

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.2:621.373.826

Развитие элементной базы для создания системы адаптивной оптики на солнечном телескопе

Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, П.А. Коняев, Е.А. Копылов, В.П. Лукин*

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

Поступила в редакцию 2.06.2017 г.

Аберрации волнового фронта на входной апертуре Большого солнечного вакуумного телескопа измерялись датчиком волнового фронта адаптивной оптической системы, который работал по солнечному пятну. Для вычисления смещения изображения использовался корреляционный алгоритм с квадратичной интерполяцией положения максимума корреляционной функции. Качество астрономического видения, характеризующееся радиусом Фрида, оценивалось из тех же экспериментальных данных, что и статистические характеристики флуктуаций коэффициентов разложения аберраций волнового фронта по полиномам Цернике. Результаты получены для радиуса Фрида, равного 51,6 мм. Рассчитывались средние значения и среднеквадратические отклонения коэффициентов разложения аберраций волнового фронта. Использовалась выборка длительностью 43 с; частота взятия отсчетов – 70 Гц. Из анализа приведенных спектров следует, что для обеспечения эффективной коррекции формируемых изображений необходимо компенсировать аберрации волнового фронта в полосе частот от 0 до 20 Гц.

Ключевые слова: турбулентность, искажения фазы, датчик волнового фронта, модовый анализ, изображение Солнца; turbulence, phase distortions, wavefront sensor, mode analysis, Sun image.

Введение

Известно, что применение систем адаптивной оптики (АО) является самым радикальным средством уменьшения влияния атмосферных искажений. Системы АО выполняют коррекцию искажений, вносимых атмосферой Земли в изображение космического объекта, в реальном масштабе времени. Создание системы АО для крупноапертурных солнечных телескопов – сложная научно-техническая задача. В настоящее время для крупнейших российских солнечных телескопов, в частности Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ), Автоматизированного солнечного телескопа (АСТ) и создаваемого 3-метрового Крупного солнечного телескопа (КСТ), разрабатываются и внедряются перспективные системы нового поколения, основанные на принципах многозеркальной адаптивной коррекции. Решение этой задачи требует последовательного выполнения теоретических исследований и экспериментов, включая создание действующих макетов аппаратуры, апробацию отдельных компонентов систем АО и новых методов их работы. К примеру, актуальной проблемой является поиск оптимальных оптических схем для согласованной работы систем АО и высокоэффективных спектральных приборов для исследования Солнца.

Элементы системы АО для БСВТ

Основные экспериментальные исследования по вышеописанной проблеме выполняются на БСВТ, установленном в Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН (г. Иркутск) и предназначенном для наблюдений тонкой структуры атмосферы Солнца с пространственным разрешением $\sim 0,2$ угл. с [1]. Телескоп имеет метровое следящее зеркало, двухлинзовый объектив, который находится в вакуумной трубе, диаметром 760 мм с фокусным расстоянием ~ 40000 мм. Выполняемые на нем наблюдения Солнца показали, что для получения изображения с предельно высоким пространственным разрешением, кроме вакуумирования оптического пути телескопа, необходима система адаптивной оптики для компенсации дрожания и размытия формируемого телескопом изображения, вызванных действием турбулентности атмосферы по лучу зрения. Работа в этом направлении уже многие годы ведется коллективом лаборатории когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН совместно с сотрудниками ИСЗФ СО РАН [2, 3].

Для ввода системы АО в оптический тракт БСВТ была разработана схема, изображенная на рис. 1. Она предназначена [2–4] для работы с односторонней системой АО. В частности, эта схема с помощью перестраиваемого окуляра 12 обеспечивает формирование выходного зрачка 13 диаметром 6,3 мм и размещение в нем разработанного датчика волнового фронта (ДВФ) 14.

* Нина Николаевна Ботыгина (bnn@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eon@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (petrkonyaev@gmail.com); Евгений Анатольевич Копылов (evgen704@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

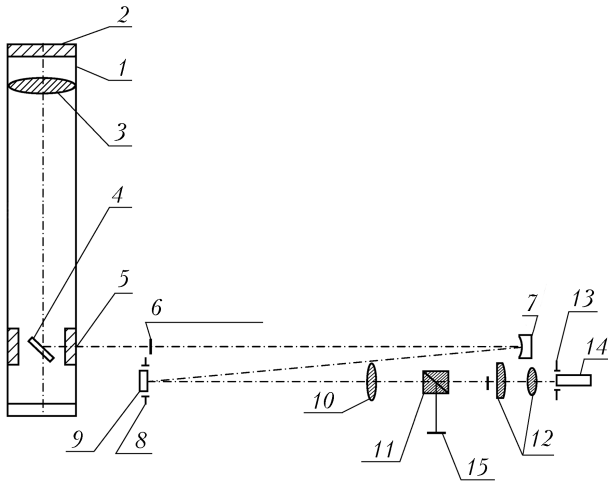


Рис. 1. Оптическая схема однозеркальной адаптивной оптической системы на БСВТ: 1 – вакуумная труба; 2 – входной иллюминатор; 3 – объектив телескопа; 4 – диагональное зеркало; 5 – выходной иллюминатор; 6 – плоскость первичного изображения; 7 – сферическое зеркало-коллиматор; 8 – выходной зрачок; 9 – управляемое зеркало; 10 – перестраиваемый объектив; 11 – светоделительный кубик; 12 – перестраиваемый окуляр; 13 – выходной зрачок; 14 – датчик волнового фронта; 15 – плоскость исправленного изображения

Системы АО для солнечных телескопов в качестве объектов слежения используют протяженные источники: солнечные пятна, поры, солнечную грануляцию. В датчике Шэка–Гартмана используется специальный растр, каждый элемент которого формирует изображение выбранного фрагмента солнечного диска. Регистрируемая датчиком гартманограмма представляет собой матрицу изображений данного фрагмента (рис. 2). Искажения волнового фронта падающего излучения вызывают смещения изображений. На основе измеренных смещений восстанавливается волновой фронт падающего излучения.

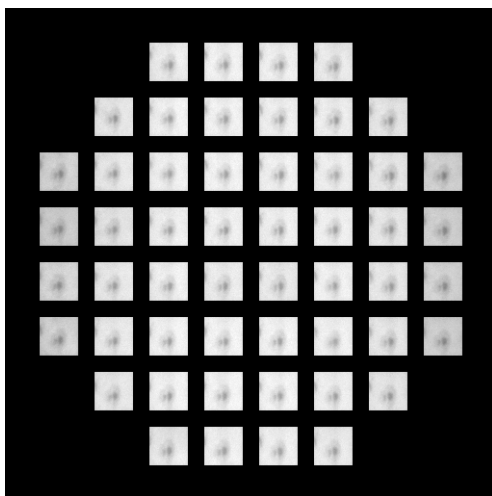


Рис. 2. Вид регистрируемой гартманограммы при использовании микрорастра размерностью 8 × 8. На микрофотографиях видно изображение солнечного пятна

Важно выполнить измерения и восстановить волновой фронт предельно точно. Это и делает датчик волнового фронта ключевым элементом [4] системы АО. Поэтому исследователи [1–5] много времени уделяют разработке ДВФ. Так, на первом этапе исследований [2, 6] в качестве детектора в датчике использовалась видеокамера DS-41-300K0262 фирмы DALSA (Канада) с разрешением 532 × 516 пикселей (1 пиксель = 10 мкм) и частотой 262 кадр/с. Связь видеокамеры с компьютером осуществлялась через плату ввода изображения PC-DIG-L фирмы Cogeco (Канада). Позднее, в 2011–2015 гг., был создан [6] и эксплуатировался в системе АО ДВФ на базе видеокамеры Prosilica GX-1050 фирмы Allie Vision (Канада), обеспечивающей быстродействие с частотой около 200 Гц.

В 2016 г. была поставлена и решена задача создания нового ДВФ Шэка–Гартмана с переменным линзовым растром и устройством быстрого введения раstra в датчик, а также проводилось развитие и обновление программ управления.

ДВФ для адаптивной оптической системы БСВТ

Для увеличения пространственного разрешения при измерении аберраций волнового фронта и уменьшения углового масштаба пикселя при регистрации гартманограммы разработан новый корреляционный ДВФ на базе видеокамеры Prosilica GX-1500 (1024 × 1024 пикселей, 1 пиксель = 5,5 мкм) и набора сменных дифракционных растров в составе системы АО на БСВТ. Растр состоит из плотно упакованных квадратных низкоапертурных дифракционных элементов. Каждый элемент представляет собой небольшой внеосевой фрагмент длиннофокусной дифракционной линзы. Растры микролинз разработаны и изготовлены в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск); они рассчитывались для излучения на длине волны 0,535 мкм. Параметры растров и ДВФ в целом приведены в таблице.

При разработке ДВФ учитывались следующие требования:

- максимальное использование элементов видеокамеры;
- параметры сменных растров должны обеспечить возможность измерения аберраций волнового фронта в любых условиях атмосферной турбулентности в месте расположения БСВТ;
- угловое поле зрения датчика не должно меняться при замене раstra;
- смещения изображения за счет ветрового качания сидеростатного зеркала телескопа должны входить в диапазон измеряемых угловых смещений;
- при регистрации гартманограммы не должна ухудшаться разрешающая способность оптической системы, формирующей изображение, по которому работает датчик волнового фронта.

На сегодняшний день параметры ДВФ позволяют измерять аберрации волнового фронта в любых

Параметры нового ДВФ

Размерность рабочей области растра (количество субапертур)	8 × 8	16 × 16	32 × 32
Период растра, пиксель	128	64	32
Период растра, мкм	704	352	176
Фокусное расстояние, мкм	21712	10856	5428
Диаметр входного зрачка телескопа, мм	600	600	600
Диаметр выходного зрачка, мкм	6296,8	6296,8	6296,8
Размер входной субапертуры БСВТ, мм	67,08 × 67,08	33,54 × 33,54	16,77 × 16,77
Количество субапертур растра в выходном зрачке	52	216	904
Угловое поле зрения субапертуры ДВФ, град	1,857 × 1,857	1,857 × 1,857	1,857 × 1,857
Угловое поле зрения входной субапертуры БСВТ, с	70,16 × 70,16	70,16 × 70,16	70,16 × 70,16
Угловой масштаб пикселя ДВФ, приведенный к входной апертуре телескопа, с	0,55	1,11	2,19
Максимальное регистрируемое угловое смещение изображения по осям координат, с	± 16,5	± 16,5	± 16,5

условиях атмосферной турбулентности на БСВТ [7–9]: от наилучших (радиус Фрида ~70 мм) до наихудших (радиус Фрида 10–15 мм). Для обеспечения работы ДВФ в таком широком диапазоне предусмотрена возможность использования целой гаммы линзовых микрорастров. Были разработаны и изготовлены линзовые микрорастры с числом субапертур от 10 × 10 до 50 × 50.

Чтобы смена растра могла проходить оперативно, разработали конструкцию исполнительного механизма для взаимной юстировки элементов корреляционного ДВФ Шэка–Гартмана: камеры, растра и др. (рис. 3). Она позволяет использовать сменные растры в диапазоне фокусных расстояний для микролинз от 5 до 21 мм. Также предусмотрена возможность регулировки высоты положения в диапазоне ±30 мм и углов наклона растров в диапазоне ±2° с угловой чувствительностью 30 с.

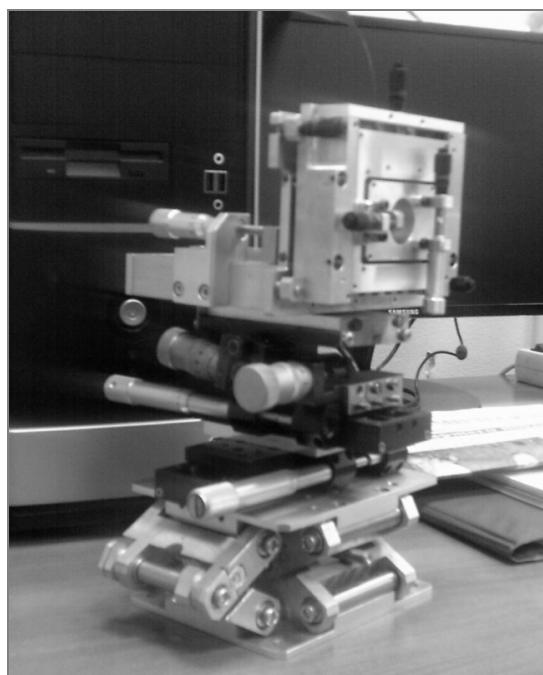


Рис. 3. Устройство юстировки и смены растров

Испытания ДВФ проводились на специально созданной лабораторной установке с использованием разработанного программного обеспечения «Адаптивная оптическая система с датчиком волнового фронта с высоким пространственным разрешением». Во время измерений ДВФ на экран оператора выводится изображение, сформированное опорной субапертурой, и в виде интерферограммы представляются измеренные aberrации волнового фронта в выходном зрачке диаметром 6,3 мм. Отдельно программа оператора показывает коэффициенты разложения aberrаций по полиномам Цернике.

Для работы системы АО с различными участками солнечного диска в датчике предусмотрена возможность выбора оптимального метода измерения локальных наклонов волнового фронта в зависимости от структуры и контраста изображения. В качестве опорных изображений рассматриваются солнечные пятна, солнечные поры, солнечная грануляционная картина и край солнечного лимба.

Для обработки изображений фрагментов солнечной грануляционной картины нами был разработан модифицированный корреляционный алгоритм измерения смещений [2]. При правильно подобранных параметрах фильтрующей функции в пространственном спектре распределения освещенности подавляются низкие частоты, что приводит к выравниванию фоновой освещенности по полю зрения датчика, а также высокие, связанные с дефектами, которые возникают в процессе регистрации изображения. В результате в преобразованном пространственном спектре преобладают частоты, соответствующие размерам гранул, а во взаимной корреляционной функции появляется глобальный максимум, связанный со смещением картины солнечной грануляции. В условиях хорошего видения разработанный алгоритм обеспечивает функционирование ДВФ по фрагменту солнечной грануляции.

В случае работы ДВФ по краю солнечного диска, по пятну либо по его части используется нормированная взаимная корреляционная функция [6]. Для определения смещения фрагмента изображения солнечной поры возможно применение как модифицированного корреляционного алгоритма (при низ-

ком контрасте изображения), так и алгоритма с нормированной взаимной корреляционной функцией.

В ДВФ использован корреляционный алгоритм [2, 6] вычисления смещения изображения с применением квадратичной интерполяции положения максимума корреляционной функции, позволяющий определять смещение изображения на долю пикселя. Как следствие, угловое разрешение ДВФ становится порядка 0,28 угл. с (1/2 пикселя) в условиях наилучшего качества видения и 1,1 угл. с в условиях наихудшего. Указанные параметры ДВФ соответствуют требованиям [4] и должны полностью обеспечить измерения искажений волнового фронта, имеющих место на БСВТ.

Корреляционный ДВФ как дифференциальный измеритель турбулентности

Качество астрономического видения, характеризующееся радиусом Фрида, оценивалось из тех же экспериментальных данных, что и статистические характеристики флуктуаций коэффициентов разложения aberrаций волнового фронта по полиномам Цернике. Для оценки использовался корреляционный ДВФ Шека–Гартмана, реализующий дифференциальный метод измерения радиуса Фрида [10–12]. Известно, что дифференциальным методом фактически измеряется средний квадрат разности случайных смещений изображений объекта-источника, формируемых двумя пространственно-разнесенными субапертурами. Принимаемые от них сигналы обеспечивают измерения векторов смещения центра тяжести ρ'_{T1} и ρ'_{T2} этих изображений.

В дифференциальном методе измеряется величина дисперсии разности (структурной функции) случайных углов прихода $D(\rho'_{T1}, \rho'_{T2}) = \langle [\rho'_{T1} - \rho'_{T2}]^2 \rangle$.

При этом усреднение $\langle [\rho'_{T1} - \rho'_{T2}]^2 \rangle$ выполняется по ансамблю турбулентных флуктуаций. Обычно на практике используется следующее выражение при условии, что разнесение двух субапертур R велико по сравнению с размером субапертуры a_T (т.е. $R > a_T$):

$$D(\mathbf{R}, 0, 0) = 2^{13/6} A_0 \pi^2 \Gamma(1/6) a_T^{-1/3} F_T^2 \times \int_0^\infty \left[1 - \frac{2^{1/6}}{\Gamma(5/6)} \left(\frac{R}{a_T} \right)^{-1/3} \right] dh C_n^2(h), \quad (1)$$

где $\int_0^\infty dh C_n^2(h)$ – интегральный профиль турбулентности, который и определяет радиус Фрида; F_T – фокусное расстояние; $A_0 = 0,033$.

Применение формулы (1) оправдано, когда астрономы работают по звездам, предполагая, что внеатмосферный объект точечный. Но эта формула в применении к солнечному телескопу, в работе

с которым используют протяженные объекты (солнечные пятна, поры, край солнечного лимба), может приводить к ошибкам. В [12] были уточнены формулы для корреляционного датчика Шека–Гартмана, работающего в режиме дифференциального измерителя по объекту, который не является точечным источником, а имеет некоторый угловой размер. Были получены выражения для структурной функции углов прихода волны в случае, когда объект-источник имеет конечный угловой размер α_0 , а именно:

$$D(\mathbf{R}, 0, \alpha_0) = 2^{13/6} A_0 \pi^2 \Gamma(1/6) F_T^2 a_T^{-1/3} \times \int_0^\infty dh C_n^2(h) \left[\left(1 + \frac{\alpha_0^2}{a_T^2} h^2 \right) - \frac{2^{1/6}}{\Gamma(5/6)} \left(\frac{R}{a_T} \right)^{-1/3} \right]. \quad (2)$$

Если в (2) положить $\alpha_0 = 0$, то она переходит в (1). Сравнивая результаты расчетов по выражениям (1) и (2), получаем, что использование (1) при работе по источнику с конечным угловым размером α_0 приводит к занижению значения интегрального профиля турбулентности примерно в следующее число раз:

$$\left(1 + \frac{\alpha_0^2}{a_T^2} h_\xi^2 \right)^{-1/6} \approx 1 - \frac{1}{6} \frac{\alpha_0^2}{a_T^2} h_\xi^2.$$

Как показывает оценка [12, 13], подобное занижение может составлять от 5 до 30% для радиуса Фрида $r_0 = 5$ см, атмосферной толщи турбулентности $h_\xi = 1000$ –1500 м и опорного объекта на Солнце с угловым размером ~ 3 –5 угл. с. Следовательно, будет завышена оценка r_0 . Поэтому в реальных атмосферных условиях допустимо использовать формулу (1) при работе по объектам на поверхности Солнца с угловыми размерами ≤ 5 –7 угл. с. Если же размеры объекта больше, то необходимо использовать (2).

Статистический анализ флуктуаций волнового фронта по данным измерений ДВФ

Измерения aberrаций волнового фронта на входной апертуре БСВТ проводились с помощью ДВФ, размещенного в схеме, изображенной на рис. 1, при замене в ней управляемого деформируемого зеркала 9 на плоское; ДВФ работал по солнечному пятну.

Измерения выполнялись, как правило, в хороших для БСВТ условиях атмосферного видения. Ниже приведены результаты, полученные для $r_0 = 51,6$ мм. Aberrации волнового фронта представлялись в виде разложения по полиномам Цернике в стандарте OSA. Длительность реализации составляла 43 с, частота взятия отсчетов – 70 Гц. Корреляционный ДВФ определяет любые отклоне-

ния от плоскостности относительно опорного кадра и выбранной опорной субапертуры. В качестве опорной была выбрана субапертура, находящаяся в центральной части гартманогаммы (см. рис. 2). Наклон волнового фронта на опорной субапертуре в опорном кадре определяет плоскость, относительно которой вычисляются aberrации волнового фронта. Результаты измерений представлялись в виде средних значений $\langle C_i \rangle$ и среднеквадратических отклонений $Sd_i = (\langle [C_i - \langle C_i \rangle]^2 \rangle)^{1/2}$ коэффициентов разложения C_i суммарных aberrаций волнового фронта (i соответствует номеру полинома Цернике). В экспериментах рассчитывались 27 полиномов, начиная с наклонов волнового фронта. На рис. 4 показаны средние значения и среднеквадратические отклонения коэффициентов разложения aberrаций.

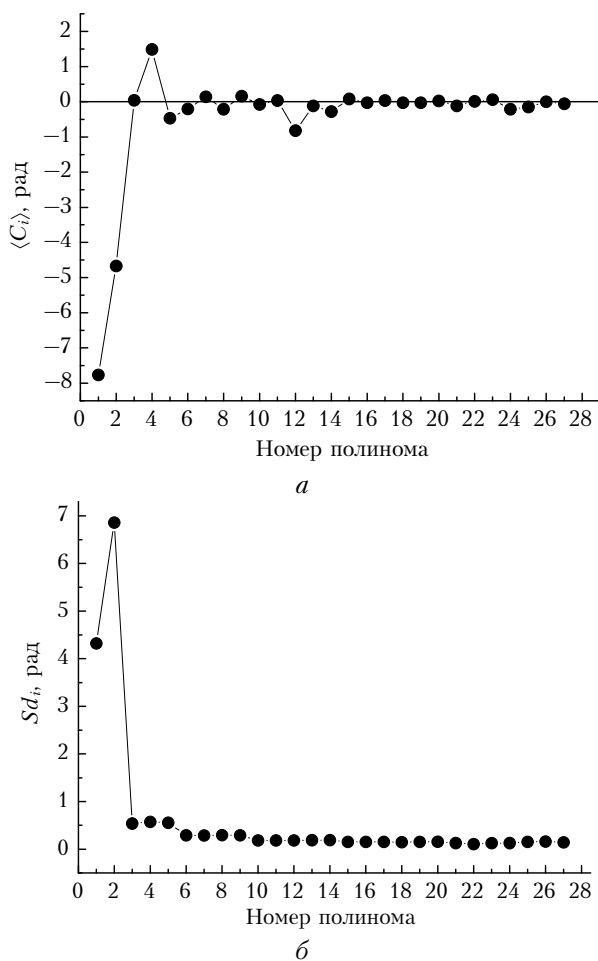


Рис. 4. Средние значения $\langle C_i \rangle$ (а) и среднеквадратические отклонения Sd_i (б) коэффициентов разложения суммарных aberrаций волнового фронта, вызванных совокупным действием атмосферной и павильонной турбулентностей и элементами оптической системы

На рис. 5 приведены статистические характеристики коэффициентов разложения aberrаций волнового фронта. Для обеспечения этих измерений в оптический тракт телескопа вводилась точечная диафрагма поля зрения ДВФ, которая помещалась в первом фокусе телескопа.

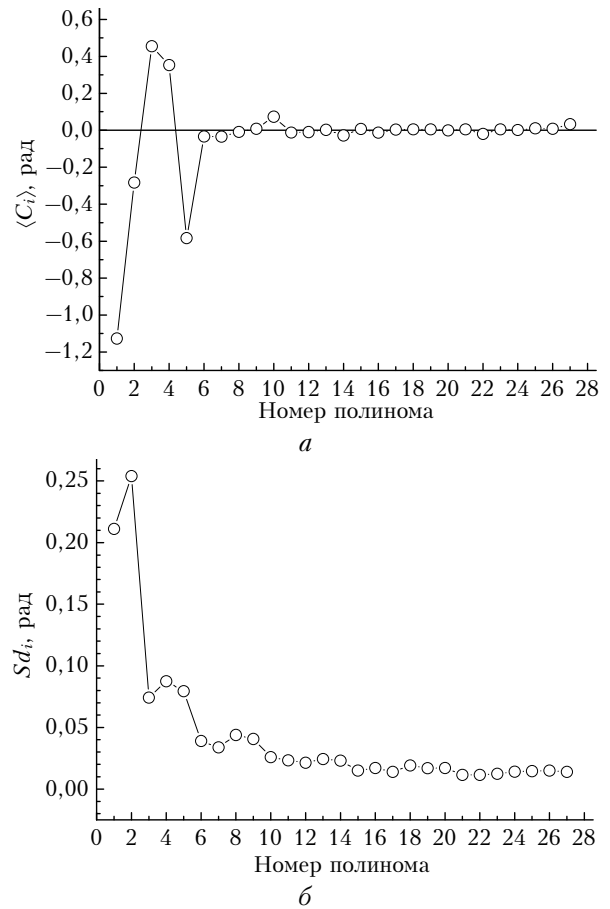


Рис. 5. Средние значения $\langle C_i \rangle$ (а) и среднеквадратические отклонения Sd_i (б) коэффициентов разложения суммарных aberrаций волнового фронта, вызванных павильонной турбулентностью и элементами оптической системы

Из сравнения результатов на рис. 4 и 5 следует, что aberrации волнового фронта второго порядка и выше, вносимые павильонной турбулентностью, составляют примерно только одну десятую часть от суммарных aberrаций. Погрешности юстировки оптической системы и aberrации оптических элементов также вносят вклад в средние значения коэффициентов разложения. В частности, заметный вклад в общие наклоны волнового фронта вносят ветровые качания зеркала сидеростата.

На рис. 6 приведены спектры мощности флуктуаций локальных углов наклона фронта на опорной субапертуре ДВФ. Спектры флуктуаций представлены в виде функции безразмерной частоты, нормированной на частоту снятия отсчетов $f_0 = 70$ Гц. В спектре наклонов по оси y (рис. 6, б) наблюдается область с локальным максимумом вблизи частоты 7 Гц, обусловленная ветровыми колебаниями сидеростатного зеркала.

Особенности на этих же частотах наблюдаются и в спектрах флуктуаций коэффициентов разложения aberrаций волнового фронта по полиномам Цернике (рис. 7, а, б). На 10 фрагментах рис. 7 представлены спектры мощности флуктуаций коэффициентов разложения суммарных aberrаций волнового фронта по полиномам Цернике первого

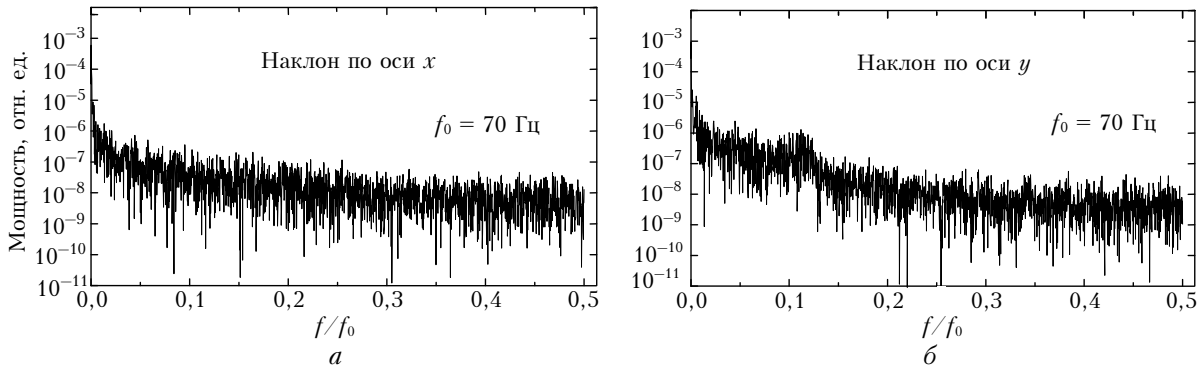


Рис. 6. Спектры флуктуаций локальных углов наклона волнового фронта на опорной субапертуре по оси x (а), по оси y (б)

и второго порядков (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) и выборочно третьего, четвертого, пятого и шестого порядков.

На рис. 8 показаны спектры мощности коэффициентов разложения павильонных aberrаций волнового фронта. Анализ приведенных спектров показывает, что для эффективной коррекции изображения на БСВТ необходимо компенсировать aberrации волнового фронта в полосе частот от 0

до 20 Гц. Частотный диапазон корректора должен быть, по крайней мере, на порядок шире корректируемого диапазона, т.е. составлять от 0 до 200 Гц.

Следует отметить, что подобные выводы относительно требуемой полосы частот для зеркала-корректора были получены на основе данных прямых метеорологических и оптических измерений и построенной модели турбулентности атмосферы [13].

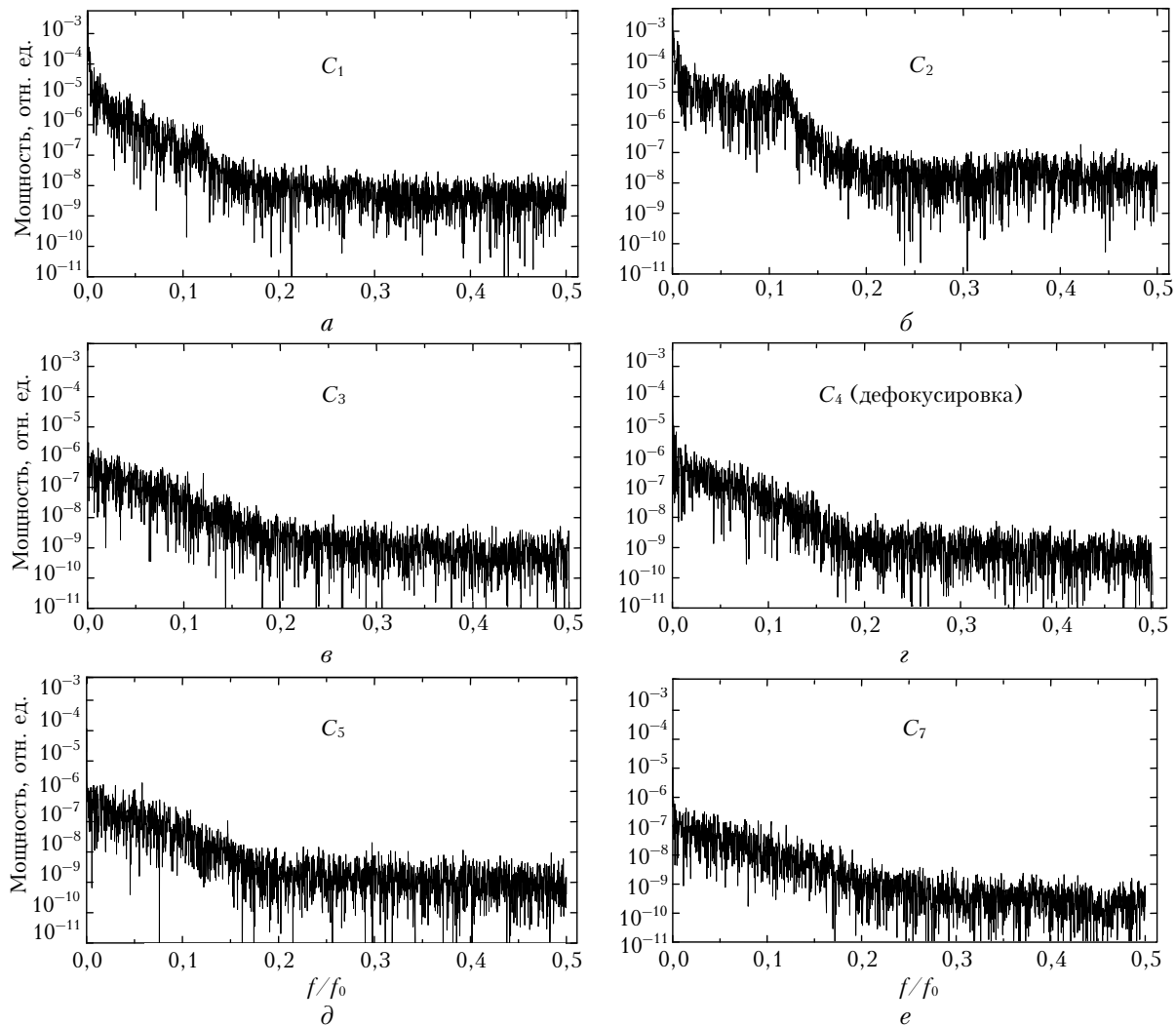


Рис. 7. Спектры мощности флуктуаций коэффициентов разложения aberrаций волнового фронта по полиномам Цернике

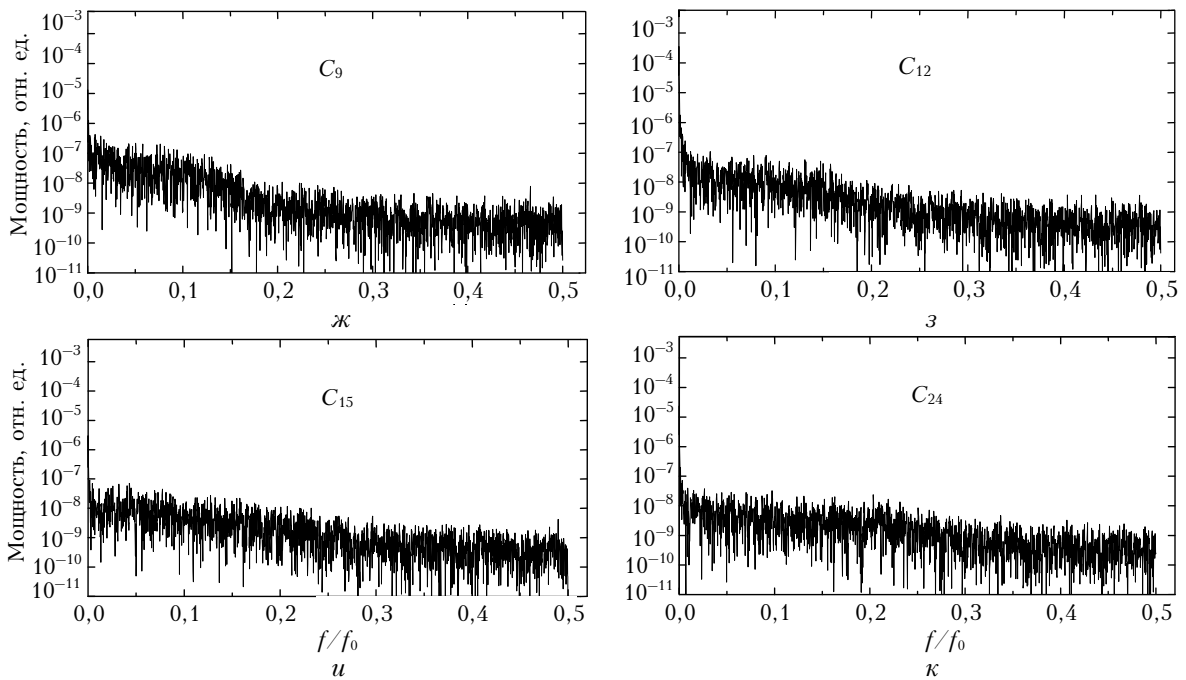


Рис. 7. Окончание

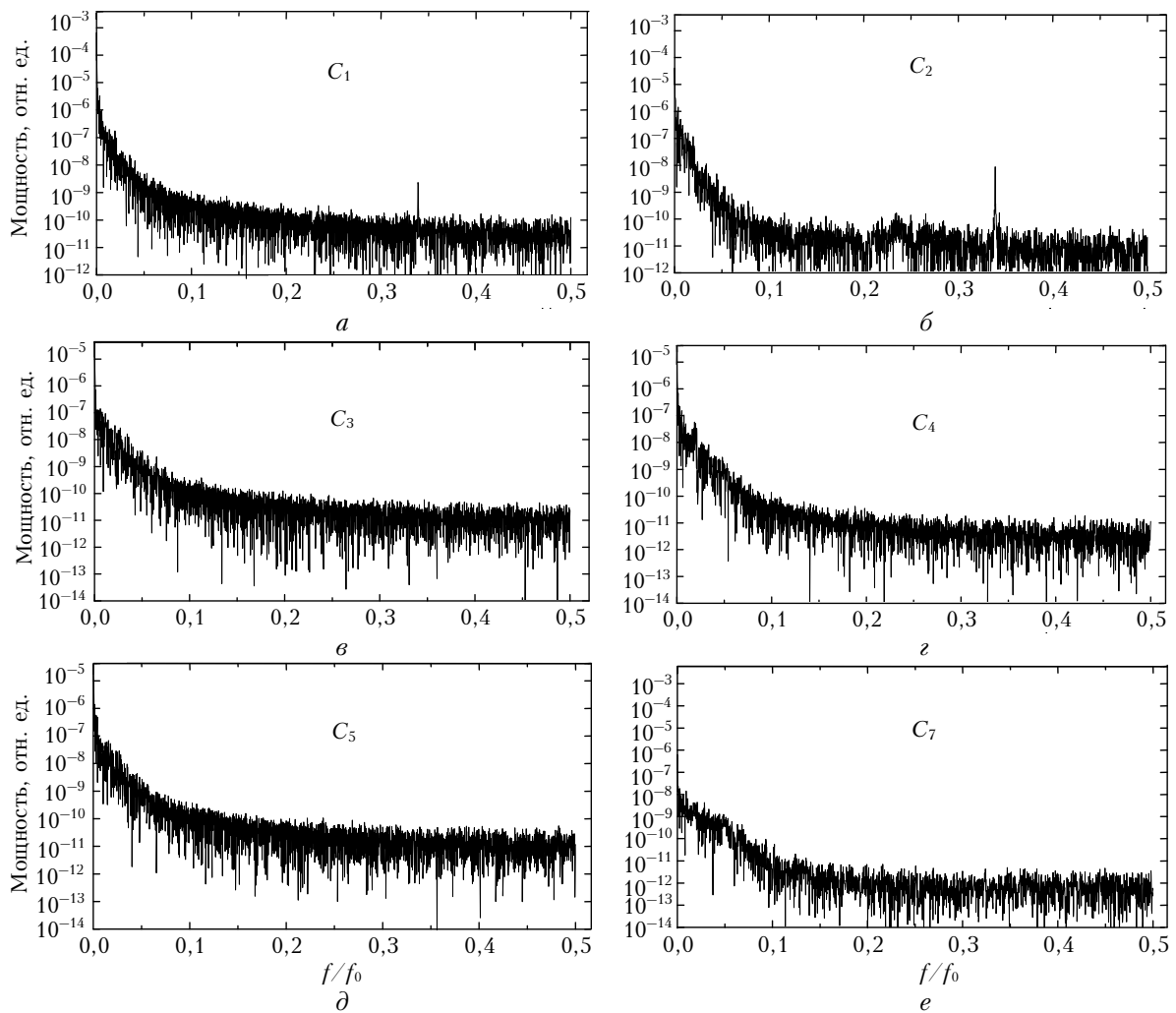


Рис. 8. Спектры мощности коэффициентов разложения aberrаций волнового фронта, вызванных павильонной турбулентностью

В [14] на основе аналитических расчетов по данным модели турбулентности для точки стояния солнечного телескопа была получена оценка требуемой полосы частот для зеркала-корректора на уровне 250 Гц.

Таким образом, для коррекции изображений в крупногабаритных солнечных телескопах в условиях сильных турбулентных искажений и дефицита времени требуются как высокочастотные ДВФ, так и быстрые активные зеркала-корректоры.

Заключение

Создание системы АО для солнечного телескопа — трудный и довольно долгий процесс. В рамках проекта была организована обработка данных для получения сведений о турбулентности в точке стояния солнечного телескопа. Для формирования требований к параметрам управляемых зеркал проведен статистический анализ флуктуаций волнового фронта, включая разложение в базисе полиномов Цернике, на основе данных измерений ДВФ. Оптико-метеорологические характеристики, полученные для площадки БСВТ (пос. Листвяника, Иркутская обл.), позволяют проследить динамику оптической нестабильности атмосферы, оценить осредненные и предельные количественные изменения основных ее параметров. В совокупности полученная информация является методической основой разрабатываемой системы АО для БСВТ с новейшими элементами коррекции атмосферных помех. По итогам работ 2017 г. предполагается переход к двухзеркальной системе АО. Применение разработанного комплекса аппаратуры на БСВТ позволит астрофизикам получать качественно новую астрофизическую информацию о состоянии Солнца, изучить его тонкую структуру.

Исследования выполняются в рамках проекта РНФ №15-19-20013 «Создание адаптивной системы, обеспечивающей работу крупногабаритного солнечного телескопа в условиях сильной атмосферной турбулентности».

1. Степанов В.Е., Банин В.Г., Круглов В.И., Григорьев В.М. Экспериментальный макет Большого солнечного вакуумного телескопа СибИЗМИР // Новая техн. в астрон. 1979. Вып. 6. С. 42–51.
2. 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.

3. Телескоп с адаптивной оптической системой: Пат. 111695. Россия, МПК. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д., Чупраков С.А. Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2011126666/28. Заявл. 29.06.2011; Опубли. 2011. Бюл. Роспатента.
4. Antoshkin L.V., Botugina 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., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Shikhovtcev 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. 990932-1–990932-6.
5. Schmidt D., Rimmele Th., Marino J., Wöger F. A review of solar adaptive optics // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99090X.
6. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П. Этапы развития адаптивной оптической системы для Большого солнечного вакуумного телескопа // Тр. VI Пулковской молодеж. астрон. конф. Изв. Главной астрон. обсерватории в Пулкове. 2016. № 224. С. 5–10.
7. Botugina N.N., Emaleev O.N., Lukin V.P., Kopylov E.A. Seasonal variability of the quality of astronomical seeing on the Large Solar Vacuum Telescope // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 10035–95.
8. Kopylov E.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Shikhovtcev A.Yu. The study of variability of the atmospheric turbulence in the region Lake Baykal // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99093S-1–99093S-7.
9. Lukin V.P., Kovadlo P.G., Shikhovtcev A.Yu. Site selection for modern ground based large telescopes // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 10035–117.
10. Michau V., Rousset G., Fontanella J.C. Wavefront sensing from extended sources // Proc. Workshop on Real-Time and Post-Facto Solar Image Correction. NSO. Sacramento Peak, USA. 1992. P. 91–102.
11. Perera S., Wilson R.W., Osborn J., Butterley T. SHIMM: A seeing and turbulence monitor for astronomy // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99093J-1.
12. Лукин В.П., Носов В.В. Измерение дрожания изображения протяженного некогерентного источника излучения // Квант. электрон. 2017. Т. 47, № 6. С. 580–588.
13. Большасова Л.А., Лукин В.П. Аналитические модели высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы для задач адаптивной оптики // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 918–925.
14. Lukin V.P., Sazonova P.V. Dynamic properties of adaptive optical systems // Rus. Phys. J. 2016. V. 59, N 7. P. 1052–1061.

Botugina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P. The development of components for creation of adaptive optics system for the solar telescope.

Wavefront aberrations at the input aperture of the Large Solar Vacuum Telescope were measured by a wavefront sensor of the adaptive optics system by a sunspot. To calculate the image displacement, a correlation algorithm with quadratic interpolation of the correlation function maximum position was used. The quality of astronomical vision, characterized by the Fried radius, was estimated from the same experimental data as the statistical characteristics of the fluctuations of the coefficients of the wavefront aberrations' expansion in Zernike polynomials. The results were obtained at a Fried radius of 51.6 mm, in a sample 43 s long, with a sampling frequency of 70 Hz. The means and standard deviations of the expansion coefficients were calculated. The analysis of the given spectra implies that the wavefront aberrations should be compensated in the frequency band 0–20 Hz for the effective correction of the images formed.