

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.31; 681.7; 53.082.5

ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА
ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ*В. П. Лукин^{1,2}, Н. Н. Ботыгина¹, О. Н. Емалеев¹, П. А. Коняев¹¹Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск²Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: lukin@iao.ru

Исследованы возможности построения датчика волнового фронта для адаптивной системы Большого солнечного вакуумного телескопа. Предложена модификация корреляционного датчика (МКД). Проведены испытания датчика при измерении смещения изображения солнечной грануляционной картины в первом и во втором фокусах телескопа в условиях хорошего видения. Проанализированы изменение качества изображения при его переносе во второй фокус и результаты измерений смещения изображения солнечной грануляции во втором фокусе при исключительно хороших условиях видения и определенной структуре грануляции. Выполнено исследование влияния уменьшения размера входной апертуры до 170 мм на качество изображения и, следовательно, на работу МКД.

Введение. Для изучения физических процессов, происходящих в малых пространственных масштабах на Солнце, необходимы солнечные телескопы с высоким пространственным или угловым разрешением. Известно [1], что солнечная атмосфера структурирована и динамична. Два важных масштаба определяют структуру солнечной атмосферы: высотный масштаб давления и длина свободного пробега фотона. В солнечной фотосфере оба они равны примерно 70 км, или 0,1 угл. с. Чтобы работать внутри этих фундаментальных масштабов, угловое разрешение телескопа должно быть лучше 0,1 угл. с. Исследования таких явлений, как нагрев солнечной короны, солнечная активность и вариации солнечной светимости, влияющих на климат на Земле, также требуют наблюдений микроструктуры магнитных полей солнечной атмосферы с угловым разрешением лучше 0,1 угл. с.

* Работа выполнена 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».

Чтобы улучшить пространственное разрешение действующих телескопов, в их состав включают адаптивные оптические системы (АОС), которые для солнечных телескопов технически сложнее, чем для звездных. Основные проблемы обусловлены тем, что дневная турбулентность более жесткая и качество видения сильно меняется во времени, а также тем, что датчик волнового фронта должен работать с излучением видимого диапазона от таких низкоконтрастных, протяженных, изменяющихся во времени объектов, как солнечная грануляция. Из-за нагрева поверхности прямым светом турбулентность у Земли много сильнее днем. Типичное значение радиуса когерентности $r_0 = 10$ см (на длине волны 500 нм) даже в лучших условиях наблюдений и типичной высоте телескопа 20–40 м над Землей. К тому же радиус когерентности, 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 АОС требуют большего числа быстродействующих элементов коррекции, чем звездные.

Основная проблема для солнечных АОС заключается в датчике волнового фронта. Датчик для звездных АОС не может быть применен для солнечных АОС, так как Солнце – протяженный объект, а объекты, которые могут использоваться как опорные звезды (натуральные или лазерные) для ночных АОС [2], не применяются при наблюдении Солнца. Солнечные АОС могут использовать как объекты слежения следующие структуры на поверхности солнечного диска: солнечные пятна, поры и солнечную грануляцию. Солнечная грануляция – проблемная цель для слежения, так как грануляционная картина имеет низкий контраст и меняется во временных масштабах порядка 1 мин.

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

Первую действующую солнечную АОС создала фирма «Локхид» (США) в середине 1980-х годов на базе 19-элементного составного зеркала и аналогового датчика волнового фронта Шека – Гартмана с 19 квадрантными детекторами для регистрации смещения изображений, формируемых 19 субапертурами. В качестве объектов слежения система могла взять достаточно контрастные на общем фоне изображения: одиночные поры и солнечные пятна. Создание этой системы является значимой вехой в развитии солнечной АОС, так как в реальном эксперименте на солнечном телескопе DST (Dunn Solar Telescope) на пике Сакраменто впервые удалось показать улучшение качества изображения при включении АОС в состав солнечного телескопа.

Следующим этапом в развитии солнечных АОС явилось создание корреляционных датчиков волнового фронта, которые могут использовать в качестве объекта слежения фрагмент солнечной грануляции [3]. Включение АОС с корреляционным датчиком в состав действующих солнечных телескопов, расположенных в наилучших по астроклимату местах, позволяет увеличить контраст изображения солнечной грануляции, но достичь дифракционного

разрешения можно только в исключительно хороших условиях видения (при радиусе когерентности примерно 20 см). Так, на телескопе NSST (New Swedish Solar Telescope) с апертурой 97 см на острове Ла Пальма (Испания) с помощью АОС и постдетекторной обработки получены изображения грануляции около солнечного пятна с разрешением 0,1 угл. с (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 сложной задачей. В 2001 г. были проведены испытания АОС с корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН [4]. Система использовала в качестве объектов слежения изображения достаточно контрастные солнечные пятна. В 2003 г. после усовершенствования системы регистрации изображения (замены видеокамеры с 8-разрядным АЦП видеокамерой с 12-разрядным АЦП) АОС показала хорошие результаты, когда объектами слежения являлись участки изображения с небольшой порой, контраст которой был не ниже 10 %. Технологические особенности ПЗС-матрицы видеокамеры не позволили получить такие же результаты при работе с фрагментом грануляционной картины. Уже тогда возникла необходимость усовершенствовать не только приборную часть датчика волнового фронта, но и корреляционный алгоритм. На основе анализа данных, записанных во время экспедиции 2004 года, разработан модифицированный корреляционный алгоритм [5], который был опробован при измерениях смещения изображения солнечной грануляции, записанных в виде фильмов.

Цель предлагаемой работы – показать, что созданный алгоритм модифицированного корреляционного датчика (МКД) обеспечивает работу адаптивной системы в условиях реального эксперимента 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 АОС также снижает контраст грануляционной картины. Известный метод выравнивания освещенности по полю изображения при работе АОС со слабоконтрастным изображением требует предварительных точных измерений интенсивности поля. В [5, 8] был опробован более оперативный, на наш взгляд, метод фильтрации в области пространственных частот регистрируемых изображений. При правильном выборе параметров фильтрующей функции этот метод может позволить убрать неравномерность освещенности изображения, созданную формирующей изображение 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 использован модифицированный алгоритм быстрого преобразования Фурье [7] для вычисления взаимной корреляции

ляционной функции распределения интенсивности в плоскости изображения. Предлагается принципиально новый алгоритм для модифицированного датчика смещения, который фактически отличается от традиционного корреляционного измерителя смещения тем, что исходное распределение интенсивности измеренного изображения предварительно фильтруется путем умножения в области пространственных частот k_x, k_y на следующую фильтрующую функцию:

$$H_B(k_x, k_y) = \exp \{-a[(k_x - k_{x0})^2 + (k_y - k_{y0})^2]\}.$$

Здесь k_{x0}, k_{y0}, a – параметры данной фильтрующей функции. Следует отметить, что эти параметры функции $H_B(k_x, k_y)$ подбираются исходя из условий эксперимента таким образом, чтобы обеспечить необходимую остроту максимума взаимной корреляционной функции. В результате наш модифицированный корреляционный датчик смещения отличается от традиционного корреляционного датчика смещения изображения тем, что в МКД производится вычисление взаимной корреляционной функции распределения интенсивности изображений для опорного и текущего кадров, предварительно отфильтрованных функцией $H_B(k_x, k_y)$.

Испытания корреляционного датчика с модифицированным корреляционным алгоритмом измерения дрожания изображения проводились на БСВТ в сентябре 2005 года. Схема датчика представлена на рис. 1. Корреляционный датчик смещения изображения выводил результаты в реальном 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. Режим регистрации предназначен для записи видеосигнала в память компьютера для дальнейшей обработки. Последовательность кадров 128×128 пикселей (каждый в формате 16 бит/пик-

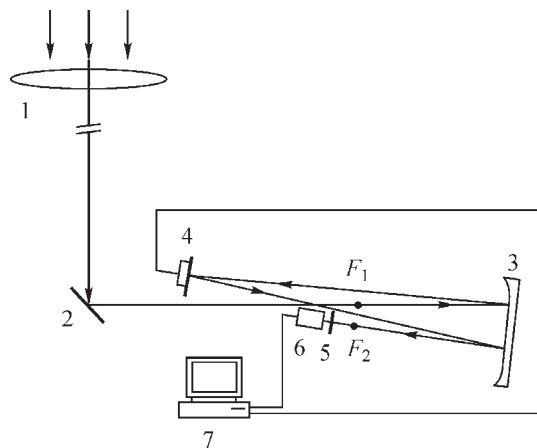


Рис. 1. Схема размещения элементов адаптивной оптики в солнечном телескопе: 1 – объектив БСВТ ($D = 760$ мм, $F = 40$ м); 2 – диагональное зеркало; 3 – сферическое зеркало ($F = 4$ м); 4 – управляемое зеркало; 5 – светофильтры; 6 – видеокамера DALSTAR (128×128 элементов, 12-разрядное АЦП, 490 кадр./с);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

сель) записывалась сначала в оперативную память компьютера, а затем на жесткий диск.

Предполагается, что в процессе реального функционирования АОС новый МКД работает с изображением, формируемым вблизи второго фокуса F_2 (см. рис. 1). Были проведены испытания МКД, в которых измерения смещения изображения осуществлялись как во втором, так и в первом фокусе телескопа. Это вызвано необходимостью проверки работоспособности модифицированного алгоритма при использовании изображения солнечной поверхности, содержащего объекты с различным контрастом и с различной степенью зашумленности.

Испытания проводились по следующей методике. Настройкой оптической схемы выбирался фрагмент изображения солнечной грануляции, с которым должен работать МКД. На основе анализа выбранного фрагмента определялись характерные размеры структуры изображения и выбирались параметры фильтрующей функции, которые вводились в программу управления. Проверяться работа МКД с выбранным фрагментом изображения. При этом в реальном масштабе времени на экране монитора в соседних окнах осуществлялся текущий просмотр и анализ вида взаимной корреляционной функции и смещающегося фрагмента изображения. Если при выбранных параметрах фильтрующей функции корреляционная функция имела резко выраженный максимум, положение которого смещалось вслед за реальным смещением изображения, можно было заявлять о том, что обеспечивались измерения смещения выбранного фрагмента изображения. В процессе экспериментов создавались файлы измеренных смещений изображений, а также изображений опорного кадра и кадра, усредненного за время реализации. Для последующего анализа результатов экспериментов записывался фильм тех же фрагментов изображения поверхности Солнца. Измерения проводились как в первом, так и во втором фокусе телескопа. Если МКД работал с фрагментом изображения, формируемого во втором фокусе, то измерения смещения проводились в двух режимах: с замкнутым контуром управления и без управления.

Результаты испытаний МКД в первом фокусе телескопа. Модифицированный корреляционный датчик волнового фронта показал хорошие результаты при работе с фрагментами изображения солнечной грануляции с четко выраженной структурой при контрасте 1,2–2,0%. Использование МКД при измерении смещения изображений солнечной грануляции, записанных в фильме, позволяет оценить правильность подобранных параметров фильтрующей функции в измерениях смещения того же фрагмента в реальном эксперименте. Были выполнены измерения смещения изображения одного и того же фрагмента солнечной грануляции (рис. 2) в реальном времени (24.09.05, 17:17) (а) и в записанном фильме (24.09.05, 17:23) (б). Измерения проводились с использованием МКД, имеющего следующие параметры фильтрующей функции $H_B(k_x, k_y)$: нормированный параметр $a = 0,5$, характерный размер структуры $(1/k_{x0}, 1/k_{y0}) = 16$ пикселей. Окно анализа МКД 96×96 пикселей, что соответствует угловому размеру изображения примерно 20×20 угл. с.

При выбранных параметрах фильтрующей функции корреляционная функция имеет выраженный максимум, смещающийся вместе с изображением. Визуальная оценка смещения изображения по приведенным кадрам и сравнение с измеренными значениями показывают, что МКД следит за смещением изображения. Возможность менять параметры фильтрующей функ-

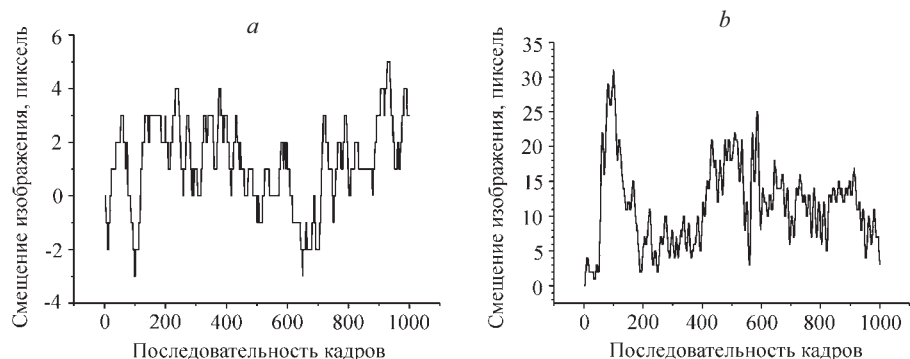


Рис. 2. Смещения фрагмента изображения солнечной грануляции, измеренные в реальном времени: смещения по оси X (а) и по оси Y (б). Длительность реализации 6,1 с (1000 кадров с экспозицией 2,04 мс через интервал 6,12 мс)

ции $H_B(k_x, k_y)$ МКД при измерении смещения изображения в одном и том же фильме позволяет проанализировать разброс измеренных значений смещения.

При сдвиге максимума фильтрующей функции на одну гармонику разброс измеренных значений лежит в интервале $[-1, 1]$ пикселей. Вероятно, для правильного измерения смещений необходимо обеспечить наибольшую возможную для выбранного фрагмента остроту и величину движущегося максимума взаимной корреляционной функции. В качестве параметра $(1/k_{x0}, 1/k_{y0})$ фильтра необходимо выбирать размер наиболее контрастных элементов структуры изображения, который 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 позволяет из дисперсии дрожания изображения оценить радиус когерентности, характеризующий атмосферную турбулентность. Для оценки радиуса когерентности были выбраны такие реализации, при которых инструментальные дрожания изображения, связанные с ветровыми колебаниями следящего (сидеростатного) зеркала солнечного телескопа, были минимальными или практически отсутствовали. Измерения проводились при слабом ветре (0,5 м/с) в направлении оси крепления сидеростатного зеркала.

Здесь надо пояснить, что БСВТ оснащен сидеростатным механизмом, отслеживающим движение Солнца на небесной сфере. Сидеростатом называют вспомогательный астрономический прибор с плоским зеркалом, которое движется так, чтобы лучи небесного светила, отраженные от зеркала, сохраняли одно и то же направление, несмотря на видимое суточное вращение небесной сферы. Таким образом, сидеростат служит для направления лучей небесного светила в неподвижный телескоп.

В качестве примера на рис. 3, а, б приведены опорный кадр и кадр, усредненный за время реализации (25.09.05, 09:59). В измерениях смещения изображения использовался МКД с параметрами фильтрующей функции $a = 0,5, (1/k_{x0}, 1/k_{y0}) = 16$ пикселей. Среднеквадратическое отклонение смещения изображения по оси X составило 3,47 пикселя (0,730 угл. с), по оси Y –

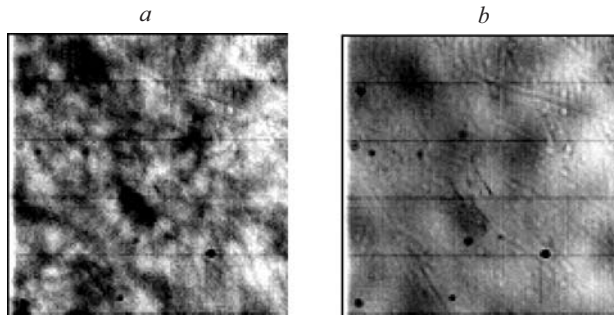


Рис. 3. Распределение интенсивности изображения: опорный (*a*) и усредненный (*b*) кадры за время реализации. Длительность реализации 50,12 с (8192 кадра с временем экспозиции кадра 2,04 мс)

3,52 пикселя (0,740 угл. с). Атмосферная турбулентность, вызывающая такие смещения изображения, характеризуется радиусом когерентности, равным 3,7 см (на длине волны $\lambda = 0,5$ мкм). Интересно, что оценка радиуса когерентности по формуле из [6], связывающей контраст грануляционной картины в телескопах с диаметром меньше 1 м и радиус когерентности, 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 МКД во втором фокусе. Испытания МКД во втором фокусе солнечного телескопа в составе АОС проводились 22.09.05 и 23.09.05. Структура изображения солнечной грануляции при полной входной апертуре и одинаковом угловом размере поля зрения датчика отличалась от изображения, с которым работал МКД в первом фокусе телескопа. Изображения, полученные во втором фокусе телескопа, показаны на рис. 4.

Анализ фильмов, записанных во втором фокусе, показал, 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. 4, *b, d*). В реальном эксперименте в процессе стабилизации фрагмента изображения структура его также изменяется: в отдельные моменты времени наиболее выражены либо крупные, либо мелкие элементы структуры. АОС работает нестабильно. Результаты испытаний показали, что для этого случая адаптивная система пытается следить за крупными масштабами. Появление

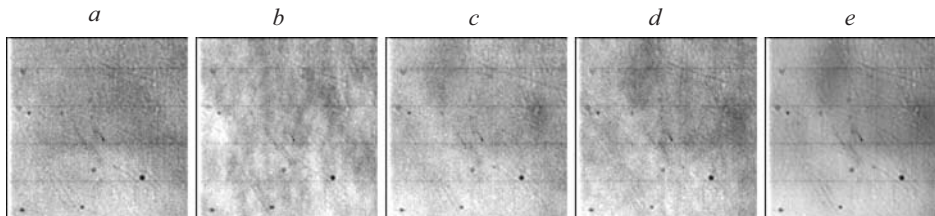


Рис. 4. Примеры типичных измеренных изображений солнечной гранулярности: опорные кадры реальных измерений (*a, b*); 1-й и 232-й кадры из фильма (*c, d*); изображение, усредненное по 1000 кадрам фильма, взятым с частотой 490 кадр./с (*e*)

Опции, пиксель	Смещение изображения при разомкнутом контуре управления	Смещение изображения при стабилизации
Среднее значение	-0,822	0,002
Среднеквадратическое отклонение	1,64	0,61
Минимальное значение	-5	-2
Максимальное значение	2	2

мелких масштабов распределения освещенности регистрируемых кадров приводит к срыву слежения.

В таблице приведены среднеквадратические отклонения смещений изображения представленных выше реализаций, из которых путем сравнения можно оценить эффективность стабилизации фрагмента изображения во втором фокусе.

Испытания МКД при различных диаметрах входной апертуры телескопа. Развитие АОС на БСВТ предполагает создание системы, корректирующей не только общие наклоны волнового фронта, но и aberrации 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 диафрагмой, помещенной перед объективом телескопа в центре либо на краю объектива. Анализировались качество изображения солнечной грануляции во втором фокусе и результаты измерений смещения изображения МКД.

При уменьшении диаметра входной апертуры до 170 мм качество изображения солнечной грануляции во втором фокусе меняется незначительно. В записанных нами реализациях (1000 кадров с временем экспозиции 2,04 мс) наблюдается в основном крупномасштабная изменяющаяся структура изображения, четко выраженная мелкая структура солнечной гранулярности про-

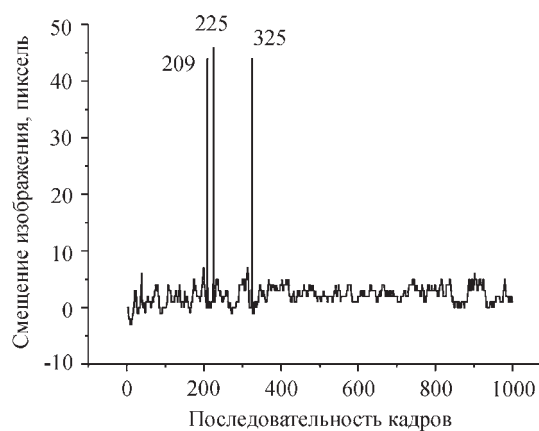


Рис. 5. Смещение изображения в фильме 23.09.05 (13:12) при размере диафрагмы 220 мм

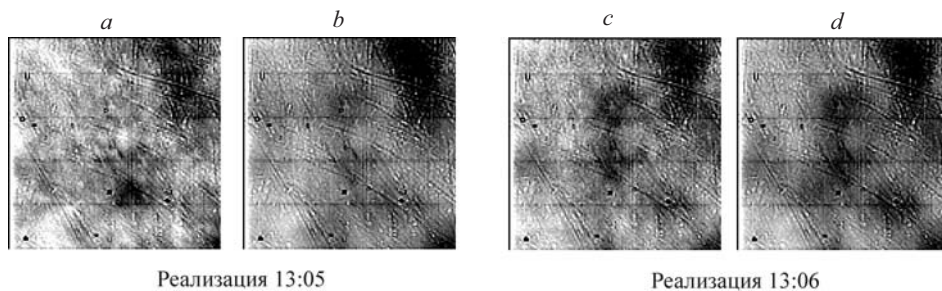


Рис. 6. Измеренные фрагменты изображения поверхности Солнца: опорные (*a, c*) и средние (*b, d*) кадры

является лишь на отдельных кадрах. В фильме, записанном при диаметре диафрагмы 220 мм, ясно видно, что при появлении кадров со структурой изображения, отличающейся от структуры опорного кадра, МКД работает нестабильно, происходят выбросы (рис. 5). При этом в МКД использовалась фильтрующая функция с такими же параметрами, как и при полной апертуре.

При стабилизации изображения (рис. 6) 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 продолжает расти (интегральный закон управления), система не выходит на режим стабилизации. Такая ситуация проявилась в реальных измерениях (13:05). В следующей реализации (13:06) структура изображения менялась незначительно: ошибка измерения стала меньше и стабилизация изображения – лучше.

Заключение. 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 МКД измеряет смещение изображения во втором фокусе только при высоком качестве изображения солнечной грануляции (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 АОС размещены вне вакуумной трубы телескопа на голографическом столе в помещении с 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). 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 АОС на БСВТ, корректирующей изображение солнечной грануляции, необходимо принять меры по обеспечению высокого качества оптической системы, переносящей изображение во второй фокус.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rimmele T. R.** Adaptive optical systems technology // Proc. SPIE. 2000. **4007**. P. 218.
2. **Лукин В. П.** Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере // УФН. 2006. **176**, № 9. С. 1000.
3. **Von der Lühe O., Widener A. L., Rimmele Th. et al.** Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes // Astron. and Astrophys. 1989. **224**. P. 351.
4. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения // Оптика атмосферы и океана. 2002. **15**, № 11. С. 1027.
5. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком // Оптика атмосферы и океана. 2005. **18**, № 12. С. 1077.
6. **Ricort G., Aime C.** Correlation image motion tracker // Astron. and Astrophys. 1979. **76**, N 3. P. 324.
7. **Ricort G., Aime C., Roddier C., Borgnino J.** Adaptive optics for solar telescopes // Solar Phys. 1981. **69**. P. 223.
8. **Лукин В. П., Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н. и др.** Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа // Оптический журнал. 2006. **73**, № 3. С. 55.
9. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Пьезоэлектрический привод для двухкоординатного управления угловым положением зеркала // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 1. С. 144.

Поступила в редакцию 7 мая 2007 г.
