

Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, П.Г. Ковадло<sup>1</sup>,  
П.А. Коняев, В.П. Лукин, В.В. Лавринов

## Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*  
<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 5.10.2005 г.

Представлены результаты испытаний на Большом солнечном вакуумном телескопе Байкальской астрофизической обсерватории адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком. На основе высокоскоростной 12-разрядной камеры DALSTAR DS-12-16K5H и управляемого зеркала с пьезоэлектрическим приводом построена система коррекции дрожания изображения, которая хорошо работает по участкам изображения с контрастом 10–15%. При использовании в качестве объекта слежения сильно зашумленных фрагментов грануляционной картины с контрастом 1–2% предложена модификация алгоритма корреляционного датчика, которая демонстрирует возможность применения корреляционной методики для работы по слабоконтрастным объектам.

### Введение

В адаптивных оптических системах, предназначенных для устранения дрожания изображения, традиционно используются корреляционные алгоритмы [1]. В Институте оптики атмосферы СО РАН создан прототип такой системы для работы на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории и проведены его испытания. Результаты исследований, изложенные в [2–4], показали достаточно высокую эффективность адаптивной системы при слежении за объектами с контрастом 10–15%.

В настоящей статье приводятся новые результаты, полученные в ходе экспедиций 2003–2004 гг., касающиеся работы следящей системы со слабоконтрастными объектами типа фрагментов грануляционной картины. Эксперименты, проведенные на БСВТ, и последующая обработка данных, полученных с помощью высокоскоростной съемки (490 кадр./с), с использованием модифицированного алгоритма корреляционного слежения, показывают возможность применения корреляционной методики для обработки полученных результатов.

### Аппаратура и методика измерений

Оптическая схема экспериментальной установки на БСВТ представлена на рис. 1. Изменения в схеме (см. [3, 4]) коснулись в основном блока регистрации оптического сигнала. Изображение регистрировалось цифровой видеокамерой DALSTAR DS-12-16K5H, имеющей динамический диапазон 12 бит на пиксель и частоту 490 кадр./с. Захват кадров осуществлялся с помощью контроллера видеосигнала PC-DIG с интерфейсом RS-422. Первая строка ПЗС-

матрицы имела засветку по темновому току, поэтому исключалась из измерений.

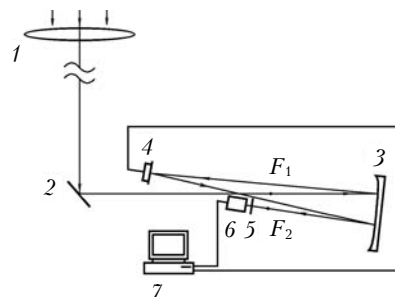


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 – объектив телескопа ( $D = 760$  мм,  $F = 40$  м); 2 – диагональное зеркало; 3 – сферическое зеркало ( $F = 4$  м); 4 – управляемое зеркало; 5 – светофильтры; 6 – видеокамера «DALSTAR» (128×128 пикселей, 12-разрядное АЦП, 490 кадр./с); 7 – компьютер Pentium VI, 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.

Перед началом экспериментов для определения коэффициента обратной связи адаптивной оптической системы с помощью программы настройки предварительно снималась статическая характеристика системы при разомкнутом контуре управления. Для этого в фокусе телескопа  $F_1$  (см. рис. 1) помещался точечный источник, на зеркало 4 с компьютера подавался сигнал управления, смещение изображения точечного источника в фокусе  $F_2$  измерялось корреляционным датчиком смещения изображения.

При работе основной программы в режиме изменения 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 для двухкоординатного управления угловым положением зеркала 4. (Подробное описание электронного блока и конструкции зеркала с пьезоэлектрическими толкателями изложено в [2]).

Режим регистрации был предназначен для высокоскоростной записи видеосигнала в память компьютера для последующей обработки. Реализации длиной 1000 и 2000 кадров по 128×128 пикселей каждый в формате 16 бит на пиксель записывались сначала в оперативную память компьютера, а затем на жесткий диск.

Работа адаптивной системы оценивалась двумя параметрами:

- относительной ошибкой слежения:  $\sigma_{er}/\sigma_c$ , где  $\sigma_{er}$  и  $\sigma_c$  – среднеквадратические отклонения сигналов рассогласования и управления;
- эффективностью подавления спектральных составляющих дрожания изображения:

$$|S(f)|^2 / |S(f)_{er}|^2,$$

где  $|S(f)|^2$  и  $|S(f)_{er}|^2$  – спектральные плотности мощности сигналов смещения изображения при разомкнутом контуре управления и сигналов остаточных смещений изображения в режиме слежения.

Корреляционная методика измерений смещения фрагмента изображения заключалась в следующем:

– в начальный момент времени запоминался опорный кадр  $I_R$ , по которому вычислялась матрица нормировки  $C_R$ ,

– в последующие моменты времени рассчитывалась нормированная взаимная корреляционная функция  $C_N$  распределения освещенности опорного и текущего кадров. Положение максимума взаимной корреляционной функции определяло координаты смещения текущего кадра относительно опорного.

Вычисления производились по следующим формулам:

взаимная корреляционная функция

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

нормированная взаимная корреляционная функция

$$C_N = C / C_R,$$

$$C_R(i, j) = \left[ \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} I^2(l, m) \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} I_R^2(i+l, j+m) \right]^{1/2}.$$

Для максимального ускорения вычислений при расчете взаимной корреляционной функции использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ):

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

Алгоритм БПФ использовался в модификации со смешанным основанием, что позволяло достаточно гибко изменять размеры окна корреляционного анализа и тем самым достигать требуемого быстродействия следящей системы.

С целью расширить область применения корреляционной методики и использовать ее для слежения за слабоконтрастными объектами была предложена модификация алгоритма БПФ для вычисления взаимной корреляционной функции:

$$C_m = F^{-1} \{ F^+ [I] F^+ [I_R] H_B(k_x, k_y) \}.$$

Фильтрующая функция задавалась в виде гауссоиды, сдвинутой относительно начала координат в плоскости пространственных частот:

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

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

## Результаты

Испытания адаптивной оптической системы на БСВТ, проведенные в августе 2003 г. со стандартным корреляционным датчиком на основе 8-разрядной видеокамеры DALSA CA-D1, показали достаточно высокую эффективность системы, когда в качестве объекта слежения использовался участок изображения с порой или группой пор с достаточно высоким контрастом (10–15%). На рис. 2 приведены спектры мощности сигналов смещения изображения при замкнутом (кривая 2) и разомкнутом (кривая 1) контуре управления. В то же время при работе адаптивной системы с фрагментом грануляционной картины такого результата получить не удалось.

Испытания адаптивной оптической системы на БСВТ, проведенные в августе 2004 г. со стандартным корреляционным датчиком на основе 12-разрядной видеокамеры DALSTAR DS-12-16K5H, показали аналогичный результат. Причина такого поведения датчика заключалась в том, что ПЗС-матрица используемой видеокамеры «DALSTAR» имеет технологические особенности в виде четырех эквидистантных горизонтальных линеек элементов с чувствительностью на 0,4–1,2% ниже чувствительности остальных элементов, что приводит к появлению четырех линий на регистрируемом изображении. Контраст этих линий при равномерной засветке матрицы составляет 0,2–0,6%.

При корреляционном анализе изображений наличие неподвижных линий обуславливает появление неподвижного локального максимума взаимной корреляционной функции. При регистрации низкоконтрастных объектов величина локального неподвижного максимума может оказаться выше величины подвижного, связанного со смещением изображения. В этом случае датчик не регистрирует смещение.

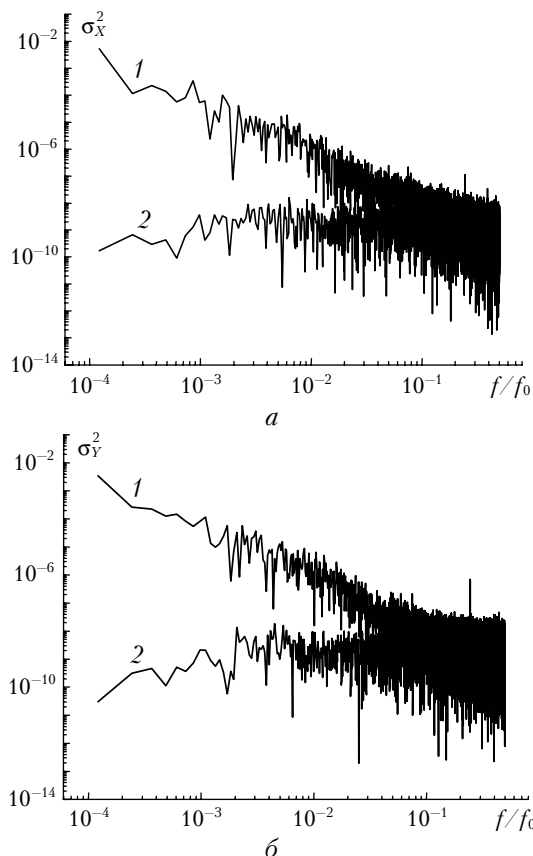


Рис. 2. Спектры мощности сигналов смещения изображения по осям  $X$  (а),  $Y$  (б);  $f_0 = 164$  Гц; длительность реализации – 50 с;  $\sigma_{X1}/\sigma_{X2} = 36,0$ ;  $\sigma_{Y1}/\sigma_{Y2} = 29,0$

Известно [5], что без учета влияния атмосферной турбулентности контраст солнечной грануляции в центральной части диска с большой степенью вероятности лежит в интервале от 16 до 19%. Контраст определяется как среднеквадратическое отклонение распределения освещенности, нормированное на среднюю освещенность. Если рассматривать солнечную фотосферу как абсолютно черное тело, то такой контраст соответствует среднеквадратическим отклонениям температуры 195 и 233 К при средней температуре 5900 К. Атмосферная турбулентность и инструментальные погрешности солнечных телескопов существенно уменьшают контраст грануляционной картины. Перенос изображения с помощью дополнительных оптических элементов во второй фокус в реальных схемах телескопов с адаптивной оптической системой также снижает контраст грануляционной картины.

В условиях проведения испытаний адаптивной оптической системы на БСВТ в 2003 и 2004 гг. контраст грануляционной картины в различных участках солнечного диска (в центре, на краю, вблизи солнечных пятен) в среднем лежал в интервале от 1 до 4%. Согласно [6] это соответствует атмосферной турбулентности, характеризующейся радиусом Фрида от 2 до 6 см. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена запись контраста последовательности кадров при наборе двухсекундной реализации с частотой 490 кадр./с. Изменения контраста изображения за

столь короткие интервалы времени связаны не с процессами на Солнце (они более медленные), а с турбулентным и инструментальным размытием и смещением изображения.

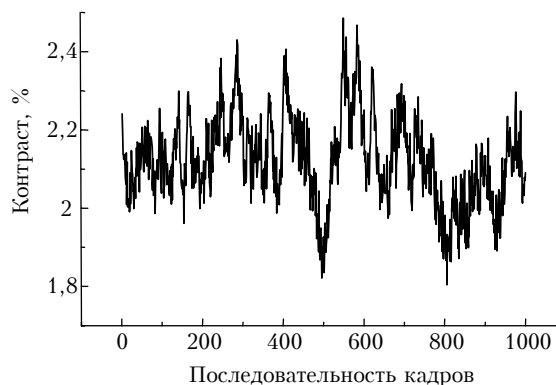


Рис. 3. Контраст изображения солнечной грануляции вблизи пятна в первом фокусе телескопа. Поле зрения приемника составляет  $29 \times 29$  угл. с

В экспедиции на БСВТ 2004 г. видеокамерой DALSTAR DS-12-16K5H, используемой в корреляционном датчике в качестве приемника излучения, были сняты фильмы солнечной грануляции различных участков Солнца. Фильмы записывались в условиях чистого неба при различной скорости ветра и различных условиях видения (насколько это было возможно за время экспедиции). Фильмы снимались и в первом, и во втором фокусе. Менялись поле зрения приемника, угловой масштаб элемента матрицы приемника и диаметр входной апертуры телескопа. С помощью дополнительного оптического элемента на одном кадре совмещались два участка изображения: участок с порой, смещение которого надежно измеряется корреляционным датчиком, и фрагмент грануляционной картины.

На основе анализа записанных фильмов была получена информация о контрасте и пространственных масштабах структуры грануляционной картины в виде корреляционной функции. Фильмы использовались для отработки алгоритмов функционирования корреляционного датчика. При регистрации смещения грануляционной картины замечено, что взаимная корреляционная функция опорного и текущего кадров имеет несколько экстремумов, в том числе и неподвижных, связанных с особенностями приемника излучения. Для выделения максимума корреляционной функции, координаты которого определяют смещение грануляционной картины, использовалась модификация корреляционного алгоритма. В пространственном спектре изображения опорного и текущего кадров усиливались характерные частоты, связанные с размером гранул. Контур усиления представлял собой гауссоиду, параметры которой задаются для каждого конкретного регистрируемого фрагмента грануляционной картины.

Таким образом, при правильно подобранных параметрах в пространственном спектре подавляются низкие частоты, что приводит к выравниванию освещенности по полю зрения датчика, а также высокие

частоты, связанные, в частности, с дефектами матрицы приемника, тем самым во взаимной корреляционной функции усиливается максимум, связанный со смещением изображения солнечной грануляции.

Использование фильмов дает возможность выработать определенные критерии при подборе параметров оптимального контура усиления. Правильность измерения смещения модифицированным корреляционным датчиком (МКД) проверялась путем сравнения с измерениями смещений традиционным корреляционным датчиком (ТКД). Измерялись смещения таких фрагментов изображения, с которыми хорошо работает традиционный корреляционный датчик.

На рис. 4 показан фрагмент изображения солнечного диска, а рис. 5–7 иллюстрируют работу ТКД и МКД с этим фрагментом. Контраст пятна равен 21%.

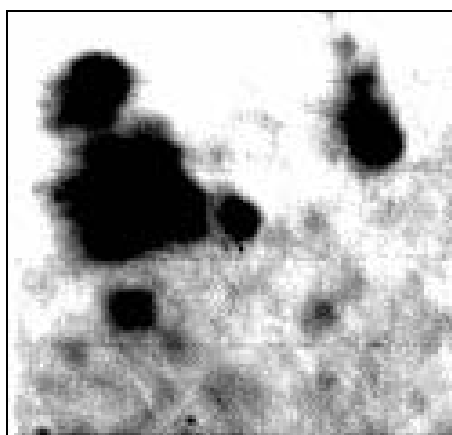


Рис. 4. Фрагмент изображения солнечного диска. Поле зрения равно  $38 \times 38$  угл. с

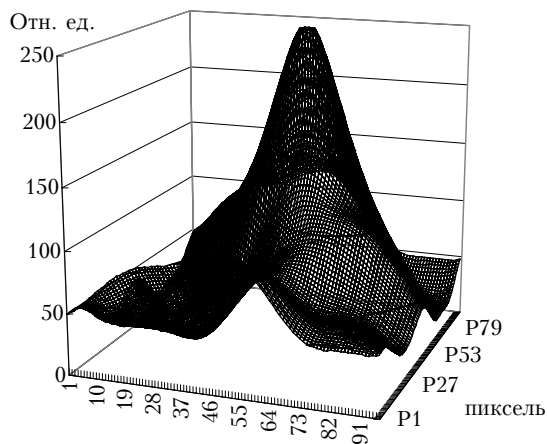


Рис. 5. Вид корреляционной функции. По осям  $X$  и  $Y$  отложены координаты в пикселях, по оси  $Z$  — значения корреляционной функции в отн. ед.

Фильм записан со скоростью 490 кадр./с. Анализируется смещение 1000 кадров. Среднеквадратические отклонения сигналов смещения изображения, измеренных ТКД, равны 0,723 угл. с (по оси  $X$ ) и 5,121 угл. с (по оси  $Y$ ), МКД — 0,720 угл. с (по оси  $X$ ) и 5,119 угл. с (по оси  $Y$ ). Фильм снимался 3 августа 2004 г. при сильном ветре. В спектре дро-

жания изображения наблюдается максимум на частоте 7,6 Гц, связанный с колебаниями сидеростатного зеркала относительно оси крепления.

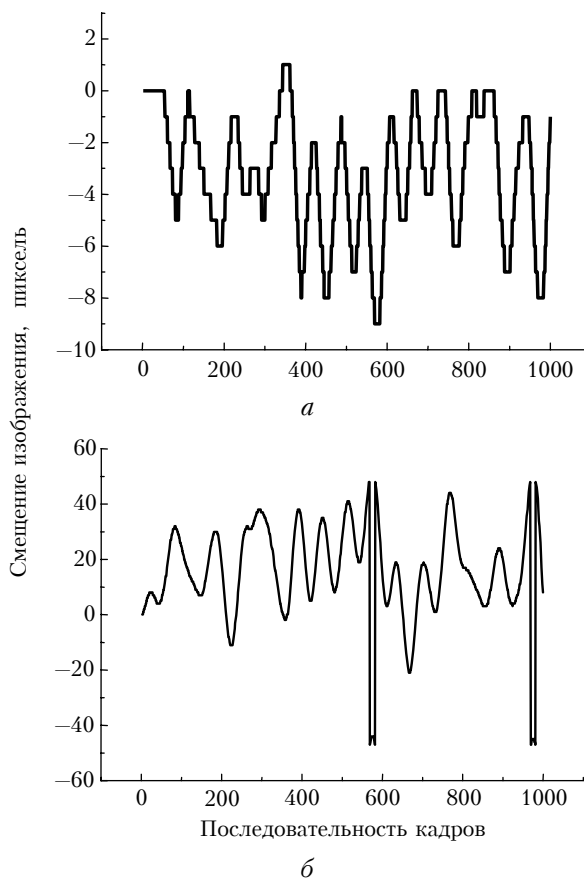


Рис. 6. Смещения изображения по осям  $X$  (а),  $Y$  (б), измеренные традиционным корреляционным датчиком (1 пиксель = 0,3 угл. с)

На рис. 8 показан фрагмент грануляционной картины, с которым ТКД плохо работает. Измеренные значения контраста представлены на рис. 3. За время реализации контраст грануляционной картины менялся в интервале 1,8–2,5%, среднее значение контраста 2,1%. Вид корреляционной функции ТКД и МКД показан на рис. 9. При работе традиционного корреляционного датчика максимумы взаимной корреляционной функции, связанные с неподвижной структурой изображения и смещающейся, близки по величине. Датчик показывает либо «0», либо пытается следить за движением изображения. Взаимная корреляционная функция МКД имеет ярко выраженный максимум, который смещается вместе с изображением.

На рис. 10 представлены сигналы смещения изображения, измеренные ТКД (кривая 1) и МКД (кривая 2). Среднеквадратические отклонения сигналов смещения изображения, измеренных МКД, равны 1,350 угл. с (по оси  $X$ ) и 4,490 угл. с (по оси  $Y$ ). Полученные значения неплохо согласуются с соответствующими значениями предыдущей реализации (см. рис. 6, 7). Промежуток времени между сравниваемыми реализациями равен 9 мин.

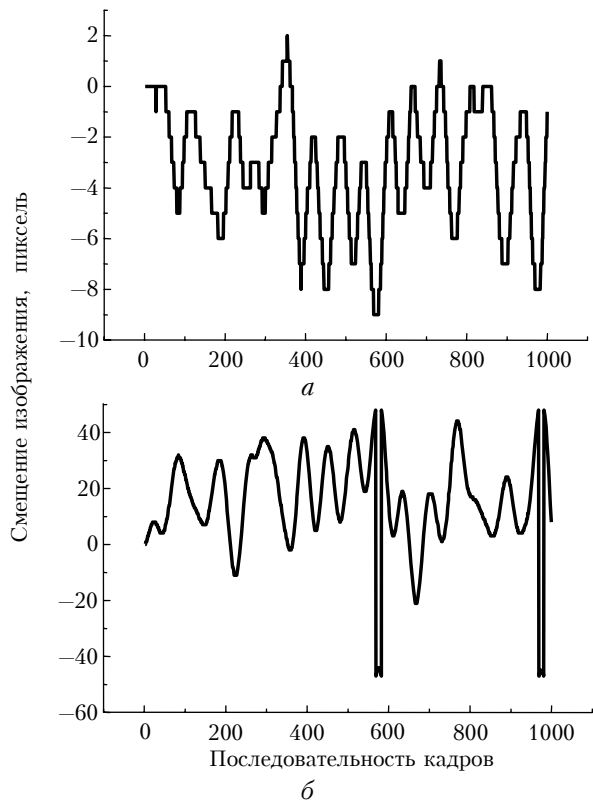


Рис. 7. Смещения изображения по осям X (а), Y (б), измеренные модифицированным корреляционным датчиком (1 пиксель = 0,3 угл. с)

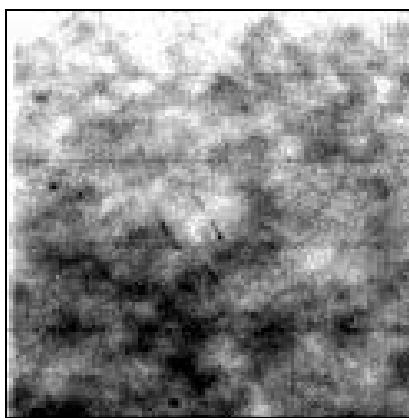


Рис. 8. Фрагмент грануляционной картины

С целью оценить возможности предлагаемого модифицированного алгоритма корреляционного слежения были получены распределения средней интенсивности грануляционной картины путем усреднения последовательности из 1000 кадров. На рис. 11, а показан опорный кадр, взятый за время 0,002 с, на котором отчетливо видна грануляционная картина участка солнечной поверхности. Ввиду значительных поперечных колебаний изображения результирующая средняя интенсивность картинки за интервал времени 2 с сильно размывается (рис. 11, б). В то же время в режиме слежения удается восстановить грануляционную структуру (рис. 11, в) и тем самым использовать МКД для адаптивной коррекции дрожания изображения слабоконтрастных объектов.

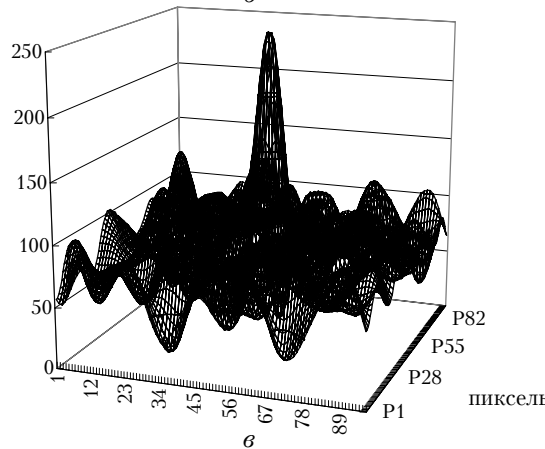
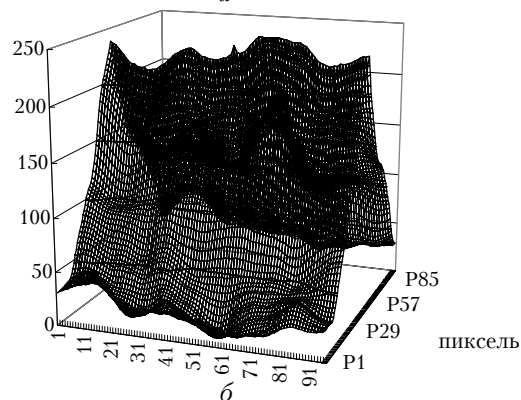
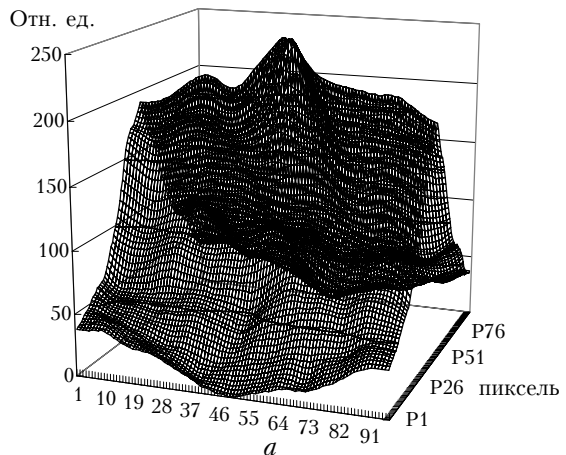


Рис. 9. Взаимная корреляционная функция опорного и текущих кадров (а, в – 10-го, б, г – 306-го) ТКД (а, б) и МКД (в, г). По осям X и Y отложены координаты в пикселях, по оси Z – значения корреляционной функции в отн. ед.

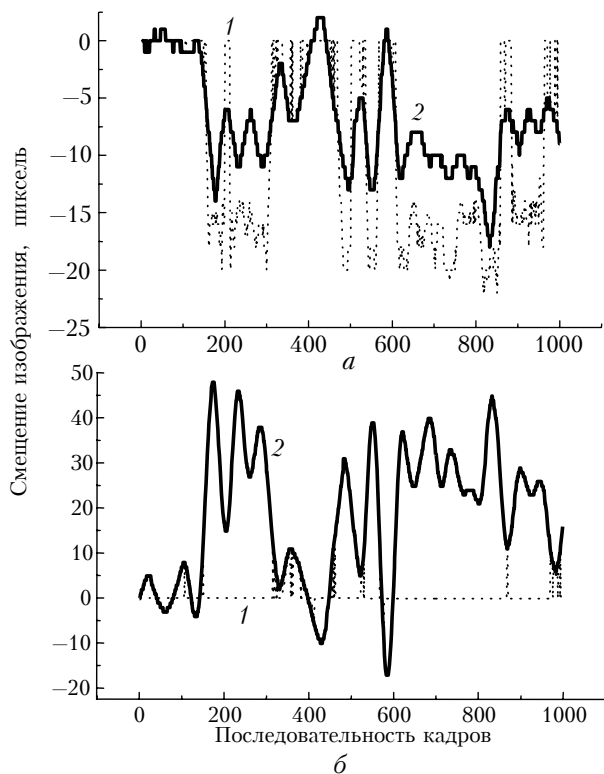


Рис. 10. Смещения изображения по осям X (а), Y (б) (1 пиксель = 0,3 угл. с)

### Выводы

Результаты испытаний на БСВТ Байкальской астрофизической обсерватории адаптивной оптической

Параметр	США	Франция	Испания	КНР	Россия, БСВТ
	1989	1995	1996	2001	2003–2004 гг.
Диаметр телескопа, мм	760	900	980	430	760
Объект слежения	Грануляция	Грануляция	Грануляция	Пятно/пора	Пора/грануляция
Алгоритм	Кросс-коррелятор	Кросс-коррелятор	Абсолют. разности	Модиф. коррелятор	Модиф. коррелятор
Частота выборки, Гц	417	582	1350	419	164–245
Поле зрения, угл. с	10×10	2×2 ~ 12×12	14×14	5×5 ~ 20×20	33×33
Полоса частот, Гц	25	60	100	84–30	120
Качество коррекции (СКО, угл. с)	0,023	0,02	0,05	0,14	0,07

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Комплексного интеграционного проекта Сибирского отделения РАН «Современный адаптивный телескоп» (2003–2005).

1. Von der Luhe O., 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 2. P. 351–360.
2. 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.

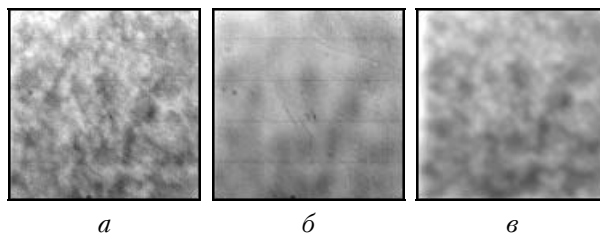


Рис. 11. Кадры грануляционной картины, полученные: а – в режиме «короткой экспозиции» (2 мс); б – в режиме «длинной экспозиции» (2 с) без управления; в – в режиме «длинной экспозиции» (2 с) с модифицированным корреляционным датчиком

системы с корреляционным датчиком, проведенные в 2003–2004 гг., показали достаточно высокую эффективность системы, когда в качестве объекта слежения используются участки изображения с контрастом 10–15%. При использовании в качестве объекта слежения фрагментов грануляционной картины с контрастом 1–2% датчик на основе стандартной корреляционной методики перестает работать. В этих случаях, т.е. когда глубина модуляции полезного сигнала незначительно превышает шумовую модуляцию, применение модифицированного алгоритма функционирования корреляционного датчика дает возможность регистрировать смещения низкоконтрастных фрагментов изображения.

В таблице приведены основные характеристики адаптивной системы коррекции дрожания изображения для Большого солнечного вакуумного телескопа и для сравнения показаны параметры существующих в настоящее время систем.

3. 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.
4. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Скоморовский В.И., Янков А.П. Разработка и исследование адаптивной оптической системы солнечного телескопа // *Автометрия.* 2003. Т. 39. № 5. С. 77–89.
5. Ricort G., Aime C. // *Astron. and Astrophys.* 1979. V. 76. N 2. P. 324–335.
6. Ricort G., Aime C., Roddier C. // *Sol. Phys.* 1981. V. 69. N 2. P. 223–231.

L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, P.G. Kovadlo, P.A. Konyayev, V.P. Lukin, V.V. Lavrinov. Adaptive tip-tilt correction system with modified correlation tracker.

The testing results of the adaptive optics system with correlation tracker at the Big Solar Vacuum Telescope at the Baikal Astrophysical Observatory are reported. Based on fast 12-bit DALSTAR DS-12-16K5H camera and active mirror with piezoelectric drive the tip-tilt correction system was build, that works using 10–15% contrast solar disk image fragments. When the tracker object is a very noisy granulation image with 1–2% contrast, the modified correlation tracking algorithm is proposed, which demonstrates an ability to use the correlation method for low contrast objects.