

Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, Л.Н. Лавринова, В.П. Лукин,  
А.И. Петров, Б.В. Фортеc, А.П. Янков

## Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа. II. Эффективность стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной щели спектрографа

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 3.12.99 г.

Представлены результаты исследования эффективности экспериментальной адаптивной системы для стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной щели спектрографа. Исследования проводились на Большом солнечном вакуумном телескопе Института солнечно-земной физики СО РАН. В зависимости от атмосферных условий дисперсия дрожания изображения на щели спектрографа в системе с адаптацией уменьшалась в 16÷40 раз. Относительная ошибка регулирования не превышала 25%. Наблюдалась высокая степень подавления гармоник в спектре сигнала смещения изображения в диапазоне частот 0–30 Гц.

### Введение

Для исследования спектральными методами происходящих на Солнце процессов в Институте солнечно-земной физики на базе Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) и спектрографа создан уникальный инструмент [1] с высоким пространственным и спектральным разрешением. Однако качество получаемых спектрограмм заметно ухудшается дрожанием изображения изучаемого участка солнечного диска, вызванным атмосферной турбулентностью и вибрациями конструкций телескопа.

Для стабилизации фрагмента изображения на входной щели спектрографа нами был разработан и опробован экспериментальный вариант следящей системы с квадрантным приемником и управляемым по углам наклона зеркалом.

Применение следящей системы с квадрантным приемником накладывает ограничения на исследуемые участки солнечного диска, так как система может работать лишь с такими фрагментами изображения, на которых присутствует выраженная локальная неоднородность распределения освещенности. Предлагаемая адаптивная система была опробована для стабилизации изображения участка солнечного диска в окрестности солнечной поры. Изучение процессов, происходящих в этой области, представляет большой интерес для исследователей.

### Описание установки

Структурная схема установки изображена на рис. 1. В качестве управляемого зеркала использовался биморфный дефлектор диаметром 36 мм, созданный в лаборатории прикладной и адаптивной оптики ИОА СО РАН и прошедший испытание в реальной схеме адаптивной оптической системы [2, 3]. Дефлектор устанавливался перед фокусом телескопа на расстоянии 280 см от фокальной плос-

кости и участвовал в формировании изображения на щели спектрографа. Чувствительность дефлектора  $1,2 \cdot 10^{-6}$  рад/В, резонансная частота зеркала зависит от основания, на которое крепится зеркало, и способа крепления и в данной системе приблизительно равна 120 Гц.

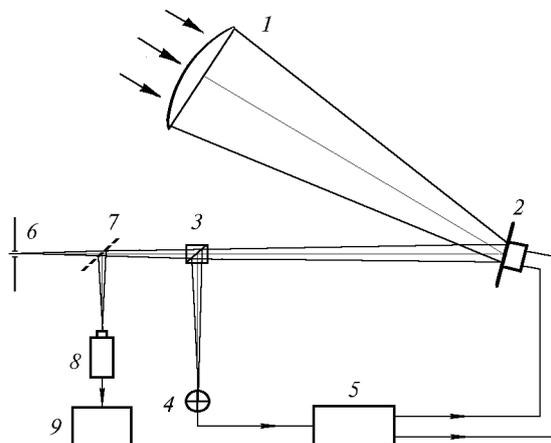


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – объектив телескопа (диаметр 760 мм, фокусное расстояние 40 м); 2 – управляемое зеркало; 3 – светоделительный кубик; 4 – приемное устройство; 5 – устройство управления; 6 – входная щель спектрографа; 7 – зеркало, вводимое в схему для оптического контроля качества стабилизации изображения; 8 – видеокамера; 9 – компьютер

Между управляемым зеркалом и входной щелью помещался светоделительный кубик, отводящий часть излучения на вход приемной системы, состоящей из оптической системы масштабирования изображения, квадрантного приемника типа ФДК-142 и усилителей сигналов с

площадок приемника. Центр приемника так же, как и центр щели спектрографа, лежит на оптической оси в фокальной плоскости телескопа. Сигналы с усилителей подавались на два идентичных канала  $X$  и  $Y$  устройства управления 5 биморфным дефлектором.

Схема электронного блока следящей системы с обратной связью по оптическому каналу приведена на рис. 2.

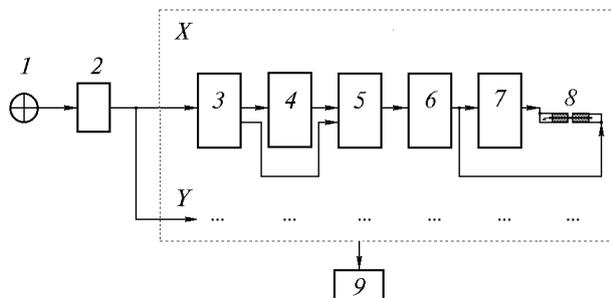


Рис. 2. Блок-схема электронного устройства следящей системы: 1 – квадрантный фотоприемник ФДК-142; 2 – входные усилители; 3 – блок вычисления смещения изображения; 4 – блок памяти смещения; 5 – блок вычисления сигнала обработки; 6, 7 – высоковольтные усилители; 8 – пьезоэлектрический дефлектор; 9 – компьютер

В системе реализован следующий алгоритм управления:

- блоком вычисления смещения изображения солнечной поры вырабатываются сигналы смещения изображения в заданной квадрантным приемником системе координат;
- блоком памяти смещения производится запоминание требуемого положения изображения на приемнике;
- блоком вычисления сигнала обработки определяется величина сигнала рассогласования и вырабатываются сигналы управления;
- управляющие сигналы преобразуются высоковольтными усилителями и подаются на обкладки пьезоэлектрического дефлектора. Максимальная амплитуда сигналов на выходе усилителей – 300 В.

Под действием этих сигналов управляемое зеркало изменяет свой угол, стабилизируя положение изображения на приемнике и на входной щели спектрографа.

Система может работать в двух режимах: как «нуль-орган» и в режиме запоминания исходного положения и стабилизации изображения в этом положении.

Предусмотрена компьютерная обработка сигналов с любого блока системы с использованием программно-аппаратного комплекса «Анализатор сигналов» [4], реализованного на базе персонального компьютера, 8-канальной системы ввода аналоговой информации и 12-разрядного АЦП.

Для оценки эффективности следящей системы по качеству стабилизации фрагмента изображения на щели спектрографа использовалась видеокамера (см. рис. 1) с вводом изображения в персональный компьютер.

## Результаты и их обсуждение

Эффективность адаптивной оптической системы стабилизации изображения оценивалась несколькими способами:

1. Определялась относительная ошибка слежения по координате  $X$  и по координате  $Y$  как отношение среднего квадратического отклонения сигнала рассогласования к

среднему квадратическому отклонению сигнала смещения изображения при разомкнутом контуре управления.

2. С использованием видеоввода и компьютерной обработки изображений вычислялось отношение дисперсий смещения центра тяжести фрагмента изображения с порой без стабилизации изображения и в режиме стабилизации изображения на входной щели спектрографа.

3. Для характеристики динамических свойств следящей системы рассматривались отношения  $\mu(f) = N_1(f)/N_2(f)$  и  $\eta(f) = [N_1(f) - N_2(f)]/N_1(f)$ , где  $N_1(f)$  и  $N_2(f)$  – усредненные по 10 реализациям длительностью 1,28 с спектральные плотности мощности сигнала смещения изображения в системе без стабилизации изображения и при стабилизации изображения на щели спектрографа.

Для определения относительной ошибки слежения последовательно, с интервалом в несколько секунд, набирались гистограммы 60-секундных реализаций сигналов смещения изображения в режиме слежения и при разомкнутом контуре управления. Частота дискретизации сигналов равнялась 400 Гц, шаг квантования – 2,44 мВ. Измерения проводились в условиях безоблачного неба при различной скорости ветра в разное время дня. Размер изображения солнечной поры, по которой работала следящая система, был равен 5 мм. Угловое поле зрения приемной системы (0,34 мрад) не превышало угловой масштаб корреляции углов наклона волнового фронта падающего излучения (0,45 мрад [5]).

В зависимости от условий измерений относительная ошибка слежения изменялась от 0,15 до 0,25. Минимальная ошибка наблюдалась в канале  $X$  (ось  $X$  направлена вдоль щели спектрографа) в первой половине дня при северном ветре со скоростью около 10 м/с. В этих условиях при разомкнутом контуре управления дисперсия дрожания изображения вдоль щели была максимальной и в несколько раз превышала дисперсию дрожания в поперечном направлении.

Одновременно с набором гистограмм сигналов смещения изображения производились запись дрожания изображения на входной щели спектрографа стандартной видеокамерой и визуализация изображения на экране телевизора. Таким образом осуществлялся оптический контроль качества стабилизации изображения. Компьютерная обработка видеоклипов записанных реализаций показала, что дисперсия остаточных смещений центра тяжести изображения солнечной поры не превышала 1/16 дисперсии смещения центра тяжести изображения при разомкнутом контуре управления.

Для иллюстрации динамических особенностей следящей системы на рис. 3 приведены спектры мощности сигналов смещения изображения при разомкнутом контуре управления и после включения следящей системы. Реализации записывались в 11 ч по местному времени при северном ветре 7 м/с и температуре воздуха 14 °С. Появление в спектре сигнала рассогласования высоких частот связано с резонансом управляемого зеркала. Однако, как видно из рисунка, дисперсия сигнала смещения изображения на этих частотах составляет примерно 1/150 дисперсии сигнала смещения изображения в системе без управления наклонами волнового фронта, т. е. система управления вносит незначительные помехи на резонансной частоте. Частотная зависимость степени подавления гармоник, присутствующих в спектре дрожания изображения (рис. 3, а), приведена в виде функций  $\mu(f)$  и  $\eta(f)$  на рис. 4.

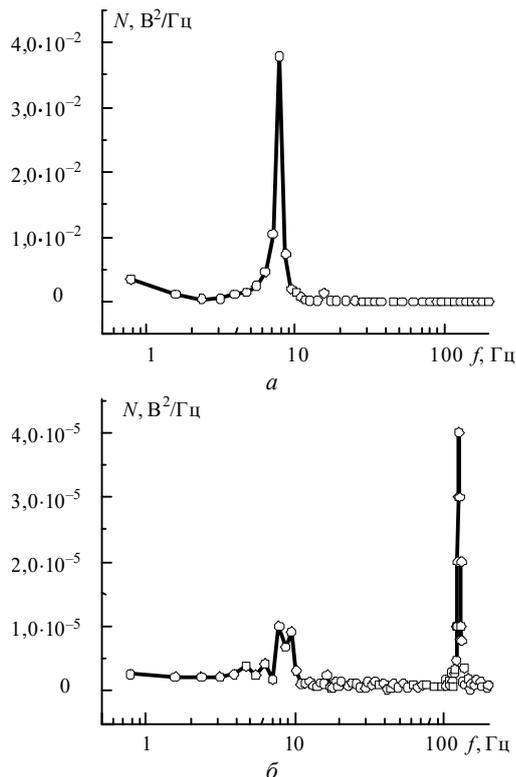


Рис. 3. Спектры мощности сигналов смещения изображения вдоль входной щели спектрографа: *a* – при разомкнутом контуре управления; *б* – при стабилизации изображения

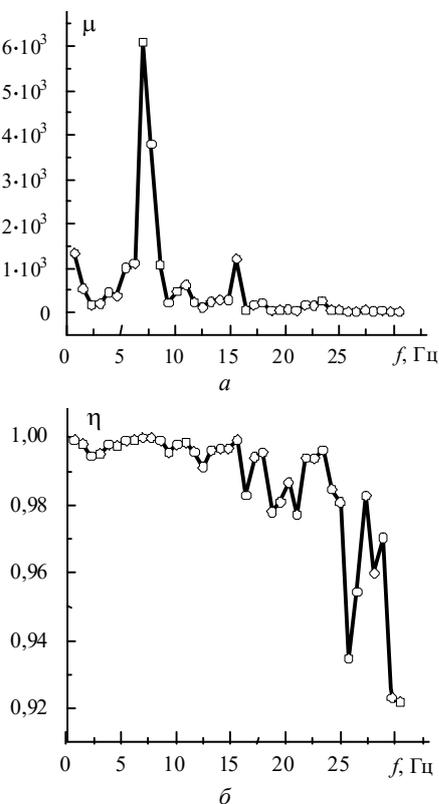


Рис. 4. Эффективность системы стабилизации изображения: *a* – частотная зависимость отношения спектральных плотностей мощности сигнала смещения изображения при разомкнутом и замкнутом контуре управления; *б* – частотная зависимость степени подавления дрожания изображения на щели спектрографа

Подобная обработка реализаций, записанных в разное время дня при северном и южном направлениях ветра от 3 до 10 м/с и температуре воздуха 14–20 °С в августе 1999 г., показала, что в сигналы смещения изображения основной вклад вносят гармоники на частоте ниже 30 Гц, которые эффективно обрабатываются следящей системой. Эффективность адаптивной системы, определяемая функцией  $\eta(f)$ , при сильных дрожаниях изображения оказалась выше 0,9 в диапазоне частот от 0 до 30 Гц (рис. 4, *б*). В то же время при сильном ветре в отдельных реализациях наблюдалось ограничение сигнала, т. е. система работала на пределе регулирования по выходному напряжению высоковольтных усилителей.

Эффективность системы в режиме с запоминанием исходного положения и стабилизации в этом положении изображения оказалась выше, чем в режиме «нуль-органа», т. е. в режиме стабилизации изображения в положении, при котором разность сигналов с верхних и нижних, с правых и левых квадрантов приемника равна 0. Вероятно, это связано с тем, что следящая система работала с фрагментом изображения на приемнике с неравномерной освещенностью вокруг изображения поры.

Анализируя спектры сигналов, записанных при различных условиях, мы заметили, что в первой половине дня наблюдаются преимущественные смещения изображения вдоль щели спектрографа (ось *X* системы), ближе к вечеру общая дисперсия дрожания изображения уменьшается, но преобладают смещения поперек щели.

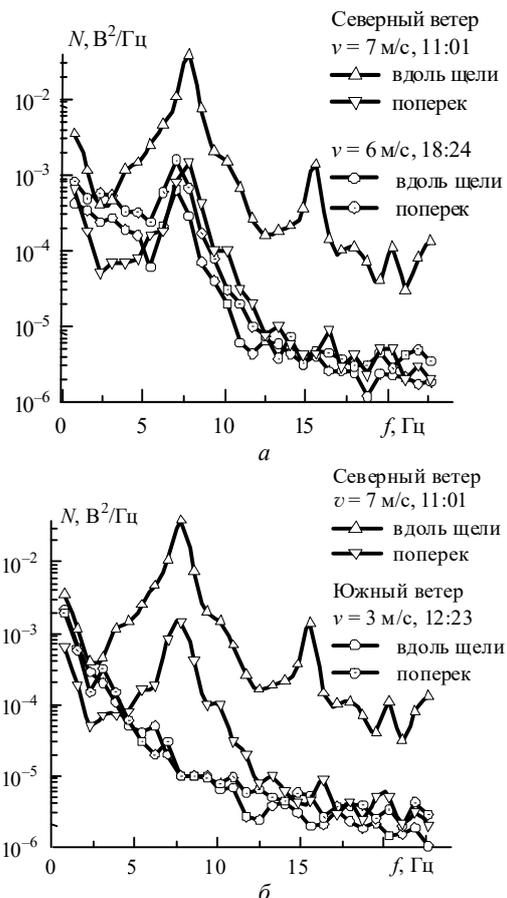


Рис. 5. Спектры мощности сигналов смещения изображения в зависимости от положения зеркала полярного сидеростата (*a*) и направления ветра (*б*)

На рис. 5, а представлены спектры мощности реализаций сигналов, записанных с 11:01 и с 18:24. Наблюдается максимум спектральной плотности мощности на частоте 7,8 Гц, и в спектре сигнала, записанного в первой половине дня, присутствует гармоника на удвоенной частоте максимума. Нами было сделано предположение, что эти дрожания связаны с вибрациями конструкции телескопа: колебаниями зеркала сидеростата относительно горизонтальной оси. Было проверено, что управление наклонами зеркала относительно этой оси в 11 ч приводит к преимущественному смещению изображения вдоль щели спектрографа, а в 18 ч, когда за счет часового ведения положение зеркала изменилось на угол чуть больше 90°, – поперек щели.

Дисперсия сигнала смещения изображения во втором положении зеркала значительно меньше, возможно это связано с тем, что направление ветра в этом случае совпадает с осью крепления зеркала, а в первом положении – перпендикулярно плоскости зеркала.

На рис. 5, б приведены спектры мощности реализаций сигналов смещения изображения, записанных при северном и южном направлениях ветра. К сожалению, метеоусловия не позволили записать реализации сигналов при одинаковой скорости ветра и строго в одно и то же время суток. При южном ветре наблюдается спадающий спектр, при северном ветре в спектре присутствует максимум на частоте 7,8 Гц. Дисперсия дрожания изображения при южном ветре существенно меньше, чем при северном.

Наблюдаемые особенности спектров, возможно, подскажут создателям БСВТ конструктивные решения для увеличения запаса устойчивости механической системы телескопа.

## Заключение

Экспериментальный вариант адаптивной оптической системы, прошедший испытание на БСВТ, обеспечил достаточно высокую степень стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной щели спектрографа, что позволило специалистам в области физики Солнца в совместном эксперименте увеличить время регистрации спектров до 300 с. Однако для постоянно действующей адаптивной системы на БСВТ необходимы создание нового управляемого зеркала, размеры которого соответствовали бы оптической схеме системы «телескоп – спектрограф» (не уменьшали светосилу системы), и усовершенствование элементов следящей системы с учетом выявленных особенностей функционирования экспериментального образца.

В заключение выражаем признательность сотрудникам ИСЗФ СО РАН за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований на уникальном инструменте и проявленный интерес к нашей работе и надеемся на дальнейшее сотрудничество.

1. Skomorovsky V.I., Firstova N.M. // Solar Physics. 1996. V. 163. P. 209–222.
2. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 5. С. 211–212.
3. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1472–1479.
4. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Лавринова Л.Н., Федоров В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 11. С. 1535–1538.
5. Berkefeld T., Glinde mann A. // Adaptive optics. July, 8–12. Maui, Hawaii. Technical digest series. 1996. V. 13. P. 206–208.

*L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, L.N. Lavrinova, V.P. Lukin, A.I. Petrov, B.V. Fortes, A.P. Yankov. Experimental adaptive optical system for Large Solar Vacuum Telescope. II. Efficiency of stabilization of solar disk image fragment on spectrograph entrance slit.*

The research results of experimental adaptive system efficiency of stabilization of the solar disk image fragment on the spectrograph entrance slit are submitted. The researches were carried out on the Large Solar Vacuum Telescope of the Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS. Depending on atmospheric conditions the variance of image jitter on a spectrograph slit in the system with adaptation decreased 16÷40 times. The relative error of regulation did not exceed 25%. The high degree of harmonics rejection in a spectrum of the image displacement signal in a range of frequencies 0–30 Hz was observed.