

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 621.375 : 551.52

**Л. В. Антошкин, Н. Н. Ботыгина, О. Н. Емалеев,
В. М. Григорьев, П. А. Коняев, В. П. Лукин, П. Г. Коваadlo,
В. И. Скоморовский, А. П. Янков**

(Томск – Иркутск)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ТЕЛЕСКОПА***

Рассмотрены возможности применения адаптивных оптических устройств для наземной солнечной астрономии и спектроскопии высокого разрешения. Предложены схемы адаптивных оптических систем с квадрантным и корреляционным датчиками смещения изображения. Приводятся результаты их испытания на Большом солнечном вакуумном телескопе Байкальской астрофизической обсерватории. Показано, что применение адаптивной системы с квадрантным приемником позволяет уменьшить дисперсию дрожания фрагмента изображения в окрестности поры в 16–40 раз (в зависимости от скорости ветра) и увеличить пространственное разрешение телескопа при спектроскопических исследованиях процессов на Солнце. Показано также, что эффективность стабилизации изображения с помощью адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком > 1 в диапазоне частот от 0 до 11 Гц. Обсуждаются пути дальнейшего развития адаптивной оптической системы солнечного телескопа.

Введение. Создание крупных астрономических приборов необходимо для получения изображения исследуемого объекта с высоким угловым разрешением и яркостью. Современным приоритетом в развитии астрономических приборов, работающих в условиях реальной атмосферы, является применение адаптивной оптики для снижения влияния атмосферы и технических искажений. Адаптивная оптика солнечных телескопов позволяет увеличить разрешающую способность наземных телескопов до уровня, необходимого для современного понимания процессов, происходящих на Солнце. В связи с этим возникает задача создания адаптивной оптической системы, работающей с различными участками изображения Солнца. Решению этой задачи посвящена предлагаемая работа. В ней анализируются воз-

Работа выполнена при поддержке гранта Сибирского отделения РАН (Интеграционный проект № 6); инициативных проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 00-02-17489, № 01-02-17389); грантов по поддержке экспедиционных исследований Российского фонда фундаментальных исследований (№ 01-02-31012, № 02-02-31021).

возможности двух адаптивных оптических систем: системы с квадрантным приемником и системы с корреляционным датчиком смещения изображения. Приводятся результаты экспериментальных исследований их работы в Большом солнечном вакуумном телескопе Института солнечно-земной физики СО РАН.

1. Макет адаптивной системы солнечного телескопа. Известно, что адаптивная оптическая система представляет собой развитие традиционных оптико-электронных систем путем включения дополнительных элементов, а именно: корректора волнового фронта (активного зеркала), измерителя искажения волнового фронта (датчика волнового фронта) и опорного источника, обеспечивающего оптический сигнал, который фиксирует датчик волнового фронта. Основным исполнительным элементом адаптивной системы является активное управляемое зеркало, которое может быть гибким или составным. Информация по управлению этим элементом извлекается с помощью специального измерителя искажений волнового фронта, называемого датчиком волнового фронта. В результате адаптивной коррекции качество изображения в телескопе может быть доведено до дифракционного, т. е. будет улучшено примерно в 10–25 раз.

В разд. 2 данной работы изложены основные результаты исследований за период 1999–2003 гг. В частности, проведены теоретические исследования предельных возможностей адаптивной фазовой коррекции искажений оптических волн, распространяющихся через турбулентную атмосферу. В первую очередь решались вопросы адекватности применяемых моделей атмосферной турбулентности для теоретического описания флуктуаций оптических волн в неоднородной атмосфере. Результаты обобщения многочисленных данных по моделям атмосферы для различных регионов мира приведены в работе [1]. Показана возможность корректного компьютерного моделирования распространения оптической волны через слой турбулентной среды [2].

В работах [3, 4] приведены результаты расчетов адаптивной коррекции турбулентных искажений в астрономическом телескопе наземного базирования при формировании изображения с помощью лазерной опорной звезды. Рассматривались бистатистические схемы формирования лазерной опорной звезды. Предложена принципиально новая схема, позволяющая осуществить измерения флуктуаций общего наклона волнового фронта. Кроме того, с использованием реальных моделей турбулентной атмосферы вычислен угол изопланатизма для случайных наклонов волнового фронта, тем самым определен предельный угловой разнос между направлением на опорный источник и на объект, изображение которого формируется с помощью адаптивной оптической системы [3, 4].

Корреляционная методика измерения смещения [5–7] оказалась более эффективной при измерении смещения изображения в условиях формирования мелкоструктурных низкоконтрастных изображений. Это могут быть участки солнечной поверхности, в которых отсутствуют солнечные пятна или поры, т. е. области спокойного Солнца.

1.1. Пьезоэлектрический привод для двухкоординатного управления угловым положением зеркала. Применение адаптивных оптических систем в астрономических и солнечных телескопах дает возможность существенно улучшить качество изображений за счет компенсации искажений волнового фронта, вызванных атмосферной турбулентностью. Адаптивные оптические системы первого порядка компенсируют наклоны волнового фронта

принимаемого излучения, что позволяет стабилизировать пространственное положение изображения изучаемого объекта. В качестве корректирующего элемента в таких системах используется управляемое по углам наклона зеркало. Нами разработана конструкция такого зеркала для стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной щели спектрографа Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) Института солнечно-земной физики СО РАН.

Разработанный привод содержит электронный блок и исполнительные устройства, созданные на основе пьезо пакетов из керамики. Сигналы управления формируются в решающем устройстве и через высоковольтные усилители подаются на пьезоэлектрические элементы, на которых закреплено зеркало. Элементы расположены в вершинах равностороннего треугольника. При воздействии сигналов управления на исполнительные устройства происходит линейная деформация пьезокерамики, что вызывает повороты зеркала. Для управления пьезоэлектрическими элементами разработан усилитель, обеспечивающий на емкостной нагрузке $C_H = 0,5$ мкФ напряжение ± 300 В в частотном диапазоне 0–100 Гц при коэффициенте усиления 30.

При разработке усилителя учитывалось, что при емкостном характере нагрузки наиболее оптимальное соотношение мощности, КПД и габаритов позволяет получить усилители с широтно-импульсной модуляцией. Однако ключевые усилители с широтно-импульсной модуляцией имеют существенные недостатки:

а) возникновение сквозных токов в выходных ключах при одновременном отпирании вызывает их перегрев и приводит к тепловому пробое выходных транзисторов;

б) импульсные помехи, возникающие при переключении выходных транзисторов, способствуют самовозбуждению привода на частоте механического резонанса.

Для повышения надежности работы и улучшения соотношения сигнал/шум в разработанном усилителе использовано триггерное включение компараторов сравнивающих устройств и стробирование в управлении выходными ключами, выполненными на биполярных статических индукционных транзисторах.

Конструкция управляемого зеркала представлена на рис. 1. Зеркало 1 диаметром 80 мм, толщиной 10 мм и массой 150 г приклеено металлополимерным клеем к трем пьезоэлектрическим элементам 3 через опоры 2 с трением упругости. Упругие элементы опор создают противодействующие моменты одновременно в двух плоскостях при различных ориентациях зеркала. Опоры выполнены из бериллиевой бронзы. Диаметр шейки опор и высота равны 2 мм. Выбранные размеры упругого элемента обеспечивают необходимую жесткость конструкции. Пьезоэлектрические элементы 3 склеены эпоксидным оптическим клеем из шести кольцевых пьезопакетов 4 размером $30 \times 18 \times 5,5$ мм, изготовленных из тонких пьезокерамических пластин, и установлены на массив-

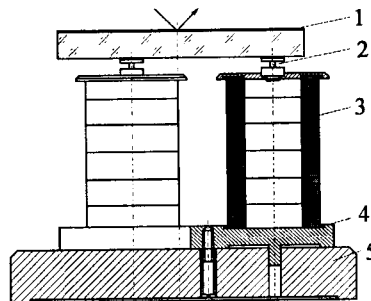


Рис. 1. Схема конструкции активного зеркала

ном основании 5. Электрически пьезопакеты в элементе соединены параллельно. Суммарная емкость элемента равна 0,5 мкФ.

Пьезоэлектрический привод прошел испытание на лабораторном стенде. Технические характеристики управляемого зеркала: максимальный угол поворота $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ рад; быстродействие 170 мкс; резонансная частота 2 кГц; рабочий диаметр зеркала 76 мм; толщина зеркала 10 мм; масса зеркала 150 г; емкость элемента 0,5 мкФ.

1.2. *Исследование «дневного астроклимата» точки размещения БСВТ.* Как известно, построение адаптивных оптических систем требует знаний о состоянии турбулентности того региона, где будет располагаться оптическая система. Для задач наблюдательной астрономии (в нашем случае задачи получения высококачественных изображений в солнечном телескопе) проводятся исследования высоких изолированных вершин, расположенных как внутри обширных горных массивов, так и на островах в океане, которые показали их несомненное преимущество для получения предельно высокого качества изображений при ночных и дневных наблюдениях перед другими формами рельефа. Качество изображения на этих пунктах определяется преимущественно турбулентностью свободной атмосферы. В замкнутых котловинах сравнительно небольших размеров, наполненных водой, какой является Байкальская котловина, нижний слой воздуха устойчиво стратифицирован. При штиле и слабых ветрах воздух до высоты формирующих котловину горных цепей (1,5–3 км) в пределах котловины мало турбулизируется практически до высоты свободной атмосферы, т. е. складываются условия, близкие к условиям высоких изолированных вершин. Вероятность реализации высокого качества из-за локальных источников турбулизации здесь, несомненно, ниже, однако это, безусловно, имеет перспективу. На таких пунктах приобретает особую важность оснащение телескопов адаптивными оптическими системами (АОС), что повысит их конкурентоспособность. Поскольку качество работы АОС прямо определяется астроклиматическими условиями, то требования к пункту установки телескопов высокого разрешения остаются жесткими. В рамках данной работы выполнены теоретические исследования влияния подстилающей поверхности на астроклимат [8, 9].

2. **Результаты испытания макета экспериментальной адаптивной оптической системы БСВТ.** В настоящее время в целом решена задача создания различных адаптивных зеркал и датчиков волнового фронта. Однако нельзя сказать, что тем самым проблема полностью решена. Наиболее проблемным на сегодняшний день является опорный источник, оптическое излучение которого несет информацию об аберрациях волнового фронта. Вот как выглядят различные аспекты проблемы выбора или формирования опорного источника для системы адаптивной оптики в солнечной и звездной астрономии.

Яркость источника. Далеко не каждая звезда имеет яркость, достаточную для обеспечения измерения аберраций даже в режиме счета фотонов. Поэтому довольно интенсивно развивается техника формирования лазерной опорной звезды. В солнечной астрономии света обычно более чем достаточно.

Размер источника. В то же время звезда – точечный объект, удаленный практически на бесконечное расстояние, что очень удобно для измерения аберраций, которые совпадают с флуктуациями оптической длины пути, когда речь идет об атмосферной турбулентности. Солнце – звезда в астрофизи-

ческом смысле, но использовать изображение его диска целиком можно только для коррекции ошибки часового ведения.

Эффекты неизопланатизма. Под термином «неизопланатизм» (в отношении адаптивной коррекции турбулентного расплывания изображения) понимают уменьшение корреляции между абберациями волнового фронта, формируемыми падающим под разными углами излучением, при увеличении углового расстояния между источниками. Угловой размер астрономического объекта (звезды), как правило, много меньше угла неизопланатизма, который составляет около 10 угл. с, а угловой размер Солнца составляет примерно 2000 угл. с.

В работах [3–5] предлагается для измерения атмосферных и/или инструментальных аббераций в солнечном телескопе опорным источником использовать темное пятно (пору) или даже грануляционную сетку фотосферы, контраст которой относительно средней яркости изображения составляет всего несколько процентов.

2.1. *Макет экспериментальной адаптивной системы для БСВТ.* Большой солнечный вакуумный телескоп построен Институтом солнечно-земной физики СО РАН и является частью Байкальской астрофизической обсерватории (БАО). Он установлен на расстоянии примерно 1 км от берега озера Байкал (на сопке) на высоте приблизительно 400 м над его уровнем и 700 м над уровнем моря. Питающей оптикой телескопа является сидеростат, диаметр следящего зеркала которого 1 м. Пространственное разрешение телескопа составляет примерно 5 угл. с в 1 мм изображения. Типичные размеры теней темных пятен составляют от 5 до 15 угл. с, что соответствует 1–3 мм в плоскости изображения. Это и позволяет выполнять спектральные измерения с достаточно высоким пространственным разрешением. Однако проведению научных наблюдений препятствует несколько эффектов, обусловленных следующими факторами.

1. *Турбулентное размытие и дрожание изображения.* Величина этого эффекта зависит от времени года, погодных условий, состояния подстилающей поверхности и времени дня и составляет по нашим оценкам величину от 1 до 5 угл. с, т. е. от 0,2 до 1 мм в плоскости изображения.

2. *Ветровое дрожание,* обусловленное действием ветра на элементы конструкции телескопа, в частности на следящее зеркало диаметром 1 м. Зеркало имеет достаточно большую парусность и только с задней стороны частично защищено северной стенкой купола от порывов ветра. Величина размаха ветрового дрожания изображения (в миллиметрах) равна примерно половине величины скорости ветра (в метрах в секунду), достигая 5 мм при скорости ветра 10 м/с. Характерная частота этого дрожания по результатам наших измерений равна 7,8 Гц.

3. *Дрейф изображения* может быть обусловлен как ошибками часового ведения, так и суточным вращением изображения Солнца, обусловленным сидеростатной конструкцией телескопа. Изображение Солнца делает полный оборот за 24 часа, так что точка, расположенная на расстоянии $2/3$ радиуса от центра изображения Солнца, движется по окружности со скоростью 35 мм/ч, т. е. примерно 0,6 мм/мин. При наблюдении заданной области в течение нескольких минут величина дрейфа начинает превышать не только турбулентные, но и ветровые смещения. Оценки, полученные в ходе экспедиции «Байкал–98» в июле–августе 1998 г., легли в основу первого макета (рис. 2) адаптивной системы для компенсации дрожания и дрейфа изображения.

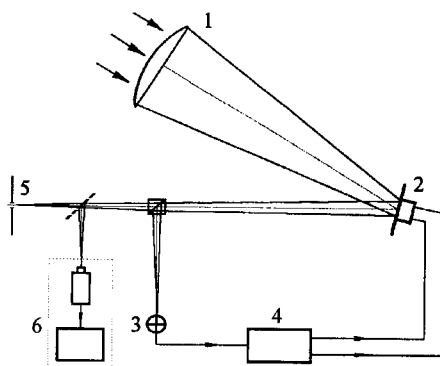


Рис. 2. Схема первого варианта макета адаптивной оптической системы: 1 – объектив телескопа; 2 – управляемое зеркало; 3 – приемное устройство; 4 – устройство управления; 5 – входная щель спектрографа; 6 – устройство для оптического контроля качества стабилизации изображения

Цель создания первого макета – демонстрация возможности улучшить характеристики и увеличить время эффективного использования

БСВТ с помощью адаптивной оптики, а также получить опыт работы с солнечным телескопом.

Нами были предложены следующий состав и размещение элементов адаптивной системы:

1. *Адаптивное зеркало (АЗ)*, управляемое по двум углам, навешивается непосредственно на диагональное зеркало телескопа. Характеристики АЗ: диаметр 36 мм; тип привода – биморфный пьезоэлемент; полный размах угла наклона отраженного луча по каждой из осей при подаче напряжения ± 300 В – 1,44 мрад; частота механического резонанса 120 Гц. Поскольку диагональное зеркало, на которое навешено АЗ, находится на расстоянии 2,8 м от плоскости изображения, это позволяет компенсировать линейные смещения изображения с размахом до 4 мм. При этом происходило некоторое виньетирование эффективного зрачка системы, уменьшающее интенсивность на оси изображения почти вчетверо. Расчет показывает, что для сохранения интенсивности изображения по всей высоте щели спектрографа (30 мм) диаметр АЗ должен быть 10–12 см.

2. *Датчик смещений*. В качестве датчика смещений изображения в данном эксперименте использовался квадрантный фотодиод ФДК-142 диаметром 13,7 мм, расположенный в плоскости изображения. Светоделительный кубик размером 3 см, находящийся на расстоянии 40 см от щели спектрометра, отводит примерно половину светового потока на этот датчик. Освещенность датчика составляет приблизительно четверть полной яркости изображения, которая равна ~ 300000 лк вне области темного пятна. Интегральная чувствительность каждого элемента датчика составляет 1 мА/лм, а величина темнового тока 16 мкА.

3. *Электронный блок управления* включает высоковольтные усилители, подающие напряжение на пьезокерамику АЗ, и решающее устройство, на которое поступают четыре сигнала с датчика смещений, прошедших предусилители. Решающее устройство построено на основе логических интегральных микросхем и осуществляет выработку сигнала управления независимо по каждой из двух координат. Поскольку система работает в замкнутом контуре, алгоритм управления основан на поиске величины управляющего сигнала, при котором сигналы с левой и правой, а также верхней и нижней частей датчика равны между собой.

2.2. *Результаты эксперимента по компенсации дрожания солнечного пятна*. Испытания адаптивной системы проводились в течение нескольких ясных солнечных дней. В качестве опорного объекта для датчика адаптивной системы было выбрано довольно большое круглое пятно диаметром пример-

лось в центр датчика при выключенном управлении – подавался управляющий сигнал на адаптивное зеркало. При этом визуально было заметно существенное уменьшение амплитуды дрожания изображения. Для количественной оценки величины остаточного дрожания использовались два канала: электронный и оптический.

Электронный канал включал аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключенный к компьютеру, на который подавался разностный сигнал с квадрантного приемника (датчика дрожания). Разность электрических сигналов с левой и правой (или верхней и нижней) частей соответствует разности их освещенности и равна нулю, когда темное пятно находится точно в центре датчика. Эффективность подавления дрожания оценивалась как отношение дисперсий сигналов при выключенном и включенном управлении.

Одновременно контроль эффективности коррекции проводился и с помощью видеокамеры SONY-740 с последующим вводом оцифрованного кадра в компьютер через плату видеоввода с разрешением 320×288 пиксел. Для удобства сигнал подавался также и на телевизионный монитор. Каждый пиксел в выбранном нами масштабе изображения соответствовал $0,1$ мм ($0,5$ угл. с). Для каждого кадра программно рассчитывалось положение центра тяжести пятна, а затем для всей последовательности кадров определялась дисперсия смещения центра тяжести по каждой из координат и разность между максимальным и минимальным значениями координаты центра тяжести.

Удалось достичь скорости прямой обработки 5 кадр./с. Использовался компьютер с процессором AMD K2-6 с тактовой частотой 300 МГц. При обработке кадра выделялось квадратное окно поперечным размером 100 пиксел. Окно помещалось в центр кадра вручную, а затем программно перемещалось вслед за вычисленным центром тяжести.

Эффективность системы по данным видеоконтроля можно оценить как в абсолютных, так и относительных величинах. Поскольку мы вычисляем положение центра тяжести пятна, то можем сказать, с какой точностью (в миллиметрах или в угловых секундах) можно стабилизировать изображение. С другой стороны, можем вычислить, во сколько раз уменьшаем дрожание изображения с помощью нашей системы.

Относительная эффективность зависит как от характеристик самой системы, так и от погодных условий, определяющих исходную величину дрожания. Приведем пример для средних погодных условий. Скорость ветра в период наблюдений менялась от $2-3$ до $8-10$ м/с. Поскольку скорость ветра во многом определяет амплитуду дрожания изображения, возьмем среднюю скорость ветра 6 м/с. В таблице приведены среднеквадратичные отклонения (СКО) и значения размаха смещения центра тяжести темного пятна (поры) на

Среднеквадратичные отклонения и значения размаха смещения центра тяжести

с коррекцией		без коррекции	
СКО	max	СКО	max
0,84	4,3	3,6	16
0,88	4,6	3,7	16

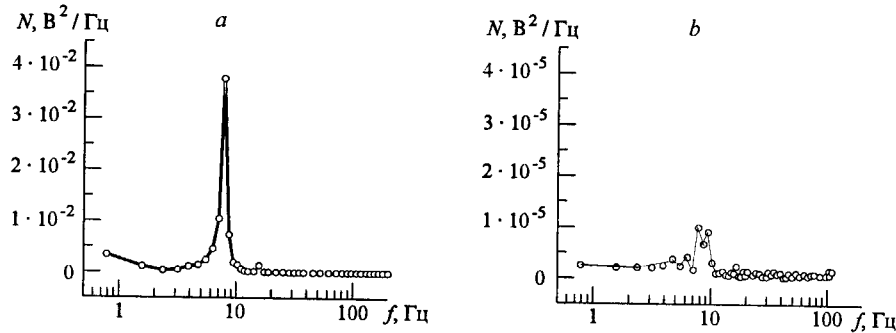


Рис. 3. Спектры мощности сигналов смещения изображения вдоль входной щели спектрографа: при разомкнутом контуре управления (а), при стабилизации изображения (б)

изображении Солнца. Значения приведены в пикселях для четырех 30-секундных реализаций: две из них с включенной системой, а две с выключенной. Эти значения получены как средние геометрические по двум осям. Как видно из таблицы, дрожание изображения уменьшается примерно вчетверо как по среднеквадратичному отклонению, так и по значению размаха. В терминах дисперсии дрожания выигрыш получается примерно в 18 раз. Аналогичные оценки эффективности получаются в электронном канале: дисперсия флуктуаций электрического сигнала с датчика дрожания (квадрантного детектора) при включении контура коррекции уменьшалась в 10–16 раз, а в некоторых случаях, например при сильном ветре, до 25 раз. Динамические особенности следящей системы отражены на рис. 3 и рис. 4. Таким образом, данная адаптивная система способна значительно (в несколько раз) уменьшить дрожание, стабилизируя изображение с погрешностью не хуже 0,5 мм в размахе.

Здесь необходимо отметить некоторые особенности ветровой компоненты дрожания изображения, обнаруженные в ходе эксперимента. Она, как выяснилось при анализе проекций дрожания на оси часового ведения и склонения, существенно не изотропна. Оказалось, что величина дрожания по оси склонения, особенно при сильном ветре, в несколько раз превышает дрожание изображения по оси ведения. Скорее, это объясняется особенностью крепления следящего зеркала, которое наиболее чувствительно к порывам ветра.

3. Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения изображения. На основе анализа результатов испытания первого макета был изготовлен макет измерителя смещения фрагмента изображения, обеспечивающий работоспособность в условиях малых вариаций интенсивности и работающий по корреляцион-

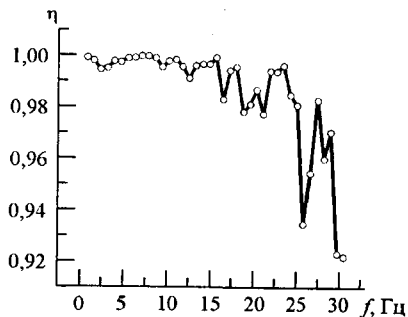


Рис. 4. Частотная зависимость степени подавления гармоник, присутствующих в спектре дрожания изображения. $\eta(f) = \frac{N_1(f) - N_2(f)}{N_1(f)}$, где $N_1(f)$ и

$N_2(f)$ – спектральные плотности мощности сигнала смещения изображения в системе без стабилизации изображения и при стабилизации изображения на щели спектрографа соответственно

ной методике. В качестве первичного датчика этого измерителя использована коммерческая видеокамера. Создана система ввода изображения в память персонального компьютера с частотой 25–30 кадр./с при размере кадра 256×256 элементов анализа. При создании нового макета, установленного непосредственно на телескопе, использовалась видеокамера фирмы «ДАЛСА». Измеритель и система управления активным зеркалом реализованы на основе персонального компьютера с тактовой частотой процессора 550 МГц. Такая скорость и соответствующий алгоритм вычислений обеспечивают выполнение необходимых расчетов с частотой обработки кадра в реальном масштабе времени (между кадрами снятия данных).

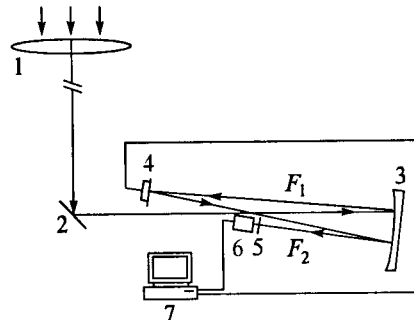
3.1. *Макет корреляционного датчика смещения изображения.* В рамках развития работ [10, 11] по созданию адаптивной оптической системы на БСВТ Байкальской астрофизической обсерватории создан модернизированный макет адаптивной системы с корреляционным датчиком и проведены его испытания на лабораторном стенде. Исследования макета корреляционного датчика [12] были проведены на структурах изображения, близких по угловым масштабам и контрасту к реальным изображениям, получаемым на солнечных телескопах.

В данном разделе приводятся результаты испытаний адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком смещения изображения на БСВТ. Оптическая схема адаптивной системы для работы на солнечном телескопе с корреляционным датчиком смещения изображения представлена на рис. 5. С помощью диагонального зеркала часть излучения, формирующего изображение Солнца, отводится в адаптивную систему. Сферическое зеркало и объектив телескопа образуют телескопическую систему, в выходном зрачке которой находится управляемое зеркало. Зеркала переносят изображение из плоскости вблизи фокуса F_1 в плоскость вблизи фокуса F_2 . Изображение регистрируется видеокамерой и с помощью специально разработанного контроллера вводится в компьютер для вычисления смещения изображения и формирования сигналов управления, которые через контроллер с интерфейсом RS-232 подаются на пьезоэлектрический привод [13] управляемого зеркала. Для функционирования адаптивной системы разработан специализированный пакет программ, позволяющий:

а) выводить изображение на экран монитора; выбирать режим работы системы, тем самым обеспечивая просмотр изображения, измерение, слежение; просматривать на экране распределение освещенности в выбранном сечении;

б) 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;

Рис. 5. 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 «ДАЛСА» (256×256 элементов, 8-разрядное АЦП, 203 кадр./с); 7 – компьютер (Pentium III, 550 МГц, видеокарта ASUS AGP-V3800 Pro/TV)



в) записывать в файлы изображение, с которым работает система, условия проведения измерений, а также вычисленные координаты смещения изображения, сигнал управления.

3.2. *Методика измерений и результаты.* Корреляционная методика измерения смещения фрагмента изображения заключается в следующем: запоминается опорный кадр и далее рассчитывается взаимная корреляционная функция распределения освещенности опорного и любого заранее выбранного 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 макета адаптивной системы проводились на БСВТ в августе 2001 года. Различные структуры (грануляционная картина, солнечные поры и пятна, группы пятен и пор) в пределах конечного фрагмента изображения поверхности Солнца имеют различную контрастность. Например, контрастность грануляционной картины в среднем составляет 1,5–2 %, поэтому работать с такой структурой 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. Поэтому нами в качестве объекта слежения использовалось изображение небольшого солнечного пятна или поры.

На рис. 6 показано распределение освещенности грануляционной картины, зарегистрированной видеокамерой без объектива. Время экспозиции составляло примерно 5 мс. ПЗС-матрица камеры находилась в фокусе телескопа. Для ослабления светового потока использовались нейтральные светофильтры и интерференционный светофильтр на длине волны 0,589 мкм. Поле зрения видеокамеры составляло 21×21 угл. с, разрешение около 0,08 угл. с. Регистрировалась область грануляции вблизи небольшой солнечной поры в изображении. 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. На рис. 6, *b* выделено одно сечение в масштабе, удобном для рас-

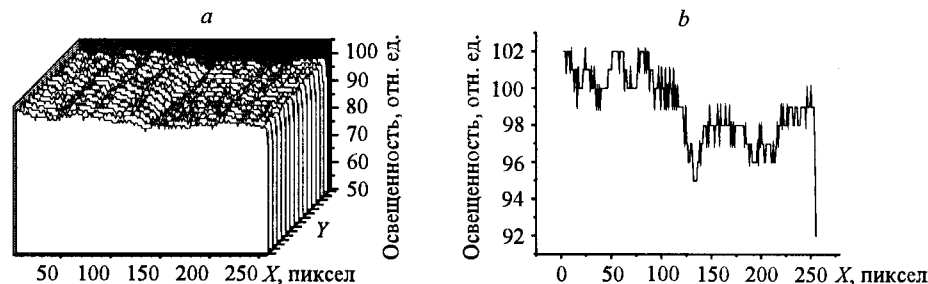


Рис. 6. Распределение освещенности грануляционной картины. Фрагмент изображения, соответствующий полю зрения $20,5 \times 1,2$ угл. с, (а) и отдельное сечение (б). (1 пиксел = 0,08 угл. с)

смотрения мелкой структуры. Полученное изображение использовалось в модельном эксперименте для анализа работы корреляционного датчика с изображением такого типа. Исследования, проведенные в рамках модели, показали, что для эффективной работы корреляционного датчика с фрагментом изображения солнечного диска в виде грануляционной картины в качестве регистратора необходима менее шумящая видеокамера с большим динамическим диапазоном и более высокоразрядным АЦП.

Чтобы проверить работу созданного макета адаптивной системы при ее максимально возможном быстродействии, 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 соответствует полю зрения адаптивной системы $24,80 \times 16,50$ угл. с. При таком окне анализа длительность цикла измерение–управление равнялась 17,8 мс. Макет системы работал с изображениями мелких солнечных пятен и пор. Контрастность изображений 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. 5) 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:

1) относительной ошибкой слежения: $\sigma_{\text{er}} / \sigma_{\text{c}}$, где σ_{er} и σ_{c} – среднеквадратичные отклонения сигналов рассогласования и управления;

2) эффективностью подавления спектральных составляющих дрожания изображения: $|S(f)|^2 / |S(f)_{\text{er}}|^2$, где $|S(f)|^2$ и $|S(f)_{\text{er}}|^2$ – 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. 7. Для наглядности контраст рисунка увеличен. Объектом слежения является изображение солнечного пятна размером 9 угл. с по уровню 0,5 глубины модуляции освещенности. Контрастность изображения составляла 8 %.

На рис. 8 приведен спектр мощности сигнала дрожания изображения при разомкнутом контуре управления. На рис. 9 представлены спектры мощности сигналов рассогласования (а) и управления (б) и их сравнение (с). Для получения спектров рис. 8 и 9 использовались реализации длительностью 17,8 с, записанные в режиме измерения и слежения последовательно с

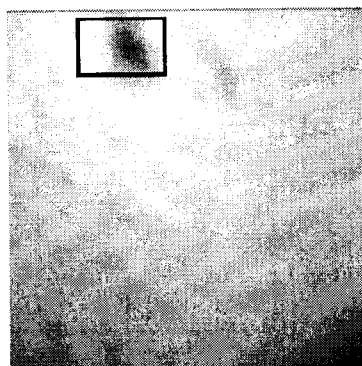


Рис. 7. Фрагмент изображения солнечного диска.

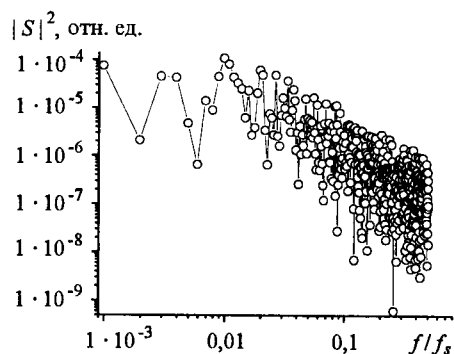


Рис. 8. Спектр мощности сигнала дрожания изображения

интервалом в несколько секунд. Частота снятия отсчетов f_s равнялась 56 Гц. На рис. 10 показана эффективность подавления дрожания изображения на различных частотах. Из этого рисунка видно, что эффективность системы стабилизации изображения >1 в диапазоне частот от 0 до 11 Гц.

Что касается ошибки слежения, то во всех случаях, когда в опорный кадр полностью попадало пятно, относительная ошибка слежения в среднем составляла 50 %.

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 корреляционного метода вычисления смещения реального изображения, записанного в условиях конкретной реализации при заданном начальном положении и размере окна анализа. Оказалось, когда солнечное пятно полностью попадает в опорный кадр, позиционная характеристика датчика линейна. Если в опорный кадр попадает только часть солнечного пятна, корреляционный датчик работает неверно. Поэтому для оценки быстродействия реальной системы в обработку брались только те реализации, в которых в опорный кадр пятно попадало полностью. В этом случае ошибка слежения реаль-

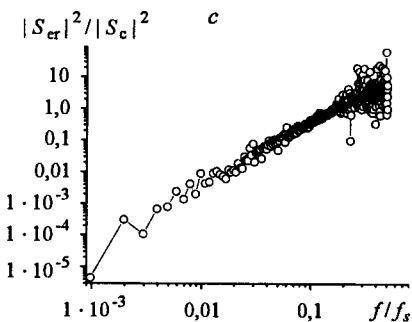
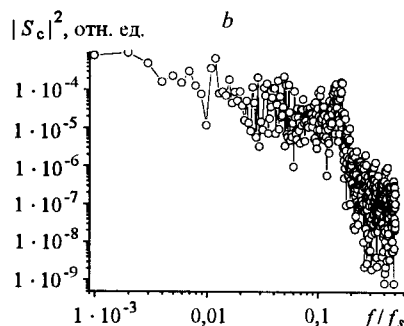
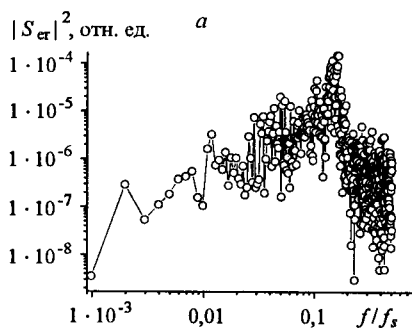
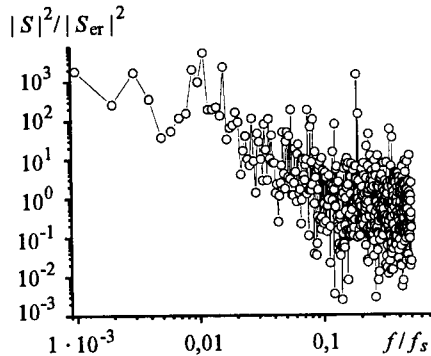


Рис. 9. Спектры мощности сигналов рассогласования (а) и управления (б) и их сравнение (с)

Рис. 10. Частотная зависимость эффективности подавления дрожания изображения



ной 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. Таким образом, экспериментальные исследования позволили определить возможности созданных адаптивных оптических систем при работе с различными фрагментами изображения солнечного диска.

Так, адаптивная оптическая система с квадрантным приемником в качестве датчика смещения изображения, работающая с солнечным пятном или порой, обеспечила высокую степень стабилизации фрагмента изображения Солнца на входной щели спектрографа. Степень подавления гармоник с частотами от 0 до 30 Гц, вносящих основной вклад в дисперсию дрожания изображения, оказалась равной 0,9. Но такая система не может работать с грануляционной картиной.

В свою очередь, испытания адаптивной оптической системы с корреляционным датчиком смещения изображения показали, что с помощью такой системы можно компенсировать дрожание изображения мелких солнечных пятен и пор на частотах до 11 Гц. Для улучшения качества стабилизации изображения с помощью этой системы необходимо увеличить пространственное разрешение корреляционного датчика и существенно повысить быстродействие системы (на порядок и более), а для этого одновременно увеличить окно анализа и значительно сократить длительность цикла измерения—управление.

Дальнейшее развитие адаптивных оптических систем для интеграции их в состав солнечного телескопа предполагает как использование датчиков нового поколения, основанных на достижениях современной компьютерной техники, так и создание простого интерфейса управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов В. В., Лукин В. П., Носов Е. В. Высотные профили интенсивности атмосферной турбулентности. Ч. II. Основные экспериментальные результаты // Изв. вузов. Физика. Деп. 29.11.2000, № 3125-B2000.
2. Kanev F. Yu., Lavrinova L. N., Lukin V. P. Possibility of adaptive correction for atmospheric turbulent layer // Proc. SPIE. 2000. 4341. P. 135.
3. Лукин В. П. Новая схема формирования бистатической опорной лазерной звезды // Оптика атмосферы и океана. 2000. 13, № 8. С. 763.
4. Lukin V. P. Tip-tilt problem and new design of LGS schemes // Selected Papers, SPIE Press. 2000. 4338. P. 127.
5. Von der Luhe O. Solar adaptive optics // Adv. Spac. Res. 1991. 11, N 5. P. 275.

6. **Von der Luhe O., Widener A. L., Rimmele T. et al.** Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes // *Astronomy and Astrophysics*. 1989. **224**. P. 351.
7. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. **15**, № 11. С. 1027.
8. **Лукин В. П., Носов В. Е., Носов В. В.** Влияние подстилающего рельефа на дрожание астрономических изображений // Тез. докл. междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2001. С.129.
9. **Lukin V. P.** Model of atmospheric turbulence and reference beacon design // *Proc. SPIE*. 2000. **4007**. P. 330.
10. **Лукин В. П., Фортес Б. В., Антошкин Л. В. и др.** Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. I. Результаты тестирования и перспективы развития // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. **12**, № 12. С. 1161.
11. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Лукин В. П. и др.** Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. II. Эффективность стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной щели спектрографа // *Оптика атмосферы и океана*. 2000. **13**, № 4. С. 420.
12. **Конуяев Р. А., Lukin V. P., Botygina N. N. et al.** Tip-tilt image correction using a correlation tracker // VIII Joint Intern. Symp. "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics". Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2001. P. 118.
13. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Пьезоэлектрический привод для двухкоординатного управления угловым положением зеркала // *Приборы и техника эксперимента*. 2002. № 1. С. 144.

*Институт оптики атмосферы СО РАН,
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
E-mail: lukin@iao.ru*

*Поступила в редакцию
16 июня 2003 г.*