

М.А. Воронцов, А.В. Кудряшов, В.В. Самаркин, В.И. Шмальгаузен

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ ГИБКИХ ЗЕРКАЛ

В работе приводится оценка эффективности компенсации aberrаций, возникающих при распространении пучка в турбулентной атмосфере с помощью гибкого зеркала на основе полупассивного биморфного пьезоэлемента.

В теоретических работах, посвященных анализу адаптивных систем атмосферной оптики, рассматриваются в основном системы с идеальными корректорами волнового фронта. Для получения более достоверной информации об эффективности систем на атмосферных трассах необходимо учитывать реальные, экспериментально измеренные характеристики управляемых зеркал. Прежде всего, речь идет о функциях отклика приводов корректора (деформациях поверхности зеркала при подаче управляющих сигналов на отдельные приводы). В настоящей работе приводятся оценки эффективности работы адаптивной системы при учете экспериментально измеренных функций отклика модального корректора на основе биморфного пьезоэлемента.

Известно [1], что для оптимальной компенсации оптических неоднородностей с колмогоровским спектром флуктуации показателя преломления функции отклика приводов корректора должны быть выбраны в виде ортогональной системы функций Карунена—Лоева. В этом случае при заданном числе каналов управления дисперсия остаточной ошибки аппроксимации фазовых искажений оказывается минимальной. Для практических расчетов обычно пользуются более простыми функциями — ортогональными в круге полиномами Цернике [2].

При создании корректоров волнового фронта, как правило, стремятся приблизить функции отклика реального зеркала к полиномам Цернике и на основании этого сделать вывод об эффективности использования данного зеркала при компенсации атмосферной турбулентности. В работе [3] сообщается о создании корректора с функциями отклика, близкими к трем полиномам Цернике (дефокусировке и астигматизмам). Аппроксимировать полиномы Цернике можно также с помощью биморфного зеркала [4, 5].

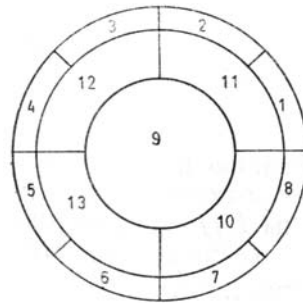


Рис. 1. Схема расположения управляющих электродов

По-видимому, такая постановка задачи не всегда оправдана. Зная статистику фазовых флуктуаций, можно непосредственно оценить эффективность реального корректора волнового фронта при компенсации этих флуктуаций. При этом может оказаться, что реальный корректор лучше исправляет атмосферные фазовые флуктуации, чем зеркало с функциями отклика в форме полиномов Цернике.

Выразим дисперсию ошибки аппроксимации фазовых искажений $\varphi(r)$ через реальные функции отклика корректора, т. е. найдем величину

$$\Delta_N^2 = \frac{1}{S} \int_S \left[\varphi(r) - \sum_{i=1}^N b_i R_i(r) \right]^2 dr, \quad (1)$$

где $R_i(\mathbf{r})$ — функция отклика i -го электрода; b_i — управляющее напряжение, подаваемое на i -й электрод; S — площадь апертуры корректора; N — число электродов. Через $\langle \rangle$ обозначена операция усреднения по ансамблю фазовых флуктуаций.

В работе [4] показано, что величина Δ_N^2 выражается через структурную функцию флуктуации фазы $D(|\mathbf{r}|)$ следующим образом:

$$\Delta_N^2 = \int_S \sigma_N^2(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}; \quad (2)$$

$$\sigma_N^2(\mathbf{r}) = \frac{1}{S} \sum_{i,j=1}^N C_{ij}^{-1} R_i(\mathbf{r}) F_j(\mathbf{r}) - \frac{1}{2S_2} \sum_{i,i,k,l=1}^N R_i(\mathbf{r}) R_j(\mathbf{r}) C_{ij}^{-1} C_{kl}^{-1} d_{kl}; \quad (3)$$

$$F_j(\mathbf{r}) = \int_S D(|\mathbf{r} - \boldsymbol{\rho}|) R_j(\boldsymbol{\rho}) d^2\boldsymbol{\rho};$$

$$d_{kl} = \int_S F_k(\mathbf{r}) R_l(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r},$$

C_{ij}^{-1} — элементы матрицы, обратной к матрице коэффициентов:

$$C_{ij} = \frac{1}{S} \int_S R_i(\mathbf{r}) R_j(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}.$$

При выводе этого выражения полагалось, что флуктуации фазы $\varphi(\mathbf{r})$ являются однородными и изотропными, а также, что $R_i(\mathbf{r}) = 1$.

Структурная функция флуктуации фазы обычно выбирается в виде

$$D(|\mathbf{r}|) = 6,88 \left(\frac{|\mathbf{r}|}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (4)$$

где r_0 — радиус когерентности Фрида.

Формулы (2) и (3) позволяют решить задачу определения Δ_N^2 для произвольной функции отклика корректора.

Для расчета дисперсии остаточной ошибки адаптивной системой с гибким биморфным зеркалом необходимо знать функции отклика его электродов. Аналитическое выражение для теоретических функций отклика биморфного зеркала было получено в работе [5].

Экспериментально найденные функции отклика, как правило, отличаются от теоретических. В настоящей работе они определялись путем обработки интерференционных изображений [5]. Геометрия управляющих электродов экспериментального образца зеркала показана на рис. 1.

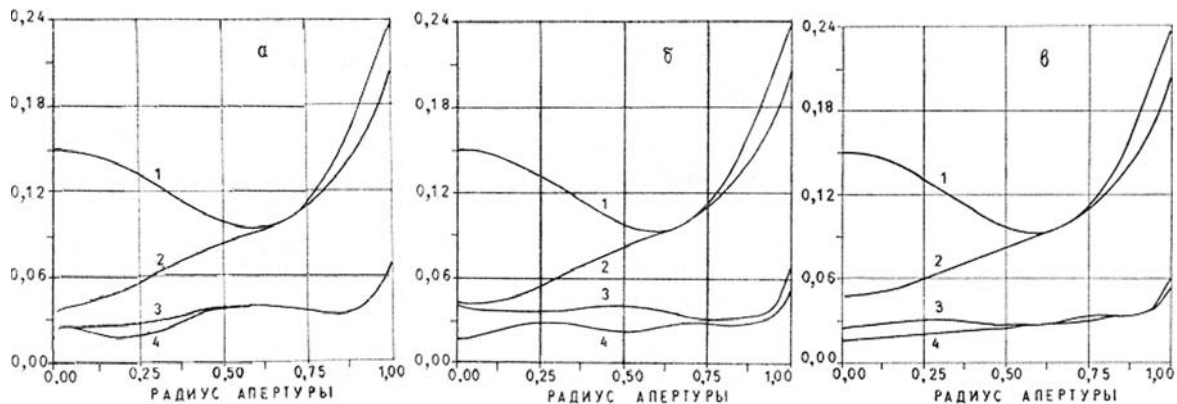


Рис. 2. Распределения дисперсии остаточной ошибки $\sigma_N(r, \Theta)$, $\Theta = 0$ по апертуре зеркала при использовании теоретических (а), экспериментальных (б) функций отклика биморфного зеркала и полиномов Цернике (в)

На рис. 2 приведены распределения дисперсии остаточной ошибки $\sigma_N^2(r, \Theta)$, $\Theta = 0$, по апертуре зеркала при использовании теоретических (а) и экспериментальных (б) функций отклика $R_i(\mathbf{r})$ биморфного корректора. При расчетах полагалось, что к 13 функциям отклика гибкого зеркала добавлены еще три ($R_1 = \text{const}$, $R_2 = x$, $R_3 = y$), соответствующие компенсации средней фазы и наклонов волнового фронта. Распределение дисперсии остаточной ошибки при компенсации средней фазы и наклонов показано на рис. 2, а, б (кривая 1) ($N = 3$). При подключении центрального электрода ($N = 4$) корректора дисперсия остаточной ошибки уменьшается (кривая 2). На рис. 2, а, б показаны дисперсии ошибки при дополнительном подключении 8 периферийных электродов ($N = 12$) (кривая 3 и 4-х электродов среднего кольца ($N = 16$)) (кривая 4).

Значения Δ_N^2 для теоретических и экспериментальных функций отклика приведены в таблице. Для сравнения, на рис. 2, в представлено распределение дисперсии $\sigma_N^2(r, \Theta)$, $\Theta = 0$ по апертуре зеркала при использовании полиномов Цернике. Кривая 1 на рис. 2, в соответствует использованию для коррекции первых трех полиномов Цернике ($N = 3$), кривая 2 первых четырех полиномов ($N = 4$), кривая 3 — первых двенадцати полиномов ($N = 12$), кривая 4 — первых шестнадцати полиномов ($N = 16$). Величины Δ_N^2 для «идеального» корректора с функциями отклика в форме полиномов Цернике представлены в таблице. Отличия Δ_N^2 для корректора с оптимальными функциями отклика и функциями отклика биморфного зеркала незначительны. Это говорит о возможности эффективного использования биморфных зеркал для коррекции искажений фазы, вызванных атмосферной турбулентностью.

Значения дисперсии остаточной ошибки Δ_N^2 при компенсации атмосферной турбулентности адаптивной системой

Тип функции отклика	Δ_N^2			
	Число каналов управления			
	3	4	12	16
Полиномы Цернике	0,134	0,111	0,0353	0,0298
Теоретическая функция отклика	0,134	0,110	0,0355	0,0301
Экспериментальная функция отклика	0,134	0,110	0,0374	0,0304

1. Wang J., Markey J. — J. Opt. Soc. Amer., 1978, v. 68, № 1, p. 78.
2. Noll R. — J. Opt. Soc. Amer., 1976, v. 66, № 3, p. 207.
3. Fuschetto A. — SPIE, 1979, v. 179, p. 17.
4. Воронцов М.А., Кудряшов А.В., Шмальгаузен В.И. — Изв. вузов. Радиофизика, 1984, т. 27, № 11, с. 1419.
5. Воронцов М.А., Гнедой С.А., Кудряшов А.В. и др. — Препринт НИЦТЛ АН СССР, № 29, 1987.

Московский госуниверситет
им. М.В. Ломоносова

Поступило в редакцию
18 апреля 1988 г.

M.A. Vorontsov, A.V. Kudryashov, V.V. Samarkin, V.I. Shmal'ganzen. **Atmospheric Turbulence Compensation Efficiency Analysis Based on Experimental Characteristics of Adaptive Flexible Mirrors.**

The efficiency of a flexible semipassive bimorph piezoid mirror in compensating for optical aberrations due to atmospheric turbulence is estimated.