

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.417: 681.787

Эффективность использования управляемого зеркала DM2-100-31 в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа

Л.В. Антошкин¹, Н.Н. Ботыгина¹, О.Н. Емалеев¹, П.Г. Ковадло²,
П.А. Коняев¹, Е.А. Копылов¹, В.П. Лукин¹, В.Д. Трифонов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 4026

Поступила в редакцию 10.08.2012 г.

Приведены результаты испытания биморфного деформируемого зеркала DM2-100-31 в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа. Показано, что в условиях сильных ветровых раскачиваний элементов конструкции телескопа диапазон углов наклона управляемого зеркала недостаточен для стабилизации изображения. Низкое быстродействие и недостаточный диапазон деформаций поверхности управляемого зеркала на световой апертуре 60 мм не позволили достичь высокой эффективности коррекции волнового фронта.

Ключевые слова: адаптивная оптическая система, управляемое зеркало; adaptive optics system, controllable mirror.

В солнечных адаптивных оптических системах (АОС) традиционно используются два управляемых зеркала: одно для управления общими наклонами волнового фронта (ВФ) излучения и второе для коррекции аберраций второго порядка и выше. Использование в АОС одного управляемого зеркала, конструкция которого позволяет совместить обе функции, имеет определенные преимущества. Это, прежде всего, уменьшение количества оптических элементов, так как формируется только один выходной зрачок телескопа, и сокращение длины оптического пути в АОС. В результате уменьшаются аберрации волнового фронта, вносимые оптическими элементами и павильонной турбулентностью.

В настоящей статье приведены результаты испытания биморфного деформируемого зеркала DM2-100-31 на экспериментальной установке АОС на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ).

Управляемое зеркало DM2-100-31 [1], разработанное для повышения качества фокусировки в лазерных системах, имеет световой диаметр 105 мм и 31 управляющий электрод. В АОС БСВТ [2]

зеркало помещается в выходной зрачок телескопа диаметром 60 мм. Световая апертура зеркала ограничивается до 60 мм. Внешнее кольцо электродов находится вне световой апертуры зеркала и используется для управления только наклонами зеркала. Наклоны зеркала по оси X осуществляются при подаче в противофазе управляющих напряжений на электроды левого и правого полукольца, по оси Y — на электроды верхнего и нижнего полукольца. Управляющие напряжения распределяются по электродам полукольца (от центральных к крайним) пропорционально расстоянию от центров электродов до оси наклона зеркала. В режиме управления только наклонами деформация поверхности зеркала в пределах световой апертуры не превышает $\lambda/10$. При подаче управляющих напряжений на 19 внутренних электродов происходит компенсация аберраций волнового фронта второго порядка и выше.

Для формирования сигналов управления наклонами зеркала предварительно на этапе калибровки АОС проводятся измерения аберрации ВФ первого порядка при последовательной подаче управляющих напряжений U_x и U_y на электроды внешнего кольца и вычисляются коэффициенты K_x и K_y линейных аппроксимаций зависимостей $U_x(C_1)$ и $U_y(C_2)$, где C_1 и C_2 — измеренные датчиком волнового фронта коэффициенты при первом и втором полиномах Цернике. Коэффициенты K_x и K_y используются при формировании сигналов управления в режиме коррекции ВФ: $U_x = -K_x C_1$, $U_y = -K_y C_2$.

* Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru);
Нина Николаевна Ботыгина (bnn@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eon@iao.ru); Павел Гаврилович Ковадло;
Петр Алексеевич Коняев (petrkonyaev@gmail.com); Евгений Анатольевич Копылов (evgen704@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Виктор Дмитриевич Трифонов.

Для формирования сигналов управления, которые подаются на внутренние электроды, в режиме калибровки измеряются 19 функций отклика управляемого зеркала. Функция отклика (ФО) измеряется aberrациями ВФ, вносимыми деформацией поверхности зеркала при подаче напряжения на управляющий электрод. Для измерения ФО используется датчик Шэка–Гартмана. Измеренные функции отклика сохраняются в виде коэффициентов разложения по полиномам Цернике и в виде смещений изображений на регистрируемой гартмограмме.

В режиме коррекции ВФ функция aberrаций измеренного волнового фронта представляется в виде линейной комбинации 19 функций отклика. С использованием метода наименьших квадратов вычисляются коэффициенты разложения. Если функции отклика (деформации поверхности зеркала) пропорциональны напряжению, приложенному к соответствующему электроду, сигналы управления на каждый из 19 электродов можно представить в виде $U_j = -K_j U_0$, где K_j – коэффициенты разложения; j – номер электрода; U_0 – калибровочное напряжение.

Экспериментальные исследования пропорциональности функции отклика напряжению, приложенному к соответствующему электроду, показали, что в среднем в каждой функции отклика 50% aberrаций можно условно считать пропорциональными напряжению. Для каждой функции отклика исследовалась зависимость вида $C_i(U)/C_i(U_0) = A_i U$, где C_i – коэффициент при i -м полиноме Цернике; A_i – коэффициент линейности. Оказалось, что 50% экспериментально полученных значений A_i лежат в интервале $[0,8/U_0, 1,2/U_0]$. При строгой пропорциональности $A_i = 1/U_0$.

Алгоритмы формирования сигналов управления были опробованы на лабораторном макете АОС в ИОА СО РАН. Для искажения волнового фронта излучения, падающего на исследуемое зеркало, использовалось второе деформируемое зеркало. Исследовались два способа формирования сигналов управления для коррекции вносимых aberrаций:

- на основе разложения измеренных aberrаций ВФ по функциям отклика в виде полиномов Цернике,
- на основе разложения измеренных смещений изображения в поле зрения каждой субапертуры датчика ВФ по функциям отклика в виде смещений.

На рис. 1 приведены результаты коррекции статических aberrаций ВФ, вносимых вторым зеркалом.

Эффективность коррекции ВФ оценивалась величиной $\eta = (\langle \text{RMS}_1 \rangle - \langle \text{RMS}_2 \rangle) / \langle \text{RMS}_1 \rangle$, где $\langle \text{RMS}_1 \rangle$ и $\langle \text{RMS}_2 \rangle$ – усредненные по времени среднеквадратические отклонения ВФ от опорного в режиме без коррекции и после подачи сигналов управления соответственно. При статических aberrациях эффективность компенсации искажений волнового фронта равна 0,990. Оба алгоритма формирования сигналов управления одинаково хорошо работают.

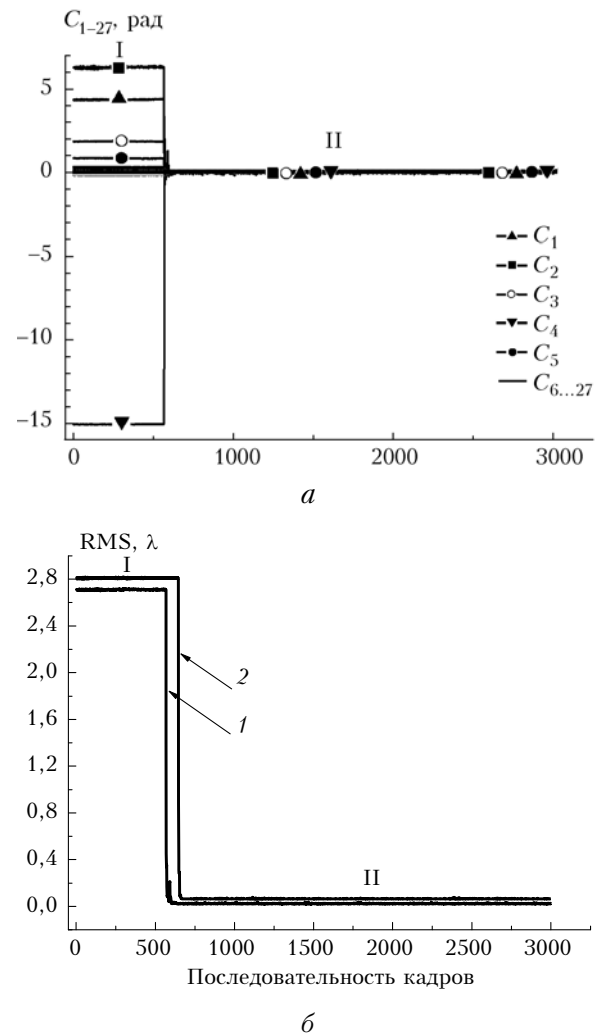


Рис. 1. Коэффициенты разложения по 27 полиномам Цернике aberrаций ВФ (а) и среднеквадратическое отклонение ВФ излучения с длиной волны 0,63 мкм (б) в режиме с разомкнутым контуром управления (I) и в режиме коррекции волнового фронта деформируемым зеркалом (II) (1 – формирование сигналов управления с использованием коэффициентов разложения по функциям отклика в виде полиномов Цернике, 2 – в виде смещений изображения)

Испытания деформируемого зеркала DM2-100-31 в АОС БСВТ показали, что исследуемое зеркало хорошо корректирует aberrации оптической системы и искажения, вызванные павильонной турбулентностью (рис. 2, а). Но при коррекции атмосферных искажений ВФ эффективность адаптивной системы существенно снижается (рис. 2, б).

Низкая эффективность коррекции ВФ обусловлена следующими причинами:

- сильное ветровое раскачивание сидеростатного зеркала приводит к угловому смещению изображения, в 6–8 раз превышающему диапазон углов наклона управляемого зеркала;
- рабочий диапазон напряжений управляемого зеркала DM2-100-31 недостаточен для коррекции ВФ в конкретной схеме АОС;

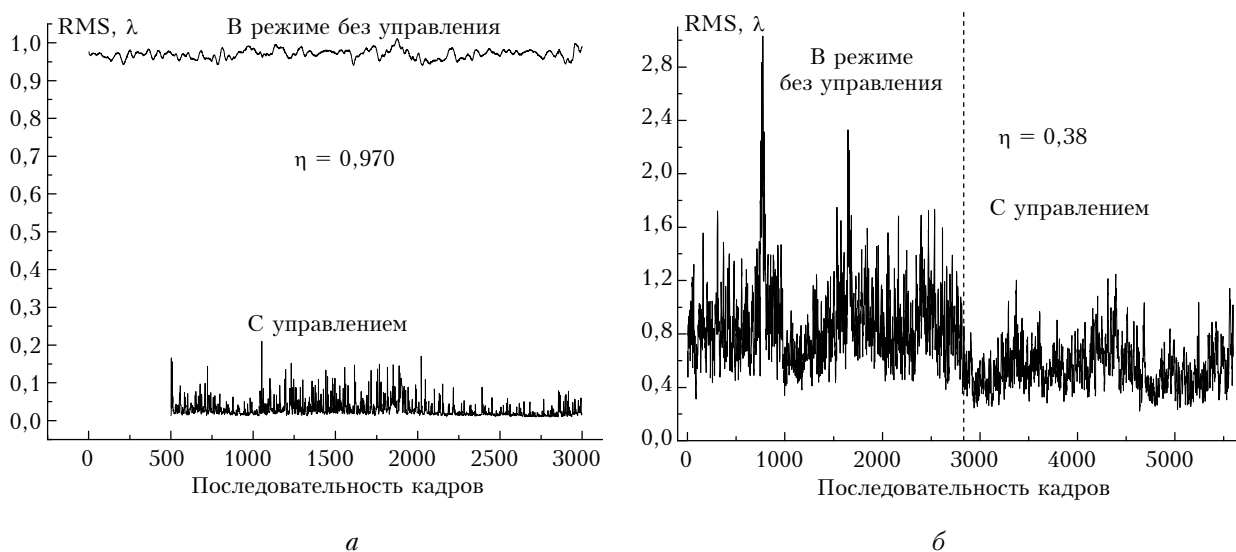


Рис. 2. Отклонения от плоскостности ВФ излучения с длиной волны 0,535 мкм в режимах с разомкнутым и замкнутым контурами управления при коррекции аберраций оптической системы (а) и атмосферных искажений ВФ (б)

— большое время установления управляемого зеркала DM2-100-31 (в среднем 23 мс, максимальное — 60 мс) не позволяет корректировать ВФ во всем частотном диапазоне изменения атмосферных искажений.

Для адаптивной оптической системы БСВТ необходимо управляемое зеркало, разработанное с учетом специфики конструкции БСВТ и астроклимата места расположения телескопа. В существующей схеме АОС диапазон углов наклона управляемого зеркала должен быть не менее $\pm(1,5-2)$ угл. мин, время установления не более 5 мс. При выборе конфигурации и количества актюаторов деформируемого зеркала необходимо учитывать качество видения телескопа, которое определяется радиусом Фрида. По оценкам при средних условиях наблюдения на БСВТ радиус Фрида равен 40–55 мм.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем» (2009–2011).

1. Александров А.Г., Завалов В.Е., Кудряшов А.В., Панченко В.Я., Рукосуев А.Л., Самаркин В.В. Адаптивная оптика для мощных лазеров со сверхкороткими импульсами излучения // Сб. трудов ИПЛИТ РАН. 2005. С. 55–70.
2. Лукин В.П., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Григорьев В.М., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д., Чупраков С.А. Развитие элементов адаптивной оптики для солнечного телескопа // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1099–1104.

L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, P.G. Kovadlo, P.A. Konyaev, E.A. Kopylov, V.P. Lukin, V.D. Trifonov. **DM2-100-31 controllable mirror efficiency in adaptive optics system at Big Solar Vacuum Telescope.**

The results of bimorph deformable mirror DM2-100-31 testing in AOS at BSVT are described. It is shown that the tip – tilt range of the controllable mirror is not enough for image stabilization in condition of strong wind swinging of telescope construction components. Slow response and insufficient range of controllable mirror surface deformation within clear aperture 60 mm does not allow a high performance of wave front correction.