет измерить на ней характеристики распределения интенсивности в системе отсчета с началом координат в центре тяжести пучка (см. рис. 1). Полупрозрачное зеркало 5 и объектив 10 создают в плоскости P , сопряженной плёнке, изображение пучка. Освещенность в плоскости P фиксируется на плёнку или измеряется ФЭУ.

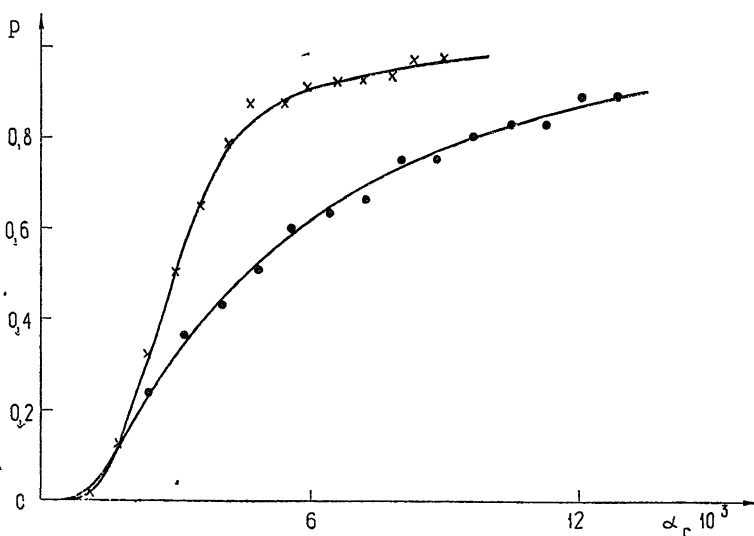


Рис. 2. Интегральная функция распределения вероятностей интенсивностей в центре тяжести фокального сечения пучка.

$$\alpha_c = J_c / I_0;$$

××× — $L = 650$ м; $C_n = 1,5 \cdot 10^{-7}$ с.м^{-1/3}; $\mu = 284$;
 ●●● — $L = 1750$ м; $C_n = 0,15 \cdot 10^{-7}$ с.м^{-1/3}; $\mu = 147$.

Описанная установка позволяет по виду наблюдаемого на экране переменного сигнала совмещать центр тяжести переменной прозрачности кадра киноплёнки 3 (центр тяжести интенсивности в сечении пучка) с осью вращения маски. Координаты центра тяжести кадра (x_c, y_c) фиксируются. Таким образом последовательно измеряются координаты центров тяжести n изображений сечения пучка, снятых в течение 1—2 минут при неизменных условиях на трассе. Получающиеся в плоскости P картины распределения освещенности при этом смещаются так, что центры тяжести всех изображений пучка в плоскости P лежат в одной точке. По освещенности в этой точке с учетом характеристической кривой плёнки можно найти интенсивность в центре тяжести сечения пучка J_c . Освещенность измерялась ФЭУ с маленькой диафрагмой, диаметр которой меньше радиуса корреляции интенсивности в пучке.

Производились также измерения интенсивности на оси фокусирующей системы $J(0)$. Для этого с осью вращения маски совмещали точку на пленке с координатами $x_0 = \langle x_c \rangle$, $y_0 = \langle y_c \rangle$, где усреднение проводится по n кадрам серии снимков, и держатель пленки не смещали при смене кадров. Так как флуктуации направления пучка распределены симметрично относительно оси фокусирующей системы, то при больших n точку с координатами $(\langle x_c \rangle, \langle y_c \rangle)$ можно считать достаточно близко совпадающей с фокусом пучка. Стандарт отклонения ее от оси системы, равный [8]

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{\sqrt{n}} = \frac{0,874}{\sqrt{n}} C_n \frac{\Delta^{3/2}}{a^{1/6}},$$

где σ_c — среднеквадратичное значение смещения центра тяжести, C_n — структурный коэффициент показателя преломления, a — апертура фокусирующей системы, должен быть меньше радиуса корреляции интенсивности в сечении пучка $\rho \approx \sqrt{\lambda L}$, что легко выполняется при реальных значениях параметров.

Результаты измерений приведены в табл. 1. Значения интенсивности в центре тяжести и на оси усреднены по n (порядка 70—80) кадрам серии и нормированы на максимум интенсивности идеальной дифракционной картины I_0 . Они приведены в зависимости от структурной функции фазы сходящейся волны на апертуре фокусирующей системы, равной

$$\mu = 1,1 C_n^2 k^2 L (2a)^{5/3}.$$

Для сравнения в таблице приведены теоретические значения, рассчитанные по формулам Кона [8].

Таблица 1

μ	$10^3 \frac{\langle J(0) \rangle}{I_0}$		$10^3 \frac{\langle J_c \rangle}{I_0}$		$10^3 \sqrt{d}$	m_{J_c}
	эксп.	теорет.	эксп.	теорет.		
147	6,4	6,3	6,1	10,2	0,5	0,7
284	3,2	2,8	4,1	4,4	0,2	0,5
362	2,0	2,1	3,0	3,2	—	0,7
386	2,4	2,0	2,6	3,0	0,2	0,9
392	1,9	2,0	2,1	2,9	0,2	0,8
425	4,0	1,8	5,1	2,7	—	1,1

Расхождение экспериментальных результатов и теории можно объяснить ошибками эксперимента и отклонением среднего арифметического значения, рассчитанного по n измерениям, от математического ожидания величины. Наибольшую ошибку вносит неточность в определении C_n по данным метеорологических наблюдений, которая может достигать 30—40%. Разброс среднего арифметического характеризуется дисперсией

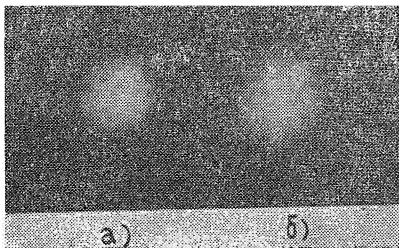


Рис. 3. Изображение средней интенсивности пучка в подвижной (а) и неподвижной (б) системах отсчета.
 $L=180$ м; $C_n = 1,1 \cdot 10^{-7}$ см $^{-1/3}$ (М 1:1).

$$d = \frac{1}{n(n-1)} \sum_1^n \left(\frac{J_c}{I_0} - \frac{\langle J_c \rangle}{I_0} \right)^2$$

(см. табл. 1). В табл. 1 приведены также значения m_{J_c} — глубины модуляции интенсивности в центре тяжести пучка

$$m_{J_c} = \frac{\sigma_{J_c}}{\langle J_c \rangle}$$

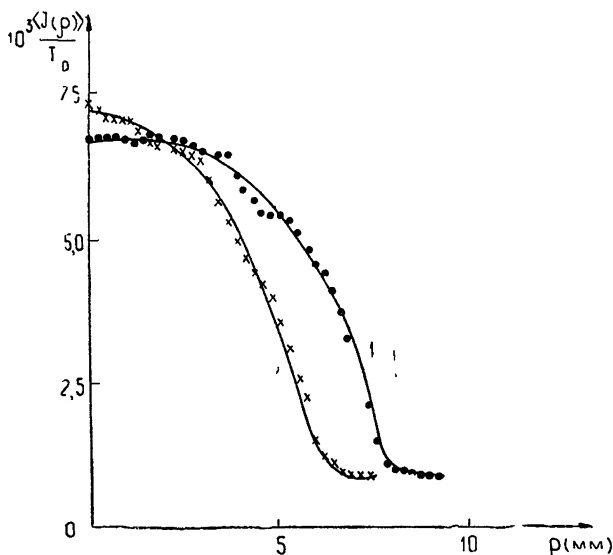


Рис. 4. Профили средней интенсивности в подвижной (2) и неподвижной (1) системах координат.
 ρ — расстояние от оси фокусирующей системы (1) или от центра тяжести пучка (2);

$$L = 180 \text{ м}; C_n = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1/3}.$$

В ходе эксперимента условия на трассе были таковы ($\mu > 100$), что в сфокусированном пучке имели место сильные флуктуации интенсивности, поэтому значения глубины модуляции лежат в области насыщения кривой $m_{J_c}(\mu)$ [6].

По измеренным значениям интенсивности в центре тяжести пучка построены также интегральные кривые распределения вероятностей (рис. 2). Подобным образом может быть измерена интенсивность в любой точке пучка, координаты которой определены относительно центра тяжести пучка.

Фотографируя изображения 50 кадров* пленки 3 в плоскости P с совмещением центров тяжести и без него, найдем среднюю интенсивность пучка в подвижной (рис. 3 а) и неподвижной (рис. 3 б) системах отсчета. На рис. 4 приведена зависимость интенсивности в пучке от расстояния от оси (1) и от центра тяжести (2), полученная фотометрированием рис. 3 и пересчетом данных с использованием характеристической кривой пленки.

* Число кадров выбрано, исходя из фотографической ширины пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Виск, Appl. Opt., 6, № Т-4, 703 (1967).
- 2 В Я. Съедин, С. С Хмелевцов, Н. Ф. Небольсин, Изв высш уч. зав. — Радиофизика, 13, № 1, 44 (1970).
- 3 Э И. Гельфер, Е И. Филатова, А. М. Черемухин, Изв высш уч. зав — Радиофизика, 13, № 2, 271 (1970).
4. Э. И. Гельфер, А. С. Гурвич, А. М. Черемухин, Изв. высш. уч. зав — Радиофизика, 14, № 8, 1208 (1971).
- 5 С. С Хмелевцов, Р. Ш Цвык, Изв. высш уч. зав. — Радиофизика, 13, № 1, 146 (1970).
6. М. Е Грачева, А. С. Гурвич, М. А. Каллистратова, И. А. Старобинец, Радиотехника и электроника, 15, № 6, 1290 (1970).
- 7 Э. И. Гельфер, Н. И. Муравьев, С. Е. Финкельштейн, А. М. Черемухин, Изв. высш уч. зав — Радиофизика, 14, № 12, 1838 (1971)
8. А. И. Кон, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 13, № 1, 61 (1970).

Горьковский государственный университет

Поступила в редакцию
8 октября 1971 г.

MEASUREMENTS OF LIGHT INTENSITY ON THE AXIS AND IN
THE GRAVITY CENTER OF A FOCUSED LIGHT BEAM

E. I. Gel'fer, V. B. Krawtsov, S. E. Finkel'shtein

The procedure is described of measuring the focused light beam intensity at the points the coordinates of which are determined with respect to the beam gravity center, as well as the mean intensity in the accompanying and rest frames of reference. The results of the measurements are presented and their comparison with theoretical values is made.
