

Развитие элементов адаптивной оптики для солнечного телескопа

В.П. Лукин^{1,2}, Л.В. Антошкин¹, Н.Н. Ботыгина¹, В.М. Григорьев³,
О.Н. Емалеев¹, П.Г. Ковадло³, П.А. Коняев¹, Е.А. Копылов¹,
В.И. Скоморовский³, В.Д. Трифионов³, С.А. Чупраков^{3*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

Поступила в редакцию 3.08.2011 г.

Описаны устройства и компоненты, входящие в адаптивную оптическую систему «Ангара», предназначенную для коррекции изображения в Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории. Показано, что применение модернизированной адаптивной системы на БСВТ не только снижает турбулентные атмосферные искажения получаемых изображений, но и придает телескопу новое качество – возможность дальнейшего усовершенствования и реализации новых способов наблюдения Солнца.

Ключевые слова: солнечный телескоп, турбулентная атмосфера, адаптивная оптика, датчик волнового фронта, деформируемое зеркало; solar telescope, turbulent atmosphere, adaptive optics, wavefront sensor, deformable mirror.

В последние годы в мире появился целый ряд астрономических приборов, в которых обеспечивается адаптивная коррекция волнового фронта (ВФ) оптической волны. Современной тенденцией стало также внедрение адаптивной коррекции в уже существующие «неадаптивные» телескопы. В США по такой схеме проводится обновление знаменитого 5-метрового Паломарского телескопа. При этом дорогостоящий телескоп получает новые возможности, увеличиваются его эффективность и производительность. Надо отметить, что для России в настоящее время, ввиду экономических трудностей, путь внедрения адаптивных систем в уже работающие телескопы является практически единственно возможным.

Для совершенствования техники достижения высокого пространственного разрешения Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) методами адаптивной оптики (АО), для отработки режимов наблюдений и планирования научных задач необходимо знать: какое пространственное разрешение при ис-

пользовании в полной мере возможностей, заложенных в БСВТ, позволяет реализовать астроклимат места установки. Кроме того, с разработкой методов и техники адаптивной оптики тесно связаны задача совершенствования отдельных узлов телескопа и поиск новых методик на пути достижения высокого разрешения.

Повышенный уровень рассеянного света значительно снижает разрешение телескопа и в целом эффективность работы адаптивной системы. Исследования атмосферного рассеянного света в районе телескопа показывают, что его вклад в уменьшение контраста солнечного изображения при средних погодных условиях не превышает 30%. Следовательно, основная доля рассеянного света создается элементами конструкции телескопа и ее снижение представляет собой самостоятельную задачу. В какой-то мере сделанные выводы подтверждаются ночными наблюдениями. Высокое разрешение на изображении имеют только детали с высоким собственным контрастом. По снимкам Луны, полученным с экспозицией 1/125 с в прямом фокусе, разрешение отдельных высококонтрастных деталей достигает 0,35–0,40 угл. с.

Проведенный анализ качества изображений, полученных на БСВТ, дал возможность оценить три составляющие, от которых зависит успешная работа телескопа, – реальное качество оптики, астроклимат павильона телескопа и астроклимат места установки телескопа. В свою очередь эти данные являются

* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru); Нина Николаевна Ботыгина (bnp@iao.ru); Виктор Михайлович Григорьев; Олег Назарович Емалеев (eon@iao.ru); Павел Гаврилович Ковадло; Петр Алексеевич Коняев (petrkonyayev@gmail.com); Евгений Анатольевич Копылов; Валерий Иосифович Скоморовский; Виктор Дмитриевич Трифионов; Сергей Александрович Чупраков.

исходной информацией для разработки и успешной эксплуатации адаптивной системы БСВТ.

Разработка и создание макета адаптивной системы предусматривают решение трех основных задач: разработка датчика волнового фронта, выбор исполнительного оптического корректора и создание программного обеспечения для измерения искажений ВФ, управления деформируемым зеркалом и анализа качества скорректированного изображения. Технически макет адаптивной системы БСВТ включает в себя высокочувствительную быстродействующую камеру, обеспечивающую возможность получения высококонтрастного изображения участка солнечной поверхности, скоростной процессор для вычисления искажений ВФ и активное зеркало-корректор, позволяющее компенсировать в реальном времени аберрации ВФ.

Все элементы адаптивной системы были макетированы и испытаны в реальных условиях на БСВТ. Для коррекции волнового фронта были последовательно опробованы плоское зеркало с двухкоординатным приводом для компенсации общих наклонов волнового фронта, составное и гибкое зеркала для коррекции как общего наклона ВФ, так и отдельных его участков.

Следует отметить, что наибольшие проблемы возникли с измерением аберраций ВФ при использовании в качестве источника излучения фрагмента солнечной грануляции. Опыт показал, что в условиях низкого контраста грануляционной картины более эффективным является модифицированный корреляционный датчик с маской Шэка–Гартмана в виде матрицы дифракционных микролинз.

С учетом предшествующих испытаний опытных образцов компенсаторов оптических атмосферных помех и с использованием последних данных наблюдений солнечного изображения разработана и опробована модернизированная оптическая схема БСВТ с адаптивными элементами [1]. На рис. 1 показана общая оптическая схема БСВТ, содержащая вакуумную трубу с входным иллиминатором, объектив телескопа диаметром 0,76 м и фокусным расстоянием 40 м, диагональное зеркало, выходной иллиминатор и плоскость первичного изображения.

В схему введены сферическое зеркало – коллиматор ($f = 4$ м), адаптивное гибкое зеркало, перестраивающий объектив ($f = 25,7$ м), светоделительный кубик, специальный окуляр, матрица дифракционных микролинз в выходном зрачке телескопа, CCD-камера 1 датчика волнового фронта и CCD-камера 2, регистрирующая исправленное изображение участка Солнца.

Изображение входного зрачка телескопа строится сферическим зеркалом-коллиматором без хроматических аберраций. Окуляр телескопической системы, формирующий выходной зрачок в плоскости входной диафрагмы датчика волнового фронта, выполнен в виде двух линзовых компонент, при изменении расстояния между которыми изменяется диаметр выходного зрачка телескопа, что позволяет использовать в датчике волнового фронта маски Шэка–Гартмана различной размерности и конфигурации.

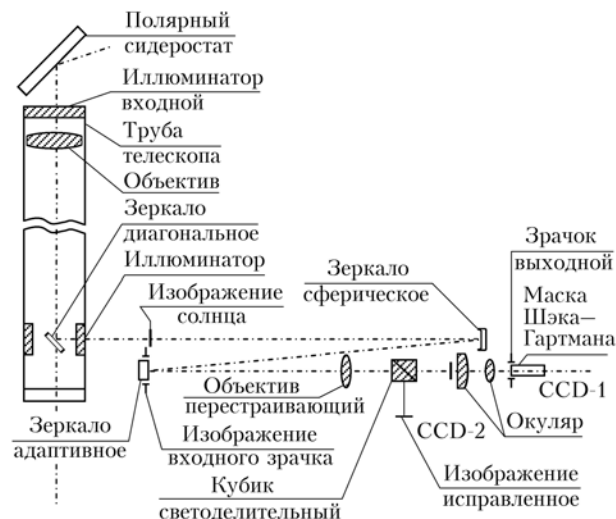


Рис. 1. Оптическая схема БСВТ с элементами адаптивной оптики

Световой пучок проходит входной иллиминатор вакуумной трубы и после объектива телескопа направляется диагональным зеркалом через выходной иллиминатор в плоскость изображения. Сферическое зеркало-коллиматор формирует изображение входного зрачка на адаптивном зеркале, которое отражает световой пучок на перестраивающий объектив. Светоделительный кубик делит пучок в двух направлениях: прямо на окуляр, образующий телескопическую систему с перестраивающим объективом и строящий выходной зрачок телескопа, в котором установлена маска Шэка–Гартмана датчика волнового фронта, и перпендикулярно на видеокамеру, регистрирующую исправленное изображение. Компьютер рассчитывает положение каждого изображения гартманогаммы относительно опорного и формирует сигнал управления на адаптивное гибкое зеркало. Исправленное изображение регистрируется второй видеокамерой.

Следует отметить, что адаптивное зеркало компенсирует как общие наклоны волнового фронта, так и локальные. Преимуществом одноконтурной схемы компенсации аберраций ВФ являются компактность системы АО и уменьшение влияния павильонной турбулентности на качество регистрируемого изображения. Полученный в ходе проведенных наблюдений опыт пока не позволяет сделать окончательный вывод о целесообразности использования одноконтурной или двухконтурной схемы компенсации аберраций ВФ. При определенных условиях, а именно при сильных инструментальных дрожаниях изображения, раздельное использование компенсаторов, на наш взгляд, имеет определенные преимущества.

Датчик волнового фронта и использование его для оценки видения через турбулентную атмосферу

Измерительным элементом адаптивной оптической системы БСВТ является корреляционный датчик

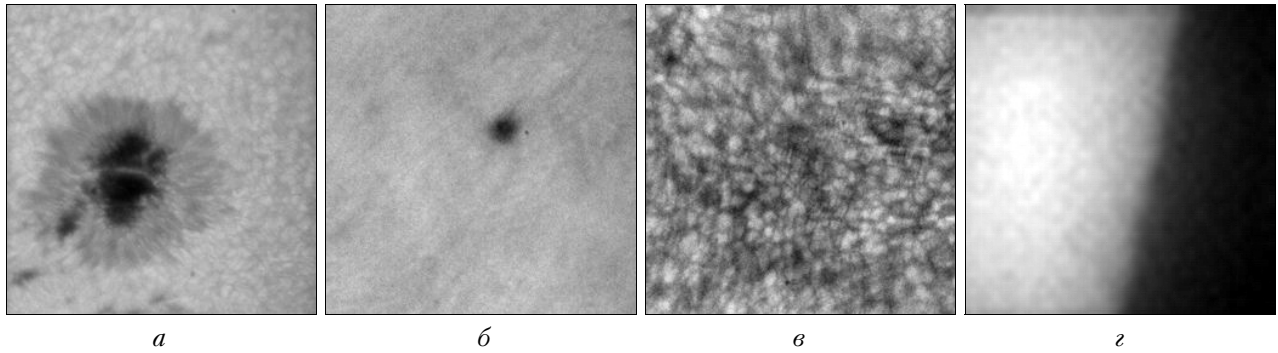


Рис. 2. Протяженные объекты на поверхности Солнца: *a* – пятно, *б* – пора, *в* – грануляция, *г* – край солнечного диска (для наглядности контраст изображений увеличен)

Шэка–Гартмана [2], а измеряемыми величинами – локальные наклоны ВФ излучения, падающего на входную апертуру телескопа. Датчик состоит из рас-тра квадратных дифракционных микролинз с числовой апертурой 0,019 и видеокамеры GE680 «Prosilica» (Канада) с разрешением 640×480 пикселей (1 пиксель = 7,4 мкм). Угловое поле зрения адаптивной системы БСВТ не превышает 58 угл. с. На рис. 2 показаны фрагменты солнечного диска, по которым работает корреляционный датчик Шэка–Гартмана.

Регистрируемая датчиком гартманограмма представляет собой матрицу изображений этого фрагмента. Искажения ВФ вызывают смещения изображений. На основе измеренных смещений восстанавливается волновой фронт на входной апертуре телескопа. Для работы адаптивной системы с различными участками солнечного диска в датчике предусмотрена возможность выбора оптимального метода измерения смещений изображения в зависимости от его структуры и контраста [3]. Вычислительные алгоритмы датчика волнового фронта реализованы в виде пакета прикладных программ для рабочих станций на базе процессоров Intel в операционной среде Windows.

При работе адаптивной оптической системы (АОС) в режиме с разомкнутым контуром управления измеренные значения локальных наклонов ВФ на входных субапертурах телескопа можно использовать для оценки радиуса Фрида r_0 , характеризующего атмосферную турбулентность на пути распространения излучения. Применение дифференциального метода измерений [4] позволяет уменьшить ошибку определения r_0 , связанную с вибрациями элементов конструкции телескопа.

Зная радиус Фрида, можно оценить качество видения ($\sim \lambda/r_0$, где λ – длина волны излучения) при различных атмосферных условиях. Накопленные данные об астроклимате могут быть использованы при совершенствовании элементов АОС.

При отсутствии на Солнце достаточно контрастных объектов, по которым надежно работает корреляционный датчик Шэка–Гартмана, оценку r_0 можно проводить по измерению смещения небольшого фрагмента изображения края диска в направлении, перпендикулярном линии края [5].

В таблице приведены значения r_0 , вычисленные по одной из реализаций датчика Шэка–Гартмана при различных относительных разносах субапертур R/r (R – расстояние между центрами субапертур, r – размер субапертуры).

Относительный разнос субапертур	8	9	10	11
Среднее значение r_0 , мм	51,06	52,46	52,99	52,54
СКО, мм	2,17	2,58	1,92	1,36

Оценка r_0 проводилась из усреднения измерений на нескольких парах одинаково разнесенных субапертур. Входная апертура телескопа разбивалась маской Гартмана на 120 субапертур размером $49,80 \times 49,80$ мм. Локальные наклоны ВФ вычислялись из измерений смещения изображения участка края солнечного диска размером 15,30 угл. с. Угловой размер поля опорного изображения равнялся $30,60 \times 30,60$ угл. с. Регистрация гартманограммы осуществлялась в узком спектральном диапазоне излучения, выделяемом светофильтром с максимальной пропусканием на длине волны 0,535 мкм и полосой пропускания 0,01 мкм, со скоростью 180 кадр/с при времени экспозиции кадра 5,2 мс. Объем реализации составлял 3000 кадров. Полученные результаты согласуются с оценкой радиуса Фрида из измерений контраста грануляционной картины [2].

Использование измерительного элемента адаптивной оптической системы для астроклиматических наблюдений даже при отсутствии на Солнце достаточно контрастных объектов значительно расширяет возможности БСВТ.

Анализатор качества изображения

Эффективность применения адаптивной оптики в системах формирования изображения оценивается качеством скорректированного изображения. Для анализа качества изображения на выходе адаптивной оптической системы БСВТ разработан аппаратно-программный комплекс [6], в состав которого входят: оптическая система переноса изображения из второго фокуса ($f = 25,7$ м) БСВТ в плоскость регистрации, видеокамера «Prosilica» GE680 с Ethernet-каналом передачи видеoinформации в компьютер

и специализированный пакет программ для обработки и анализа изображения. Благодаря эффективным алгоритмам параллельной обработки сигналов анализатор может работать в реальном времени регистрации изображения. Максимальная скорость регистрации, которую обеспечивает видеокамера при разрешении 640×480 пикселей, составляет 200 кадр/с. Частота кадров видеокамеры «Prosilica» GE680 зависит от времени экспозиции. Время экспозиции кадра регулируется в диапазоне от 30 мкс до 10 мс.

Оптическая система анализатора качества изображения (АКИ) переносит анализируемое изображение в плоскость регистрации с увеличением, обеспечивающим регистрацию изображения дифракционного качества. Угловой размер пикселя регистрации (элемента ПЗС-матрицы) равняется 0,11 угл. с, что соответствует половине дифракционного предела углового разрешения телескопа при диаметре объектива 600 мм. Уменьшение входной апертуры телескопа до 600 мм дает возможность проводить наблюдения в любое время при полном заполнении объектива светом, отраженным от сидеростатного зеркала.

В зависимости от режима работы АОС анализатор качества изображения выполняет различные функции. В режиме с замкнутой обратной связью АКИ служит для оценки эффективности АОС. Для этой цели в анализаторе реализована возможность оценки качества изображения по трем критериям: контрасту, резкости и по спектральному критерию. В режиме с разомкнутой обратной связью АКИ позволяет осуществлять отбор и накопление кадров с хорошим качеством изображения, а также обработку изображения с использованием цифровой пространственной фильтрации, корреляционного метода и метода адаптивного апертурного синтеза. Внешний вид анализатора качества изображения показан на рис. 3.

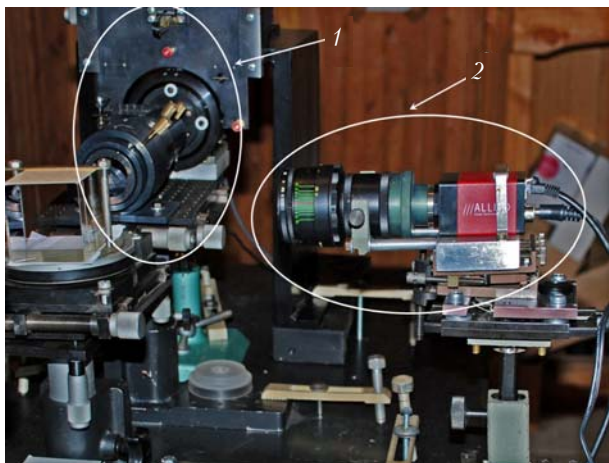


Рис. 3. Анализатор качества изображения в АОС БСВТ (1 – элементы датчика волнового фронта, 2 – АКИ)

Результаты анализа и вид опорного и усредненного изображений записываются в файлы и сохраняются. В программе предусмотрена возможность записи и анализа фильмов. На рис. 4 приведены графики, демонстрирующие эффективность стабилиза-

ции фрагмента изображения солнечной грануляции при использовании модифицированного корреляционного датчика смещения изображения [2].

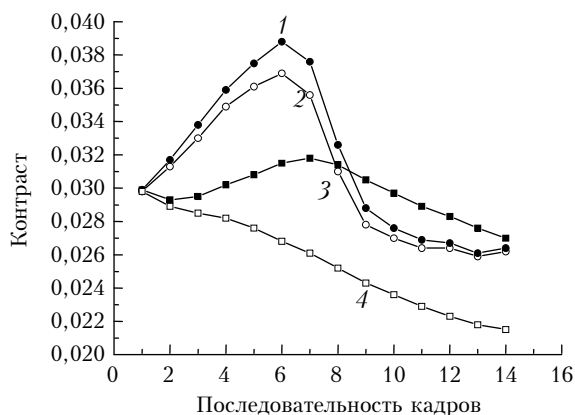


Рис. 4. Контраст текущего изображения и текущего среднего при стабилизации изображения солнечной грануляции (кривые 1, 3 соответственно) и в отсутствие стабилизации (кривые 2, 4)

Наблюдается заметное увеличение контраста накапливаемого (суммарного) изображения при стабилизации положения изображения, что важно при работе оптических инструментов, требующих экспозиций большой длительности.

В настоящее время данный анализатор внедрен на БСВТ и используется в рутинном режиме работы, позволяя при наблюдениях Солнца проводить отбор наиболее контрастных изображений.

Исследование возможности применения деформируемого зеркала DM2-100-31 в адаптивной оптической системе БСВТ

Для компенсации атмосферной турбулентности в адаптивных оптических системах, как правило, используются два управляемых зеркала: первое для управления общими наклонами волнового фронта, второе для компенсации высших аберраций волнового фронта [7]. Такие оптические схемы реализованы на солнечных телескопах [8, 9]. Альтернативным вариантом является адаптивная оптическая система с одним управляемым элементом, конструкция которого позволяет разделять управление наклонами волнового фронта и исправлять высшие аберрации волнового фронта. Преимуществом такой одноконтурной системы являются уменьшение влияния павильонной турбулентности за счет уменьшения длины оптического пути в АОС и компактность оптической схемы.

В разрабатываемой нами адаптивной системе используется одно управляемое деформируемое биморфное зеркало DM2-100-31 [10]. Зеркало имеет световую апертуру 105 мм. В адаптивной оптической системе БСВТ в плоскости управляемого зеркала формируется выходной зрачок телескопа диаметром

60 мм. Внешнее кольцо электродов (рис. 5) находится вне световой аппаратуры зеркала и используется для управления только наклонами зеркала.

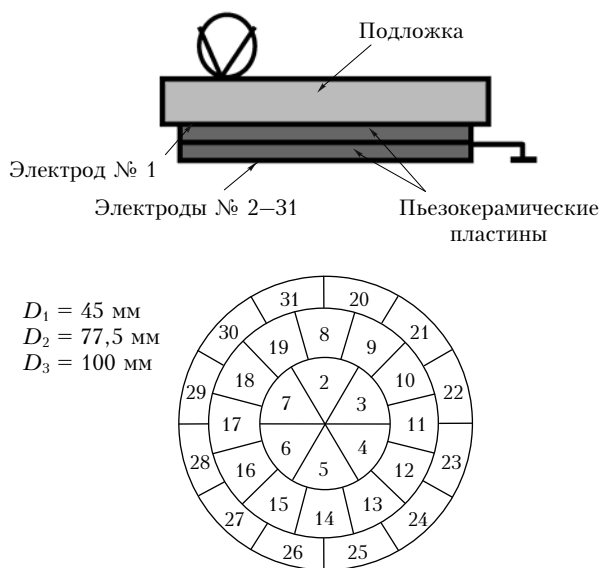


Рис. 5. Конструкция управляемого зеркала

Наклоны зеркала по оси X осуществляются при подаче в противофазе управляющих напряжений на электроды левого и правого полуколец, по оси Y — на электроды верхнего и нижнего полуколец. Управляющие напряжения распределяются по электродам полукольца (от центральных к крайним) пропорционально расстоянию от центров электродов до оси наклона зеркала.

Предварительные исследования статической характеристики управляемого по углам наклона зеркала (рис. 6) показали, что динамический диапазон линейного изменения углов наклона зеркала составляет ± 24 угл. с.

Динамический диапазон углов наклона зеркала позволяет компенсировать общие наклоны волнового фронта на входной апертуре телескопа в диапазоне $\pm 4,8$ угл. с.

При измерении угловой чувствительности зеркала контролировалась плоскостность поверхности зеркала. Деформация поверхности зеркала в пределах световой апертуры в режиме управления наклонами не превышала $\lambda/10$ [11].

Компенсация aberrаций волнового фронта в пределах световой апертуры зеркала обеспечивается управляющими напряжениями на 19 внутренних электродах зеркала. Оценка точности воспроизведения зеркалом отдельного полинома Цернике при уменьшении диаметра световой апертуры до 60 мм показала, что среднеквадратическое отклонение задаваемого и воспроизводимого волновых фронтов не превышает 10^{-4} рад [11].

Для оценки динамических свойств управляемого зеркала измерялась переходная характеристика. Из переходной характеристики следует, что время установления деформации поверхности зеркала в среднем составляет 23 мс.

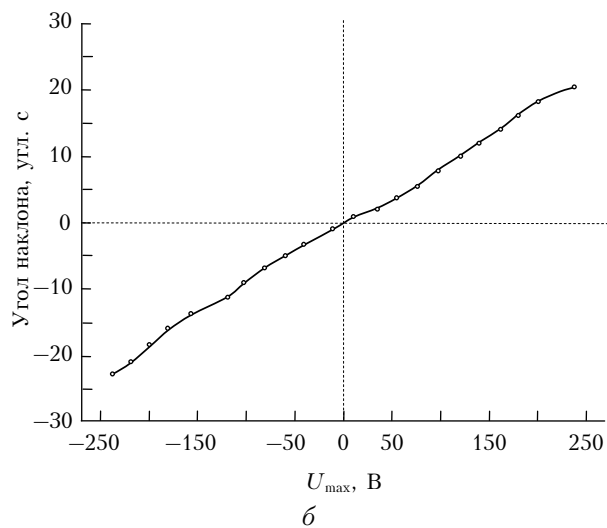
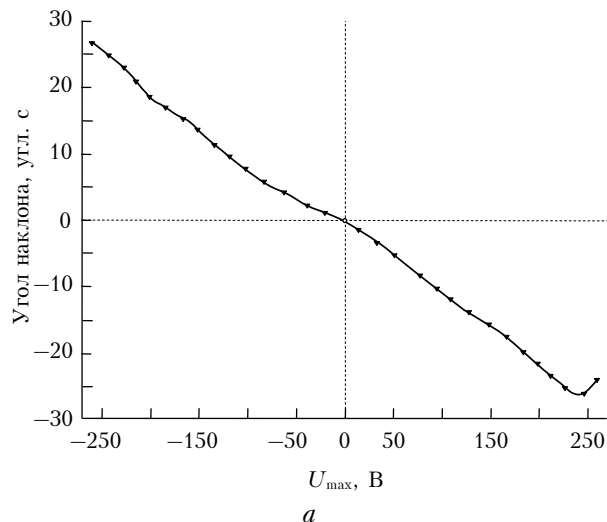


Рис. 6. Зависимость углов наклона зеркала по оси X (а) и по оси Y (б) от управляющего напряжения

Проведенные исследования показали, что зеркало DM2-100-31 со световой апертурой 60 мм можно использовать в одноконтурной адаптивной оптической системе БСВТ для компенсации атмосферных искажений волнового фронта. Однако большое время установления деформации поверхности зеркала при воздействии сигнала управления может стать причиной ограничения рабочей полосы частот АОС.

Работы [1, 5, 6, 11] выполнены при частичной финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем» (2009–2011) и Государственного контракта № 16.740.11.0392 в рамках ФЦП.

1. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Григорьев В.М., Емалеев О.Н., Ковadlo П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д., Чураков С.А. Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) с адаптивными элементами // Труды XVII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2011. С. В203–В206.

2. *Лукин В.П., Григорьев В.М., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лавринов В.В., Ковадло П.Г., Скоморовский В.И.* Результаты испытания адаптивной оптической системы с модифицированным корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе // *Оптика атмосфер. и океана*. 2007. Т. 20, № 5. С. 419–427.
3. *Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyayev P.A.* Wavefront sensors for adaptive optical systems // *Measurement. Sci. Rev.* 2010. V. 10, N 3. P. 101–106.
4. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана*. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
5. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Оценка параметра атмосферной турбулентности из измерений смещения изображения края солнечного диска // *Труды XVII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. Томск, 2011. С. В61–В63.
6. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Анализатор качества изображения как составной элемент адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа // *Труды XVII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. Томск, 2011. С. F51–F54.
7. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 212 с.
8. *Paterson C., Munro I., Dainty J.C.* A low cost adaptive optics system using a membrane mirror // *Opt. express*. 2000. V. 6, N 9. P. 175–185.
9. *Scharnera B.G., Dettori P., Mats G., Lofdahl M.G., Shandb M.* Adaptive optics system for the new Swedish solar telescope // *Proc. SPIE*. 2002. V. 4853. P. 370–380.
10. *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. М.: ИПЛИТ РАН*, 2005. С. 55–70.
11. *Копылов Е.А., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Лукин В.П., Мамаев А.Л.* Управляемое зеркало для адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа // *Труды XVII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. Томск, 2011. С. F51–F54.

V.P. Lukin, L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, V.M. Grigor'ev, O.N. Emaleev, P.G. Kovadlo, P.A. Konyayev, E.A. Kopylov, V.I. Skomorovskii, V.D. Trifonov, S.A. Chuprakov. **Development of adaptive optics components for solar telescope.**

The devices and components of adaptive optical system “Angara”, which is developed for image correction in the Big solar vacuum telescope (BSVT) at Baykal astrophysical observatory are described. It is shown that the use of modernized adaptive system in BSVT not only reduces the turbulent atmospheric distortions of an image, but also gives a possibility to improve the telescope for new methods of solar observations.