

УДК 535.3

## УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ЗЕРКАЛАМИ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАЗРЕШЕНИЙ

А. Н. Боршевников, Д. А. Дементьев, Е. В. Леонов, Д. М. Ляхов,  
Г. Н. Сохарева, А. В. Черных, Ю. И. Шанин, В. И. Щипалкин

*Научно-исследовательский институт «Научно-производственное объединение "ЛУЧ"»,  
142103, г. Подольск Московской обл., ул. Железнодорожная, 24  
E-mail: syi@luch.podolsk.ru*

Кратко описаны методы управления двумя деформируемыми зеркалами, одно из которых корректирует aberrации высокой пространственной частоты, а другое — aberrации низкой пространственной частоты. Приведены результаты начальных экспериментов по отработке алгоритмов управления такими деформируемыми зеркалами.

*Ключевые слова:* атмосферная турбулентность, волновой фронт, адаптивная оптическая система, деформируемое зеркало, датчик волнового фронта, низкочастотный корректор, высокочастотный корректор.

DOI: 10.15372/AUT20180315

**Введение.** Один из возможных подходов к компенсации турбулентности атмосферы основан на раздельной компенсации низких и высоких частот (НЧ и ВЧ), присутствующих в спектре итогового возмущения волнового фронта (ВФ) излучения. При этом в оптической схеме находится два корректора ВФ. Один корректор предназначен для компенсации aberrаций ВФ с низким пространственным разрешением (НПР), другой — с высоким пространственным разрешением (ВПР). Это значит, что один корректор (деформируемое зеркало (ДЗ) НПР) компенсирует низкие порядки возмущений (дисторсию, дефокусировку, астигматизм, цилиндр), другой (деформируемое зеркало ВПР) — более высокие порядки. Такое управление основано на том факте, что амплитуды и временные частоты низкочастотных и высокочастотных составляющих aberrаций различаются на порядок величины. Согласно [1] дисперсия ВФ некомпенсированной атмосферной турбулентности ( $\sigma_{\text{БК}}^2$ ) выражается уравнением

$$\sigma_{\text{БК}}^2 = 1,02(D/r_0)^{5/3}, \quad (1)$$

где  $D$  — диаметр апертуры зеркала;  $r_0$  — радиус Фрида (характерный размер турбулентности). После удаления двухосевого наклона дисперсия ВФ составляет

$$\sigma_{\text{нак}}^2 = 0,134(D/r_0)^{5/3}, \quad (2)$$

т. е. уменьшается в 7,6 раза. Дисперсия ВФ при коррекции высоких мод рассчитывается по формуле [1]

$$\sigma_{N_m}^2 = 0,2944N_m^{-\sqrt{3}/2}(D/r_0)^{5/3} \text{ [рад]}, \quad (3)$$

где  $N_m$  — число корректируемых мод. Отношение величины скомпенсированной дисперсии к некомпенсированной выражается как

$$\Delta^2(N_m) = \sigma_{N_m}^2/\sigma_{\text{БК}}^2 = 0,289N_m^{-\sqrt{3}/2}. \quad (4)$$

Анализ (4) показал, что корректор НПР компенсирует около 84 % амплитудных возмущений ВФ, а корректор ВПР пытается убрать оставшиеся 16 %. У корректора НПР

должны быть большие перемещения приводов ( $\sim 10$  мкм), искривляющие поверхность ДЗ, но при малых частотах их работы (порядка 1–10 Гц). И наоборот, приводы корректора ВПР имеют малые ходы ( $\sim 2$  мкм) при более высоких рабочих частотах (порядка 10–100 Гц). Действуя так, удаётся распределить управление необходимой энергией и решить противоречия, возникающие при управлении ВФ во всём необходимом диапазоне частот, включая низкие и высокие частоты. В системе с двумя ДЗ алгоритм управления фильтрует порядки aberrаций ВФ таким образом, чтобы более низкие порядки направлялись на корректор НПР, а более высокие — на корректор ВПР. Это управление в иностранной литературе известно как *woofer-tweet control* по аналогии с разнесением динамиков звуковых систем на низкочастотные (*woofer (w)*) и высокочастотные (*tweet (t)*).

Для выяснения потребности в использовании двух зеркал необходимо оценить требования хода привода ДЗ нахождением ожидаемого изменения фазы по апертуре. Максимальное изменение фазы можно установить, вычисляя выражение

$$\langle [\varphi(\mathbf{r} + \mathbf{s}) - \varphi(\mathbf{s})]^2 \rangle = 6,88(|\mathbf{s}|/r_0)^{5/3}[1 - (|\mathbf{s}|/D)^{1/3}], \quad (5)$$

где  $\varphi(\mathbf{r})$  — атмосферная фаза в пространственной координате  $\mathbf{r}$ ;  $\mathbf{s}$  — пространственное разнесение. Из уравнения (5) приблизительное значение хода может быть рассчитано для относительно сильной турбулентности. Например, при апертуре 75 см,  $r_0 = 2$  см и длине волны  $\lambda$  оптическая разность хода (ОРХ) составляет  $2,24\lambda$ . Чтобы избежать насыщения приводов деформируемого зеркала, их максимальный ход не должен превышать трёхкратного среднеквадратичного значения перемещения привода. Если ход привода выразить в определении ОРХ излучения, то для длин световых волн порядка микрона максимальный ход привода составит  $6,72\lambda$ . Однако зеркало с высоким пространственным разрешением, как правило, имеет ход, который может составлять всего  $\pm(1-2)$  мкм ОРХ, и само по себе оно не в состоянии удовлетворить требования к ходу, т. е. необходимо устанавливать второе деформируемое зеркало с большим ходом приводов ( $\sim 10$  мкм).

При исправлении световых сигналов, проходящих через турбулентную атмосферу, в оптическом тракте вместе с корректорами наклонов [2] работают и деформируемые зеркала, которые исправляют оптические aberrации более высоких порядков. Цель данной работы — исследование эффективности способа управления деформируемыми зеркалами при разнесении коррекций aberrаций низкого и высокого пространственных разрешений на два различных деформируемых зеркала.

**Технология управления деформируемыми зеркалами с НПР и ВПР.** Наличие двух ДЗ требует, чтобы регулятор распределил команды управления между ними. Существует два подхода к управлению. В первом подходе полная коррекция сначала предоставляется корректору ВПР. Затем команды приводам корректора ВПР также направляются на корректор НПР с помощью передаточной матрицы, которая преобразует команды корректора ВПР в соответствующие команды корректора НПР. Поскольку временной отклик корректора НПР медленнее, чем корректора ВПР, то высокочастотные компоненты команд корректора ВПР фильтруются корректором НПР. На рис. 1 показаны блок-схемы обычного регулятора и регулятора такого типа управления. Передаточная матрица  $H_{t2w}$  представляет собой преобразование из команд ВПР в команды НПР, а  $H_{w2t}$  — передаточная матрица, определяющая влияние ДЗ НПР на положение приводов ДЗ ВПР в целях совмещения коррекций обоих зеркал.

В других методах управления НПР и ВПР в адаптивных оптических системах (АОС) используются фильтры для разделения команд, посылаемых на ДЗ, между двумя зеркалами. В этих регуляторах отклик корректора НПР включён в контур управления корректором ВПР для того, чтобы рассчитать соответствующее разделение команд ДЗ между обоими корректорами. Таким образом, корректор ВПР имеет два контура управления:

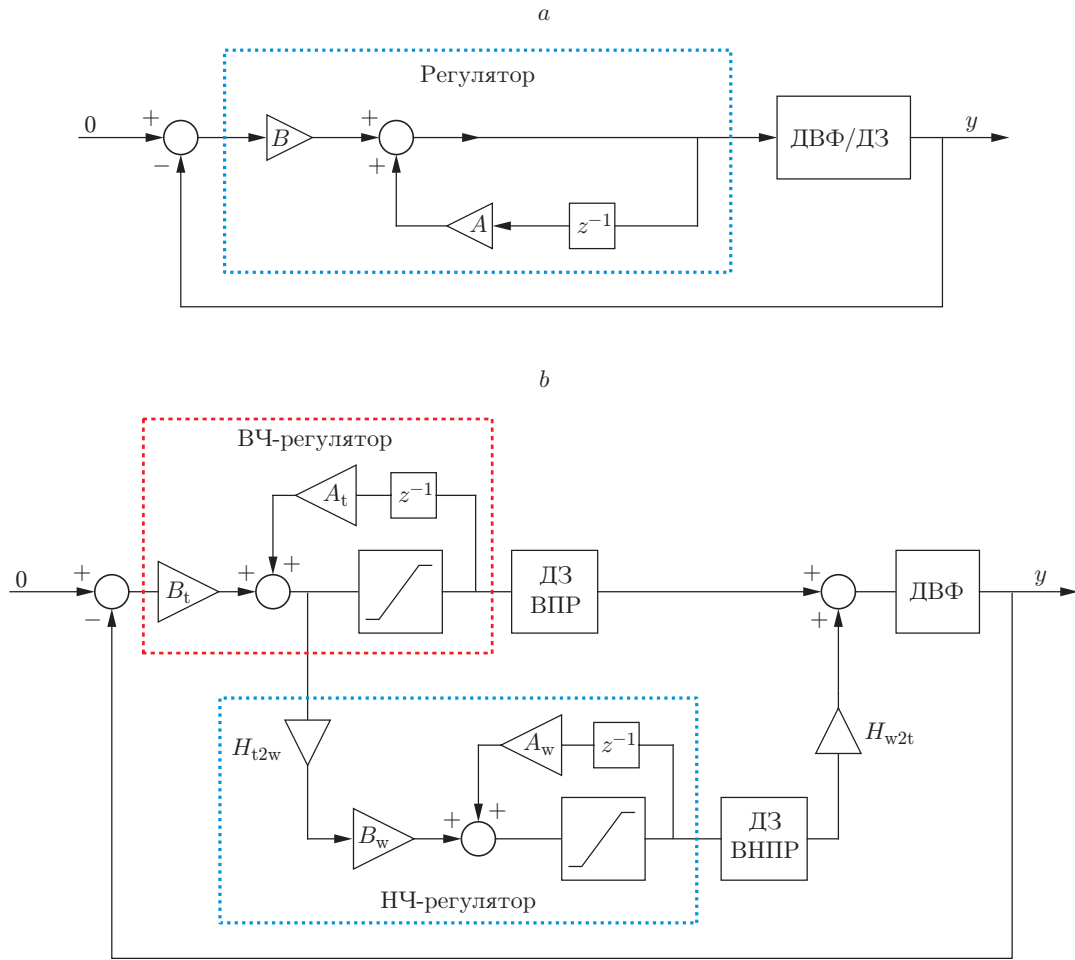


Рис. 1. Регуляторы адаптивной оптики: *a* — обычный регулятор, *b* — регулятор АОС НПР/ВПР с командами корректора ВПР, отображёнными на корректор НПР [3]. Обозначения:  $A, B$  — коэффициенты усиления интегрирующих звеньев;  $y$  — выходной сигнал;  $z^{-1}$  — звено задержки;  $A_t, B_t$  и  $A_w, B_w$  — коэффициенты усиления интегрирующих звеньев ВЧ- и НЧ-регуляторов соответственно; ДВФ — датчик волнового фронта

по одному для содержимых НПР и ВПР. Независимо от применяемого регулятора цель алгоритма управления корректорами НПР и ВПР — позволить системе с двумя ДЗ достичь работоспособности системы, которая использует одно широкополосное зеркало без ограничений хода.

**Экспериментальная проверка совместной работы корректоров НПР и ВПР.**

Были проведены начальные исследования АОС, включающей в оптическую схему корректоры НПР и ВПР — деформируемые зеркала. Экспериментально исследовалась возможность использования в АОС двух управляемых зеркал: корректора НПР для компенсации aberrаций низкого порядка до двух включительно (дефокусировка, астигматизм) и корректора ВПР для компенсации aberrаций высоких порядков. Оптическая схема исследовательского стенда показана на рис. 2.

Деформируемые зеркала круглой формы управлялись 109 пьезоприводами (корректор ВПР) и 21 пьезоприводом (корректор НПР). Деформируемые зеркала спроектированы и изготовлены таким образом, что аналогично решению из [3] пространство корректора НПР является ортогональным к пространству корректора ВПР, и это предотвращает работу корректоров НПР и ВПР друг против друга.

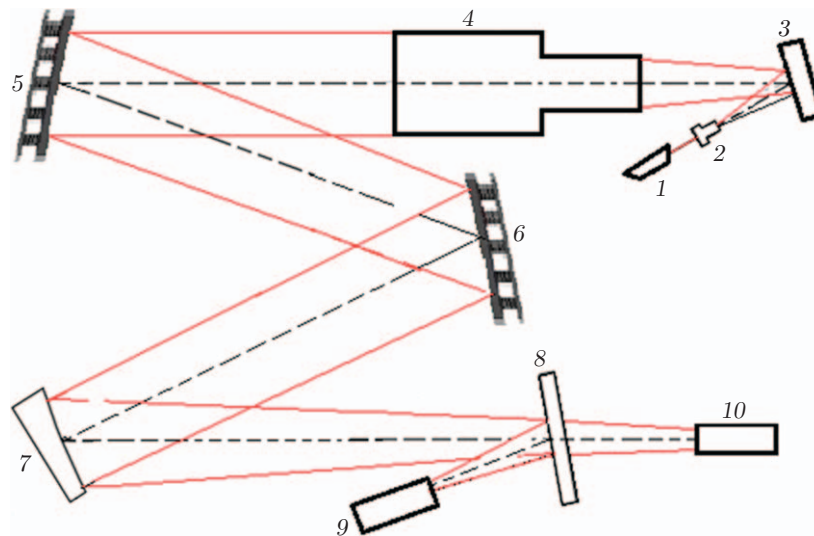


Рис. 2. Оптическая схема исследований взаимной работы корректоров НПР/ВПР: 1 — He—Ne-лазер; 2 — микробъектив  $40\times$ ; 3 — поворотное зеркало; 4 — объектив телескопа; 5, 6 — деформируемые зеркала (корректоры НПР и ВПР соответственно); 7 — внеосевая парабола; 8 — светоделитель; 9 — датчик интенсивности; 10 — ДВФ

В целях определения влияния количества точек на гартманограмме, получаемой с помощью ДВФ, на работоспособность АОС испытывались два варианта ДВФ (табл. 1). Для дополнительной оценки качества коррекции по размеру фокального пятна устанавливался датчик интенсивности. В обеих сериях испытаний для датчика интенсивности использовалась камера Manta  $1920 \times 1200$  с размером пикселя  $5,86 \times 5,86$  мкм. При этом диаметр дифракционного ограниченного пятна равнялся 11,0 мкм.

Исследование носило демонстрационный характер: АОС компенсировала aberrации оптической схемы (в том числе наведённые искусственно) в статическом режиме. Опыты проводились как без компенсации (обратная связь системы управления выключена), так и с компенсацией (обратная связь включена). При работе с обратной связью были изучены следующие схемы управления:

1. Оба ДЗ работали одновременно без разделения на корректоры НПР и ВПР, т. е. управляющие напряжения подавались одновременно на оба зеркала. Это вариант так называемого «длинного зеркала» [4–6], когда предварительно проводилась калибровка системы снятием функций отклика на двух зеркалах одновременно. Восстанавливаемый с помощью ДВФ волновой фронт служил для выработки необходимых напряжений для их адресации на пьезоприводы сразу двух зеркал.

2. Оба зеркала работали с разделением сигнала на корректоры НПР и ВПР [3], когда при восстановлении ВФ из аппроксимационного полинома выделялись aberrации низкого (до 2-го включительно) и высокого порядков.

Таблица 1

### Характеристики ДВФ

Тип камеры	Характеристики линзового раstra			
	Зона засветки, мм	Фокусное расстояние, мм	Шаг между линзами, мм	Количество линз
Basler $1920 \times 1200$	2,1	6,5	0,3	47 (7 точек на диаметре)
PhotonFocus $1312 \times 1082$	4,2	3,7	0,15	617 (28 точек на диаметре)

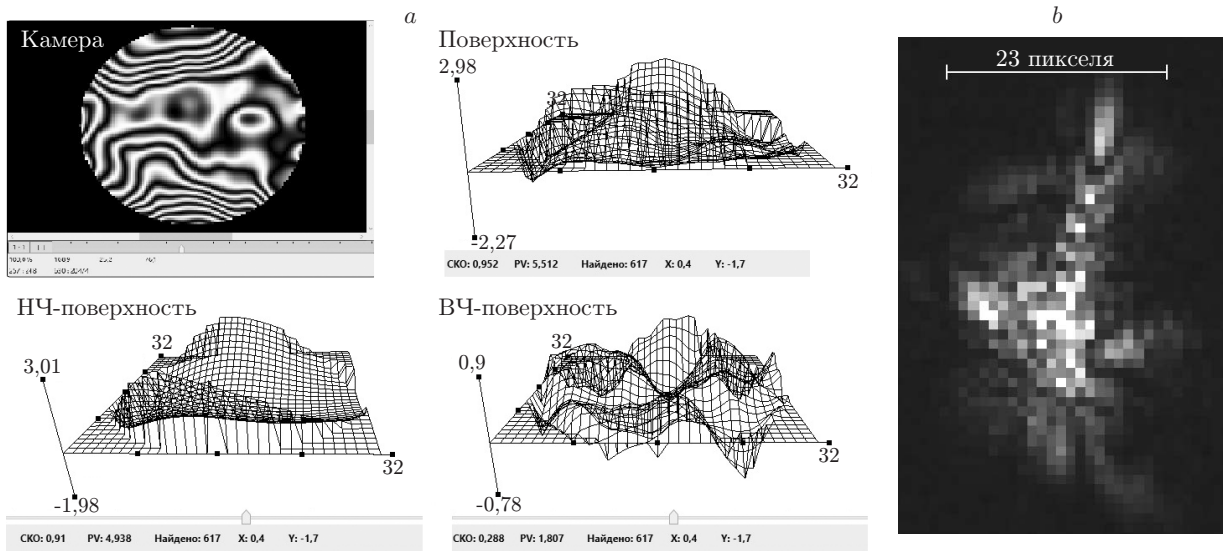


Рис. 3. Результаты работы АОС: *a* — интерферограмма и топограммы aberrаций оптической схемы без включения обратной связи; *b* — фокальное пятно без работы обратной связи

Созданное программное обеспечение по управлению корректорами НПР и ВПР позволяло получать результаты коррекции, производимой АОС, в виде интерферограмм ВФ, общей и частных (вклады НПР и ВПР) топограмм ВФ и с регистрацией фокального пятна на датчике интенсивности. Результаты были получены на двух ДВФ, но на рис. 3–5 представлены только для одного ДВФ с камерой PhotonFocus: а) при отсутствии коррекции и при её наличии; б) без разделения корректоров НПР и ВПР; в) с разделением сигнала для корректоров НПР и ВПР.

Результаты исследований сведены в табл. 2, где использованы следующие обозначения:  $R$  — степень полинома по радиусу и углу зеркала в полярных координатах;  $D_{\text{пят. 80}}$  — диаметр пятна в фокусе, содержащего 80 % энергии излучения;  $P-V$  — максимальное рас-

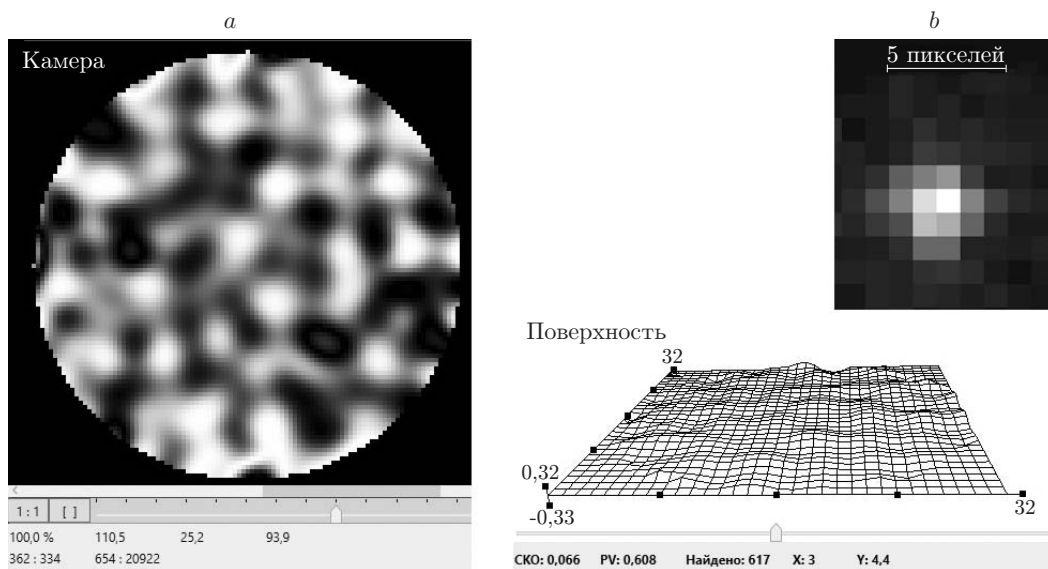


Рис. 4. Результаты коррекции, производимой АОС: *a* — интерферограмма и топограмма коррекции aberrаций с использованием обоих зеркал одновременно без разделения на ДЗ НПР и ВПР; *b* — фокальное пятно при работе обратной связи

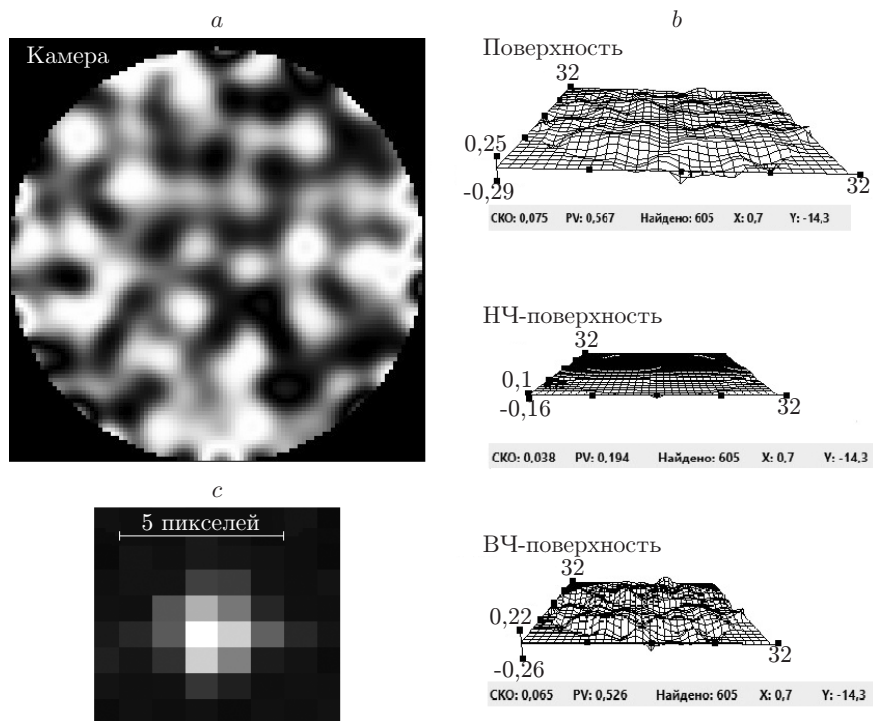


Рис. 5. Результаты коррекции, производимой АОС: *a* — интерферограмма; *b* — топограммы коррекции aberrаций с использованием алгоритма по раздельной работе корректоров НПР и ВПР; *c* — фокальное пятно при работе обратной связи

стояние между пиком и впадиной в ВФ; СКО — среднеквадратичное отклонение от плоского ВФ. Разница в измеренных с помощью двух датчиков  $P-V$  и СКО ВФ объясняется более точным воспроизведением реального ВФ датчиком на основе камеры PhotonFocus. Датчик на основе камеры Basler в силу использования меньшего количества точек измерения даёт более сглаженную картину ВФ, и поэтому его аппроксимация полиномом менее точна.

Оба способа управления одновременно двумя ДЗ были эффективны по сравнению с управлением отдельными зеркалами и показали примерно одинаковые (с учётом погрешности) размеры пятна. При этом в первом способе (без разделения на НПР и ВПР) управление деформируемыми зеркалами осуществлялось параллельно. Во втором способе (с

Таблица 2  
Результаты работы АОС с ДВФ на основе разных камер

Режим управления	$R$	$D_{\text{пят. } 80}$ , мкм	Размах $P-V$ , мкм	СКО, мкм
Обратная связь отключена	3; 9	153,5	5,00	0,810
	4; 25	175,8	5,51	0,810
Без разделения на НПР и ВПР	3; 9	58,6	0,31	0,040
	4; 25	48,1	0,61	0,066
Разделение на НПР и ВПР	3; 9	62,1	0,15	0,018
	4; 25	50,4	0,57	0,075

Примечание. Режимы управления: первая строка — получено с помощью камеры Basler, вторая строка — с помощью камеры PhotonFocus.

разделением на НПР и ВПР) выполнено только последовательное управление корректорами НПР и ВПР. Это обстоятельство привело к передаче накопленной на корректоре НПР ошибки корректору ВПР и замедлению процесса управления. В дальнейшем планируется реализовать параллельное управление двумя корректорами с разделением по пространственному разрешению.

**Заключение.** Проведённые исследования показали возможность использования двух ДЗ для улучшения работы адаптивной оптической системы. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования эффективности применения раздельного управления НПР и ВПР, которые будут сосредоточены на отработке алгоритма разделения сигналов на ДЗ НПР и ВПР в динамическом режиме функционирования системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tyson R. K.** Principles of Adaptive Optics. Boca Raton — London — New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015. 384 p.
2. **Бокало С. Ю., Бокашов И. М., Ляхов Д. М. и др.** Стабилизация астрономических изображений с помощью управляемого плоского зеркала // Автометрия. 2018. **54**, № 1. С. 54–60.
3. **Perez J. J.** Adaptive control of woofer-tweeter adaptive optics // Thesis. Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, 2009. 82 p.
4. **Gavel D., Norton A.** Woofer-tweeter deformable mirror control for closed-loop adaptive optics: theory and practice // Proc. SPIE. 2014. **9148**. 91484J.
5. **Zou W., Qi X., Burns S. A.** Wavefront-aberration sorting and correction for a dual-deformable-mirror adaptive-optics system // Opt. lett. 2008. **33**, N 22. P. 2602–2604.
6. **Zou W., Burns S. A.** Testing of Lagrange multiplier damped least-squares control algorithm for woofer-tweeter adaptive optics // Appl. Opt. 2012. **9**, N 5. P. 1198–1208.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2017 г.*

---