

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Владимир Петрович Лукин

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1, доктор физико-математических наук, профессор, тел. (382)249-26-06, e-mail: lukin@iao.ru

В связи с широким применением оптико-электронных систем дан обзор развития адаптивной оптики, как эффективному средству устранения нерегулярных искажений, возникающих при распространении света в неоднородной среде с помощью управляемых оптических элементов. Представлено описание этого быстро развивающегося направления науки и техники. Многие идеи, развиваемые в последние годы, были высказаны еще достаточно давно, однако только сейчас, в связи с созданием современной элементной базы оптико-электронных систем и приборов, начинают внедряться в самые широкие области науки и техники. Проведен ретроспективный анализ развития адаптивной оптики от идей до внедренных систем в астрономии, в исследования физики мощных лазеров, в медицине. Представлено современное состояние развития систем адаптивной оптики в звездной и солнечной астрономии, приведены некоторые результаты их использования в системах коррекции искажений мощных лазерных систем и комплексов.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, адаптивная оптика, датчик волнового фронта, моделирование, солнечный телескоп.

THE TECHNOLOGY OF ADAPTIVE OPTICS TO EXTEND OPPORTUNITIES OF OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS

Vladimir P. Lukin

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Square Academician Zuev St., Tomsk, 634055, Russia, D. Sc., Professor, phone: (382)249-26-06, e-mail: lukin@iao.ru

In connection with the widespread use of optoelectronic systems, an overview of the development of adaptive optics is given as an effective means of eliminating the irregular distortions that occur when light propagates in an inhomogeneous medium using controlled optical elements. A description of this rapidly developing field of science and technology is presented. Many ideas developed in recent years have been expressed quite a long time ago, but only now, in connection with the creation of a modern element base of optical-electronic systems and devices, they are beginning to be introduced into the widest fields of science and technology. Many ideas developed in recent years have been expressed quite a long time ago, but only now, in connection with the creation of a modern element base of optical-electronic systems and devices, they are beginning to be introduced into the widest fields of science and technology. A retrospective analysis of the development of adaptive optics from ideas to embedded systems in astronomy, in research into the physics of high-power lasers, in medicine has been carried out. The present state of development of systems of adaptive optics in stellar and solar astronomy is presented, some results of their use in systems for the distortion correction of high-power laser systems and complexes are presented.

Key words: optoelectronic systems, adaptive optics, wavefront sensor, simulation, solar telescope.

Введение

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) ввиду технического несовершенства своих составляющих элементов и случайных неоднородностей на трассах распространения оптических волн практически не реализуют своей предельной эффективности. В тоже время интенсивное применение ОЭС для передачи информации, узконаправленной транспортировки энергии электромагнитного излучения, формирования изображения в условиях реальных условий делают актуальным развитие методов и устройств коррекции, включая адаптивные, представляющие собой наиболее радикальные средства борьбы со снижением этой эффективности. Применительно к системам, работающим в случайно-неоднородных средах, таких как земная атмосфера, основными искажающими факторами, наряду с молекулярным поглощением и аэрозольным рассеянием света, являются крупномасштабные случайные неоднородности показателя преломления. Они, в первую очередь, связаны с атмосферной рефракцией и турбулентным перемешиванием воздушных масс в атмосфере, а также могут возникать за счет молекулярного и аэрозольного поглощения в канале распространения мощного оптического излучения. Возможно применение различных методов для минимизации этих искажений, например, путем выбора оптимальной длины волны, пространственных параметров и временных режимов излучения и т. д. Однако наиболее радикальным средством являются создаваемые в настоящее время системы адаптивной оптики (АО), которые позволяют в реальном масштабе времени компенсировать эти искажения.

Что такое сама адаптивная оптика

Термин «адаптивная оптика» обобщает широкий круг задач и собственно оптических устройств, которые позволяют уменьшить влияние атмосферных или иных неоднородностей показателя преломления на эффективность работы оптических систем. Применительно к атмосферным задачам целью разработки адаптивных систем является минимизация искажений при формировании оптических пучков и изображений. Принцип работы адаптивных систем заключается в управлении волновым фронтом принимаемого или передаваемого излучения. Это управление осуществляется посредством активных элементов, таких как гибкие или составные управляемые зеркала, управляемые фазовые транспаранты и т. д.

В настоящее время АО стала разделом физической оптики, изучающим методы устранения нерегулярных искажений, возникающих при распространении света в неоднородной среде, с помощью управляемых оптических элементов. Основные задачи АО – это повышение предела разрешения наблюдатель-

ных приборов, концентрация оптического излучения на приемнике или мишени и т. п. АО находит применение в конструировании наземных астрономических телескопов, в системах оптической коммуникации, в промышленной лазерной технике, в офтальмологии и пр., где позволяет компенсировать, соответственно, атмосферные искажения, абберации оптических систем, в том числе оптических элементов глаза человека.

Об актуальности проблемы развития систем АО свидетельствуют многочисленные международные и российские конференции, в том числе, мероприятия, проводимые Международным обществом инженеров-оптиков (SPIE), наличие секций по АО в программах различных конференций, тематика которых связана с физикой лазеров, оптикой атмосферы, вопросами дистанционного зондирования, с применением лазерной техники и оптики в промышленности и медицине, особенно, в офтальмологии. АО прошла время своего становления и вступает в период широкого внедрения. Развитие АО было стимулировано в первую очередь практическими задачами создания оптических систем, для успешного функционирования которых необходимо устранять возмущения волнового фронта, вызываемые неконтролируемыми случайными воздействиями. К наиболее известным системам такого типа относятся: наземные телескопы для астрономических исследований, системы формирования и фокусировки лазерного излучения; лазерные высокоточные измерительные системы, работающие в атмосфере; оптические системы формирования излучения мощных лазеров. Задачи систем АО достаточно разнообразны, но их объединяет общая идея – устранение нерегулярных искажений, возникающих при распространении света в неоднородной среде с помощью управляемых оптических элементов.

Адаптивная оптика (АО) стремительно развивающаяся ветвь науки, целиком базирующаяся на новых технологиях. Внедрение ее достижений в современную оптическую, в том числе, лазерную технику сулит грандиозные перспективы и дает возможности появления и роста большому кругу новейших оптических технологий. Для успешного развития этой отрасли, прежде всего, требуется отказ от оценки АО как чисто прикладной технологии, а отнесение самой адаптивной оптики в список фундаментальных наук в разделе физика и астрономия, а вот создание элементной базы этой науки следует отнести к разряду создания новых технологий и новых технических средств.

Адаптивная оптика – это, с одной стороны, часть физической оптики, а с другой стороны она входит в раздел, описывающий фундаментальные проблемы фотоники и прецизионные лазерные технологии. В современном представлении фотоника осуществляет связь между фундаментальными проблемами, решаемыми квантовой электроникой, лазерной физикой, нелинейной оптикой и актуальными практическими задачами, направленными на разработку новых лазерных и лазерно-информационных технологий, включающими инте-

гральную, волоконную, адаптивную оптику, микро- и нанооптику, волноводную оптоэлектронику и др. Возникла и динамично развивается оптоинформатика, связанная с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий и устройств для передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий, разработки принципиально новых средств программного обеспечения.

Научные исследования по направлению фотоника имеют междисциплинарный характер и объединяют физику, химию, математику, информатику, инженерные науки и биологию. Основные технологии, с которых начиналась и на которых базируется АО, это следующие:

- теория распространения волн в случайно-неоднородных средах,
- методы параллельных численных вычислений,
- численные методы решения обратных задач оптики,
- методы фазовых измерений,
- технологический переход от сплошных оптических к составным и динамическим элементам,
- новые элементы управления светом,
- технологии создания опорных источников.

Схемы построения систем АО

Рассмотрим теперь классическую схему построения системы адаптивной оптики. Для выполнения своих функций система АО должна содержать, как правило, следующие основные компоненты:

- 1) устройство воздействия на волновой фронт (активный корректор), которое может быть отражающим или преломляющим;
- 2) измерительное устройство (датчик волнового фронта), принимающее свет и вырабатывающее сигнал, связанный с оптимизируемым свойством;
- 3) устройство обработки информации, воспринимающее результаты измерений и преобразующее их в сигналы для управления устройством воздействия на волновой фронт,
- 4) опорный источник, обеспечивающий информацию о флуктуациях оптической волны при ее распространении в случайной среде.

Это те дополнительные элементы, которые должны были включены в состав оптико-электронной системы для обеспечения коррекции. В ряде обзоров и монографий [1–9] собрана достаточно полная информация о них. Надо отметить, что все элементы, входящие в состав систем АО, достаточно традиционны, кроме, принципиально нового оптического управляемого (активного) элемента.

Расположение этих основных компонентов (рис. 1) в системе АО будет определяться, прежде всего, назначением самой оптической системы.



Рис. 1. Структурная схема астрономического телескопа с системой АО

Численное моделирование систем АО

Надо сказать, что начавшееся в 70 годы XX века широкое практическое внедрение элементов и систем АО выявило ряд вопросов, потребовавших дальнейшего развития теории распространения оптических волн в атмосфере. Поэтому вполне объяснимо то внимание разработчиков систем АО к вопросам развития исследований по численному моделированию. Надо сказать, что моделирование систем АО, как динамических систем, требуется проводить как на этапе проектирования таких систем и определения их основных параметров, так и при создании математического аппарата, обеспечивающего быстрое вычисление и расчет сигналов управления.

Поиск ответов на возникающие вопросы приводит к необходимости разработки детальной и адекватной математической модели АО и использования такого метода исследования, как *численный эксперимент*, который основывается на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих распространение оптических волн в атмосфере. Численный эксперимент позволяет учесть максимальное число факторов для адекватного моделирования АО и дает возможность в рамках единого подхода исследовать практически любую значимую характеристику излучения – эффективный размер светового пятна, пиковую интенсивность, мощность в приемной апертуре, статистические характеристики интенсивности и фазы излучения. В отношении систем АО численный эксперимент позволяет просчитать и предсказать эффективность различных конфигураций системы, тогда как при проведении натурного эксперимента это потребовало бы значительных затрат времени и средств.

Следует отметить, что одной из первых работ по численному моделированию турбулентных искажений оптических волн была работа Бакли [10], в которой использовал метод преобразования Фурье (метод спектральной выборки) для моделирования одномерных случайных фазовых экранов. Далее в работах Флека, Морриса и Фейта [11], В. П. Кандидова и В. И. Леденева [12], П. А. Коняева [13] метод спектральной выборки использовался для генерации двумерных случайных фазовых экранов в задаче распространения когерентного пучка в случайно-неоднородной среде, в том числе и для оценки эффективности фазовой коррекции атмосферных искажений. В работе [14] аналогичный метод использовался в исследованиях функции плотности вероятности для флуктуаций интенсивности.

Упомянутый метод преобразования Фурье первоначально использовался для цифрового моделирования в радиотехнике [15]. Однако особенностью турбулентной атмосферы, как случайно-неоднородной среды, является предельно широкий (больше, чем $1 : 1\ 000$) диапазон пространственных масштабов неоднородностей показателя преломления. Чтобы корректно моделировать все масштабы турбулентных флуктуаций (от внутреннего до внешнего), требуется сетка размерностью как минимум в тысячу узлов по каждой из координат, что приводит к колоссальным вычислительным затратам. Для преодоления трудностей, связанных с широкополосностью спектра атмосферной турбулентности, имеет смысл применить некий «комбинированный» метод, о котором впервые упоминается в докладах Дункана и Коллинза [16, 17], а также в работе И. Е. Тельпуховского и С. С. Чеснокова [18]. Основная идея состоит в совместном использовании спектрального (гармонического) и полиномиального представлений, причем каждое из них применяется для моделирования своей области пространственных масштабов: спектральное разложение используется для моделирования мелкомасштабных неоднородностей, а полиномиальное – для представления масштабов больше, чем размер расчетной сетки. Этот подход получил дальнейшее развитие в работах [19–21], где он был обобщен также и на случай нестационарных (динамических) задач.

Вклад СССР и России в развитие теории распространения волн в случайно-неоднородных средах

В основе теории описания флуктуаций оптических волн в случайных средах лежат работы Рытова С. М., Татарского В. И., Обухова А. М., Колмогорова А. Н., Яненко Н. Н., работы научных школ МГУ, ИОФ РАН, ФИАН, ИПФ РАН, НИРФИ, ИОА СО РАН. Определенную роль сыграла секция по АО РАН, работающая под руководством академика Зуева В. Е. (ученый секр. Лукин В. П.). Важным тогда было организация и проведение первых конференций по АО в СССР и в России: это были научные совещания, организуемые в Томске, 1978; в КРАО, 1986; в Шатуре, 1997.

Примерно тогда же начались и первые серьезные международные контакты, в том числе, участие в проведении конференций: Scintillation Meeting, 1992

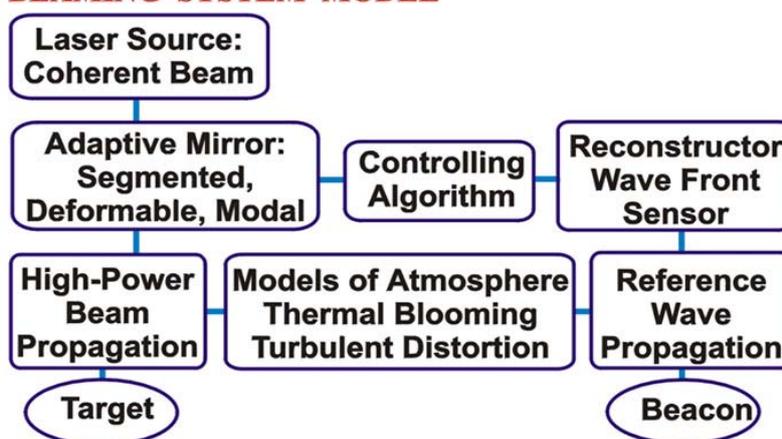
(Tatarskii V.I., Ishimaru A.), участие в работе первых международных конференций по АО (Мюнхен – 1993, 1995; Гавайи – 1994, 1996), а также чтение лекций на международных школах во Франции (Коржес, 1993; Лезуж, 1996).

Известно, что в основе современного моделирования работы систем АО в настоящее время лежит, как правило, 4-мерная программа динамического моделирования работы адаптивных систем. В ИОА СО РАН такая программа была развита в период 1989–1994 гг. Она представляет собой 4-мерную компьютерную динамическую модель атмосферной адаптивной системы, впервые опубликованную в работах [21–23].

Эта система была оформлена в виде пакета программ [24–26]. Содержание пакета представлено на рис. 2. В пакете две вида программ – для систем видения и для лазерных систем, переносящих энергию.

STRUCTURE OF THE MODELS

BEAMING SYSTEM MODEL



IMAGING SYSTEM MODEL

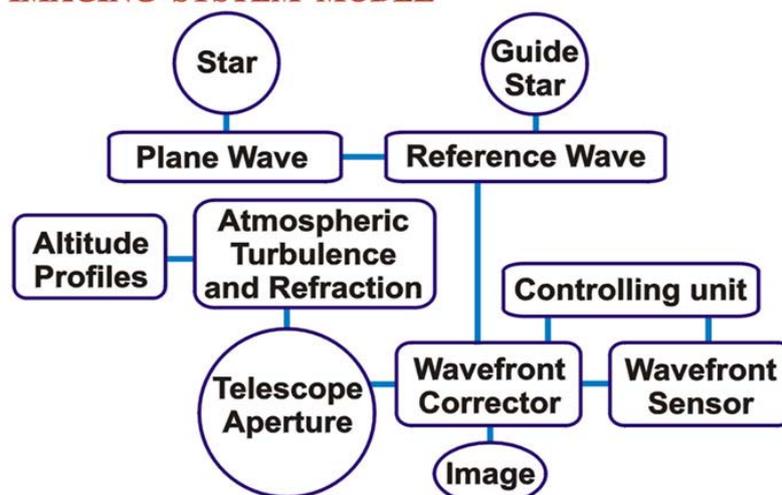


Рис. 2. Пакет программ, который был реализован, в частности, на компьютерном кластере типа Эльбрус

Расчеты для астрономических систем

Надо отметить, что с его использованием было осуществлено сравнение расчетов на его основе с пакетом MOLLY (США). На его основе были выполнены расчеты характеристик наземных оптических телескопов. В 1994 г. было выполнено проектирование адаптивной системы для 10-метрового российского составного телескопа AST-10 [27, 28].

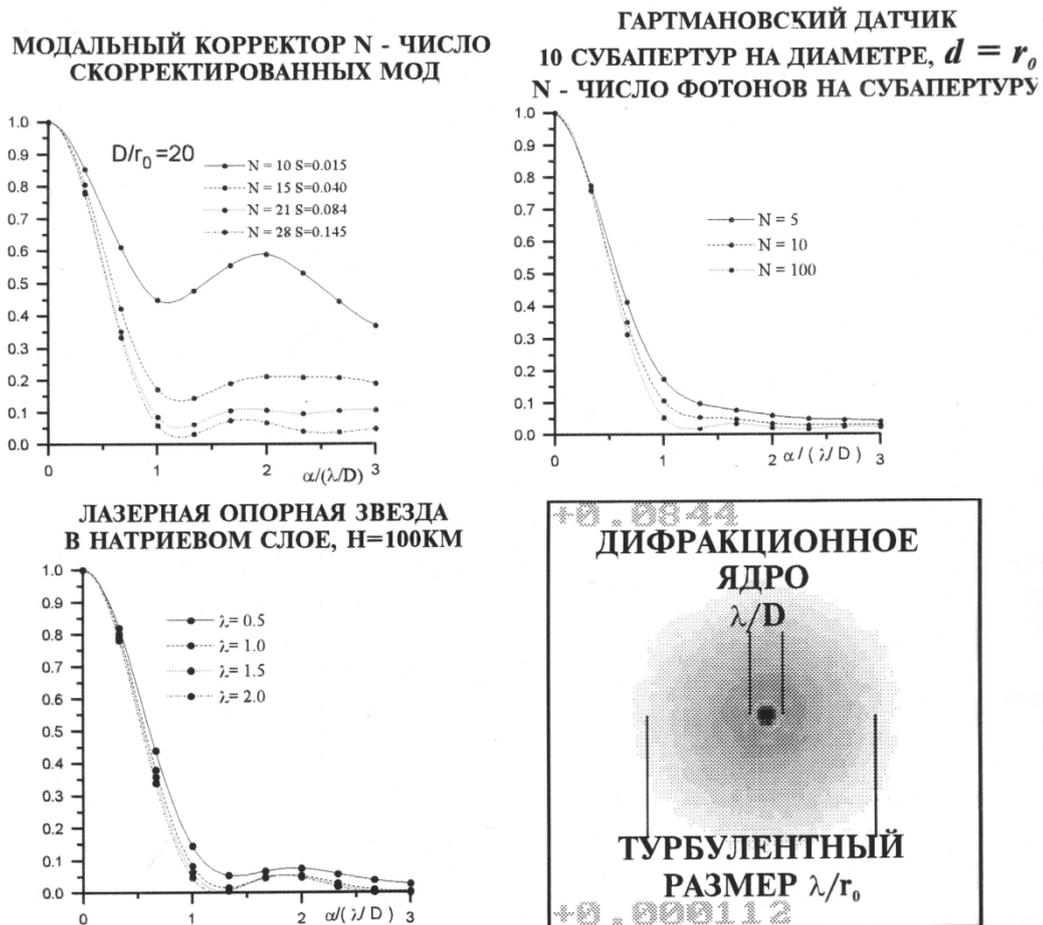


Рис. 3. Расчеты для АСТ-10. По вертикальной оси отложено значение ФРТ, нормированное на осевое значение, по горизонтальной оси – угловое расстояние, нормированное на дифракционный размер

Также был выполнен анализ (1997) больше-базового звездного интерферометра при различных ориентациях базы интерферометра, распределения скорости ветра и внешнего масштаба турбулентности [29].

Чтобы узнать реальную историю развития АО, читайте выпуски сборника ЛАС «Как это было...» [30], а также статью [31] или книгу П. В. Зарубина «Лазерное оружие. Миф или реальность».

Современные ОЭС (по материалам зарубежных изданий)

Рассмотрим в качестве примеров [32–35] несколько современных ОЭС систем. Так, к их числу могут относиться следующие системы:

- ABL – лазер на борту самолета;
- SBL – лазер космического базирования;
- TABL – тактический мощный лазер;
- NIF (192) – система лазерного термоядерного синтеза: NOVA (10), Omega (60), Beamlet;
- SELENE – система передачи энергии мощного лазера на спутники;
- RelayMirror – система передачи и трансформации лазерного излучения на трассах различных сценариев;
- AAT/AST – адаптивные астрономические телескопы;
- OWL – Ошеломляюще Большой Телескоп;
- LGS – лазерные опорные звезды.

На рис. 4 показана работа американской системы (это проект, но довольно хорошо продвинутый) – лазера на борту самолета.



Рис. 4. Система ABL – лазер на борту самолета

Дадим здесь краткое примерное описание работы [32] этой системы. Для обнаружения она работает вместе с системой АВАКС. Полет проходит на высоте 10–14 км, дальность работы лазерной системы до 500 км, скорость полета 600–850 км/час, система работает выше облаков. В настоящее время ABL имеет в своем составе: 6 инфракрасных датчиков для пассивного обнаружения пламени или факела от ракеты, в системе есть лазер ARS (CO₂), мощность примерно 200 Ватт, служит для определения дальности до цели, лазер TILL (Yb:YAG) нескольких киловатт мощности, этот лазер освещает носовую часть ракеты и получает первый отраженный сигнал. Затем вступает в работу лазер BILL

(Nd:YAG) – этот лазер создает опорную звезду и позволяет на основе отраженного сигнала получить информацию об атмосфере, после этого запускается адаптивная система и срабатывает лазер HEL (COIL) – это лазер на 1,315 мкм и мегаваттного класса мощности. Лазер HEL (COIL) представляет собой 6 модулей, каждый имеет размер с ВАЗ и вес примерно 1.2 тонны. Лазер кассетного заряжения, после выстрела компоненты реактивы выбрасываются с самолета. Ракета обнаруживается и уничтожается на начальной фазе разгона, пока ее скорость не превышает 1 км/с.

Расчеты атмосферных параметров для системы ABL

Для того чтобы оценить возможности такой системы, предварительно необходима оценка [1] параметров системы АО, а именно следующих:

- $r_0 \approx (k^2 \cos^{-1} \Theta \int_{H_0}^{\infty} d\xi C_n^2(\xi))^{-5/3}$ – радиуса когерентности оптической волны;
- $\tau_0 \approx r_0 / v$ – допустимой временной задержки сигнала в контуре обратной связи коррекции;
- $\Theta \approx r_0 \cos^{-1} \Theta / h_\xi$ – угла изопланатизма системы;
- внешнего масштаба турбулентности атмосферы L0;
- возможного уровня дисперсии флуктуаций интенсивности:

$$\sigma_{\text{инт}}^2 = (k^{7/6} C_n^2 L^{11/6}).$$

Общие требования для применения адаптивных систем

Можно сформулировать в качестве основного требования к системе адаптивной коррекции – необходимо обеспечить нахождение объекта за время всех задержек в пределах изопланарной области атмосферы. Условием эффективной адаптивной коррекции является соблюдение следующего неравенства [36–38]: $v_{\text{об}}(2L/c + \tau_a) < \Theta_{\text{из}} = r_0 / h_{\text{eff}}$, здесь $v_{\text{об}}$ – скорость объекта, $\Theta_{\text{из}}$ – изопланарный угол турбулентной атмосферы между источником излучения и объектом, τ_a – временная задержка в самой адаптивной системе.

При наблюдении в зенит и на длине волны 0.55 мкм в хороших условиях угол изопланатизма для всей толщи атмосферы примерно равен 10^{-4} . Для горизонтальных атмосферных трасс этот угол можно оценивать как отношение $\Theta_{\text{из}} \approx r_0 / L$ и он будет составлять величину порядка 10^{-5} . Это означает, что система наведения должна работать с субсекундной точностью наведения. Это может обеспечить современное адаптивное зеркало, установленное в кардановом подвесе.

Для трассы СП-Земля «быстрой» адаптивной системой будет считаться система с полосой частот не менее 10 КГц, такая адаптивная система может от-

рабатывать уходы положения СП по отношению к станциям на Земле со скоростями до 20 км/с.

Если же использовать «медленные» адаптивные системы, например, с полосой частот 200 Гц, тогда скорости ухода положения СП не могут быть более, чем 400 м/с. Это уже сопоставимо со скоростями ветра на больших высотах. Именно сильные ветры на большой высоте будут основной помехой для стабилизации СП.

Расчеты по моделям турбулентной атмосферы

С использованием нашего компьютерного пакета [23–26] были рассчитаны все необходимые параметры для системы AVL и оказалось, что современный уровень развития техники не способен пока в полной мере удовлетворить требованиям разработчиков. На рис. 5–7 приведены результаты расчетов с использованием пакета: рассчитаны радиусы когерентности, минимальная требуемая частота работы системы АО, а также зависимость качества коррекции от уровня дисперсии флуктуаций интенсивности в оптическом излучении. На рис. 6 обозначение M – это скорость объекта в числах Маха.

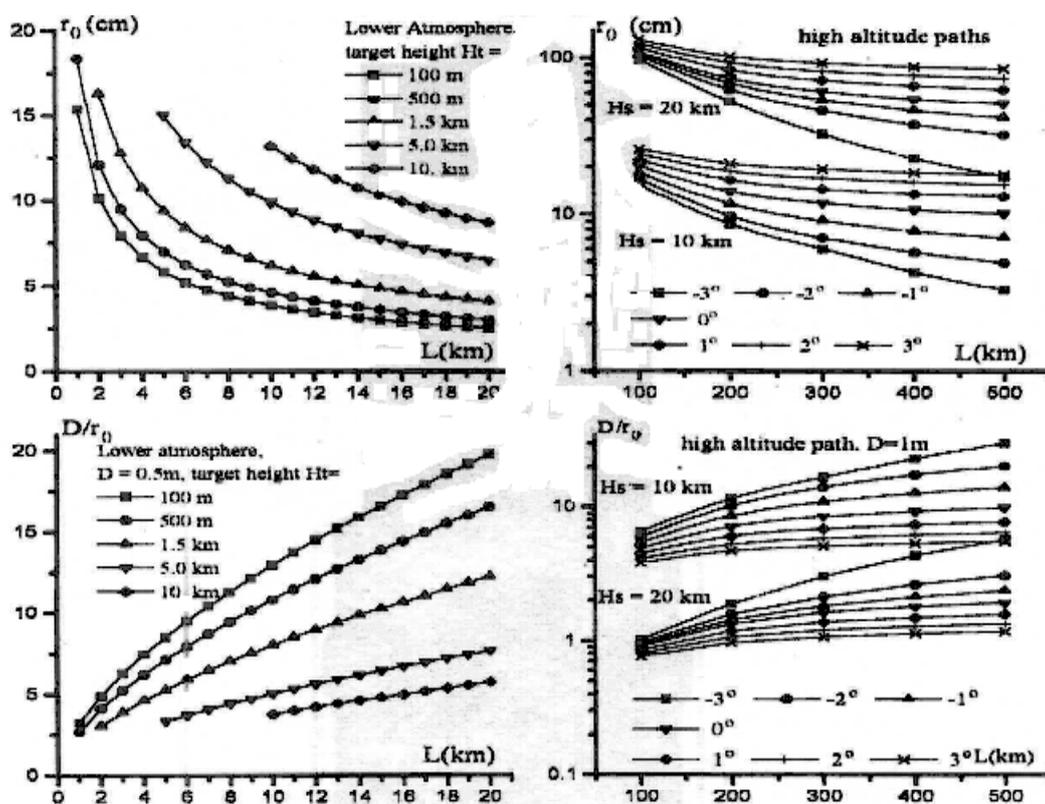


Рис. 5. Расчет величины радиуса когерентности для различных сценариев работы системы AVL:

левый столбец – работа системы с Земли на наклонных трассах; правый столбец – работа при полетах на высоте 10 и 20 км и длинах трасс до 500 км

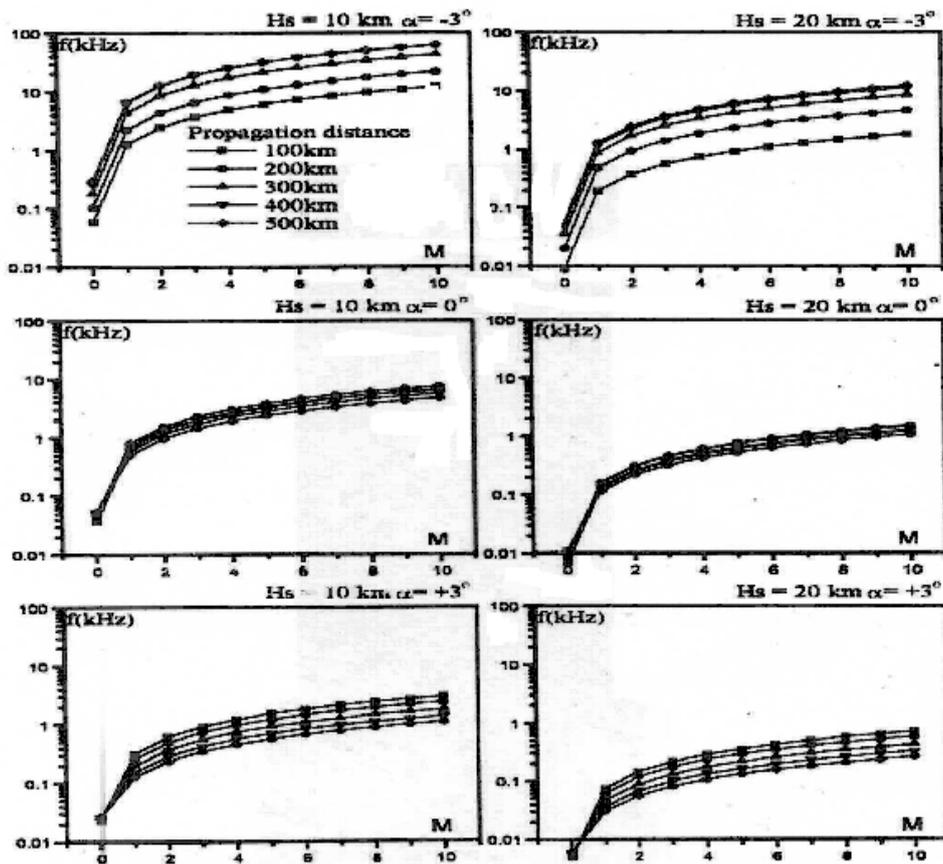


Рис. 6. Расчет требуемой минимальной частоты для системы АО, которая способна обеспечить коррекцию, при работе по объекту, движущемуся с различной скоростью в атмосфере:

слева полет на высоте 10 км, правый столбец – полет на высоте 20 км

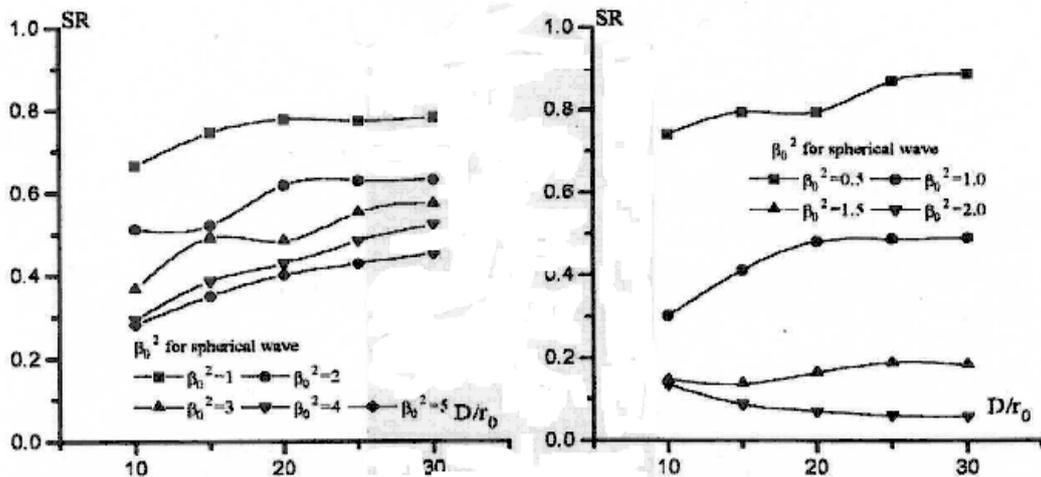


Рис. 7. Параметр Штреля системы адаптивной фокусировки лазерного пучка при применении адаптивной коррекции (слева – полная фазовая коррекция, справа – фазовые дислокации фильтруются) как функция размера апертуры передающей лазерной системы. Здесь D – это диаметр лазерного пучка

Результаты, представленные на рис. 7, убедительно показывают, что эффективность фазовой системы коррекции будет существенно зависеть от уровня флуктуаций интенсивности в принимаемой оптической волне [36–38].

Проблемы применения лазерных опорных звезд

Для обеспечения практической реализации излучающей оптической системы атмосфера должна быть включена в контур обратной связи, т. е. рассеянное излучение может быть получено как отражение от объекта или от неоднородностей атмосферы. В таком случае можно говорить о формировании искусственного (виртуального) опорного источника.

В начале 1980-х гг. широко исследовались адаптивные астрономические телескопические системы, а искусственные опорные источники стали называть *лазерными опорными звездами (ЛОЗ)*. Реализация подобных «звезд» стала возможным на основе использования: 1) обратного рэлеевского рассеяния оптического излучения (используется специальный лазерный источник, работающий с Земли в заданном направлении вверх) или упругого рассеяния света на атмосферном аэрозоле на высотах 8–20 км, 2) стимулированного излучения на облаках атомов некоторых металлов (подобные облака на больших высотах в атмосфере образуют металлы, например натрий). В первом случае лазерные опорные звезды стали называться рэлеевскими опорными звездами, во втором – натриевыми.

В зависимости от типа формируемой звезды требования к лазерному источнику существенно меняются. Для формирования рэлеевской звезды требуется коротковолновое достаточно мощное лазерное излучение. Натриевая звезда требует определенных: длины волны, ширины полосы и мощности излучателя. Это обусловлено селективностью поглощения, а также достаточно низким уровнем мощности, при котором наступает эффект насыщения.

Интерес к этой проблеме особенно вырос в связи с изучением возможностей применения отраженного назад от объектов (или от неоднородностей атмосферы) оптического излучения. Известно, что в реальных оптико-электронных системах может быть использовано рассеянное назад излучение. В адаптивных системах в качестве опорного применяется излучение, прошедшее оптическую трассу дважды. В качестве одного из предельных случаев может рассматриваться зеркально-отраженное излучение.

В этом случае необходимо принимать во внимание особенности флуктуаций параметров оптических волн, прошедших дважды через одни и те же оптические неоднородности атмосферы. Поскольку в адаптивной оптике наиболее важным параметром является фаза оптической волны, то особенное внимание нужно уделить флуктуациям фазы отраженных волн в атмосфере.

Примерно в середине 1970-х гг. исследователи и инженеры, работающие над созданием оптических систем видения и зондирования атмосферы, осознали важность особенностей флуктуаций отраженных волн. По сравнению с передающими системами в оптических системах зондирования всегда присутст-

вует эффект прохождения оптической трассы дважды: при прямом и при обратном распространении.

Первые советские работы [39–43] по применению искусственного опорного бакена, датируются, начиная с 1979 г., а далее 1979–1983 гг., 1986 г. Первое совещание (еще в рамках СССР) по проблеме применение систем АО называлось «Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп» и было проведено в 1986 г. в Крымской астрофизической обсерватории. Там были представлены расчеты предельного разрешения телескопа с опорным бакеном. Первое упоминание о влиянии «фокусного неизопланатизма» (1995), впервые был предложен алгоритм, так называемой, «оптимальной коррекции» (1996), выполнен анализ моностатических и бистатических схем (1995, 1996, 1998), была предложена гибридная схема (1997). В работах 1999 г. проведено сравнение двух бистатических схем формирования ЛОЗ, а также показана возможность оценки «полного глобального наклона» – лазерный крест (2000).

Была даже предложена [43] конкретная схема (рис. 8) по формированию такой ЛОЗ с использованием сигнала отраженного от самого объекта или от неоднородностей атмосферы.

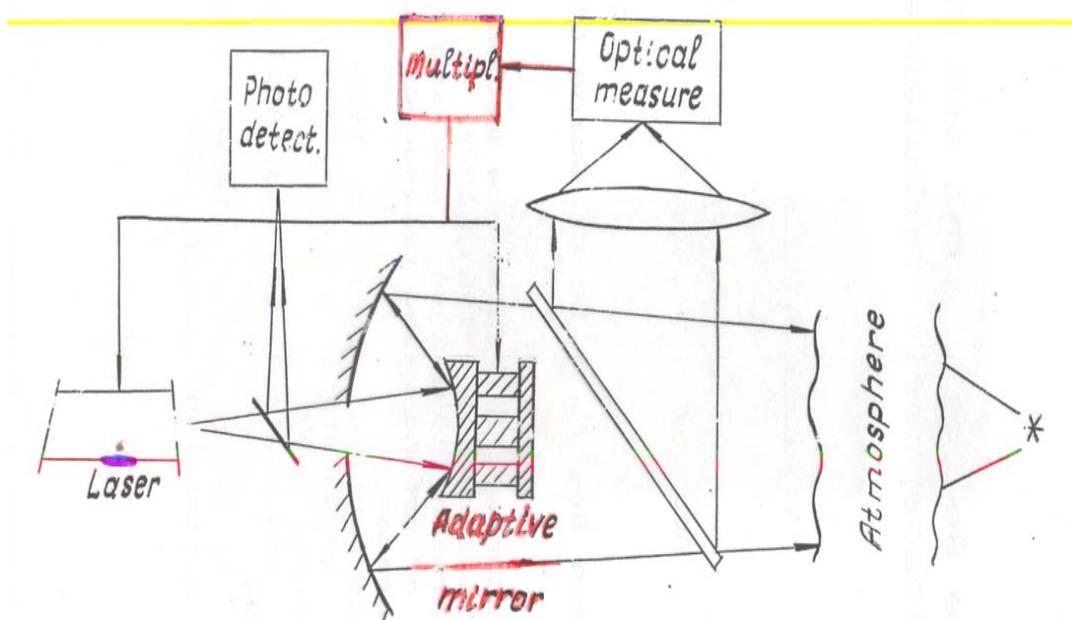


Рис. 8. Первая схема применения лазерной опорной звезды на основе обратного рассеяния света

В то же время важно отметить, для правильной оценки вклада, что до 1992 г. все работы по применению лазеров по созданию опорных источников в США были засекречены.

В первых американских работах (секретных, о них все узнали только после 1992 г.) следует выделить [32]: расчеты Д. Фрида (conference in La Jolle: first calculation of D. Fried, 1982), предложение Уильяма Хаппера по применению

отражения от слоя натрия в атмосфере (Will Happer, sodium artificial beacon, 1985), сообщение Даррила Гринвуда по работам в Линкольнской Лаборатории США (Lincoln Lab, Darryl Greenwood, experiment at WSMR, 1984-1985), а также работы Роберта Фугейта (Air Force Phillips Lab, Robert Fugate, experiment at SOR, 1992).

Однако все это стало известно только в 1993 г. после публикации (Journal of MIT, LL, 1992). А обнародовано это было на двух научных школах для стран НАТО: NATO Summer School (Corsica, France, 1993) и NATO Winter School (France, Le Huches, 1996).

Особняком стоят работы, выполненные во Франции (Renaud Foy and Antoine Labeyrie, Astronomy & Astrophysics, laser-beacon concept, 1985) и в Италии (Bistatic schemes and pyramid sensor, Roberto Ragazzoni, 1996; Morocco, 2000; Venice, 2001).

В СССР и в Российской Федерации впервые [30, 43] были поставлены исследования по использованию отраженных волн для фазовой коррекции: экспериментальная попытка по применению сигнала, отраженного от края облака (В. Г. Выгон, «Астрофизика», 1978–1982), первый фотометрический измеритель дрожания изображения на диссекторе (ИОА СО РАН, 1981), измерения на БТА (ИОА СО РАН, 1982), были предприняты попытки применения усилителей света – системы «Стрелец» и «Козерог» для приема слабого оптического сигнала (ИОА СО РАН, 1980–1983), выполнены первые расчеты дрожания фокусированных пучков и изображений (Белов М. Л., 1977, 1982), проведены расчеты дрожания изображения (Афанасьев А., Беленький М., ИОА СО РАН, 1988), выполнены первые эксперименты на горизонтальных трассах с зеркальными отражателями (ИОА СО РАН, 1979–1981), появился опыт построения первого в мире составного телескопа АСТ-1200 (ФИАН РАН, 1976–1978), работы по построению наземного адаптивного телескопа ГРАФ (ИКИ РАН, 1983–1985).

Исследования последних лет были обобщены в монографии [45]. Однако, несмотря на успехи в развитии методов по использованию сигнала от ЛОЗ, до конкретных экспериментов в России дело так и не дошло. Прежде всего, из-за высокой стоимости комплектующих элементов.

Проблемы построения солнечного адаптивного телескопа

Следует считать современной тенденцией внедрение систем АО для коррекции искажений в уже существующие «неадаптивные» астрономические телескопы. Для Российской Федерации в настоящее время путь внедрения систем АО в работающие телескопы является единственно возможным. Уникальное оборудование, какими являются астрономические телескопы, при этом получает новые возможности, увеличиваются их эффективность и производительность работы [46–49].

Мы в ИОА СО РАН поставили перед собой задачу получить на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Института солнечно-земной физики СО РАН разрешение на уровне 0,2 угл. сек. Ниже (рис. 9) представлен это телескоп (БСВТ), который установлен около озера Байкал.



Рис. 9. Большой солнечный вакуумный телескоп (в Байкальской астрофизической обсерватории, пос. Листвянка)

Современный уровень коррекции с использованием одного активного зеркала показал, что созданная нами адаптивная оптическая система «Ангара», установленная на Большом солнечном вакуумном телескопе (Байкальская астрофизическая обсерватория) (рис. 10), вполне работоспособна [50–54]. Ниже даются на рисунках (рис. 11–14) фотографии некоторых компонентов системы: датчика волнового фронта, анализатора качества изображения.



Рис. 10. Адаптивная система АНГАРА



Рис. 11. Корреляционный датчик Шека – Гартмана системы коррекции

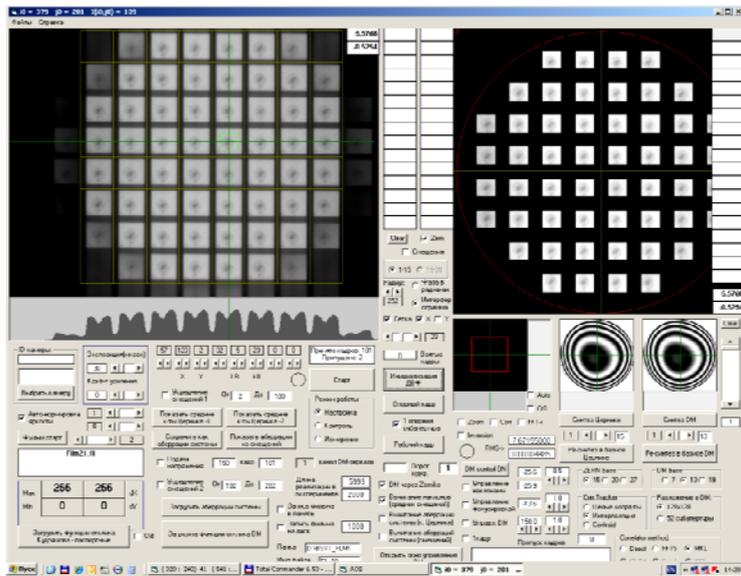


Рис. 12. Панель оператора системы АНГАРА.0

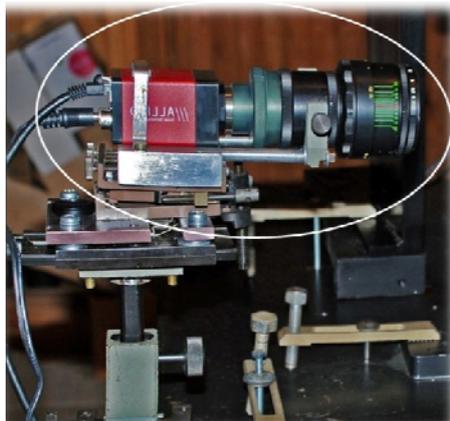


Рис. 13. Анализатор качества изображения (АКИ)

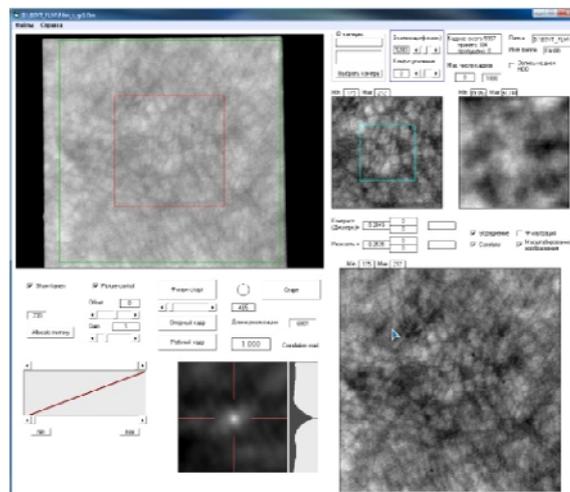


Рис. 14. Панель оператора системы АКИ

Во время работы, когда система, устанавливалась на БСВТ, была всесторонне исследована работа системы АНГАРА при использовании различных видимых структур в изображении поверхности Солнца. Система работала при использовании солнечного пятна (рис. 15).

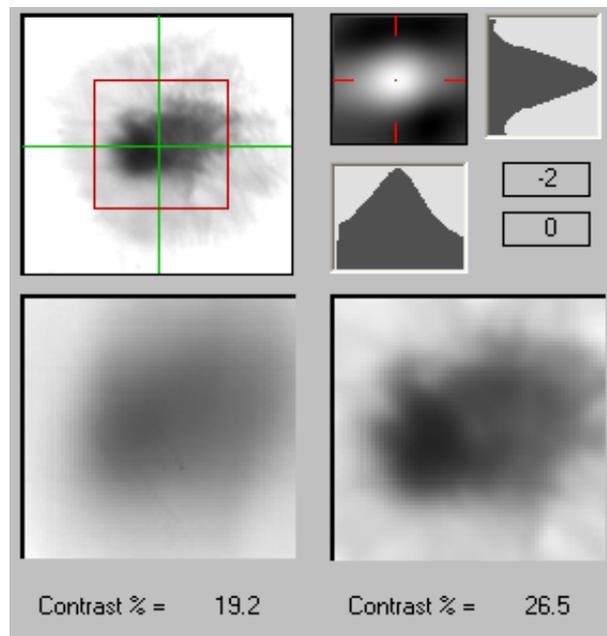


Рис. 15. Работа системы АНГАРА с использованием солнечного пятна, имеющего исходный контраст 19,2 % при короткой экспозиции

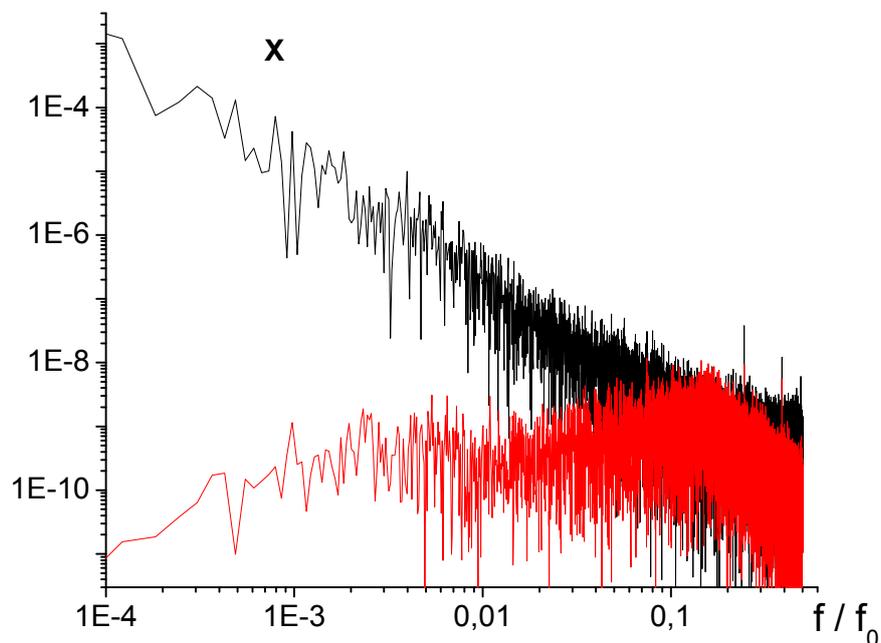


Рис. 16. Энергетический спектр случайного дрожания фрагмента изображения без коррекции (черная кривая) и при коррекции системой АНГАРА (красная кривая)

График на рис. 16 показывает, что в результате коррекции отношение дисперсий процессов – без коррекции и при коррекции составляет 24.

Была опробована работа системы по солнечной поре. В результате работы системы АНГАРА по низко-контрастному изображению солнечной поры удалось увеличить контраст (рис. 17) в изображении участка поверхности Солнца примерно в 1,5 раза.

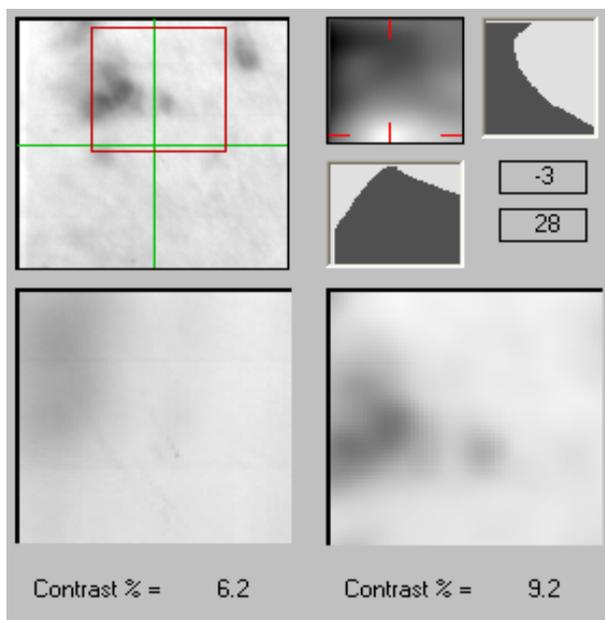


Рис. 17. Работа системы АНГАРА с использованием солнечной поры, имеющей исходный контраст 6,2 %

В последующие, после создания системы АНГАРА, годы работы по системам АО для солнечных телескопов получили дальнейшее развитие [52–56]. Так в 2017 г. на Большом солнечном вакуумном телескопе Института солнечно-земной физики СО РАН были выполнены работы по созданию элементной базы для отработки методов регистрации и коррекции искажений оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы. В результате на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) установлена трехкаскадная система коррекции изображения. Осуществлено развитие программного обеспечения, которое обеспечивает, как проведение статистического анализа качества формируемого изображения в БСВТ, так и объединяет работу датчика волнового фронта, анализатора качества изображения и астрономического прибора – фильтрографа.

Адаптивная оптика в космической солнечной энергетике

Непопадающую на Землю солнечную энергию можно «вернуть» Земле, с помощью расположенных в ближнем космосе систем огромных управляемых

оптических зеркал [57]. Отражаемая от них солнечная энергия может быть направлена на специальную стратосферную платформу или систему из нескольких таких платформ. На этой платформе расположены солнечные батареи, преобразующие солнечный свет в электричество, либо системы накачки лазеров.

Общепризнанным является то, что солнечная энергетика – одно из наиболее перспективных направлений развития возобновляемых источников энергии. По оценкам специалистов, к 2100 г. Солнце станет доминирующим источником энергии на планете.

Солнечные аэрокосмические энергетические комплексы с СВЧ и лазерными магистралями наиболее предпочтительны для построения распределенной энергетической системы России и могут полностью обеспечить энергетическую безопасность и надежное энергоснабжение на отдаленных и труднодоступных территориях Сибири, Севера и Дальнего Востока, которые не охвачены централизованным энергоснабжением. Эффективным путем решения указанных проблем является создание аэрокосмических солнечных электростанций мощностью 0,1–10 ГВт с беспроводной передачей электроэнергии наземным потребителям.

Заключение

Известно, что создание современных крупных ОЭС – это достаточно длительный процесс, который обычно проводится в условиях отсутствия полной информации об особенностях среды распространения оптического излучения. А поскольку самые современные ОЭС достаточно дороги, так как требуют на начальном этапе своего проектирования, проведения соответствующих расчетов и оценок эффективности применения различного рода алгоритмов и программ, реализуемых на основе использования современной техники АО, и создание их проходит в течение ряда лет, то основные параметры системы не могут не претерпевать изменений. Это заставляет строить такие системы с учетом возможного изменения их основных параметров на различных этапах проектирования и изготовления. Возможность гибкого изменения параметров оптической системы является в настоящее время одним из основных требований современного проектирования оптико-электронной аппаратуры, и адаптивные оптические системы дают такую возможность. Это связано, прежде всего, с тем, что кардинальное изменение основных параметров оптической системы можно обеспечить только на основе смены алгоритма работы систем АО. На пути создания оптических систем стоят неизбежные этапы проектирования систем и определения потенциальных возможностей их применения в условиях реальной атмосферы. Каждый элемент оптической схемы требует предварительных расчетов, поэтому часто приходится проводить расчеты не только параметров адаптивной оптики, но и всей системы в целом.

Развитие, как теории, так и самих систем АО, проходит непрерывно. Задачу формирования заданных параметров и коррекции aberrаций лазерного излучения можно решать различными способами, например, с применением ампли-

тудных масок, голографических и дифракционных элементов и т. д. Однако все перечисленные методы зависят от конкретных параметров пучка и при наличии в оптической системе шумов, aberrаций. Поэтому использование гибких зеркал, параметры которых можно подстраивать под изменившиеся условия эксперимента, является, с этой точки зрения, наиболее универсальным.

В последние годы достаточно интенсивно развиваются методики управления параметрами лазерного излучения на основе внутрирезонаторных систем, использующих гибкие активные зеркала на основе гибридных алгоритмов, позволяющих эффективно управлять фокусировкой, мощностью, пиковой интенсивностью и формой распределения поля лазерного излучения. Предложенные методики внерезонаторного гибридного алгоритма управления биморфным корректором могут эффективно использоваться для коррекции aberrаций и для формирования заданных распределений интенсивности одномодового и многомодового по поперечным индексам излучения лазера в заданной плоскости.

Новым аспектом проблемы является, например, генерация и компенсация вихревых оптических пучков управляемыми фазовыми элементами, позволяющая формировать такие пучки [55, 58], например, для систем лазерной связи, а также компенсировать их негативное влияние в задачах атмосферной оптики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск : Наука, 1986. (в переводе: Lukin V. P. Atmospheric Adaptive Optics // SPIE Press. PM 23. 1996).
2. Special Issue on Adaptive optics // J. Opt. Soc. Am. – 1977. – 67 (3). – 3.
3. Special Issue on Adaptive Optics // J. Opt. Soc. Am. A. – 1994. – 11 (2). – 3.
4. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. – М. : Наука, 1985.
5. Воронцов М. А., Корябин А. В., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы. – М. : Наука, 1988.
6. Лукьянов Д. П., Корниенко А. А., Рудницкий Б. Е. Оптические адаптивные системы. – М. : Радио и связь, 1989.
7. Тараненко В. Г., Шанин О. И. Адаптивная оптика. – М. : Радио и связь, 1990.
8. Hardy J. W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. – New York ; Oxford: Oxford University Press, 1998.
9. Muller R. A., Buffington A. // J. Opt. Soc. Am. – 1970. – 64. – 1200.
10. Buckley R. // Journ. Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1975. – 37. – 1431.
11. Fleck J. A., Morris J. R., Feit M. D. // Appl. Phys. – 1976. – 10. – 129.
12. Кандидов В. П., Леденев В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1981. – 24. – 438.
13. Коняев П. А. // Тезисы докл. VII Всесоюзн. симпоз. по распротр. лаз. излучен. в атмосфере. – Томск : ИОА СО АН СССР, 1983.
14. Martin J. M., Flatte S. M. // Appl. Opt. – 1988. – 27. – 2111.
15. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М. : Советское радио, 1971.
16. Collins S. A., Duncan D. // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – 65. – 1218.
17. Duncan D. D., Collins S. A. // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – 65. – 1232.
18. Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. – 1991. – 4. – 1294.
19. Fortes B. V., Lukin V. P. // Proc. SPIE. – 1992. – 1668. – 477.
20. Коняев П. А. Численное исследование тепловых искажений лазерных пучков в атмосфере : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск : Изд-во ТГУ, 1984.

21. Fortes B. V., Kanev F. Yu., Konyaev P. A., Lukin V. P. Potential capabilities of adaptive optical systems in the atmosphere // *Journ. Opt. Soc. Am. A.* – 1994. – V. 11, No. 2. – P. 903–907.
22. Lukin V., Fortes B. Modeling of the image observed through a turbulent atmosphere // *Proc. SPIE.* – 1992. – V. 1688. – P. 477–488.
23. Lukin V., Fortes B. Adaptive beaming and imaging in the turbulent atmosphere. – SPIE Press. PM109, 2002. – 201 p.
24. Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Лукин В. П., Фортес Б. В. Численная модель адаптивной оптической системы. Часть I. Распространение лазерных пучков в атмосфере // *Оптика атмосферы и океана.* – 1995. – Т. 8, No. 3. – С. 409–418.
25. Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Лукин В. П., Фортес Б. В. Численная модель адаптивной оптической системы. Часть II. Датчики волнового фронта и исполнительные элементы // *Оптика атмосферы и океана.* – 1995. – Т. 8, No. 3. – С. 419–428.
26. Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Лукин В. П., Фортес Б. В. Численная модель адаптивной оптической системы. Часть III. Программная реализация модели // *Оптика атмосферы и океана.* – 1995. – Т. 8, No. 3. – С. 429–434.
27. Lukin V. P. Computer modeling of adaptive optics for telescope design // *ESO Workshop Proc.* – 1995. – No. 54. – P. 373–378.
28. Lukin V. P., Fortes B. V. Partial phase correction of turbulent distortions in telescope AST-10 // *Applied Optics.* – 1998. – V. 37, No. 21. – P. 4561–4568.
29. Lukin V. P., Fortes B. V. Ground-based spatial interferometers and atmospheric turbulence // *Pure and Applied Optics.* – 1996. – V. 5, No. 1. – P. 1–11.
30. Лукин В. П. Лазерные опорные звезды – искусственные опорные источники // *Сборник статей «Как это было...».* ЛАС. Москва. – 2016. – Вып. 5. – С. 181–191.
31. Зарубин П. В. // *Квантовая электроника.* – 2002. – 32. – 1048.
32. Duffner R. W. *Airborne Laser. Bullets of Light* // New-York and London: Plenum Press, 1997.
33. Steiner T. D., Merritt P. H. // *Proc. SPIE.* – 1999. – 3706. – 3.
34. Steiner T. D., Butts R. R. // *Proc. SPIE.* – 1999. – 3706.
35. Air Force Shoots For Laser Ballistic Missile Terminator // *National Defense.* – 1996. – 81 (522). – 23.
36. Lukin V. P., Fortes B. V. The influence of wave front dislocations on phase conjugation instability at thermal blooming compensation // *Pure and Applied Optics.* – 1997. – V. 6. – P. 103–116.
37. Lukin V. P., Fortes B. V. Estimation of turbulent degradation and required spatial resolution of adaptive systems // *Remote Sensing.* – *Proc. SPIE.* – 1998. – V. 3494. – P. 191–202.
38. Lukin V. P., Fortes B. V. Phase-correction of turbulent distortions of an optical wave propagating under strong intensity fluctuations // *Applied Optics.* – 2002. – V. 41, No. 27. – P. 5616–5624.
39. Лукин В. П., Матюхин В. Ф. Адаптивная коррекция изображения // *Квантовая электроника.* – 1983. – Т. 10, No. 12. – С. 2465–2473.
40. Лукин В. П., Матюхин В. Ф., Шилов Ю. П. Авторское свидетельство No. 217315, приоритет от 28.05.84.
41. Lukin V. P., Fortes B. V. Efficiency of adaptive correction of images in a telescope using an artificial guide star // *OSA Techn. Digest.* – 1995. – Vol. 23. – P. 192–194.
42. Лукин В. П. Лазерные опорные звезды и проблема измерения наклона волнового фронта // *Оптика атмосферы и океана.* – 1996. – Т. 9, No. 11. – С. 1433–1442.
43. Лукин В. П., Фортес Б. В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. – 212 с.
44. Special Issue on Adaptive Optics // *Lincoln Laboratory Journal.* – 1992. – 5 (1).

45. Большасова Л. А., Лукин В. П. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. – М. : Физико-математическая литература, 2012. – 125 с.
46. Rimmele T. R., Marino J. Solar adaptive optics // *Living Rev. Solar Physics*. – 2011. – Vol. 8. – P. 92–98.
47. Scharmer G. B., Derrori P., Löfdahl M. G., Shand M. Adaptive optics system for the new Swedish solar telescope // *Proc. SPIE*. – 2002. – Vol. 4853. – 4853-52.
48. Scharmer G. B., Bjelksjö K., Korkonen T., Lingberg B., Petterson B. The 1-meter Swedish solar telescope // *Proc. SPIE*. – 2002. – Vol. 4853. – 4853-47.
49. Лукин В. П., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н., Антошкин Л. В., Коняев П. А. Анализатор качества изображения // *Датчики и системы*. – 2012. – № 6 (157). – С. 12–14.
50. Lukin V. P., Grigor'ev V. M., Antoshkin L. V., Botugina N. N., Emaleev O. N., Kovadlo P. G., Konyaev P. A., Kopulov E. A., Skomorovski V. I., Trifonov V. D., Chuprakov S. A. Development of adaptive optics elements for solar telescope // *Proc. SPIE*. – 2012. – Vol. 8447. – 84476E.
51. Lukin V. P., Botugina N. N., Emaleev O. N., Antoshkin L. V., Konyaev P. A. Image quality analyzer // *Proc. SPIE*. – 2012. – Vol. 8447. – 84474A.
52. Ботыгина Н. Н., Ковадло П. Г., Копылов Е. А., Лукин В. П., Туев М. В., Шиховцев А. Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа из оптических и метеорологических измерений // *Оптика атмосферы и океана*. – 2013. – Т. 26, № 11. – С. 942–947.
53. Лукин В. П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // *Успехи физических наук*. – 2014. – Т. 184, вып. 6. – С. 599–640.
54. Antoshkin L. V., Botygina N. N., Bolbasova L. A., Emaleev O. N., Konyaev P. A., Kopylov E. A., Kovadlo P. G., Kolobov D. Yu., Lavrinov V. V., Lavrinova L. N., Lukin V. P., Chuprakov S. A., Selin A. A., Shikhovtsev A. Yu. Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2017. – Vol. 30 (3). – P. 291–299.
55. Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н., Коняев П. А., Копылов Е. А., Лукин В. П. Развитие элементной базы для создания системы адаптивной оптики на солнечном телескопе // *Оптика атмосферы и океана*. – 2017. – Т. 30, № 11. – С. 990–997.
56. Botygina N. N., Kolobov D. Yu., Kovadlo P. G., Lukin V. P., Chuprakov S. A., Shikhovtsev A. Yu. “The first light” for the system of inputting the elements of AO into the optical path of LSVT // *Proc. SPIE*. – 2018. – Vol. 10833. – 10833-351. doi: 10.1117/12.2504689.
57. Сигов А. С., Матюхин В. Ф. О проблемах, решаемых адаптивной оптикой в интересах создания солнечной аэрокосмической энергетики России // *Концепция развития аэрокосмической энергетики в России на период до 2045 года*. – 2017.
58. Котляр В. В., Стафеев С. С., Налимов А. Г. Острая фокусировка лазерного света с помощью микрооптики. – Самара : СНГУ, 2018.

© В. П. Лукин, 2019