

Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере

В.П. Лукин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 29.06.2009 г.

Выделено несколько этапов становления работ по адаптивной оптике в ИОА СО РАН. Описаны принципиально новые оптико-электронные элементы, на их основе проводятся эксперименты в атмосфере. Дается анализ тенденций развития современной адаптивной оптики.

Ключевые слова: адаптивная оптика, фаза, турбулентность, коррекция, волна; adaptive optics, phase, turbulence, correction, wave.

Введение

Исследования по разработке систем адаптивной оптики проводятся в Институте оптики атмосферы СО РАН уже более 25 лет. Решаются традиционные задачи оптики, а именно: **формирование оптических пучков и изображений** с целью обеспечения концентрации энергии лазерного пучка, повышение четкости оптического изображения, увеличение скорости передачи данных в оптических линиях связи и ряд других.

Для этого в структуру адаптивных оптико-электронных систем вводят новые элементы, такие как корректор волнового фронта (активный оптический элемент), датчик искажений (измеритель флуктуаций) волнового фронта, опорный источник, решающее устройство и алгоритм работы. Поскольку эти новые элементы, не говоря уже о системе в целом, серийно не выпускаются, то необходимо было их разрабатывать и создавать самим, поэтому работы шли по пути разработки теории адаптивных систем и создания новых элементов, макетов систем и алгоритмов их управления.

Первые работы

Успехи в развитии теории и техники измерений флуктуаций оптических волн в турбулентной атмосфере позволили в конце 70-х гг. начать в Институте оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН) исследования по изучению особенностей распространения оптического излучения в атмосфере при адаптивном управлении. Начиная с 1977 г. исследование фазовых флуктуаций оптических волн [1, 2] переросли в развитие теории фазовых адаптивных оптических систем, обеспечивающих опти-

мальное формирование оптического изображения и лазерных пучков большой мощности через атмосферу Земли как неоднородную и случайную рассеивающую и поглощающую среду.

Можно выделить несколько этапов развития рассматриваемой проблемы. В 1977 г. именно в ИОА СО РАН появилась первая оригинальная работа по адаптивной оптике в СССР [3]. В 1981 г. был поставлен первый эксперимент по адаптивной коррекции в атмосфере [4]. В 1985 г. было изготовлено впервые в СССР 19-элементное составное зеркало [5].

Первые серьезные достижения

В 1978–1983 гг. были выработаны основные принципы функционирования адаптивного телескопа с использованием лазерных опорных звезд (см. историю вопроса в работе [6]) для коррекции лазерных пучков и изображений, также были выполнены пионерные работы по исследованию динамических характеристик адаптивных систем [7], введены в практику двухцветные адаптивные системы [8]. В 1986 г. было завершено создание теории атмосферных адаптивных систем, в частности была опубликована монография [9], которая в 1996 г. была переведена на английский язык. Специально отметим, что в ней впервые был введен новый класс адаптивных систем – прогнозирующие адаптивные системы.

В 1995 г. был выполнен по заданию Миннауки РФ проект адаптивной системы для российского телескопа АСТ-10 [10]. В 1996 г. созданы адаптивные элементы и внедрены для 2-м телескопа Китая. В 1998–1999 гг. была создана первая адаптивная система для 1-м Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск) [11], работающая по сигналу, пропорциональному смещению положения изображения края солнечного

* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

диска. Для стабилизации изображения Солнца было использовано управляемое по двум перпендикулярным направлениям плоское зеркало [12]. Ниже приведены результаты работы этой системы (с коррекцией/без коррекции) дрожания изображения фрагмента солнечной поверхности на БСВТ.

Среднеквадратическое отклонение дрожания изображения, угл. с	Максимальный размах дрожания, угл. с
0,84/3,6	4,3/16
0,88/3,7	4,6/16

Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа

Следующим этапом была разработка системы стабилизации положения солнечной поры (или пятна) на фрагменте изображения Солнца. В качестве объекта слежения использовались участки изображения с небольшой порой, имеющей контраст 10–15%. На рис. 1 показана структурная схема макета системы стабилизации.

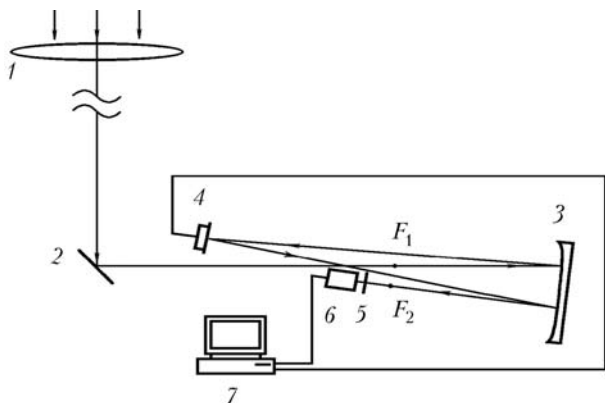


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 – объектив телескопа (диаметр апертуры 760 мм, фокусное расстояние 40 м); 2 – диагональное зеркало; 3 – сферическое зеркало (фокусное расстояние 4 м); 4 – управляемое зеркало; 5 – светофильтры; 6 – видеокамера (128×128 элементов, 12-разрядное АЦП, 490 кадр./с); 7 – компьютер с платой ввода видеосигнала

В составе системы стабилизации изображения на солнечном телескопе БСВТ применялся макет корреляционного датчика смещения [13, 14]. Все компоненты данного макета были созданы в ИОА СО РАН на базе коммерческих компонентов (камера, плата ввода изображения, персональный компьютер). В качестве системы ввода изображения была использована видеокамера DALSTAR (128×128 элементов, размер пикселя 16×16 мкм, 12-разрядное АЦП, 490 кадр./с) с платой ввода изображения фирмы CORECO.

Измеренное с помощью камеры смещение фрагмента изображения поверхности Солнца использовалось для компенсации углового положения этого зеркала. На рис. 2 приведены спектры мощности сигналов смещения изображения при замкнутом (кривая 2) и разомкнутом (кривая 1) контурах

управления с помощью управляемого зеркала 4 (см. рис. 1). Отношение среднеквадратических отклонений флуктуаций угловых смещений изображения без (1) и при (2) угловой коррекции (амплитуда «подавления» флуктуаций) составляют 36 и 29.

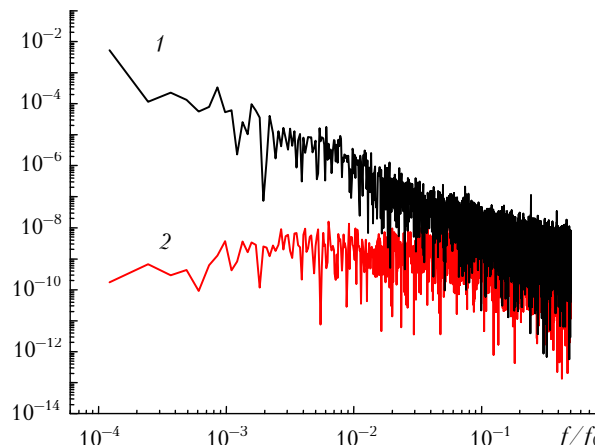


Рис. 2. Спектры мощности сигналов случайного смещения изображения по одной из осей. Частота оцифровки сигнала $f_0 = 164$ Гц, длительность реализации – 50 с: 1 – при разомкнутом контуре управления, 2 – при замкнутом контуре

При работе системы слежения с фрагментом грануляционной картины был получен отрицательный результат. Корреляционный датчик не регистрировал смещение изображения.

Ввиду практического отсутствия в настоящее время контрастных пятен на поверхности Солнца насущной проблемой является использование солнечной гранулярности для обеспечения работы датчика волнового фронта в разрабатываемой нами адаптивной оптической системе АНГАРА [15]. Необходимость работы адаптивной системы с протяженными и низкоконтрастными объектами (мелкие пятна и поры, солнечная гранулярность), наблюдаемыми в изображении Солнца, определяет особые требования к датчику смещения изображения. Сколь сложна эта проблема, можно понять из следующего факта: в условиях проведения испытаний адаптивной оптической системы на БСВТ в августе 2003 г. и в августе 2004 г. контраст грануляционной картины, измеренный в различных участках солнечного диска (в центре, на краю, вблизи солнечных пятен), в среднем лежал в интервале от 1 до 4%.

Для обеспечения работы адаптивной системы по изображению грануляционной картины были разработаны два варианта модифицированных алгоритмов слежения за смещением положения фрагмента изображения солнечной поверхности [16]. Для иллюстрации работы системы на БСВТ на рис. 3 приведены две пары фрагментов солнечного изображения. Фрагмент 2 адаптирован по фрагменту 1, а фрагмент 4 адаптирован по фрагменту 3. Можно видеть, что исходный фрагмент 1 имеет более высокий контраст, чем фрагмент 3, и адаптируется более качественно.

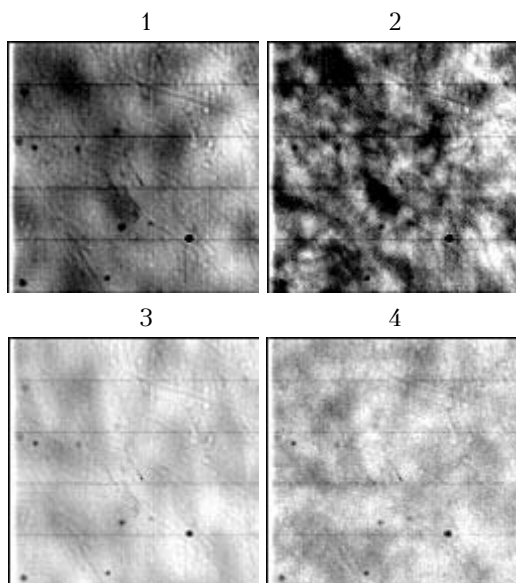


Рис. 3. Фрагменты солнечного изображения: слева — исходные, справа — адаптированные. (Поле зрения $26 \times 26''$; цена деления 1 пикселя $0,2''$)

Испытания на БСВТ опытного образца адаптивной оптической системы коррекции солнечного изображения на разных стадиях его создания показали, что устойчивая работа коррекции изображения возможна в условиях повышенного относительного контраста деталей солнечного изображения 2% и более. С помощью адаптивной системы удастся решить две основные проблемы: во-первых, компенсировать атмосферные, инструментальные оптические и механические помехи и, во-вторых, в условиях кратковременного уменьшения атмосферных помех фиксировать наличие (пусть кратковременное) моментов предельно высокого качества для текущего фонового уровня оптических помех. Имеется также возможность отбирать кадры в моменты наилучшего качества для апостериорной обработки.

Совместно с сотрудниками ИСЗФ СО РАН было разработано несколько оптических схем для введения системы «АНГАРА» в тракт БСВТ.

Проблема коррекции фазовых искажений в условиях «сильных» флуктуаций интенсивности

Важным этапом развития исследований по адаптивной оптике стало использование фазовой коррекции для устранения искажений оптических волн в условиях самовоздействия излучения. Первые работы были выполнены в 80-х гг. [17, 18]. В работе [19] было высказано предположение, что нестабильность фазовой коррекции в условиях самовоздействия излучения связана с появлением дислокаций волнового фронта. Это позднее было доказано в монографии [20], которая также была переведена на английский язык. Кроме того, впервые было сформулировано само понятие алгоритма коррекции. Это было связано с тем, что коррекция

теплового самовоздействия не корректируется за один шаг, имеет место итерационный процесс, для которого важен поведенческий характер сходимости.

В частности, был сделан вывод, что, начиная с некоторого значения плотности мощности лазерного излучения, применение алгоритма фазового сопряжения приводит к росту расходимости корректируемого пучка и это не позволяет существенно увеличить концентрацию светового поля в плоскости наблюдения. Наряду с расходимостью наблюдается нестабильность колебательного характера [19–21], т.е. осцилляции параметров излучения. Механизм развития осцилляций описан в работе [20]. Развитие автоколебательного режима объяснялось размыканием петли обратной связи в адаптивной системе. «Сильная» дефокусирующая линза на трассе приводит к обрыву связи и уменьшению концентрации поля на объекте фокусировки. С течением времени локальная тепловая линза перемещается в направлении ветра, и после ее выхода за пределы пучка обратная связь восстанавливается, параметры излучения в плоскости наблюдения возрастают.

Более детальный анализ процесса управления позволяет сделать вывод [22, 23], что в рассматриваемых условиях невозможно говорить о размыкании обратной связи в системе. По-видимому, причиной осцилляций является нарушение принципа оптической обратимости, лежащего в основе алгоритма фазового сопряжения.

Сравнение алгоритмов управления показало, что потеря устойчивости фазового сопряжения в нелинейной среде обусловлена нарушением принципа оптической обратимости при реализации алгоритма. В средах с низкой нелинейностью обращение волнового фронта обеспечивает полную компенсацию искажений пучков. С увеличением мощности излучения в плоскости наблюдения развиваются осцилляции параметров поля. Появление колебаний также объясняется нарушением принципа оптической обратимости.

В ряде работ, например [22–25], были рассмотрены характеристики фазовой коррекции турбулентных искажений оптических волн при большой дисперсии флуктуаций фазы. Обычно полагалось, что флуктуации интенсивности отсутствуют. Здесь рассмотрим другой предельный случай — случай сильных флуктуаций интенсивности, предполагая, что адаптивная система имеет неограниченное пространственно-временное разрешение в отношении коррекции фазовых искажений. При этом адаптивная коррекция часто трактовалась как выпрямление волнового фронта, если речь шла о приеме искаженной волны. Для адаптивной фокусировки пучков коррекция рассматривалась как предыскажение волнового фронта. С другой стороны, более строгое математическое рассмотрение в рамках волновой оптики описывает фокусировку пучка или изображения как сложение парциальных волн с учетом фазы их колебаний. С этой точки зрения адаптивный элемент фазирует парциальные волны и обеспечивает максимальную интенсивность в фокусе системы.

В обычных условиях, если волновой фронт является достаточно гладкой поверхностью, оба подхода действительно практически эквивалентны. Однако при нарушении условия гладкости волнового фронта ситуация меняется. Это происходит, например, в турбулентной атмосфере, когда флуктуации интенсивности, вызванные турбулентными флуктуациями показателя преломления, достаточно сильны.

Известно, что фазовые искажения при прохождении через оптически неоднородную среду по мере дальнейшего распространения волны трансформируются в модуляцию пространственного распределения интенсивности. При достаточно глубокой модуляции могут возникнуть точки с нулевой интенсивностью. С точки зрения адаптивной фазовой коррекции важно то, что при появлении дислокаций нарушается непрерывность двумерного распределения фазы. При появлении таких разрывов ошибка аппроксимации волнового фронта адаптивным зеркалом будет значительно увеличиваться.

Наши численные расчеты показали, что так называемая дислокационная фаза, появляющаяся при развитии амплитудных флуктуаций, есть то препятствие, которое ограничивает эффективность фазовых адаптивных систем [20, 23].

Амплитудно-фазовая адаптивная коррекция

Известно, что наиболее эффективным является алгоритм обращения волнового фронта. Этот алгоритм основан на принципе взаимности. Из общих свойств волнового параболического уравнения для сред, обладающих свойством взаимности флуктуаций, известно, что элементарная сферическая волна идеально восстанавливается операцией обращения волнового фронта только для случая, когда эта операция применяется в пределах бесконечной исходной апертуры.

Строгое выполнение принципа взаимности при формировании обратного лазерного пучка требует точного воспроизведения как фазовой, так и амплитудной компонент волны, принимаемой от баке-на. Однако на практике вынуждены ограничиваться использованием только информации о фазе. При этом на адаптивном зеркале выставляется фазосопряженный волновой фронт и оно освещается гауссовым пучком. Нами проведено численное моделирование распространения обратного лазерного пучка в условиях сильных флуктуаций, когда имеют место разрывы волнового фронта. Показано различие между полным обращением волны и фазовым сопряжением на идеальном адаптивном зеркале, детально воспроизводящем все разрывы волнового фронта. Предлагается при формировании обратного пучка вырезать эти линии разрывов [22, 23]. Этого можно достичь путем вывода из канала адаптивной системы тех участков волнового фронта, которые соответствуют областям глубокого затухания в световой волне, принимаемой от баке-на. Следовательно, устранение таких участков не ухудшает свойств

пучка, получаемого при фазовом сопряжении, и позволяет решить проблему воспроизведения дислокаций волнового фронта на адаптивном зеркале.

Нами был проведен численный эксперимент [24] по моделированию алгоритма фазового сопряжения (ФС) на адаптивном зеркале (АЗ) и распространению обратного пучка в турбулентной атмосфере. Обратный пучок формировался из гауссова пучка на АЗ, сопряженно воспроизводящем форму волнового фронта (ВФ) опорного гауссова пучка, прошедшего в турбулентной атмосфере.

Было проведено сравнение трех разных способов формирования обратного пучка на идеальном активном зеркале: полное обращение волнового фронта (ОВФ), фазовое сопряжение с отслеживанием центра тяжести пришедшего пучка и распространение гауссова лазерного пучка без фазовой коррекции. На рис. 4 для всех трех случаев приведены рассчитанные кривые зависимости ошибки обращения ϵ_0 и параметра S_1 (количество энергии пучка, попадающей в пределы круга его эффективного радиуса) от параметра турбулентности C_n^2 .

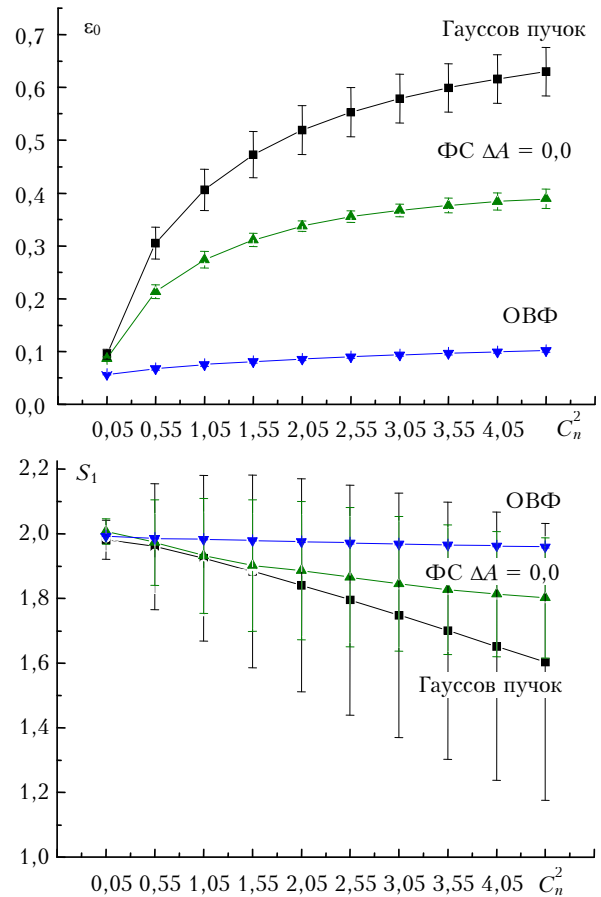


Рис. 4. Сравнение трех разных способов формирования обратного пучка на идеальном активном зеркале

В результате можно сделать вывод, что замена сложного амплитудного распределения пришедшей волны при ФС гауссовым амплитудным распределением вносит большую погрешность по сравнению с ОВФ. Это может привести к наложению ог-

раничений на соблюдение принципа взаимности, на котором основывается адаптивная оптика. Причина этого заключена в неиспользовании амплитудной информации [20, 25, 26]. Подмена сложного амплитудного профиля пучка гладким гауссовым профилем при детальном воспроизведении особенностей волнового фронта приведет к закачиванию большого количества энергии в те области, где ее быть не должно, и, в частности, в области с оптическими вихрями. Заметим, что простое игнорирование наличия дислокаций (использование сглаженной фазы от среднеквадратических реконструкторов волнового фронта) при ФС пучком с гауссовой амплитудой также не решает этой проблемы лишней энергии. Гибкое адаптивное зеркало воспроизводит сглаженный волновой фронт без дислокаций, тогда как сегментированное адаптивное зеркало формирует дыры в гауссовом пучке в тех местах, где должны быть области глубокого замирания сигнала.

Таким образом, убедительно показано, что замена сложного амплитудного распределения прошедшей волны гауссовым распределением при ФС на зеркале вносит большую погрешность по сравнению с алгоритмом ОВФ. Это может привести к наложению ограничений на соблюдение принципа взаимности, на котором основывается адаптивная оптика. По сравнению с этим проблема неспособности детально воспроизводить на гибком адаптивном зеркале линии разрыва, связанные с наличием оптических вихрей, оказывается менее существенной. Она может быть успешно решена путем вывода областей глубокого замирания, содержащих оптические вихри, из канала адаптивной системы при соответствующем подборе значения порога блокируемой интенсивности.

Амплитудно-фазовое управление пучком в двухзеркальной адаптивной системе

Несмотря на достаточно большое количество публикаций по данной теме, до сих пор не решенной остается одна из основных теоретических проблем, возникающих при выполнении ОВФ в двухзеркальной системе. Нет точного быстродействующего алгоритма, позволяющего при управлении фазой пучка в одной плоскости получить требуемое распределение амплитуды в плоскости, находящейся на некотором расстоянии от первой. Предлагаемые для решения этой задачи алгоритмы являются или итерационными, или обладают невысокой точностью.

В [27–29] рассматривается еще один метод, позволяющий определить фазу пучка в плоскости первого зеркала, которая бы обеспечила требуемый амплитудный профиль в плоскости второго зеркала. На основе разработанного алгоритма выполнено исследование компенсации турбулентных искажений когерентного излучения, проведено сравнение эффективности ОВФ с эффективностью чисто фазового управления.

Выполнение ОВФ возможно в адаптивной системе, включающей два зеркала, разделенных промежутком, в котором пучок распространяется без искажений. Первое зеркало (M1) задает фазу пучка. При распространении в свободном пространстве изменения фазы приводят к изменениям амплитуды. Таким образом, в плоскости зеркала M2 (на входе в среду) достигается требуемое распределение интенсивности светового поля. Зеркало M2 компенсирует внесенные изменения фазы и выполняет операцию сопряжения. В результате на входе в среду формируется пучок с заданным распределением амплитудного и фазового профилей. Основная сложность в реализации данной операции – это задание фазового профиля, обеспечивающего необходимое распределение амплитуды.

В работах [26–29] показано, что предложенный метод амплитудно-фазового управления не обеспечивает абсолютную компенсацию распределенной турбулентной линзы, но полученные значения критерия фокусировки являются более высокими, чем при чисто фазовом управлении (рис. 5).

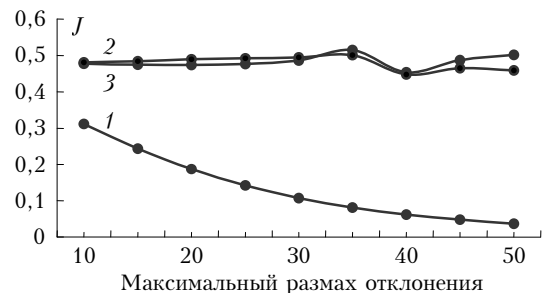


Рис. 5. Доля энергии на удаленной цели как функция параметра нелинейности $|R_v|$ [17–20]. Безразмерная длина трассы $Z = 0,5$. Кривая 1 – данные, полученные без адаптивного управления; 2 – результат работы системы при точном задании амплитуды (алгоритм ОВФ); 3 – результат работы двухзеркальной системы

Расчеты показали высокую эффективность амплитудно-фазовой коррекции по сравнению с чисто фазовой коррекцией. При этом амплитудное управление достигается только с использованием линейных преобразований поля искаженной волны [28–32].

Создание датчика волнового фронта на основе дифракционной оптики

Совместно с Институтом автоматизации и электротехники СО РАН (ИАЭ СО РАН) были выполнены исследования по применению раstra внеосевых дифракционных линз для низкоапертурного (малое значение отношения диаметра апертуры к фокусу) датчика Шэка–Гартмана. Известно, что датчики Шэка–Гартмана широко используются для измерения искажений волнового фронта в астрономических адаптивных оптических системах, устраняющих дрожание изображений звезд, вызываемое турбулентностью атмосферы. Особенностью этой разновидности датчиков Шэка–Гартмана является то, что они используют растры длиннофокусных линз. Однако изготовление таких датчиков без

больших девиаций фокусных расстояний от линзы к линзе является серьезной проблемой.

Был предложен новый подход [34, 35] к проблеме, смысл которого состоит в замене элементарного линзового растра на внеосевой фрагмент дифракционной линзы с таким же фокусом, но существенно большим диаметром. Расстояние от оптической оси дифракционной линзы до фрагмента выбирается таким образом, чтобы дифрагировавший сфокусированный пучок не перекрывался ни одним пучком нулевого порядка дифракции от других линз. Таким образом, измерительная цифровая камера должна быть в таком датчике смещена от оптической оси системы.

Растр внеосевых линз может быть реализован и как многоуровневый дифракционный элемент, и как бинарный. В последнем случае дифракционная эффективность в (+1-м) порядке сфокусированного линзами света составляет 40%, но этот недостаток компенсируется появляющейся гибкостью оптической схемы датчика. Датчик может быть сделан двухканальным за счет установки дополнительной цифровой камеры в (-1-м) дифракционном порядке. При этом расходящийся (-1-й) порядок фокусируется на камеру дополнительной линзой. Масштаб изображения во втором канале определяется фокусом дополнительной линзы.

Точность формирования волнового фронта таким растром во многом зависит от размера пикселя при записи. Расчет микроструктуры растра внеосевых линз был произведен с размером пикселя, равным 0,25 мкм, что соответствует точности формируемого волнового фронта не более четверти длины волны записи (период дифракционных зон во внеосевой линзе 6–7 мкм). На основе предложенной схемы и цифровой камеры с количеством элементов 512×512 был реализован датчик Шэка–Гартмана с численной апертурой, равной 0,005 (рис. 6).

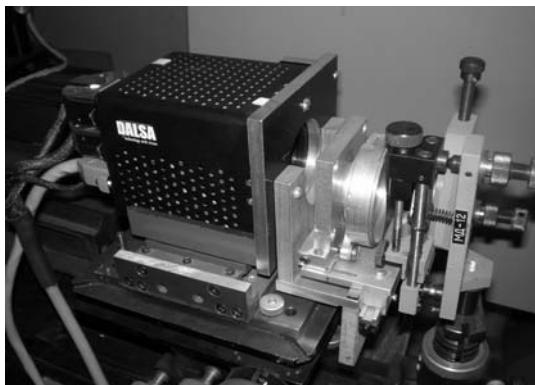


Рис. 6. Внешний вид датчика волнового фронта, созданный на основе камеры фирмы DALSA

Результаты применения дифракционного растра сравнивались с чисто рефракционными растрами. Для численной проверки эффективности такой системы мы разработали программу для моделирования работы низкоапертурного датчика Шэка–Гартмана в условиях турбулентности с различными

размерами элементарных линз. В ходе тестового лабораторного эксперимента была осуществлена проверка элементов и программных средств датчика Шэка–Гартмана, созданного для измерения деформаций волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося на горизонтальных атмосферных трассах. Применялся оптический клин, который обеспечивал наклон волнового фронта (рис. 7).

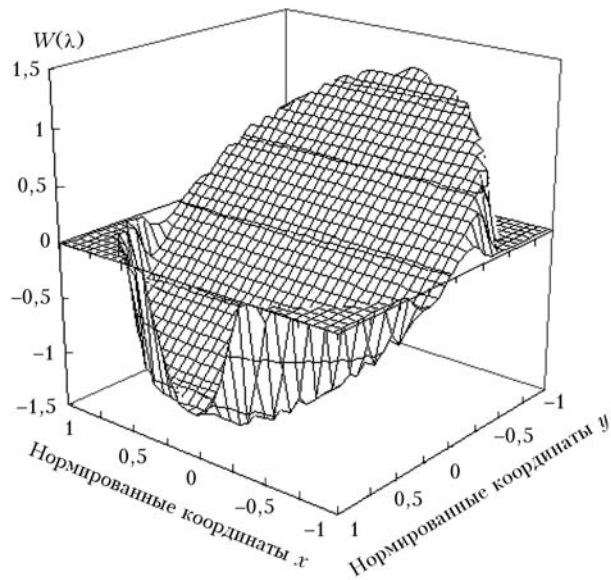


Рис. 7. Восстановленный наклон волнового фронта по 14 полиномам Цернике ВФ-излучения на входной апертуре датчика в лабораторном эксперименте при повороте оптического клина на 180°

Значения амплитуды ошибки восстановления фазы составили: максимальный размах отклонения – 0,006 длины волны; среднеквадратическое отклонение – 0,005 длины волны.

Использование в датчике растра низкоапертурных внеосевых дифракционных линз с высоким качеством формирования волновых фронтов и высокой степенью повторяемости параметров отдельных элементов позволило регистрировать наклоны волнового фронта (~ 10 угл. с) с высоким угловым разрешением. Общая ошибка системы измерения (системы формирования изображения, регистрации гартманогаммы и вычисления углового смещения центра тяжести изображения) не превышает 4,8 угл. с (0,15 пикселя в плоскости регистрации), что приводит к среднеквадратическому отклонению от плоскостности восстановленного волнового фронта, не превышающему 0,0170 длины волны.

Осуществлялась проверка работы датчика в реальном эксперименте на атмосферной трассе (рис. 8). Разработанный пакет программ позволяет в реальном времени измерять смещения изображений и восстанавливать волновой фронт на входной апертуре датчика. Датчик Шэка–Гартмана предполагается использовать в качестве измерителя для определения параметров атмосферной турбулентности и как элемент адаптивной оптической системы формирования изображения.

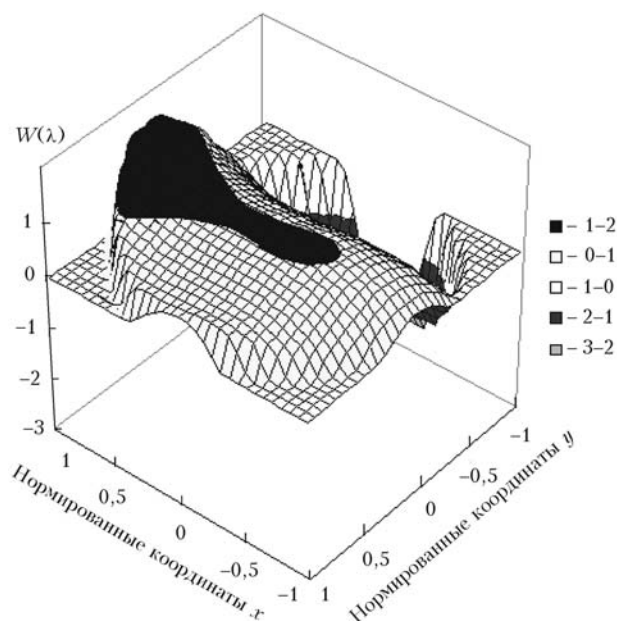


Рис. 8. Атмосферный эксперимент по испытанию датчика Шэка–Гартмана. Длина атмосферной трассы – 100 м, коллимированный лазерный пучок диаметром 100 мм, диаметр входной апертуры приемника – 73 мм, длина волны излучения 0,63 мкм

Корреляционный датчик Шэка–Гартмана для адаптивной оптической системы БСВТ

Бывают ситуации, когда для работы датчика волнового фронта адаптивной оптической системы используется некогерентный источник излучения (например, Солнце). Кроме того, необходимые устойчивые контрастные структуры, видимые в изображении источника. При работе в составе солнечного телескопа это могут быть солнечные поры, солнечные пятна, грануляционная картина. В отличие от традиционного датчика Гартмана работа датчика Шэка–Гартмана осуществляется в плоскости изображения источника [32, 33]. Был проведен расчет микролинзового раstra для датчика Шэка–Гартмана, созданного на базе видеокамеры Prosilica GE680 (размерность матрицы 640×480 , размер 1 пикселя = 7,4 мкм, кадровая частота камеры 202 Гц). В ИАЭ СО РАН изготовлен растр дифракционных микролинз (12×12 микролинз с числовой апертурой 0,026, размер квадратных субапертур 281×281 мкм), разработан пакет программ корреляционного датчика Шэка–Гартмана и создана экспериментальная установка для его юстировки и тестирования.

Современные проблемы

В настоящее время существует ряд актуальных нерешенных проблем. Сюда следует отнести проблему исследования особенностей фазы оптической

волны в условиях «сильных» флуктуаций интенсивности. В работах [28, 31] рассматриваются влияние дислокации фазы и новые методы измерения фазы оптической волны, а также изучаются вопросы устойчивости фазовых адаптивных оптических систем.

Известно, что одним из ключевых элементов оптической схемы адаптивной системы является опорный источник. Уже в первых работах В.П. Линника и Дж. Харди появляется упоминание об «опорном источнике». В настоящее время наиболее актуальным является создание опорных источников – лазерных опорных звезд (ЛОЗ) на основе использования сигнала обратного рассеяния оптического излучения от неоднородностей атмосферы. В работе [35] было показано, что на основе использования обратимости флуктуаций оптических волн можно построить алгоритмы управления параметрами когерентного оптического излучения: время послылки импульса, угла нацеливания и оптимального фокуса. Все перечисленные выше задачи обобщаются на случай частично когерентного пучка с факторизуемой функцией когерентности, при этом вместо приема в точке следует фиксировать отраженное от объекта излучение на некоторой площадке, согласованной со спектром когерентности исходного излучения по разностной координате.

Данные подходы по адаптивной коррекции искажений оптических пучков, фокусируемых на удаленных объектах в атмосфере, ориентированы на адаптивные оптические системы, которые в качестве датчиков волнового фронта используют анализаторы интенсивности.

В литературе существует много подходов по поиску максимумов для двумерных распределений оптических лазерных пучков, распространяющихся в случайно-неоднородной среде. Однако при их сравнении с фазовыми датчиками волнового фронта (например, с датчиком Шэка–Гартмана или сдвиговым интерферометром) следует заметить, что анализатор интенсивности требует более высокого быстродействия по сравнению с фазовым датчиком волнового фронта, а также очень большого динамического диапазона, особенно это касается оптических систем, работающих в условиях «сильных» флуктуаций интенсивности.

Автор выражает признательность сотрудникам лаборатории когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН за помощь в подготовке материала для этой статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта СО РАН 2009–2011 гг. «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем» и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», проект «Развитие адаптивных систем и измерителей параметров атмосферной турбулентности для улучшения солнечных астрономических наблюдений».

1. *Lukin V.P., Pokasov V.V.* Optical wave phase fluctuations // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. N 1. P. 121–135.
2. *Миронов В.Л., Покасов В.В., Лукин В.П.* Когерентность лазерного излучения в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1985. 175 с.
3. *Лукин В.П.* Об эффективности компенсации фазовых искажений в оптической волне // *Квант. электрон.* 1977. Т. 4. № 4. С. 923–927.
4. *Лукин В.П., Емалеев О.Н.* Коррекция угловых смещений оптических пучков // *Квант. электрон.* 1982. Т. 9. № 5. С. 952–958.
5. *Лукин В.П., Емалеев О.Н., Пушиной Л.А., Шалагин А.В.* Составное адаптивное зеркало // *Труды VIII Всесоюз. симпоз. Ч. III.* Томск: ИОА СО РАН, 1986. С. 183–185.
6. *Lukin V.P.* Monostatic and bistatic schemes for laser guide star formation and optimal algorithm for tilt correction in ground-based adaptive telescopes // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 21. P. 4634–4644.
7. *Лукин В.П., Миронов В.Л.* Динамические характеристики адаптивных оптических систем // *Квант. электрон.* 1985. Т. 12. № 9. С. 1959–1962.
8. *Lukin V.P.* Efficiency of some correction systems // *Opt. Lett.* 1979. V. 4. N 1. P. 15–17.
9. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с. (перевод: *Lukin V.P.* Atmospheric adaptive optics // SPIE Press. 1996. V. PM 23. 280 p.).
10. *Lukin V.P., Fortes B.V.* Partial correction for turbulent distortions in ground-based telescope // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 21. P. 4561–4568.
11. *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.
12. *Лукин В.П., Фортес Б.В., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Хавринова Л.Н., Янков А.П., Булатов А.В.* Экспериментальная адаптивная оптическая система для БСВТ. I. Результаты тестирования и перспективы развития // *Оптика атмосфер. и океана.* 1999. Т. 12. № 12. С. 1161–1164.
13. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковadlo П.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Петров А.И., Янков А.П.* Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15. № 11. С. 1027–1030.
14. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Лукин В.П., Ковadlo П.Г., Скоморовский В.И., Янков А.П.* Развитие дизайна адаптивной системы для солнечного телескопа // *Автометрия.* 2003. Т. 39. № 5. С. 77–90.
15. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковadlo П.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Лавринов В.В.* Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18. № 12. С. 1077–1082.
16. *Lukin V.P., Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Grigor'ev V.M., Konyayev P.A., Kovadlo P.G., Skomorovski V.I., Yankov A.P.* Adaptive System of Tip-Tilt Correction of Image with Modified Correlation Tracker for BSVT // *RS seria 12M.* 2007. V. 6. N 1. P. 219–226.
17. *Коняев П.А., Лукин В.П.* Тепловые искажения фокусированных лазерных пучков в атмосфере // *Изв. вузов. Физ.* 1983. № 2. С. 79–89.
18. *Коняев П.А., Лукин В.П., Миронов В.Л.* Эффективность применения адаптивных оптических систем в условиях самовоздействия излучения в атмосфере // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1985. Т. 49. № 3. С. 536–540.
19. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Влияние дислокаций волнового фронта на нестабильность фазосопреженной коррекции при тепловом самовоздействии // *Оптика атмосфер. и океана.* 1995. Т. 8. № 3. С. 435–447.
20. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 212 с.
21. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивная коррекция сфокусированного пучка в условиях сильных флуктуаций интенсивности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13. № 5. С. 515–520.
22. *Lukin V.P.* Phase-correction of turbulent distortions of an optical wave propagating under strong intensity fluctuations // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 27. P. 5616–5624.
23. *Лукин В.П.* Фазовое управление сфокусированным лазерным пучком. Сопоставление эффективности методов // *Квант. электрон.* 2005. Т. 31. № 2. С. 143–148.
24. *Lukin V.P., Kanev F.Yu., Lavrinova L.N.* Analysis of algorithms intended for a laser beam adaptive control in nonlinear medium // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 21. P. 4598–4604.
25. *Lukin V.P., Sennikov V.A., Tartakovski V.A.* Optical vortices: creation, annihilation, and modeling // *Selec. Papers.* SPIE Press. 2000. V. 4338. P. 107–117.
26. *Тартаковский В.А., Сенников В.А., Коняев П.А., Лукин В.П.* Обращение волны в условиях сильных флуктуаций и последовательное фазирование в адаптивной оптике // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15. № 12. С. 1104–1113.
27. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А.* Принципиальные ограничения алгоритма фазового сопряжения и реализация амплитудно-фазового управления в двухзеркальной адаптивной системе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15. № 12. С. 1073–1077.
28. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика // *Успехи физ. наук.* 2003. Т. 173. № 8. С. 11–17.
29. *Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Сенников В.А., Макенова Н.А., Тартаковский В.А., Коняев П.А.* Фазовое и амплитудно-фазовое управление лазерным пучком при распространении его в атмосфере // *Квант. электрон.* 2004. Т. 33. № 9. С. 825–832.
30. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П.* Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во СО РАН, 2005. 343 с.
31. *Лукин В.П.* Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере // *Успехи физ. наук.* 2006. Т. 176. № 9. С. 18–24.
32. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А.* Датчики волнового фронта для адаптивных оптических систем // *Автометрия.* 2008. № 4. С. 119–128.
33. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Корольков В.П., Лавринова Л.Н., Насыров Р.К., Полещук А.Г., Черкашин В.В.* Датчик Шэка–Гартмана на основе раstra низкоапертурных внеосевых дифракционных линз // *Автометрия.* 2009. Т. 45. № 2. С. 1–12.
34. *Лукин В.П., Чарноцкий М.И.* Принцип взаимности и адаптивное управление параметрами оптического излучения // *Квант. электрон.* 1982. Т. 9. № 5. С. 852–958.
35. *Лукин В.П.* Некоторые особенности формирования опорных источников // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19. № 12. С. 1021–1028.

V.P. Lukin. Adaptive formation of beams and images in the atmosphere.

Several stages of organization of work on adaptive optics at IAO SB RAS are chosen. Radically new optoelectronic elements and experiments in atmosphere on their base are organized. The analysis of trends in development of modern adaptive opto-electronics systems is done.