

ют профили  $N_0(z)$ , полученные практически одновременно при различных  $f_2$  и  $P_1G_1$  (рис. 1)

В заключение отметим основные достоинства модифицированного метода КМ.

1) Метод применим для исследования  $N_0(z)$  при  $z \sim 80-100$  км, где не применим обычный метод КМ, а также для исследования  $N_0(z)$  при  $z \sim 60-80$  км

2) Метод позволяет экспериментально контролировать роль самовоздействия греющего импульса. Поскольку  $f_1 \sim f_2$ , то множитель самовоздействия  $P(\tau_1) \approx 1 - M_a(0)$ . В наших экспериментах  $M_a(0) \approx 5-7\%$ .

3) Метод обладает удовлетворительным высотным разрешением, хотя эффект по своей природе интегральный.

Основной недостаток метода следующий.

Теория метода предполагает, что среда в течение измерения не изменяется. Реально же параметры ионосферы флуктуируют случайным образом с некоторым характерным временем. Поэтому значения коэффициентов КМ, полученные для различных задержек  $\tau$ , могут слабо коррелировать между собой. Получение профилей  $N_0$  в этом случае невозможно.

Выражаю глубокую благодарность И. С. Шлюгеру за организацию эксперимента, О. Н. Бортниковой и М. А. Сысолятиной за помощь в вычислениях.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Fejer J A — J. Atm. Terr. Phys., 1955, 7, p 322.
- 2 Landmark R, Lied F.— J. Atm. Terr. Phys., 1961, 23, p 92.
- 3 Гуревич А. В., Шлюгер И. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 9, с 1237
- 4 Данилов А. Д. Популярная аэрономия. — Л.: Гидрометеониздат, 1978
- 5 Кротова З. Н., Рыжов В. А., Шлюгер И. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 11, с. 1658
- 6 Иванов В. А., Комраков Г. П., Кротова З. Н., Рыжов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 11, с. 1653

Харьковский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
25 июля 1983 г.

УДК 621 371.621 378

## ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ПРИ ОТРАЖЕНИИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

*В. В. Бороноев, В. Д. Дашиниаев,  
Г. И. Занданова, В. Н. Поплаухин, Э. А. Трубочеев*

В связи с использованием лазеров для целей локации представляет интерес исследование флуктуаций интенсивности отраженного в турбулентной среде оптического пучка. Основные работы по исследованию дисперсии флуктуаций интенсивности лазерных пучков на локационных трассах в турбулентной атмосфере были рассмотрены и систематизированы в работах [1, 2]

Однако исследований дисперсии флуктуаций интенсивности сфокусированного лазерного пучка при отражении в турбулентной атмосфере до настоящего времени не проводилось. Все опубликованные работы касаются распространения сфокусированного пучка только на прямых трассах. Например, для дисперсии и пространственной корреляционной функции в случае сфокусированного пучка [3] были получены результаты, близкие к наблюдающимся в эксперименте [4]. В работах [5, 6] была рассчитана дисперсия флуктуаций интенсивности для коллимированного и сфокусированного пучков при последовательном переходе от области слабых флуктуаций к области фокуса и далее к режиму насыщения дисперсии.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям относительной дисперсии флуктуаций интенсивности в отраженном сфокусированном лазерном пучке в зависимости от дифракционного параметра передатчика  $\Omega_i = ka_i^2/x$ , типа отражателя и интенсивности турбулентности на трассе, характеризуемой структурной функцией флуктуаций фазы  $D_s(2a_i, 2x) = 2,84 \beta_0^2 \Omega_i^{5/6}$ . Здесь  $\beta_0^2 = 1,23 C_n^2 k^{7,6} x^{11/6}$ ,  $k$  — волновое число,  $C_n^2$  — структурная характеристика показателя преломления воздуха,  $x$  — длина трассы,  $a_i$  — эффективный радиус излучающей апертуры. Измерения

проводились на однородной горизонтальной трассе протяженностью 300 м синхронно с измерениями структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2$  оптическим методом [4]. Луч лазера проходил в среднем на высоте 1 м от поверхности земли. В качестве источника излучения использовался He-Ne-лазер ЛГ-38 ( $\lambda=0,63$  мкм), работавший в одномодовом режиме. Лазерное излучение фокусировалось в плоскости отражателя с помощью телескопической системы ОСК-2 с выходным диаметром объектива 150 мм. При этом получали сфокусированные пучки с числами Френеля  $\Omega_i$ , равными 30 и 90. Радиусы пучков  $a_i$  определялись на уровне  $e^{-1}$  от максимального значения кривой распределения средней интенсивности на выходе телескопической системы. Фокусировка пучка производилась в вечернее время при минимальной интенсивности турбулентности на трассе. В качестве отражателей использовались плоское оптическое зеркало размером  $400 \times 400$  мм<sup>2</sup> и трехгранный уголкового отражатель с размером ребра 61 мм и углом расходимости 3'. Во время измерений производилась смена отражателей, т. е. дисперсия отраженного сфокусированного лазерного пучка записывалась попеременно от плоского зеркала или уголкового отражателя. Во время измерений уголкового отражателя оставался полностью открытым. Приходящий с трассы отраженный сигнал попадал на маленькое зеркало размером  $2 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Таким образом, максимальная затененная часть поперечного сечения пучка на выходе телескопической системы составляла менее 1%. Приемником сигнала служил фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79 с входной диафрагмой диаметром 0,3 мм. Для уменьшения фоновой засветки перед ФЭУ устанавливался интерференционный светофильтр на длину волны  $\lambda=0,63$  мкм с полосой пропускания  $\Delta\lambda = 10\text{Å}$ . С помощью интеграторов определялось среднее значение интенсивности светового потока  $\bar{I}$ , а тепловой квадрат использовался для определения среднеквадратичного значения интенсивности светового потока  $\bar{I}^2$ .

Величина относительной дисперсии флуктуаций интенсивности вычислялась по формуле [4]

$$\beta^2 = (\bar{I}^2 - (\bar{I})^2) / (\bar{I})^2,$$

где  $\bar{I}$  и  $\bar{I}^2$  — соответственно средние и среднеквадратичные значения сигнала, усредненные за 5 минут.

Динамический диапазон квадратора по напряжению ограничен из-за применения согласующего усилителя и составлял 50 дБ. Полоса пропускания  $\Delta F$  — от нуля до 10 кГц. Относительная погрешность измерений относительной дисперсии флуктуаций интенсивности за счет ограниченного динамического диапазона в предположении логарифмически нормального закона распределения вероятностей флуктуаций не превышала 25% [4]. Более подробно аппарата и методика измерений относительной дисперсии описаны в [7].

Измерения относительной дисперсии флуктуаций интенсивности в отраженном сфокусированном лазерном пучке проводились в августе — сентябре 1981 г в основном в дневное и вечернее время суток. Во время эксперимента преобладала ясная безоблачная погода. Скорость ветра изменялась в пределах 0—5 м/с.

Результаты измерений среднеквадратичных отклонений флуктуаций интенсивности отраженного сфокусированного лазерного пучка в зависимости от дифракционного параметра передатчика типа отражателя и турбулентных условий распространения  $D_s(2a_i, 2x)$  представлены на рис. 1. Вертикальными линиями обозначены 95-процентные доверительные интервалы. Из рисунка видно, что в отраженном сфокусированном лазерном пучке (кривые 1, 2), как и в случае прямого распространения [4], насыщение флуктуаций интенсивности  $\beta$  наблюдается при значении параметра  $D_s^{1/2}(2a_i, 2x) \approx 10$ . Кривые 1 и 2 соответствуют сфокусированному лазерному пучку с  $\Omega_i$ , равным 30 и 90 соответственно, отраженному от плоского оптического зеркала. Из приведенных на рисунке кривых видно, что дисперсия флуктуаций интенсивности в более узком ( $\Omega_i=30$ , кривая 1) пучке превышает соответствующую величину в более широком ( $\Omega_i=90$ , кривая 2) лазерном пучке, как и в случае коллимированного пучка [1]. Отметим, что уровень насыщения ( $\beta = 1,5 - 1,6$ ) относительной дисперсии флуктуаций интенсивности отраженного сфокусированного пучка близок к уровню насыщения относительной дисперсии в сферической волне [4,6]. Этот факт можно объяснить, по-видимому, тем, что после отражения сфокусированного пучка от зеркала на приемник приходит сферическая волна. При этом прямой и отраженный лучи проходят все расстояние от передатчика до приемника не по коррелированным неоднородностям атмосферы.

На этом же рисунке для сравнения приведена теоретическая кривая (кривая 5) для сфокусированного пучка с параметрами  $\Omega = 25$ ,  $x/F = 1$  на трассе без отражения [4]. Как видно, уровень насыщения дисперсии в отраженных от зеркала сфокусированных пучках выше расчетного уровня насыщения дисперсии в прямых сфокусированных пучках (кривая 5), но ниже экспериментального уровня насыщения дисперсии этого же пучка (кривая 6) [4]. На этом же рисунке приведены кривые 3 и 4, соответствующие сфокусированным лазерным пучкам (с дифракционными параметрами  $\Omega_i=30$  и  $\Omega_i=90$  соответственно), отраженным от трехгранного уголкового отражате-

ля И здесь наблюдается превышение дисперсии флуктуаций интенсивности для более узкого пучка ( $\Omega_t=30$ ) над соответствующей величиной для более широкого пучка ( $\Omega_t=90$ ). Но в случае отражения от уголкового отражателя наблюдается более резкая зависимость  $\beta$  от дифракционного размера передатчика по сравнению с отражением от зеркала. Следует также отметить более низкий уровень насыщения дисперсии при отражении пучка от уголкового отражателя по сравнению с дисперсией флуктуаций интенсивности при отражении пучка от зеркала.

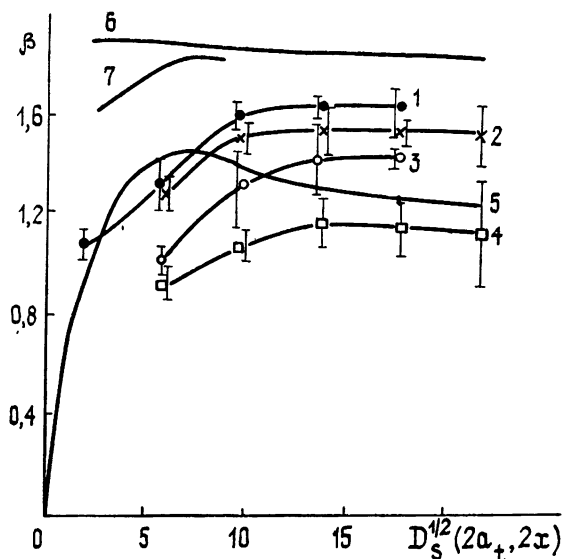


Рис. 1.

Здесь же для качественного сравнения приведена кривая зависимости дисперсии на оси коллимированного лазерного пучка с параметром  $\Omega_t=10$ , отраженным от уголкового отражателя с параметром  $\Omega_r=1$  [7] (кривая 7). Как видно из рисунка, уровень насыщения отраженного сфокусированного лазерного пучка ниже уровня насыщения коллимированного пучка с близкими дифракционными параметрами.

Из приведенных результатов измерений следует, что величина относительной дисперсии флуктуаций интенсивности отраженного сфокусированного лазерного пучка зависит как от дифракционного параметра излучающей апертуры, так и от типа отражателя, т. е. наблюдаются те же закономерности, что и для случая коллимированного пучка [4].

В заключение авторы выражают признательность В. А. Банаху и Ч. Ц. Цыдыпову за внимание и поддержку в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере — Новосибирск: Наука, 1981, 246 с.
2. Банах В. А., Миронов В. Л. — Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по атмосферной оптике. Ч. II. — Томск, 1980, с. 48.
3. Gochelashvily K. S.— *Optica Acta*, 1973, 20, № 3, p. 193
4. Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1976, 277 с.
5. Банах В. А., Креков Г. М., Миронов В. Л. — Изв. вузов — Радиофизика, 1974, 17, № 2, с. 252.
6. Banakh V. A., Krekov G. M., Mironov V. L. e. a.— *JOSA*, 1974, 64, № 4, p. 516.
7. Аксенов В. П., Гомбоев Н. Ц., Зубрицкий Э. В., Малыгина Г. Ф., Миронов В. Л., Трубочеев Э. А. В кн.: Распространение оптических волн в случайно-неоднородной атмосфере. — Новосибирск: Наука, 1979, с. 40.

Институт естественных наук  
Бурятского филиала СО АН СССР

Поступила в редакцию  
11 апреля 1983 г.,  
после доработки  
1 ноября 1983 г.