ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИМОРФНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ЗЕРКАЛА В АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Н. Н. Ботыгина, О. Н. Емалеев, П. А. Коняев, Е. А. Копылов, В. П. Лукин

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Традиционно, в адаптивных системах, как правило, используется два управляемых зеркала: одно для управления общими наклонами волнового фронта и второе для коррекции высших аберраций волнового фронта [1]. Недостатком таких схем является большая длина оптического пути в адаптивных оптических системах, вследствие чего возникают дополнительные искажения волнового фронта.

В работе предлагается использовать иной подход в построении АОС, а именно когда одним управляемым элементом предлагается производить коррекцию и общих углов наклона и более высоких аберраций. В данной работе, в качестве элемента, корректирующего волновой фронт, в АОС БСВТ использовалось деформируемое биморфное зеркало DM2-100-31, разработанное ООО «Найт-Н(опт)» для повышения качества фокусировки в лазерных системах [2]. Зеркало имеет световую апертуру 105 мм. Диапазон управляющих напряжений –240 В – +300 В.

Биморфное деформируемое зеркало (далее зеркало) представляет собой трехслойную пластину, первая пластина с отражающим покрытием выполнена из оптического стекла, другие две пластины из пьезокерамического материала. Эти пластины жестко склеены между собой. Схема зеркала показана на рис. 1.

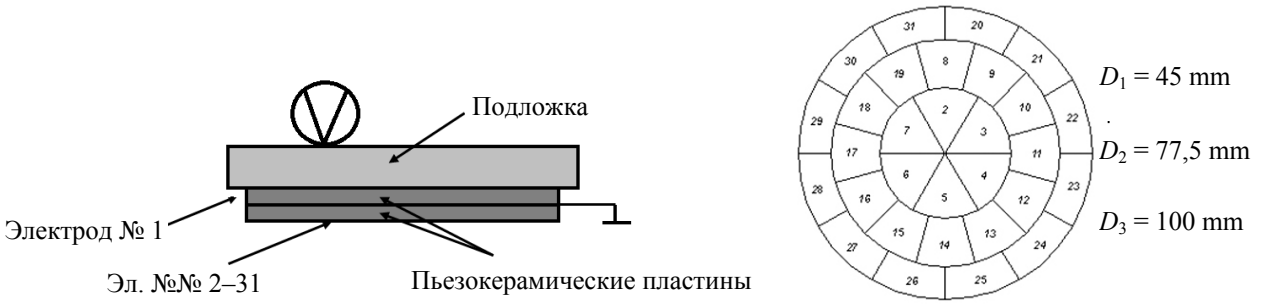


Рис. 1. Схема зеркала и расположение пьезоэлектрических пластин

При таком подходе, для компенсации общих углов наклона предлагается использовать внешнее кольцо электродов зеркала, которое исключается из световой апертуры зеркала, а компенсация аберраций волнового фронта на световой апертуре зеркала обеспечивается управляющими напряжениями на внутренних электродах зеркала.

Работа управляемого зеркала на ограниченной световой апертуре с отдельным управлением по общим углам наклона является нехарактерной для него и в связи с чем необходимо провести исследование его характеристик в условиях предполагаемой работы зеркала.

Из-за особенности конструкции биморфного зеркала качество поверхности зависит от внешних условий эксплуатации, поэтому первоначально необходимо производить процедура начальной коррекции поверхности зеркала. Деформация начальной плоскостности поверхности (Δ) зеркала составляла 2,548 мкм, среднеквадратическое отклонение (СКО) от плоскостности поверхности – 0,817 мкм. Для коррекции начальных аберраций найдены напряжения для выравнивания на всей поверхности зеркала. Остаточная деформация поверхности после выравнивания составила Δ = 0,301 мкм, СКО = 0,03 мкм. Проверялась воспроизводимость этой поверхности при приложении фиксированного напряжения на электроды зеркала. Величина корректировки напряжения составила: на 1 электроде, отвечающим за изменения кривизны поверхности зеркала (фокусировку),

до ±14 В, на 2 кольце (2–7 электроды) до ± 8 В, на 3 кольце (8–19 электроды) до ±20 В, на 4 кольце (20–31 электроды) до ± 18 В.

Методом линейной аппроксимации, было рассчитано распределение управляющих напряжений на электроды внешнего кольца для создания наклона зеркала по оси *X* и *Y*. При измерении угловой чувствительность зеркала по приложенному напряжению с помощью интерферометра, контролировалась плоскостность рабочей поверхности зеркала (рис. 2).

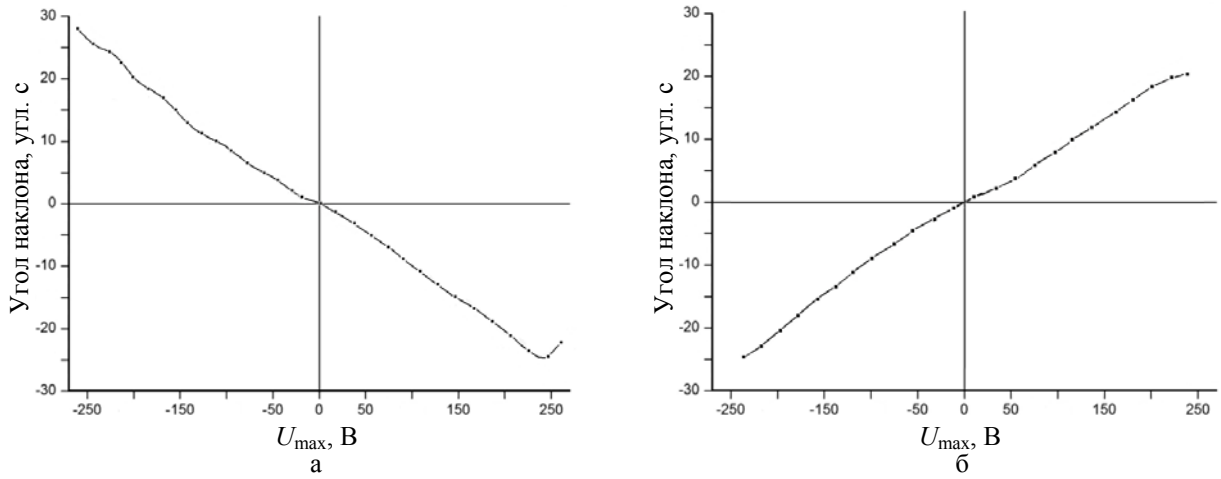


Рис. 2. Зависимость угла наклона зеркала от приложенного напряжения на внешнее управляющее кольцо зеркала по оси *X* (а) и *Y* (б)

Максимальная абсолютная ошибка измерений угла наклона, выраженная в среднеквадратическом отклонении, во всем диапазоне управляющих напряжений не превышает ± 0,51 угл. с по оси *X* и ± 0,59 угл. с по оси *Y*. Рис. 2 показывает, что статическая характеристика управляемого по углам наклона зеркала близка к линейной, в диапазоне управляющих напряжений ± 240 В. Одновременно контролировалась остаточная деформация поверхности зеркала (рис. 3).

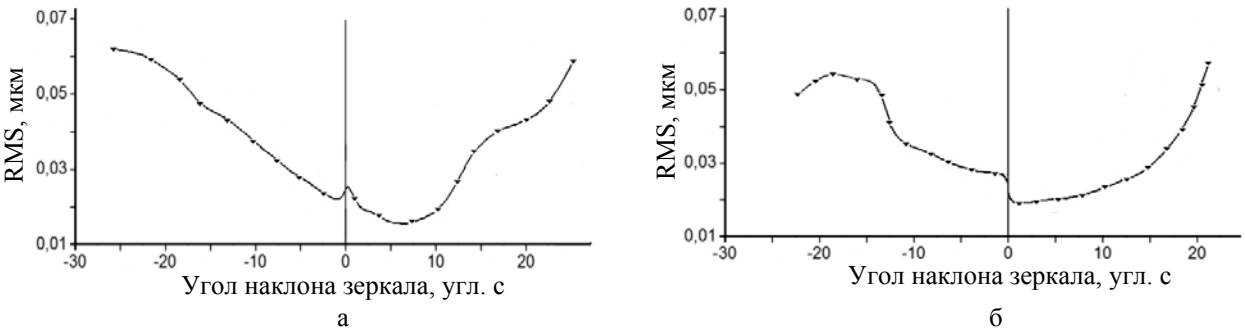


Рис. 3. Деформация на поверхности зеркала при в режиме наклона внешним кольцом электродов по осям *X* (а) и *Y* (б)

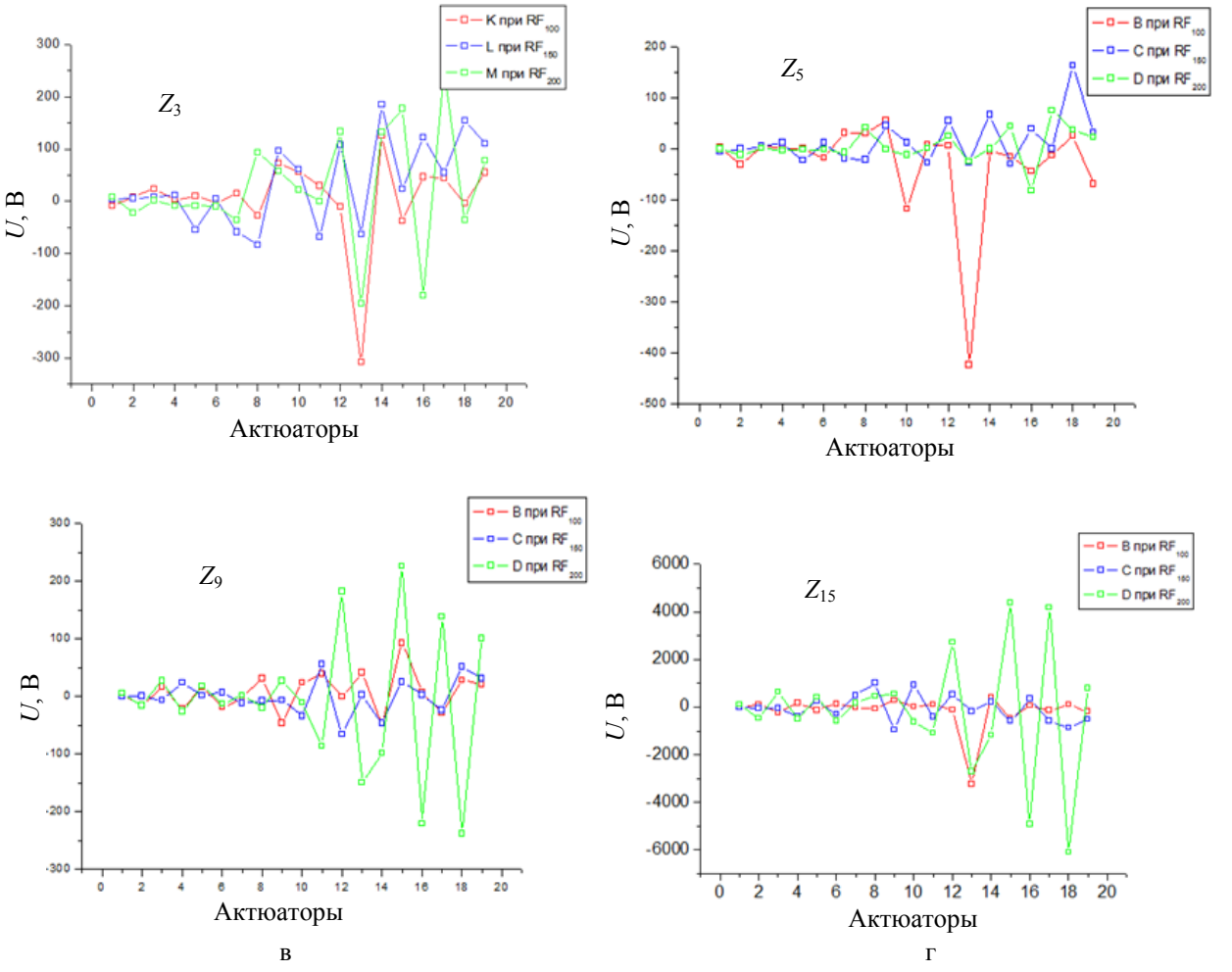
При управлении плоскостью зеркала по углам наклона максимальная деформация плоскости не превышает Δ = 0,14 мкм (~λ/10; λ = 0,63 мкм).

Так как при коррекции волнового фронта функция аберраций волнового фронта представляется в виде линейной комбинацией функции отклика, то исследование линейности деформации от напряжения, приложенного к конкретному электроду, является важной задачей. Традиционно аберрации волнового фронта принято описывать разложением по полиномам Цернике, поэтому в работе проверялась линейность коэффициентов разложения при полиномах от приложенного к электродам напряжения. Было определено, что 50 % коэффициентов разложения 19-и функций

отклика не попадает в 20 % интервал линейности по напряжению, что приводит к погрешности воспроизведения волнового фронта управляемым зеркалом.

В численном эксперименте проводилось исследование влияния нелинейности деформации управляемого зеркала на воспроизводимость полиномов Цернике. Каждый конкретный полином Цернике последовательно разлагался по трем видам функций отклика, экспериментально измеренным при напряжениях 100, 150, 200 В. В численном эксперименте использовались функции отклика, измеренные при последовательной подаче напряжения 100 вольт на каждый электрод. Вычислялись сигналы управления, подаваемые на каждый электрод управляемого зеркала DM2–100–31.

Если деформации управляемого зеркала линейны, то для воспроизведения конкретного полинома, подаваемые на электроды напряжения не должны изменяться при разложении по функциям отклика, измеренным при напряжениях 100, 150, 200 В. Коэффициенты разложения по функциям отклика, при изменении базиса, должны линейно изменяться: линейно увеличиваться, если функция отклика измеряется при меньшем напряжении и уменьшаться, если функция отклика измеряется при большем напряжении. На рис. 4 приведены примеры того, какие необходимо подать напряжения для того, чтобы воспроизвести зеркалом конкретный полином Цернике.



в г

Рис. 4. Напряжения, необходимые для того, чтобы воспроизвести 3, 5, 9, 15 полиномы Цернике, а, б, в, г соответственно. Красным цветом показаны напряжения, полученные при разложении полинома по функциям отклика измеренные при напряжении 100 В, синим – 150 вольт, зеленым – 200 В

Из рис. 4 наблюдается большой разброс сигналов управления на каждом из электродов для воспроизведения конкретного полинома. Максимальный разброс напряжений достигает, в некоторых случаях и 100 %. Так как исследуемое зеркало используется в АОС в замкнутом контуре управления, собственные ошибки зеркала могут быть исправлены за несколько шагов управления при условии, что частота зеркала значительно превышает, как минимум на 1 порядок, частоту изменения аберраций ВФ, приходящего на входную апертуру телескопа

На лабораторном макете, созданном в ИОА СОРАН, исследовалась возможность и точность компенсации аберраций высших порядков волнового фронта на апертуре диаметром 60 мм. Для искажения волнового фронта излучения, падающего на исследуемое зеркало, использовалось второе деформируемое зеркало. Формирования сигналов управления для коррекции вносимых аберраций производилось на основе разложения измеренных аберраций ВФ по функциям отклика в виде полиномов Цернике.

На рис. 5 приведены результаты коррекции статических аберраций ВФ, вносимых вторым зеркалом.

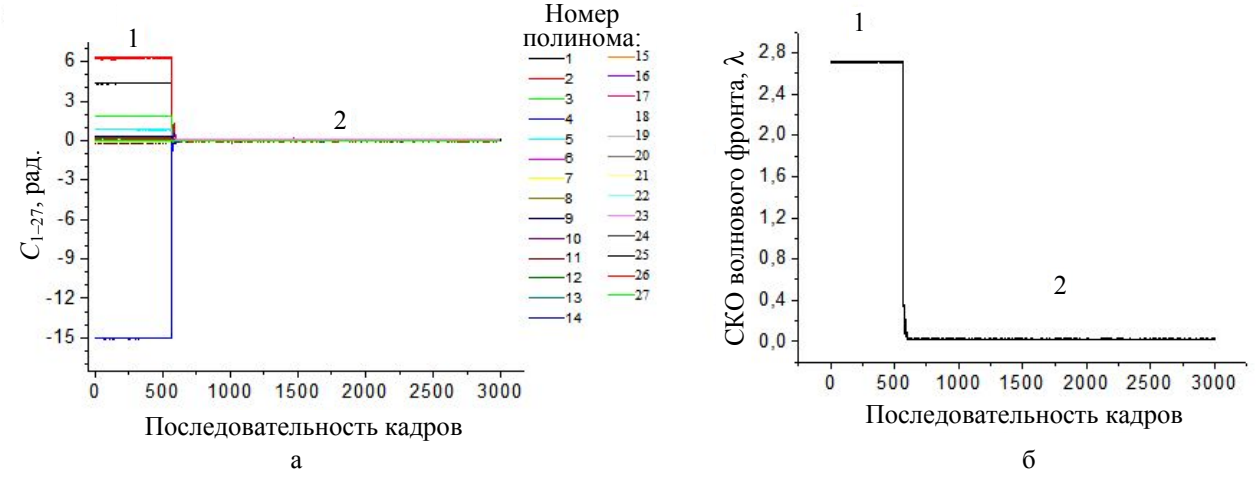


Рис. 5. Коэффициенты разложения по 27-и полиномам Цернике аберраций ВФ и среднеквадратическое отклонение ВФ от плоскостности: 1 – без управления, 2 – при управлении

Эффективность коррекции ВФ оценивалась величиной $\eta = (\langle\text{СКО ВФ}_1\rangle - \langle\text{СКО ВФ}_2\rangle)/\langle\text{СКО ВФ}_1\rangle$, где $\langle\text{СКО ВФ}_1\rangle$ и $\langle\text{СКО ВФ}_2\rangle$ – усредненные по времени среднеквадратические отклонения ВФ от опорного в режиме без коррекции и после подачи сигналов управления.

При коррекции статических аберрациях эффективность компенсации искажений волнового фронта равна 0,990.

Для оценки динамических свойств управляемого зеркала измерялась переходная характеристика. На различные электроды зеркала подавалось ступенчатое напряжения и датчиком волнового фронта Шека-Гартмана, с частотой 262 кадр/с., регистрировались смещения изображения гартманограммы. Было установлено, что время установления деформация поверхности зеркала в среднем составляет 23 мс.

Исследование эффективности применения управляемого зеркала DM2-100-31 в адаптивной оптической схеме с замкнутым контуром управления проводилось в оптической схеме Большого солнечного вакуумного телескопа в узком диапазоне (10 нм) на длине волны 535 нм. Исследование проводилось при качестве астрономического видения соответствовавшему радиусу Фрида 50 мм.

Для улучшения качества изображения, АОС должна корректировать аберрации как самой оптической системы включая павильонные аберрации и аберрации ВФ вносимые атмосферной турбулентностью. Для проверки эффекта коррекции павильонных аберраций в первом фокусе телескопа устанавливалась точечная диафрагма. Эффективность работы зеркала определятся из сравнения остаточных и корректируемых аберраций волнового фронта. На рис. 6 показан эффект компенсации аберраций оптической системы (а) и коррекции павильонных эффектов (б).

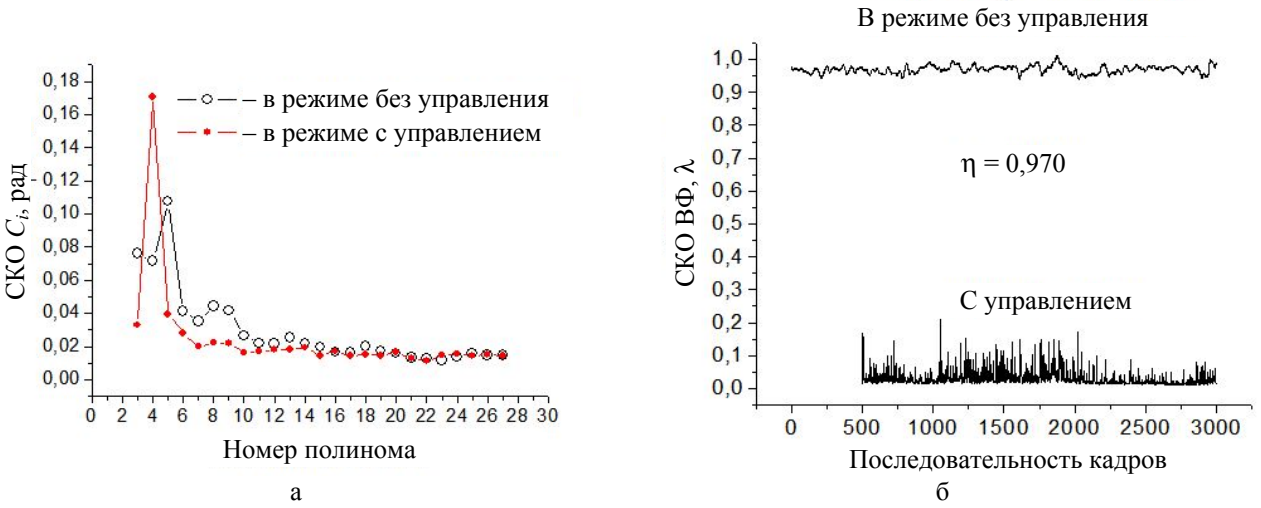


Рис. 6. Компенсация аберраций оптической системы БСВТ (а) и отклонение от плоскостности волнового фронта излучения в режимах разомкнутого и замкнутого контура управления АОС при коррекции аберраций вызванных павильонными эффектами

Среднеквадратическое отклонение волнового фронта уменьшилось в 36 раз. Эффективность работы АОС составила η = 0,97. В режиме работы АОС БСВТ по коррекции солнечных изображений разложение волнового фронта производилось по 27 полиномам Цернике при открытой полевой диафрагме в первом фокусе телескопа. Конечно же, наибольший вклад в сумму аберраций волнового фронта излучения вносят общие углы наклона волнового фронта. Что явно наблюдается при контроле всех аберраций в режиме замкнутого и разомкнутого контура управления АОС (рис. 7).

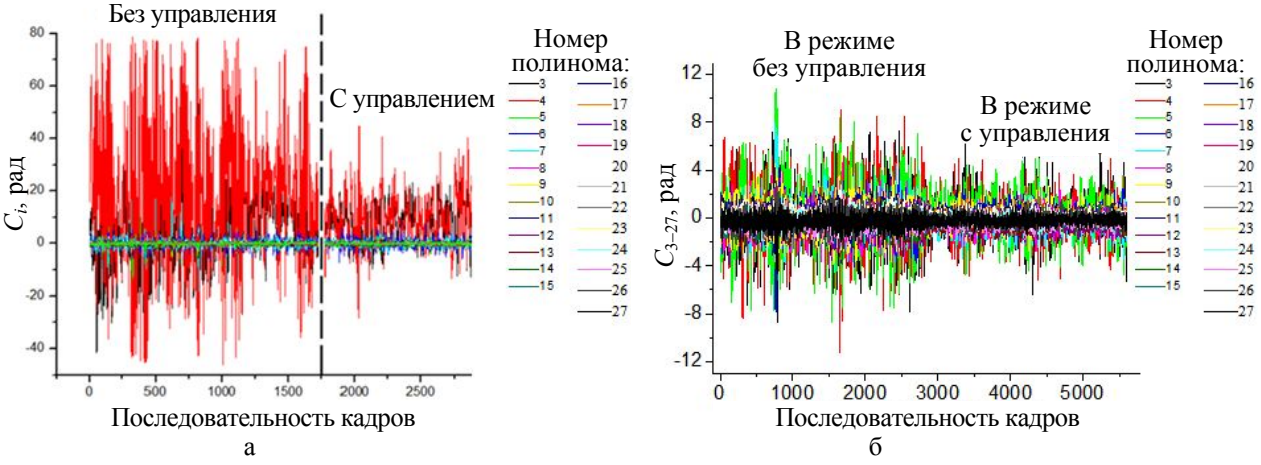


Рис. 7. Результаты компенсации аберраций ВФ с управлением по общим наклонам (а) и без учета общих наклонов (б)

Отдельно контролировался эффект стабилизации солнечных изображений без коррекции более высоких аберраций. На рис. 8 показана коррекция общих углов наклона ВФ исследуемым зеркалом.

После подачи сигналов управления на деформируемое зеркало величина углов наклона волного фронта падает примерно в 2–2,5 раза. Зеркало частично стабилизирует изображение солнечных объектов. Ярко выраженные всплески в режиме управления свидетельствуют о том, что либо система переходит в режим управления с положительной обратной связью (теряет устойчивость), либо объект слежения уходит из окна анализа ДВФ за счет ветровых колебаний сидеростатного зеркала. Во время проведенных испытаний на БСВТ был сильный ветер в плоскости перпендикулярной плоскости зеркала.

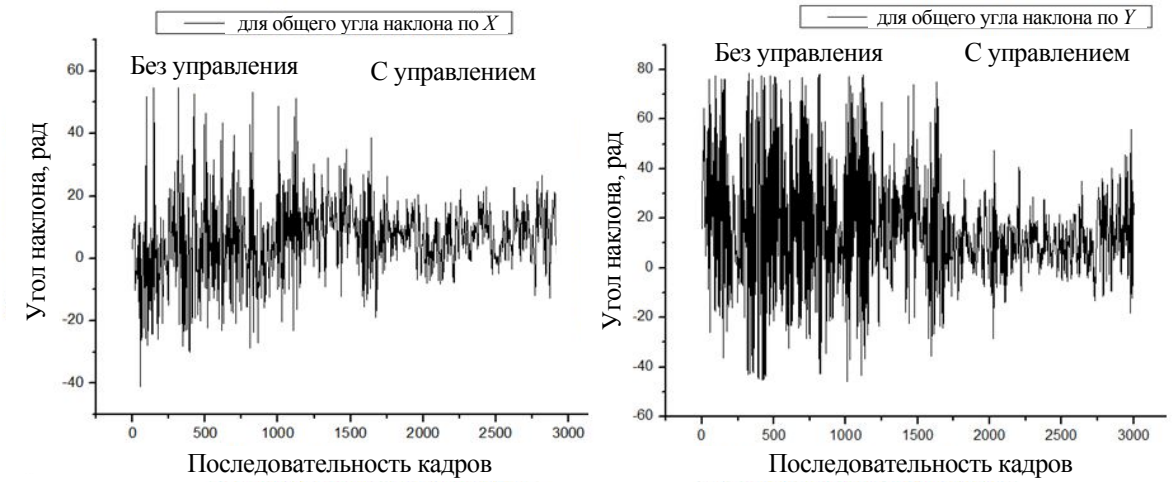


Рис. 8. Эффект коррекции общих углов наклонов волнового фронта управляемым зеркалом DM2-100-31

В два раза происходит уменьшение стрелы прогиба управляемого зеркала при коррекции дефокусировки в разомкнутом и замкнутом контуре управления (рис. 9).

Произведена отдельная оценка влияния атмосферной турбулентности и отдельно влияние павильона, на вносимые углы наклона и дефокусировки волнового фронта.

При коррекции атмосферных искажений волнового фронта эффективность работы системы резко снижалась до $\eta = 0{,}38$ (рис. 10).

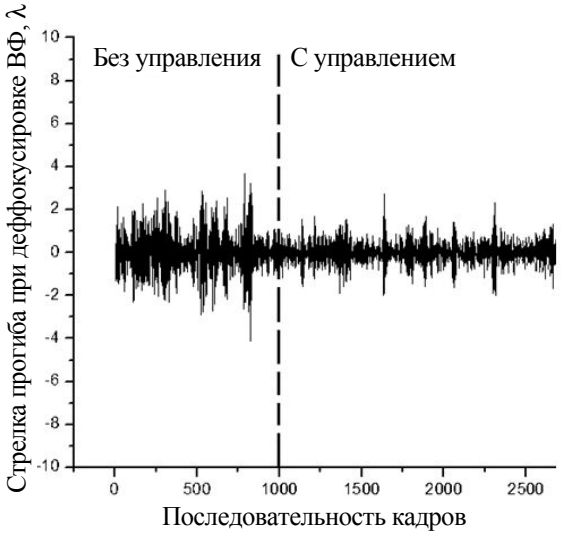


Рис. 9. Эффект коррекции дефокусировки в АОС БСВТ

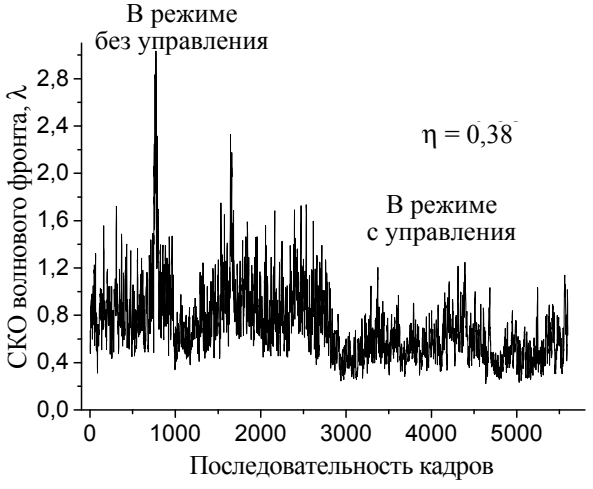


Рис. 10. Отклонение от плоскостности волнового фронта излучения в режимах разомкнутого и замкнутого контура управления АОС (с 3000 кадра) при коррекции атмосферных аберраций

Вывод

При исследовании линейности функций отклика было выявлено, что только 50 % рассмотренных аберраций линейны относительно подаваемых на приводы зеркала напряжений.

В численном эксперименте показано, что ошибки разложения полиномов Цернике по функциям отклика зеркала не превышают $6 \cdot 10^{-5}$ рад ($10^{-5}\lambda$). Отсюда следует, что зеркало DM2-100-31

при ограничении световой апертуры до 60 мм способно воспроизводить полиномы Цернике с заданной точностью.

Испытания деформируемого зеркала DM2-100-31 на лабораторном макете АОС показали, что относительно статические аберрации компенсируются с достаточной точностью, а именно СКО волнового фронта уменьшаются почти 100 раз. Соответственно, проверка работоспособности зеркала DM2-100-31 при совмещении двух функций, а именно управление общими наклонами внешним кольцом электродов, находящимся вне световой апертуры, и компенсации аберраций выше первого порядка электродами на световой апертуре, подтверждает возможность реализации одноконтурных АОС.

Из результатов экспериментальных исследований, следует, что исследуемое зеркало DM2-100-31 отлично корректирует статические аберрации оптической системы, уменьшая в 36 раз СКО волнового фронта от плоскостности. При компенсации атмосферных аберраций волнового фронта эффективность работы зеркала резко падает до 2,5 раза. Это связанно с тем, что уровень атмосферных искажений волнового фронта на момент исследования значительно превышал рабочие характеристики зеркала. Определенно, что сильное влияние в дрожание изображения вносят ветровые дрожания сидеростатного зеркала телескопа. Таким образом, использование гибкого зеркала DM2-100-31 в АОС показало низкую эффективность из-за недостаточного динамического диапазона зеркала по углам наклона. Недокомпенсация углов наклона приводит к возрастанию ошибки измерения аберраций волнового фронта, т. к. объект слежения уходит из окна анализа датчика волнового фронта.

Для реализации более эффективной одноконтурной адаптивной системы, компенсирующей атмосферные искажения волнового фронта необходимо использовать корректор, прежде всего с малой инерционностью электродов зеркала. Таким образом, проведенные наблюдений показали, что раздельное управление одним гибким зеркалом имеет некоторые преимущества, что не позволяет отказаться от общей концепции использования раздельного способа компенсации общих и локальных наклонов. Учитывая сезонную изменчивость качества астрономического видения [3] для отдельных видов работ, раздельное использование компенсаторов имеет определенные преимущества.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант № 15-19-20013.

Список литературы

1. Лукин В. П., Фортес Б. В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере // Новосибирск. Изд-во СО РАН. 1999. 212 с.

2. 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 // Сборник трудов ИПЛИТ РАН. 2005. С. 55–70.

3. Ботыгина Н. Н., Ковадло П. Г., Копылов Е. А., Лукин В. П., Туев М. В., Шиховцев А. Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.