

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Б.В. Фортес

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБКОГО И СОСТАВНОГО ЗЕРКАЛ В ЗАДАЧЕ КОРРЕКЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Выполнен расчет функции рассеяния точки (ФРТ) наземного адаптивного телескопа для двух вариантов корректоров волнового фронта: гибкого зеркала и составного зеркала. Гибкое зеркало рассматривалось как тонкая пластина квадратной формы, закрепленная в центре и деформируемая системой поперечных сил в 20 точках. Составной корректор представлял собой набор квадратных элементов, управляемых по трем степеням свободы; число элементов варьировалось от 1 до 16. Искажения волнового фронта имели колмогоровский спектр и считались известными для каждой случайной реализации. Получено, что ФРТ при использовании 9-элементного составного корректора (27 степеней свободы) близка к ФРТ, полученной для гибкого зеркала с 20-ю степенями свободы.

1. Введение

Проблема компенсации атмосферных искажений волнового фронта (ВФ) исследуется достаточно давно. Первые работы по этой теме появились в середине 60-х годов [1]. Однако в то время техническая база не позволяла приступить к построению эффективных устройств для компенсации атмосферных искажений. В последние годы появилась реальная возможность создать измерители и корректоры искажений волнового фронта и оснастить ими оптические устройства, работающие в условиях атмосферных искажений [2–5]. В связи с этим вновь повысился интерес к теоретическим работам и увеличилось число публикаций, посвященных проблемам выбора оптимальной конструкции и конфигурации корректоров волнового фронта [6–9].

Существует два основных класса корректоров волнового фронта: гибкие и составные зеркала. Эффективность составного зеркала с гексагональной формой сегментов рассматривалась в [11], где было показано, что для достижения разрешения наземного телескопа, близкого к дифракционному пределу, достаточно иметь размер сегмента, равный трем радиусам Фрида r_0 [6]. В [10] рассматривался гибкий корректор с различными типами функций отклика и была получена формула для оценки дисперсии остаточных искажений ВФ, однако ФРТ системы не рассчитывалась, а функции отклика не были результатом расчета для реальной гибкой пластины. В [12] были рассчитаны функции отклика зеркала, деформируемого системой моментов, но не выполнен расчет остаточных искажений волнового фронта.

Таким образом, в известной литературе отсутствуют данные, позволяющие непосредственно сравнить эффективность использования гибкого и составного корректоров волнового фронта при компенсации турбулентных искажений изображения. Ранее подобное сравнение было проведено нами в задаче компенсации искажений, возникающих при тепловом расплывании мощного пучка на вертикальной трассе [11], где мы использовали модель составного зеркала с элементами гексагональной формы и сравнивали его эффективность с эффективностью коррекции аберраций низших порядков, т. е. аппроксимировали гибкое зеркало модальным корректором. В данной статье мы рассматриваем составной корректор с элементами квадратной формы и используем модель упругой квадратной пластины, деформируемой 20 сервоприводами, в качестве гибкого зеркала. Результирующая ФРТ двух систем сопоставлялась при варьировании числа элементов составного корректора.

2. Модель оптической системы

Мы рассматривали телескоп, имеющий квадратный входной зрачок с поперечным размером $D = 1$ м. Функция рассеяния точки рассчитывалась с помощью следующих методов. П е р в ы й м е т о д, традиционно используемый для расчета ФРТ, состоит в вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) двумерного массива комплексных чисел $U(l, m)$, $l, m = 1, \dots, N$ (N — размер массива), представляющих собой дискретизированное с пространственным шагом $\Delta x = \Delta y$ распределение комплексной амплитуды оптической волны $U(x, y)$ в плоскости апертуры телескопа. В т о р о й м е т о д, обычно используемый для расчета распространения параксиальных пучков, включает в себя: 1) вычисление ДПФ комплексной амплитуды поля, 2) умножение пространственного спектра поля на фильтрующую функцию, соответствующую распространению на расстояние f [13], 3) вычисление обратного ДПФ, в результате которого получается распределение комплексной амплитуды поля в плоскости $z = f$. Предварительно в плоскости $z = 0$ комплексная амплитуда $U(x, y)$ умножается на комплексный множитель

$$C(x, y) = \exp\left\{\frac{ik}{2f}(x^2 + y^2)\right\}, \quad (1)$$

соответствующий фокусировке поля в плоскость $z = f$. Здесь $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны излучения.

Первый метод использовался преимущественно при расчете ФРТ в отсутствие коррекции. Второй метод удобен тем, что он позволяет варьировать масштаб распределения интенсивности в фокальной плоскости, меняя фокусное расстояние f . При

$$f = f_1 = (\Delta x)^2 N/\lambda \quad (2)$$

распределение интенсивности $I(l, m)$ в фокальной плоскости вычисленное методом фильтрации пространственных частот (ФПЧ), практически идентично распределению интенсивности, вычисленному методом ДПФ. При фокусном расстоянии, равном $2f_1$, получается вдвое более широкое распределение интенсивности, при $f = f_1/2$ — вдвое более узкое и т.д. При этом меняется только линейный масштаб, а угловое распределение интенсивности остается постоянным. Метод ФПЧ удобно использовать при расчете скорректированной ФРТ, ширина которой приближается к дифракционному значению и появляется необходимость увеличить число точек расчетной сетки, попадающих в пределы эффективного размера фокального пятна.

Влияние турбулентных флуктуаций показателя преломления атмосферы учитывалось в приближении фазового экрана, расположенного в плоскости апертуры телескопа и искажающего только форму волнового фронта первоначально плоской волны. Спектральная плотность флуктуаций фазы задавалась в виде

$$F_s(\mathbf{x}) = 0,489r_0^{-5/3}(\mathbf{x}^2 + \mathbf{x}_0^2)^{-11/6}, \quad (3)$$

где

$$r_0 = (k^2 \int C_n^2(h) dh)^{-5/6} \quad (4)$$

— радиус когерентности Фрида; $\mathbf{x}_0 = 2\pi/L_0$, L_0 — внешний масштаб турбулентности. Существуют различные оценки значений внешнего масштаба турбулентности: от десятков и сотен метров до десятков километров. В наших расчетах использовалось значение $L_0 = 1000$ м.

Пространственные масштабы флуктуаций фазы, удовлетворяющие условию $2\pi/\mathbf{x} < N\Delta x = G$, N — размер расчетной сетки по осям X и Y , генерировались путем вычисления ДПФ от массива отсчетов случайных реализаций спектральной амплитуды $A_s(\mathbf{x}_{xl}, \mathbf{x}_{ym})$, удовлетворяющей условию

$$\langle A_s(\mathbf{x}_{xl}, \mathbf{x}_{ym})|^2 \rangle = F_s(\mathbf{x}_{xl}, \mathbf{x}_{ym}), \quad (5)$$

где угловые скобки обозначают усреднение по статистическому ансамблю. Чтобы учесть пространственные масштабы, большие чем размер расчетной сетки G , к полученному после нахождения ДПФ фазовому фронту $S(x, y)$ добавлялись аберрации, вычисляемые как сумма первых 28 полиномов Цернике [7, 8] с коэффициентами, генерируемыми с помощью датчика случайных чисел как независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией, равной:

$$\sigma_n^2 = 8\pi(n+1) \int_0^{2\pi/G} \mathbf{x} d\mathbf{x} F_s(\mathbf{x}) \frac{J_n^2(\mathbf{x}R)}{(\mathbf{x}R)^2}, \quad (6)$$

где n — радиальная степень соответствующего полинома.

3. Модели зеркал

Действие составного корректора имитировалось как вычитание из искаженного волнового фронта в пределах каждого элемента корректора постоянной составляющей и линейных компонент, вычисленных методом наименьших квадратов из условия минимизации среднеквадратической ошибки остаточных искажений.

Статический прогиб $W(x, y)$ упругого зеркала описывался уравнением бигармонического типа [14]:

$$D\left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4}\right) = g(x, y), \quad (7)$$

$g(x, y)$ — поперечная нагрузка; D — цилиндрическая жесткость. Для использованного зеркала со свободными краями условия на контуре записывались как:

$$D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial n^2} + \sigma \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2} \right) \Big|_{L_j} = 0. \quad (8)$$

Здесь $\partial/\partial n$ и $\partial/\partial \tau$ — производные по нормали и касательной соответственно, σ — коэффициент Пуассона. Условие в центральной шарнирно опертой точке

$$W = 0, D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial n^2} + \sigma \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2} \right) = 0. \quad (9)$$

4. Результаты моделирования

Определение ФРТ было выполнено для видимого диапазона излучения с длиной волны $\lambda = 0.55$ мкм. Радиус когерентности r_0 принимал два значения: 20 см (рис. 1, *a*) и 10 см (рис. 1, *б*) ($D/r_0 = 5$ и 10 соответственно). Расчеты проводились для составного корректора, число элементов которого варьировалось от 1 (3 степени свободы) до 16 (48 степеней свободы) и для гибкого корректора (20 степеней свободы). На каждом из рисунков по оси OX отложено угловое расстояние α в секундах, по оси OY радиальное сечение ФРТ, нормированное на дифракционный максимум. ФРТ усреднялась по случайным реализациям искажений ВФ, число которых составляло 100–300 для системы без коррекции и 10–30 при коррекции искажений ВФ. Дополнительные сведения представлены в табл. 1 и 2, где указаны значения отношения числа Штреля St и полной ширины ФРТ по уровню половины от максимума (FWHM) в зависимости от числа степеней свободы корректора N_c . Гибкому зеркалу соответствует последняя строка в каждой таблице. Первая строка соответствует нескорректированной ФРТ.

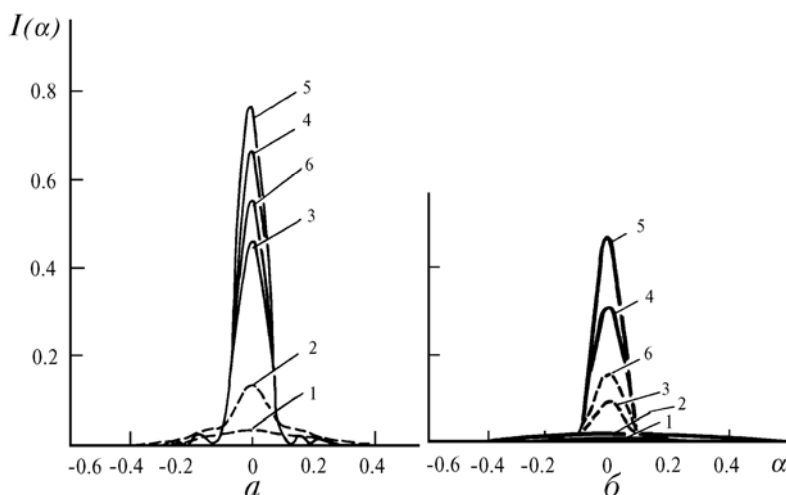


Рис. 1. ФРТ адаптивного телескопа в зависимости от числа степеней свободы активного элемента, *a* — $r_0 = 20$ см, *б* — $r_0 = 10$ см. 1 — без коррекции; 2 — 3 степени свободы (составное зеркало, 1 элемент); 3 — 12 степеней свободы (составное зеркало, 4 элемента); 4 — 27 степеней свободы (составное зеркало, 9 элементов); 5 — 48 степеней свободы (составное зеркало, 16 элементов); 6 — 20 степеней свободы (упругий корректор, 20 сервоприводов)

Таблица 1

N_c	St	FWHM
0	0,03	0,50''
3	0,14	0,14''
12	0,45	0,10''
27	0,67	0,10''
48	0,75	0,10''
20	0,55	0,10''

Таблица 2

N_c	St	FWHM
0	0,008	1,1''
3	0,017	0,64''
12	0,09	0,11''
27	0,31	0,10''
48	0,46	0,10''
20	0,15	0,11''

Из представленных данных видно, что эффективность компенсации искажений составным зеркалом пропорционально увеличивается с ростом числа его элементов (числа координат управления). При этом приблизительно одинаковые результаты получены для составного зеркала с 27-ю степенями свободы и для упругого корректора, имеющего 20 степеней свободы. По-видимому, эффективность зеркала определяется, в основном, числом его координат управления и практически не изменяется при переходе от составного к гибкому зеркалу.

1. Fried D. L. //J. Opt. Soc. Am. 1966. V. 56. № 10. P. 1372–1379.
2. Merkle F. //Tech. Rept. LEST Foundat. 1987. № 28. P. 35–54.
3. Dickman F. //Tech. Rept. LEST Foundat. 1987. № 28. P. 35–54.
4. Wilson R. N., Franza F. and Noethe L. //Journal of Modern Optics. 1987. V. 34. № 4. P. 485–509.
5. Dunn R. R. //Techn. Rept. LEST Foundat. 1987. № 28. P. 87–106.
6. Fried D. L. //Proc. IEEE. 1967. V. 55. P. 57–67.
7. Noll R. J. //J. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. № 3. P. 207–211.
8. Roddier N. //Optical Engineering. 1990. V. 29. № 10. P. 1174–1180.
9. Buckley R. //Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1975. № 37. P. 1431–1446.
10. Tyson R. K. //Optical Engineering. 1990. V. 29. № 10. P. 1165–1173.
11. Коняев П. А., Лукин В. П., Фортес Б. В. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №12. С. 1279–1285.
12. Mehta P. K. //Optical Engineering. 1990. V. 29. № 10. P. 1213–1222.
13. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 318 с.
14. Огибалов П. М. Изгиб, устойчивость и колебания пластинок. М.: Изд-во МГУ, 1958. 168 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 сентября 1992 г.

F. Yu. Kanev, V. P. Lukin, B. V. Fortes. The Efficiency of Deformable and Segmented Mirrors in Correction of Turbulent-Induced Distortions of a Beam Wave Front.

The calculations of function of a point image diffusion for a ground based adaptive telescope are made for two types of the wave front correctors, i.e. for deformable and segmented mirrors. The deformable mirror is assumed to be a thin plate of a square shape fixed at its center with the deformation forces being applied to it at 20 points. The segmented corrector is assumed to be a matrix of square shaped segments having three degrees of freedom, each number of segments being varied from 1 to 16. The wave front distortions are taken with Kolmogorov spectrum and are assumed to be known in each random sample. It is shown in the paper that the function of a point image diffusion calculated for the case of correction performed with a 9-segments mirror (27 degrees of freedom) is very close to that calculated of the deformable mirror actuated at 20 points.