

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 53.082.5; 520.16

Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности

Л.В. Антошкин¹, Н.Н. Ботыгина¹, Л.А. Больбасова¹, О.Н. Емалеев¹,
П.А. Коняев¹, Е.А. Копылов¹, П.Г. Ковадло², Д.Ю. Колобов²,
А.В. Кудряшов¹, В.В. Лавринов¹, Л.Н. Лавринова¹, В.П. Лукин¹,
С.А. Чупраков², А.А. Селин¹, А.Ю. Шиховцев^{2*}

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

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

Поступила в редакцию 25.08.2016 г.

Изложены новые результаты, полученные в рамках проекта РФФ № 15-19-20013. Проект выполняется с середины 2015 г. Он посвящен решению актуальной задачи развития такой высокотехнологической отрасли, как оптико-электронное приборостроение, основанное на использовании адаптивной оптики для астрономических, лазерных и других приложений.

Ключевые слова: астрономия, адаптивная оптика, фазовая коррекция, турбулентность; astronomy, adaptive optics, phase correction, turbulence.

Введение

В настоящее время новейшие научные и технологические результаты в оптико-электронном приборостроении полностью определяются прогрессом, достигнутым в ряде приоритетных направлений развития науки и техники и критических технологий. Одно из таких направлений – построение систем адаптивной оптики (АО). Использование систем АО является признанным подходом для преодоления случайных искажений, вплоть до сильных, принципиально ограничивающих возможности применения оптико-электронных систем (ОЭС), и позволяет обеспечить дифракционно-ограниченные характеристики для ОЭС при работе в турбулентной атмосфере.

Настоящий проект является логическим продолжением работ [1–11], ранее выполняемых в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН). Команда проекта имеет опыт работы порядка 10 лет. За это время было пройдено несколько стадий развития системы АО [1–11], от корреляционного трекера до низкопорядковой коррекции для Байкальского солнечного вакуумного телескопа (БСВТ), работающего в Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск).

Результаты проекта лягут в основу построения систем АО для крупногабаритных солнечных телескопов, способных работать в условиях проявления сильных флуктуаций. Это необходимо в связи с тем, что солнечные телескопы работают в условиях дневной, следовательно более сильной по сравнению с ночной, турбулентностью. Кроме того, команда проекта планирует обобщить мировой опыт применения различного типа адаптивных зеркал и схем введений их в общую схему солнечного телескопа, а также выявить возможные подходы к созданию датчика волнового фронта для управления многозеркальными системами АО. Анализ имеющихся в печати экспериментальных данных по наблюдению Солнца с помощью телескопов, работающих с применением систем АО, будет использован для создания системы анализа качества получаемых изображений Солнца.

* Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru);
Нина Николаевна Ботыгина (bnn@iao.ru); Лидия Адольфовна Больбасова (sla@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eon@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (petrkonyayev@gmail.com); Евгений Анатольевич Копылов (evgen704@iao.ru); Петр Гаврилович Ковадло; Дмитрий Юрьевич Колобов; Алексей Валерьевич Кудряшов; Виталий Валериевич Лавринов; Лидия Николаевна Лавринова (lnl@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Сергей Александрович Чупраков; Антон Алексеевич Селин; Артем Юрьевич Шиховцев.

Научные задачи проекта

Главной особенностью создаваемой сейчас системы АО является обеспечение возможности эффективной работы в условиях сильной турбулентности.

Первая, принципиально важная задача проекта — создание оптической схемы ввода системы АО в тракт солнечного телескопа, которая позволит увеличить эффективность использования телескопа без прерывания рутинных высокоточных спектральных наблюдений.

Также одной из задач проекта является развитие пакета компьютерных программ для моделирования работы систем АО, позволяющих в динамике оценить реальное действие атмосферной турбулентности на оптические волны. Пакет включает в себя решение задачи распространения оптических волн в турбулентной атмосфере; измерения искажений волнового фронта; решение задач по расчету управляющих воздействий на активный оптический элемент. По совокупности его составляющих и функциональных возможностей данный пакет программ находится на самом высоком мировом научном уровне. Новые разработки базируются на фундаменте достижений коллектива. Пакет программ может применяться для расчетов исходных параметров всех элементов, входящих в систему АО, расчета сигналов коррекции искажений в системе и для оценки эффективности ее использования. При проведении этих расчетов должны использоваться данные о состоянии атмосферной турбулентности в месте расположения ОЭС.

Поэтому постоянно проводятся работы по накоплению данных измерений турбулентности в различные сезоны года. В 2015 г. было организовано несколько экспедиций во все сезоны для построения местной сезонной модели турбулентности в точке стояния БСВТ. Для измерений используются следующие приборы и оборудование: дифференциальный измеритель дрожания изображения (ДИММ) на базе телескопа MEADE, акустическая метеостанция МЕТЕО-2, корреляционный датчик волнового фронта (ДВФ) Шека—Гартмана (Shack—Hartmann), установленный на БСВТ, датчик Брандта. Кроме того, для получения информации о вертикальном ходе структурного параметра показателя преломления проводится реанализ данных, позволяющих получать вертикальные профили дисперсии флуктуаций температуры. Используется созданная ранее местная модель вертикального изменения скорости ветра. Как некий итог, поставлена задача построить местную модель вертикальных профилей турбулентности и скорости ветра для точки стояния БСВТ.

Одним из критически важных этапов проекта является сравнительный анализ возможностей применения самых современных деформируемых зеркал, а главное, применение прогнозирующих алгоритмов управления этими активными элементами. Значительных результатов в адаптивной фазовой коррекции можно достичь, используя современные активные деформируемые зеркала (ДЗ) с большим числом каналов управления и высоким быстродействием.

Однако ввиду того что ДЗ является механическим элементом, оно обладает ограниченным быстродействием и динамическим диапазоном перестройки. Расширение динамического диапазона возможно на основе применения нескольких активных зеркал, в том числе отдельного зеркала для коррекции наклонов волнового фронта. Для ускорения работы ДЗ возможна реализация алгоритмического подхода, при этом для управления активными элементами необходима разработка специальных алгоритмов управления ДЗ, позволяющих минимизировать временную задержку. Предполагается также, что для ускорения работы системы АО может применяться техника фильтрации Калмана.

Опираясь на мировой опыт, в частности, на материалы докладов, представленных на международном симпозиуме *Astronomical Telescopes and Instrumentation-2016* в Эдинбурге [12—21], считаем правильным вернуться к построению двухконтурной (двухзеркальной) системы АО, использующей как корректор наклонов волнового фронта, так и гибкое зеркало с числом приводов свыше 30. Для этого необходимо отработать алгоритмы одновременного управления двумя активными зеркалами — корректором наклонов и гибким биморфным зеркалом, а также провести дополнительный статистический анализ флуктуаций волнового фронта, включая разложение в базисе полиномов Цернике, по данным измерений ДВФ для формирования требований к параметрам управляемых зеркал.

Разработанные нами прогнозирующие алгоритмы управления базируются на данных прямых измерений параметров атмосферы. При этом наиболее приемлемой прямой мониторинг состояния атмосферной турбулентности по трассе работы ОЭС. Для случая астрономического телескопа это предполагает анализ вертикального распределения в атмосфере интенсивности турбулентности. Мы планируем осуществлять получение данных об атмосфере в рутинном режиме, используя ДВФ системы АО, устанавливаемый на работающем телескопе, и метеонаблюдения в районе телескопа. Коррекция, реализуемая на основе применения многозеркальной системы АО, сделает возможным внедрение таких систем в существующие российские астрономические телескопы, работающие в условиях сильной турбулентности. Это позволит значительно повысить уровень и качество астрономических наблюдений, осуществляемых с территории России, в частности, в обсерваториях юга Сибири — Байкальская астрофизическая обсерватория, Саянская солнечная обсерватория, что сделает востребованными отечественные обсерватории с точки зрения проведения на них высококачественных наблюдений.

Следующей по важности задачей проекта считаем создание высокоскоростного датчика волнового фронта. Реализуется разработка модернизированного корреляционного ДВФ Шека—Гартмана высокого разрешения для измерения волнового фронта в условиях сильной атмосферной турбулентности.

В рамках проекта также ведутся работы по созданию компьютерной модели системы АО для сол-

нечного телескопа с использованием технологий параллельного программирования для моделирования сигнала для ДВФ с применением многослойной модели вертикальной эволюции интенсивности турбулентности. Считаем, что к построению многозеркальной системы следует подходить только после тщательного анализа вертикального профиля уровня турбулентности, так как корректоры волнового фронта должны устанавливаться в плоскостях, сопряженных с наиболее сильными слоями атмосферной турбулентности. Это информация может быть получена только путем наблюдения атмосферной турбулентности в точке стояния телескопа.

В целом все составляющие проекта должны способствовать решению насущной научно-технической задачи — созданию адаптивной системы коррекции изображения на солнечном крупногабаритном телескопе. Численные расчеты и использование научно-технического задела позволят в процессе выполнения проекта [21] создать действующий макет системы АО для работы в составе БСВТ. Установка системы АО на крупноапертурном солнечном телескопе БСВТ станет одним из элементов решения актуальной физической проблемы изучения солнечно-земных связей на основе высокоточных наблюдений Солнца. Телескоп получит новые возможности — практически дифракционные параметры, что позволит получать снимки поверхности Солнца с разрешением порядка 0,1 угл. с.

Алгоритм моделирования динамической турбулентности

В интересах создания высокоскоростных систем АО нами были использованы новые технологии параллельного программирования [22], которые повышают эффективность численных алгоритмов, в частности, становится возможным компьютерное моделирование сложных компонентов и систем, работающих в динамическом режиме [23]. Многозеркальная система адаптивной коррекции является именно такой сложной системой.

Известно, что для атмосферных приложений адаптивной оптики требуется разработка динамических моделей турбулентности атмосферы, эволюционирующих во времени. Ранее нами был разработан алгоритм генерирования бесконечно протяженного экрана, однако применение его в динамических задачах основано на гипотезе Тейлора о «замороженности» турбулентности, а сам алгоритм сложен в практической реализации. Широкую популярность получил известный спектрально-фазовый метод, предназначенный для моделирования процессов и полей с заданной статистикой (спектральной плотностью).

Для двумерного дискретного поля $s(i, j)$ этот метод может быть представлен в виде

$$s(i, j) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} S(l, m) \times \exp(i g(l, m)) \cdot \exp\left[i 2\pi \left(\frac{l \cdot i}{L} + \frac{m \cdot j}{M}\right)\right] = FFT\{S(l, m) \cdot \exp(i g(l, m))\}. \quad (1)$$

Здесь FFT — оператор дискретного преобразования Фурье; $g(l, m)$ — некоррелированное двумерное случайное поле (белый шум); $S(l, m)$ — спектральная амплитуда.

Чтобы смоделировать эволюцию поля $s(k, l)$ во времени, необходимо согласно (1) задать функциональную связь двумерных массивов случайных чисел $g(l, m) = f(t)$ для дискретных моментов времени $t_n = nT$, где T — интервал времени дискретизации. В работе было предложено использовать для этого модель авторегрессии со скользящим средним, которая широко применяется в теории случайных процессов и описывается дискретным разностным уравнением

$$f(nT) = \sum_{p=1}^{N_{AP}} a_p \cdot f((n-p)T) + \sum_{q=1}^{N_{CC}} b_q \cdot r((n-q)T) + r(nT), \quad (2)$$

где $r(nT)$ — дискретный белый шум с нормальным распределением, нулевым средним значением и дисперсией σ_r^2 ; N_{AP} — порядок модели авторегрессии; N_{CC} — порядок модели скользящего среднего.

Спектр мощности такого процесса имеет аналитическое выражение в виде

$$F(\omega) = \sigma^2 \frac{\left| 1 + \sum_{q=1}^{N_{CC}} b_q \cdot \exp(-i\omega qT) \right|^2}{\left| 1 - \sum_{p=1}^{N_{AP}} a_p \cdot \exp(-i\omega pT) \right|^2}, \quad \frac{\pi}{T} \leq \omega < \frac{\pi}{T}. \quad (3)$$

Меняя коэффициенты a_p и b_q , можно варьировать поведение временного спектра $F(\omega)$ в широких пределах.

Однако на практике реализация предлагаемого метода требует сохранения большого объема данных двумерных массивов значений $g(l, m)$ для предыдущих моментов времени. Поэтому нами было предложено использовать модель авторегрессии 1-го порядка ($p = 1, q = 1$), которая предъявляет минимальные требования к памяти компьютера. Был разработан пошаговый алгоритм для модели авторегрессии 1-го порядка. Работа выполняется в четыре шага. Используется генератор псевдослучайных чисел с нормальным распределением, нулевым средним и ненулевой дисперсией. Применение параллельного алгоритма быстрого преобразования Фурье существенно ускоряет вычисления.

В итоге удалось предложить эффективный алгоритм (получивший в английском написании название ARMA) формирования изменяющихся во времени двумерных случайных полей с известным временным спектром. Возможна реализация предложенного метода с использованием параллельных алгоритмов, что делает этот метод еще более эффективным для моделирования динамических задач атмосферной адаптивной оптики [22, 23].

Был выполнен расчет эволюции двумерного случайного поля $s(i, j)$ со степенным спектром колмогоровского типа [23]. Для моделирования эволюции в среде, движущейся со скоростью $V(v_x, v_y)$, необходимо изменить формулу (1), введя в нее экспоненциальный множитель сдвига:

$$s(i, j) = FFT\{S \cdot \exp(ig(l, m)) \exp(i \cdot nT(v_x + v_y))\}. \quad (4)$$

На рис. 1 приведены результаты сопоставления расчетов временного спектра блуждания гауссова пучка для двух моделей: «замороженной» турбулентности – на основе прямого применения гипотезы «замороженных» флуктуаций (черные квадраты) и модели (2) (серые точки). Отметим, что с использованием пакета программ удается смоделировать практически бесконечный массив данных, причем гарантируется сохранение закона распределения вероятности.

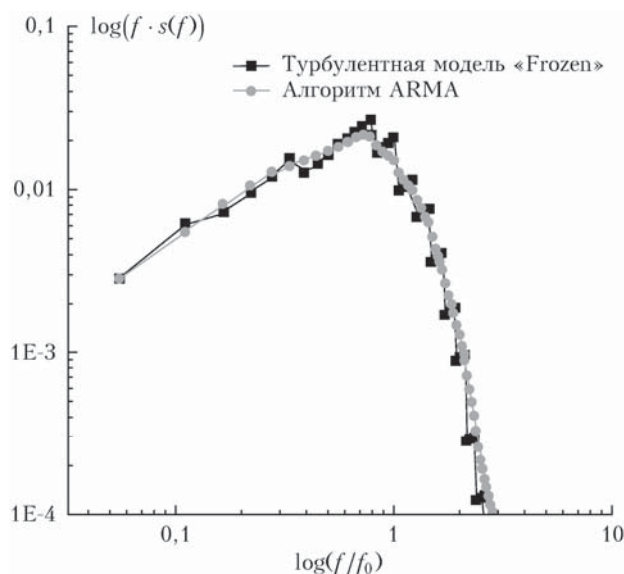


Рис. 1. Сопоставление расчетов спектров дрожания изображения, формируемого в турбулентной атмосфере, при прямом использовании гипотезы «замороженной» турбулентности и при использовании нового алгоритма

Данный алгоритм в сочетании с методом расщепления Фурье-преобразования был положен в основу создания программного компьютерного имитатора атмосферной турбулентности [23, 24] для численного моделирования динамических задач оптики атмосферы с использованием параллельных алгоритмов из библиотеки MKL Intel Parallel Studio. В автономном режиме имитатор позволяет проводить теоретические исследования путем компьютерного мо-

делирования, а будучи подключенным к гибкому управляемому зеркалу, он дает возможность проводить эксперименты с системами АО. В настоящее время в программном имитаторе реализованы следующие функции:

- моделирование динамической турбулентности со степенным спектром атмосферной турбулентности с задаваемыми внешним и внутренним масштабами;
- разложение двумерной фазовой функции в базисы полиномов Цернике и функций отклика гибких управляемых зеркал различных типов;
- ресинтез двумерной фазовой функции по вычисленным коэффициентам полиномов Цернике с произвольным усилением низших мод (наклоны, дефокусировка, астигматизм);
- управление скоростью эволюции среды в алгоритме авторегрессии;
- управление скоростью и направлением поперечного движения среды;
- при подключении деформируемого зеркала возможно управление им в реальном времени с частотой до 100 Гц.

Имитатор фазовых искажений волнового фронта

Известно, что настройка систем АО в условиях натурального эксперимента требует больших финансовых и временных затрат. Поэтому актуальным и целесообразным является разделение задачи отладки систем АО на предварительную подготовку и настройку системы в лабораторных условиях с последующей работой в условиях натуральных фазовых возмущений. В этой связи в состав лабораторного стенда по отработке алгоритмов работы систем АО мы предлагаем включить имитатор турбулентности.

Такой подход требует создания специального инструмента, позволяющего обеспечить детерминированные амплитудно-фазовые искажения волнового фронта для настройки АО как классической системы автоматического регулирования, а затем симуляции этих искажений с использованием тех или иных моделей атмосферы и активной среды лазера. Для работы на стенде мы предлагаем физический имитатор [25] фазовых искажений оптических волн, представляющий собой активное биморфное зеркало с системой высоковольтных усилителей, управляемое с помощью компьютера. Имитируемое фазовое распределение оптического поля возникает в отраженном от активного зеркала оптическом излучении. Под действием управляющих сигналов фаза отраженного излучения может изменяться в пространстве и времени.

- В состав имитатора входят:
- персональный компьютер;
 - программа «Имитатор искажений волнового фронта», управляющая многоканальным цифроаналоговым преобразователем (ЦАП);
 - многоканальный ЦАП, управляющий высоковольтными усилителями;
 - блок высоковольтных усилителей, нагруженных на биморфные актюаторы деформируемого зеркала;

– деформируемое зеркало имитатора, расположенное на пути излучения.

В мире уже существует подобное имитационное оборудование. Так, простой фазовый имитатор был разработан в Европейской Южной Обсерватории (г. Мюнхен, Германия). По сравнению с этим наиболее широко применяемым фазовым имитатором, представляющим собой вращающуюся фазовую пластинку, предлагаемый нами имитатор имеет ряд преимуществ. Прежде всего, это:

– возможность моделирования турбулентности с максимально большим диапазоном масштабов; сама компьютерная программа может быть эффективно применима для компьютерного моделирования изменяющихся во времени случайных процессов и полей, возможна ее реализация с использованием параллельных алгоритмов;

– возможность генерации турбулентности различных видов, в том числе моделирование неколмогоровской турбулентности, когерентной турбулентности, неколмогоровской турбулентности с конечными внешним и внутренним масштабами;

– несколько способов расчета управляющих воздействий на активное биморфное зеркало; программное определение требуемого числа полиномов для представления соответствующих фазовых искажений;

– возможность моделирования временной изменчивости среды; временная эволюция масштабов.

Такой имитатор способен работать с адаптивными зеркалами различных типов, как российских, так и зарубежных фирм-изготовителей, в том числе и с теми, что есть в наличии в команде проекта. Это, прежде всего, зеркала отечественного произ-

водства, в частности, зеркало, изготовленное компанией Active Optics NightN Ltd., представляющее собой биморфное деформируемое зеркало с 31 актюатором и системой усилителей; зеркало для управления волновым фронтом по наклонам, изготовленное в ИОА СО РАН. Предполагается также применение скоростного микромашинного зеркала фирмы Boston Micromachines (Бостон, США). Эти имеющиеся в наличии зеркала и будут использованы на стенде для отработки алгоритмов работы системы АО. Одной из задач создаваемого имитатора является [26, 27] разработка алгоритмов управления гибким зеркалом по измерениям датчика Шека–Гартмана.

Текущее состояние стенда на БСВТ

Кроме исследовательского стенда, развиваемого в ИОА СО РАН, в настоящее время оборудован и развивается стенд по отработке систем АО в реальных условиях натурального эксперимента на самом телескопе БСВТ.

Схема стенда представлена на рис. 2. В основе построения стенда лежит разработанная ранее схема, предложенная в патенте на полезную модель [28].

Оптическая схема стенда вписана в оптическую схему самого телескопа (рис. 2). В дальней части виден иллюминатор БСВТ, из которого солнечное излучение выводится и попадает на элементы стенда. Схема стенда построена таким образом, что оптическое (солнечное) излучение непосредственно сразу после иллюминатора БСВТ попадает на сферическое зеркало, которое преобразует сходящийся пучок в параллельный.

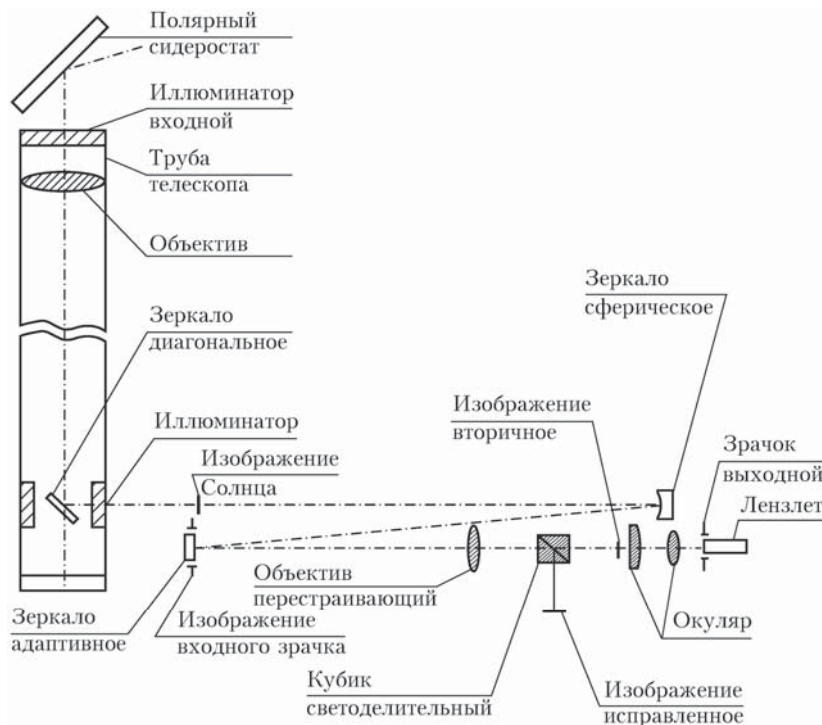


Рис. 2. Оптическая схема стенда, включающего в себя однозеркальную систему АО

Основные компоненты стенда размещаются на двух горизонтальных оптических столах. В состав стенда входят: датчик волнового фронта, анализатор качества изображения, компьютеры для обработки данных. Некоторые характеристики элементов стенда были описаны в наших работах [8–11, 29].

Основные параметры корреляционного ДВФ, установленного на стенде:

- поле зрения системы – до 50 угл. с;
- угловой масштаб пикселя – 1,28 угл. с;
- частота взятия отсчетов – 180–206 кадров/с;
- длина реализаций – более 6000 кадров;
- дискретизация регистрируемого сигнала освещенности – 8 бит.

Выходными параметрами ДВФ являются двухмерная картина фазы волнового фронта, а также разложения фазы по 27–35 ортогональным полиномам Цернике.

Анализатор качества изображения (АКИ) создан на основе видеокамеры Prosilica GE-680 и предназначен [28] для анализа формируемого телескопом изображения видимой поверхности Солнца. Результатами работы АКИ являются отбор наилучшего изображения и вывод среднего изображения на основе расчета параметров контраста и резкости.

Все компоненты стенда были модернизированы и введены в работу в августе 2015 г. при проведении первой экспедиции.

Модернизация ДВФ и АКИ

В августе–октябре 2015 г. нами была проведена модернизация стенда на БСВТ. Модернизация коснулась в первую очередь ДВФ. Практически был создан новый ДВФ на основе камеры фирмы Allied Vision, имеющей более высокую частоту регистрации кадров порядка 309 кадров/с. Такое увеличение быстродействия системы видеорегистрации на основе цифровой камеры позволило проводить эксперименты с записью быстропротекающих процессов в память компьютера по интерфейсу GIG-E (1000 Мб/с). Потребности в модернизации ДВФ возникла, прежде всего, в связи с тем, что для создания высокоэффективной адаптивной системы солнечного телескопа, работающей в режиме сильных флуктуаций интенсивности, необходимы дополнительные исследования статистических характеристик параметров корректируемого волнового фронта и в первую очередь натурные измерения временных спектров флуктуаций коэффициентов полиномов Цернике 1-го и 2-го порядков.

В свою очередь, получаемые с помощью модернизированного датчика данные будут использованы при составлении технических требований к двухканальной системе АО, корректирующей наклоны тип-титл зеркалом и высшие аберрации деформируемым зеркалом.

Для этого в течение 2015 г. мы провели следующие мероприятия:

1) выбрана и приобретена камера, имеющая частоту кадров 309 кадров/с при разрешении 640×480 пикселей;

2) разработаны компьютерные программы процедуры ввода изображения с помощью новой камеры с использованием механизма буферизации кадров в оперативной памяти с параллельной обработкой кадров в реальном времени эксперимента;

3) отлажено и проверено в лабораторных испытаниях программное обеспечение высокоскоростного контроля качества изображения с одновременной записью кадров в дисковую память компьютера, управляющего системой АО;

4) модернизирован алгоритм корреляционного датчика сдвига для измерения смещения изображения в реальном времени со скоростью выше 300 кадров/с.

Это модифицированное программное обеспечение для ДВФ и системы АКИ было передано в эксплуатацию, и во время третьего выезда на БСВТ в ноябре–декабре 2015 г. использовалось уже обновленное математическое обеспечение, что позволило увеличить их быстродействие.

По результатам измерений за 2015–2106 гг. на БСВТ с использованием ДВФ в различные сезоны года было выполнено обобщение всех имеющихся на данный момент оценок радиуса Фрида на БСВТ с целью установления его сезонной изменчивости.

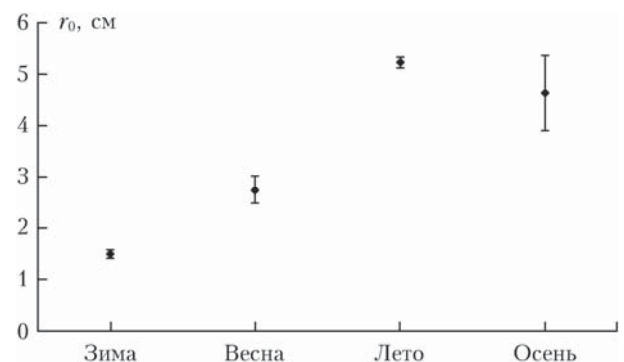


Рис. 3. Сезонная изменчивость средних значений радиуса Фрида

На рис. 3 приведены данные, характеризующие сезонную изменчивость уровня интегральной турбулентности в точке стояния БСВТ.

Особенности вертикальных изменений флуктуаций показателя преломления воздуха в месте расположения БСВТ

Были также изучены [30, 31] особенности вертикальных изменений флуктуаций показателя преломления воздуха до высот около 20 км в месте расположения БСВТ. Предложена возможная аппроксимация местной модели флуктуаций показателя преломления воздуха.

Для расчета профиля C_n^2 использовались данные архива реанализа NCEP/NCAR (National Cen-

ters for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research). С помощью рядов температуры воздуха на разных изобарических уровнях рассчитаны дисперсии температуры за промежутки времени, соответствующий продолжительности естественного синоптического периода (5–7 сут). На основе формы спектра турбулентности в широком диапазоне частот, включая интервал $1,65 \cdot 10^{-6} - 2,31 \cdot 10^{-6}$ Гц, получены оценки характеристик высокочастотных флуктуаций, в том числе C_n^2 . На рис. 4 показаны рассчитанные профили C_n^2 для утренних и дневных условий.

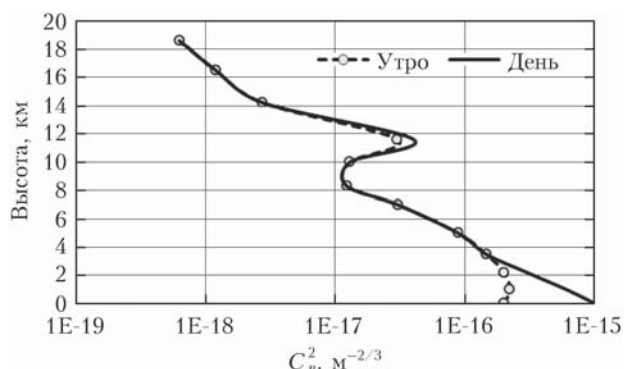


Рис. 4. Рассчитанные профили структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха для утренних и дневных условий

Анализ профилей $C_n^2(z)$ для утренних и дневных условий показывает, что в месте расположения

БСВТ в величину $\int_0^H C_n^2 dz$ значительный вклад вно-

сит турбулентность пограничного слоя атмосферы. Выше пограничного слоя турбулентность уменьшается с высотой. Однако на уровне около 12 км формируется атмосферный слой с повышенной турбулентностью. Причина усиления турбулентности в этом слое связана со струйным течением, которое наблюдается в течение всего года. Струйное течение существует благодаря устойчивому западно-восточному переносу. На уровне 9 км наблюдается слой с пониженной интенсивностью турбулентности, что, по-видимому, связано с уровнем обращения ветра. На высоте $H \sim 20$ км флуктуации показателя преломления становятся малыми по величине.

Таким образом, нами предложена аналитическая модель высотной зависимости структурной характеристики показателя преломления с использованием многолетних экспериментальных данных для Байкальской астрофизической обсерватории. Данная характеристика атмосферы важна для разработки и исследования эффективности системы АО БСВТ. С использованием предложенной модели рассчитаны основные параметры: угол изопланатизма, эффективная толщина, радиус Фрида. Последний хорошо соответствует экспериментально измеренным значениям и значению, восстановленному из данных NCEP/NCAR.

Разработка технических решений введения двухзеркальной системы АО в оптическую схему БСВТ

Наблюдения Солнца показали, что для получения изображения с высоким пространственным разрешением, кроме вакуумирования оптического пути БСВТ, необходима соответствующая система АО для коррекции дрожания и замыывания изображения из-за сильной турбулентности атмосферы по лучу зрения.

Поэтому уже в первый год выполнения проекта началась работа по формированию схемы введения многозеркальной коррекции в БСВТ. Ранее была разработана и изготовлена оптическая система, позволяющая устанавливать адаптивное зеркало в схему БСВТ и размещать согласующую оптику как вне вакуумной трубы на лабораторном столе длиной около 4 м, так впоследствии и в трубе с выводом фокальной плоскости непосредственно через нижний иллюминатор. Малая светосила БСВТ позволяет упростить конструкцию системы АО путем использования в качестве одного из обязательных оптических элементов сферического зеркала, наклоненного на малый угол.

На рис. 2 показана оптическая схема самого БСВТ и однозеркальная система АО [1–11, 28]. Объектив телескопа находится в вакуумной трубе, имеет диаметр 760 мм и фокусное расстояние около 40000 мм. Световой пучок, отражаясь от зеркала-сидеростата, проходит входной иллюминатор и недалеко от фокальной плоскости отражается диагональным зеркалом на один из выходных иллюминаторов. Сферическое зеркало с фокусным расстоянием 4 м строит параллельный пучок и изображение входного зрачка телескопа, в котором установлено адаптивное зеркало. Двухлинзовый объектив перестраивает изображение в нужном масштабе, а специальная оптическая система с переменным фокусным расстоянием строит выходной зрачок, в котором устанавливается лэнзлет, представляющий собой матрицу из дифракционных линз, строящих изображения на ПЗС-камере. Компьютер рассчитывает положение каждого изображения относительно опорного и подает команду на соответствующую зону адаптивного зеркала. Перед вторичным изображением светоделительный кубик отражает часть светового потока на камеру, регистрирующую исправленное изображение.

Как показывает анализ самых современных публикаций по применению АО для крупногабаритных солнечных телескопов, их построение предполагается на основе применения мультисопряженной (т.е. многозеркальной) коррекции. В настоящее время в рамках проекта разрабатываются составляющие для проведения численного моделирования всего комплекса телескопа, включая ДВФ и гибкое зеркало, и алгоритм коррекции на основе местной модели турбулентности, учитывающей в том числе ее сезонные вариации.

Разработка технических решений по введению многозеркальной коррекции в оптическую схему

БСВТ будет осуществляться по мере развития модели турбулентности для региона, анализа мирового опыта и уточнении параметров атмосферы [32].

На рис. 5 приведена схема введения уже двух зеркал в оптический тракт БСВТ. При этом в качестве одного из них может использоваться корректор наклонов. Схема разрабатывалась с учетом конкретных размеров имеющихся в наличии элементов управления. Предполагается, что на первом этапе выполнения работ при проектировании макета системы АО будут использованы элементы, имеющиеся в наличии в ИОА СО РАН, а именно гибкое биморфное зеркало, которое изготовлено под руководством А.В. Кудряшова, и создаваемый в рамках проекта макет корректора наклонов – тип-тилт зеркало.

Необходимо отметить следующее.

Зеркало – корректор наклонов необходимо для коррекции в том числе и дрожания башни телескопа. Для этого в схеме должен быть корреляционный датчик ухода положения Солнца. Необходимо тщательно продумать его параметры: диапазон углов и частоту коррекции.

Оптимальное положение гибких зеркал зависит от вида высотного распределения структурного параметра показателя преломления воздуха над обсерваторией. Если такое положение не выбрано, то эффект от трех зеркал будет не выше, чем от одного. Параметры датчиков волнового фронта для каждого из корректирующих зеркал также зависят от поведения турбулентности в регионе [30, 32].

Возможно проведение численного моделирования всего комплекса телескопа, включая ДВФ, ДЗ и алгоритм управления телескопом на основе местной модели турбулентности. В качестве наиболее вероятного ДВФ можно использовать развиваемый в ИОА СО РАН корреляционный датчик Шека–Гартмана с переменным числом используемых субапертур от 8×8 до 30×30 . Для разных зеркал возможно использование датчиков различных размеров.

Особое место занимает оценка требуемой полосы частот, которая должна обрабатываться гибкими зеркалами, а также их динамический диапазон перестройки. По всей видимости, биморфные зеркала, как самые медленные, хотя и дешевые, следует сразу исключить из рассмотрения. Что касается при-

менения микромашиных зеркал (Бостон, США, Нидерланды), они себя еще недостаточно зарекомендовали. Поэтому мы считаем необходимым использовать мембранные зеркала на пьезотолкателях, которые обещают полосу частот управления выше 1 кГц. Предполагается начать эскизную разработку АО системы БСВТ Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН с двух зеркал: тип-тилт и адаптивное (деформируемое) зеркало. Систему следует прорабатывать в двух вариантах:

- оба зеркала установлены в двух разнесенных плоскостях изображения входного зрачка телескопа;
- зеркало тип-тилт установлено перед изображением входного зрачка с расположенным в нем адаптивным зеркалом.

Алгоритмы работы также требуют моделирования с учетом и параметров телескопа, и турбулентности. Важно соблюдать этапность при разработке АО: сначала наклоны, потом одно зеркало, далее следует добавлять зеркала. Стоит отметить также, что мультисопреженные системы еще не вышли из зоны научных исследований, поэтому нельзя о них говорить как о реально внедренных в практику астрономических наблюдений [16–20]. С учетом нашей информации о турбулентности региона следует ориентироваться на предельно сильную турбулентность, т.е. турбулентность с радиусом когерентности менее 5 см, при высоких скоростях ветра на входной апертуре телескопа. Необходимо размещение в обсерватории приборов контроля атмосферной турбулентности.

Создание больших телескопов, работающих с использованием АО, требует применения специальной вычислительной техники как на этапе моделирования, так и при реализации систем управления и датчиков волнового фронта. Необходимо начинать эту работу уже сейчас, учитывая мировой опыт.

Заключение

Результаты, полученные при выполнении настоящего проекта [21, 30–33], будут использованы в дальнейшем при проектировании АО для нового российского трехметрового крупноапертурного солнечного телескопа (КСТ), создаваемого в рамках «МЕГАПРОЕКТА», выполняемого под руководством

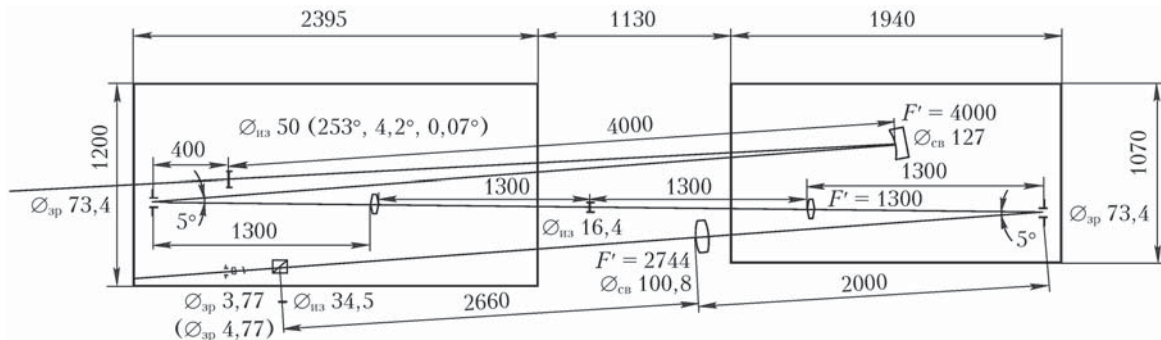


Рис. 5. Введение двухзеркальной системы АО в оптическую схему БСВТ

академика Г.А. Жеребцова. Важно отметить, что без системы АО трехметровый солнечный телескоп КСТ не может работать эффективно. Создание такого телескопа с системой АО позволит российской солнечной астрономии получать достойные научные результаты на мировом уровне.

Проект финансово поддержан грантом Российского научного фонда № 15-19-20013.

1. *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.
2. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Лавринов В.В., Лукин В.П.* Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1077–1082.
3. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Янков А.П.* Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа // Оптик. ж. 2006. Т. 73, № 3. С. 55–60.
4. *Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Grigor'ev V.M., Konyaev P.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Skomorovski V.I., Yankov A.P.* Adaptive system of tip-tilt correction of image with modified correlation tracker for BSVT // RS seria 12M. 2007. V. 6, N 1. P. 219–226.
5. *Григорьев В.М., Лукин В.П., 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.
6. *Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Лукин В.П.* Датчики волнового фронта для адаптивных оптических систем // Автометрия. 2008. Т. 44, № 4. С. 119–128.
7. *Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Lukin V.P.* Wave-front sensors for adaptive optical systems // Proc. SPIE. 2009. V. 7476. P. 74760L01–74760L08.
8. *Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Корольков В.П., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Насыров Р.К., Полещук А.Г., Черкашин В.В.* Датчик Шака–Гартмана на основе раstra низкоапертурных внеосевых дифракционных линз // Автометрия. 2009. Т. 45, № 2. С. 88–98.
9. *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.
10. *Копылов Е.А., Лукин В.П.* Статистические характеристики биморфного зеркала DM2-100-31 и возможность его применения в адаптивной оптической схеме Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1111–1113.
11. *Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин Л.В., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Развитие элементов адаптивной оптики для солнечного телескопа // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1099–1104.
12. *Changhui Rao, Naiting Gu, Lei Zhu, Cheng Li, Jinglong Huang, Yuntao Chen, Yangyi Liu, Benxi Yao, Zhiyong Wang, Xuedong Cao, Ming Zhang, Hong Liu, Yongjian Wan, Hao Xian, Wenli Ma.* Progress on the 1.8 m Solar Telescope: The CLST // Proc SPIE. V. 9906. P. 9906–157.
13. *Johnson L.C., Cummings K., Drobilek M., Johanson E., Marino J., Richards K., Rimmele T., Sekulic P., Wöger F.* Status of the DKIST system for solar adaptive optics // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99090Y.
14. *Schmidt D., Rimmele T., Marino J., Wöger F.* A review of solar adaptive optics // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99090X.
15. *Berkefeld T., Schmidt D., Soltau D., Heidecke F., Fischer A.* The AO system of the 1.5 m GREGOR solar telescope: Four years of operation // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 990924.
16. *Schmidt D., Marino J., Gorceix N., Xianyu Zhang, Berkefeld T., Goode P.R., Rimmele T.R.* Progress with multi-conjugate adaptive optics at the Big Bear Solar Observatory // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 990929.
17. *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. P. 99092I. DOI: 10.1117/12.2231057.
18. *Noriaki Miura, Ayumu Oh-ishi, Shotaro Aoki, Hikaru Mogaki, Susumu Kuwamura, Naoshi Baba, Yoichiro Hanaoka, Masashi Yamaguchi, Satoru Ueno, Yoshikazu Nakatani, Kiyoshi Ichimoto.* Development of a new solar adaptive optics system at the Hida Observatory // Proc. SPIE. 2014. V. 9148. P. 914831.
19. *Noriaki Miura, Akira Oh-ishi, Susumu Kuwamura, Naoshi Baba, Yoichiro Hanaoka, Satoru Ueno, Yoshikazu Nakatani, Kiyoshi Ichimoto.* Status of Hida solar adaptive optics system and experiment of tomographic wavefront sensing // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99092N.
20. *Lanqiang Zhang, Lin Kong, Hua Bao, Lei Zhu, 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, P. 99092C. DOI: 10.1117/12.2231955.
21. *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., Kudryashov A.V., Lavinov 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. 2016. V. 9909. P. 990932.
22. *Konyaev P.A.* A computer-based simulator of the atmospheric turbulence // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 968025.
23. *Коняев П.А.* Компьютерное моделирование адаптивной оптики для атмосферных лазерных систем // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 12–19.
24. *Коняев П.А.* Алгоритм моделирования динамической турбулентности в задачах атмосферной и адаптивной оптики // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 948–951.
25. *Киселев В.Ю., Берченко Е.А., Филатов А.С., Коняев П.А., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Имитатор фазовых искажений волнового фронта // Фотоника. 2014. № 4(46). С. 34–49.
26. *Антошкин Л.В., Голенева Н.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н.* Метод вычисления поперечных составляющих скорости ветра на входной апертуре адаптивной системы по измерениям датчика волнового фронта Шака–Гартмана // Автометрия. 2015. Т. 51, вып. 6. С. 63–69.
27. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н.* Развитие алгоритмов управления гибким зеркалом // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 929–933; *Antoshkin L.V., Lavinov V.V., Lavrinova L.N.* Development

- of flexible mirror control algorithms // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 29–88.
28. *Телескоп с адаптивной оптической системой*: Пат. на полезную модель № 111695. Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, П.Г. Ковадло, П.А. Коняев, Е.А. Копылов, В.П. Лукин, В.И. Скоморовский, В.Д. Трифонов, С.А. Чупраков. Оpubл. 29.06.2011.
 29. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин Л.В., Коняев П.А.* Анализатор качества изображения // *Датчики и системы*. 2012. № 6. С. 12–14.
 30. *Kopylov E.A., Bolbasova L.A., Goleneva N.V., Lavrinov V.V.* Investigations of parameters of image quality for adaptive optical systems of BSVT // *Proc. SPIE*. 2015. V. 9680. P. 9680.
 31. *Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Лукин В.П.* О некоторых способах описания изменения показателя преломления с высотой // *Мат-лы XXII Межд. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. В191–В194.
 32. *Лукин В.П., Сазонова П.В.* Динамические свойства адаптивных оптических систем // *Изв. вузов. Физ.* 2015. Т. 59, № 7. С. 121–129.
 33. *Носов В.В., Носов Е.В., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Особенности структуры турбулентности в обсерваториях юга Сибири // *Тез. докл. межд. конференции «Настоящее и будущее малых и средних телескопов»*. САО РАН. 2015. С. 54–57.

L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, L.A. Bolbasova, O.N. Emaleev, P.A. Konyayev, E.A. Kopylov, P.G. Kovadlo, D.Yu. Kolobov, A.V. Kudryashov, V.V. Lavrinov, L.N. Lavrinova, V.P. Lukin, S.A. Chuprakov, A.A. Selin, A.Yu. Shikhovtsev. **Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence.**

In this paper, we present new results obtained within Russian Science Foundation project N 15-19-20013. The project was started in the middle of 2015. It is devoted to the solution of actual problems of the optoelectronic industry on the basis of the use of adaptive optics in astronomy, laser, and other applications. Recent achievements in this industry are completely determined by the progress in priority directions of science and critical technologies. One of these directions is the design of adaptive optics (AO) systems, which allow overcoming random distortions and, thus, achieving diffraction-limited performance for systems operating in a turbulent atmosphere. We describe the progress in the development of the newest AO system for the Russian largest solar telescope, i.e., 1-m Big Solar Vacuum Telescope of the Baikal Astrophysical Observatory, and approaches to the development of such systems operating in strong day turbulence conditions.