

**В.П. Лукин, Б.В. Фортес, Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев,
Л.Н. Лавринова, А.И. Петров, А.П. Янков, А.В. Булатов*, П.Г. Ковadlo*, Н.М. Фирстова***

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА. I. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

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

Поступила в редакцию 1.11.99 г.

Рассматриваются возможности применения адаптивной оптики для наземной солнечной астрономии и солнечной спектроскопии высокого разрешения. Описываются экспериментальная адаптивная система компенсации дрожания изображения и результаты ее тестирования. Обсуждаются различные пути развития адаптивной оптики для Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории.

1. Введение

Целью проектов создания крупных астрономических приборов является получение высококачественного изображения исследуемого объекта, т.е. изображения с высоким угловым разрешением и яркостью. Этого достигают путем увеличения размера зрачка телескопа. Однако по мере увеличения зрачка оптической системы вместе с уменьшением дифракционного размытия изображения начинают проявляться и факторы, действующие в противоположном направлении, – увеличиваются турбулентное размытие, aberrации оптической системы и другие инструментальные ошибки [1, 2].

Задачей адаптивных оптических систем, дополняющих основную оптическую систему телескопа, является противодействие этим негативным факторам. Основным исполнительным элементом адаптивной системы является пространственный модулятор оптической длины пути, например управляемое гибкое или составное зеркало, т.е. адаптивный корректор aberrаций. Информация для подачи управлений извлекается из оптической волны датчиком aberrаций. На сегодняшний день известно довольно много схем датчиков и корректоров aberrаций, а также и способов замыкания контура адаптивной коррекции.

2. Особенности использования адаптивной оптики для солнечной астрономии

Пожалуй, наибольшего развития системы адаптивной оптики достигли в звездной астрономии. На сегодняшний день в целом решена задача создания различных адаптивных зеркал и датчиков волнового фронта. Однако нельзя сказать, что тем самым проблема полностью исчерпана. Наиболее узким местом на сегодняшний день является опорный источник, оптическое излучение которого несет информацию об aberrациях волнового фронта. Интересно, что здесь солнечная и звездная астрономия похожи друг на друга с точностью до «наоборот». Вот как выглядят различные аспекты проблемы выбора или формирования опорного источника для системы адаптивной оптики в этих двух направлениях астрономии.

Яркость источника

Далеко не каждая звезда имеет яркость, достаточную для обеспечения измерения aberrаций даже в режиме счета фотонов. Поэтому достаточно 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 aberrаций, которые совпадают с флуктуациями оптической длины пути, когда речь идет об атмосферной турбулентности. Солнце – звезда в астрофизическом 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 aberrациями волнового фронта, формируемыми под разными углами при увеличении этого углового расстояния. Угловой размер астрономического объекта (звезда), как правило, много меньше угла изопланатизма, который составляет около 10 угл. с, а угловой размер Солнца составляет примерно 2000 угл. с.

Ряд авторов предлагает для измерения атмосферных и (или) инструментальных aberrаций в солнечном телескопе в качестве опорного источника использовать темное пятно или даже грануляционную сетку фотосферы, контраст которой относительно средней яркости изображения составляет всего несколько процентов [3–5].

3. Экспериментальная адаптивная система

Прежде всего нужно сказать несколько слов о самом БСВТ. Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) построен Институтом солнечно-земной физики СО РАН на берегу Байкала. Он входит в состав Байкальской астрофизи-

ческой обсерватории (БАО) и расположен на расстоянии примерно 1 км от берега Байкала на сопке, на высоте приблизительно 400 м над уровнем Байкала и на высоте 700 м над уровнем моря. Телескоп был создан для спектроскопии Солнца высокого разрешения. Питающей оптикой телескопа является сидеростат, диаметр следающего зеркала которого 1 м. Линзовая система с размером зрачка 76 см и фокусным расстоянием 40 м дает в фокальной плоскости изображение Солнца размером 38 см. Это соответствует пространственному разрешению примерно 5 угл. с в 1 мм изображения. Типичные размеры тени 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 следающее зеркало диаметром 1 м. Зеркало имеет достаточно большую парусность и только с задней стороны частично защищено северной стенкой купола от порывов ветра. Размах ветрового дрожания изображения, выраженный в миллиметрах, примерно равен половине скорости ветра, выраженной в метрах в секунду, достигая 5 мм при скорости ветра 10 м/с. Характерные частоты этого дрожания, в герцах, по нашим оценкам, примерно равны отношению скорости ветра в м/с к размеру телескопа в метрах, т.е. определяются формулой $f = V/D$, где V – скорость ветра, D – диаметр зеркала. Заметим, что эта же формула, согласно теории турбулентных aberrаций, дает максимум спектра турбулентного дрожания.

3. *Дрейф изображения* может быть вызван как ошибками часового ведения, так и суточным вращением изображения Солнца, обусловленным сидеростатной конструкцией телескопа. Изображение Солнца делает полный оборот за 24 ч, 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.

Эти оценки, полученные нами в ходе экспедиции «Байкал-98» в июле – августе 1998 г., легли в основу проекта прототипа адаптивной системы для компенсации дрожания и дрейфа изображения. Этот прототип был создан для того, чтобы:

а) продемонстрировать возможности улучшения характеристик и увеличения времени эффективного использования БСВТ с помощью адаптивной оптики;

б) получить опыт работы с солнечным телескопом, а также глубже понять особенности наблюдательной солнечной астрономии и место адаптивной оптики в эксплуатации телескопа, с одной стороны, и получить новые фундаментальные знания о физике Солнца – с другой.

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 каждому направлению 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, то это позволяет компенсировать линейные смещения изображения с размахом до 4 мм. При этом происходит 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 в данном эксперименте использовался квадратный фотодиод ФДК-142 диаметром 13,7 мм, находящийся в плоскости изображения. Светоделительный кубик размером 3 см, расположенный на расстоянии 40 см от щели спектрометра, отводит примерно половину светового потока на этот датчик. Освещенность датчика составляет приблизительно четверть полной яркости изображения, составляющей около 300 тыс. лк вне области темного пятна. Интегральная чувствительность каждого элемента датчика составляет 1 мА/лм, а среднеквадратическая величина темнового тока – 16 мкА.

3. *Электронный блок управления* включает в себя высоковольтные усилители, подающие напряжение на пьезокерамику АЗ, и решающее устройство, на которое поступают 4 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, то алгоритм управления основан на поиске величины управляющего сигнала, при котором сигналы с левой и правой, а также верхней и нижней половин датчика равны между собой.

4. Результаты эксперимента по компенсации дрожания солнечного пятна

Испытания адаптивной системы проводились в течение нескольких ясных солнечных дней в период с 20 по 30 августа 1999 г. В качестве опорного объекта для датчика адаптивной системы было выбрано довольно крупное круглое пятно диаметром примерно 3 мм. С помощью пульта ручного управления телескопом пятно подводилось на центр датчика при выключенной адаптивной системе, после чего замыкался электронный контур управления и управляющий сигнал подавался 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 квадратного приемника (датчика дрожания). Разность электрических сигналов с левой и правой (или верхней и нижней) половин датчика 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 после-

дующим вводом оцифрованного кадра в компьютер через плату видеоввода MiRo DC10 с разрешением 320×288 пикселей. Для удобства сигнал подавался также и на телевизионный монитор (цветной телевизор диагональю 54 см). Каждый пиксель 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 определялись дисперсия положения центра тяжести по каждой из координат и разность между максимальным и минимальным значением координаты центра тяжести.

Удалось достичь скорости прямой обработки 5 кадр./с (без записи исходного сигнала на видеоленту или оцифрованного сигнала на магнитный диск). Использовался компьютер с процессором AMD K2-6 с тактовой частотой 300 МГц. Для увеличения скорости обработки кадра выделялось квадратное окно, имеющее поперечный размер 100 пикселей. Центр окна сначала наводился вручную, а затем программно перемещался вслед за вычисленным центром тяжести.

Эффективность системы по данным видеоконтроля можно оценить как в абсолютных, так и относительных величинах, т.е. можно рассчитать точность стабилизации изображения в миллиметрах или в угловых секундах либо определить, во сколько раз уменьшилось дрожание изображения с помощью нашей системы. Для ученого-наблюдателя важна абсолютная характеристика, т.е. что оптическая система гарантирует стабилизацию изображения исследуемой области фотосферы Солнца на щели спектрометра с заданной точностью в течение времени наблюдения.

Относительная эффективность зависит как от характеристик самой системы, так и от погодных условий, определяющих исходную величину дрожания. Из погодных условий главным является скорость ветра, которая в период наблюдений менялась от 2–3 до 8–10 м/с. В таблице приведены среднеквадратические значения (СК) и размах (max, в пикселях) центра тяжести темного пятна на изображении Солнца при средней скорости ветра 6 м/с.

С коррекцией		Без коррекции	
СК	max	СК	max
0,84	4,3	3,6	16
0,88	4,6	3,7	16

Примечание. 1 пиксель равен примерно 0,1 мм.

Значения приведены для четырех 30-секундных реализаций, две из них с включенной системой, а две – без. Приведенные значения получены как средние геометрические по двум осям. Как видно из таблицы, дрожание изображения уменьшается примерно вчетверо как по СК, так и по размаху. В терминах дисперсии дрожания выигрыш получается примерно в 18 раз. Аналогичные оценки эффективности получаются в электронном канале: дисперсия флуктуаций электрического сигнала с датчика дрожания (квadrантного детектора) при включении контура коррекции уменьшалась в 10–16 раз, а в некоторых случаях, при сильном ветре, – до 25 раз. Таким образом, данная адаптивная система способна значительно, в несколько раз, уменьшить дрожание, стабилизируя изображение с погрешностью не более 0,5 мм в размахе.

Здесь необходимо отметить некоторые особенности ветровой компоненты дрожания изображения, обнаруженные в ходе эксперимента. Она, как выяснилось при анализе

проекции дрожания на оси часового ведения (α) и склонения (δ), существенно не изотропна. Оказалось, что величина дрожания по оси δ , особенно при сильном ветре, в несколько раз превышает дрожание изображения по оси α . Скорее всего, это объясняется особенностью крепления следящего зеркала, которое наиболее чувствительно к порывам ветра. Это зеркало управляется по углу склонения δ , поэтому ось, на которую посажено зеркало, препятствует ветровому биению зеркала по оси α . В результате величины дрожания изображения по этим двум осям могут отличаться в несколько раз.

5. Перспективы развития системы

Прежде всего, нужно найти способ увеличения жесткости крепления следящего зеркала телескопа. Большие амплитуды дрожания по оси склонения накладывают определенные ограничения на точность стабилизации изображения, поскольку любая адаптивная система имеет конечный динамический диапазон.

Развитие системы адаптивной стабилизации изображения видится следующим образом. Прежде всего, нужно сделать датчик дрожания, способный работать по пятнам различной формы и размера, по группе пятен и даже по малоконтрастной грануляционной сетке. Прототипы таких датчиков известны – это корреляционные гиды, для создания которых требуется специальная техническая видеокамера. Планируется использовать видеокамеры фирмы DALSA (www.dalsa.com), в частности модели CA-D1-0128 или CA-D1-0256, которые отличаются размерностью матрицы соответственно 128×128 и 256×256 пикселей, а также скоростью 736 и 203 кадр./с. Кадры изображения будут обрабатываться компьютером, корреляционными методами будет определяться смещение картинки относительно опорного кадра.

Дальнейшие перспективы связаны с построением адаптивной системы для компенсации высших аберраций, т.е. турбулентного размытия изображения. Здесь необходимо прежде всего четко понимать ограничения, обусловленные эффектами углового неизопланатизма. Это выражается в том, что резкой будет только центральная часть изображения размером порядка 10 угл. с, т.е. 2 мм в плоскости изображения БСВТ. Щель спектрометра, находящаяся в плоскости изображения, имеет размер 30 мм, поэтому лишь часть проводимых научных измерений будет получать выигрыш от использования адаптивной оптики.

Еще более далекие перспективы имеет использование адаптивных систем с широким полем зрения. Принцип их работы основан на распределенной коррекции аберраций с помощью нескольких адаптивных зеркал, каждое из которых находится в плоскости, оптически сопряженной некоторому атмосферному слою. Это позволяет увеличивать угловой размер области резкого изображения, наращивая количество АЗ. В этом направлении, однако, имеются не только технические, но и концептуальные проблемы, связанные с созданием датчика, способного измерять мгновенные значения аберраций волнового фронта, вносимые турбулентными слоями на различных высотах.

Существуют соответствующие подходы к этой проблеме в адаптивной оптике для звездной астрономии, основанные на измерении аберраций волнового фронта нескольких опорных звезд. Для применения их в солнечной астрономии нужно обобщить соответствующие методы измерения аберраций на случай распределенного источника, каким является Солнце.

6. Заключение

Таким образом, проведенные нами испытания адаптивной системы для стабилизации изображения Солнца на телескопе БСВТ показали ее эффективность и перспективность при эксплуатации телескопа. Дальнейшее развитие системы предполагает создание датчиков нового поколения на основе достижений современной компьютерной и видеотехники, а также интеграцию адаптивной системы в состав телескопа путем создания для пользователя простого и удобного интерфейса управления.

1. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 214 с.
2. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 286 с.
3. *Von Der Luhe O.* Solar adaptive optics // *Adv. Spac. Res.* 1991. V. 11. ¹ 5. P. 275–284.
4. *Acton D.S., Smithson R.C.* Solar imaging with a segmented adaptive mirror // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. ¹ 16. P. 3161–3169.
5. *Von Der Luhe O., Widener A.L., Rimmele T., Spence G., Dunn R., Wiborg P.* Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes // *Astronomy and Astrophysics.* 1989. V. 224. P. 351–360.

V.P. Lukin, B.V. Fortes, L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, L.N. Lavrinova, A.I. Petrov, A.P. Yankov, A.V. Bulatov, P.G. Kovadlo, N.M. Firstova. **Experimental Setup of Adaptive Optical System for LSVT. I. Testing Results and Perspectives.**

The efficiency of adaptive optics application to ground-based solar astronomy and high-resolution solar spectroscopy is considered. Experimental setup of adaptive optical system for image stabilization is described as well as results of test runs. We discuss the possible ways of the system further development for Large Solar Vacuum Telescope (LSVT) of Baykal Astrophysical Observatory.