

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА

И.В. Русских, Д.Ю. Колобов, А.В. Киселев

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
vanekrus@iszf.irk.ru

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE OPTICS SYSTEM FOR LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE

I.V. Russkikh, D.Y. Kolobov, A.V. Kiselev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
vanekrus@iszf.irk.ru

Аннотация. Одной из важнейших задач экспериментальной физики Солнца является исследование тонкой структуры солнечной атмосферы. Характерные размеры интересующих образований составляют величины порядка $0.1''$. Дифракционное разрешение крупноапертурных телескопов наземного базирования примерно соответствует этим значениям. Достижение такого разрешения возможно при формировании изображения лучами с равной оптической длины пути — плоским волновым фронтом. Атмосфера Земли неоднородна по температуре, плотности и показателю преломления воздуха как вдоль луча зрения, так и поперек. Такие неоднородности приводят к оптическим разностям хода и искажениям волнового фронта. Как следствие, реальное разрешение телескопа ухудшается до $1.5\text{--}2''$. Исправление волнового фронта осуществляется с помощью систем адаптивной оптики, где для измерения формы ВФ используются датчики Шака-Гартмана, а для коррекции — активные деформируемые и тип-тилт зеркала, установленные в оптической плоскости, сопряженной с плоскостью входной апертуры телескопа. Статья посвящена разработке такой системы для Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории (БСВТ БАО).

Ключевые слова: телескоп, адаптивная оптика.

Abstract. One of the most important problems of experimental Solar physics is research of fine structure of the Solar atmosphere. Typically size of the fine structure phenomena is about $0.1''$. Diffraction resolution of the ground large aperture telescopes roughly corresponds to this value. Such resolution can be obtained with forming image by rays with equal optical path length — flat wavefront. Earth's atmosphere is inhomogeneous by the temperature, density and refractive index both along the line of sight and across. Such irregularities make optical path lengths different which results into the distorted wavefront. Consequently, real telescope resolution reduces to $1.5\text{--}2''$. Adaptive optics systems are used to correct wavefront. It consists of Shack-Hartmann wavefront sensors for wavefront measuring and deformable and tip-tilt mirrors for correction. Both wavefront measuring and correction devices are placed in optical plane conjugated with telescope aperture. Development of such system is made for Large Solar vacuum telescope at the Baikal Astrophysical Observatory.

Keywords: telescope, adaptive optics.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем физики Солнца является понимание механизмов переноса энергии во внешние слои его атмосферы. Одним из возможных механизмов считается распространение волн в солнечной плазме. Для решения задач гелиосейсмологии необходимо проводить наблюдения одновременно в нескольких спектральных линиях от фотосферы до короны. Например, источниками колебаний в верхних слоях атмосферы могут быть яркие точки в тени пятен в фотосфере [Jess et al., 2012]. Их характерный размер порядка 0.1 угл. сек., тогда как размеры самих пятен порядка 2 угл. мин. При этом важно иметь временное разрешение, характерное для времени протекания процессов в фотосфере и хромосфере — порядка 5 с. Такого рода наблюдения проводят с помощью наземных телескопов. В полной мере достичь этих параметров станет возможным с помощью крупных солнечных телескопов. Тем не менее существующие телескопы имеют потенциал для развития, особенно в части предельного пространственного разрешения при использовании систем адаптивной оптики, а разрабатываемые для них системы являются экспериментальной базой для создания новых крупных телескопов.

ОПИСАНИЕ ТЕЛЕСКОПА

БСВТ — телескоп средней апертуры, расположен в Байкальской астрофизической обсерватории (БАО)

в пос. Листвянка на берегу Байкала на высоте более 600 м над уровнем моря [Степанов и др., 1979]. Наведение телескопа обеспечивается следящей установкой — сидеростатом с плоским зеркалом диаметром 1 м — расположенной на башне высотой 25 м. Она питает объектив диаметром 76 см, расположенный на фокусирующем механизме в вакуумной трубе. Остаточное давление в трубе менее 5 кПа минимизирует влияние воздушных потоков внутри нее. На расстоянии 40 м от объектива фокусируется изображение диаметром 38 см. За 2.5 м до фокальной плоскости пучок света диаметром 100 мм вырезается диагональным зеркалом и направляет его в один из боковых иллюминаторов трубы: на спектральную щель спектрографа или во входное окно оптической лаборатории, где установлен опытный образец АОС. Остальной свет падает через выходной иллюминатор трубы на координатную установку — оптико-механический координатометр, обеспечивающий наведение на выбранный участок Солнца по координатам и удержание его на входе приемной аппаратуры (щели спектрографа, входной диафрагмы АОС).

В 2000-х гг. был разработан стенд АОС Ангара для БСВТ, где была опробована схема работы датчика Шака-Гартмана и управления адаптивным зеркалом [Лукин, 1999]. Последний вариант многокаскадной адаптивной системы коррекции изображений для Большого солнечного вакуумного телескопа приведен в [Лукин, 2019].

В данной работе решается задача создания рабочей оптической системы коррекции изображений, согласованной с атмосферными условиями, для рутинных наблюдений. Не менее важной является возможность проведения исследований с целью разработки методов анализа и управления АОС.

АТМОСФЕРНЫЕ УСЛОВИЯ

В идеальной оптической системе свет от точечного источника, которым при наших условиях можно считать звезду, обладает практически плоским волновым фронтом. В реальности свет проходит через неоднородную среду атмосферы Земли, отдельные участки которой имеют разные плотность, температуру и другие характеристики, влияющие на коэффициент преломления, что приводит к искажению волнового фронта. Изображение точечного источника при этом размывается. Влияние атмосферы на разрешение телескопа оценивают по параметру r_0 — параметру Фрида, который определяет средний размер участка поверхности волнового фронта, на котором разность фаз не превышает 1 радиан. Иначе говоря, разрешение крупноапертурного телескопа без АОС эквивалентно разрешению атмосферной «линзы» диаметром r_0 , следовательно при $r_0 \sim 13$ см и $\lambda \sim 500$ нм можно получить разрешение порядка 1".

Исследованиям астроклимата и, в частности, атмосферному качеству изображения в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории посвящен ряд работ [Ботыгина, 2013; Ковадло, 2013; Ковадло, 2015]. По данным исследований характерные значения r_0 дневной атмосферы в БАО изменяются от 4 до 8 см [Копылов, 2015; Ботыгина, 2013, Kovadlo, 2017]. Хорошее качество изображения наблюдается примерно в 10 процентах часов за год. Как видно из табл., периоды хорошего качества продолжительностью >60 мин наблюдаются еще реже.

В эти периоды телескоп можно использовать в режиме высокого разрешения для получения длительных серий наблюдательных данных. В остальное время разрешение порядка 1–2", и тогда маловероятно достижение дифракционного качества даже с адаптивной оптикой, что ограничивает круг экспериментальных задач. Однако, в этом случае применение АОС может существенно увеличить эффективность телескопа в режиме среднего разрешения (0.5–1").

СХЕМА АОС БСВТ

Изначально БСВТ был спроектирован как система с питающим зеркалом диаметром 1.5 м, но исторически сложилось так, что было установлено метровое зеркало, поэтому в летний период на входную апертуру телескопа (объектив) падает пучок света не круглой, а сложной формы в виде эллипса со срезанными краями, малая ось которого в день Солнцестояния составляет немногим больше 600 мм. Из-за особенности сидеростата в течение дня этот эллипс вращается, что затрудняет юстировку АОС и анализ волнового фронта. Расчет оптической схемы АОС сделан для работы как при полной (720 мм), так и при диафрагмированной до 600 мм апертурах. При

расчете схемы учитывалось распределение параметра Фрида по диафрагмированной апертуре телескопа для дневного времени (рис. 1), показывающее высокую степень неоднородности.

Характерные значения r_0 для некоторых астрономических обсерваторий. Для БАО приведены оценки, сделанные ИСЗФ СО РАН, по данным измерений дрожания солнечных изображений с помощью датчика Брандта и локальных наклонов датчиком Шака-Гартмана с общей продолжительностью наблюдений около 2 лет

	Hanle	BAO	Merak	Big Bear	Haleakala
Годовое количество часов $r_0 > 7$ см	514	790	731	1053	997
Годовое количество часов $r_0 > 12$ см	74	122	108	136	399
Годовое количество двухчасовых периодов с $r_0 > 7$ см	38	>40	76	83	82
Годовое количество двухчасовых периодов с $r_0 > 12$ см	1	>2	6	1	10

На рис. 2 представлена итоговая схема с указанием радиусов кривизны силовых зеркал. Созданная схема удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к ней: возможность установки двух ДВФ и двух корректоров волнового фронта; минимальное влияние вспомогательной оптики на изображения; удобство юстировки; удобство юстировки ка-

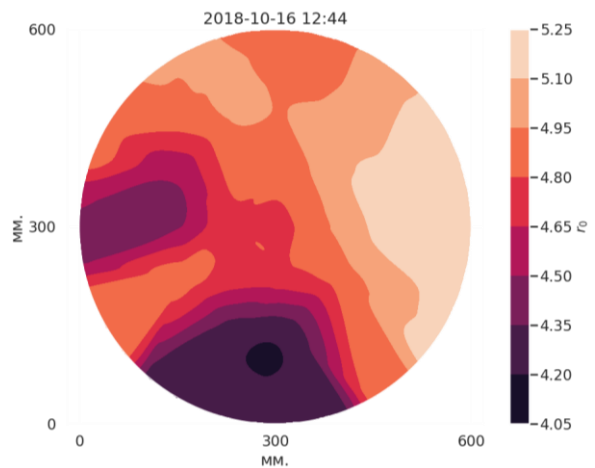


Рис. 1. Распределение параметра Фрида на апертуре БСВТ

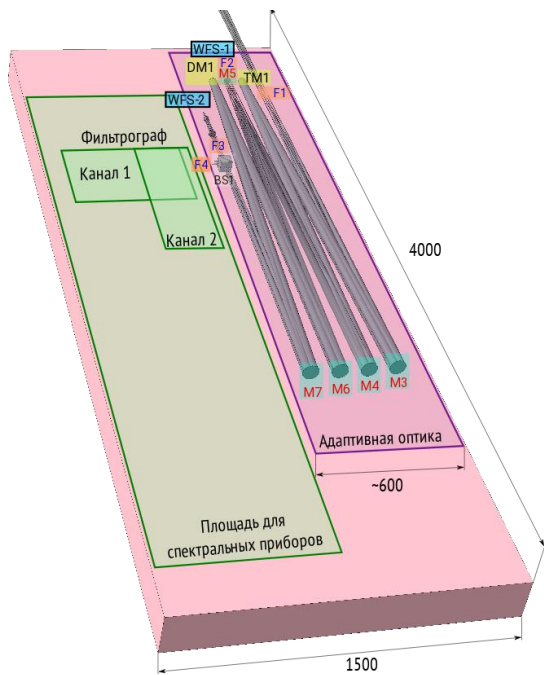


Рис. 2. Итоговая схема АОС (размеры в мм)

чество и доступа к элементам; компромиссная стоимость и сложность изготовления ее элементов.

Расположение системы на оптическом столе выбрано так, чтобы при давлении в трубе ниже 5 кПа и температуре воздуха около нуля градусов и среднем положении объектива входная апертура (диафрагма, определяющая поле зрения системы) АОС оказывалась в фокальной плоскости телескопа. Далее диафрагма считается неподвижной, а фокус телескопа при смене условий настраивается на нее. Первичное выставление и дальнейшая юстировка элементов системы производится относительно ее входной апертуры последовательно в порядке хода светового пучка. Одной из особенностей системы является возможность расположения оптической оси всех ее элементов в одной плоскости, что упрощает сборку и юстировку системы, а также снижает требования к монтажным частям системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вспомогательная оптика была изготовлена в ИСЗФ СО РАН. Параметры изображений, полученных на датчиках и активных зеркалах, соответствуют расчетным. Отработаны методики юстировки, опробованы алгоритмы калибровки. В дальнейшем планируется улучшение алгоритмов калибровки и управления системой, а также достижение работы системы в режиме замкнутого контура на частоте более 150 Гц. Решение этих задач позволит на следующем этапе проводить наблюдательные программы БСВТ с использованием АОС.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Исследование параметров волнового фронта, включая распределение радиуса Фрида по апертуре телескопа выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых — кандидатов наук МК-227.2019.8 (№ 075-15-2019-628).

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп [<http://ckp-rf.ru/usu/200615>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Ковадло П.Г., Кочеткова О.С., Шиховцев А.Ю., Язев С.А. Астроклимат Сибири // Всерос. конф. по солнечно-земной физике, посв. 100-летию со дня рождения чл.-корр. РАН В.Е. Степанова, 16–21 сентября 2013 г. Иркутск. 2013. С. 43.

Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Об астроклиматических условиях в горных районах юга Восточной Сибири // Тезисы Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и XIV конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». 2015. С. 95–96.

Копылов Е.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. Исследование изменчивости атмосферной турбулентности с помощью датчика волнового фронта // Изв. выс. уч. зав. Физика. 2015. Т. 58, № 3. С. 104–106.

Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В. и др. Многокаскадная система коррекции изображения для Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 404–413.

Лукин В.П., Фортес Б.В., Антошкин Л.В. и др. Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа: результаты тестирования и перспективы развития // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 12. С. 1161–1164.

Степанов В.Е., Банин В.Г., Круглов В.И. Экспериментальный макет Большого солнечного вакуумного телескопа (ЭМ БСВТ) СИБИЗМИР // Новая техника в астрономии. 1979. С. 42–51.

Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Lukin V.P., et al. On the spectral composition of atmospheric turbulent optical distortions from observations on solar telescopes // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104660U (30 November 2017). 2017. DOI: [10.1117/12.2284308](https://doi.org/10.1117/12.2284308).

Jess D.B., De Moortel I., Mathioudakis M., et al. The source of 3 minute magnetoacoustic oscillations in coronal fans // Astrophys. J. 2012. V. 757, N 2. P. 160.

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/200615>.