

Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, П.Г. Ковадло*, П.А. Коняев,
В.П. Лукин, А.И. Петров, А.П. Янков

Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения изображения

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

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

Поступила в редакцию 11.06.2002 г.

Сообщаются результаты испытания адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком смещения изображения. В состав адаптивной оптической системы входят следующие основные компоненты: двухкоординатное управляемое зеркало с пьезоэлектрическим приводом, контроллер привода (RS-232 интерфейс), компьютер (Pentium III, 550 МГц), видеокамера «DALSA» (256 × 256 элементов, 8-разрядное АЦП, 203 кадр./с), контроллер видеокамеры (шина ISA), специализированный пакет программ.

Испытания проводились на Большом солнечном вакуумном телескопе Института солнечно-земной физики (Байкальская астрофизическая обсерватория). Адаптивная оптическая система стабилизировала положение фрагмента изображения солнечного диска. Относительная ошибка слежения в среднем составляла 50%.

Введение

При исследовании различных участков Солнца спектроскопическими методами необходимо стабилизировать на входной щели спектрографа различные структуры изображения солнечного диска. Для стабилизации фрагмента грануляционной картины в солнечных телескопах используются адаптивные системы с корреляционными датчиками смещения изображения, например [1].

В рамках развития наших работ [2, 3] по созданию адаптивной оптической системы на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории нами был создан макет такой системы на лабораторном стенде и проведены его испытания. Исследования корреляционного датчика [4] проводились при различных структурах изображения, близких по угловым масштабам и контрасту к реальным изображениям, получаемым на солнечных телескопах.

В данной статье приводятся результаты испытания адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком смещения изображения на Большом солнечном вакуумном телескопе.

Структурная схема установки

Оптическая схема экспериментальной установки на БСВТ представлена на рис. 1. С помощью диагонального зеркала 2 часть излучения, формирующего изображение Солнца, отводится в адаптивную систему. Сферическое зеркало 3 и объектив телескопа 1 образуют телескопическую систему, в выходном зрачке которой находится управляемое зеркало 4. Зеркала 3

и 4 переносят изображение из плоскости вблизи фокуса F_1 в плоскость вблизи F_2 . Изображение регистрируется видеокамерой 6 и с помощью специально разработанного контроллера вводится в компьютер 7 для вычисления смещения изображения и формирования сигналов управления, которые через контроллер с интерфейсом RS-232 подаются на пьезоэлектрический привод [5] управляемого зеркала 4.

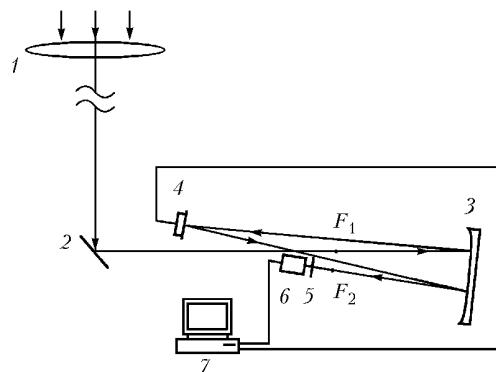


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 – объектив телескопа ($D = 760$ мм, $F = 40$ м); 2 – диагональное зеркало; 3 – сферическое зеркало ($F = 4$ м); 4 – управляемое зеркало; 5 – светофильтры; 6 – видеокамера «DALSA» (256 × 256 элементов, 8-разрядное АЦП, 203 кадр./с); 7 – компьютер (Pentium III, 550 МГц, видеокарта ASUS AGP-V3800 Pro/TV)

Для функционирования адаптивной системы разработан специализированный пакет программ, позволяющий:

- выводить изображение на экран монитора;
- выбирать режим работы системы, тем самым обеспечивая: а) просмотр изображения, б) измерения, в) слежение;

- просматривать на экране распределение освещенности в выбранном сечении;
- выбирать окно анализа;
- задавать параметры системы и количество циклов измерений;
- вычислять координаты смещения изображения;
- формировать сигналы управления;
- снимать статическую характеристику корреляционного датчика и адаптивной системы;
- записывать в файлы: а) изображение, с которым работает система, б) условия проведения измерений, в) вычисленные координаты смещения изображения, г) сигнал управления.

Методика измерений и результаты

Корреляционная методика измерений смещения фрагмента изображения заключается в следующем: запоминается опорный кадр и рассчитывается взаимная корреляционная функция распределения освещенности опорного и текущего кадров. Положение максимума взаимной корреляционной функции определяет координаты смещения текущего кадра относительно опорного.

Для вычисления взаимной корреляционной функции в работе использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье по смешанному основанию. Алгоритм работал в 16-разрядной арифметике с плавающей запятой.

Испытания адаптивной системы стабилизации фрагмента изображения Солнца проводились на БСВТ в условиях безоблачного неба в августе 2001 г. В качестве объектов слежения использовались различные структуры в рамках конечного фрагмента изображения (грануляционная картина, изображение солнечных пятен и пор). Контрастность фрагментов изображения была различной.

Контрастность грануляционной картины в условиях эксперимента в среднем составляла 1,5 – 2%, поэтому использовать в качестве объекта слежения фрагмент грануляционной картины оказалось затруднительно. Это связано с тем, что при регистрации такого изображения видеокамерой с 8-разрядным АЦП глубина модуляции полезного сигнала незначительно превышает модуляцию, связанную с шумами самой камеры. В этом случае корреляционный датчик работает по шумовой модуляции, что ведет к ошибке измерений и снижает эффективность стабилизации изображения. Распределение освещенности грануляционной картины показано на рис. 2.

Изображение зарегистрировано видеокамерой без объектива. ПЗС-матрица видеокамеры находилась в фокусе телескопа. Время экспозиции составляло примерно 5 мс. Для ослабления светового потока использовались нейтральные светофильтры и интерференционный светофильтр на длине волны 0,589 мкм. Поле зрения видеокамеры было равно 20,5 × 20,5 угл. с, разрешение – около 0,08 угл. с. Регистрировалась область грануляции вблизи поры. Телескоп настраивался на резкость по попадающему в поле зрения видеокамеры

краю поры. Распределение освещенности приведено в виде сечений $Y = \text{const}$ с шагом, равным одному элементу ПЗС-матрицы.

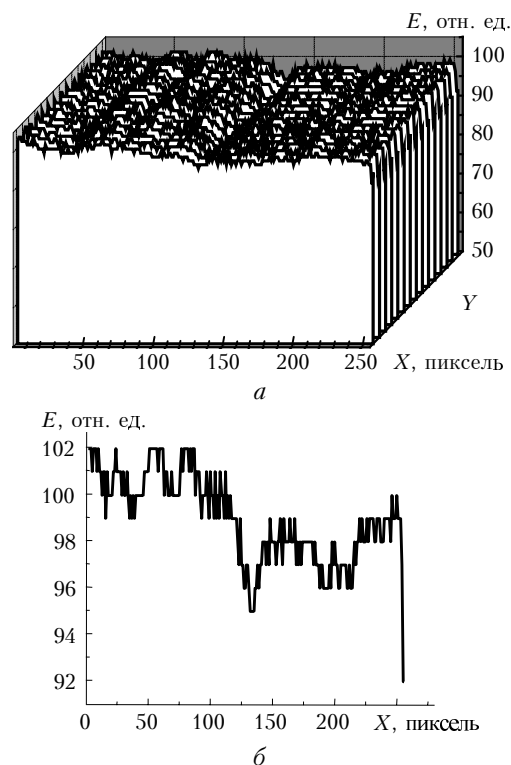


Рис. 2. Распределение освещенности грануляционной картины. Фрагмент изображения, соответствующий полю зрения 20,5 × 1,2 угл. с (а), отдельное сечение (б). 1 пиксель = 0,08 угл. с

На рис. 2,б выделено одно сечение в масштабе, удобном для рассмотрения мелкой структуры. Полученное изображение использовалось в модельном эксперименте для анализа работы корреляционного датчика с фрагментом изображения в виде грануляционной картины с контрастностью 1,5 – 2% в качестве регистратора необходима менее шумящая видеокамера с большим динамическим диапазоном и с более высокоразрядным АЦП.

Чтобы проверить работу созданной адаптивной системы при ее максимально возможном быстродействии и разрешении датчика не хуже 1 угл. с, на изображении солнечного диска выбирались такие объекты слежения, которые бы позволили использовать небольшое окно анализа. В большинстве случаев окно анализа составляло 24 × 16 элементов, что соответствовало полю зрения адаптивной системы 24,80 × 16,50 угл. с. При окне анализа 24 × 16 элементов длительность цикла «измерение – управление» равнялась 17,8 мс. Система работала с изображениями мелких солнечных пятен и пор. Контрастность изображений была различной: от 6 до 40%. Контрастность изображения солнечного пятна определялась следующим образом:

$$K = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}),$$

где E_{\max} и E_{\min} – максимальная и минимальная освещенность в окне анализа.

Для определения коэффициента обратной связи адаптивной оптической системы 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.

Работа адаптивной системы оценивалась двумя параметрами:

- относительной ошибкой слежения: σ_{er}/σ_c , где σ_{er} и σ_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.

В качестве иллюстрации функционирования адаптивной системы в работе приводятся результаты, полученные при стабилизации положения фрагмента изображения, выделенного рамкой на рис. 3. Объектом слежения является изображение солнечного пятна размером 9 угл. с по уровню 0,5 глубины модуляции освещенности. Контрастность изображения равняется 8%.

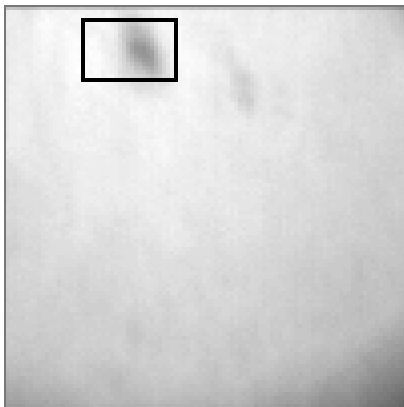


Рис. 3. Фрагмент изображения солнечного диска (контраст изображения увеличен)

Во всех случаях, когда в опорный кадр полностью попадало пятно, относительная ошибка слежения в среднем составляла 50%. На рис. 4 приведен спектр мощности сигнала дрожания изображения при разомкнутом контуре управления. На рис. 5 представлены спектры мощности сигналов рассогласования и управления и их сравнение. Для получения спектров (рис. 4 и 5) использовались реализации длительностью 17,8 с, записанные в режиме измерения и слежения последовательно с интервалом в несколько секунд. Частота снятия отсчетов f_s равнялась

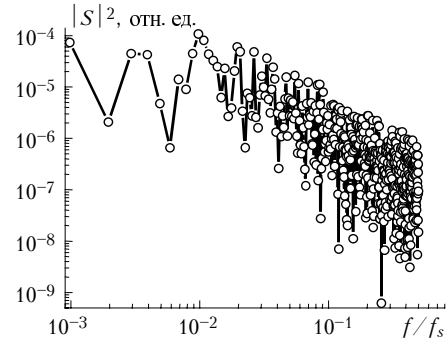


Рис. 4. Спектр мощности сигнала дрожания изображения

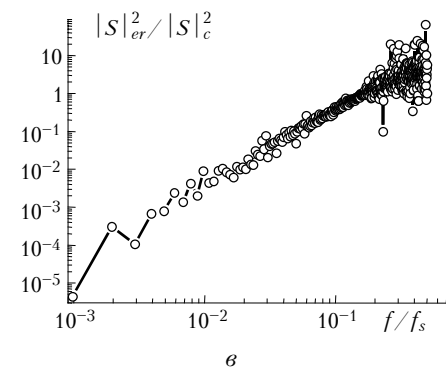
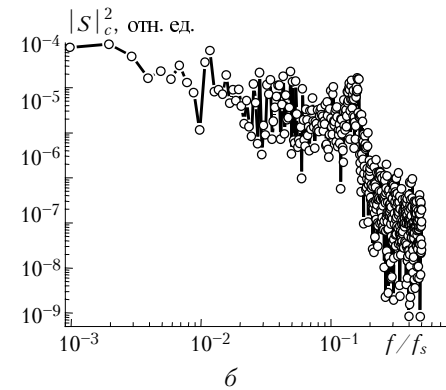
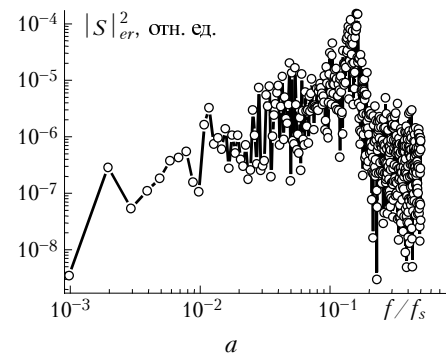


Рис. 5. Спектры мощности сигналов рассогласования (а) и управления (б) и их сравнение (в)

56,0 Гц. Эффективность подавления дрожания изображения на различных частотах показана на рис. 6, из которого видно, что эффективность системы стабилизации изображения выше единицы в диапазоне частот от 0 до 11,0 Гц.

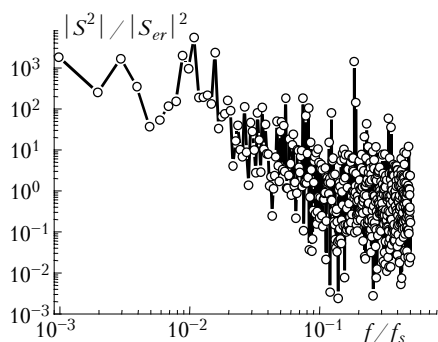


Рис. 6. Частотная зависимость эффективности подавления дрожания изображения

Чтобы понять, чем обусловлена ошибка слежения, в компьютерную модель корреляционного датчика смещения изображения вводилось изображение, с которым работал реальный датчик, и строилась позиционная характеристика датчика. Таким образом выявлялась принципиальная возможность вычисления смещения реального изображения, записанного в условиях конкретной реализации при заданном начальном положении и размере окна анализа, корреляционным методом. Оказалось, что, когда солнечное пятно полностью попадает в опорный кадр, позиционная характеристика датчика линейна. Если в опорном кадре оказывалась только часть солнечного пятна, корреляционный датчик работал неверно. Поэтому для оценки быстродействия реальной системы в обработку брались только те реализации, в которых пятно полностью попадало в опорный кадр. В этом случае ошибка слежения реальной системы обусловлена не принципиальными недостатками метода, а динамическими характеристиками системы, в первую очередь низким быстродействием и шумами системы, а также изменением распределения освещенности изображения за время набора реализации.

Заключение

Испытания на БСВТ созданной нами адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком смещения изображения показали, что адаптивная оптическая система компенсирует дрожание изображения мелких солнечных пятен и пор на частотах ниже 11 Гц. Для улучшения качества стабилизации изображения необходимо увеличить пространственное разрешение корреляционного датчика и существенно

повысить быстродействие системы (на порядок и более). Для этого необходимо одновременно увеличить окно анализа и значительно сократить длительность цикла «измерение – управление». А это возможно при замене отдельных элементов системы на более быстродействующие. Кроме того, для работы адаптивной системы с любыми фрагментами изображения солнечного диска, в том числе и с грануляционной картиной, необходима, как уже отмечалось выше, видеокамера с большим динамическим диапазоном.

Таким образом, проведенные испытания позволили определить возможности созданной адаптивной системы при работе с различными фрагментами изображения солнечного диска и наметить пути дальнейшего ее совершенствования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 00-02-17489) и СО РАН (комплексный интеграционный проект № 6 «Адаптивный солнечный телескоп»).

1. Luhe O. von der, Widener A.L., Rimmele Th., Spence G., Dunn R.B., Wiborg P. Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes // *Astron. and Astrophys.* 1989. V. 224. P. 351–360.
2. Лукин В.П., Фортес Б.В., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Петров А.И., Янков А.П., Булатов А.В., Ковадло П.Г., Фирстова Н.М. Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа. I. Результаты тестирования и перспективы развития // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 12. С. 1161–1164.
3. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Петров А.И., Фортес Б.В., Янков А.П. Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа. II. Эффективность стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной цели спектрографа // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13. № 4. С. 420–423.
4. Konyaev P.A., Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N. Tip-tilt image correction using a correlation tracker // VIII Joint International Symposium «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics»: *Sympos. Proc.* / Ed. by V.A. Banakh and O.V. Tikhomirova. Tomsk: Institute of Atmosph. Optics SB RAS, 2001. P. 118.
5. 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 техника эксперим.* 2002. № 1. С. 144–146.

L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, P.G. Kovadlo, P.A. Konyaev, V.P. Lukin, A.I. Petrov, A.P. Yankov. **Adaptive optics system with correlation detector of image displacement.**

The results of testing an adaptive optics system with correlation detector of image displacement are reported. A correlation tracker consists of the following main components: tip-tilt mirror with piezoelectric drive, drive controller (RS-232 interface), computer (Pentium III, 550 MHz), video camera DALSA (256 × 256 pixel, 8 bit ADC, 203 frame/s), video camera controller (ISA bus), software (specially developed).

The system was tested at the Big Solar Vacuum Telescope of the Institute of Solar-Terrestrial Physics (the Baikal Astrophysical Observatory). The adaptive optics system stabilizes the position of a solar disk image fragment. The relative control error is 50% on the average.