

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 520.16

**Двухзеркальная адаптивная система  
коррекции атмосферных помех  
Большого солнечного вакуумного телескопа**

**Н.Н. Ботыгина<sup>1</sup>, Д.Ю. Колобов<sup>2</sup>, П.Г. Коваadlo<sup>2</sup>, В.П. Лукин<sup>1</sup>,  
С.А. Чупраков<sup>2</sup>, А.Ю. Шиховцев<sup>1\*</sup>**

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

<sup>2</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

Поступила в редакцию 31.01.2018 г.

Описаны особенности двухзеркальной адаптивной системы коррекции атмосферных помех Большого солнечного вакуумного телескопа, разработанной с учетом коррекции инструментальных вибраций телескопов в широком амплитудно-частотном диапазоне с открытым сидеростатным питающим зеркалом. Коррекция общих наклонов фронта световой волны и его деформаций осуществляется отдельно. Адаптивная оптическая система рассчитана на работу с протяженными источниками света (Солнцем), имеющими низкий контраст деталей изображения.

*Ключевые слова:* солнечный телескоп, коррекция, турбулентность, Солнце; solar telescope, correction, turbulence, Sun.

Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) был введен в эксплуатацию около 30 лет назад и был ориентирован на исследование тонкой структуры солнечных явлений. В соответствии с предназначением в его конструкции были предусмотрены все возможные на тот момент элементы, способствующие получению высокого разрешения в условиях наземного базирования. Основное внимание уделялось снижению действия атмосферной турбулентности, наружных и внутренних павильонных эффектов на искажения волнового фронта падающего на апертуру излучения и дальнейший ход лучей внутри павильона до регистратора. Телескоп имеет систему контроля оптики во время работы в штатном режиме наблюдений.

Место расположения телескопа на южном склоне Байкальской котловины на высоте 240 м относительно зеркала озера вблизи от береговой линии, выбранное путем многолетних астроклиматических наблюдений на разных пунктах, отличается самым низким уровнем атмосферной турбулентности во все сезоны года, характерные для территории юга Восточной Сибири. Развитие дневной турбулентности

воздуха в Байкальской котловине подавляется охлаждающим действием воды. Сравнительный анализ астроклиматических характеристик известных солнечных обсерваторий показал, что выбранный пункт входит в число наиболее благоприятных мест для проведения солнечных наблюдений с высоким разрешением, так как средняя годовая суммарная продолжительность ясного неба здесь составляет 2106 ч.

Выбранная конструкция телескопа с наклонным расположением трубы позволила наиболее оптимально встроить его в местный рельеф (небольшое изолированное поднятие в береговом гребне, круто обрывающемся к линии уреза воды) и поднять входную апертуру на 25 м над подстилающей поверхностью. Специальные исследования показали, что конвективная турбулентность приземного слоя на этой высоте снижается более чем на 70%.

Вакуумный вариант трубы телескопа длиной 40 м защищает рабочий пучок света от воздействия внутривидеопавильонной турбулентности, возникающей из-за разности нагрева и охлаждения в течение суток отдельных частей конструкции телескопа.

Выбор оптической схемы телескопа был также сделан с учетом минимизации влияния инструментальных помех на качество изображения. Основное требование «минимум возможных помех от не защищенной вакуумом оптики» было выполнено: использовали только одно плоское питающее зеркало на сидеростатной установке. Двухлинзовый объектив диаметром 760 мм размещен в вакуумной трубе. Но перед

\* Нина Николаевна Ботыгина (bnn@iao.ru); Дмитрий Юрьевич Колобов (kolobov@iszf.irk.ru); Павел Гаврилович Коваadlo (kovadlo2006@yandex.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Сергей Александрович Чупраков (chuprg@mail.iszf.irk.ru); Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta@gmail.com).

объективом располагается плоский стеклянный ил-люминатор, закрывающий входной торец вакуумной трубы, который подвергается тепловому воздействию солнечного пучка и окружающей среды. Предусмотрены его активная термостабилизация и контроль состояния оптического тракта телескопа в заданных допусках, в том числе во время штатных наблюдений с помощью специально разработанной интерферометрической лазерной системы.

Первоначально предполагалось, что в длинно-фокусной системе атмосферно и инструментально рассеянный свет не будет оказывать существенного влияния на качество изображения. Однако его влияние, как показала практика наблюдений, оказалось выше ожидаемого при исследовании низкоконтрастных объектов, например солнечной грануляции. Ниже будет показано, что этот эффект затрудняет работу корреляционных датчиков волнового фронта и снижает степень коррекции атмосферных помех.

Описанный комплекс мероприятий и конструктивные особенности телескопа позволили значительно снизить влияние приземной конвекции, павильонных и инструментальных эффектов на качество изображения. Накопленный за время эксплуатации БСВТ хронологический ряд показателей качества изображения демонстрирует (рис. 1), что при реальном разрешении телескопа  $0,2''$  вероятность изображений лучше  $1''$  составляет  $20\text{--}25\%$  за время наблюдений с учетом сезона года. Эти результаты позволяют надеяться, что введение в оптическую схему БСВТ активных корректирующих оптических элементов и адаптивной мультисистемы позволит значительно повысить информативность наблюдений, расширить круг задач и вывести инструмент на новый уровень.

Многолетние исследования качества солнечного изображения показывают, что значения радиуса Фрида, определенные из реализаций дрожания края солнечного изображения, пятенных фрагментов и их размытия, в отдельные моменты времени могут достигать  $200\text{ мкм}$  и более. Около  $25\%$  наблюдательного времени повторяемость качества изображения колеблется в пределах  $1''$  и меньше. Такие оценки были получены за длительные интервалы в разные сезоны года в течение всего периода эксплуатации БСВТ по фотографическим и фотоэлектрическим наблюдениям солнечных изображений.

На рис. 1 показана вероятность повторяемости качества солнечного изображения на БСВТ в белом свете (на длине волны вблизи  $0,5\text{ мкм}$ ). Разрешение фрагментов изображений, полученных с короткой экспозицией, оценивалось по фотоснимкам. Необходимо отметить, что снимки выполнялись в моменты улучшения качества изображения по визуальной оценке, без последующей селекции полученных изображений.

Определение предельного углового пространственного разрешения выполнено по фотографиям отдельных участков Солнца размером  $150'' \times 150''$  и  $400'' \times 400''$ , которые фотометрировались с шагом  $0,014''$ . По полученным реализациям вычислялись одномерные спектры «мощности» неоднородностей

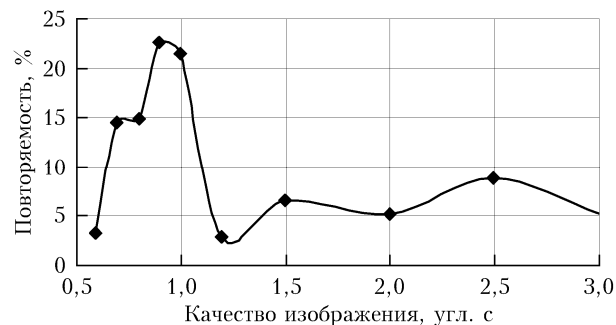


Рис. 1. Вероятность повторяемости качества солнечного изображения в белом свете на БСВТ

распределения яркости. На рис. 2 показан пример пространственных спектров «мощности» неоднородностей яркости фрагментов изображения солнечной грануляции по полю размером  $\sim 50''$  с высоким и низким пространственным разрешением. Стратосферный снимок солнечной грануляции в настоящем исследовании принят нами за эталон по угловому разрешению  $\sim 0,2''$ . Фотоснимки, полученные на БСВТ, отличаются контрастом и разрешением. Снимок 14.06.2003 г. имеет более высокое пространственное разрешение и, судя по спектру, «мощность» начинает превышать шум на уровне  $\sim 0,5''$ ; снимок 25.07.2003 г. более размыт и имеет разрешение около  $1,0''$ . Заметим, что из-за низкого, по сравнению с эталонным, контраста и размытия максимумы на спектрах обоих снимков сдвинуты вправо в сторону больших размеров фрагментов грануляционной структуры.

Для выбора параметров датчика волнового фронта и корректирующих элементов адаптивной системы необходимо обратить внимание на тот факт, что спектр высокого разрешения (стратосферный снимок, рис. 2) имеет три пика, соответствующих среднему угловому размеру междугранульного пространства  $\sim 0,9''$  и солнечных гранул  $\sim 1,3''$  и  $2,0''$ . Специальные исследования контраста солнечной грануляции на изображениях Солнца, полученных на БСВТ, имеют контраст  $0,5\text{--}1,5\%$  от фонового значения за счет высокого атмосферного и инструментального рассеяния света. Эти значения по относительному контрасту ниже эталонных почти в 3 раза для солнечных гранул размером  $2''$  и более чем в 6 раз — для гранул размером  $\sim 1''$ . Приведенные оценки контраста фрагментов солнечных изображений на БСВТ позволяют сформулировать требования к фотоприемным матрицам датчиков волнового фронта.

При разработке адаптивной системы для БСВТ решалась задача достижения предельного разрешения ( $0,2''$ ) в реальных условиях наблюдений. Определенный оптимизм в этом направлении возник после анализа отобранных снимков солнечных изображений в белом свете, который показал, что разрешение отдельных фрагментов составляет половину секунды дуги. При ночных наблюдениях Луны, когда свободная конвекция в приземном слое отсутствует, отдельные фрагменты на снимках имеют разрешение лучше  $0,4''$ .

Таким образом, полученный наблюдательный опыт и накопленные фотоматериалы исследований

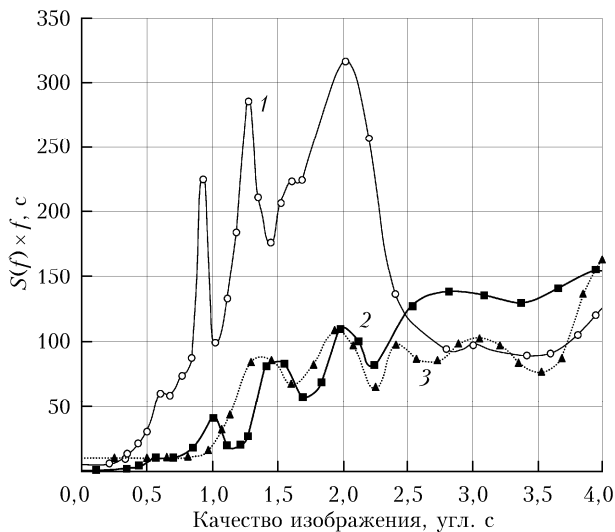


Рис. 2. Пространственные спектры «мощности» яркости фрагментов изображения солнечной грануляции по полю размером  $\sim 50''$ : данные, полученные на основе стратосферного снимка № 2002 Главной астрономической обсерватории (Пулковская обсерватория) (1); данные с БСВТ: фотоснимок 14.06.2003 г. с высоким разрешением (2), и электронный фотоснимок 25.07.2003 г. с низким разрешением (3);  $S(f)$  — квадрат относительных разностей яркости в зависимости от углового расстояния ( $f$ ) солнечного изображения;  $f$  — частота колебаний

по достижению высокого разрешения позволяют надеяться, что введение в оптическую схему БСВТ элементов адаптивной коррекции изображений даст возможность поднять разрешающую способность телескопа до его предельной, но что более важно — увеличить продолжительность наблюдений тонкой структуры Солнца с предельным разрешением. Предполагаемое в перспективе просветление вакуумного иллюминатора и объектива телескопа снизит уровень инструментального рассеянного света и повысит контраст солнечных изображений в прямом фокусе телескопа.

С учетом низкого контраста фрагментов солнечного изображения БСВТ для устойчивой работы адаптивной коррекции в реальных условиях для достижения фотометрической точности, близкой к 0,2%, требуется фотоматрица с динамическим диапазоном световой чувствительности более 5000. Под динамическим диапазоном фотоматрицы здесь понимается максимальный сигнал накопления (насыщенная экспозиция), деленный на общее среднеквадратическое значение шума эквивалентной экспозиции. Опыт использования видеокамеры DALSA с КМОП-матрицей CR-GEN0-N640x (640 × 480 пикселей, 7,4 × 7,4 мкм, 8 бит, 300 к/с) показал, что устойчивая работа адаптивной системы возможна только при высоком контрасте (более 10%) используемых объектов на солнечном изображении (пятна и поры). Лучшие показатели были получены с 14-битными видеокамерами Prosilica, однако они не обеспечивают, как показано ниже, требуемого быстродействия.

Исследования предельных значений амплитуды углов прихода света высокочастотных характеристик качества солнечного изображения были выполнены

в 1960–1970 гг. с помощью скоростной киносъемки (5000 кадров в секунду) М.Б. Керимбековым в Главной астрономической обсерватории. Впоследствии в ИСЗФ СО РАН они также проводились с помощью фотоэлектрического регистратора дрожания изображения Солнца (ФЭРДИС) с временным разрешением 2,5 мс [1] и анализатора качества солнечного изображения [2]. Полученные при этом результаты позволили оценить максимальное быстродействие системы коррекции, необходимое для коррекции набег фазы отдельных участков волнового фронта, исходя из оптического разрешения БСВТ ( $0,2''$ ) не менее чем в 200 Гц.

### Эксплуатационные характеристики БСВТ с открытым сидеростатным зеркалом

Поднятие питающего зеркала телескопа выше наиболее турбулизированного слоя воздуха тесно связано с проблемой жесткости и вибраций поддерживающей конструкции от напорного ветрового давления. Особенно уязвимым является слабо защищенное куполом питающее зеркало. Кроме этого, на вакуумную трубу и другие элементы передаются вибрации ветрозащиты. Поэтому изображение светила в фокусе телескопа смещается как целое сложным образом и складывается с движениями, вызванными атмосферными неоднородностями. Для выбора амплитудно-частотных характеристик зеркала адаптивной системы, корректирующего общие наклоны волнового фронта, были исследованы колебания питающего зеркала при разных ветровых нагрузках на конструкцию телескопа с помощью сейсмоматчиков.

Для определения резонансных частот колебаний площадки сидеростата и питающего зеркала был проведен спектральный анализ их угловых вибрационных характеристик. Результаты анализа показаны на рис. 3.

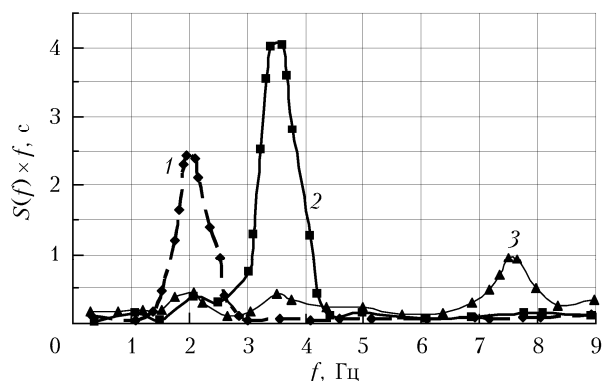


Рис. 3. Спектры приведенной мощности колебаний площадки сидеростата БСВТ в плоскостях С–Ю (1) и В–З (2), также зеркала сидеростата (3) в плоскости, нормальной к оси его вращения ( $S(f)$  — квадрат амплитуды колебаний в секундах дуги,  $f$  — частота)

На рис. 3 показано, что резонансная частота колебаний всей конструкции в плоскости В–З равна 2 Гц, а в плоскости С–Ю — 3,6 Гц. Жесткость

подвеса сидеростатного зеркала исследовалась аналогичным образом. Резонансная частота конструкции подвеса с зеркалом равна примерно 7,7 Гц (рис. 4). Различие в резонансных частотах указывает на разную жесткость конструкции в разных направлениях. Угловые вибрационные помехи малы при тихих и легких ветрах. Оцененные резонансные частоты достаточно высоки и должны лежать в частотном диапазоне корректора общих наклонов волнового фронта. Отметим, что параллельные смещения площадки сидеростата (без наклонов) не оказывают воздействия на смещение изображения в фокусе телескопа. Шаговый привод часового ведения сидеростата также вызывает колебания зеркала на его резонансной частоте, но амплитуда наклонов не превышает сотой доли угловой секунды.

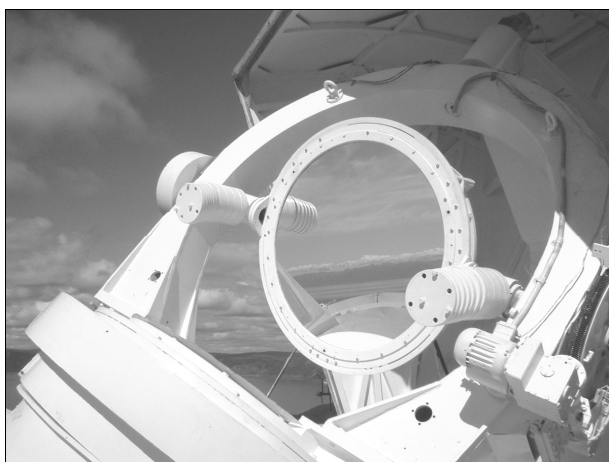


Рис. 4. Сидеростатное зеркало БСВТ

С северной стороны питающее зеркало телескопа защищено откидным куполом, с других сторон в разной степени подвержено ветровым нагрузкам (рис. 4). В процессе опытной эксплуатации для снижения уровня вибраций сидеростата с питающим зеркалом поддерживающая его колонна высотой 22 м была жестко соединена с вакуумной наклонной трубой и вся конструкция помещена в ветрозащиту. В ходе специально проведенных синхронных измерений амплитуды угловых колебаний площадки сидеростата, угловых вибраций самого зеркала при разных скоростях и направлениях ветра оказалось, что наибольшие наклоны зеркала при скорости ветра 10 м/с и меньше при северном ветре составляют 0,4", при южном ветре — 1,5", при восточном и западном ветрах — 0,8", при скорости ветра 3 м/с и менее все углы не превышают 0,2". Следует отметить, что при порывистом ветре средняя скорость может не превышать 5 м/с, а порывы достигают 15 м/с (самый неблагоприятный режим работы). Угловые колебания зеркала при этом могут резко увеличиваться до 10–15".

С учетом приведенных оценок плоское корректирующее зеркало общего наклона волнового фронта (tip-tilt mirror) должно иметь динамический диапазон выше указанных угловых значений (>15") и частоту обработки механических колебаний эле-

ментов конструкции телескопа, как минимум в три раза превышающую резонансную частоту колебаний питающего зеркала, т.е. выше 25 Гц.

### Выбор технических параметров двухзеркальной адаптивной системы для оптической схемы БСВТ

Опытные наблюдения на БСВТ с адаптивной оптической системой «Ангара» [3], имеющей одно биморфное зеркало для коррекции общих наклонов волнового фронта и его деформаций в поле апертуры с учетом механических колебаний конструкций телескопа, показали, что добиться стабильной работы возможно только в условиях малых флуктуаций углов прихода света. Тем более, что БСВТ имеет открытую сидеростатную систему, которая часто подвержена высоким ветровым нагрузкам, вызывающим вибрации питающего зеркала и, хотя и в меньшей степени, трубы телескопа.

В настоящей разработке адаптивной системы коррекции солнечного изображения в оптической схеме БСВТ целесообразно было разделить коррекцию на два самостоятельных плеча — компенсировать углы наклона волнового фронта отдельным плоским зеркалом, а для коррекции деформаций волнового фронта использовать гибкое зеркало.

Общепринятым считается, что биморфные деформируемые зеркала с радиально-кольцевой геометрией электродов при умеренной стоимости наилучшим образом соответствуют кольцевой апертуре телескопа. При оптимально подобранных параметрах телескопа, датчика волнового фронта и амплитудно-частотных характеристиках биморфного зеркала можно добиться наиболее высокой степени исправления турбулентных искажений.

В оптическом плече для компенсации общих наклонов фронта плоским корректирующим зеркалом для измерения углов наклона волнового фронта на апертуре используется отдельный датчик, который измеряет средний угол наклона в двух ортогональных проекциях. Рабочий диапазон частот плоского корректирующего зеркала должен быть более 300 Гц. Минимальные и максимальные углы наклонов зеркала в эквиваленте к разрешению составляют  $0,04 \div 30''$ .

В качестве модального анализатора волнового фронта при заданных параметрах телескопа использован корреляционный датчик Шака–Гартмана: диаметр входной апертуры  $d = 740$  мм; разрешение  $\sim 0,2''$ ; корректируемое рабочее поле зрения телескопа  $\sim 58''$ ; радиус когерентности по наблюдениям (см. рис. 1) составляет  $r_0 \sim 50$  мм; количество субапертур в линии диафрагмы Шака–Гартмана 60.

Датчик Шака–Гартмана состоит из раstra квадратных дифракционных микролинз с числовой апертурой 0,019 и видеокамеры Prosilica GE-680 (Canada) с разрешением  $640 \times 480$  пикселей (1 пиксель =  $7,4$  мкм). Видеокамера работает в узкой полосе длин волн благодаря узкополосному оптическому фильтру, выбранному на  $\lambda = 0,535$  мкм с полосой пропускания 10 нм и расположенному перед камерой.

Разрешение фотоприемной матрицы из расчета 25 пикселей/субапертуру составляет  $640 \times 480$  пикселей, частота работы системы адаптации, рассчитанная исходя из формулы Гринвуда  $0,43V/r_0$ , где  $V$  – интегральная скорость ветра ( $\sim 10$  м/с) в оптически активном слое атмосферы, должны быть выше 260 Гц.

Среднеквадратическое отклонение смещения изображения по оси  $X$  составляет 2,56 пикселя ( $0,54''$ ), по оси  $Y$  – 2,60 пикселя ( $0,54''$ ). Атмосферная турбулентность, вызывающая такие смещения изображения, характеризуется радиусом Фрида 50 мм ( $\lambda = 0,5$  мкм). Деформируемое зеркало содержит 39 активных корректирующих элементов, что обеспечивает в видимом диапазоне длин волн достижимый параметр Штреля не менее 0,6. Рабочий диапазон частот зеркала  $0 \div 300$  Гц, в перспективе до 1 кГц.

### Особенности расчетных параметров адаптивной оптической системы и ее сопряжения с оптической схемой БСВТ

Оснащение БСВТ Байкальской астрофизической обсерватории системой адаптивной оптики (АО) «Ангара» было выполнено ранее, когда использовался одиночный оптический элемент, который компенсировал как сдвиг изображения, так и искажения волнового фронта высоких порядков. Опыт ее использования при штатных наблюдениях солнечного изображения с высоким разрешением выявил ряд недостатков. К наиболее серьезным можно отнести недостаточный амплитудный диапазон компенсации общих наклонов волнового фронта и низкое общее быстродействие всех элементов системы.

В оптической схеме системы АО применялись единый объектив для построения изображения зрачка и одиночное зеркало для перестраивания изображения во вторичном фокусе. В то же время большинство схем АО солнечных телескопов состоят из плоского корректирующего и «деформируемого» зеркал, причем изображение зрачка формируется на поверхности последнего, а единый датчик контролирует и искажения, и наклоны волнового фронта.

Представленная в настоящей работе адаптивная оптическая система БСВТ формирует два промежуточных изображения входного зрачка. В одном из них устанавливается плоское корректирующее зеркало,

а в промежуточном изображении фокальной плоскости размещается отдельный датчик, отслеживающий только наклоны волнового фронта. Удобной особенностью схемы является телецентричность (параллельность) пучков, которыми строятся оба промежуточных выходных зрачка. Ход лучей в схеме показан на рис. 5 (цв. вкладка).

После фокальной плоскости БСВТ  $F1$  изображение, вырезанное полевой диафрагмой, падает на первое коллиматорное зеркало  $M3$ , строящее параллельными пучками первое промежуточное изображение зрачка на плоском корректирующем зеркале  $TM1$ . Фокусные расстояния обоих коллиматорных зеркал таковы, что при рабочем диаметре главного объектива 720 мм изображение зрачка имеет диаметр 40 мм, а при рабочем диаметре 600 мм – 35 мм.

Первое камерное зеркало  $M4$  строит первое промежуточное изображение  $F2$  на «полупрозрачном» зеркале  $M5$ , за которым расположена оптическая система, питающая датчик плоского корректирующего зеркала  $WFS-1$ . Расходящиеся пучки первого промежуточного изображения, отраженные «полупрозрачным» зеркалом  $M5$ , попадают на второе коллиматорное зеркало  $M6$ , которое строит на «деформируемом» зеркале  $DM1$  второе изображение зрачка, диаметр которого для 720 и 600 мм входного зрачка точно такой же, как на плоском корректирующем зеркале.

Окончательное изображение  $F4$  формируется вторым камерным зеркалом  $M7$ , от радиуса кривизны которого зависит фокусное расстояние системы. Светоделительный кубик  $BS1$  разделяет пучок на два фокуса:  $F3$  – для датчика волнового фронта деформируемого зеркала  $WFS-2$  и рабочий фокус  $F4$ , в котором установлено научное регистрирующее оборудование. В таблице приведены радиусы, световые диаметры и углы наклона зеркал.

Малая оптическая сила при углах наклона зеркал позволяет сохранить дифракционное качество изображения в видимом диапазоне. Все зеркала имеют сферическую форму. Графики геометрических aberrаций показаны на рис. 6, а концентрации энергии для поля зрения диаметром  $2\omega = 3'$  – на рис. 7 (цв. вкладка) (получены в результате расчетов с использованием системы ZEMAX), из которого видно, что aberrации системы близки к дифракционному пределу во всем поле зрения.

Таким образом, к адаптивной системе не предъявляются требований исправления астигматизма согласующей оптической системы, что позволяет не ограничивать максимальную амплитуду деформируемого зеркала.

Параметры формирующих зеркал

Зеркала	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Угол разворота, град
I коллиматорное зеркало $M3$	4460	77	1,10
I камерное зеркало $M4$	4710	77	1,65
II коллиматорное зеркало $M6$	4710	77	1,65
II камерное зеркало $M7$	3061	77	1,50

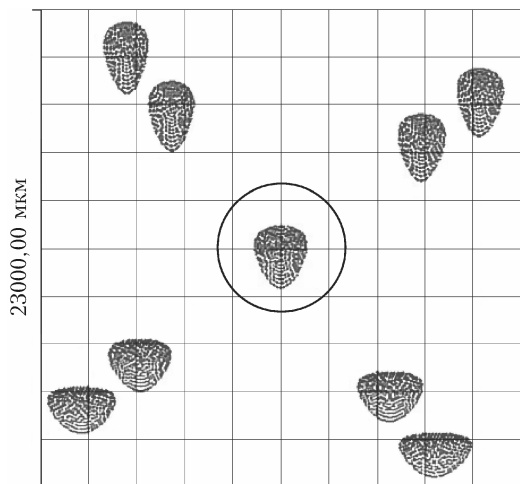


Рис. 6. Геометрические aberrации системы в плоскости наилучшей фокусировки камерного зеркала. Размер диска Эйри соответствует длине волны 0,6563 мкм, увеличение 100, длина стороны квадрата 23 мм. Фокусное расстояние системы 2560 мм, угловое поле зрения  $2\omega = 3'$

### Схемы сопряжения датчиков волнового фронта

Одной из причин разработки схемы с двумя изображениями зрачка была необходимость использования разных датчиков для контроля наклона и деформаций волнового фронта. Датчик плоского корректирующего зеркала установлен за полупрозрачным зеркалом вблизи первого промежуточного изображения. Датчиком является камера Fairfield, штатный объектив которой с фокусным расстоянием 25 мм имеет возможность фокусировки на расстояние до 100 мм. Ахроматический склеенный объектив Thorlabs AC508-100-A диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 100 мм, установленный на минимальном расстоянии от полупрозрачного зеркала, строит изображение выходного зрачка на внутренней диафрагме штатного объектива Fairfield 202374, как показано на рис. 8 (цв. вкладка).

Датчик «деформируемого» зеркала установлен в рабочей фокальной плоскости камерного зеркала. Оптическая система, которая строит изображение на матрице микролинз, представляет собой двухкомпонентную систему из тонкого положительного мениска и толстой склеенной линзы. Такая конфигурация позволила получить интересную систему, напоминающую «окуляр Кельнера» с фокусным расстоянием, изменяемым от 114 до 195 мм, строящую изображение зрачка. Она свободна от хроматизма увеличения и астигматизма для поля зрения до  $11^\circ$  для зрачка диаметром до 5 мм. Система показана на рис. 8. Графики ее геометрических aberrаций показаны на рис. 9 (цв. вкладка) (получены в результате расчетов с использованием системы ZEMAX).

Отличительной особенностью датчика является возможность менять параметры раstra, не меняя углового масштаба изображения. Как было показано выше, это стало возможным благодаря специально разработанному окуляру, состоящему из двух линзовых компонентов. Путем изменения расстояния между линзовыми компонентами можно регулировать размер выходного зрачка, что позволяет использовать растры с различными параметрами. Датчик рассчитан на условия атмосферы, соответствующие значениям радиуса Фрида ( $r_0 = 45\text{--}50$  и  $65\text{--}70$  мм).

На основании этих данных были изготовлены растры с количеством  $12 \times 12$  и  $8 \times 8$  субапертур и размерами 281,2 и 421,8 мкм соответственно. Фокусное расстояние составило 11350 мкм для раstra  $8 \times 8$  субапертур и 7560 мкм — для раstra  $12 \times 12$  субапертур.

Основные узлы адаптивной системы смонтированы на оптическом столе-скамье размером  $4,0 \times 1,5$  м (рис. 10). На нем расположена наклонная вакуумная труба телескопа с иллюминатором, через который с помощью диагонального зеркала, установленного в трубе, выводится часть света рабочего пучка. В плоскости прямого фокуса телескопа на столе-скамье установлена ограничивающая диафрагма, с помощью которой выбирается фрагмент солнечного изображения после коррекции, поступающий для исследования на фильтрограф.

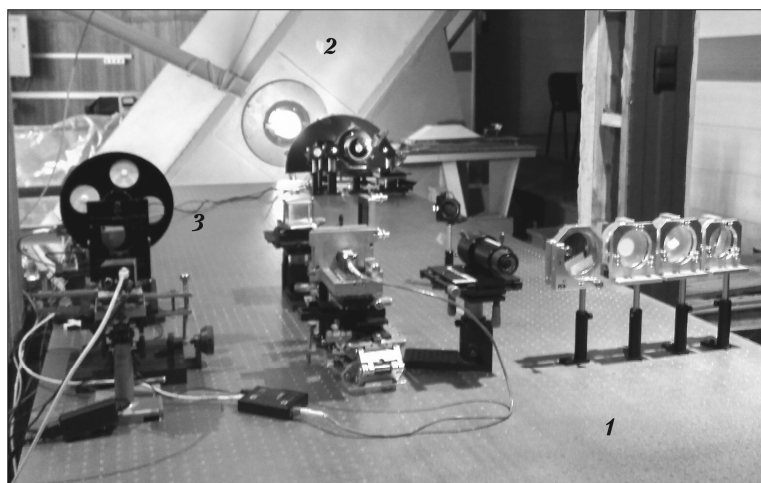


Рис. 10. Оптический стол (1), на котором размещена адаптивная система коррекции атмосферных помех и фильтрограф (3) для исследования исправленного фрагмента солнечного изображения; вакуумная труба телескопа (2)

На рис. 11 отдельно показаны узел анализатора волнового фронта, корректирующий наклоны плоского корректирующего зеркала, установленный в первой сопряженной со зрачком телескопа плоскости, и ограничивающая диафрагма.

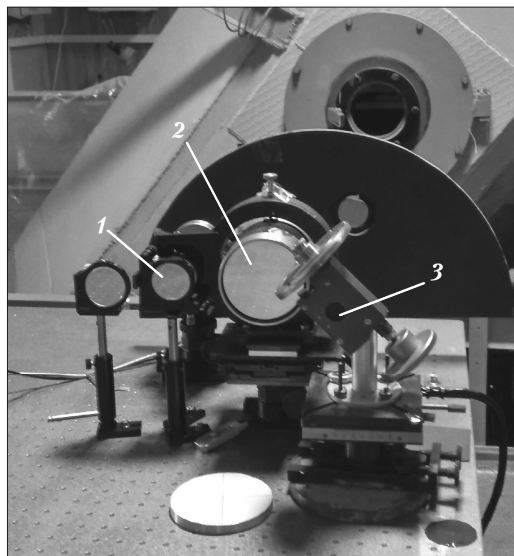


Рис. 11. Узел анализатора волнового фронта и корректора общих наклонов: 1 – анализатор наклонов волнового фронта; 2 – плоское зеркало, корректирующее наклоны; 3 – ограничивающая диафрагма

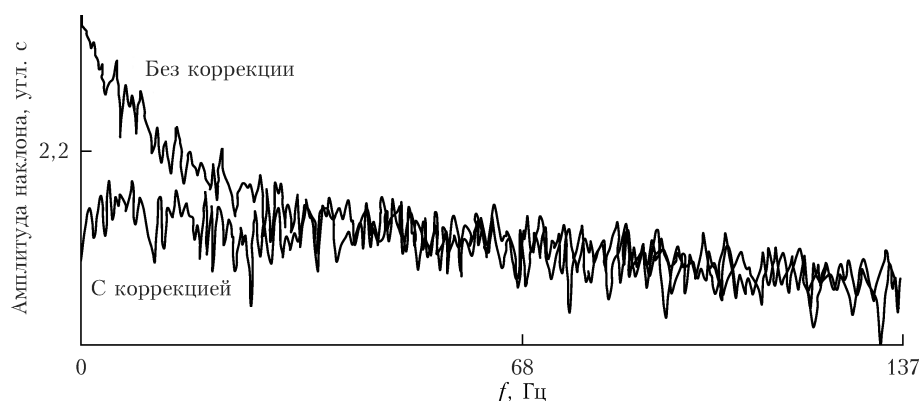


Рис. 12. Пример работы корректора наклонов фронта световой волны

В ходе проведения опытных наблюдений солнечного изображения на БСВТ тестированию подверглись все элементы адаптивной системы. Результаты работы оптического контура коррекции [4] общих наклонов волнового фронта представлены на рис. 12 в виде спектров угловых колебаний фрагмента солнечного изображения размером  $58''$  с коррекцией и без коррекции. Наклон волнового фронта определялся (на Солнце в этот период не было пятен) по краю солнечного изображения. Можно видеть, что корректор эффективно компенсирует амплитуды колебаний угла наклона выбранного фрагмента изображения до частоты 50–60 Гц. На частотах ниже 10 Гц эффект коррекции наибольший. Отметим, что на частоте выше 100 Гц амплитуда колебаний углов наклона составляет около  $0,6''$  и определяется уже деформациями отдельных фрагментов волнового фронта. Из этого следует, что оставшиеся деформации должны корректироваться в оптическом плече деформируемого зеркала. Результаты исследования остаточных деформаций волнового фронта, выполненные корреляционным датчиком Шака–Гартмана, подтвердили полученные результаты.

На следующем этапе исследовательских работ будут детально исследованы амплитудно-частотные характеристики корреляционного датчика волнового фронта и деформируемого зеркала и оценен уровень ошибок коррекции и источники возможных помех.

1. Ковадло П.Г., Иванов В.И., Дарчия Ш.П. Фотоэлектрический регистратор дрожания изображения Солнца // Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца. 1975. Вып. 37. С. 196–202.
2. Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.

3. Лукин В.П., Григорьев В.М., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лавринов В.В., Ковадло П.Г., Скоморовский В.И. Результаты испытания адаптивной оптической системы с модифицированным корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 419–427.
4. Antoshkin L.V., Borzilov A.G., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N. Program-hardware complex for optical beams formation with modeled tilt angles // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. P. 10466 0X. DOI: 10.1117/12.22849.

**N.N. Botygina, D.Yu. Kolobov, P.G. Kovadlo, V.P. Lukin, S.A. Chuprakov, A.Yu. Shikhovtsev. Two-mirror adaptive system for correcting atmospheric disturbances of the Large Solar Vacuum Telescope.**

The paper describes the features of the two-mirror adaptive system for correcting atmospheric disturbances of the Large Solar Vacuum Telescope, developed with allowance for the correction of instrumental vibrations of telescopes in a wide amplitude-frequency range with an open siderostat supply mirror. Corrections of the general slopes of the light wave front and its deformations are carried out separately. The adaptive optics system is designed to work with extended light sources (the Sun), which have a low contrast of image details.

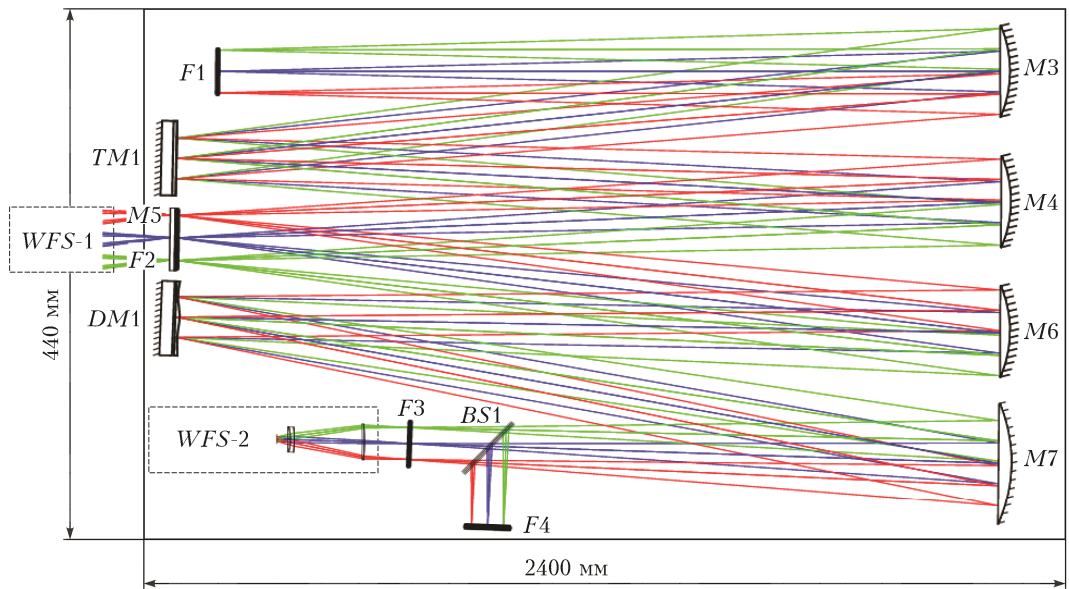


Рис. 5. Схема сопряжения адаптивной системы с БСВТ

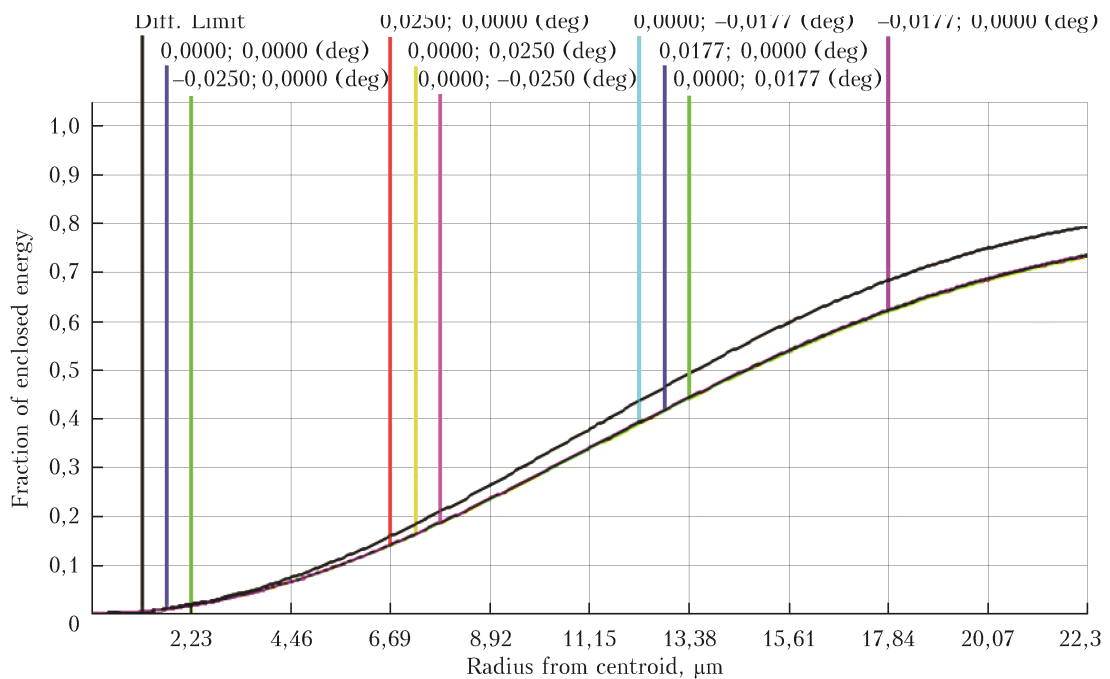


Рис. 7. Концентрация энергии в кружке 0,3" (см рис. 6). Дифракционный предел соответствует длине волны 0,6563 мкм



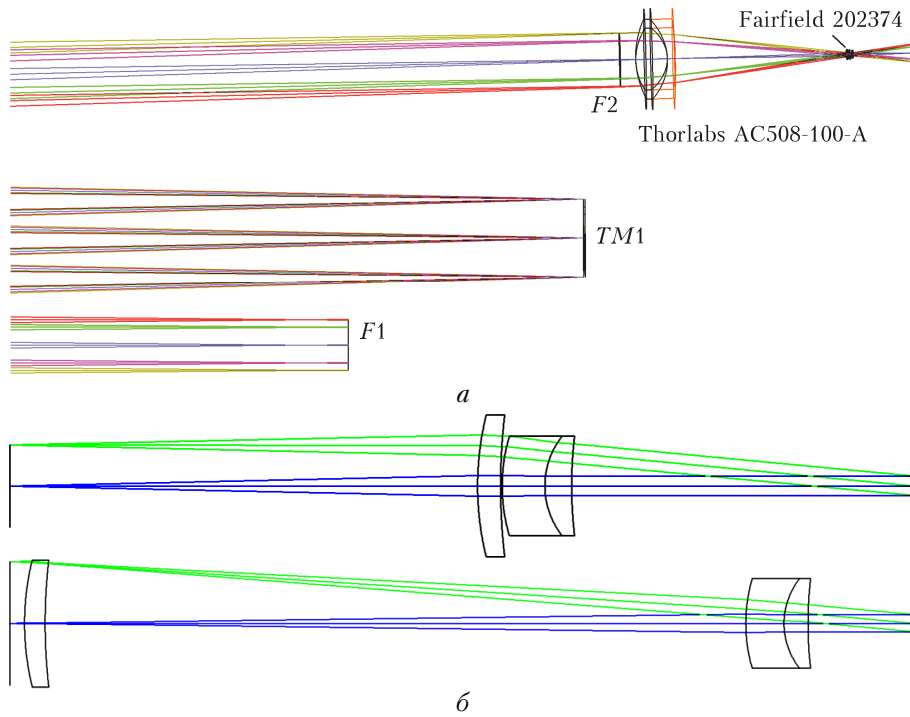


Рис. 8. Системы формирования изображения зрачка на датчиках наклона (а) и деформаций (б) волнового фронта

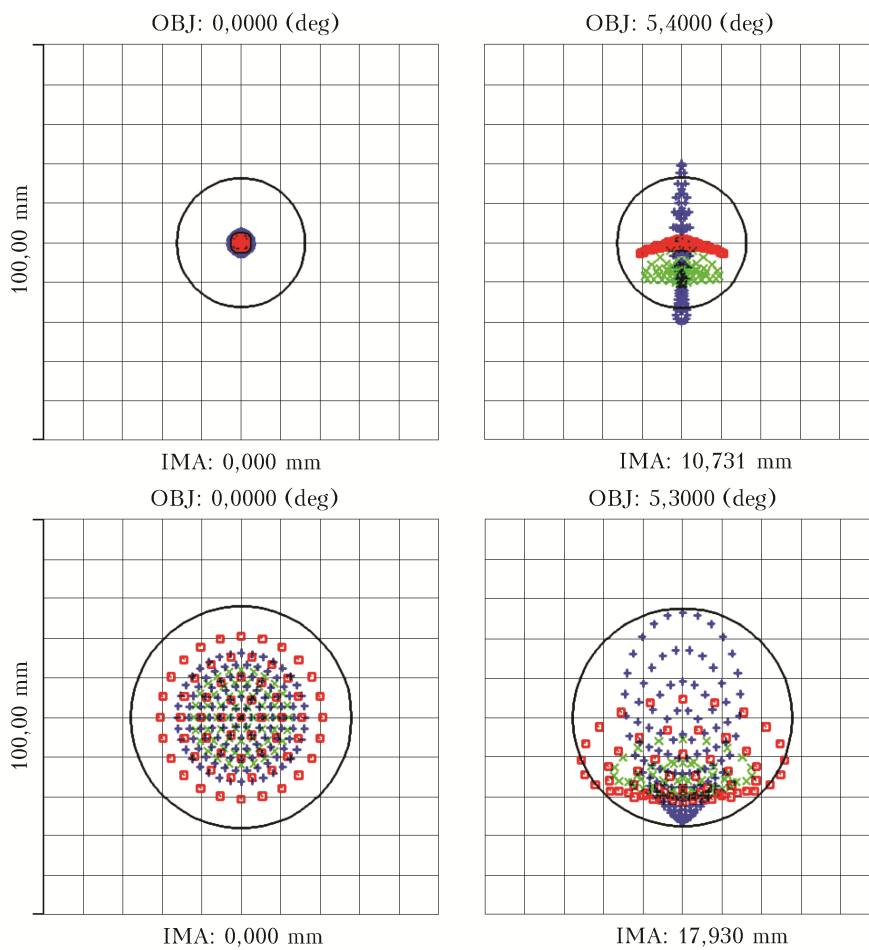


Рис. 9. Геометрические aberrации оптической системы для построения изображения зрачка на лэнзлете датчика деформаций волнового фронта. Две верхние диаграммы соответствуют фокусному расстоянию 113,5 мм, две нижние – 195 мм