

В.П. Лукин^{1,2}, В.М. Григорьев³, Л.В. Антошкин¹,
Н.Н. Ботыгина¹, О.Н. Емалеев¹, П.А. Коняев¹, Е.А. Копылов²,
В.В. Лавринов¹, П.Г. Ковадло³, В.И. Скоморовский³

Результаты испытания адаптивной оптической системы с модифицированным корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

² *Томский государственный университет*

³ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 30.01.2007 г.

Испытания модифицированного корреляционного датчика (МКД) на Большом солнечном вакуумном телескопе показали, что при правильном выборе параметров фильтрующей функции МКД надежно измеряет смещение изображения солнечной грануляции в первом фокусе телескопа в условиях хорошего видения. В составе адаптивной оптической системы МКД должен измерять смещение изображения во втором фокусе телескопа. Оказалось, что качество изображения заметно ухудшается при переносе изображения во второй фокус. МКД измеряет смещение изображения солнечной грануляции во втором фокусе только при исключительно хороших условиях видения и при определенной структуре грануляции. Уменьшение входной апертуры телескопа до 170 мм незначительно влияет на качество изображения и, следовательно, на работу МКД.

Введение

Для изучения физических процессов, происходящих в малых масштабах на Солнце, необходимы солнечные телескопы с высоким пространственным или угловым разрешением. Известно [1], что солнечная атмосфера высокоструктурирована и динамична. Два важных масштаба определяют структуру солнечной атмосферы: высотный масштаб давления и длина свободного пробега фотона. В солнечной фотосфере оба они около 70 км или 0,1". Чтобы разрешить эти фундаментальные масштабы, угловое разрешение телескопа должно быть лучше чем 0,1". Исследования таких явлений, как нагрев солнечной короны, солнечная активность и вариации солнечной светимости, влияющих на климат на Земле, требуют наблюдений микроструктуры магнитных полей солнечной атмосферы с угловым разрешением лучше чем 0,1". Для создания теоретических моделей солнечной атмосферы нужны параметры, которые можно получить при изучении поведения еще более мелких пространственных масштабов солнечной атмосферы.

Чтобы улучшить пространственное разрешение действующих телескопов, в их состав включают адаптивные оптические (АО) системы. По сравнению со звездными АО-системами для солнечных телескопов технически более сложны. Основные сложности обусловлены тем, что дневная турбулентность более сильная и качество видения существенно меняется во времени, а также тем, что датчик волнового фронта должен работать с излучением видимого диапазона

от низкоконтрастных, протяженных, изменяющихся во времени объектов, таких как солнечная грануляция. Из-за нагрева поверхности прямым светом турбулентность у Земли много сильнее днем. Даже в лучших местах расположения при типичной высоте телескопа 20–40 м над Землей типичное значение радиуса Фрида r_0 равно 10 см ($\lambda = 500$ нм). К тому же радиус Фрида, характеризующий силу атмосферной турбулентности, сильно флуктуирует на коротких временных масштабах (секунды) и часто уменьшается до нескольких сантиметров. Поэтому, несмотря на относительно малые размеры входных апертур солнечных телескопов, солнечные АО-системы требуют большего числа более быстродействующих элементов коррекции, чем звездные.

Основная проблема для солнечных АО-систем заключается в развитии датчика волнового фронта. Датчик, который используется для звездных АО-систем, не может быть использован для солнечных, так как Солнце — протяженный объект, и объекты, которые могут использоваться как опорные звезды (натуральные или лазерные) для ночных АО-систем [2], не применимы, когда наблюдается Солнце. Солнечные АО-системы используют в качестве объектов слежения структуры на поверхности солнечного диска — солнечные пятна, поры и солнечная грануляция. Солнечная грануляция, в частности, — проблемная цель для слежения, так как грануляционная картина имеет низкий контраст и меняется во временных масштабах порядка 1 мин.

Надо отметить, что применение лазерной опорной звезды (ЛОЗ) — не очень практичное решение

для солнечной адаптивной оптики (АО), так как нужны слишком яркие лазеры для работы на фоне солнечного диска или специальные узкополосные фильтры. Сложность и стоимость таких проектов таковы, что мы достаточно далеки от серьезных шагов в этом направлении. Возможное применение ЛОЗ в солнечной астрономии — это наблюдение очень слабой короны. Яркость короны составляет примерно 10^{-6} от яркости диска, т.е. яркости самой структуры недостаточно для слежения. Будущее использование ЛОЗ в солнечной АО-системе рассматривается для наблюдения короны на новом 4-метровом телескопе ATST (Advanced Technology Solar Telescope).

История развития солнечной АО на начальных этапах ее становления достаточно подробно изложена в работе Риммеле [1]. Первые эксперименты по солнечной АО были проведены Харди в 1979 г. на телескопе VTT (Vacuum Tower Telescope) на Сакраменто Пик. В качестве датчика волнового фронта в эксперименте использовался сдвиговый интерферометр. Предполагалось, что АО-система сможет работать как с яркими звездами, так и с солнечными пятнами. В действительности АО-система продемонстрировала улучшение качества изображения звезды, но не улучшила изображение солнечного пятна.

Первую действующую солнечную АО-систему создала фирма Локхид в середине 80-х гг. на базе 19-элементного составного зеркала и аналогового датчика волнового фронта Шека—Гартмана [SH] с 19 квадрантными детекторами для регистрации смещения изображений, формируемых 19 субапертурами. В качестве объектов слежения система могла использовать достаточно контрастные на общем фоне изображения одиночные поры и солнечные пятна. Создание этой системы является значимой вехой в развитии солнечной АО, так как в реальном эксперименте на солнечном телескопе DST (Dunn Solar Telescope) на Сакраменто Пик впервые удалось показать улучшение качества изображения при включении в состав солнечного телескопа АО-системы.

Следующим этапом в развитии солнечных АО-систем явилось создание корреляционных датчиков волнового фронта, позволяющих использовать в качестве объекта слежения фрагмент солнечной грануляции [3]. Включение АО-систем с корреляционным датчиком в состав действующих солнечных телескопов, расположенных в наилучших по астроклимату местах, позволяет усилить контраст изображения солнечной грануляции, но достичь дифракционного разрешения можно только в исключительно хороших условиях видения ($r_0 = 20$ см). Так, на телескопе NSST (New Swedish Solar Telescope) с апертурой 97 см на La Palma с помощью АО-системы и постдетекторной обработки получены изображения грануляции около солнечного пятна с разрешением $0,1''$ (70 км). В эксперименте использовался светофильтр с центральной длиной волны около 430 нм. Время экспозиции кадра равнялось 20 мс.

Улучшение качества грануляционной картины на солнечных телескопах, работающих в худших условиях видения, до сих пор остается достаточно сложной задачей. В 2001 г. нами были проведены испы-

тания АО-системы с корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ [4]. Система использовала в качестве объектов слежения изображения достаточно контрастных солнечных пятен. В 2003 г. после усовершенствования системы регистрации изображения (замены видеокамеры с 8-разрядным АЦП на видеокамеру с 12-разрядным АЦП) АО-система показала хорошие результаты, когда в качестве объекта слежения использовались участки изображения с небольшой порой, контраст которой был не ниже 10%. Технологические особенности ПЗС-матрицы используемой видеокамеры не позволили получить такие же результаты при работе с фрагментом грануляционной картины. Возникла необходимость совершенствовать не только приборную часть датчика волнового фронта, но и корреляционный алгоритм.

На основе анализа фильмов, записанных во время экспедиции 2004 г., нами был разработан модифицированный корреляционный алгоритм [5], который был опробован на измерениях смещения изображения солнечной грануляции в фильмах. Правильность измерений смещения модифицированным корреляционным датчиком проверялась сравнением с измерениями смещений традиционным корреляционным датчиком таких фрагментов изображения, с которыми хорошо работает традиционный корреляционный алгоритм.

В настоящей статье приводятся результаты испытания модифицированного корреляционного датчика в экспериментальной схеме на Большом солнечном вакуумном телескопе.

Модифицированный корреляционный датчик и методика испытаний

Изображение солнечной грануляции является слабоконтрастным в силу физической природы самого объекта наблюдения. Инструментальные погрешности солнечных телескопов и атмосферная турбулентность существенно уменьшают контраст грануляционной картины [6, 7]. Перенос изображения с помощью дополнительных оптических элементов во второй фокус в реальных схемах солнечных телескопов с АО-системой также снижает контраст грануляционной картины. Отсюда особые требования к системам регистрации изображения и измерениям смещения. Известный метод выравнивания освещенности по полю изображения при работе АО-систем со слабоконтрастным изображением требует предварительных точных измерений. Нами был опробован [5, 8] более оперативный, на наш взгляд, метод фильтрации в области пространственных частот регистрируемых изображений. При правильном выборе параметров фильтрующей функции этот метод позволяет убрать неравномерность освещенности изображения, созданную формирующей изображением оптикой (низкие пространственные частоты), а также дефекты изображения, размер которых сравним с размером элементов матрицы фотоприемника (высокие частоты). В нашем случае — это

технологические особенности ПЗС-матрицы (четыре горизонтальные линейки элементов с чувствительностью на 0,4–1,2% ниже чувствительности остальных элементов матрицы) и случайные дефекты, появляющиеся в процессе измерений.

В датчике смещения изображения реализован модифицированный алгоритм БПФ [7] для вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ):

$$C(i, j) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} I(l, m) I_R(i+l, j+m),$$

$$C = F^{-1} \{ F^+ [I] F^+ [I_R] \},$$

$$C_m = F^{-1} \{ F^+ [I] F^+ [I_R] H(\kappa_x, \kappa_y) \};$$

$$H(\kappa_x, \kappa_y) = \exp \left\{ -a \left[(\kappa_x - \kappa_{x0})^2 + (\kappa_y - \kappa_{y0})^2 \right] \right\},$$

где F обозначает операцию преобразования Фурье; I — распределение освещенности изображения; $H(\kappa_x, \kappa_y)$ — фильтр пространственных частот κ_x, κ_y с параметром a , характеризующим его ширину.

Параметры фильтра H подбираются исходя из условий эксперимента таким образом, чтобы обеспечить необходимую остроту максимума взаимной корреляционной функции.

Испытания модифицированного корреляционного датчика (МКД) с модифицированным корреляционным алгоритмом измерения дрожания изображения проводились на Большом солнечном вакуумном телескопе в сентябре 2005 г. Схема установки представлена на рис. 1.

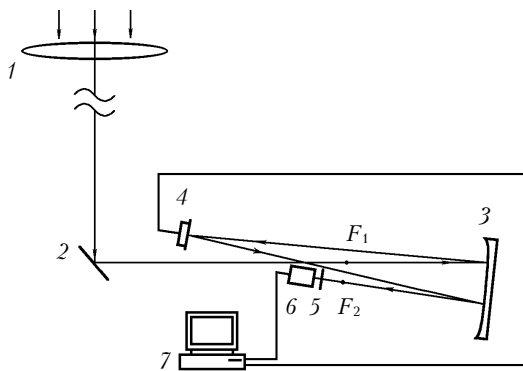


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — объектив телескопа БСВТ ($D = 760$ мм, $F = 40$ м); 2 — диагональное зеркало; 3 — сферическое зеркало ($F = 4$ м); 4 — управляемое зеркало; 5 — светофильтры; 6 — видеокамера «DALSTAR» (128×128 элементов, 12-разрядное АЦП, 490 кадр./с); 7 — компьютер Pentium VI, 2,4 ГГц с платой ввода видеосигнала PC-DIG

Программное обеспечение состояло из вспомогательной программы настройки и основной программы управления. Программа управления, в свою очередь, имела несколько режимов работы: измерения, слежения, регистрации. При работе основной программы в режиме измерения поток кадров, поступающих от видеокамеры, отображался в оверлейном окне драйвера захвата. Корреляционный датчик смещения изображения выводил результаты в реаль-

ном времени как в цифровом, так и в графическом виде. При работе программы в режиме слежения сигналы управления через контроллер с интерфейсом RS-232 подавались на пьезоэлектрический привод [9] для двухкоординатного управления угловым положением зеркала 4. Режим регистрации был предназначен для записи видеосигнала в память компьютера для последующей обработки. Последовательность кадров по 128×128 пикселей каждый в формате 16 бит на пиксель записывалась сначала в оперативную память компьютера, а затем на жесткий диск.

В реальной схеме АО-системы МКД работает с изображением, формируемым вблизи второго фокуса F_2 (см. рис. 1). Однако программа испытаний модифицированного корреляционного датчика включала в себя измерения смещения изображения, как во втором, так и в первом фокусе телескопа, чтобы проверить работоспособность модифицированного алгоритма на объектах с различными контрастом и степенью зашумленности.

Испытания проводились по следующей методике. Настройкой оптической схемы выбирался фрагмент изображения солнечной грануляции, с которым должен работать модифицированный корреляционный датчик. На основе анализа выбранного фрагмента изображения определялись характерные размеры структуры изображения и выбирались параметры фильтрующей функции, которые вводились в программу управления. Проверялась работа МКД с выбранным фрагментом изображения. В реальном времени в соседних окнах на экране монитора осуществлялись просмотр и анализ вида взаимной корреляционной функции и смещающегося фрагмента изображения. Если при выбранных параметрах фильтрующей функции корреляционная функция имела выраженный максимум, следящий за смещением изображения, проводились измерения смещения выбранного фрагмента изображения. Создавались файлы измеренных смещений, а также изображений опорного кадра и усредненного за время реализации. Записывался фильм с тем же фрагментом изображения для последующего анализа. Если МКД работал с фрагментом изображения, формируемого во II фокусе, измерения смещения проводились в двух режимах: с замкнутым контуром управления и без управления.

Результаты испытаний модифицированного корреляционного датчика в I фокусе телескопа

Модифицированный корреляционный алгоритм показал хорошие результаты при работе с фрагментами изображения солнечной грануляции с достаточно хорошо выраженной структурой с контрастом 1,2–2,0% (рис. 2). Фрагменты изображения солнечной грануляции получены в I фокусе при хороших погодных условиях 24.09.05 (слабый без порывов северный ветер 2–5 м/с, безоблачное небо, метеорологическая дальность видимости 8–10 км) и 25.09.05 в первой половине дня (ветер южный 0,5–1 м/с,

тонкая прослойка высоких перистых облаков, метеорологическая дальность видимости 8–10 км). Угловой размер изображения – 26×26" (128×128 пикселей). Угловое поле зрения датчика 20×20" (96×96 пикселей).

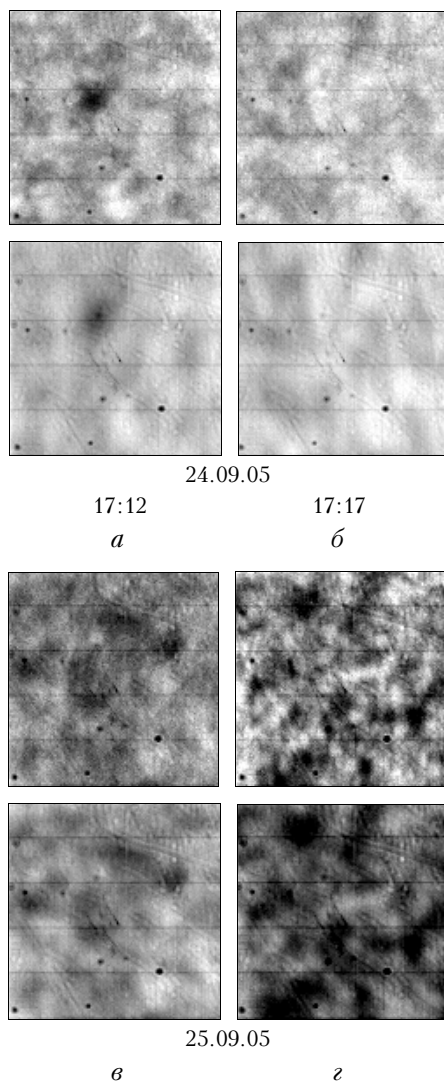


Рис. 2. Фрагменты изображения солнечной грануляции. Верхний ряд – изображения, полученные со временем экспозиции кадра 2,04 мс; нижний ряд – усредненные по 1000 кадрам, взятым с периодом 6,12 мс

На рис. 3 показано сечение одного из приведенных изображений. Такие изображения солнечной грануляции были получены в эксперименте в I фокусе телескопа при хороших условиях видения.

Использование модифицированного корреляционного алгоритма при измерении смещения изображений солнечной грануляции, записанных в фильме, позволяет оценить, насколько правильно были подобраны параметры фильтрующей функции в измерениях смещения того же фрагмента в реальном эксперименте. Измеренные в реальном времени (24.09.05, 17:17) и в фильме (24.09.05, 17:23) смещения изображения одного и того же фрагмента солнечной грануляции приведены на рис. 4 и 5.

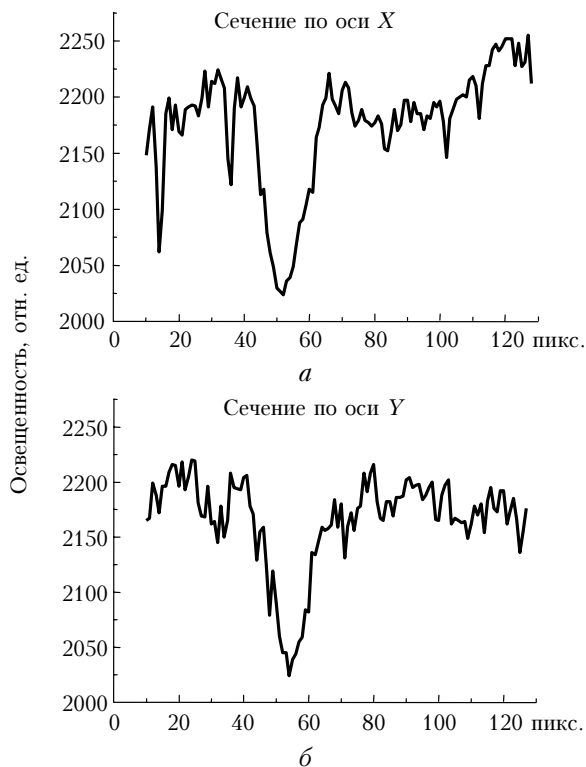


Рис. 3. Ортогональные сечения через изображение поры (см. рис. 2, а, верхний ряд), 1 пиксель = 0,21"

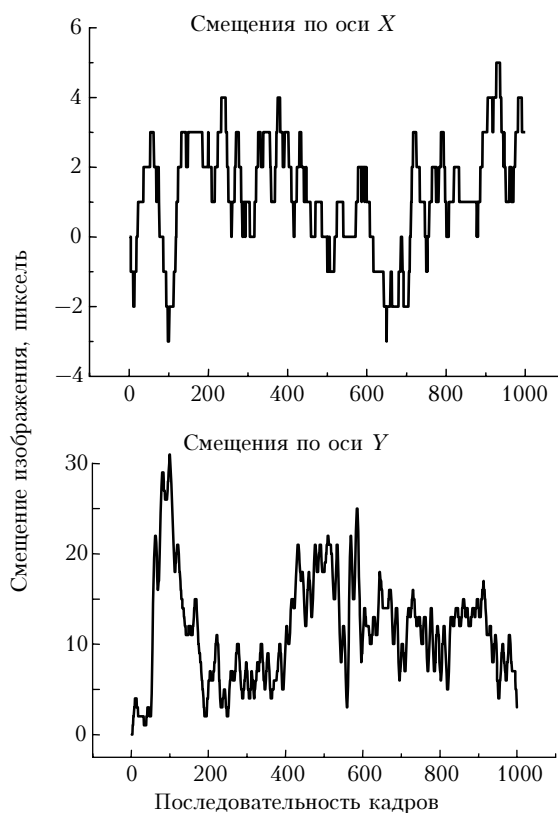


Рис. 4. Измеренные в реальном времени смещения фрагмента изображения солнечной грануляции. Длительность реализации 6,1 с (1000 кадров с экспозицией 2,04 мс с периодом 6,12 мс)

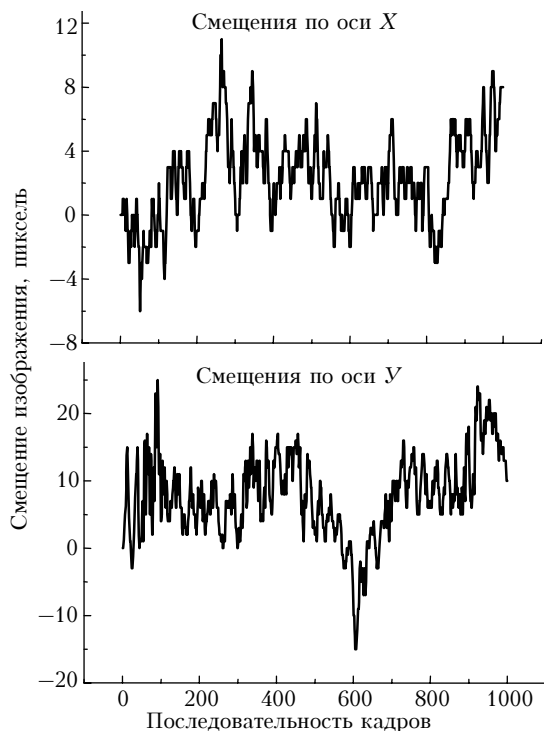


Рис. 5. Измеренные в фильме смещения фрагмента изображения солнечной грануляции. Длительность реализации 16,32 с (1000 кадров с экспозицией 2,04 мс с периодом 16,32 мс)

Измерения проводились МКД с одинаковыми параметрами фильтрующей функции: нормированный параметр $a = 0,5$, характерный размер структуры l_0 равен 16 пикселям. Окно анализа МКД — 96×96 пикселей, что соответствует угловому размеру изображения $20 \times 20''$.

При выбранных параметрах фильтрующей функции корреляционная функция имеет выраженный максимум, смещающийся вместе с изображением. Визуальная оценка смещения изображения по приведенным кадрам (рис. 6) и сравнение с измеренными значениями показывают, что модифицированный корреляционный датчик следит за смещением изображения.

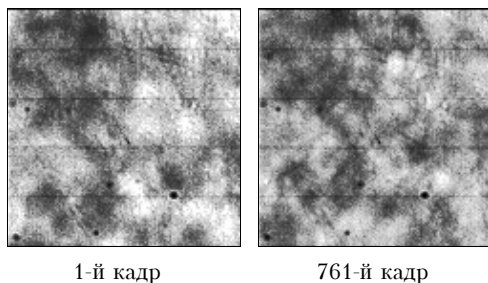


Рис. 6. Кадры из фильма. Контраст изображения в окне анализа 761-го кадра равен 1,47%. Интервал изменения контраста в фильме 1,3–1,6%

Возможность менять параметры фильтрующей функции модифицированного корреляционного датчика при измерении смещения изображения в одном и том же фильме позволяет проанализировать раз-

брос измеренных значений смещения при используемом критерии выбора параметров (рис. 7).

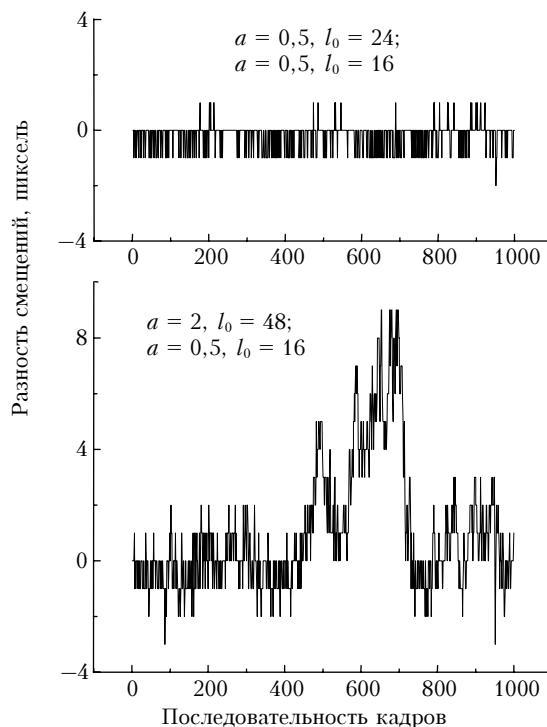


Рис. 7. Разность измеренных смещений изображения в фильме (24.09.05, 17:23) при различных параметрах фильтрующей функции

При сдвиге максимума фильтрующей функции на одну гармонику разброс измеренных значений лежит в интервале $[-1, 1]$ пикселей. При выделении на том же фрагменте более крупных элементов структуры изображения в качестве объектов слежения измеренные смещения существенно отличаются. Вероятно, для правильного измерения смещений необходимо обеспечить наибольшую возможную для выбранного фрагмента остроту и величину движущегося максимума ВКФ. В качестве параметра l_0 необходимо выбирать размер наиболее контрастных элементов структуры изображения. Размер их должен быть в несколько раз меньше размера окна анализа и на порядок больше неподвижных элементов структуры, связанных с дефектами приемника. Полуширина фильтрующей функции определяется разбросом размеров наиболее контрастных элементов структуры и их изменением в процессе регистрации.

Запись и обработка длинных реализаций смещения изображения позволяют из дисперсии дрожания изображения оценить радиус Фрида, характеризующий атмосферную турбулентность. Для оценки радиуса Фрида выбраны такие реализации, когда инструментальные дрожания изображения, связанные с ветровыми колебаниями сидерастатного зеркала, практически отсутствовали. Измерения проводились при слабом ветре 0,5 м/с в направлении оси крепления сидерастатного зеркала.

В качестве примера на рис. 8 приведены опорный кадр и усредненный за время реализации

(25.09.05, 09:59), длительность которой 50,12 с (8192 кадра с временем экспозиции кадра 2,04 мс).

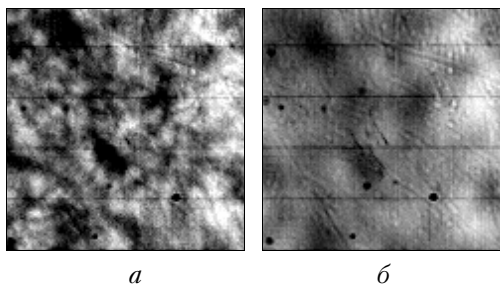


Рис. 8. Опорный кадр (а) и усредненный за время реализации (б)

В измерениях смещения изображения использовался модифицированный корреляционный датчик с параметрами фильтрующей функции $a = 0,5$, $l_0 = 16$ пикселям. Среднеквадратическое отклонение смещения изображения по оси X составило 3,47 пикселя ($0,730''$), по оси Y — 3,52 пикселя ($0,740''$). Атмосферная турбулентность, вызывающая такие смещения изображения, характеризуется радиусом Фрида, равным 3,7 см ($\lambda = 500$ нм).

Интересно, что оценка радиуса Фрида по формуле, предложенной в работе [6], связывающей контраст грануляционной картины в телескопах с диаметром меньше 1 м и радиус Фрида, если он меньше 10 см, согласуется со значением, полученным из

дисперсии дрожания изображения. Следует отметить, что качество изображения солнечной грануляции в этих измерениях было одним из лучших, наблюдаемых нами в экспедициях в августе—сентябре 1998—2005 гг.

Результаты испытания модифицированного корреляционного датчика во II фокусе

Испытания МДК во II фокусе в составе АО-системы проводились 22.09.05 и 23.09.05. Структура изображения солнечной грануляции (рис. 9) при полной входной апертуре при одинаковом угловом размере поля зрения датчика отличалась от изображения, с которым работал МДК в I фокусе.

Просмотр и анализ фильмов, записанных во II фокусе, показали, что в течение 2-секундной реализации структура изображения меняется: наряду со слабоконтрастными достаточно крупными неоднородностями освещенности в отдельные моменты времени проявляется мелкая структура изображения (рис. 9, б, з). В реальном эксперименте в процессе стабилизации фрагмента изображения структура его также изменяется: в отдельные моменты времени наиболее выражены либо крупные, либо мелкие элементы структуры. АО-система работает нестабильно. В приведенной на рис. 10 реализации адаптивная система пытается следить за крупными масштабами.

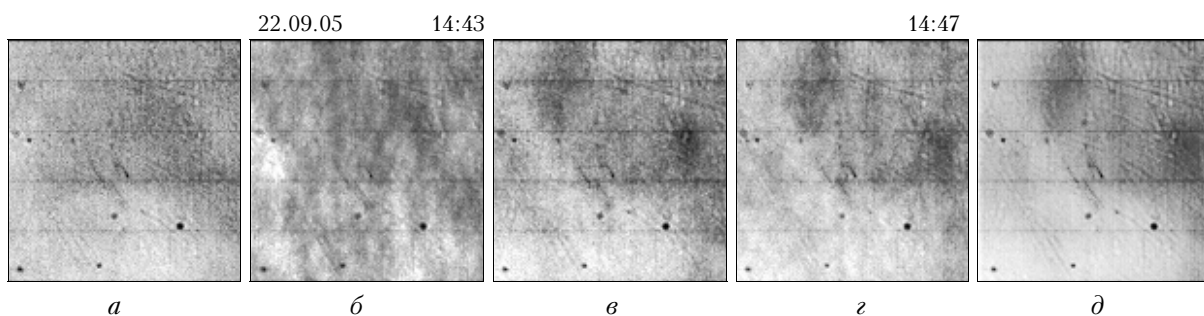


Рис. 9. Изображения, полученные во II фокусе: а, б — опорные кадры реальных измерений; в, з — 1-й и 232-й кадры из фильма; д — изображение, усредненное по 1000 кадрам фильма, взятым с частотой 490 кадр./с

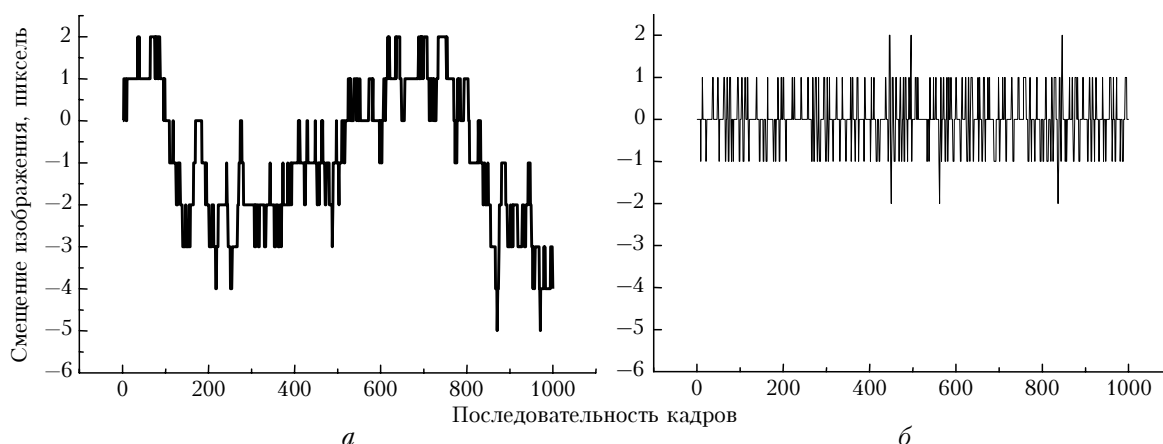


Рис. 10. Смещение изображения по оси X в измерениях 22.09.05 (14:43) при разомкнутом (а) и замкнутом (б) контурах управления при выделении крупных масштабов (параметры фильтрующей функции: $a = 1$, $l_0 = 32$ пикселям). 1 пиксель = $0,21''$, длительность реализации 6,10 с (1000 кадров с временем экспозиции 2,04 мс с периодом 6,12 мс)

Статистическая оценка, пиксель	Смещение изображения при разомкнутом контуре управления	Смещение изображения при стабилизации	Сигнал управления	Смещение изображения в фильме
Среднее значение	-0,822	0,002	2,094	-2,89
Среднеквадр. откл.	1,64	0,61	2,84	1,98
Минимальное значение	-5	-2	-4	-8
Максимальное значение	2	2	10	0

Появление мелких масштабов распределения освещенности регистрируемых кадров приводит к срыву слежения (выбросы в отдельных точках рис. 10, б). В таблице приведены среднеквадратические отклонения представленных выше реализаций, из которых можно оценить эффективность стабилизации фрагмента изображения во II фокусе.

Испытания модифицированного корреляционного датчика при различных диаметрах входной апертуры телескопа

Развитие исследований по АО на БСВТ предполагает создание системы, корректирующей не только общие наклоны волнового фронта, но и аберрации более высокого порядка. В таких системах входная апертура телескопа разбивается линзовой маской Гартмана на субапертуры и регистрируются смещения изображений, созданных каждой субапертурой. В связи с этим были проведены испытания МКД при

уменьшении диаметра входной апертуры телескопа. Входная апертура телескопа уменьшалась диафрагмой, помещенной перед объективом телескопа в центре либо на краю объектива. Анализировались качество изображения солнечной грануляции во втором фокусе и результаты измерений смещения изображения модифицированным корреляционным датчиком. При уменьшении диаметра входной апертуры до 170 мм качество изображения солнечной грануляции во втором фокусе меняется незначительно. В записанных реализациях (1000 кадров со временем экспозиции 2,04 мс) наблюдается в основном крупномасштабная изменяющаяся структура изображения, четко выраженная мелкая структура проявляется лишь на отдельных кадрах (рис. 11).

В фильме, записанном при диаметре диафрагмы, равном 220 мм, ясно видно, что при появлении кадров со структурой изображения, отличающейся от структуры опорного кадра, МКД дает выбросы. Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 12, 13. В МКД использовалась фильтрующая функция (ФФ) с такими же параметрами, как и при полной апертуре.

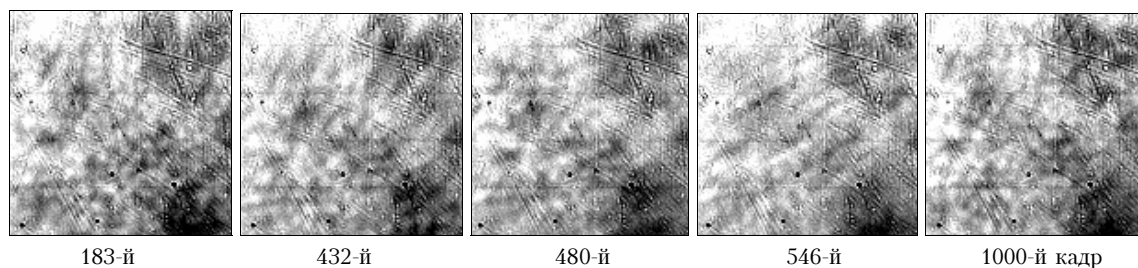


Рис. 11. Кадры с мелкой структурой изображения в фильме 23.09.05 (13:50) (диафрагма 170 мм в центре объектива телескопа)

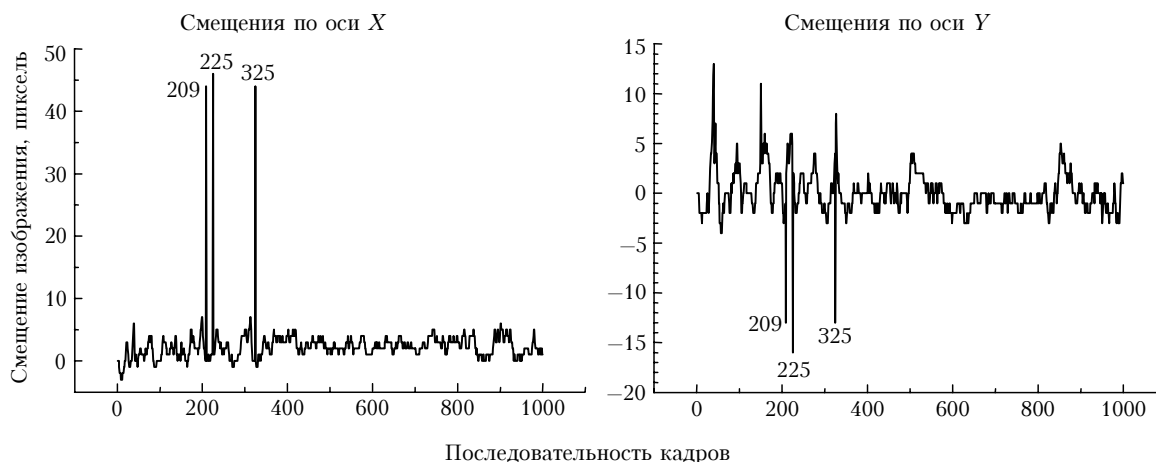


Рис. 12. Смещение изображения в фильме 23.09.05 (13:12) при диафрагме 220 мм на краю объектива телескопа (параметры ФФ: $a = 1$, $l_0 = 32$ пикселям)

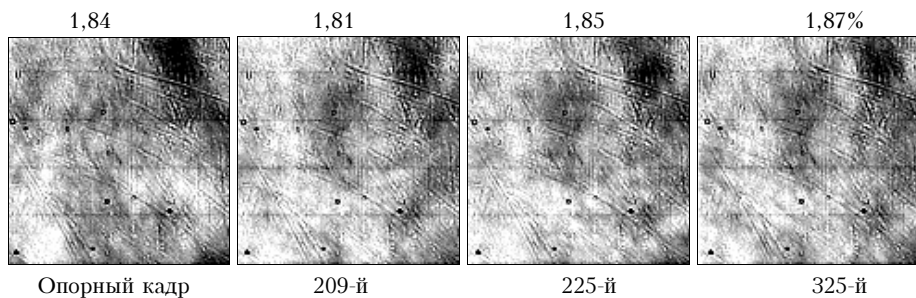


Рис. 13. Кадры фильма 23.09.05 (13:12) и контраст изображения

При стабилизации изображения такая ошибка МКД может привести к увеличению сигнала управления, значительно превышающему верхнюю границу диапазона управляемого зеркала. Зеркало оказывается в крайнем положении, а ошибка слежения увеличивается на сдвиг, обусловленный крайним положением зеркала. Сигнал управления продол-

жает расти (интегральный закон управления), система не выходит на режим стабилизации. Такая ситуация проявилась в реальных измерениях (13:05) (рис. 14, 15, *а, б*). В следующей реализации (13:06) структура изображения менялась незначительно, ошибка измерения меньше и стабилизация изображения лучше (рис. 15, *в, г*).

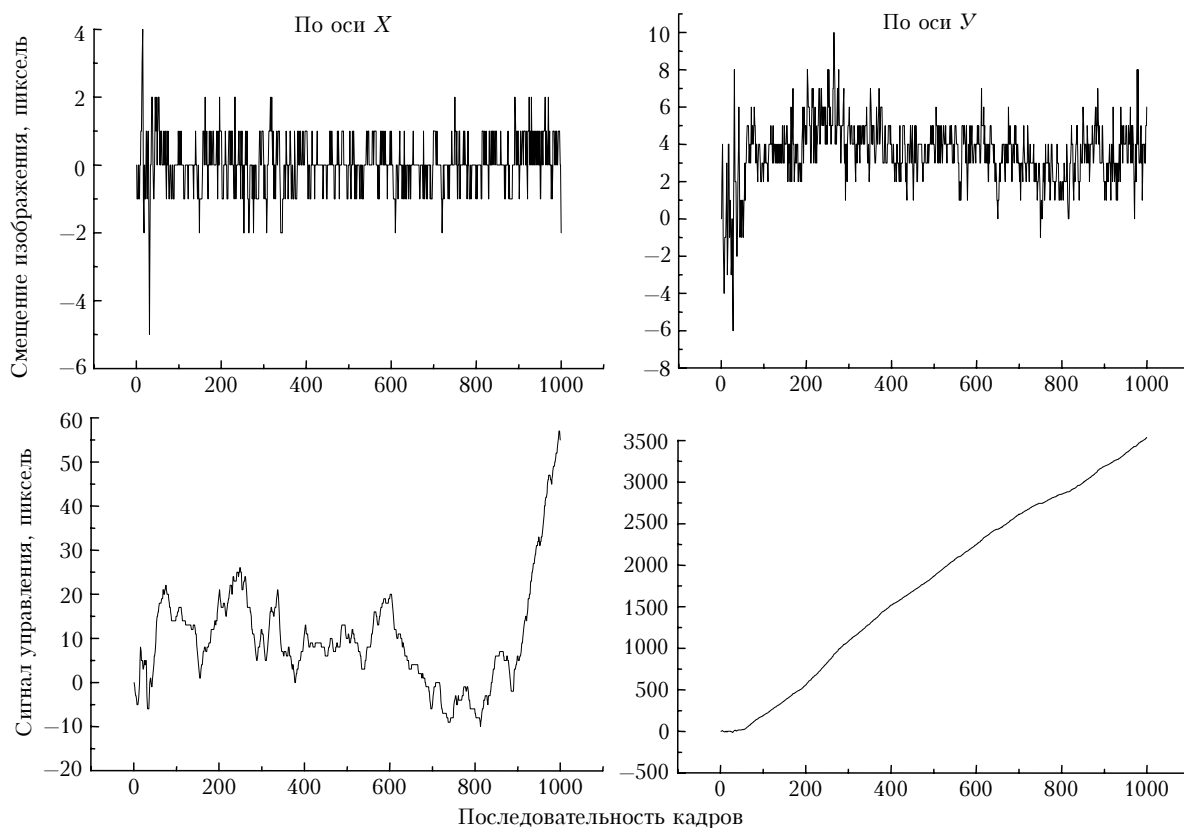


Рис. 14. Смещения изображения и сигналы управления в реальных измерениях с замкнутым контуром управления (13:05)

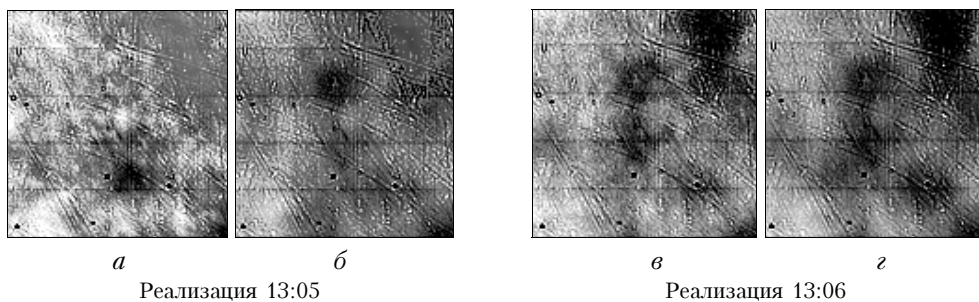


Рис. 15. Опорные (*а, в*) и средние (*б, г*) кадры за время стабилизации

Выводы

Использование модифицированного корреляционного датчика для измерения смещения изображения в первом фокусе телескопа показало, что при правильном выборе параметров фильтрующей функции МКД надежно измеряет смещение изображения солнечной грануляции в условиях хорошего видения.

В составе адаптивной оптической системы модифицированный корреляционный датчик измеряет смещение изображения во втором фокусе только при высоком качестве изображения солнечной грануляции (только при исключительно хороших условиях видения и при определенной структуре грануляции). Уменьшение входной апертуры телескопа до 170 мм незначительно влияет на качество изображения и, следовательно, на работу МКД.

Заметное ухудшение качества изображения происходит при переносе изображения во второй фокус. В настоящее время элементы адаптивной оптической системы размещены вне вакуумной трубы телескопа на голографическом столе в помещении с существующими перепадами температуры. Длина оптического пути при переносе изображения из первого фокуса телескопа во второй около 17 м. Искажения, которые вносят дополнительные оптические элементы переноса изображения и среда между ними, оказывают существенное влияние на качество изначально слабоконтрастного изображения солнечной грануляции. Структура изображения во втором фокусе меняется в течение коротких реализаций (2 с). Алгоритм МКД пытается следить за крупными масштабами (размытое изображение) и дает большую ошибку при выделении фильтрующей функцией мелких масштабов (мелкая структура изображения редко проявляется в процессе измерения).

При развитии АО-системы на БСВТ, корректирующей изображение солнечной грануляции, необходимо принять меры по обеспечению высокого качества оптической системы, переносающей изображение во второй фокус.

Работа выполнена при финансировании в рамках комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.2 «Развитие адаптивных систем коррекции изображения для наземных телескопов» и Программы Президиума РАН № 16. Часть 3. Проект 1. «Дневной астроклимат и проблемы построения адаптивного телескопа».

1. Rimmele T.R. Adaptive Optical Systems Techology // Proc. SPIE. 2000. V. 4007. P. 218–231.
2. Лукин В.П. Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176. № 9. С. 1000–1006.
3. O.von der Luhe, Widener A.L., Rimmele Th., Spence G., Dunn R.B., Wiborg P. Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes // Astron. and Astrophys. 1989. V. 224. P. 351–360.
4. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Петров А.И., Янков А.П. Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 11. С. 1027–1030.
5. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Лавринов В.В. Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1077–1082.
6. Ricort G., Aime C. Solar Seeing and the Statistical Properties of the Photospheric Solar Granulation // Astron. and Astrophys. 1979. V. 76. P. 324–335.
7. Ricort G., Aime C., Roddier C., Borgino J. Determination of Fried's parameter r_0 prediction for the observed r.m.s. contrast in solar granulation // Sol. Phys. 1981. V. 69. P. 223–231.
8. Лукин В.П., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Скоморовский В.И., Янков А.П. Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа // Оптич. ж. 2006. Т. 73. № 3. С. 55–60.
9. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Лукин В.П., Янков А.П. Пьезоэлектрический привод для двухкоординатного управления угловым положением зеркала // Приборы и техн. эксперим. 2002. № 1. С. 144–146.

V.P. Lukin, V.M. Grigorjev, L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, P.A. Konyaev, E.A. Kopylov, V.V. Lavrinov, P.G. Kovadlo, V.I. Skomorovskii. **Results of testing the adaptive optical system with a modified correlation sensor at Large Solar Vacuum Telescope.**

Testing of the modified correlation sensor (MCS) at Large Solar Vacuum Telescope have shown that at a proper choice of the filtering function parameters the MCS reliably measures the shift of the solar granulation image in the telescope first focus under conditions of good seeing. As a part of the adaptive optical system, MCS must measure the image shift in the telescope second focus. It turns out that the image quality becomes noticeably worse when the image is transferred to the second focus. The MCS measures the image shift of the solar granulation in the second focus only under very good seeing conditions and definite granulation structure. A decrease of the input aperture to 170 mm insignificantly affects the image quality and, consequently, the MCS operation.