

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 538.566:520

Адаптивная система стабилизации и формирования изображения для крупноапертурного солнечного телескопа

В.П. Лукин, П.А. Коняев, А.Г. Борзилов, Е.Л. Соин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 8.02.2021 г.

Обсуждаются пути дальнейшего развития созданной в ИОА СО РАН при технической поддержке ИСЗФ СО РАН многокаскадной адаптивной системы стабилизации и формирования изображения на Большом солнечном вакуумном телескопе, ранее показавшей свою эффективность. Предлагается разработка быстроедействующих алгоритмов корреляционного слежения, а также дополнение состава системы вторым комплектом из датчика волнового фронта и гибкого зеркала, установленного в плоскости, сопряженной с высотой слоя сильной локальной турбулентности.

Ключевые слова: астрономия, солнечный телескоп, атмосфера, турбулентность, адаптивная оптика, каскады коррекции; *astronomy, solar telescope, atmosphere, turbulence, adaptive optics, cascades of correction.*

Введение

Эффективность любого солнечного астрономического телескопа при проведении спектральных исследований понимается как способность фиксировать спектр излучения в выделенной области на фоне солнечной поверхности. Она определяется размером входной щели спектрального инструмента, качеством изображений, формируемых оптикой в условиях атмосферных искажений, и свойствами используемого приемника. Хорошо известно, что с увеличением апертуры телескопа атмосферные искажения начинают ограничивать качество изображений даже в самых лучших наблюдательных местах на поверхности Земли. Однако эти ограничения могут быть успешно преодолены с помощью разработанных в течение последних 30–40 лет методов и систем адаптивной оптики (АО) [1–9].

После появления новых проектов по созданию крупноапертурных солнечных телескопов появилась потребность в разработке так называемых мультисопряженных адаптивных систем. Это мощное средство, прежде всего, для расширения поля зрения астрономических систем, поскольку для большинства даже лучших мировых солнечных обсерваторий в видимом диапазоне длин волн угол изопланатизма атмосферы, ограничивающий поле зрения эффективной системы АО, составляет не более 10 угл. с.

Такие системы уже построены для многих солнечных телескопов [10–17].

Безусловно, создаваемые в настоящее время новые экстремально большие солнечные телескопы Advanced Technology Solar Telescope (ATST) и European Solar Telescope (EST) также будут оборудованы такими системами. Требования по достижению высокого углового разрешения и значения параметра Штреля в видимом диапазоне длин волн для солнечных телескопов и широкого поля зрения для будущих 4-метровых телескопов делают структуру системы АО довольно сложной, с огромным числом степеней свободы [16, 17].

Однако для солнечного телескопа даже с апертурой порядка 1 м, работающего в условиях сильной дневной турбулентности атмосферы, также необходима многокомпонентная система АО. Построением такой системы для Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) в течение нескольких последних лет занимались сотрудники Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) и Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН. Они прошли достаточно долгий путь: начинали с простейшей системы, развивали ее и пришли к современной многокаскадной системе. Отдельные результаты этого пути были опубликованы в статьях и докладывались на конференциях по астрономии [18–20]. Наиболее полно проделанная работа была описана в [21]. Анализ нынешнего состояния исследований в этой области показывает, что построение современной системы АО остается актуальной и достаточно сложной научно-технической проблемой.

* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru); Александр Григорьевич Борзилов (alex.borzilov@mail.ru); Егор Леонидович Соин (egorsh@vtomske.ru).

1. Предварительный анализ состояния турбулентности в точке стояния телескопа

Известно, что для построения системы АО и ее элементов необходимы глубокие знания об атмосферной турбулентности. Поэтому в процессе проектирования и эксплуатации системы АО использовалось несколько способов измерения атмосферной турбулентности и оценки радиуса когерентности [3]. Прежде всего, метеорологический способ, заключающийся в расчете этого параметра по данным построенной ранее модели вертикального профиля структурного параметра показателя преломления [22–24]. Сама модель турбулентности была ранее построена [23] на основе реанализа по метеоданным, получаемым в целом для региона Байкальской астрофизической обсерватории, где установлен БСВТ. Эта модель турбулентности постоянно развивается и уточняется, в том числе с использованием данных измерений средних значений температуры и скорости ветра в приземном слое атмосферы с помощью акустической метеостанции и прямых измерений датчиком волнового фронта.

По данным атмосферных измерений с использованием реанализа для точки стояния телескопа также была построена модель вертикального профиля средней горизонтальной скорости ветра для различных сезонов года. При построении модели используется так называемый ветер $V5/3$, представляющий собой вектор скорости ветра, взвешенный на вертикальный профиль турбулентности. Как оказалось, его среднегодовое значение равно $\sim 2,5$ м/с, причем зимой средняя скорость ветра для точки стояния БСВТ увеличивается до $3,2$ м/с [23, 24]. Именно ветер $V5/3$ характеризует собой скорость эволюции картины турбулентности на пути распространения оптических волн, приходящих на апертуру солнечного телескопа. Поэтому величина средней скорости ветра $V5/3$ нужна для оценки необходимой минимальной частоты работы датчика волнового фронта системы АО.

В процессе оптических наблюдений с использованием самих систем АО также проводились постоянные измерения интегральной турбулентности атмосферы на основе данных измерений корреляционным датчиком волнового фронта. При этом применялся дифференциальный способ оценки структурной функции фазы [19]. Как показали многолетние наблюдения [22–24], выполняемые на этом телескопе, величина радиуса когерентности (на длине волны $0,55$ мкм) имеет ярко выраженный сезонный ход: летом он равен $4\text{--}5$ см, тогда как в осенне-зимний период он существенно ниже ($1,5\text{--}2,3$ см). При проведении измерений в ноябре 2017 г., когда впервые применялась многокаскадная система АО, также выполнялись измерения радиуса когерентности при ее работе. Это позволяло непосредственно из данных датчика волнового фронта получать значения радиуса когерентности (параметра Фрида)

и частоты Гринвуда [24]. Результаты измерений этих параметров атмосферы дают основание сказать, что работа системы АО на БСВТ проходит в условиях сильных турбулентных искажений: так, величина отношения диаметра апертуры телескопа ($D = 76$ см) к радиусу когерентности составляет $\sim 35\text{--}40$, при этом для средней скорости ветра $3,2$ м/с требуемая частота Гринвуда должна быть 40 Гц [23, 24].

Отсюда следует вывод, что условия наблюдений Солнца на БСВТ заведомо предполагают повышенный дневной уровень турбулентности. Хорошие условия наблюдений составляют порядка 10% наблюдательного времени даже в пунктах, которые принято считать эталоном хорошего астроклимата. Для работы системы АО это означает, что должно быть предусмотрено как минимум два режима: для условно хороших и условно плохих условий наблюдений. А для минимизации нежелательных павильонных эффектов необходимо сократить общий оптический путь. Следовательно, с точки зрения эксплуатации выгодно иметь компактную оптическую систему АО.

2. Схема многокаскадной системы стабилизации изображения

Очевидно, применяемая система АО должна обеспечивать дифракционное качество изображения, т.е. должна не ухудшать качество изображения, даваемое оптической системой телескопа. Кроме того, она должна обеспечить основные характеристики спектрального прибора: поле зрения и работу в нужном спектральном диапазоне. Современные задачи физики Солнца требуют одновременных измерений в нескольких участках спектра видимого излучения, а также в ближнем инфракрасном диапазоне. И наконец, важно сделать систему удобной для эксплуатации: компактной, сравнительно простой в юстировке и настройке. Критерием успеха в конечном счете является эффективность использования наблюдательного времени и получение актуальных данных о солнечной атмосфере.

Для эффективной работы АО необходимо, чтобы основные компоненты (активные оптические элементы и анализатор волнового фронта) работали в оптимальном режиме. Практический опыт показывает, что наиболее удачными являются схемы с отдельной коррекцией общих углов наклона волнового фронта и аберраций более высоких порядков. Этот подход позволяет максимально эффективно использовать адаптивный компонент системы — деформируемое зеркало. Таким образом, именно сильная дневная атмосферная турбулентность, а также наличие больших инструментальных искажений (например, качание главного следящего зеркала, приводящее к искажениям мгновенного положения изображения Солнца на уровне $10\text{--}20$ угл. с) определили построение системы АО для этого солнечного телескопа [25] в виде нескольких каскадов коррекции, каждый из которых использует свои собст-

венные датчик волнового фронта и корректор. В результате многолетних исследований [21] был выбран путь построения системы АО для солнечного телескопа именно как многокаскадной системы.

Здесь мы, прежде всего, кратко опишем построенную трехкаскадную систему коррекции изображения для БСВТ. При этом, говоря об особенностях оптической схемы, хотелось бы выделить некоторые моменты, которые отличают используемую нами схему ввода системы АО в БСВТ:

- в настоящее время используется система АО, в которой имеются три каскада коррекции, причем каждый из них имеет свой собственный датчик искажений;

- первые два каскада системы ввода АО являются довольно традиционными: это каскад коррекции наклонов волнового фронта, использующий в качестве датчика искажения измеритель WFS-1 [25], и каскад коррекции с использованием гибкого зеркала, которое управляется с помощью корреляционного датчика волнового фронта [20];

- третий каскад представляет собой постдетекторную коррекцию получаемого изображения на основе оптимальной фильтрации с использованием экспериментально измеренной оптической передаточной функции (ОПФ), которую в реальном времени регистрирует еще один датчик – анализатор качества изображения (АКИ) [25].

Очень важной оказалась возможность использовать датчик волнового фронта, входящий ранее в состав стенда АО «Ангара» [19]. Это обеспечило преимущество в развитии системы АО, в частности методов анализа волнового фронта. В рабочем фокусе системы предусмотрена установка многоканальных фильтровых систем для спектральных исследований солнечной атмосферы. Особенность используемой схемы (рис. 1) в том, что оптический сигнал после каждого каскада коррекции подается на отдельный астрономический инструмент. Так, например, после коррекции наклонов в первом каскаде

солнечное оптическое излучение поступает в спектрограф для анализа временных спектров, а после второго каскада оптическое излучение подается на специальный астрономический прибор – фильтрограф. И наконец, в результате работы третьего каскада получают высококачественные изображения, которые можно анализировать, накапливать, выбирая наиболее качественное. Таким образом, реализация подобной системы АО позволяет одновременно улучшать качество работы трех астрономических инструментов, работающих на телескопе.

Хотелось бы также отметить, что применение каскада обратной оптимальной фильтрации непосредственно после частичной фазово-сопряженной коррекции представляет собой оригинальный подход, который до сих пор не использовался в астрономических приложениях для систем АО.

Известно, что крупные солнечные телескопы изначально предназначены для проведения поисковых исследований и получения новых данных, что напрямую связано с организацией новых типов экспериментов. Система АО должна обеспечивать эффективную работу спектральных приборов, расположенных в рабочем фокусе. Под эффективностью здесь понимается максимально полное использование светового потока, а также возможность в некоторой степени изменять конфигурацию системы и прибора.

В итоге для адаптивной коррекции изображения солнечной поверхности в видимой фотосфере на БСВТ нами совместно с сотрудниками ИСЗФ СО РАН была создана экспериментальная установка [25], важнейшая часть которой приведена на рис. 1. Эта оптическая схема обеспечивает последовательный перенос изображения входного зрачка телескопа по трем каскадам.

На рис. 1 F1, F2, F3 – это положения фокусов телескопической системы, причем фокусы F2, F3 представляют собой изображения первичного фокуса F1. Зеркала M3, M4, M5 образуют коллимирующую

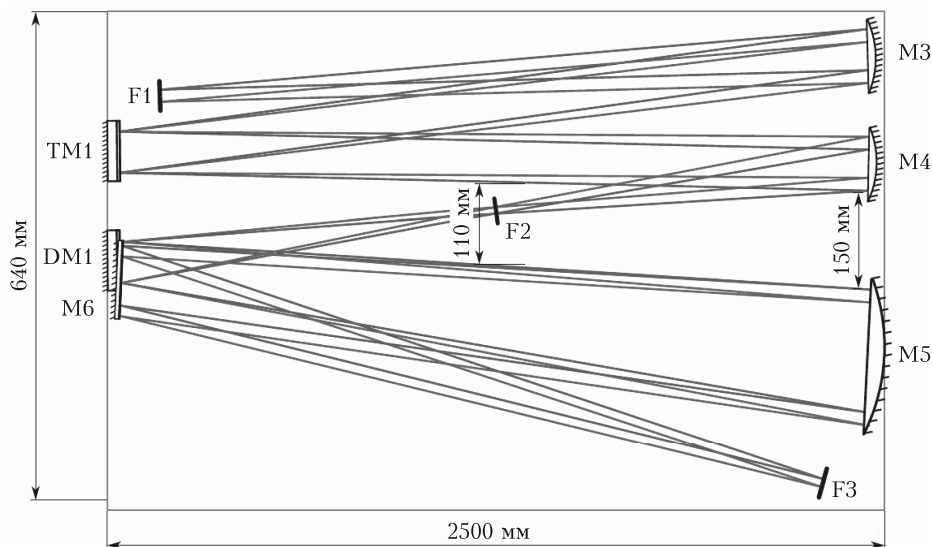


Рис. 1. Схема ввода двухзеркальной системы АО (вид сверху)

систему зеркал, которые обеспечивают перенос и построение выходного зрачка телескопа, ТМ1 – плоское управляемое корректирующее зеркало. Зеркала М3 и М4 переносят выходной зрачок солнечного телескопа на деформируемое (гибкое) зеркало DM1. В плоскости полупрозрачного зеркала М6 размещается созданный в ИОА СО РАН АКИ [25], представляющий собой датчик волнового фронта WFS-1 для управления плоским зеркалом, корректирующим случайные наклоны волнового фронта. В фокусе F3 располагается датчик волнового фронта WFS-2 – корреляционный датчик Шэка–Гартмана. В фокусе F3 и его изображениях могут размещаться и одновременно работать специальные наблюдательные инструменты для исследования Солнца, например, фильтрограф для получения данных о солнечной атмосфере в узких спектральных полосах.

3. Техническое и программное обеспечение системы стабилизации изображения

Перейдем к описанию технических особенностей созданной схемы. Прежде всего, заметим, что схема размещается на большом оптическом столе размерами 4000 × 1500 мм. Детально все элементы системы были описаны в [19, 25]. Технические особенности БСВТ позволяют формировать (см. рис. 1) несколько вариантов оптической схемы размещения даже многокаскадной системы коррекции изображения. Здесь мы отдельно остановимся только на тех параметрах системы, которые необходимы для перехода на мультисопряженную версию работы.

Оптическая схема предусматривает введение специального датчика волнового фронта, ориентированного на управление системой зеркала ТМ1. Именно этот датчик вырабатывает сигналы для коррекции наклонов волнового фронта. При этом корректируются случайные наклоны, обусловленные как действием турбулентности атмосферы, так и внешними техническими причинами, например ветровым качанием телескопа в целом и ветровыми флуктуациями следящего целостатного зеркала телескопа. Зачастую эти технические искажения намного превышают обусловленные турбулентностью случайные дрожания изображения. Именно стабилизация изображения и является задачей первого каскада, это важно с точки зрения использования динамики гибкого зеркала во втором каскаде коррекции изображения.

В оптической схеме второй каскад коррекции обеспечивается тем, что свет после отражения от гибкого зеркала проходит через светоделительный кубик и часть света направляется на матрицу цифровой видеокамеры второго анализатора качества изображения (АКИ2) (размещен в следующем фокусе F4, который не показан на рис. 1). Остальная часть света через окуляр попадает в канал второго корреляционного датчика волнового фронта WFS-2, состояще-

го из дифракционного линзлета и цифровой видеокамеры. Второй каскад системы предусматривает коррекцию aberrаций волнового фронта с помощью гибкого деформируемого зеркала с рабочим диаметром 35 мм, сопряженного с плоскостью апертуры диаметром 600 мм. Производитель деформируемых зеркал OKO-Tech рекомендует диаметр световой апертуры 35–40 мм при полном диаметре зеркал 50 мм. Таким образом, в случае светового диаметра 40 мм будет обеспечено практически полное использование входной апертуры БСВТ – 720 мм.

В третьем каскаде используется цифровая видеокамера АКИ2. Именно сигнал с этого датчика применяется для постдетекторной коррекции.

В макете осуществлялась одновременная регистрация оптических изображений в трех плоскостях (F2, F3, F4) с использованием трех цифровых камер Allied Mako G030. Параметры используемых видеокамер были следующими:

- режим работы и экспозиция: автоматический, ручное управление;
- длительность кадра: 100 мкс – 10000 мс;
- коэффициент усиления 0–50, применялся биннинг (децимация);
- частота кадров в режиме VGA – 320 Гц при максимальной области ROI.

При изменении размера кадра АКИ1 обеспечивал работу на различных частотах: при размере кадра 640 × 320 на частоте 450 Гц, при 640 × 256 – на 550 Гц, при 640 × 128 – на 980 Гц.

Для записи регистрируемых изображений и их обработки в макете применялась рабочая станция с процессором Intel i5-4690.

Впервые трехкаскадная система коррекции была запущена в ноябре 2017 г. Отметим, что первый каскад системы АО, выполняющий роль корректора наклонов волнового фронта, образуют плоское зеркало-дефлектор ТМ1 [21, 26] и датчик смещения изображения WFS-1, созданный на основе видеокамеры МАКО. Фактически этот датчик для корректора наклонов волнового фронта представляет собой ранее созданную [25] систему АКИ. Для обеспечения управления фазовым фронтом для компенсации дрожания изображения разработан, изготовлен, прошел экспериментальную проверку на стендах и установлен на БСВТ двухкоординатный пьезокерамический корректор углов наклона волнового фронта. Основным отличием этого устройства от известных аналогов является малое время установки зеркала с подавлением колебаний на частоте его механического резонанса, а также сохранение плоскостности зеркала во всем диапазоне корректируемых углов наклона волнового фронта.

Солнечное излучение после первого каскада коррекции может быть сразу направлено на спектрометр БСВТ, причем в результате стабилизации излучения на спектральной щели увеличивается эффективность работы солнечного телескопа по измерению спектров излучения Солнца в различных интервалах. Это повышает эффективность работы телескопа как спектрального прибора.

Второй каскад системы образуют корреляционный датчик волнового фронта WFS-1 с блоком растров и гибкое деформируемое зеркало DM1 [21]. Причем при работе настоящего макета предполагается использование двух вариантов гибких зеркал: биморфного (производства России) или мембранного зеркала на пьезотолкателях (производство Нидерландов). Этот каскад адаптивной коррекции был испытан ранее в 2009–2011 гг.

Третий каскад коррекции образуют АКИ2 и компьютерный комплекс обработки кадров изображения. Особенность этого каскада в том, что он может быть задействован как непосредственно во время эксперимента, так и впоследствии. Во втором случае формируемое изображение записывается с предельной частотой на электронные накопители и обрабатывается уже после проведения эксперимента. В двухкаскадном режиме, включающем коррекцию только наклонов и постдетекторную обработку [27–32], для обработки кадров изображения в реальном времени использовалась специальная программа, обеспечивающая накопление отдельных кадров и выполнение инверсной фильтрации.

Окно управления этой программой показано на рис. 2. Слева сверху – окно видеокamеры АКИ2 с растровым изображением фрагмента солнечного диска, по сигналам которого осуществлялись слежение и коррекция дрожания в горизонтальной плоскости (поскольку в качестве опорного объекта используется край солнечного диска). Справа сверху – окно вывода предварительных результатов измерений. Нижняя часть окна программы служит для вывода обработанного изображения.

4. Инструментальный состав многокаскадной системы АО и решаемые задачи

Далее приведем описание основных компонентов системы АО для стабилизации изображения и оценки параметров атмосферы (первый каскад):

- датчик наклонов – камера ALLIED MAKO G-030, работающая по программе корреляционного трекинга изображения;
- корректор наклонов TM1 – плоское зеркало с контроллером и программой управления.

Корреляционный датчик волнового фронта – дифракционный линзлет с камерой MAKO G-030 и программой субапертурного корреляционного трекинга с реконструкцией волнового фронта по методу наименьших квадратов в базе полиномов Цернике (второй каскад).

Компоненты системы АО для цифровой коррекции и формирования изображения (третий каскад):

- цифровой стабилизатор изображения;
- модифицированный АКИ2;
- программное обеспечение для восстановления размытого изображения методом инверсной фильтрации (постдетекторная обработка в реальном времени).

Кроме этого, в состав макета была включена система контроля атмосферы – метеостанция, измеряющая флуктуации температур и скорость ветра. Также в первом каскаде оценивался радиус когерентности Фрида из измерений дрожания изображений. Данные сопровождающих метеозмерений

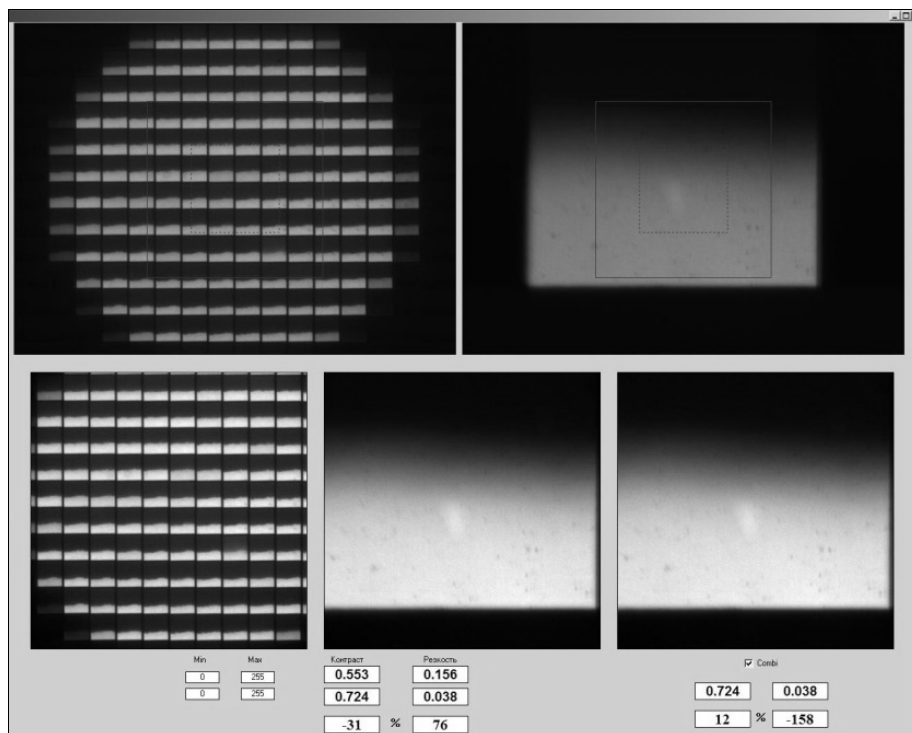


Рис. 2. Главное окно программы, обеспечивающей управление зеркалом TM1 и контроль за текущим кадром изображения

(температура, скорость ветра, уровень турбулентности) фиксировались на ноутбук ASUS с процессором Intel i5-4690.

Ввиду полного отсутствия контрастных солнечных пятен на видимой поверхности Солнца с конца 2017 по начало 2018 г. вся работа макета системы выполнялась с использованием изображения края солнечного диска. Край солнечного диска является достаточно контрастной структурой, наблюдаемой в изображениях Солнца, но имеет ряд ограничений для использования в качестве опорного источника, прежде всего, связанных с тем, что измеряемыми величинами являются только поперечные смещения изображения солнечного лимба.

Отдельные результаты и выводы, сформулированные на основе проведенных испытаний системы стабилизации изображения в системе АО БСВТ, будут приведены ниже. Все измерения углового смещения изображения края солнечного диска приведены к углам наклона волнового фронта излучения на входном зрачке телескопа. Измерения выполнялись одновременно WFS-1, размещенным во втором фокусе, и АКИ2, установленным в четвертом фокусе телескопа (см. рис. 1).

Графики смещений изображения края диска Солнца и их спектров (рис. 3) наглядно иллюстрируют эффективность стабилизации дрожания зеркалом ТМ1.

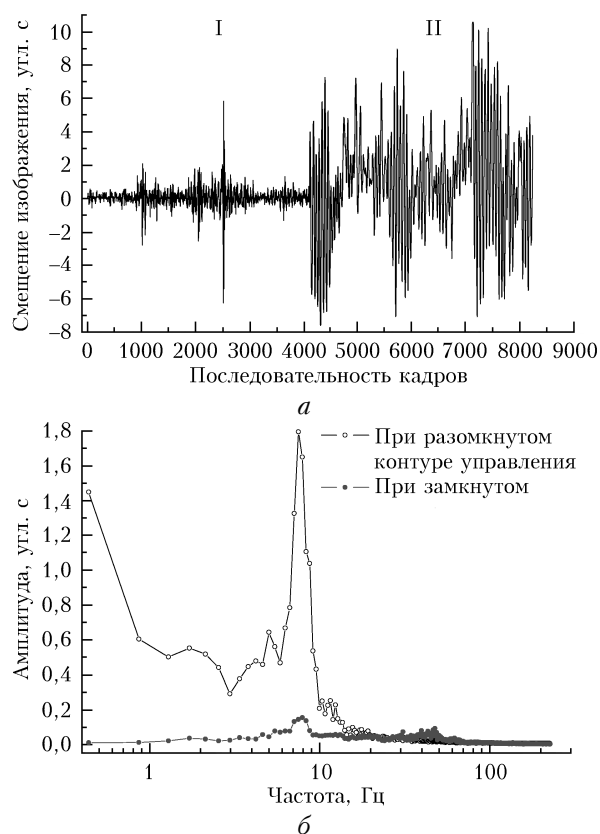


Рис. 3. Угловые смещения положения изображения (а) и амплитудные спектры (б), регистрируемые датчиком стабилизации изображения в режиме стабилизации (область I) и при разомкнутом контуре управления (область II); измерения проводились 10 ноября 2017 г. в 14:13 по местному времени

На рис. 3, а приведены временные изменения случайных угловых смещений изображения вертикального края диска Солнца в горизонтальной плоскости. Здесь по оси ординат отложены угловые смещения изображения, измеренные корреляционным датчиком сдвига, по оси абсцисс — последовательность кадров изображения, по которому проводились измерения в реальном времени. Участок, состоящий из первых 4096 отсчетов (область I), содержит данные, полученные при замкнутом контуре управления. Второй участок на этом же графике (область II) содержит данные измерений, полученные при разомкнутом контуре управления. Видно, что в результате действия первого каскада коррекции максимальная амплитуда колебаний изображения снижается более чем в 10 раз, причем корректор наклонов уменьшает действие не только турбулентных искажений, но и технических aberrаций, связанных с дрожанием элементов самого телескопа.

На рис. 3, б показано поведение спектров случайных дрожаний изображения в диапазоне частот от долей герц до 100 Гц. Из графика видно, что при замыкании контура коррекции происходит существенное уменьшение случайных смещений изображения. Кроме того, видно, что участок в районе 8–9 Гц содержит максимум энергии колебаний, вызванных действием сильного ветра на сидеростат телескопа. Одновременные измерения скорости ветра акустическим анемометром [22, 24] в этот момент времени давали максимальные значения в диапазоне 15–20 м/с.

Также для характеристики состояния атмосферы на рис. 4 приведены значения радиуса Фрида, полученные путем обработки данных с корреляционного трекера (в первом каскаде системы). Из этих данных видно, что имеют место быстрые изменения уровня турбулентности из-за сильного ветра.

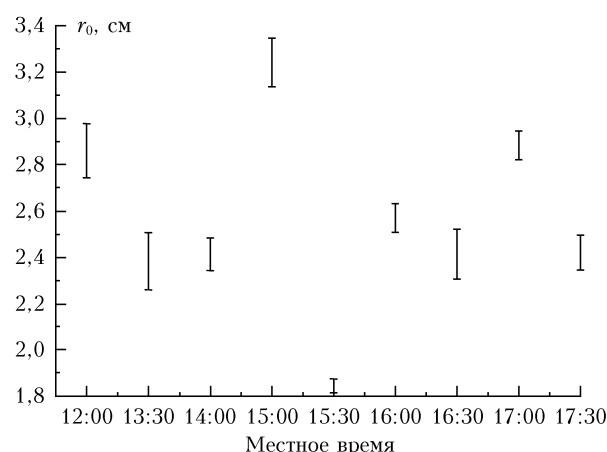
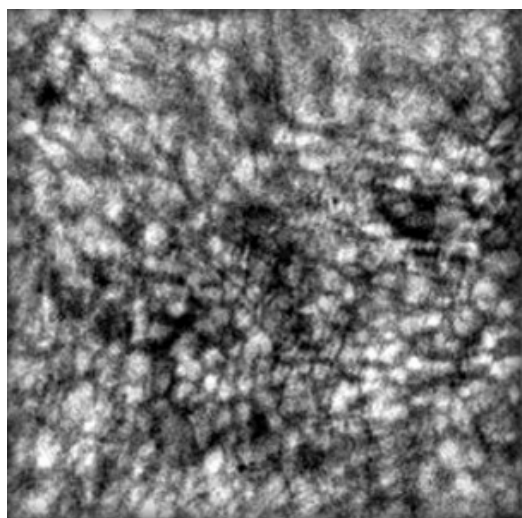


Рис. 4. Значения радиуса Фрида, полученные по данным измерений в первом каскаде макета (данные за 10 ноября 2017 г.)

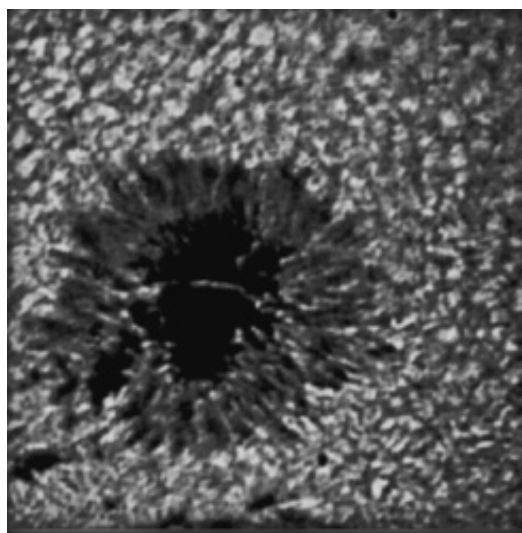
На основании обработки больших массивов данных, полученных в экспериментах [20, 21, 26] с адаптивной системой БСВТ, работающей даже по сигналу положения изображения края солнечного диска, можно сделать вывод об эффективности каскада стабилизации дрожания изображения системы

АО, который позволяет уменьшить как действие турбулентных неоднородностей, так и влияние технических искажений самой схемы телескопа: качание всей конструкции телескопа и ветровое раскачивание следящего зеркала.

Второй каскад коррекции был установлен нами на БСВТ еще в 2009–2011 гг. Было исследовано два режима работы системы АО при использовании различных видимых структур на изображении поверхности Солнца: по сигналам смещения изображений солнечных пятен (контраст 6–9%) и по смещениям солнечной гранулярности (контраст 1–2%). Эти две структуры на изображениях Солнца имеют существенно различный контраст. Как показали измерения, работа только по солнечной гранулярности (рис. 5, *а*), когда регистрируемые изображения



а



б

Рис. 5. Изображение солнечного пятна и гранулярности, полученное при короткой экспозиции в системе АО БСВТ, когда радиус когерентности был равен 6,5 см (*а*), и изображение солнечной гранулярности, полученное при короткой экспозиции в системе АО БСВТ, когда радиус когерентности был равен 5,5 см (*б*)

очень низкоконтрастные, серьезно влияет на точность определения волнового фронта, особенно при интенсивной мелкомасштабной турбулентности, когда средний радиус когерентности не превышает 4 см. В этом случае структура изображения различима только вблизи оптической оси системы (центр изображения на рис. 5, *а*). На краю изображение практически не адаптировано и визуально совпадает по качеству с искаженными изображениями.

На рис. 5, *б* показано изображение солнечного пятна, полученное на БСВТ при короткой экспозиции в условиях средней интенсивности атмосферной турбулентности по лучу зрения (радиус когерентности составлял ~6,5 см) в системе АО БСВТ без применения методов апостериорной обработки.

Оказалось, что размер наименьших разрешимых деталей на Солнце в системе АО составил ~0,5 угл. с. На рис. 5, *а* различимы тень, полутень, течения плазмы в полутени, обычно невидимый мелкомасштабный световой мост солнечного пятна и солнечная гранулярность.

В целом можно констатировать, что, как и первый, второй каскад системы АО также доказал свою эффективность.

5. Двухкаскадная адаптивная система стабилизации и формирования изображения, включающая постдетекторную цифровую обработку

Переход на работу системы АО с использованием двух каскадов, коррекции случайных наклонов и постдетекторной обработки, связан с необходимостью получения изображения отдельных частей поверхности Солнца максимально возможного качества. Для этого в адаптивную систему вводится каскад компьютерной обработки изображений, поступающих с цифровых видеокамер. Такая обработка может быть проведена как в отложенном режиме, когда изображения обрабатываются после их регистрации и записи в архив, так и в реальном времени, непосредственно при наблюдении. В последнем случае к алгоритмам цифровой обработки предъявляются высокие требования по быстродействию.

Современные солнечные телескопы наземного базирования с большими приемными апертурами обычно используют системы АО, которые помогают им компенсировать действие атмосферной турбулентности в реальном масштабе времени, чтобы обеспечить близкое к теоретическому пределу пространственное разрешение. Однако ввиду технических ограничений системы АО часто способны только частично компенсировать атмосферу с производительностью коррекции, которая зависит от серьезности внесенных aberrаций. Для получения данных с максимально возможным пространственным разрешением используются методы постфактальной

реконструкции изображения, такие как деконволюция, фазовое разнесение, его обобщения, многокадровая слепая деконволюция и многообъектная многокадровая слепая деконволюция, а также спекл-интерферометрия [28–33]. У каждого из этих методов существует определенный компромисс между точностью и вычислительными требованиями, и от приложения зависит, какой метод лучше всего использовать. Для обеспечения фотометрической точности некоторые из вышеупомянутых методов требуют знания оптической передаточной функции или ее аналога Фурье, функции рассеяния точки. Было обнаружено, что эти две функции имеют особое значение для астрономических наблюдений.

Основные материалы по программам, применяемым нами при постдетекторной коррекции, опубликованы в [34]. Для постдетекторного формирования цифровых изображений в адаптивной системе БСВТ нами было разработано программное обеспечение обработки кадров цифровой видеокамеры в реальном времени с использованием современных быстродействующих параллельных алгоритмов из библиотек Intel MKL и IPP.

В результате впервые на БСВТ совместно с каскадом коррекции случайных смещений изображения был применен каскад формирования изображения, основанный на цифровой обработке кадров [21, 24, 26]. Для постдетекторного улучшения изображений, размываемых атмосферной турбулентностью, был использован метод инверсной фильтрации с регуляризацией. Для применения этого метода в реальном времени был разработан эффективный быстродействующий алгоритм, позволяющий вести цифровую фильтрацию изображений [26, 34] с высоким разрешением и частотой короткоэкспозиционных кадров до 300 кадров в секунду. Необходимость применения обусловлена тем, что при средних атмосферных условиях разрешающая способность БСВТ снижается по отношению к теоретическому дифракционному пределу (0,2 угл. с) и составляет порядка 1,5 угл. с.

В результате на основе обработки полученных в разное время данных наблюдений Солнца на БСВТ с помощью созданного в ИОА СО РАН АКИ было проанализировано качество формируемых изображений поверхности Солнца. Этот инструмент в том числе позволяет осуществлять отбор отдельных изображений в моменты наилучшего качества для их апостериорной обработки. Данные наблюдений постоянно записываются на электронные накопители для дальнейшей обработки.

6. Мероприятия по переходу на мультисопряженную версию схемы коррекции

При создании системы была заложена возможность ее развития. Например, путем включения в состав еще одного каскада, состоящего из еще одного датчика волнового фронта и второго гибкого

зеркала, что делает эту систему АО мультисопряженной.

6.1. Расчеты требований к элементам мультисопряженной системы АО

Для оценки потенциальных возможностей макета многокаскадной системы АО были проведены численные расчеты. При этом был выполнен численный анализ нескольких вариантов реализации системы АО. На рис. 6 показаны расчетные значения величины достижимого значения параметра Штреля при работе солнечного телескопа при различных углах места положения Солнца и при использовании различных элементов системы АО. Кривая 1 на рис. 6 соответствует случаю, когда коррекция отсутствует (т.е. система АО выключена), кривая 2 – случаю, когда применяется двухкаскадная система АО, в которой датчик волнового фронта WFS имеет низкое разрешение (геометрия раstra датчика 16×16) и корректирующее DM-зеркало имеет низкое разрешение (корректируются только 15 полиномов Цернике). Кривая 3 соответствует случаю, когда WFS имеет высокое разрешение (геометрия 64×64), а DM-зеркало по прежнему имеет низкое разрешение, кривая 4 – это случай, когда и WFS и DM-зеркало имеют высокое разрешение (корректируются не менее 35 полиномов Цернике). И наконец, кривая 5 соответствует «идеальной» системе АО, в которой используется операция сшивки модельной фазы волнового фронта «по модулю 2π », что является «теоретическим пределом» для WFS, а функция DM-зеркала заменяется на оператор смены знака у измеренного волнового фронта. Таким образом, система под номером 5 является предельной, показывающей потенциальные возможности телескопа, достижимые только при использовании мультисопряженной системы АО.

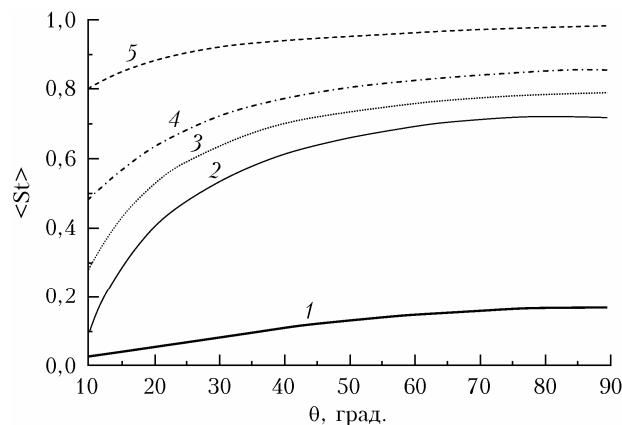


Рис. 6. Зависимость числа Штреля при различных углах места положения Солнца для различных вариантов реализации системы АО

Эти расчеты позволяют оценить принципиально достижимые характеристики солнечного телескопа при дальнейшем развитии созданного многокаскадного макета системы АО.

6.2. Датчик волнового фронта со сменой растров

Нами был создан дополнительный датчик волнового фронта (WFS-3) (рис. 7) на базе видеокамеры Prosilica GX (размерность сенсора камеры 1024×1024 пикселей) и набора сменных дифракционных микрорастров. Для тонкой настройки при установке в оптическую схему БСВТ WFS-3 была разработана специальная конструкция юстировочного столика. В настоящее время WFS-3 уже используется в макете системы АО. Растры рассчитывались для излучения с длиной волны $0,55 \text{ мкм}$. Чтобы смена растра могла проходить оперативно, микрорастры размещаются в центрируемых цилиндрах-капсулях. Для этого был специально сконструирован исполнительный механизм для взаимной юстировки элементов датчика волнового фронта Шэка–Гартмана.

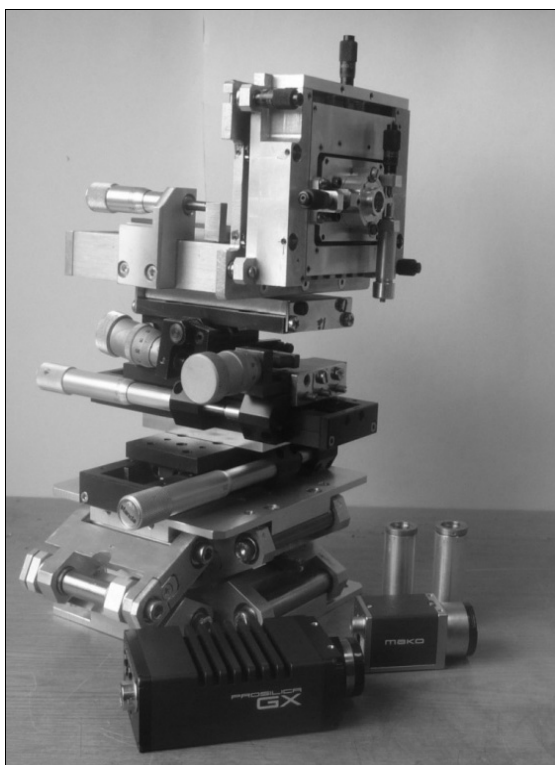


Рис. 7. Внешний вид дополнительного датчика волнового фронта, обеспечивающего работу при различных турбулентных условиях

Такая конструкция позволяет использовать сменные микрорастры, имеющие фокусные расстояния от 5 до 21 мм . Для обеспечения работы датчика волнового фронта в таком широком диапазоне предусмотрена возможность смены размерности линзовых растров: 8×8 , 16×16 , 32×32 элементов. Разработанный датчик обеспечивает измерения аберраций волнового фронта практически при любых условиях атмосферной турбулентности на БСВТ: от наилучших – при радиусе Фрида $\sim 70 \text{ мм}$, до наихудших – радиус Фрида $10\text{--}15 \text{ мм}$.

6.3. Измерения вертикального распределения интенсивности атмосферной турбулентности

В течение июня 2018 г. измерения корреляционным датчиком волнового фронта системы АО БСВТ были продолжены. Используя этот датчик как дифференциальный измеритель дрожания изображения края солнечного диска, мы получили новые данные по величине радиуса когерентности. Результаты расчета дают значения радиуса когерентности в интервале от $3,5$ до $6,5 \text{ см}$ для длины волны $0,55 \text{ мкм}$. В [27] описан сценарий формирования искажений волнового фронта на основе анализа данных измерений дифференциального дрожания изображений с помощью датчика волнового фронта Шэка–Гартмана БСВТ.

Также по данным измерений дрожаний субизображений датчиком Шэка–Гартмана были оценены [27] пространственные кросс-корреляционные функции смещения положений центров тяжести этих изображений. Путем триангуляции положения максимумов кросс-корреляций искажений волнового фронта были определены высоты атмосферных турбулентных слоев, которые пропорциональны угловому смещению между фрагментами субизображений солнечного края. На основе анализа характера пространственных кросс-корреляционных функций было обнаружено, что в месте расположения БСВТ локальные интенсивные турбулентные слои наблюдаются на высотах $1150\text{--}1440$ и $570\text{--}640 \text{ м}$. Это согласуется с типичными высотами атмосферных слоев [19]. Такие данные дают нам полезную информацию для построения уже мультисопряженной системы АО.

Таким образом, теоретические расчеты, а также развитие элементной базы макета путем создания еще одного каскада коррекции обосновывают развитие макета двухзеркальной многокаскадной системы АО. Оптическая схема (см. рис. 1) допускает масштабирование и может быть развита до уровня мультисопряженной системы АО с одновременным применением нескольких активных зеркал. Работа корреляционного датчика волнового фронта на БСВТ обеспечивает регистрацию вертикального распределения интенсивных турбулентных слоев над телескопом, что дает информацию для организации каскада для второго гибкого зеркала.

Заключение

Предложен и обоснован возможный путь развития установленного на БСВТ макета многокаскадной системы АО. Сейчас в системе используются два управляемых зеркала: зеркало для коррекции наклонов и деформируемое зеркало; в рутинном режиме работают два датчика волнового фронта для управления корректором наклонов и деформируемым зеркалом, а также АКИ, описанный в [25]. Это позволило на БСВТ обеспечить работу в замкнутом контуре макета системы АО, представляющего собой трехкаскадную систему коррекции. В качестве третьего каскада коррекции используется

постдетекторная фильтрация. В измерениях, выполненных в ноябре 2017 г., работа осуществлялась на основе слежения за краем солнечного диска, при этом была выполнена стабилизация положения и постдетекторная фильтрация получаемых изображений Солнца с помощью АКИ в рутинном режиме наблюдений.

Результаты оптических измерений позволяют сформулировать конкретные рекомендации для этапа проектирования подобной системы АО для строящегося солнечного телескопа КСТ-3, в том числе возможные подходы к построению датчиков волнового фронта для управления мультисопряженными системами АО, а также требования для создания высокоскоростных корректирующих зеркал. Построенная ранее местная модель турбулентности [22–24] и результаты наблюдений на БСВТ с применением системы АО [20, 21] также могут быть обобщены в интересах развития проекта нового солнечного телескопа.

Авторы благодарят сотрудников ИОА СО РАН Л.В. Антошкина, Н.Н. Ботыгину, О.Н. Емалева, Е.А. Копылова, а также сотрудников ИСЗФ СО РАН А.Ю. Шиховцева и П.Г. Ковадло за помощь при проведении работ на солнечном телескопе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Scharmer G.B., Dettori P., Löfdahl M.G., Shand M. Adaptive optics system for the new Swedish solar telescope // Proc. SPIE. 2002. V. 4853. 4853-52.2. P. 370–380.
2. Rimmele T.R., Marino J. Solar adaptive optics // Living Rev. Sol. Phys. 2011. V. 8. P. 92–98.
3. Antoshkin L.V., Botygina N.N., Lukin V.P., Emaleev O.N. Design development of adaptive system for solar telescope // Proc. SPIE. 2004. V. 5552. P. 261–268.
4. Kellerer A. Wide-field solar adaptive optics in a layer-oriented approach // Appl. Opt. 2012. V. 51. P. 5743–5751.
5. Moretto G., Langlois M., Goode P., Gorceix N., Shumko S. Design for solar multi-conjugate adaptive optics at the New Solar Telescope // Third AO4ELT Conference – Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes. Italy, 2013.
6. Schmidt D., Gorceix N., Marino J., Berkefeld T., Rimmele T., Zhang X., Woeger F., Goode P. Progress in multi-conjugate adaptive optics at Big Bear Solar Observatory // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. DOI: 10.1117/12.2232087.
7. Changhui Rao, Lei Zhu, Xuejun Rao, Lanqiang Zhang, Hua Bao, Lin Kong, Youming Guo, Libo Zhong, Xue'an Ma, Mei Li, Cheng Wang, Xiaojun Zhang, Xinlong Fan, Donghong Chen, Zhongyi Feng, Xiaoyun Wang, Naiting Gu, Zhiyong Wang. Solar adaptive optics for 1-m New Vacuum Solar Telescope // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. DOI: 10.1117/12.2231057.
8. Lanqiang Zhang, Lin Kong, Hua Bao, Lei Zhua, Xuejun Rao, Changhui Rao. Preliminary result of the solar multi-conjugate adaptive optics for 1-m New Vacuum Solar Telescope // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. DOI: 10.1117/12.2231955.
9. Montilla I., Marino J., Asensio Ramos A., Collados M., Montoya L., Tallon M. Solar adaptive optics: Specificities, lessons learned, and open alternatives // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. DOI: 10.1117/12.2233652.
10. Langlois M., Moretto G., Richards K., Hegwer S., Rimmele T. Solar multi-conjugate adaptive optics at the Dunn Solar Telescope // Proc. SPIE. 2004. 5490.
11. Berkefeld T., Soltau D. GREGOR solar telescope: Design and status // Astron. Nachr. 2010. V. 331, N 6. P. 624–627.
12. Collados M., Bettonvil F., Cavaller L., Ermolli I., Gelly B., Pérez A., Socas-Navarro H., Soltau D., Volkmer R. European Solar Telescope: Progress status // Astron. Nachr. 2010. V. 331, N 6. P. 615–619.
13. Keil S., Rimmele T., Wagner J. Advanced Technology Solar Telescope // Earth, Moon, and Planets. 2009. V. 104. P. 77–82.
14. Thiébaud E., Tallon M. Fast minimum variance wavefront reconstruction for extremely large telescopes // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. V. 27. P. 1046–1059.
15. Tallon M., Tallon-Bosc I., Béchet C., Momey F., Fradin M., Thiébaud E. Fractal Iterative Method for fast atmospheric tomography on extremely large telescope // Proc. SPIE. 2010. V. 7736. DOI: 10.1117/12.858042.
16. Rimmele T., Woeger F., Marino J., Richards K., Hegwer S., Berkefeld T., Soltau D., Schmidt D., Waldmann T. Solar multi-conjugate adaptive optics at the Dunn Solar Telescope // Proc. SPIE. 2010. V. 7736.
17. Langlois M., Moretto G., Béchet C., Tallon M., Montilla I., Goode Ph., Gorceix N., Shumko S. Solar multi-conjugate adaptive optics system for the Big Bear Observatory // Third AO4ELT Conference – Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes. Florence, Italy. May 2013. DOI: 10.12839/AO4ELT3.13316.
18. Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Lukin V.P. Wavefront sensors for adaptive optical systems // Meas. Sci. Rev. 2010. V. 10, N 3. P. 101–106.
19. Lukin V.P., Grigor'ev V.M., Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Kovadlo P.G., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Skomorovski V.I., Trifonov V.D., Chuprakov S.A. Development of adaptive optics elements for solar telescope // Proc. SPIE. 2012. V. 8447. DOI: 10.1117/12.925594.
20. Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Demidov M.L., Grigoriev V.M., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu., Trifonov V.D. Adaptive system for solar telescope for working in the conditions of strong atmospheric turbulence // Proc. SPIE. (Astronomical Telescopes + Instrumentation). 2016. V. 9909. DOI: 10.1117/12.2231936.
21. Лукин В.П., Антошкин Л.В., Большасова Л.А., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Канев Ф.Ю., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Макарова Н.А., Носов В.В., Носов Е.В., Торзаев А.В. История развития и становления работ по адаптивной оптике в ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 758–776; Lukin V.P., Antoshkin L.V., Bol'basova L.A., Botygina N.N., Emaleev O.N., Kanev F.Yu., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Makenova N.A., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V. The history of the development and genesis of works on adaptive optics in the Institute of Atmospheric Optics // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 1. P. 85–103.
22. Kopylov E.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu. The study of variability of the atmospheric turbulence in the region Lake Baykal // Proc. SPIE. (Astronomical Telescopes + Instrumentation). 2016. V. 9909. DOI: 10.1117/12.2231940.
23. Bolbasova L.A., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., Selin A.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G. Daytime optical

- turbulence and wind speed distributions at the Baikal Astrophysical Observatory // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2019. V. 482. P. 2619–2626.
24. *Konyaev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu.* Works on a set of data measuring turbulence in different seasons of the year // *Proc. SPIE.* 2017. V. 10466. DOI: 10.1117/12.2283000.
 25. *Lukin V.P., Botugina N.N., Emaleev O.N., Antoshkin L.V., Konyaev P.A.* Image quality analyzer // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8447. 84474A-1.
 26. *Antoshkin L.V., Borzilov A.G., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N.* Program–hardware complex for optical beams formation with modeled tilt angels // *Proc. SPIE.* 2017. V. 10466. DOI: 10.1117/12.2284987.
 27. *Ковадло П.Г., Шуховцев А.Ю., Копылов Е.А., Куселев А.В., Русских И.В.* Исследование оптических атмосферных искажений по данным измерений датчика волнового фронта // *Изв. вузов. Физика.* 2020. Т. 63, № 11. С. 109–114. DOI: 10.17223/00213411/63/11/109.
 28. *Paxman R.G., Thelen B.J., Murphy R.J., Gleichman K.W., Georges J.A.* Phase-diverse adaptive optics for future telescopes // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6711. DOI: 10.1117/12.734665.
 29. *Knox K.T., Thompson B.J.* Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure photographs // *Astrophys. J.* 1974. V. 193. P. L45–L48.
 30. *Veran J.-P., Rigaut F., Maitre H., Rouan D.* Estimation of the adaptive optics long-exposure point-spread function using control loop data // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1997. V. 14. P. 3057–3069.
 31. *Gendron E., Clénet Y., Fusco T., Rousset G.* New algorithms for adaptive optics point-spread function reconstruction // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 457. P. 359–363.
 32. *Marino J., Rimmele T., Christou J.* Long exposure point spread function estimation from adaptive optics loop data: validation and results // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6272. 62723W.
 33. *Wöger F.* Optical transfer functions derived from solar adaptive optics system data // *Appl. Opt.* 2010. V. 49, N 10. P. 1818–1825.
 34. *Konyaev P.A., Lukin V.P.* Computation algorithms for simulation in atmospheric optics // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 12. P. B107–B112.

V.P. Lukin, P.A. Konyaev, A.G. Borzilov, E.L. Soin. **Adaptive imaging and stabilization system for a large-aperture solar telescope.**

The ways of further development of a multistage adaptive system for stabilization and image formation at the Large Solar Vacuum Telescope are suggested. The system was created at IAO SB RAS with the technical support of ISTP SB RAS, tested, and proved to be effective. In this system, the first stage provides image stabilization, the second stage corrects the wave-front shape using a flexible mirror controlled by a special wave-front sensor, and the third stage is post-detector frame processing. For post-detector correction of digital images, special processing software was developed based on high-speed parallel algorithms. The system can be improved by means of creating high-speed correlation tracking algorithms and adding a second set of wave-front sensor and flexible mirror mounted in a plane conjugate to the altitude of a layer of strong local turbulence.