

УДК 535.317

ФЛУКТУАЦИИ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ, ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ЛОКАЦИИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Г. Я. Патрушев, О. А. Пельмский, А. И. Петров

Получены экспериментальные значения величины среднеквадратического смещения центра тяжести изображения в условиях мерцаний светового потока за счет конечных размеров приемника и отражателя. Показано, что величина смещений существенно зависит от типа искусственного отражателя (диск, уголок, решетка уголков) и не согласуется с расчетом, соответствующим условиям проведения эксперимента.

В оптических системах слежения и траекторных измерений, работающих в атмосфере, определенный вклад в погрешность оперативного измерения угловых координат объектов вносит ее турбулентность. Такие измерения проводятся, как правило, моноимпульсным методом [1, 2] или по положению мгновенного центра тяжести $R_{x,y}$ изображения лоцируемого объекта в плоскости анализа Σ приемного телескопа [3, 4]:

$$R_{x,y} = \frac{\iint_{\Sigma} \{x, y\} I(x, y) dx dy}{\iint_{\Sigma} I(x, y) dx dy} = \frac{P_{x,y}}{P}, \quad (1)$$

где $\{x, y\}$ — декартовы координаты, отсчитываемые от оптической оси системы, $I(x, y)$ — мгновенное распределение интенсивности, P — поток через апертуру, $P_{x,y}$ — момент изображения относительно осей x и y соответственно.

Флуктуации центра тяжести изображения источника света при распространении излучения в турбулентной атмосфере в условиях, когда флуктуациями потока P можно пренебречь, рассмотрены в основополагающей монографии [5]. При проведении соответствующих экспериментов, представленных в [5], использовалась аппаратура, в которой также исключалось влияние мерцаний потока [6]. Однако при локации искусственных объектов, размеры которых сравнимы с пространственным радиусом корреляции интенсивности падающей световой волны, при приеме оптического излучения на апертуры конечных диаметров, неизбежно возникают флуктуации светового потока, которые могут существенно влиять на точность определения угловых координат лоцируемого объекта. В работе [7] предпринята попытка учесть влияние мерцаний светового потока через апертуру на точность измерения угловых координат, но из-за выбранной модели флуктуаций интенсивности $I(x, y)$ результаты оказываются далекими от реальных [8]. Дисперсия случайных смещений центра тяжести изображения (1) при локации зеркального диска и уголкового отражателя в зависимости от размера приемной апертуры при наличии флуктуаций потока теоретически исследована в работах [9, 10]. Полученные в них зависимости величины дисперсии σ_R^2 смещения от диаметра приемной апертуры D существенно отличаются от случая, когда флуктуациями потока можно пренебречь [5]: $\sigma_R^2 \sim D^{-1/3}$ даже в условиях отражения от безграничного диска и уголкового отражателя. Экспериментальная проверка полученных в [9, 10] результатов не проводилась. Однако ее необходимость видна

из следующих соображений. Используемая в [9] модель отражателя с плавным (гауссовым) изменением коэффициента отражения от центра к его краю в ряде случаев дает результаты, существенно отличающиеся от экспериментальных данных, полученных на реальных отражателях с «резкими» краями [11]. Вычисления в [9, 10] проведены в весьма существенном предположении, что координаты центра тяжести R_x, y и поток P независимы (см. [4], с. 82). Имеющиеся измерения флуктуаций центра тяжести изображения углового отражателя для фраунгоферовой зоны дифракции [12] существенно превышают эту величину для прямого распространения, тогда как для френелевой зоны дифракции наблюдается обратная ситуация [13]. Представляющие значительный интерес исследования с набором матриц (матрицей) угловых отражателей, используемых на ИСЗ [14, 15], не проводились вообще.

В настоящей работе исследуются флуктуации центра тяжести изображения зеркального диска, углового отражателя, двумерной решетки отражателей (такие отражатели используются в различных системах [3, 14, 15]) в условиях сильных флуктуаций интенсивности. В измерениях реализовались случаи как слабых, так и сильных флуктуаций потока через приемную апертуру телескопа. Обнаружено существенное различие между экспериментальными данными и теоретическими расчетами [10], соответствующими оперативному алгоритму обработки сигналов (1). Полученные результаты дают оценку атмосферной составляющей погрешности измерения угловых координат оптическими следящими системами.

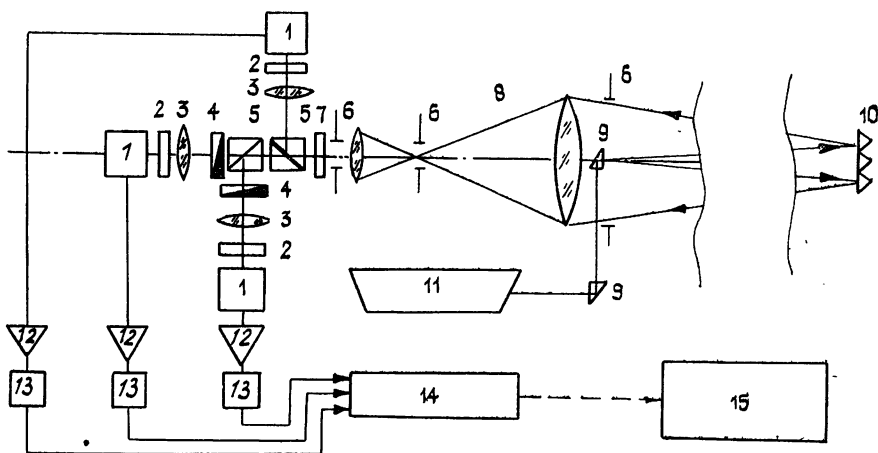


Рис. 1. Блок-схема установки по измерению флуктуаций центра тяжести изображения: 1 — фотоэлектронный умножитель; 2 — матовое стекло; 3 — собирающая линза; 4 — оптический анализатор изображения, 5 — светоделительный кубик; 6 — диафрагма, 7 — интерференционный светофильтр; 8 — приемный телескоп; 9 — диагональная призма; 10 — искусственный отражатель, 11 — оптический квантовый генератор; 12 — предварительный усилитель, 13 — фильтр нижних частот; 14 — система цифровой регистрации; 15 — ЭВМ.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для измерения величины случайных смещений центра тяжести изображения лоцируемого объекта в плоскости резкого изображения оптической системы приемного телескопа. Одномодовое излучение оптического квантового генератора ЛГ-38 мощностью ~ 55 МВт с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм, совмещенное с оптической осью приемного телескопа посредством диагональных призм, направлялось в атмосферу, где на расстоянии L был установлен отражатель, возвращающий излучение лазера на объектив приемного телескопа, где оно после интерференционного светофильтра на $\lambda = 0,63$ мкм с полосой пропускания (на уровне $0,5$) 20 \AA системой светоделительных кубиков разводилось на три фотоэлектронных умножителя ФЭУ-79, один из которых был предназначен для измерения полного потока P излучения, а два других при помощи

оптических анализаторов изображения давали сигналы, пропорциональные, соответственно, вертикальному R_y и горизонтальному R_x моменту изображения отражателя, построенного оптической системой телескопа. Фокусирующие линзы и матовые стекла предназначены для ослабления влияния зонной чувствительности фотокатодов ФЭУ, возникающей при перемещениях светового пучка по площади последних. Система диафрагм ограничивала фоновые засветки, уровень которых в эксперименте не превышал 1%. Усиленные предварительными усилителями электрические сигналы с ФЭУ через фильтры нижних частот направлялись в систему цифровой регистрации для записи на магнитную ленту. Записанная информация обрабатывалась на ЭВМ по программам, позволяющим получать статистические характеристики величин R_x , R_y , P , P_x , P_y .

Приемный телескоп представлял собой длиннофокусную оптическую систему с высококачественным объективом диаметром 500 мм и набором сменных окуляров с различными фокусными расстояниями. Наличие перед объективом телескопа диагональной призмы с линейными размерами 5×5 мм не вносит существенных искажений в структуру исследуемого светового поля в плоскости резкого изображения отражателя, и приемная апертура работает как круговая до тех пор, пока между диаметром «тени» d_1 и наружным диаметром рабочей поверхности d сохраняется соотношение $(d_1/d) \leq 0,5$. Теоретически этот вопрос был рассмотрен в работе [16]. Оптический анализатор устанавливался в плоскости резкого изображения отражателя, построенного приемным телескопом, и представлял собой нейтральный оптический фильтр с линейным (с точностью $(1-2)\%$) распределением коэффициента пропускания τ по соответствующей (x -й) координате, например, $\tau(x, y) = cx$, где c — коэффициент, характеризующий угол наклона распределения τ . При размерах анализатора 18×18 мм коэффициент пропускания τ изменялся от 0,05 до 0,8. Использование такого фильтра, установленного перед фотоприемником и изменяющего величину светового потока в каждый момент времени в зависимости от пространственного положения светового пятна в плоскости анализатора изображения, позволяет экспериментально определять координаты центра тяжести изображения по формуле (1). Действительно, если в плоскости анализатора имеем мгновенное распределение интенсивности $I(x, y, t)$ то после анализатора на фотокатод ФЭУ распределение принимает вид $cxI(x, y, t)$. Переменная составляющая электрического сигнала с ФЭУ будет пропорциональна распределению интенсивности в каждый момент времени t :

$$U_x(t) \sim k_x \iint_{\Sigma} xI(x, y, t) dx dy = k_x P_x(t), \quad (2)$$

где k_x — коэффициент пропорциональности, учитывающий усиление электронного тракта и крутизну характеристики анализатора изображения. Величина сигнала с ФЭУ $U(t)$ канала измерения полного потока определяется коэффициентом k_1 :

$$U(t) \sim k_1 \iint_{\Sigma} I(x, y, t) dx dy = k_1 P(t). \quad (3)$$

Координата центра тяжести мгновенного распределения интенсивности получается делением величин сигналов из соответствующих измерительных каналов:

$$R_x(t) = \frac{k_x P_x(t)}{k_1 P(t)} = K_x \frac{P_x(t)}{P(t)}, \quad (4)$$

где K_x определяется при калибровке. Определение чувствительности установки к изменению угла наклона нормали фазового фронта оптической волны на входной апертуре проводилось имитатором угловых

смещений, представляющим собой зеркало, приклеенное на пьезокерамику, с известной зависимостью угла поворота от амплитуды прикладываемого к пьезокерамике напряжения. Максимальная чувствительность установки при эффективном фокусном расстоянии F_t приемного телескопа 136 м была не хуже $2 \cdot 10^{-7}$ рад (0,04 угл. с).

Эксперимент проводился в атмосфере на горизонтальном участке местности с относительно ровной подстилающей поверхностью, для случая распространения квазисферической световой волны в условиях сильных флуктуаций интенсивности. Оптическая трасса с отражением общей длиной $2L = 2,5$ км проходила на высоте не менее 1,2 м над подстилающей поверхностью. В качестве отражателя (позиция 10, рис. 1) использовались зеркальный диск диаметром 500 мм с набором съемных диафрагм, уголкового отражателя со световым диаметром 2,6 см и погрешностью изготовления двугранного угла при вершине 0,5", двумерная решетка уголкового отражателей (погрешность изготовления — (1—5)") с гексагональным расположением элементов.

В эксперименте одновременно с исследованием смещений центра тяжести изображения измерялись следующие величины: структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , характеризующая уровень турбулентности, — оптическим способом [17] из флуктуаций интенсивности сферической волны на вспомогательной (200 м) V-образной трассе с отражением от плоского зеркала и приемом на апертуру диаметром 0,75 мм; средняя V_{\perp} и флуктуационная σ_{\perp}

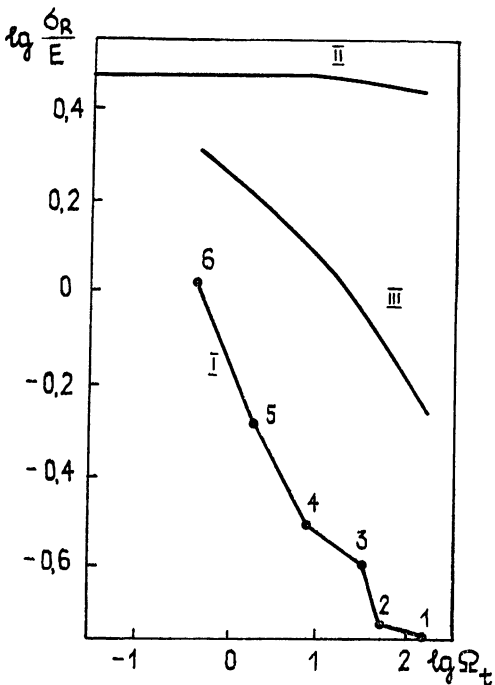


Рис. 2. Зависимость нормированной на E величины среднеквадратических смещений σ_R центра тяжести изображения бесконечного плоского зеркала от диаметра приемной апертуры.

I — аппроксимация экспериментальных данных; II — расчет для условий эксперимента [10]; III — расчет по формуле (2) при постоянном световом потоке для внешнего масштаба $L_0 = 0,5$ м и величин C_n^2 , L , соответствующих условиям эксперимента.

флуктуаций фазы [18] и пространственный спектр флуктуаций показателя преломления $\Phi_n(x)$, учитывающий внешний масштаб турбулентности L_0 , $\Phi_n(x) = 0,033 C_n^2 x^{-11/3} [1 - \exp(-x^2/x_0^2)]$, где $x_0 = 2\pi/L_0$.

Расчетное соотношение получено Афанасьевым А. Л. и имеет вид

$$\sigma_R^2 = \frac{3}{8} \cdot 0,132\pi^2 \Gamma\left(\frac{1}{6}\right) 2^{-4/3} C_n^2 2L (2R)^{-1/3} \left\{ 1 - \frac{8}{9} \left(\frac{R^2 x_0^2}{R^2 x_0^2 + 4} \right)^{1/6} \times \right. \\ \left. \times {}_2F_1\left(\frac{1}{6}, 1; \frac{5}{2}; \frac{R^2 x_0^2}{R^2 x_0^2 + 4}\right) + \frac{27,6}{72} {}_2F_1\left(\frac{1}{6}, 2; \frac{5}{2}; \frac{1}{2}\right) \left[1 - \left(1 + \frac{16}{R^2 x_0^2} \right)^{-1/6} \right] \right\}, \quad (5)$$

где ${}_2F_1(a, b; c; z)$, $\Gamma(z)$ — гипергеометрическая и гамма-функция соответственно [19], K — радиус приемной апертуры. Точки на кривой I соответствуют среднеквадратическим флуктуациям потока P и диаметрам входной апертуры: 1— $\sigma_P = 0,16$, $D = 500$ мм; 2— $\sigma_P = 0,28$, $D = 320$ мм; 3— $\sigma_P = 0,52$, $D = 250$ мм; 4— $\sigma_P = 0,73$, $D = 125$ мм; 5— $\sigma_P = 0,91$, $D = 62$ мм; 6— $\sigma_P = 1,13$, $D = 31$ мм.

Из сравнения экспериментальных данных I и результатов расчета III видно определенное качественное сходство в поведении исследуемой зависимости σ_R . И в то же время экспериментальные результаты в значительной степени качественно не согласуются с теоретическим расчетом II [10]. Одной из причин, несомненно, является учет в [10] конечности внешнего масштаба турбулентности L_0 [7], который для условий эксперимента сравним в случае точек 1, 2 с диаметром приемной апертуры. Введение конечного L_0 в расчет [10] должно изменить наклон зависимости II только при больших значениях Ωt , в то время как при малых апертурах (точки 5, 6) его влияние, по-видимому, будет несущественно.

Представляется, что одной из возможных причин расхождения данных эксперимента и [10] является следующий факт. Как показала специальная обработка сигналов, имеется корреляция между флуктуациями горизонтальной компоненты центра тяжести R_x и потоком P . Величина коэффициента корреляции k_i зависит от диаметра апертуры D и для точек 1—6 она равна соответственно: $K_1 = -0,31$; $K_2 = -0,18$; $K_3 = -0,2$; $K_4 = 0$; $K_5 = 0,4$; $K_6 = 0,5$. В то же время весь расчет [10] построен на предположении независимости величин $R_{x,y}$ и P [4], т. е. главная предпосылка, на которой он основан, не выполняется. Функциональная связь величин $R_{x,y}$ и P из формулы (1) очевидна, и, следовательно, в общем случае должна существовать их зависимость. Только в предельных случаях больших ($D \rightarrow \infty$), когда поток постоянен ($P = \text{const}$), или малых апертур ($D \rightarrow 0$) величина $R_{x,y}$ не зависит от флуктуаций потока.

Таблица 1

Тип отражателя	Среднеквадратическое смещение σ_R (угл. с)
Зеркальный диск А	1,03
Уголок	0,66
Уголок	0,66
Набор уголков	0,35
Зеркальный диск А	1,03
Зеркальный диск В	0,72
Набор уголков	0,35
Зеркальный диск В	0,72

Полученные в результате обработки экспериментальных данных значения среднеквадратических смещений изображения σ_R показали, что при одинаковых условиях распространения ($\beta_0 \approx 4,5$), приема на апертуру, диаметр которой много больше дифракционных размеров световых пучков и, следовательно, флуктуации потока возникают только на отражателе, величина σ_R зависит от типа и геометрических размеров используемого отражателя. Так, из приведенных в табл. 1 резуль-

татов сравнения σ_R для уголкового отражателя и зеркального диска A (геометрический размер диска соответствует размеру одного уголка) видно, что среднеквадратические смещения последнего в 1,6 раза больше. Этот результат объясняется тем, что уголок частично обращает фазовый фронт падающей на него световой волны, что, в конечном счете, и приводит к уменьшению среднеквадратических смещений его изображения в плоскости наблюдения приемного телескопа. Аналогичные сравнения величин изображений зеркального диска B и практически эквивалентной по площади гексагональной решетки из 12 уголков, диаметром 12,5 см, показали, что смещения диска в два раза больше. Среднеквадратические смещения изображения одного уголка превышают смещения изображения решетки из 12 уголков в 1,9 раза, а сравнение σ_R для зеркальных дисков A и B показало, что изображение меньшего по площади диска A смещается больше изображения диска B в 1,4 раза. Последний результат можно объяснить тем, что увеличение площади лоцируемого объекта приводит к уменьшению флуктуаций потока через площадку, соответствующую отражателю.

Авторы выражают признательность М. Л. Белову, Б. Н. Чену за дискуссии, которые способствовали появлению данной работы; А. П. Ростову, М. В. Анисимову, Ю. И. Безрукову — за участие в подготовке и проведении натурных измерений; Т. П. Родионовой, М. Г. Бондаренко, участвовавшим в обработке экспериментальных данных на ЭВМ; О. Н. Емалееву — за предоставленный имитатор угловых смещений, использованный для калибровки экспериментальной установки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Андреев Г. А., Магид Р. М. // Изв. вузов. Радиофизика 1972 Т. 15. № 1. С. 55.
2. Jonson R, Weiss P. F. // Appl. Opt. 1968. V. 7. № 6. P. 1095.
3. Webb W. E. Proc. 8th Annual IEEE Reg. III Conf. 1969, Huntsville Ala, 1969. — 285 p.
4. Сигналы и помехи в лазерной локации / Под ред Зуева В. Е. — М.: Радио и связь, 1985.
5. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере — М.: Наука, 1967.
6. Бовшеров В. М., Гурвич А. С., Каллистратов М. А. // Изв. вузов. Радиофизика 1961. Т. 4. № 5. С. 886
7. Белов М. Л., Орлов В. М. // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. № 4. С. 814.
8. Чен Б. Н. // Опт. и спектр. 1987 Т. 62 № 5. С. 1185.
9. Аксенов В. П., Банах В. А., Чен Б. Н. // Опт. и спектр. 1984. Т. 56. № 5. С. 864.
10. Аксенов В. П., Банах В. А., Чен Б. Н. // Опт. и спектр. 1984 Т. 57. № 4. С. 732
11. Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. № 3 С. 587.
12. Hansen J, Madhu S. // Appl. Opt. 1972. V 11. № 2. P. 233.
13. Лукин В. П., Сазанович В. М., Слободян С. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 6. С. 721
14. Применение уголковых отражателей при лазерной локации космических объектов / Под ред Ерпылаева Н. П. — М.: Астросовет АН СССР, 1973.
15. Buffton J, Iyer R., Taylor L // Appl. Opt. 1977. V. 16. № 9. P. 2408
16. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере.— Новосибирск Наука, 1981.
17. Вакуров Г. Ф., Жаркова Л. А., Исакова А. И. и др. Препринт Томского филиала СО АН СССР № 4. 1984.
18. Патрушев Г. Я. // Квантовая электроника 1978. Т. 5. № 11. С. 2342.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР

Поступила в редакцию
14 июля 1987 г.

THE IMAGE CENTER-OF-GRAVITY FLUCTUATIONS AT SOUNDING IN A TURBULENT ATMOSPHERE

G. Ya. Patrushev, O. A. Pelymskij, A. I. Petrov

The values of the rms displacement of image center of gravity under the conditions of light flow scintillations due to finite sizes of the receiver and reflector have been experimentally obtained. It was shown that the value of displacements strongly depends on the type of an artificial reflector (disk, corner array) and does not compare reasonably with the corresponding results experimentally calculated.