

# Оценка производительности биморфного деформируемого зеркала путем воспроизведения полиномов Цернике

В.В. Топоровский  
Институт динамик геосфер РАН  
им. М.А. Садовского  
Москва, Россия  
topor@activeoptics.ru

А.В. Кудряшов  
Институт динамик геосфер РАН  
им. М.А. Садовского  
Москва, Россия  
kud@activeoptics.ru

В.В. Самаркин  
Институт динамик геосфер РАН  
им. М.А. Садовского  
Москва, Россия  
samarkin@nightn.ru

И.В. Галактионов  
Институт динамик геосфер РАН  
им. М.А. Садовского  
Москва, Россия  
galaktionov@activeoptics.ru

А.Л. Рукосуев  
Институт динамик геосфер РАН  
им. М.А. Садовского  
Москва, Россия  
alru@nightn.ru

**Аннотация**—Производительность корректора волнового фронта может быть оценена путем воспроизведения модальных ортонормированных функций. Нами было проведено исследование возможности реконструкции полиномов Цернике при помощи биморфного корректора волнового фронта с 37 управляющими элементами.

**Ключевые слова**— адаптивная оптика, полиномы Цернике, биморфное деформируемое зеркало, атмосферная турбулентность.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В течение всего времени разработок в области передачи оптического излучения на расстояние производились попытки в предотвращении воздействия атмосферных синтилляций на световой пучок. Плотность интенсивности светового пучка на мишени стремительно снижается из-за влияния на оптический пучок атмосферной турбулентности [1]. Искажения волнового фронта в оптической волне, вызванные атмосферной турбулентностью, приводят к расширению луча (помимо того, на уширение пучка влияет дифракция), случайным изменениям положения центра луча, называемым дрейфом луча, и случайному перераспределению энергии пучка в поперечном сечении луча, что приводит к флуктуациям освещенности [2].

Подобного рода искажения могут быть исправлены путем внедрения адаптивной оптической системы, где главным исполнительным элементом является корректор волнового фронта [3], [4]. В случае модальных корректоров волнового фронта, к которым относится биморфное деформируемое зеркало [5], [6] эффективность компенсации реальных аберраций волнового фронта может быть оценена путем воспроизведения модальных ортонормированных функций [7].

## 2. ОПИСАНИЕ ФАЗЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МОДАЛЬНЫХ ОРТОНОМИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ

Понимание влияния атмосферной турбулентности на качество пучка может быть достигнуто путем разложения фазового распределения внутри апертуры с точки зрения набора ортонормированных базисных функций. Фаза

внутри апертуры, случайным образом изменяющаяся во времени, описывается с помощью случайно изменяющихся коэффициентов  $a_i(t)$  и детерминированных базовых функций  $\varphi(x)$  в виде:

$$\varphi(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi_i(x). \quad (1)$$

Базисные функции в данном случае должны удовлетворять условию ортонормированности:

$$\int \phi_i(x) \phi_j(x) dx = \delta_{ij}. \quad (2)$$

Исходя из данного условия статистика турбулентной атмосферы может быть описана, используя ковариационную матрицу коэффициентов разложения  $\langle a_i a_j \rangle$ . Благодаря ортонормированности базисных функций,  $\sigma^2$  зависит исключительно от диагональных членов ковариационной матрицы:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{\infty} \langle a_i^2 \rangle. \quad (3)$$

Данное условие показывает главное преимущество модального описания фазы. Таким образом, если система в состоянии корректировать ряд первых модальных функций  $N$ , то среднеквадратичное отклонение фазы, усредненной по апертуре ( $\sigma_{res N}^2$ ), которое остается корректировать может быть описано следующим выражением:

$$\sigma_{res N}^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^N \langle a_i^2 \rangle. \quad (4)$$

Снижение остаточного среднеквадратичного отклонения фазы, усредненной по апертуре  $\sigma_{res N}^2$ , очевидно, зависит от количества скорректированных модальных функций, а также выбора данных функций. Крайне привлекательным с данной точки зрения являются полиномы Цернике. Полиномы Цернике особенно удобны с позиции того, что они достаточно просты в аналитическом представлении, а также члены низкого порядка совпадают по форме с обычными оптическими аберрациями, такими как наклоны волнового фронта, астигматизмы, дефокусировка, комы.

Также остаточное среднеквадратичное отклонение фазы, усредненной по апертуре  $\sigma_{res N}^2$ , может быть

выражено через множитель  $\left(\frac{D_r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}$ , используя следующую формулу:

$$\sigma_{res N}^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^N \langle a_i^2 \rangle = \Delta_N \left(\frac{D_r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}. \quad (5)$$

Тем самым, коэффициенты  $\Delta_N$  определяют величину остаточного среднеквадратичного отклонения фазы, усредненной по апертуре  $\sigma_{res N}^2$  нормированных на множитель  $\left(\frac{D_r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}$ . Компенсация модальных функций наклонов волнового фронта дает наибольшее снижение остаточного среднеквадратичного отклонения фазы  $\sigma_{res N}$ . [8].

### 3. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПОЛИНОМОВ ЦЕРНИКЕ БИМОРФНЫМ ДЕФОРМИРУЕМЫМ ЗЕРКАЛОМ

Нами были проведены экспериментальные исследования по воспроизведению полиномов Цернике при помощи биморфного корректора волнового фронта с 37 электродами, расположенными на подложке диаметром 30 мм.

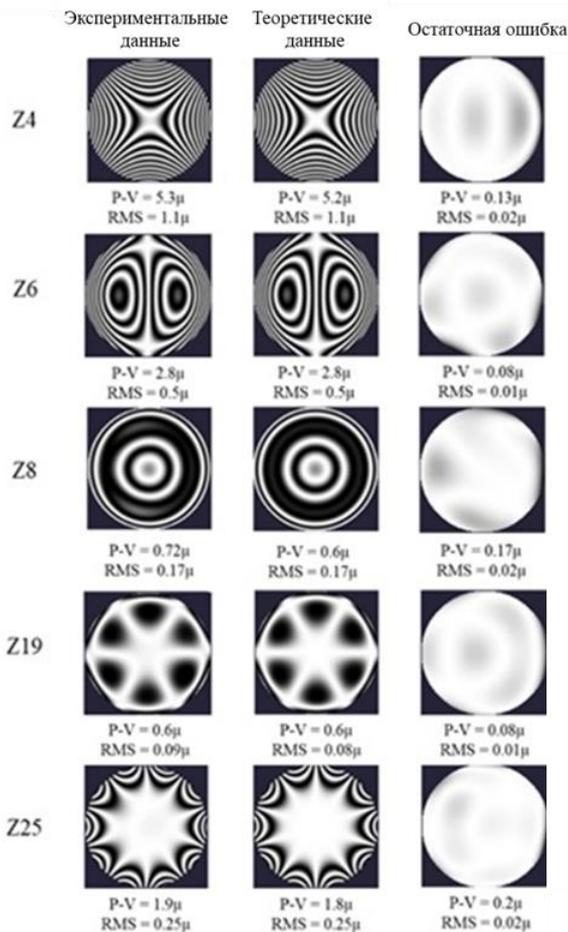


Рис. 1. Воспроизведение полиномов Цернике 37-элементным биморфным деформируемым зеркалом

Но также стоит отметить, что так как функции отклика биморфного зеркала модальные, воспроизведение фиксированных aberrаций по отдельности не полностью описывает возможность зеркала компенсировать aberrации волнового фронта в совокупности. Например, при коррекции волнового фронта со значением полинома Цернике Z33 равном -0,17 мкм (P-V) зеркало компенсирует данный полином практически идеально (P-V = - 0,005 мкм). Но в случае воспроизведения данного полинома в отдельности зеркало не справляется с данной задачей.

Корректор волнового фронта был способен воспроизвести фиксированные aberrации волнового фронта вплоть до 28го полинома Цернике (7-й порядок). Как видно из данного рисунка биморфное зеркало справляется с реконструкцией крупномасштабных aberrаций с большой амплитудой. Например, астигматизм первого порядка имеет значительную амплитуду 5,3 мкм (P-V), а кома 2,8 мкм (P-V).

Очень характерно то, что при увеличении порядков полиномов Цернике снижается максимальная амплитуда их воспроизведения, что типично для флуктуаций фазы, вызванных эффектами атмосферной турбулентности. Остаточное значение среднего квадратичного отклонения составило менее  $\lambda/20$  соответствующее значению фактора Штреля не менее 0,9 [8]

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена из средств гранта РФФИ 20-19-00597.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nistazakis, H.E. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels / H.E. Nistazakis, T.A. Tsiftsis, G.S. Tombras // IET Commun. – 2009. – Vol. 3(8). – P. 1402-1409.
- [2] Noll, R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence / R.J. Noll // J. Opt. Soc. Am. – 1976. – Vol. 66. – P. 207-211.
- [3] Toporovsky, V. Water-cooled stacked-actuator flexible mirror for high-power laser beam correction / V. Toporovsky, V. Samarkin, J. Sheldakova, A. Rukosuev, A. Kudryashov // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 144. – P. 107427.
- [4] Rukosuev, A.L. Smart adaptive optical system for correcting the laser wavefront distorted by atmospheric turbulence / A.L. Rukosuev, A.N. Nikitin, Y.V. Sheldakova, A.V. Kudryashov, V.N. Belousov, V.A. Bogachev, M.V. Volkov, S.G. Garanin, F.A. Starikov // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50(8). – P. 707-709.
- [5] Sheldakova, J. Miniature bimorph deformable mirror for laser beam shaping / J. Sheldakova, I. Galaktionov, A. Nikitin, A. Rukosuev, V. Samarkin, V. Toporovsky, A. Kudryashov // Proc. SPIE. – 2020. – Vol. 11266. – P. 112661L.
- [6] Toporovsky, V. Development and investigation of small-aperture bimorph deformable mirror for correction of low-order aberrations of laser radiation / V. Toporovsky, A. Kudryashov, J. Sheldakova, V. Samarkin // Proc. SPIE. – 2020. – Vol. 11560. – P. 115601Z.
- [7] Dai, G.M. Modal wave-front reconstruction with Zernike polynomials and Karhunen-Loève functions / G.M. Dai // Journal of the Optical Society of America A. – 1996. – Vol.13. – P. 1218-1225.
- [8] Roddier, F. Adaptive Optics in Astronomy / F. Roddier. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999. – 419 p.
- [9] Roggemann, N. Imaging Through Turbulence / N. Roggemann, B. Welsh. – CRC Press. 1996. – 320 p.