

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.31; 681.7; 53.082.5

**Возможности применения адаптивной оптики
для солнечных телескопов**

**В.П. Лукин^{1,3}, В.М. Григорьев², Л.В. Антошкин¹, Н.Н. Ботыгина¹,
О.Н. Емалеев¹, П.А. Коняев¹, П.Г. Ковадло², В.В. Носов¹,
В.И. Скоморовский², А.В. Торгаев^{1*}**

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, а/я 4026

³Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 1.10.2008 г.

Обобщаются первые результаты применения адаптивной оптики на солнечном телескопе. Оптические эксперименты сопровождалась измерениями характеристик локального астроклимата вблизи Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ), на котором ведутся работы по применению адаптивной оптики. Наблюдения производились в июле 2005 при ясной солнечной погоде и практически полном отсутствии облачности. На основании данных метеоизмерений рассчитывались значения параметра локальной температурной стратификации – числа Монина–Обухова.

Испытания модифицированного корреляционного датчика (МКД) на БСВТ в Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН показали, что при правильном выборе параметров фильтрующей функции МКД обеспечивает надежные измерения смещения изображения солнечной грануляции в первом фокусе телескопа. В процессе рутинного использования адаптивной оптической системы МКД должен измерять смещение изображения во втором фокусе телескопа. Оказалось, что МКД измеряет смещение изображения солнечной грануляции во втором фокусе телескопа только при исключительно хороших условиях видения и при определенной структуре грануляции. Уменьшение входной апертуры телескопа до 170 мм только незначительно влияет на качество изображения и, следовательно, на работу МКД.

Ключевые слова: турбулентность, солнечная астрономия, Солнце, адаптивная оптика, датчик волнового фронта, гранулярность.

Введение

Для изучения физических процессов, происходящих в малых масштабах на Солнце, необходимы солнечные телескопы с высоким пространственным 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 составляют примерно 70 км. Чтобы разрешить эти фундаментальные масштабы, угловое разрешение телескопа должно быть лучше 0,1". Исследования таких явлений, как нагрев солнечной короны, солнечная активность и вариации

солнечной светимости, влияющих на климат Земли, требуют наблюдений микроструктуры магнитных полей солнечной атмосферы с угловым разрешением лучше 0,1". Для создания теоретических моделей солнечной атмосферы нужны параметры, которые можно получить при изучении поведения еще более мелких пространственных масштабов солнечной атмосферы.

Для улучшения пространственного разрешения действующих телескопов в их состав включают адаптивные оптические системы (АОС). По сравнению со звездными, АОС для солнечных телескопов технически более сложны, так как дневная турбулентность более жесткая, чем ночная, и быстрее меняется во времени. Кроме того, датчик волнового фронта должен работать с излучением видимого диапазона с использованием низкоконтрастных, протяженных, изменяющихся во времени объектов, таких как солнечная грануляция. Из-за нагрева поверхности прямым светом турбулентность у Земли значительно сильнее днем. Типичное значение радиуса Фрида $r_0 = 10$ см (на 500 нм) даже в лучших

* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Виктор Михайлович Григорьев; Леонид Владимирович Антошкин; Нина Николаевна Ботыгина; Олег Назарович Емалеев; Петр Алексеевич Коняев; Павел Гаврилович Ковадло; Виктор Викторович Носов; Валерий Иосифович Скоморовский; Андрей Валерьевич Торгаев.

местах и на высоте телескопа 20–40 м над Землей. 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 АОС требуют большого числа быстродействующих элементов коррекции, чем звездные [1–3].

1. Результаты измерений характеристик локального астроклимата вблизи Большого солнечного вакуумного телескопа

Применение АОС, в свою очередь, требует предварительных исследований особенностей дневной турбулентности, поэтому первым этапом проектирования любой адаптивной системы является кропотливое исследование условий оптических наблюдений в месте расположения астрономического инструмента. В данном разделе представлены результаты измерений характеристик локального астроклимата вблизи Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ). Этот телескоп был выбран в качестве полигона для отработки новых методов коррекции изображения. В этой связи возникает задача более пристального изучения дневного астроклимата данного региона. Здесь будут обсуждаться наблюдения, которые производились в июле 2005 г. при солнечной погоде и при практически полном отсутствии облачности. Измерения проводились на площадке вблизи БСВТ с восточной стороны и на верхней площадке вблизи купола и зеркала телескопа. Также были произведены измерения высотных профилей вдоль стен башни телескопа БСВТ от уровня земли до высоты 25 м с северного, западного и восточного направлений.

1.1. Измерительная аппаратура

Для измерений использовалась мобильная ультразвуковая метеосистема «Метео-2М», разработанная в Институте оптики атмосферы СО РАН [4]. В результате измерений и их обработки определялись следующие параметры воздушных потоков: средняя температура $\langle T \rangle$, структурная характеристика показателя преломления C_n^2 , структурная характеристика температуры C_T^2 , средняя скорость горизонтального ветра V , средняя скорость вертикального ветра W , среднее направление горизонтального ветра, масштаб Монина–Обухова L . На основании этих параметров рассчитывалось значение параметра локальной температурной стратификации (числа Монина–Обухова) $\zeta = h/L$ (здесь h – высота точки наблюдения от подстилающей поверхности).

При измерениях турбулентных параметров время осреднения, как известно, должно выбирать-

ся из условия, чтобы масштаб длины осредненного турбулентного течения (средняя скорость ветра, умноженная на время осреднения) существенно превышал внешний масштаб турбулентности по направлению среднего течения (или время осреднения должно существенно превышать характерный временной масштаб корреляции изучаемого поля). При этих условиях временные средние значения измеряемых параметров будут статистически устойчивыми.

Измерения в приземном слое над ровной поверхностью обычно производят со временем осреднения не менее 100 с. Соответствующий этому времени масштаб длины для скорости ветра 1–10 м/с составляет 0,1–1 км и практически всегда превышает внешний масштаб турбулентности.

В случае неровной поверхности продольный внешний масштаб турбулентности в нижнем приземном слое будет, очевидно, определяться характерным расстоянием между неровностями или неоднородностями поверхности. Для горного рельефа с неоднородной поверхностью такое приповерхностное расстояние невелико и может быть оценено десятками метров. Следовательно, и для неровной поверхности измерения в приземном слое можно проводить со временем осреднения также около 100 с.

Относительная погрешность измерений структурных характеристик C_T^2 , C_n^2 , C_V^2 определяется, в первую очередь, чувствительностью прибора и уменьшается с увеличением средней скорости ветра, времени осреднения и самих значений структурных характеристик [4]. Так, например, в условиях относительно слабой турбулентности ($C_n^2 = 5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$) при времени осреднения 2 мин и средней скорости ветра 0,5–10 м/с относительная погрешность измерений величины C_n^2 находится в диапазоне 0,4–14% (0,4; 7 и 14% – соответственно для скорости ветра 10; 1 и 0,5 м/с). С такими же ошибками измеряются и характеристики C_T^2 , C_V^2 . По этим данным рассчитывались [5–8] скорости диссипации кинетической энергии ϵ и температуры N , соответствующие закону Колмогорова–Обухова. Поэтому относительная погрешность измерений ϵ (N) практически является суммой погрешностей C_V^2 и постоянной Колмогорова (C_T^2) и постоянной Обухова (C_θ).

1.2. Результаты измерений характеристик локального астроклимата

В табл. 1 приведены результаты регистрации высотных профилей метеопараметров вдоль башни Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. Профили наблюдались вдоль трех сторон башни телескопа: северной, западной, восточной. Измерения производились на расстоянии примерно 1,5 м от стен, расстояние между точками наблюдения по высоте составляло приблизительно 2 м.

Таблица 1

Высотные профили метеопараметров вдоль башни БСВТ (26.07.05)

h , м	$\langle T \rangle$, °C	C_n^2 , см ^{-2/3}	C_T^2 , град/см ^{2/3}	V , м/с	W , м/с	L , м	$\zeta = h/L$
14:40–15:35; северная сторона							
1,8	17,86	$8,21 \cdot 10^{-15}$	$10,51 \cdot 10^{-3}$	0,43	0,74	18,38	0,098
3,8	19,75	$2,20 \cdot 10^{-15}$	$28,98 \cdot 10^{-3}$	1,21	0,15	832,6	0,0046
5,8	19,92	$12,35 \cdot 10^{-15}$	$16,31 \cdot 10^{-3}$	1,68	0,52	-516,2	-0,01
7,8	19,85	$15,24 \cdot 10^{-15}$	$20,11 \cdot 10^{-3}$	2,93	0,49	-156,5	-0,05
9,8	19,76	$14,25 \cdot 10^{-15}$	$18,79 \cdot 10^{-3}$	3,62	0,49	-371,2	-0,026
11,8	19,5	$13,16 \cdot 10^{-15}$	$17,3 \cdot 10^{-3}$	3,11	0,34	-104,3	-0,11
13,8	19,81	$12,73 \cdot 10^{-15}$	$16,82 \cdot 10^{-3}$	3,44	0,64	-45,48	-0,3
15,8	20,02	$19,06 \cdot 10^{-15}$	$25,27 \cdot 10^{-3}$	1,85	0,42	-303,8	-0,05
17,8	20,2	$13,55 \cdot 10^{-15}$	$18,03 \cdot 10^{-3}$	1,73	0,73	-224,4	-0,08
19,8	20,44	$34,01 \cdot 10^{-15}$	$45,4 \cdot 10^{-3}$	1,07	0,49	16580	0,001
22,1	20,69	$20,92 \cdot 10^{-15}$	$28,04 \cdot 10^{-3}$	1,25	1,31	2212	0,01
15:45–16:40; западная сторона							
2,0	21,7	$11,88 \cdot 10^{-15}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1,92	1,56	-0,348	-5,75
3,0	21,27	$7,87 \cdot 10^{-15}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	0,77	0,67	-60,2	-0,05
5,0	20,66	$8,37 \cdot 10^{-15}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	1,04	1,36	-34,87	-0,14
7,0	20,37	$9,97 \cdot 10^{-15}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	0,83	1,63	-581,5	-0,01
9,0	20,91	$7,05 \cdot 10^{-15}$	$0,95 \cdot 10^{-2}$	1,12	1,45	-205,5	-0,04
11,0	21,02	$6,43 \cdot 10^{-15}$	$0,86 \cdot 10^{-2}$	1,2	1,34	-122,7	-0,09
13,0	20,89	$6,64 \cdot 10^{-15}$	$0,89 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,99	-8,3	-1,57
15,0	20,77	$5,93 \cdot 10^{-15}$	$0,79 \cdot 10^{-2}$	0,35	1,45	-52,23	-0,72
17,0	20,66	$6 \cdot 10^{-15}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	0,12	1,69	-35,86	-0,47
19,0	21,23	$4,39 \cdot 10^{-15}$	$0,59 \cdot 10^{-2}$	0,82	1,28	-1,32	-14,39
21,4	21,28	$18,11 \cdot 10^{-15}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,3	-1510	-0,01
17:00–17:40; восточная сторона							
1,8	21,24	$6,87 \cdot 10^{-15}$	$9,24 \cdot 10^{-3}$	1,31	-1,61	4375	0,04
2,6	21,62	$4,6 \cdot 10^{-15}$	$6,23 \cdot 10^{-3}$	1,26	-1,86	-169,2	-0,02
4,6	21,55	$3,05 \cdot 10^{-15}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$	2,17	-1,45	-329,2	-0,01
6,6	20,91	$2,58 \cdot 10^{-15}$	$3,46 \cdot 10^{-3}$	2,53	-1,32	-5,52	-1,2
8,6	20,88	$2,88 \cdot 10^{-15}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$	2,6	-0,63	-8703	-0,001
10,6	20,31	$2,52 \cdot 10^{-15}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	2,44	-0,99	-1233	-0,009
12,6	20,5	$3,07 \cdot 10^{-15}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	3,03	-0,72	-1143	-0,01
14,6	20,52	$3,76 \cdot 10^{-15}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	2,53	-0,61	-56,97	-0,26
16,6	21,5	$3,66 \cdot 10^{-15}$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	2,61	-0,5	-5001	-0,003
18,6	21,14	$3,41 \cdot 10^{-15}$	$4,59 \cdot 10^{-3}$	1,61	0,81	-958	-0,02
20,9	20,45	$2,8 \cdot 10^{-15}$	$3,74 \cdot 10^{-3}$	5,53	2,93	-90,61	-0,23

Как видно из этих данных, значения вертикальной составляющей ветра W на северной и западной сторонах в основном положительны, а на восточной — отрицательны. Следовательно, устойчивое вихревое образование вблизи башни БСВТ на северной и западной сторонах имеет линии тока, направленные в основном вдоль башни вверх. На востоке же, наоборот, линии тока направлены вдоль башни вниз. Это означает, что локальная пространственная область, внутри которой находится телескоп, на севере и западе испытывает вертикальное растяжение ветровыми потоками (вертикальные размеры области увеличиваются), а на востоке — вертикальное сжатие (вертикальные размеры области уменьшаются).

На рис. 1–3 приведены измеренные профили средней температуры $\langle T \rangle$, структурной характеристики показателя преломления C_n^2 и числа Монина–Обухова ζ для трех сторон башни БСВТ. Пунктирные кривые на рис. 1 и 2 соответствуют применению теории подобия для плоской подстилающей поверхности (это сделано в работе [8]).

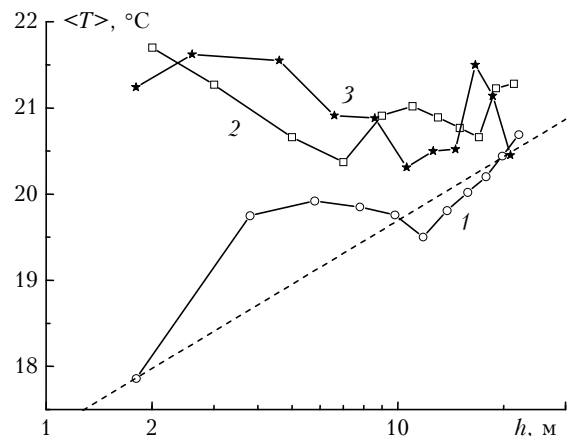


Рис. 1. Высотные профили средней температуры с различных сторон башни БСВТ. Расстояние от стенок башни 1,5 м, наблюдения до высоты 25 м. Измерения 26.07.05, время местное 14:40–17:40. Стабильно открытое Солнце. 1 — северная сторона, 2 — западная сторона, 3 — восточная сторона. Пунктир — теория подобия плоской подстилающей поверхности $\langle T(h) \rangle = T^* \ln(h/h_0) + T(h_0)$ (для северной кривой $T^* = 1,15$ °C; $h_0 = 1,8$ м; $T(h_0) = 17,86$ °C)

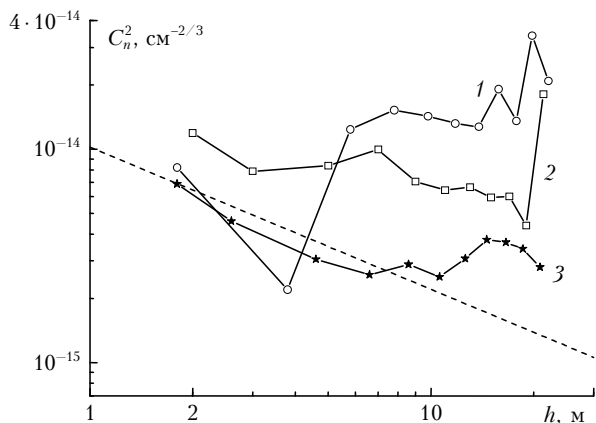


Рис. 2. Высотные профили структурной характеристики C_n^2 с различных сторон башни БСВТ. Расстояние от стен башни 1,5 м, наблюдения до высоты 25 м. Измерения 26.07.05, время местное 14:40–17:40. Стабильно открытое Солнце. 1 – северная сторона, 2 – западная сторона, 3 – восточная сторона. Пунктир – теория подобия плоской подстилающей поверхности $C_n^2 = C_n^2(h_0) (h/h_0)^{-2/3}$ (для восточной кривой $C_n^2(h_0) = 6,9 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$, $h_0 = 1,8 \text{ м}$)

Из рис. 1 и 2 видно, что высотные профили как средней температуры, так и структурной характеристики показателя преломления не совпадают с результатами теории подобия для плоской подстилающей поверхности. В соответствии с этой теорией средняя температура с высотой должна расти, а структурная характеристика C_n^2 – убывать. Кроме того, для плоской подстилающей поверхности масштаб Монина–Обухова L (или толщина подслоя динамической турбулентности) является константой. Следовательно, число Монина–Обухова $\zeta = h/L$ должно линейно расти с высотой h . Однако, как видно из рис. 3, в наших измерениях число ζ практически постоянно. Это означает, что сам масштаб Монина–Обухова L растет с высотой. Наблюдаются также значительные осцилляции числа ζ .

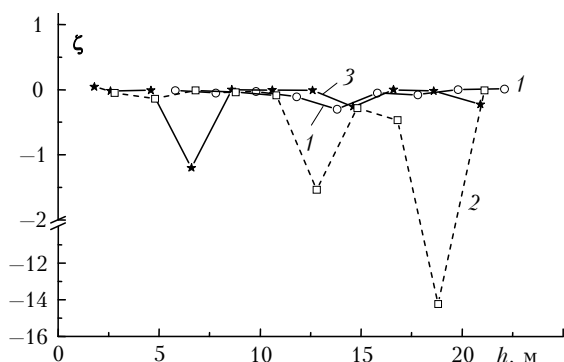


Рис. 3. Высотные профили числа Монина–Обухова с различных сторон башни БСВТ. Расстояние от стен башни 1,5 м, наблюдения до высоты 25 м. Измерения 26.07.05, время местное 14:40–17:40. Стабильно открытое Солнце. 1 – северная сторона, 2 – западная сторона, 3 – восточная сторона

Данные измерений высотных профилей $\langle T \rangle$, C_n^2 , ζ (см. рис. 1–3) можно объяснить, используя

точные аналитические решения краевых задач для существующих уравнений турбулентной диффузии [5–8]. В этих работах показано, что в плоскопараллельных турбулентных течениях над нагретым (охлажденным) локальным участком граничной поверхности возникает нагретая (охлажденная) пространственная область, представляющая собой полусферу или конус, искаженный средним течением. Внутри такой полусферы выполняются все теоретические положения, справедливые для изотропного пограничного слоя теории подобия Монина–Обухова. Из точных решений уравнений турбулентной диффузии следует, что для периодических температурных неоднородностей подстилающей поверхности некоторые характеристики турбулентности осциллируют с увеличением высоты наблюдения. Периоды этих осцилляций связаны с периодами неоднородностей подстилающей поверхности.

Как известно, площадка с расположенным на ней БСВТ, на котором проводились испытания АОС, покрыта слоем белой мраморной крошки. Из-за отражения от нее части солнечного излучения вблизи БСВТ возникает переохлажденный участок поверхности, над которым приповерхностные значения турбулентных характеристик, например C_n^2 , в среднем меньше, чем на поверхности без крошки. Поэтому можно говорить о появлении охлажденной пространственной области в виде полусферы. Сам телескоп оказывается внутри этой полусферы, в которой выполняется положение теории подобия Монина–Обухова. На границе полусферы характеристики турбулентности должны «сшиваться» со значениями, соответствующими окружающему пространству, которые были бы, если бы переохлажденный участок поверхности отсутствовал. Значения C_n^2 на границе полусферы больше, чем вблизи подстилающей поверхности внутри полусферы, поэтому внутри нее значения C_n^2 с ростом высоты вначале убывают (в соответствии с теорией подобия), а затем растут, чтобы совпасть с большими значениями на границе.

При таком поведении структурной характеристики естественно появляется минимум на некоторой промежуточной высоте внутри полусферы. Чем больше разница между значениями C_n^2 вблизи подстилающей поверхности внутри полусферы и на ее границах, тем меньше проявляется участок действия теории подобия. Этот участок все более приближается к подстилающей поверхности, и значения C_n^2 в минимуме мало отличаются от приповерхностных. Вне полусферы профиль C_n^2 будет совпадать со своими значениями, которые были бы, если бы переохлажденный участок отсутствовал. Эти значения, в соответствии с теорией подобия, убывают с ростом высоты.

Таким образом, наличие переохлажденного участка приводит к тому, что профиль C_n^2 над ним с увеличением высоты вначале убывает, достигая минимума, затем растет, достигая максимума, затем

вновь убывает. Поэтому должен наблюдаться осциллирующий характер поведения профиля C_n^2 . Осцилляции тогда наиболее ярко выражены, когда велика разница между значениями C_n^2 вблизи подстилающей поверхности внутри полусферы и на ее границах, т.е. при сильном переохлаждении участка поверхности.

Из рис. 2 видно, что профиль C_n^2 на восточной стороне башни имеет, как правило, и минимум, и максимум. Высота, на которой значение C_n^2 максимально, соответствует верхней границе полусферы с восточной стороны. Вследствие искажений этой полусферы воздушными потоками ее высота с восточной стороны меньше, чем с северной и западной сторон. Поэтому северные и западные высотные профили C_n^2 , имея промежуточные минимумы, в среднем растут с высотой, чтобы сравняться со значениями на границе. В соответствии с рассмотренными теоретическими положениями, наличие осцилляций профилей $\langle T \rangle$, C_n^2 , ζ (см. рис. 1–3) можно объяснить присутствием периодических неоднородностей подстилающей поверхности вблизи телескопа по радиальной координате.

Несмотря на то что атмосферный участок, прилегающий к самому телескопу, составляет малую долю от всей длины атмосферной трассы, которая имеет место при наблюдении Солнца, он будет иметь определенное влияние на качество формируемого изображения [9–12]. Так, известно, что при исследовании Солнца, как правило, рекомендуют проводить наблюдения при малых зенитных углах положения Солнца, т.е. когда влияние приземного слоя атмосферы минимально. Это в первую очередь связано с тем, что именно эта часть турбулентного слоя обладает наибольшим действием.

Безусловно, эти особенности поведения метеопараметров вблизи БСВТ необходимо учитывать при проектировании АОС, и особенно ее главных элементов – гибкого зеркала и датчика волнового фронта. Знание турбулентности региона позволяет определить требуемый динамический диапазон измерений для датчика волнового фронта и задать диапазон управления в гибком зеркале. Кроме того, отклонения от классических законов поведения самой турбулентности [8] могут существенно изменить качество прогноза достижимого уровня коррекции. А самое главное – то, что знание особенностей турбулентности позволяет существенно увеличить эффективность адаптивной коррекции путем развития алгоритмов коррекции.

2. Результаты испытания адаптивной оптической системы с модифицированным корреляционным датчиком на БСВТ

В данном разделе приводятся результаты испытания модифицированного корреляционного датчика (МКД) в экспериментальной схеме на БСВТ. Известно, что в настоящее время основной пробле-

мой при построении макетов АОС для солнечных телескопов является создание датчика волнового фронта. Датчик, который применяется в звездных адаптивных системах, не может использоваться для солнечных АОС, так как Солнце является протяженным объектом и объекты, которые могут использоваться как опорные звезды (натуральные или лазерные) для ночных АОС [13, 14], здесь не применимы.

Солнечные АОС в качестве объектов слежения структуры на поверхности солнечного диска могут использовать: солнечные пятна, поры и солнечную грануляцию. Солнечная грануляция, в частности, – проблемная цель для слежения, так как грануляционная картина имеет низкий контраст и меняется во временных масштабах порядка нескольких минут.

2.1. Краткая история развития солнечных АОС

История развития солнечных АОС на начальных этапах ее становления достаточно подробно изложена в работе Rimmele [1]. Первые эксперименты по солнечным АОС были проведены Харди в 1979 г. на телескопе VTT (Vacuum Tower Telescope) на Сакраменто Пик. В качестве датчика волнового фронта в эксперименте тогда использовался сдвиговый интерферометр. Предполагалось, что система сможет работать как с яркими звездами, так и с солнечными пятнами. В действительности же тогда АОС продемонстрировала улучшение качества изображения звезды, но не улучшила изображение солнечного пятна. В то же время наша первая система, работающая с использованием простейшего координатного датчика положения, дала серьезный положительный результат [13].

Следующим этапом в развитии солнечных АОС явилось создание корреляционных датчиков волнового фронта, позволяющих использовать в качестве объекта слежения фрагмент солнечной грануляции [2, 3, 11–14]. Включение АОС 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) (в обсерватории на о. La Palma) с апертурой 97 см с помощью АОС и *постдетекторной обработки* получены изображения грануляции около солнечного пятна с разрешением 0,1" (70 км).

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 испытания АОС с корреляционным датчиком на БСВТ [13]. В качестве объектов слежения система использовала изображения достаточно контрастных солнечных пятен. В 2003 г. после усовершенствования системы регистрации изображения, путем замены видеокамеры с 8-разрядным АЦП на видеокамеру

с 12-разрядным АЦП, АОС показала хорошие результаты, когда в качестве объекта слежения использовались участки изображения с небольшой порой, контраст которой был не ниже 10%. Но тогда же технологические особенности ПЗС-матрицы видеокамеры «Dalsa» 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 разработан модифицированный корреляционный алгоритм [14–16], который опробован на измерениях смещения изображения солнечной грануляции в фильмах. Правильность измерений смещения модифицированным корреляционным датчиком проверялась путем сравнения с измерениями смещений традиционным корреляционным датчиком таких фрагментов изображения, с которыми хорошо работает традиционный корреляционный алгоритм.

2.2. 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 [11, 12, 17, 18]. Перенос изображения с помощью дополнительных оптических элементов во второй фокус в реальных схемах солнечных телескопов с АОС также снижает контраст грануляционной картины. Отсюда особые требования к системам регистрации изображения и измерителям смещения. Известный метод выравнивания освещенности по полю изображения при работе АОС со слабоконтрастным изображением требует предварительных точных измерений.

Нами был опробован [13, 16] более оперативный, на наш взгляд, метод фильтрации в области пространственных частот регистрируемых изображений. При правильном выборе параметров фильтрующей функции этот метод позволит 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 [15] для вычисления взаимной корреляционной функции $S(i, j)$ в точках с координатами (i, j) . Ниже приведены формулы, обеспечивающие вычисление взаимной корреляции:

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

$$C = F^- \{ F^+ [I] F^+ [I_R] \}, \quad (2)$$

$$C_m = F^- \{ F^+ [I] F^+ [I_R] \times_B (\kappa_x, \kappa_y) \}, \quad (3)$$

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

где $I(l, m)$ – текущая интенсивность в изображении фрагмента Солнца; $I_R(i, j)$ – интенсивность для опорного кадра, который записывается предварительно, но может обновляться в процессе работы; F^- , F^+ – операции вычисления обратного и прямого преобразования Фурье. Формулы (2), (3) показывают выражения для расчета взаимной корреляции с помощью метода Фурье при использовании традиционного и модифицированного алгоритмов. Модификация основывается на применении фильтра $H_B(a, \kappa_{x0}, \kappa_{y0})$, параметры которого подбираются, исходя из условий эксперимента, таким образом, чтобы обеспечить необходимую остроту максимума взаимной корреляционной функции.

Испытания корреляционного датчика с модифицированным корреляционным алгоритмом измерения дрожания изображения проводились на БСВТ в сентябре 2005 г. Схема установки представлена на рис. 4.

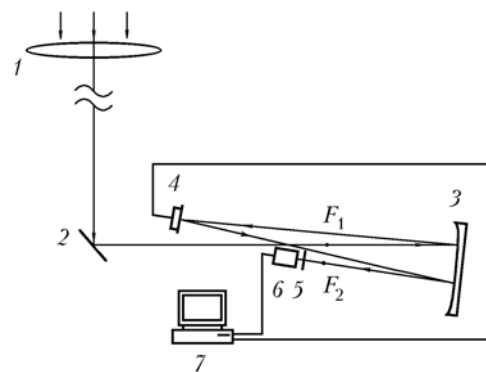


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – объектив телескопа БСВТ (диаметр 760 мм, длина фокуса 40 м); 2 – диагональное зеркало; 3 – сферическое зеркало ($F_{1,2} = 4$ м); 4 – управляемое зеркало; 5 – светофильтры; 6 – видеокамера «DALSTAR» (128 × 128 элементов, 12-разрядное АЦП, 490 кадр/с); 7 – 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 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 [16] для двухкоординатного управления угловым положением зеркала 4.

В реальной схеме АОС датчик МКД работает с изображением, формируемым вблизи второго фокуса F_2 (см. рис. 4). Поэтому 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 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 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 втором фокусе, измерения смещения проводились в двух режимах: с замкнутым контуром управления и без управления.

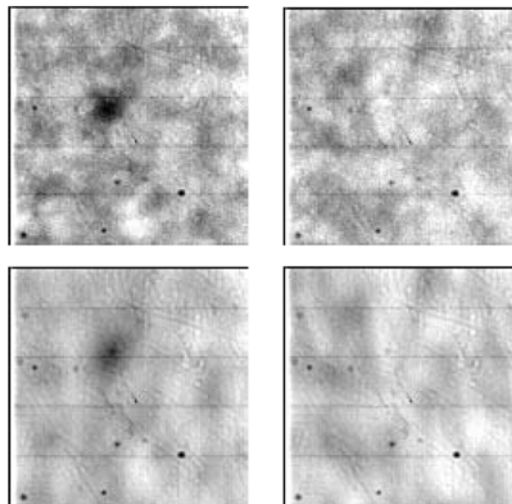
2.3. Результаты испытаний МКД в первом фокусе телескопа

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. 5).

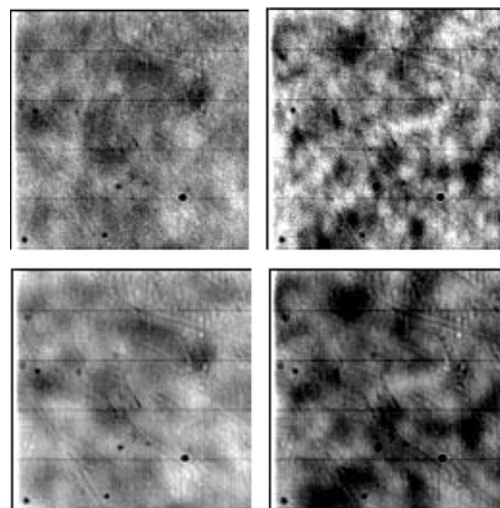
На рис. 6 показано сечение одного из приведенных изображений. Такие изображения солнечной грануляции были получены в эксперименте в первом фокусе телескопа при хороших условиях видения.

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) сме-

щения изображения одного и того же фрагмента солнечной грануляции приведены на рис. 7 и 8.



24.09.05



25.09.05

Рис. 5. Фрагменты изображения солнечной грануляции, полученные в первом фокусе при хороших погодных условиях 24.09.05 (слабый без порывов северный ветер $\sim 2\text{--}5$ м/с, безоблачное небо, метеорологическая дальность видимости $\sim 8\text{--}10$ км) и 25.09.05 в первой половине дня (ветер южный $0,5\text{--}1$ м/с, тонкая прослойка высоких перистых облаков, метеорологическая дальность видимости $\sim 8\text{--}10$ км). Угловой размер изображения 26×26 угл. с (128×128 пикселей). Угловое поле зрения датчика — 20×20 угл. с. (96×96 пикселей). Верхний ряд — изображения, полученные со временем экспозиции кадра 2,04 мс, нижний ряд — усредненные по 1000 кадрам, взятым через 6,12 мс

Измерения проводились МКД с одинаковыми параметрами фильтрующей функции H_B : нормированный параметр $a = 0,5$, характерный размер структуры ($l_0 = 16$ пикселей; окно анализа МКД — 96×96 пикселей, что соответствует угловому размеру изображения 20×20 угл. с).

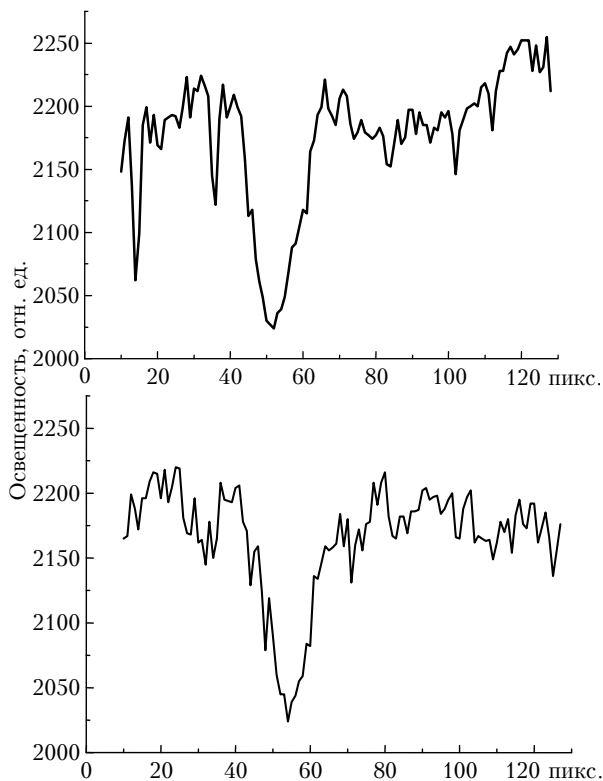


Рис. 6. Ортогональные сечения через изображение поры (рис. 5, а, верхний ряд). 1 пиксель = 0,21 угл. с

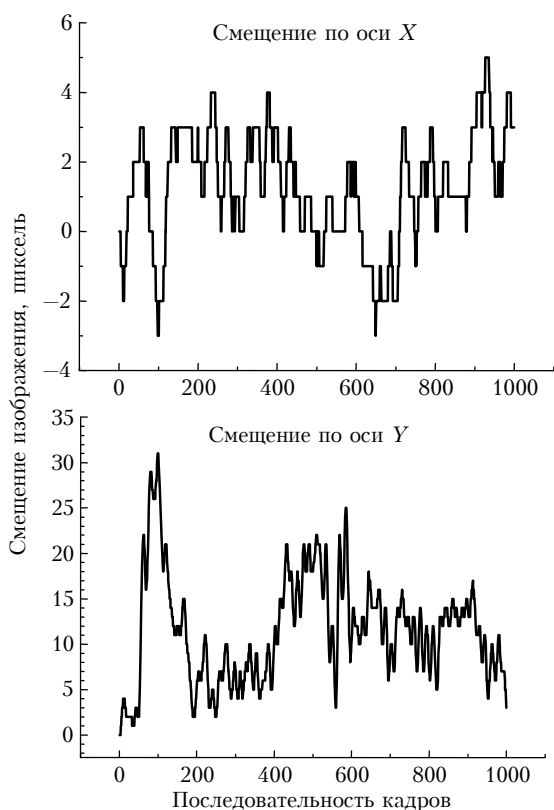


Рис. 7. Измеренные в реальном времени смещения фрагмента изображения солнечной грануляции. Длительность реализации — 6,1 с (1000 кадров с экспозицией 2,04 мс через интервал 6,12 мс)

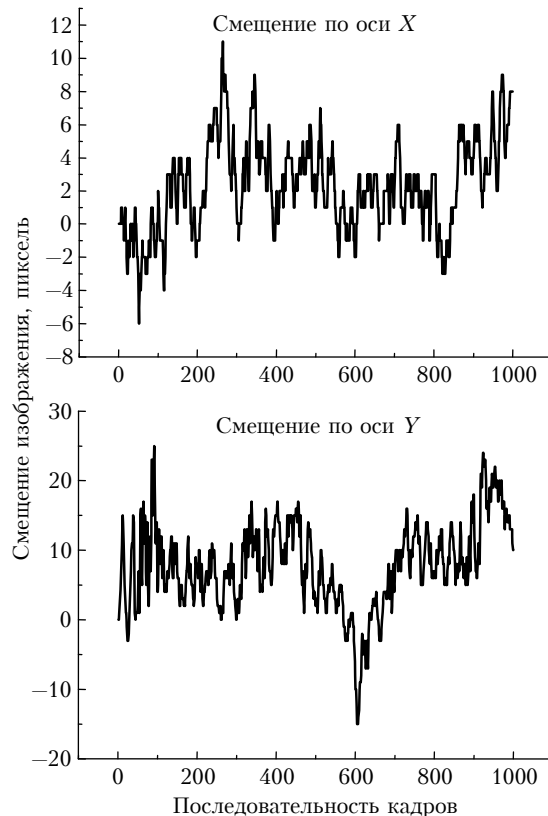


Рис. 8. Измеренные в фильме смещения фрагмента изображения солнечной грануляции. Длительность реализации — 17,5 с (1000 кадров с экспозицией 2,04 мс через интервал 17,47 мс)

При выбранных параметрах фильтрующей функции корреляционная функция имеет выраженный максимум, смещающийся вместе с изображением. Визуальная оценка смещения изображения по приведенным выше кадрам и сравнение с измеренными значениями показывают, что модифицированный корреляционный датчик следит за смещением изображения. Возможность менять параметры фильтрующей функции модифицированного корреляционного датчика при измерении смещения изображения в одном и том же фильме позволяет проанализировать разброс измеренных значений смещения при используемом критерии выбора параметров (рис. 9).

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 взаимной корреляционной функции.

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.

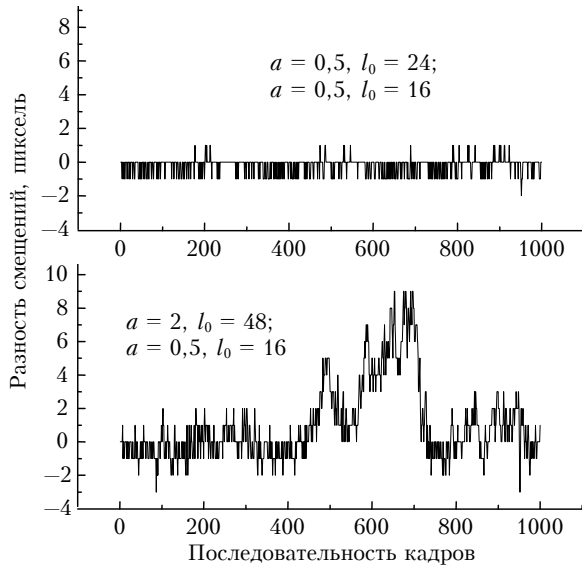


Рис. 9. Разность измеренных смещений изображения в фильме (24.09.05; 17:23) при двух парах параметров фильтрующей функции

Запись и обработка длинных реализаций смещения изображения позволяет 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 солнечного телескопа, практически отсутствовали. Измерения проводились при слабом ветре 0,5 м/с в направлении оси крепления сидерастатного зеркала.

В качестве примера на рис. 10 приведены опорный кадр и усредненный за время реализации (25.09.05; 09:59). В измерениях смещения изображения использовался модифицированный корреляционный датчик с параметрами фильтрующей функции H_B : $a = 0,5$, $l_0 = 16$ пикселей. В этих измерениях среднеквадратическое отклонение смещения

изображения по оси X составило 3,47 пикселя (0,730 угл.с), по оси Y – 3,52 пикселя (0,740 угл.с).

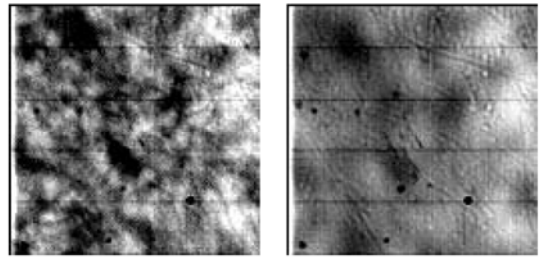


Рис. 10. Опорный кадр и усредненный за время реализации (25.09.05; 09:59). Длительность реализации 50,12 с (8192 кадра с временем экспозиции 2,04 мс)

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 [11], 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 1998–2005 гг.

2.4. Результаты испытания МКД во втором фокусе

Испытания МКД во втором фокусе в составе АОС проводились 22 и 23.09.05. Структура изображения солнечной грануляции (рис. 11) при полной входной апертуре при одинаковом угловом размере поля зрения датчика отличалась от изображения, с которым работал МКД в первом фокусе телескопа. На рис. 11 показаны изображения, полученные во втором фокусе.

Просмотр и 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. 11, б, з).

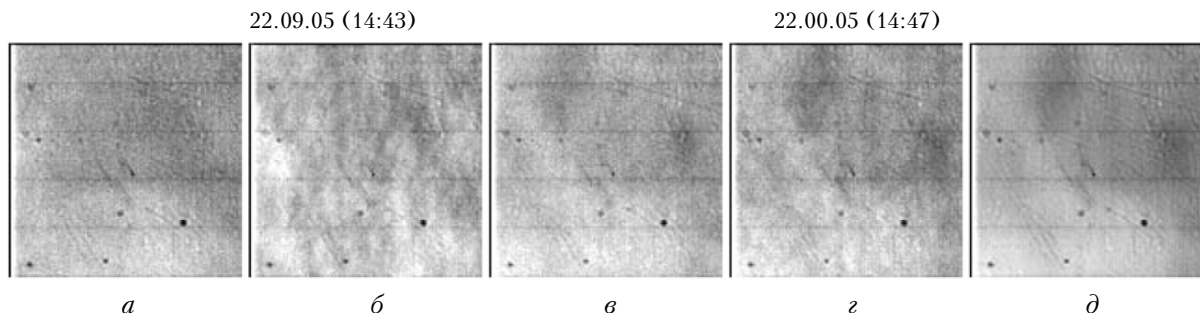


Рис. 11. Опорные кадры реальных измерений (а, б); 1-й и 232-й кадры из фильма (в, г); изображение, усредненное по 1000 кадрам фильма, взятым с частотой 490 кадр./с (д)

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.

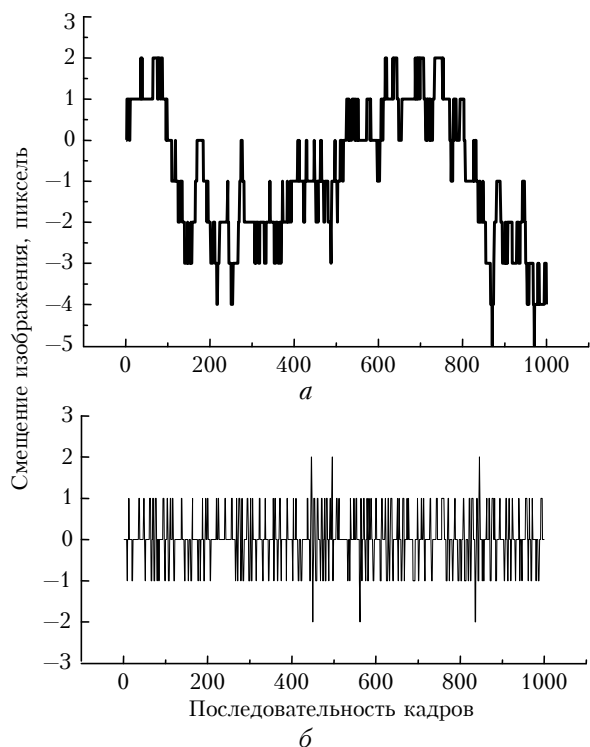


Рис. 12. Смещение изображения по оси X (22.09.05; 14:43) при разомкнутом (a) и при замкнутом (b) контуре управления при выделении крупных масштабов (параметры фильтрующей функции: $a = 1$, $l_0 = 32$ пикселям). 1 пиксель = 0,21 угл. с, длительность реализации 6,10 с (1000 кадров с временем экспозиции 2,04 мс через интервал времени 6,12 мс)

В приведенной на рис. 12 реализации адаптивная система пытается следить за крупными масштабами. Появление мелких масштабов распределения

освещенности регистрируемых кадров приводит к срыву слежения (выбросы в отдельных точках, рис. 12, б). В табл. 2 приведены среднеквадратические отклонения представленных выше реализаций, из которых можно оценить эффективность стабилизации фрагмента изображения во втором фокусе.

2.5. Испытания МКД при различных диаметрах входной апертуры телескопа

Развитие АОС на БСВТ предполагает создание системы, корректирующей не только общие наклоны волнового фронта, но и аберрации более высокого порядка. Такая система уже сейчас нами создана – это система «Ангара» [18]. В ней 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 с временем экспозиции 2,04 мс) наблюдается в основном крупномасштабная изменяющаяся структура изображения, четко выраженная мелкая структура проявляется лишь на отдельных кадрах (рис. 13).

В фильме, записанном при диаметре диафрагмы, равном 220 мм, видно, что при появлении кадров со структурой изображения, отличающейся от структуры опорного кадра, МКД дает выбросы. Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 14, 15.

Таблица 2

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

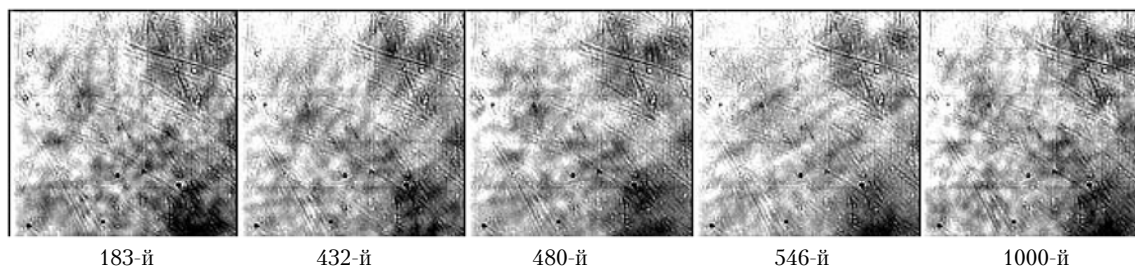


Рис. 13. Кадры с мелкой структурой изображения в фильме (23.09.05; 13:50) (диафрагма 170 мм в центре объектива телескопа)

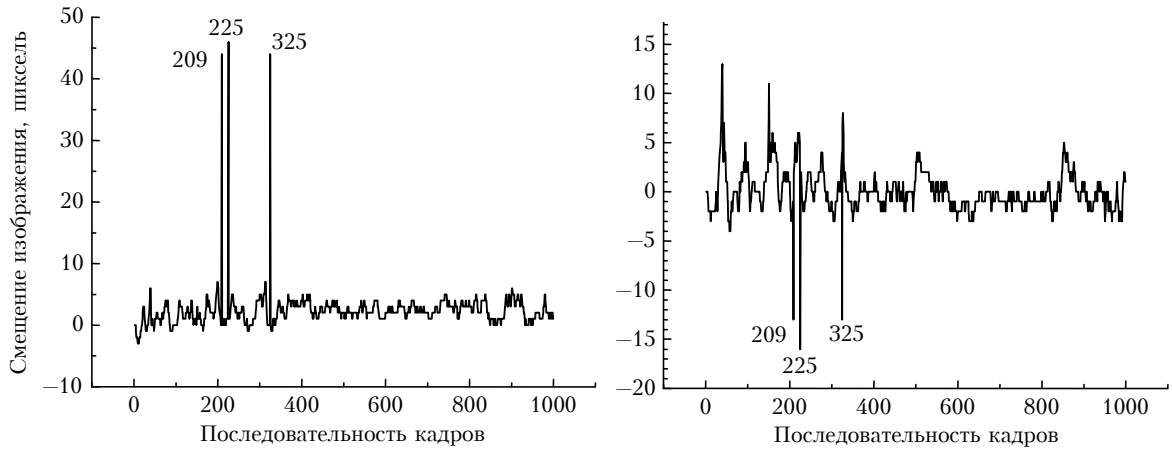


Рис. 14. Смещение изображения в фильме 23.09.05 (13:12) при диафрагме 220 мм на краю объектива телескопа (параметры фильтра: $a = 1$, $l_0 = 32$ пикселям)

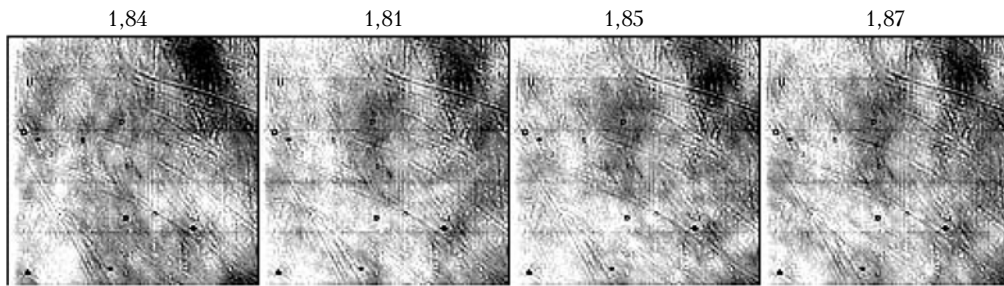


Рис. 15. Кадры фильма 23.09.05 (13:12); цифры сверху — контраст изображения, %

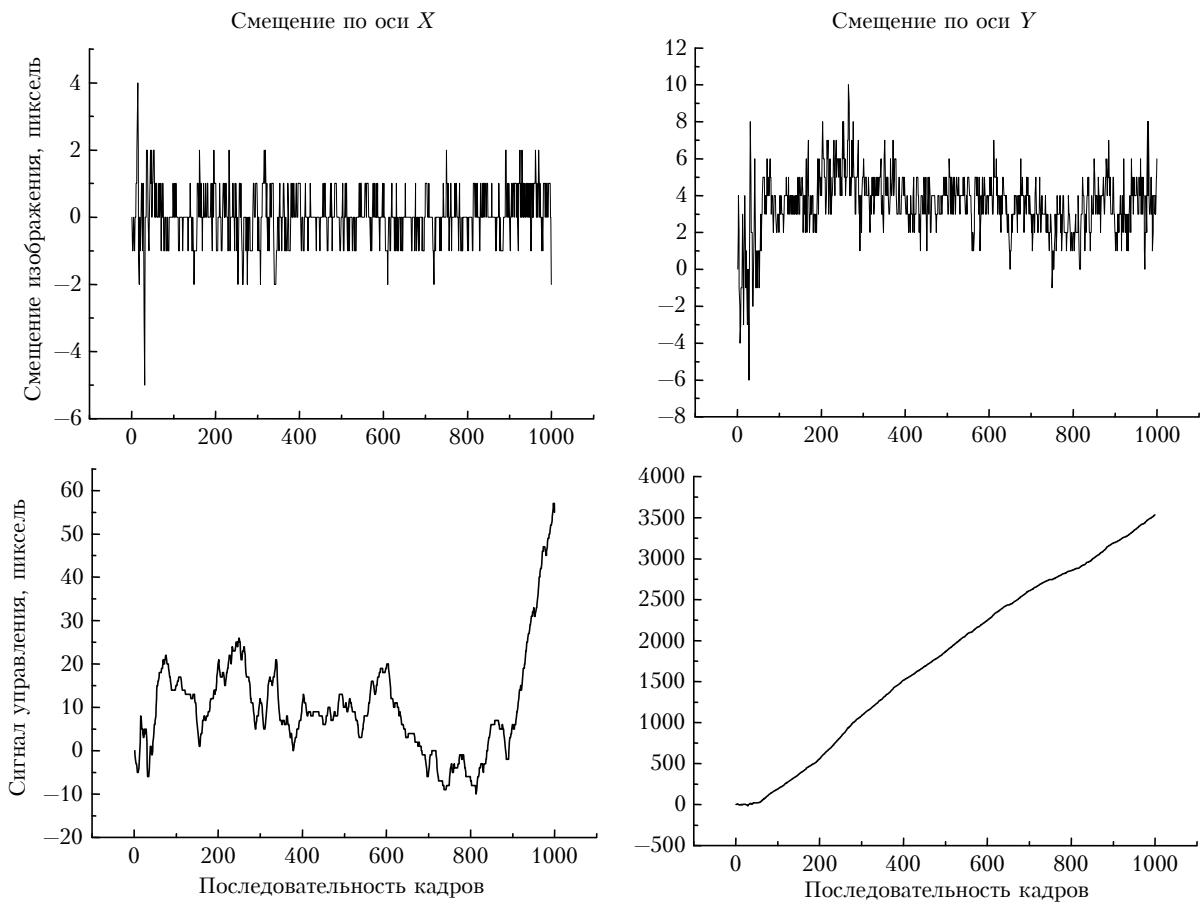


Рис. 16. Смещения изображения и сигналы управления в реальных измерениях с замкнутым контуром управления (13:05)

В МКД использовалась фильтрующая функция с такими же параметрами, как и при полной апертуре.

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 продолжает расти (интегральный закон управления), система не выходит на режим стабилизации (рис. 16, 17).

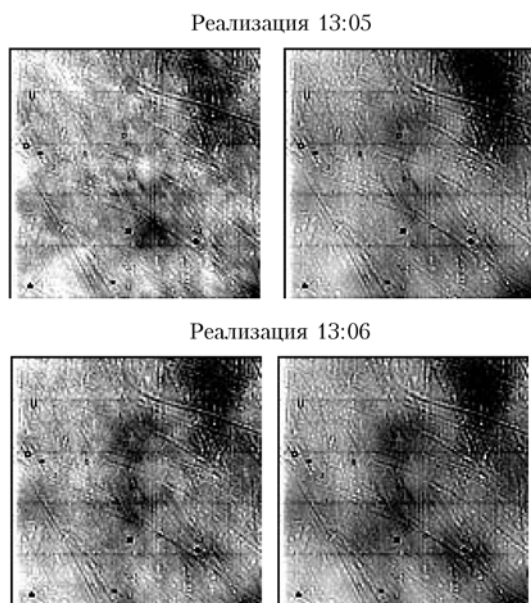


Рис. 17. Опорные кадры (слева) и средние (справа) за время стабилизации

Такая ситуация проявилась в реальных измерениях (13:05). В следующей реализации (13:06) структура изображения менялась незначительно, ошибка измерения меньше и стабилизация изображения лучше.

Заключение

Испытания корреляционного датчика с модифицированным корреляционным алгоритмом измерения дрожания изображения (МКД) проводились на БСВТ начиная с 2005 г. и были продолжены в 2006–2008 гг. В процессе этих работ постоянно осуществлялся контроль за состоянием приземной турбулентности в районе БСВТ, данные с датчика МКД давали значение интегральной турбулентности по трассе наблюдений изображения Солнца.

Программа испытаний алгоритма МКД для адаптивной системы включала в себя измерения смещения изображения в первом и во втором фокусах телескопа. Методика испытаний состояла из анализа фрагмента изображения для выбора параметров фильтрующей функции, измерения смещения изображения, если при выбранных параметрах фильтрующей функции корреляционная функция

имеет выраженный максимум, следящий за смещением изображения. Испытания датчика в первом фокусе телескопа проводились при таких погодных условиях, когда наблюдалось хорошее для БСВТ качество изображения. Условием эффективной работы датчика, при правильно выбранных параметрах фильтрующей функции, является то, что корреляционная функция имеет выраженный максимум, который смещается вместе с изображением. Применение модифицированного корреляционного датчика для измерения смещения изображения в первом фокусе телескопа показало, что в реальном эксперименте удастся подобрать такие параметры фильтрующей функции МКД, которые надежно обеспечивают измерения смещения изображения солнечной грануляции в условиях хорошего видения. Уменьшение входной апертуры телескопа до 170 мм незначительно влияет на качество изображения и, следовательно, на работу МКД. Структура изображения во втором фокусе меняется в течение коротких реализаций. МКД хорошо следит за крупными масштабами и дает большую ошибку при выделении фильтрующей функцией мелких масштабов [13–15, 17–19].

В составе адаптивной оптической системы МКД измеряет смещение изображения во втором фокусе только при высоком качестве изображения солнечной грануляции, что реализуется только при исключительно хороших условиях видения и при определенной структуре грануляции. Заметное ухудшение качества изображения происходит при переносе изображения во второй фокус. В настоящее время элементы адаптивной оптической системы размещены [18–20] 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).

Используемый алгоритм следит 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 [20], корректирующей изображение солнечной грануляции, необходимо принять меры по обеспечению высокого качества оптической системы, переносящей 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. *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. N 3. P. 351–360.
2. *Ricort G., Aime C.* Correlation image motion tracker // *Astron. and Astrophys.* 1979. V. 76. P. 324–335.
3. *Ricort G., Aime C., Roddier C., Borgino J.* Adaptive optics for solar telescopes // *Sol. Phys.* 1981. V. 69. N 2. P. 223–231.
4. *Комплекс автоматизированный ультразвуковой метеорологический «Метео-2»:* Руководство по эксплуатации. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002.
5. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В.* Влияние температурных неоднородностей подстилающей поверхности на высотный профиль интенсивности атмосферной турбулентности // VI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1999. С. 54.
6. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В.* Реконструкция высотных профилей интенсивности атмосферной турбулентности по неоднородному граничному полю приземных значений // VI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1999. С. 55.
7. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V.* Solution of boundary value problems of semiempiric theory of turbulence for arbitrary wind velocity profiles // IX Joint Int. Symp. «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric Physics». Tomsk: IAO SB RAS, 2002. P. 78.
8. *Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В.* Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 10. С. 845–862.
9. *Мионов В.Л., Носов В.В., Чен Б.Н.* Дрожание оптических изображений лазерных источников в турбулентной атмосфере // *Изв. вузов. Сер. Радиофиз.* 1980. Т. 23. № 4. С. 461–469.
10. *Аксенов В.П., Алексеев А.В., Банах В.А., Булдаков В.М., Веретенников В.В., Жуков А.Ф., Кабанов М.В., Креков Г.М., Макушкин Ю.С., Мионов В.Л., Мицель А.А., Нелюбин Н.Ф., Носов В.В., Пономарев Ю.Н., Пхалагов Ю.А., Фирсов К.М.* Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения / Под ред. В.Е. Зуева, В.В. Носова. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1987. 247 с.
11. *Lawrence R.S., Ochs G.R., Clifford S.F.* // *J. Opt. Soc. Amer.* 1970. V. 60. N 6. P. 826–830.
12. *Rimmele T.R.* Adaptive Optical Systems Technology // *Proc. SPIE.* 2000. V. 4007. P. 218–231.
13. *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 изображения // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15. № 11. С. 1027–1030.
14. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Лукин В.П., Янков А.П.* Пьезоэлектрический привод для двухкоординатного управления углом положением зеркала // *Приборы и техн. эксперим.* 2002. № 1. С. 144–146.
15. *Лукин В.П., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Скорморовский В.И., Янков А.П.* Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа // *Оптич. ж.* 2006. Т. 73. № 3. С. 55–60.
16. *Лукин В.П.* Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере // *Успехи физ. наук.* 2006. Т. 176. № 9. С. 1000–1006.
17. *Лукин В.П., Фортес Б.В., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Янков А.П., Булатов А.В., Ковадло П.Г., Фирстова Т.М.* Экспериментальная адаптивная оптическая система для БСВТ // *Наука–производству.* 2003. № 9(65). С. 6–9.
18. *Konyaev P.A., Lukin V.P., Emaleev O.N., Botygina N.N., Grigor'ev V.M., Kovadlo P.G., Lavrinov V.V., Antoshkin L.V.* Modified correlation tracker algorithm for tip-tilt correction system and project ANGARA on the Big Solar Vacuum Telescope // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6272. P. 627250-1–627251-7.
19. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А.* Датчики волнового фронта для адаптивных оптических систем // *Автометрия.* 2008. № 4. С. 119–128.
20. *Lukin V.P., Grigor'ev V.M., Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kovadlo P.G., and Skomorovskii V.I.* Tests of the adaptive optical system with a modified correlation sensor at the Big solar vacuum telescope // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7108. P. 71080K-1–71080K-7.

Lukin V.P., Grigoriev V.M., Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kovadlo P.G., Nosov V.V., Skomorovskii V.I., Torgaev A.V. **Possibilities of using adaptive optics in solar telescopes.**

The first results of the use of adaptive correction system are generalised at the solar telescope. The optical experiments were accompanied by measurements of the local astroclimate parameter near the Big solar vacuum telescope (BSVT), incorporating adaptive correction system. The observations were conducted in July 2005 under clear solar weather and the absence of clouds. On the grounds of given meteo measurements the parameter of local warm-up stratification – the Monin–Obukhov numbers was calculated.

Testing the modified correlation sensor (MKD) of BSVT of Baykal astrophysical observatory of the Institute of solar-Terrestrial physics have shown that at a proper choices of parameter of the filtering functions of wave-front sensor provides the reliable measurements of the offset of the solar granulation image in the first focus of the telescope. It turned out that MKD measures the offset of the solar granulation picture in the second focus under very good conditions of the vision only and under determined structure of granulations. The reduction of the input aperture of the telescope to 170 mm weakly influences the quality of the image and, consequently, on MKD work.