

05

## Коррекция крупно- и мелкомасштабных aberrаций волнового фронта лазерного излучения в двухконтурной адаптивной оптической системе

© В.В. Топоровский<sup>1,2</sup>, И.В. Галактионов<sup>1,2</sup>, А.Н. Никитин<sup>1</sup>, В.В. Самаркин<sup>1</sup>, А.В. Кудряшов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия

e-mail: topor@activeoptics.ru

Поступила в редакцию 04.05.2024 г.

В окончательной редакции 04.05.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Представлена адаптивная оптическая система с возможностью последовательной коррекции крупно- и мелкомасштабных aberrаций волнового фронта лазерного излучения, возникающих при создании искусственной турбулентности на лабораторном стенде тепловентилятором. В качестве корректоров волнового фронта было использовано 50 мм биморфное деформируемое зеркало с 28 управляющими элементами для компенсации фазовых флуктуаций низших порядков (дефокус, астигматизм, кома, сферическая aberrация) и пьезоэлектрическое деформируемое зеркало толкательного типа с апертурой 78 мм и 55 актюаторами для подавления влияния фазовых флуктуаций высших порядков. Для анализа характеристик волнового фронта и обеспечения обратной связи были использованы два датчика волнового фронта типа Шака–Гартмана.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрические корректоры волнового фронта, биморфное деформируемое зеркало, пьезоактюаторное деформируемое зеркало, датчик волнового фронта Шака–Гартмана.

DOI: 10.61011/OS.2024.12.59796.6631-24

### Введение

Влияние эффектов атмосферной турбулентности при распространении лазерного излучения через оптический тракт проявляется в расширении пространственно-угловой структуры пучка, в случайном изменении положения центра (дрейф) и перераспределении энергии в его поперечном сечении, что вызвано возникновением локальных флуктуаций показателя преломления [1–3]. Нежелательное воздействие турбулентности может быть снижено путем применения методов и средств адаптивной оптики [4,5]. Классическая адаптивная оптическая система состоит из корректора волнового фронта, датчика волнового фронта и блока управления [6–9]. Корректор волнового фронта, как основной элемент системы, зачастую характеризуется пространственными (разрешение управляющих элементов, амплитуда деформации отражающей поверхности) и временными (диапазон рабочих частот) параметрами. Однако затруднительно создать корректор волнового фронта, одновременно удовлетворяющий требованиям и по амплитуде, и по диапазону рабочих частот. Поэтому используются адаптивные оптические системы с двумя корректорами волнового фронта [6,8], где для коррекции крупномасштабных aberrаций волнового фронта, которые изменяются во времени с низкой частотой, применяются устройства с относительно малым пространственным разрешением актюаторов. Для компенсации мелкомасштабных флук-

туаций фазы, имеющих высокую частоту колебаний, используют корректоры с высокой плотностью управляющих элементов, но с меньшей амплитудой деформации подложки. Первому критерию вполне соответствует биморфное деформируемое зеркало [10–12], второму — пьезоэлектрическое деформируемое зеркало толкательного типа [13–16].

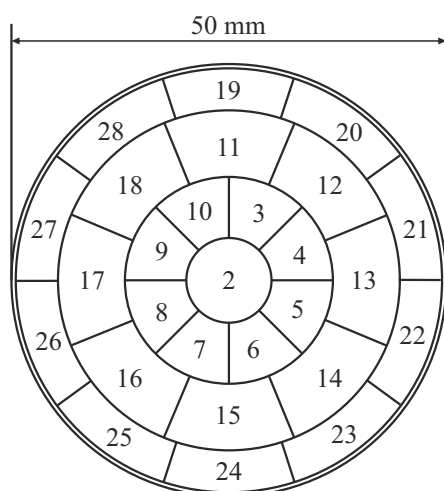
Помимо этого, возникает проблема с управлением корректорами волнового фронта. На данный момент существует четыре основных метода контроля в подобных адаптивных оптических системах:

— зональный метод — сигналы управления получают путем инверсии составной матрицы взаимодействия [17];

— модальная реконструкция — сигналы управления получают в результате разделения режимов низкочастотной и высокочастотной составляющих спектра и рассчитываются отдельно для обоих корректоров [18];

— распределение Цернике — aberrации волнового фронта разлагаются на полиномы Цернике, и каждое деформируемое зеркало корректирует пространственно-разделенный волновой фронт со своим собственным набором полиномов [19];

— двухконтурное управление — самый простой и надежный метод управления, суть которого заключается в использовании двух отдельных адаптивных оптических контуров с отдельными датчиками волнового фронта [20].



**Рис. 1.** Сетка электродов биморфного деформируемого зеркала.

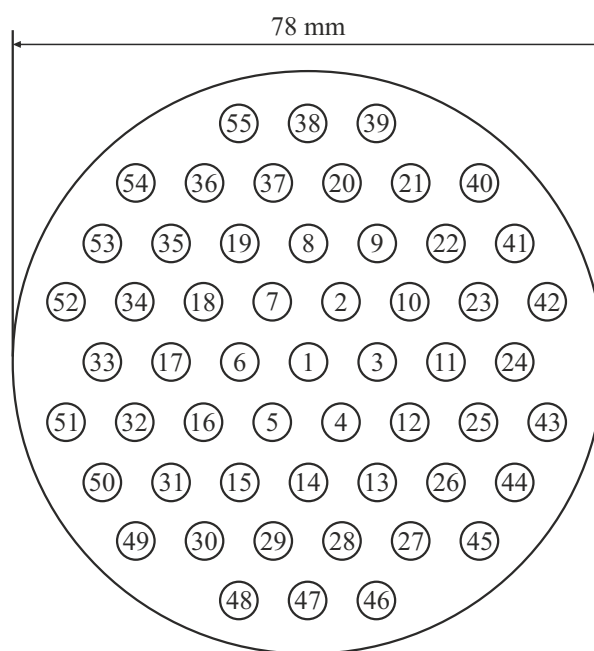
Таким образом, было выбрано двухконтурное управление деформируемыми зеркалами в разработанной адаптивной оптической системе.

## Двухконтурная адаптивная оптическая система на основе биморфного и пьезоактюаторного деформируемого зеркала

Создание адаптивной оптической системы во многом опирается на выбор корректоров волнового фронта и подбор их основных параметров.

Как было упомянуто выше, в качестве устройства для компенсации низших aberrаций волнового фронта было использовано 50 mm биморфное деформируемое зеркало с 28 управляющими элементами (рис. 1), где одна пьезопластина представляет собой общий электрод для эффективной коррекции дефокусировки, а другая разделена на 27 электродов для компенсации других aberrаций волнового фронта. Основными преимуществами данного зеркала являются большая амплитуда изгиба поверхности, а также возможность коррекции крупномасштабных флуктуаций фазы при помощи небольшого количества управляющих электродов (например, для компенсации влияния дефокусировки, астигматизма и комы достаточно 13 электродов). В то же время они имеют ряд недостатков: низкая амплитуда коррекции aberrаций высоких порядков (от 8 полиномов Цернике), что обусловлено высоким коэффициентом связи электродов зеркала (coupling coefficient) и медленным амплитудно-частотным откликом, что ограничивает возможность их использования в системах коррекции быстроменяющихся мелкомасштабных флуктуаций фазы.

Для компенсации высших aberrаций волнового фронта было использовано пьезоактюаторное деформируемое зеркало (рис. 2), преимуществами которого являются



**Рис. 2.** Геометрия расположения актюаторов деформируемого зеркала толкательного типа.

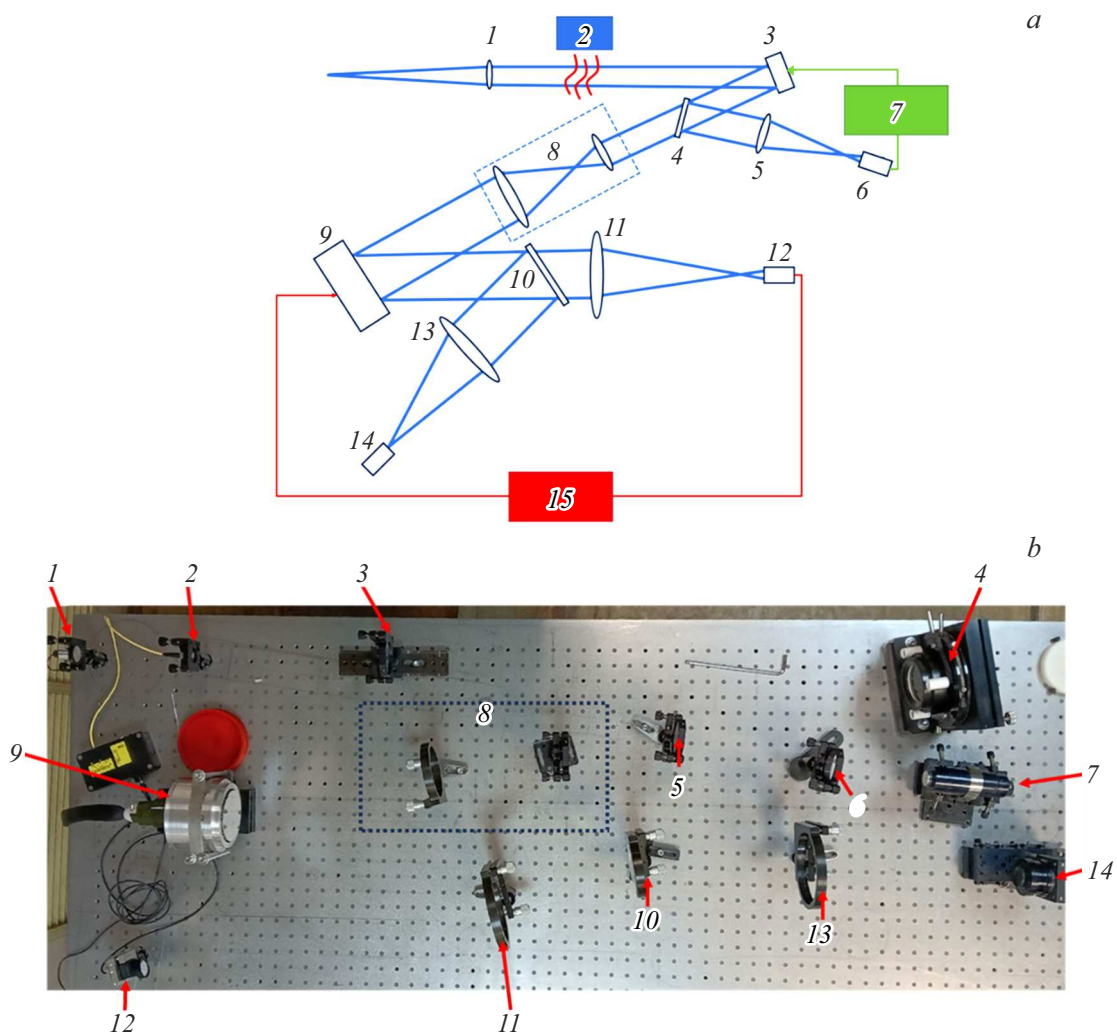
высокое значение частоты первого резонанса (фактор, определяющий диапазон рабочих частот системы) и высокая точность коррекции мелкомасштабных aberrаций волнового фронта.

Принципиальная оптическая схема двухконтурной адаптивной оптической системы представлена на рис. 3, а. Она состоит из двух корректоров волнового фронта (биморфного и пьезоактюаторного), согласующей оптики для увеличения размера пучка с 50 до 75 mm. Для оценки эффективности работы системы была использована длиннофокусная линза, в фокусе которой располагалась камера дальнего поля. Обратная связь для управления актюаторами деформируемых зеркал обеспечивается наличием двух датчиков волнового фронта Шака–Гартмана. Искусственная турбулентность на оптическом стенде создавалась при помощи тепловентилятора, создаваемый поток которого соответствует атмосферной турбулентности спектра Колмогорова [1].

Фотография собранной экспериментальной установки представлена на рис. 3, б.

## Заключение

В настоящей работе рассмотрена двухконтурная адаптивная оптическая система для компенсации крупно- и мелкомасштабных aberrаций волнового фронта. Биморфный корректор волнового фронта диаметром 50 mm с 28 электродами был использован для коррекции крупномасштабных aberrаций волнового фронта лазерного излучения, а пьезоактюаторное гибкое зеркало диамет-



**Рис. 3.** Двухконтурная адаптивная оптическая система: (а) принципиальная схема экспериментальной установки (1 — коллимирующая линза, 2 — тепловентилятор, 3 — биморфное деформируемое зеркало, 4, 10 — светоделительные пластины, 5, 11 — объективы, 6, 12 — датчики волнового фронта, 7, 15 — блоки управления, 8 — согласующая оптика, 9 — пьезоактюаторное деформируемое зеркало, 13 — длиннофокусная линза, 14 — камера дальнего поля); (б) фотография экспериментальной установки (1 — трассировочный лазер, 2 — диагностический лазер, 3 — коллимирующая линза, 4 — биморфное деформируемое зеркало, 5, 10 — светоделительные пластины, 6, 13 — объективы, 7, 14 — датчики волнового фронта, 8 — согласующая оптика, 9 — пьезоактюаторное деформируемое зеркало, 11 — длиннофокусная линза, 12 — камера ближнего поля).

ром 78 mm с 55 управляющими элементами — для компенсации влияния мелкомасштабных флуктуаций фазы. Турбулентность, аналогичная возникающей на реальных атмосферных трассах, создавалась при помощи тепловентилятора на лабораторном стенде.

### Финансирование работы

Работа выполнена на средства гранта Российского научного фонда № 20-19-00597.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A. Rukosuev, A. Nikitin, V. Toporovsky, J. Sheldakova, A. Kudryashov. *Photonics*, **9**, 351 (2022). DOI: 10.3390/photonics9050351
- [2] F. Roddier. *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge University Press, 1999).
- [3] D.L. Fried. *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 1427–1435 (1965). DOI: 10.1364/JOSA.55.001427
- [4] V. Toporovsky, A. Kudryashov, V. Samarkin, J. Sheldakova, A. Rukosuev. *Proc. SPIE*, **11266**, 1126619 (2020). DOI: 10.1117/12.2548325
- [5] P. Rausch, S. Verpoort, U. Wittrock. *Optics Express*, **24**, 1528–1542 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.001528
- [6] I. Galaktionov, J. Sheldakova, A. Nikitin, V. Toporovsky, A. Kudryashov. *Algorithms*, **16**, 337 (2023). DOI: 10.3390/a16070337

- [7] J.-F. Lavigne, J.-P. Véran. *J. Opt. Soc. Am. A, Optics, Image Science, and Vision*, **25**, 2271–2279 (2008). DOI: 10.1364/JOSAA.25.002271
- [8] C. Correia, J. Véran. *Optics Letters*, **37**, 3132–3134 (2012). DOI: 10.1364/OL.37.003132
- [9] W. Zou, S. Burns. *Appl. Optics*, **51**, 1198–1208 (2012). DOI: 10.1364/AO.51.001198
- [10] V. Toporovsky, A. Kudryashov, V. Samarkin, I. Galaktionov, A. Rukosuev. *Proc. ITNT-2022*, 1–5 (2022). DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848711
- [11] V. Toporovsky, V. Samarkin, A. Kudryashov, I. Galaktionov. *Proc. SPIE*, **12218**, 1221806 (2022). DOI: 10.1117/12.2632914
- [12] S. Kokorowski. *J. Opt. Soc. Am.*, **69**, 181–187 (1979). DOI: 10.1364/JOSA.69.000181
- [13] V. Toporovsky, V. Samarkin, A. Kudryashov, I. Galaktionov, A. Panich, A. Malykhin. *Micromachines*, **14**, 2004 (2023). DOI: 10.3390/mi14112004
- [14] V. Toporovsky, A. Kudryashov, V. Samarkin, J. Sheldakova, A. Rukosuev. *Proc. SPIE*, **10772**, 107720U (2018). DOI: 10.1117/12.2324271
- [15] V. Toporovsky, V. Samarkin, A. Kudryashov, A. Panich, A. Sokallo, A. Malykhin, J. Sheldakova. *Proc. SPIE*, **11987**, 119870M (2022). DOI: 10.1117/12.2614509
- [16] V. Toporovskiy, A. Kudryashov, V. Samarkin, J. Sheldakova, A. Rukosuev. *Proc. SPIE*, **11135**, 111350A (2019). DOI: 10.1117/12.2533984
- [17] R. Conan, C. Bradley, P. Hampton, O. Keskin, A. Hilton, C. Blain. *Appl. Opt.*, **46**, 4329–4340 (2007). DOI: 10.1364/AO.46.004329
- [18] S. Hu, B. Xu, X. Zhang, J. Hou, J. Wu, W. Jiang. *Appl. Opt.*, **45**, 2638–2642 (2006). DOI: 10.1364/AO.45.002638
- [19] S.M. Jones, S. Olivier, D. Chen, S. Joeres, S. Sadda, R.J. Zawadzki, J.S. Werner, D.T. Miller. *Proc. SPIE*, **6467**, 64670H1 (2007). DOI: 10.1117/12.711189
- [20] D.C. Chen, S.M. Jones, D.A. Silva, S.S. Olivier. *J. Opt. Soc. Am. A*, **24**, 1305–1312 (2007). DOI: 10.1364/JOSAA.24.001305