

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА:

СОГЛАСОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Более трех веков земная атмосфера вызывала разочарование у астрономов. Слой газов, которыми мы дышим, искажает изображение так, что обычные телескопы с диаметром объектива больше нескольких сантиметров не могут достичь того предела разрешения, который установлен для их оптики. Как это скорректировать, рассказывают авторы работы [1].

Эта проблема была известна еще Исааку Ньютону, в 1704 он понял, что турбулентность атмосферы влияет на формирование изображения. Точно так же, как тепловые волны, парящие над нагретым участком земли, могут испортить нам его вид, изображение удаленного объекта, сформированное телескопом, искажается благодаря температурным изменениям в отделяющем нас атмосферном слое. Поэтому свет, входящий в телескоп, доходит до него по разным траекториям и попадает в разные точки входной апертуры.

Размер изображения и его качество зависят от статистической характеристики пространственной частоты турбулентности, называемой *длиной когерентности*, или r_0 , обычно равной 10 см в хорошем месте. Следовательно, даже для хорошего места разрешающая способность большого телескопа (диаметром 4 или 8 метров) сравнима с той, что дает 10-см телескоп; изображение не будет резче того, что позволяет атмосфера.

Атмосферная турбулентность действует так, как если бы одна большая апертура телескопа была заменена множеством апертур малых телескопов размера r_0 и каждый телескоп испытывал бы тряску независимо от других и так, что отдельные точки изображения почти никогда не совпадали бы. Степень этой тряски задается другим статистическим параметром – *временем когерентности*, имеющим обычно порядок 1 мс. Изображение в результате становится нечет-

ким благодаря дрожанию, похожему на дрожание руки, но с частотой, достигающей тысячи герц!

НЕТРАДИЦИОННОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ

Одно из решений этой проблемы, предложенное Ньютоном, – устанавливать телескопы как можно выше. Это решение объясняет, почему современные астрономические телескопы устанавливаются на вершинах гор, помещаются на воздушных шарах и самолетах или, как например космический телескоп Хаббл, размещаются на околоземной орбите.

Так как космический телескоп располагается за пределами земной атмосферы, он реализует полную разрешающую способность своей 2,4-м апертуры и дает возможность получить революционные результаты в астрофизике. Однако такой телескоп пока один, он позволяет проводить только ограниченное количество наблюдений. Его размеры много меньше тех, что имеют телескопы нового поколения с диаметром зеркала 8 и 10 метров, такие как Keck I и II, Gemini, Very Large Telescope (VLT), Subaru, не говоря уже о предложенной новой генерации телескопов. 15 лет назад астрономы могли только мечтать о таких телескопах, а сегодня уже используются или строятся по крайней мере 10 из них. Если можно было бы реализовать разрешающую способность таких больших апертур, это было бы главным успехом в астрономии. К счастью, существует технология, которая позволяет это сделать.

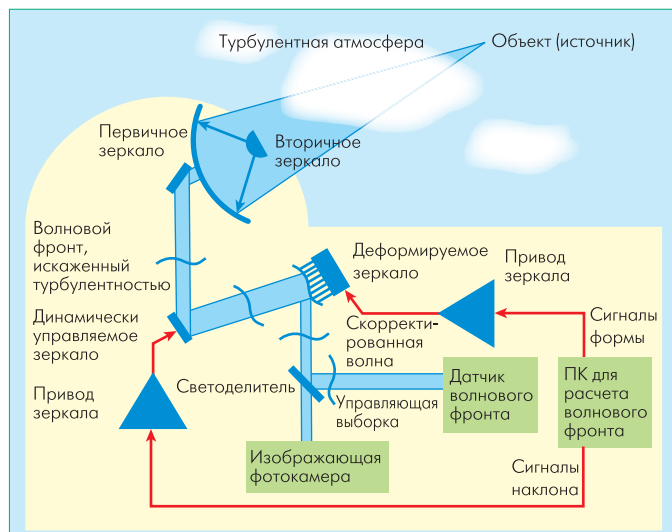


Рис. 1 Схема адаптивной оптической системы

В 1953 году Хорас Бэбкок (Horace Babcock) предложил инструмент, который мог бы измерять атмосферные искажения в реальном времени и корректировать их, используя быстро перестраиваемые формоизменяющиеся оптические компоненты [2]. Доступные в то время технологии не позволяли решить эту задачу, однако основная предложенная концепция, поддержанная современными технологиями, эволюционировала со временем в то, что сейчас и представляет предмет адаптивной оптики.

ФИКСИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Сейчас в оборонной технике и в астрономии используется большое количество адаптивных оптических систем. В общем случае они сформированы по схеме, показанной на рис.1. Большой телескоп-рефлектор получает изображение точечного объекта, расположенного за пределами атмосферы. Хотя свет, попадающий на телескоп, должен быть практически плоской волной, он на самом деле существенно искажен за счет прохождения через многие локализованные воздушные массы различной температуры (с различными коэффициентами преломления).

Этот волновой фронт с аберрациями разделяется светоделителем и посылается в основную изображающую фотокамеру (или другой инструмент, используемый в качестве детектора, например на изображающий спектрометр) и на детектор волнового фронта, который управляет устройством, корректирующим фазу волнового фронта. Детектор волнового фронта оптически анализирует принятый луч и генерирует сигналы, используемые высокоскоростным процессором, который вычисляет оценки как дрожания фазы волнового фронта, или наклона фронта, так и информацию об искажении формы волнового фронта более высокого порядка. Эти сигналы затем используются для формирования оптической обратной связи, которая применяется для того, чтобы сохра-

нить фронт входящего луча плоским, формируя в фокальной плоскости камеры скорректированный образ объекта высокого разрешения. Сигналы наклона приводят в движение управляемые зеркала, чтобы удерживать данный объект в центре поля изображения; сигналы формы фронта прикладываются к продвинутому элементу, называемому *деформируемым зеркалом*. Этот элемент часто представляет собой кусочки стекла, прикрепленные к двумерному массиву пьезоэлектрических датчиков, или, как в *биморфном зеркале*, непрерывную биморфную структуру из стекла и пьезоэлектрического материала.

Недавно стала использоваться микромашинная технология для создания мембранных зеркал с электростатическими исполнительными механизмами (*актюаторами*). Эти элементы не так жестки, как их стеклянные эквиваленты, но они значительно дешевле и могут производиться в большом количестве. В этих зеркалах датчики деформируют отражающую поверхность пластины так, что полностью устраняют атмосферные искажения. Другой тип фазоуправляющего устройства использует жидкие кристаллы, показатель преломления которых может управляться приложенным напряжением. Однако эти устройства в общем случае слишком медленны для использования в атмосферной адаптивной оптике, а их спектральное пропускание – ограничено.

Ключевой элемент в этих системах – *датчик волнового фронта*. Было разработано много типов таких элементов, характерный из них – датчик Гартмана – показан на рис.2. Он был получен на основе использования классической техники оцифровки размеров планет солнечной системы с помощью телескопа. На рисунке искаженная волна поступает слева. Тот факт, что волновой фронт изогнут, говорит о некотором различии в направлениях распространения луча в разных локальных частях, как это показано стрелками лучей, характеризующих ньютоновские лучи света, проходящие через различные части апертуры. Эти лучи падают на массив элементарных линз, диаметр которых выбирается так, чтобы он соответствовал размеру r_0 выбранной планеты солнечной системы. Эти линзы разбивают основную апертуру на субапертуры, позади которых формируются фокальные пятна.

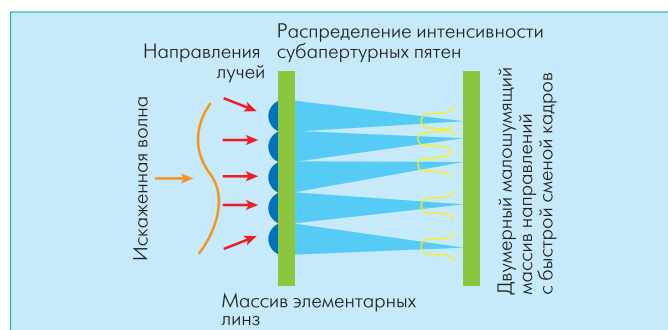


Рис.2 Принцип работы датчика волнового фронта Гартмана

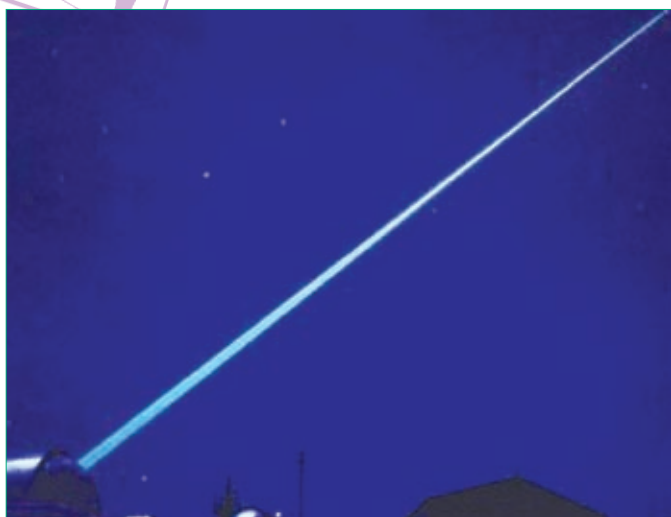


Рис.3 Лазерная направляющая звезда (гид) в работе в пределах дальности видимости отраженного света звезды

Направление локального луча определяет положение фокального пятна каждой субапертуры так, что если для измерения положения всех пятен используется массив датчиков, то форма (и наклон) входного луча может быть вычислен и использован для корректировки этого луча.

Однако, так как атмосфера искажает фазу волнового фронта случайно, возникает вопрос: "Как мы узнаем, каким образом нужно корректировать волновой фронт?" Системы адаптивной оптики, в частности восстановители волнового фронта, требуют наличия калибрующего источника за пределами атмосферы с известной начальной фазой, который мог бы быть использован для одновременного измерения влияния атмосферы на волновой фронт. Для этого можно было бы использовать близлежащую звезду, но вообще-то в этом мало радости, так как она фактически не может быть калибрующим источником, учитывая, что она движется.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСТОЧНИКА

Бэбкок указал, что для систем адаптивной оптики просто нужен яркий источник, чтобы работать эффективно, а это ограничивает диапазон астрономических объектов, которые можно было бы исследовать. Решить проблему было достаточно трудно вплоть до 1981 года, когда Юлиус Фейнлейб (Julius Feinleib) – специалист компании Adaptive Optics Associates (AOA) – предложил создавать такой источник искусственно – путем проектирования мощного лазера в нужном направлении и использования молекулярного обратного рассеяния от высотной части его луча в качестве привода всей системы [3]. Пример такой *лазерной направляющей звезды* (гида) показан на рис.3.

Эта идея была тут же засекречена и разрабатывалась в рамках ВПК США. В 1985 она была независимо предложена в открытой литературе Фоем (Foy) и Лэйбери (Labeurie) [4]. В конце концов, оборонную тематику рассекретили, и эта техника получила название *метода лазерной направля-*

ющей звезды (laser-guide-star approach) [3], который чрезвычайно расширил использование адаптивной оптики и стал предметом многих исследований. В 1993 году Бэбкок и Фейнлейб были награждены престижной премией за их вклад в область адаптивной оптики.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Успехи в области обработки электронных изображений и увеличение вычислительной мощности компьютеров сделали возможным реализовать подход Гартмана к детектированию волнового фронта в небольшом пакете ПО для настольного ПК; его разработчики – компании AOA, Wavefront Sciences и CILAS (во Франции). На рис.4 и 5 показан датчик волнового фронта WaveScope компании AOA и его компьютерный интерфейс. Путем вставки некоторых дополнительных электронных плат в системный блок (компьютер) можно заставить полученное устройство управлять деформируемыми зеркалами, производимыми компаниями Xinetics, OKO Technologies, CILAS и Boston Micro-Machines. Благодаря увеличению скорости вычислений сегодня можно осуществлять все расчеты, необходимые для атмосферной адаптивной оптики с помощью процессоров Pentium (компании Intel), освобождая системы адаптивной оптики от необходимости использовать специальные карты для обработки сигнала.

Применение стандартных компонентов для обработки сигналов говорит о том, что эта технология достигла совершенства. Пример выравнивания зеркала компании Xinetics с помощью датчика волнового фронта WaveScope, используемого для измерения формы поверхности зеркала и вычисления параметров восстановителя для управления актюаторами, показан на рис.6. Приведенные интерферограммы вычислены с помощью датчика волнового фронта WaveScope на основании данных пятна Гартмана. Изображение слева показывает вид поверхности при установке актюаторов в среднее положение, а изображение справа показывает вид выровненного зеркала.

Системы адаптивной оптики (как действующие, так и строящиеся) находятся (географически) во многих местах. Самая



Рис.4 Датчик волнового фронта WaveScope компании Adaptive Optics Associates

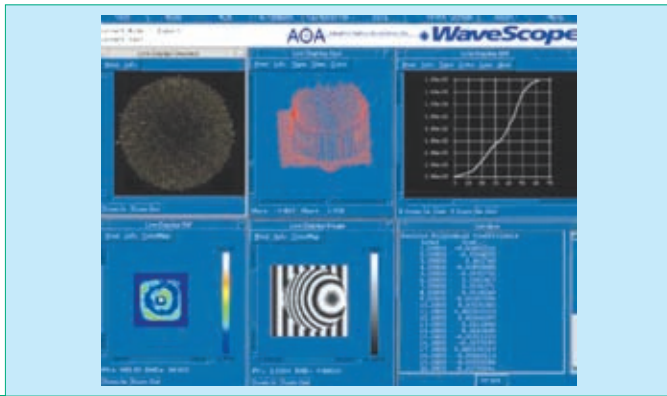


Рис.5 Пользовательский интерфейс датчика волнового фронта WaveScope. Текущее окно показывает некоторые опции дисплея и сжатия данных, возможные благодаря декомпозиции Цернике (Zernike) измеренного волнового фронта

большая из работающих систем находится в лаборатории Phillips Laboratory (BVC, США). В этой системе реализован привод (на базе метрового телескопа) с лазерной направляющей звездой, ограничивающий дифракцию для видимых длин волн. Компания Raytheon поставила систему AEOS (Advanced Electro-Optical System) для телескопа этой лаборатории, расположенного на горе Haleakala (Гавайи, США). Эта система используется на 3,67-м телескопе и имеет зеркало с 941 актюатором.

Существует также большое количество других адаптивных оптических систем, построенных для астрономии. Практически все новые телескопы 8-м класса будут оснащены адаптивной оптикой, а большинство инструментов 4-м класса будет модернизировано с использованием этих систем. Примерами систем, которые используются для регулярных астрономических исследований, являются, например, канадско-французский телескоп на Гавайях, построенный Гавайским университетом, и система ALFA (рис.7), построенная компанией AOA для телескопа астрономической обсерватории в Calar Alto (Испания) Института квантовой оптики им. Макса Планка (Max Planck Quantum Optics Institute, Германия). Система ALFA [5] имеет лазерную направляющую звезду, высокоскоростную чувствительную фотокамеру и деформируемое



Начальное состояние (интерференционные полосы перед выравниванием)

Стандартная модель данных (UDM), выровненная до уровня $\lambda/25$ кв (измерено за двойной проход)

Рис.6 Выравнивание деформируемого зеркала компании Xinetics с использованием датчика волнового фронта WaveScope с его опцией адаптивной оптики

97-ю актюаторами зеркало. Дальнейшее распространение этой технологии, которое осуществляют такие правительственные лаборатории, как Phillips Lab, Jet Propulsion Laboratory, Lawrence Livermore и MIT Lincoln Laboratory, а также компании, например AOA, привело к широкому использованию адаптивной оптики на практике.

Интерес ВПК США к применению защищенных систем оптической связи, датчиков дальнего обнаружения для театра военных действий и оборонных систем, использующих баллистические ракеты, также является движущей силой для новых исследований в области адаптивной оптики и датчиков волнового фронта.

ЧТО ДАЛЬШЕ?

Адаптивная оптика ищет новые приложения и за пределами оборонных систем ВПК и астрономии. Оптические системы с мощными лазерами, используемые для обработки материалов, например для отделения изотопов, накапливают ошибки волнового фронта благодаря небольшим температурным искажениям в каждом из множества используемых оптичес-

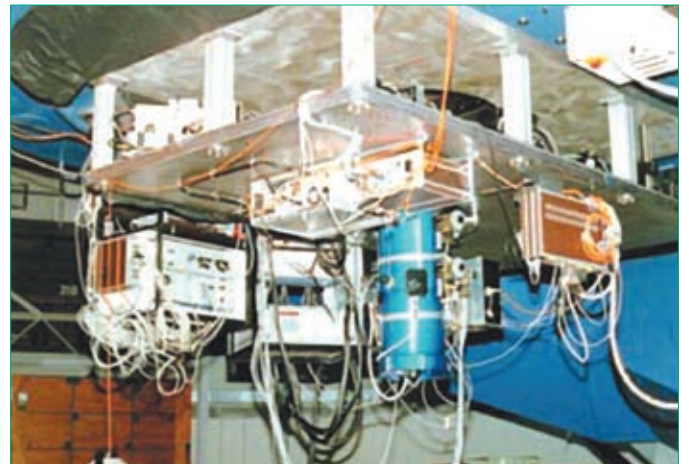


Рис.7 Система адаптивной оптики ALFA, установленная Институтом квантовой оптики им. Макса Планка (Германия) на астрономическом телескопе в Calar Alto, Испания

ких элементов, которые можно было бы легко скорректировать с помощью адаптивной оптики. Другие приложения можно найти в системах лазерной связи, которые используют кодированные инфракрасные лазеры для связи между точками, находящимися на расстоянии прямой видимости. Турбулентность и сцинтилляции вдоль пути распространения луча в атмосфере могут быть значительными. Здесь адаптивная оптика используется для того, чтобы ограничить потерю данных и уменьшить затухание в канале [6]. Она может использоваться и в медицине: например, фотография, получаемая сетчаткой глаза, может быть улучшена путем компенсации турбулентности, внесенной внутриглазной циркулирующей жидкостью, а глазные хирурги могут использовать датчики волнового фронта для измерения формы роговицы у пациента во время такой процедуры, как кератектомия. В офталь-

мологии как Visx, так и Zeiss Humphrey разработали инструменты на основе датчика Гартмана для измерения оптических параметров глаза пациента.

Датчики волнового фронта также используются в оптических измерениях и производстве. Форму оптических компонентов можно измерить в процессе производства. Диапазон применений – от измерений положения зеркала телескопа для контроля выравнивания связанных совместно с ним линз, до оптических волокон, используемых для целей телекоммуникаций. Наиболее успешный пример использования датчика волнового фронта для оптического тестирования – работа по ремонту космического телескопа Хаббл (Hubble), которая проводилась с помощью датчика волнового фронта сверхвысокой точности, изготовленного компанией AOA. Этот датчик, названный ABA (Aberrated Beam Analyzer – анализатор aberrаций луча), использовался для тестирования систем COSTAR (Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement) и WF PC II (Wide Field/Planetary Camera), прежде чем был запущен в космос. Датчик использует усовершенствованный вариант метода Гартмана для достижения абсолютной точности лучше, чем $\lambda/100$ скв, и долговременной повторяемости порядка $\lambda/2000$ скв [7, 8]. Результаты были настолько успешными, что этот датчик стал образцовым для тестирования всех инструментов космического телескопа Хаббл.

РАССУЖДАЯ ШИРЕ

Астрономические исследования всегда подстегивали развитие адаптивной оптики. Даже после установки совершенных систем на новых 8-м телескопах астрономы и инженеры устремлены в будущее. Следующий шаг, или даже прыжок, в конструкции телескопов – создание ELT (Extremely Large Telescope – сверхбольшого телескопа) с диаметром апертуры 25–100 м и разработка *мультисопряженной (multiconjugate) адаптивной оптики*, в которой турбулентность различных

атмосферных слоев измеряется отдельными лазерными маяками и датчиками волнового фронта. Такие необычно большие апертуры, возможно, будут составлены из ряда отдельных телескопов с апертурами диаметром 1–5 м каждый со своей собственной системой адаптивной оптики и лазерной направляющей звездой [9]. Отдельные зеркала будут выровнены так, чтобы работали как один большой блок. Это выравнивание само по себе потребует датчика волнового фронта, что будет еще одним вызовом тем, кто уже вовлечен в выравнивание зеркал современных больших сегментированных телескопов (подобно Keck и Hobby Eberly). Будучи один раз выровнены, параллельные адаптивные системы позволят корректировать получаемые изображения. Вся необходимая для реализации адаптивной оптики на ELT технология уже существует, весь вопрос только в масштабах системы.

ВЫВОДЫ

Адаптивная оптика развивается в двух совершенно разных направлениях: поиска приложений в медицине и в изготовлении вещей, нужных в быту (с одной стороны); продолжения работ в области оборонной тематики и астрономии с целью разработки еще больших систем (с другой).

Влияние технологий изготовления компонентов, требуемых для адаптивной оптики, распространяется далеко за пределы области основного применения. Высокоскоростные камеры машинного зрения коммерчески доступны и оснащены системами обработки в реальном масштабе времени, необходимыми для быстрой автоматической инспекции и управления. Многие бытовые фотоаппараты оснащены системами электронной стабилизации изображения, используют микрооптические технологии (разработанные для датчиков Гартмана) для создания приложений, управляющих массивами лазерных диодов, генерацией кондиционированного освещения и продвинутыми дисплеями.

ОБ АВТОРАХ

Алан Вирт (Allan Wirth) и Том Гонсировский (Tom Gonsiorowski) – компания Adaptive Optics Associates, Inc

Адаптивные оптические системы требовали детекторов с высокой квантовой эффективностью, уровнем шумов ниже 100 электронов на пиксел и скоростью тысячи кадров в секунду. Скорость вычислений поддерживалась на уровне выше 10 Гфлопс, а деформируемые зеркала использовали сотни актюаторов. До недавнего времени цена таких систем составляла миллионы долларов за одну установку, однако широкое внедрение современных коммерческих компьютеров и фотокамер значительно снизили их стоимость.

С прогрессом технологии детекторы становились тише, больше и быстрее, а процессоры мощнее, и зеркала с тысячу актюаторов также становились реальностью. Большие системы сегодня используются для коррекции апертур 8-м и 10-м телескопов. Наступит день, когда много таких систем будут соединены в параллель, что позволит корректировать изображения, сформированные телескопами со 100-м диаметром эквивалентного зеркала.

Сегодня адаптивная оптика повсеместно используется во многих астрономических телескопах. В течение нескольких лет

она станет универсальным инструментом астрономической оптики и мы, наконец-то, превзойдем сэра Исаака Ньютона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wirth A., Gonsiorowski T.** From <http://www.photonics.com/content/handbook/2006/detectors/82216.aspx>
2. **Babcock H.W.** The possibility of compensating atmospheric seeing. – Publ. Astr. Soc. Pacific, 1953, v.65, p.229–236.
3. **Collins G.P.** Making stars to see stars: DOD adaptive optics work is declassified. – Physics Today, Feb. 1992, v.18.
4. **Foy R., Labeyrie A.** Feasibility of adaptive optic telescope with laserprobe. – Astron. Astrophys., 1985, v.152, p.29–31.
5. **Bruno T.L., Wirth A., Jankevics A.J.** Applying Hartmann wavefront-sensing technology to precision optical testing of the Hubble Space Telescope correctors. – Proc. of the SPIE, 1993, v.1920, p.328–336.
6. **Wirth A., Bruno T.L., Jankevics A.J.** Satellite Conference on Active and Adaptive Optics. – Proc. of the ICO-16. Garching/Munich., 1993, p.325–330.
7. **Wirth A.** et al. Real-time modal control implementation for adaptive optics. – Applied Optics, 1998, v.37, No.21, p.4586–4560.
8. **Levine B.M.** et al. Satellite Conference on Active and Horizontal line-of-sight turbulence over near-ground paths and implications for adaptive optics corrections in laser communications. – Applied Optics, 1998, v.37, No.21, p.4553–4597.
9. **Schmutz L.** et al. Adaptive optics concepts for extremely large aperture telescopes. Workshop on Extremely Large Telescopes. – Backaskog Castle, Sweden, 1999.