

История развития и становления работ по адаптивной оптике в ИОА СО РАН

В.П. Лукин, Л.В. Антошкин, Л.А. Больбасова, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, Ф.Ю. Канев, П.А. Коняев, Е.А. Копылов, В.В. Лавринов, Л.Н. Лавринова, Н.А. Макенова, В.В. Носов, Е.В. Носов, А.В. Торгаев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 14.06.2019 г.

Дан обзор развития адаптивной оптики, ее методов и средств устранения нерегулярных искажений, возникающих при распространении света в неоднородной среде. Многие идеи, развиваемые в последние годы, были высказаны достаточно давно, однако только сейчас, благодаря созданию современной элементной базы оптико-электронных систем и приборов, они начинают внедряться в самые широкие области науки и техники. В работе также представлено современное состояние систем адаптивной оптики в солнечной астрономии, приведены некоторые аспекты их использования в системах коррекции искажений мощных лазерных систем. Проведен ретроспективный анализ исследований Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, связанных с направлением адаптивной оптики.

Ключевые слова: атмосфера, распространение, турбулентность, фазовые флуктуации, адаптивная оптика, измерения, когерентная турбулентность; *atmosphere, propagation, turbulence, phase fluctuations, adaptive optics, measurements, coherent turbulence.*

Введение

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) ввиду технического несовершенства составляющих элементов, а также по причине случайных неоднородностей на трассах распространения оптических волн практически не реализуют своей предельной эффективности. В то же время интенсивное применение ОЭС для передачи информации, узконаправленной транспортировки энергии электромагнитного излучения и формирования изображений в реальных условиях обуславливает актуальность развития методов и устройств коррекции, включая адаптивные, представляющие собой наиболее радикальные средства борьбы со снижением эффективности ОЭС.

Для систем, работающих 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. Минимизировать эти искажения можно различными методами, например путем выбора оптимальной длины волны, пространственных параметров и временных режимов излучения и т.д. Однако наиболее радикальное средство – создаваемые в настоящее время системы адаптивной оптики (АО), которые позволяют компенсировать эти искажения в режиме реального времени.

В настоящее время АО стала разделом физической оптики, изучающим методы устранения нерегулярных искажений, которые возникают при распространении света в неоднородной среде, с помощью управляемых оптических элементов. Термин «адаптивная оптика» обобщает широкий круг задач и собственно оптических устройств, позволяющих 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

* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru); Лидия Адольфовна Больбасова (sla@iao.ru); Нина Николаевна Ботыгина (bnn@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eop@iao.ru); Федор Юрьевич Канев (mna@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (petrkonyaev@gmail.com); Евгений Анатольевич Копылов (evgen704@iao.ru); Виталий Валериевич Лавринов (lvv@iao.ru); Лидия Николаевна Лавринова (lnl@iao.ru); Наиля Алтыханова Макенова (mna.05@mail.ru); Виктор Викторович Носов (Nosov@iao.ru); Евгений Викторович Носов; Андрей Витальевич Торгаев (Torgaev@iao.ru).

работы адаптивных систем заключается в управлении волновым фронтом принимаемого или передаваемого излучения, которое осуществляется посредством активных элементов, таких как гибкие или составные управляемые зеркала, управляемые фазовые транспаранты и т.д.

Первые годы развития адаптивной оптики

Считается, что первые исследования по созданию систем АО относятся к концу 50-х гг. XX в. Идеи, положившие начало развитию систем АО, способные в реальном времени компенсировать атмосферные искажения волнового фронта, практически одновременно были высказаны в США [1] и в СССР [2]. Н.В. Вавскок в [1] предложил использовать для коррекции искажений управляемые оптические элементы с обратной связью. В.П. Линник [2] предложил возможность активной компенсации атмосферных искажений при астрономических наблюдениях с помощью зеркальных устройств с составной или сплошной деформируемой поверхностью.

Безусловно, первые идеи создания АО появились раньше, чем возможности их реализации. Специальные элементы, необходимые для построения систем АО, были созданы только в 1970-х гг., поэтому первые существенные успехи в развитии и применении АО относятся именно к этому времени. В этой связи следует выделить обзорные работы [3, 4] по применению систем АО для коррекции динамических искажений в оптических волнах. J.W. Hardy предложил первую адаптивную оптическую систему для коррекции атмосферных искажений [5], названную RTAC (Real-Time Atmospheric Compensation), которая была разработана под его руководством фирмой Jtek (США).

Первые действительно успешные работы по применению систем АО были выполнены именно в астрономии. Это связано с тем, что системы АО были достаточно дороги, и только дорогостоящие научные проекты, какими всегда были и остаются крупные астрономические телескопы, могли выделить средства для построения таких систем. Здесь следует особо отметить многолетние исследования [6], проводимые в Европейской южной обсерватории.

В 70-е гг. XX в. ускоренно выполнялись теоретические и экспериментальные работы по применению оптических систем в атмосфере, в основе которых лежали достижения теории распространения волн в случайно-неоднородных средах [7–15]. Среди теоретических исследований особое место занимают работы D.L. Fried [10, 12], в которых была проведена параметризация оптических систем с точки зрения уровня фазовых флуктуаций в оптической волне, впервые введен так называемый радиус когерентности атмосферы, а также определены понятия короткой и длинной экспозиции при регистрации случайных оптических сигналов. Безусловно важны

ми стали исследования D. Greenwood [13, 14], в которых было введено понятие частоты Гринвуда, определяющее минимальные требования к быстродействию контура обратной связи системы АО. Эти исследования позволили сформулировать необходимые требования к элементам системы АО.

Краткая история развития ЛКАО

Лаборатория когерентной и адаптивной оптики была организована в 1981 г., таким образом, она существует уже 38 лет. В разные годы она носила названия ГАО – группа адаптивной оптики, ГПАО – группа прикладной и адаптивной оптики, ЛПАО – лаборатория прикладной и адаптивной оптики и, наконец, с 1993 г. стала называться ЛКАО – лаборатория когерентной и адаптивной оптики.

Научное направление атмосферной адаптивной оптики зародилось первоначально внутри лаборатории оптики случайно-неоднородных сред (ОСНС), которая была создана в Институте (тогда – ИОА СО АН СССР) профессором С.С. Хмелевцовым.

Это была очень большая (по меркам академического института) лаборатория. В период расцвета (примерно 1974 г.) в составе лаборатории ОСНС работало около 80 человек. Широта научных исследований и задачи увеличения количества специалистов лаборатории и повышения их профессионального роста заставили ее лидера С.С. Хмелевцова поставить перед директором Института, тогда еще членом-корреспондентом АН СССР В.Е. Зуевым, вопрос о создании отдела с одноименным названием. Однако эта инициатива не была поддержана. В 1976 г. С.С. Хмелевцов, став доктором наук, переезжает в г. Обнинск, а руководителем направления оптики случайно-неоднородных сред становится докт. физ.-мат. наук В.Л. Миронов. Рядом с ним работали опытные научные сотрудники, тогда кандидаты наук, В.В. Покасов, В.И. Букатый, В.Я. Съедин, А.В. Кузиковский. Они руководят тематическими научными группами.

Вопросами когерентности излучения, исследованию фазовых флуктуаций оптических волн при распространении в турбулентной атмосфере занималась тематическая группа под руководством В.В. Покасова. Много внимания уделялось созданию новой техники, и поэтому В.В. Покасов с самого начала привлек к работе инженеров О.Н. Емалева, В.И. Назарчука, техника Л.В. Антошкина. Все более значимым в деятельности лаборатории и научных исследованиях становится участие выпускников кафедры оптико-электронных приборов радиотехнического факультета ТГУ: О.Л. Тузова, А.А. Макарова, В.П. Лукина. Несколько позднее в этот коллектив влилась команда, которую собирал в вычислительном центре ИОА СО АН СССР канд. физ.-мат. наук И.Г. Винтизенко и которая занималась вопросами цифровой голографии. В ее составе были исследователи, выпускники ТПУ и ТГУ, В.А. Тартаковский и П.А. Коняев.

Измерения фазовых флуктуаций оптических волн в турбулентной атмосфере

Совместные усилия исследователей и инженеров позволили научной группе довольно быстро разработать и создать уникальный по тем временам прибор ИФАС — измеритель фазы аналого-цифровой следящий. Он был предназначен для измерений фазовых флуктуаций оптических волн при распространении в турбулентной атмосфере. В работе прибора использовалась идея разделения амплитудных и фазовых флуктуаций путем применения гомодинного смещения (интерференции) оптического пучка излучения, прошедшего слой турбулентной среды, и когерентного с ним опорного оптического пучка, который предварительно подвергался фазовой модуляции сигналом звуковой частоты. Задачи выделения фазовой информации для оптической волны при оптическом смещении полей были поставлены и решены в дипломной работе В.П. Лукина, тогда студента ТГУ, под названием «Гетеродинный метод раздельной регистрации флуктуаций амплитуды и фазы оптического поля». Авторское свидетельство на способ измерения фазовых флуктуаций оптических волн [15] получили В.В. Покасов, О.Н. Емалеев, В.И. Назарчук. Эксплуатацию ИФАС начали в 1970 г., и практически сразу с его помощью были получены уникальные результаты мирового уровня. Чего стоит, например, только один факт: в статье известного журнала «Природа» американский ученый доктор М. Арэнд назвал научным подвигом сделанную в коллективе работу по получению полезного сигнала (фазового сигнала) с разностью хода интерферирующих оптических пучков в 400 м в приземном слое атмосферы.

В этот период (начало 70-х гг. XX в.) в СССР стремительно развивалось направление по изучению флуктуаций оптических волн при распространении в случайно-неоднородных средах. Здесь безусловным научным лидером был Институт физики атмосферы (ИФА) АН СССР (г. Москва), где директором был академик А.М. Обухова [16], а ведущими специалистами по этому направлению — член-корр. АН СССР, докт. физ.-мат. наук В.И. Татарский [7] и докт. физ.-мат. наук А.С. Гурвич [17].

Коллектив специалистов, работающих под руководством В.В. Покасова, был организован в отдельную научную группу под названием ГОТ — группа оптики турбулентности. По иронии судьбы она первоначально входила в состав отдела автоматизации Института. Наверное, это было и хорошо, так как тогда для обработки сигналов нужен был большой объем вычислений, что требовало, как тогда говорили, значительного «машинного времени». Именно в этот период были опубликованы наши работы [18–22] по измерению флуктуаций фазы оптических волн при распространении в турбулентных средах. Был создан математический аппарат для решения ряда обратных задач оптики, на основе фазовых оптических измерений был выполнен большой объем экспериментальных исследований по зон-

дированию спектральной плотности, внутреннего и внешнего масштабов, анизотропии спектра турбулентности атмосферы [22–24].

Одним из важных результатов тех лет было обнаружение существенного отличия спектра турбулентности от модели Колмогорова–Обухова в области больших турбулентных неоднородностей. Это стало основой для использования модели спектра турбулентности [20, 23] с конечным внешним масштабом. При этом впервые в мире были осуществлены измерения фазовых флуктуаций (рис. 1) оптической волны в турбулентной атмосфере на трассах большой протяженности.

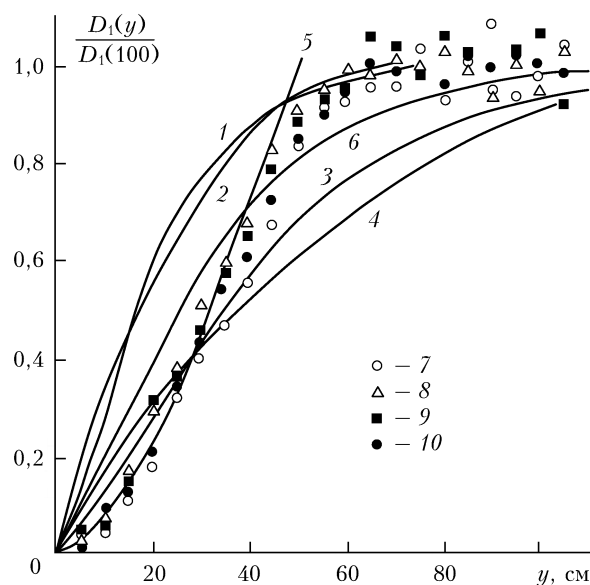


Рис. 1. Нормированная структурная функция фазы: кривые 1, 2, 3, 4, 6 — данные расчетов для различных моделей спектра турбулентности с конечным внешним масштабом; 5 — расчет для колмогоровской модели; 7–10 — экспериментальные данные, полученные в различных условиях

Зондирование атмосферной турбулентности методом просвечивания

В 1971–1976 гг. тематическая группа В.В. Покасова занималась исследованием флуктуаций фазы оптических волн при распространении в турбулентной атмосфере [18, 19, 21–24]. Разнообразные электронно-вычислительные машины (ЭВМ), которыми пользовались в начале 70-х гг., были, как правило, мало мощными. Сначала это были ЭВМ типа «Минск-32», потом появились «комнатные», т.е. занимающие целую комнату, вычислительные машины типа «Мир-2», «Проминь», «Наири», а далее — серия машин СМ-4 и СМ-8. Примерно в то же время для работы в экспериментальных установках появились малые машины типа «Электроника-60». И, наконец, вершиной вычислительных возможностей для теоретиков стала супер-машина БЭСМ-6. Она позволяла решать многие задачи, прежде всего,

теоретические, а также использовалась при обработке экспериментальных данных. Следующим поколением машин была серия ЕС-1020. Последней «большой» машиной стал комплекс «Эльбрус».

По мере усовершенствования оборудования в ИОА СО АН СССР также развивались системы удаленного доступа и распределенного пользования общими вычислительными средствами. Хотелось бы отметить некоторых специалистов, которые много сделали для автоматизации экспериментов: А.И. Гудзенко, Н.Е. Яковлев, В.Т. Колайда, Е.И. Громаков. В экспериментах тогда либо напрямую использовались малые вычислительные машины, либо экспериментальные данные фиксировались на магнитную ленту, для чего применялись многоканальные записывающие устройства, например магнитограф. Кроме этого, пользовался оптический прибор – шлейфовый осциллограф, сначала записывающий сигнал на фотопленку, которая затем подавалась на устройство перезаписи на другой носитель. Это позволяло регистрировать данные довольно высокочастотных сигналов. В ряде случаев для регистрации данных эксперимента использовалось уникальное устройство – электрический ленточный перфоратор. Самым быстродействующим тогда был ПЭЛ-150 – перфоратор электрический ленточный для записи данных на бумажную ленту с частотой работы 150 Гц. Данные, записанные на бумажную перфоленту, вводились в ЭВМ и подвергались статистической обработке. При этом вычислялись корреляционные функции и энергетические спектры сигналов. Потом эти статистические данные использовались для решения обратных задач оптики, например для восстановления энергетических спектров, их масштабов и параметров атмосферной турбулентности, скорости ветра и других величин.

Естественным развитием первых измерений фазовых флуктуаций оптических волн стали работы по применению получаемых данных для решения обратных задач оптики – зондирования атмосферной турбулентности методом оптического просвечивания. Именно в эти годы в СССР силами прекрасной школы математиков были поставлены и решены многие некорректные обратные задачи [25]. Методы регуляризации стали широко использоваться в ИОА СО АН СССР при решении задач зондирования как структуры турбулентности, так и аэрозолей атмосферы.

Благодаря прямым контактам между тематической группой В.В. Покасова и лабораторией В.М. Бовшеверова из ИФА АН СССР появились совместные работы по синхронному измерению флуктуаций интенсивности и фазы оптических волн в турбулентной атмосфере. Наиболее полно это выразилось в проведении совместных экспедиционных измерений в 1973 г. на научной базе ИФА РАН «Атмосфера», расположенной в пригороде г. Цимлянска Ростовской обл. Итогом этих работ стала совместная публикация [26]. В 1981 г. была опубликована этапная статья [27], в которой суммировались все основные результаты примерно за 10 лет.

Предпосылки для начала работ по адаптивной оптике

С 1977 г. внутри ГОТ начал формироваться коллектив, интересующийся вопросами применения данных фазовых измерений для задач управления. В результате по инициативе В.П. Лукина в 1981 г. в Институте был создан отдельный научный коллектив – группа адаптивной оптики (ГАО), впоследствии преобразованная в лабораторию когерентной и адаптивной оптики. Именно в этом коллективе сейчас проводятся основные исследования по разработке систем АО Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

А в самом начале 1980-х гг. сотрудники ГАО начинают развивать теорию адаптивных оптических систем для обеспечения оптимального формирования оптического изображения и лазерных пучков через атмосферу Земли как неоднородную и случайную рассеивающую и поглощающую среду. Также создавалась элементная база АО и проводились эксперименты в атмосфере. В итоге коллектив фактически впервые в СССР выполнил ряд экспериментов с адаптивными оптическими системами по коррекции как рефракции, так и атмосферной турбулентности.

Сейчас наша лаборатория занимается традиционными задачами оптики: это формирование оптических пучков и изображений с целью обеспечения концентрации энергии лазерного пучка, повышения четкости оптического изображения, увеличения скорости передачи данных в оптических линиях связи и др. Для решения таких задач в структуру адаптивных оптико-электронных систем включают новые элементы [3–6]: корректор волнового фронта (активный оптический элемент), датчик искажений (измеритель флуктуаций) волнового фронта, опорный источник, решающее устройство и алгоритм его работы.

Поскольку перечисленные элементы, не говоря уже о системе в целом, в то время серийно не выпускались, необходимо было их разрабатывать и создавать самим, поэтому работы шли по пути как разработки теории адаптивных систем, так и создания новых элементов, макетов систем и алгоритмов их управления. В связи с этим основными научными направлениями лаборатории уже много лет остаются:

- 1) изучение особенностей формирования оптических изображений и пучков излучения в атмосфере с использованием АО, включая распространение мощного, а также амплитудно- и фазово-модулированного оптического излучения;
- 2) отработка отдельных элементов и систем АО;
- 3) исследование влияния астроклиматических и погодных изменений на структурные особенности атмосферной турбулентности как важнейшего искажающего фактора атмосферы.

Наши первые работы по АО

С самых первых работ (1977–1990 гг.) проводилось последовательное развитие научного направления, связанного с анализом динамических

и спектральных характеристик адаптивных оптических систем, что позволило сформировать в ИОА СО РАН коллектив, работы которого были признаны как в России, так и за рубежом [28–37]. Хотелось бы специально выделить опубликованную сначала в СССР, а позднее в США монографию по теории применения адаптивных систем в атмосфере [36]. Она стала этапной публикацией для коллектива. Даже по прошествии более чем 30 лет она остается актуальной. Эта монография была переведена дважды на английский язык и вышла в престижном издательстве в США [37].

Наиболее значимые результаты первых работ [28–35] представлены ниже. Впервые были предложены и изучены двухцветные адаптивные системы, где длины корректируемой и опорной волн различаются. Была обоснована схема масштабирования данных измерений в опорном канале для управления в корректируемом канале. Это было сделано как для задач формирования изображений, так и для задач формирования когерентных лазерных пучков в атмосфере [36]. В 1993–1996 гг. интенсивно разрабатывались оригинальные отечественные проекты адаптивных телескопов. При анализе динамических свойств адаптивных систем впервые было предложено использовать идеи статистического предсказания флуктуаций [32–34]. Помимо традиционных адаптивных систем постоянного запаздывания, рассмотрены возможности «скоростных», а также «прогнозирующих» адаптивных систем. Установлены предельно допустимые временные задержки в адаптивных системах, которые обеспечивают заданный уровень коррекции. Они определяются эффективной скоростью ветра, радиусом когерентности атмосферы и параметрами оптической системы.

Для проведения первых экспериментов по стабилизации лазерных пучков и изображений в лаборатории было разработано и изготовлено (1984 г.) первое в СССР составное 19-элементное пьезокерамическое зеркало, каждый элемент которого имел три степени свободы. Также был изготовлен скоростной оптический корректор наклонов волнового фронта. С использованием этих элементов в 1984–1986 гг. были выполнены первые в СССР эксперименты по коррекции изображений и лазерных пучков с помощью многоэлементных корректоров [38–48].

Численное моделирование работы систем АО на основе метода расщепления

Для создания систем АО было необходимо разработать математический аппарат для численного решения параболического волнового уравнения. Это было сделано в ЛПАО в работах под руководством П.А. Коняева с участием Ф.Ю. Канева, Б.В. Фортеца, Л.Н. Лавриновой [49–56].

Начавшееся в 70-е гг. XX в. широкое практическое внедрение элементов и систем АО выявило ряд вопросов, потребовавших дальнейшего развития теории распространения оптических волн в атмо-

сфере. Поэтому вполне объяснимо внимание разработчиков систем АО к вопросам развития исследований по численному моделированию. При этом моделирование динамики систем АО 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 он позволяет просчитать и предсказать эффективность различных конфигураций системы, тогда как при проведении натурального эксперимента это потребовало бы значительных затрат времени и средств.

Одной из первых работ по численному моделированию турбулентных искажений оптических волн была работа R. Buckley [57], где он использовал метод преобразования Фурье (метод спектральной выборки) для моделирования одномерных случайных фазовых экранов. Далее в работах J.A. Fleck, J.R. Morris, M.D. Feit [58], В.П. Кандидова и В.И. Леденева [59], П.А. Коняева [60] 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 [61] аналогичный метод применялся в исследованиях функции плотности вероятности для флуктуаций интенсивности.

Упомянутый метод преобразования Фурье первоначально использовался для цифрового моделирования в радиотехнике [62]. Однако особенностью турбулентной атмосферы как случайно-неоднородной среды является предельно широкий (больше чем 1:1000) 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 D.D. Duncan, S.A. Collins [63, 64], а также в работе И.Е. Тельпу-

ховского и С.С. Чеснокова [65]. 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 больших, чем размер расчетной сетки. Этот подход получил дальнейшее развитие в работах [66–68], где он был обобщен также и на случай нестационарных (динамических) задач.

Эти результаты широко публиковались в России и за рубежом, докладывались на международных конференциях; было проведено сравнение рассчитанных параметров с известными аналогами, разработанными в США в Линкольнской лаборатории и на ракетной базе «Белые Пески». Научный уровень этих исследований, безусловно, превышает достигнутый к тому времени мировым научным сообществом в области теории адаптивных систем. На рис. 2 показан результат применения программы, использующей метод расщепления при решении задачи распространения мощного излучения в условиях самовоздействия. Эти данные были впервые опубликованы в материалах международного симпозиума в 1991 г. [69].

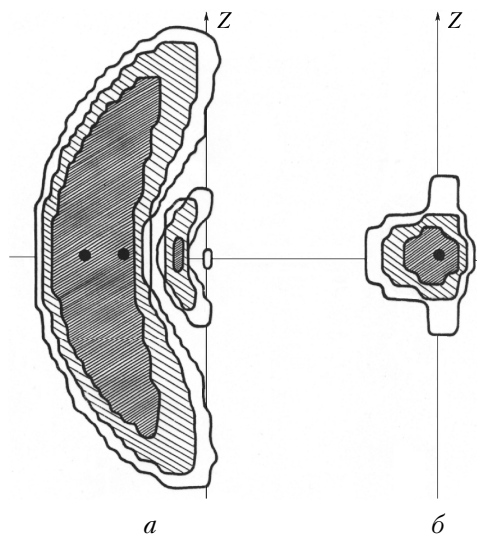


Рис. 2. Распределение интенсивности (в относительных единицах) фокусированного пучка в условиях самовоздействия излучения: *a* — без применения адаптивной коррекции; *б* — с применением фазового сопряженного алгоритма

Цикл работ [70–74] обобщает многолетние исследования по созданию программ для расчета характеристик оптических волн, распространяющихся в условиях адаптивного управления. Эти программы могут быть использованы на всех этапах проектирования, создания и эксплуатации современных оптико-электронных систем. Вышеупомянутые результаты были использованы при выполнении работ по грантам РФФИ и Европейской южной обсерватории для создания телескопа АСТ-10, разрабатываемого под руководством ВЦ «Астрофизика».

Применение теории систем АО для новых телескопов

Результатами практического применения этих достижений стал проект [75] адаптивной оптической системы для телескопа АСТ-10, разработанной в 1993–1994 гг. по заданию Министерства науки РФ. Сам телескоп, имея составное 91-элементное зеркало, оказался слишком медленным для компенсации турбулентных искажений в реальном времени. Был обобщен мировой опыт разработки подобных систем, также была предложена концепция коррекции с использованием адаптивного вторичного зеркала, а также зеркала, управляемого по двум углам, для стабилизации изображения в целом. Была промоделирована вся оптическая система телескопа, начиная с ошибок юстировки его первичного зеркала. Мы изучили влияние технических ошибок расфокусировки первичного зеркала АСТ-10 на величину параметра Штреля. Далее мы исследовали возможность частичной фазовой коррекции изображения с помощью адаптивного вторичного зеркала, различные уровни турбулентности на основе моделей атмосферы, различные типы активных зеркал (составные, гибкие, модовые), различные измерители волнового фронта. Рассчитывалась функция размытия точки (ФРТ) телескопа (рис. 3) при частичной коррекции турбулентных искажений [75]. Были рассмотрены как составные, так и гибкие зеркала с разным числом составляющих элементов. Также было проанализировано влияние флуктуаций количества фотонов входящего на телескоп светового потока при работе со слабыми звездами. Нами, в частности, были предложены подходы работы телескопа с использованием лазерной опорной звезды для различных диапазонов длин волн (рис. 3, *в*).

Примерно в это же время изучалось влияние турбулентной атмосферы на большебазовые интерферометры, в том числе звездные. Были выполнены аналитические и численные расчеты спектров разности фаз для сигналов звездных интерферометров с различными базами при использовании разных моделей спектра турбулентности, а также при произвольной ориентации вектора скорости ветра и измерительной базы интерферометра. Работа выполнялась по гранту РФФИ и проекту, поддержанному Европейской южной обсерваторией. Было показано, что определяющую роль играет использование корректной модели высотного хода внешнего масштаба турбулентности [76–78].

Затем наш научный коллектив получил признание как мировой лидер в разработке основ теории формирования оптических изображений через рефракционную и турбулентную атмосферу, моделей спектра турбулентности для различных регионов мира, различных схем и алгоритмов работы датчиков волнового фронта как интерференционного, так и дифракционного типов, а также моделей адаптивных оптических зеркал различного типа и оценке эффективности их применения для адаптивных телескопов, интерферометров и систем формирования лазерных пучков.

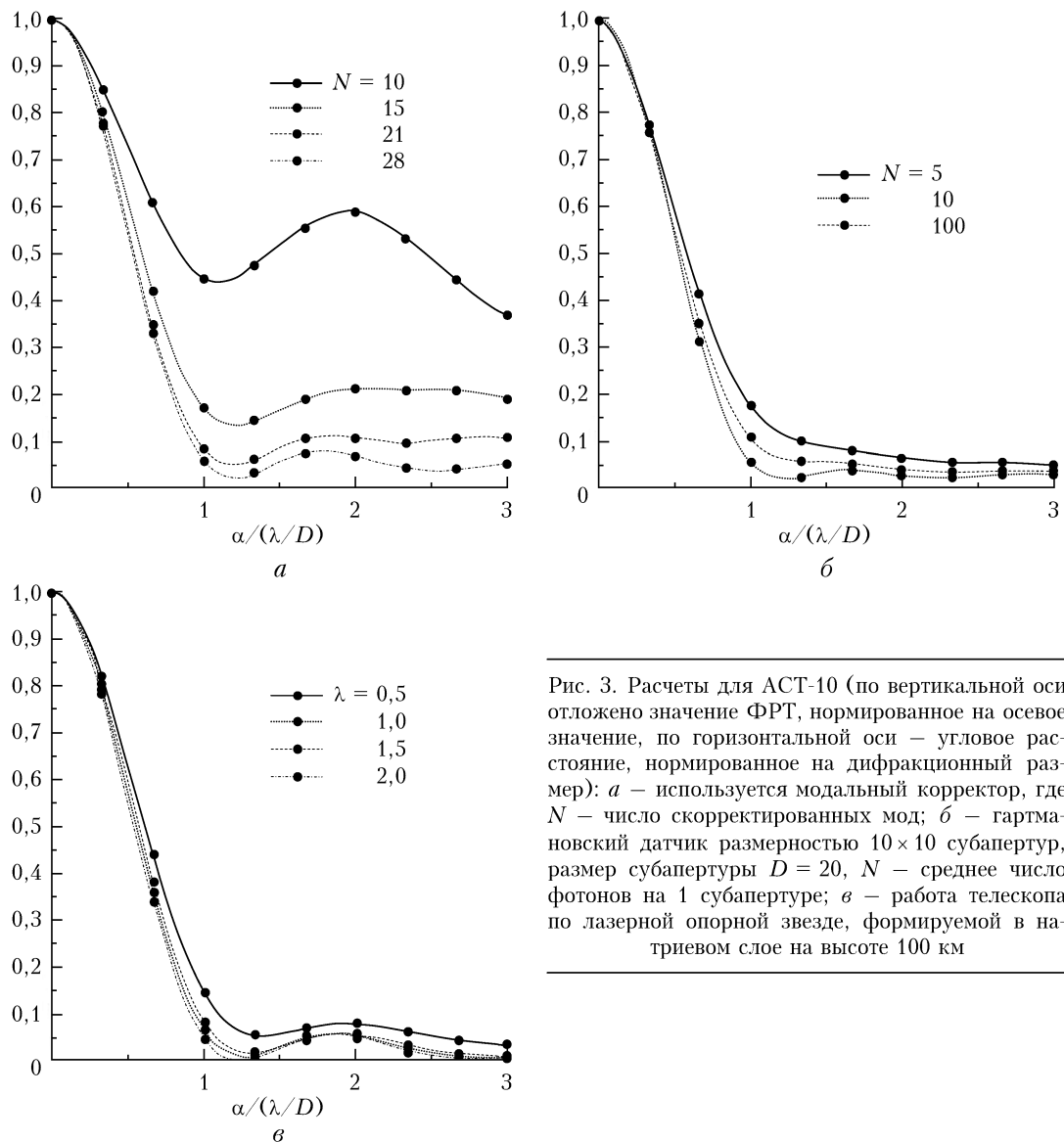


Рис. 3. Расчеты для АСТ-10 (по вертикальной оси отложено значение ФРТ, нормированное на осевое значение, по горизонтальной оси – угловое расстояние, нормированное на дифракционный размер): *а* – используется модальный корректор, где N – число скорректированных мод; *б* – гартмановский датчик размерностью 10×10 субапертур, размер субапертуры $D = 20$, N – среднее число фотонов на 1 субапертуре; *в* – работа телескопа по лазерной опорной звезде, формируемой в натриевом слое на высоте 100 км

Кроме этого, в 1994–1999 гг. были выполнены работы по контракту с Ливерморской национальной лабораторией США по поставке в Китай (Нанкинский центр астрономических инструментов) двух корректоров наклонов волнового фронта для установки на двухметровых телескопах Китая и проект по разработке адаптивной системы для астрономического телескопа Мексики (1996 г.).

В течение трех лет (1997–1999 гг.) выполнялся контракт SPC с Европейским отделением аэрокосмических исследований и развития (Лондон, Англия) «Характеристики атмосферных неоднородностей, созданных самолетом». Изучалось влияние движущегося (летающего) самолета на характеристики атмосферы в следе самолета, в том числе проводился учет влияния динамики вихрей в следе самолета на динамику атмосферной турбулентности. Была создана аппаратура для изучения флуктуаций параметров оптических волн, распространяющихся в следе взлетающего самолета. Установлено (в результате расчетов и экспериментально), что в течение нескольких секунд самолетный след сохраняет высокотурбулизо-

ванное состояние, приводящее к увеличению интенсивности естественной турбулентности на 2–3 порядка [79].

В 1997–1999 гг. мы выполняли грант ИНТАС № 97-2112 «Самоорганизация лазерного излучения с резонаторами на динамических структурах». В рамках этого проекта были исследованы возможности самопроизвольной (самостартующей) генерации в твердотельных лазерах, активная среда которых имеет продольные вариации усиления. В качестве управляемого элемента резонатора рассматривались динамические решетки вариации показателя преломления и усиления активного вещества лазера.

Развитие систем АО для солнечных телескопов

В настоящее время для изучения физических процессов, происходящих в малых масштабах на Солнце, нужны солнечные телескопы с высоким пространственным разрешением. Считается, что

необходимо обеспечить наблюдения на Солнце на масштабах порядка 70 км. Чтобы фиксировать процессы в пределах таких масштабов, угловое разрешение телескопа должно быть лучше чем 0,1 угл. с [80–86]. Исследования таких явлений, как нагрев солнечной короны, солнечная активность и вариации солнечной светимости, влияющих на климат Земли, требуют наблюдений микроструктуры магнитных полей солнечной атмосферы с угловым разрешением лучше чем 0,05 угл. с. Для создания динамических моделей солнечной атмосферы нужны параметры, которые можно получить при изучении поведения еще более мелких пространственных масштабов солнечной атмосферы.

По сравнению с системами АО для звездных телескопов системы АО для солнечных технически более сложные. Основные сложности обусловлены тем, что дневная турбулентность более *жесткая*, чем ночная, и сильнее меняется во времени. Кроме того, датчик волнового фронта должен работать с излучением видимого диапазона с использованием низкоконтрастных, протяженных, изменяющихся во времени объектов, таких как солнечная грануляция. Типичное значение радиуса когерентности для дневной турбулентности оказывается не более 10 см (на $\lambda = 0,55$ мкм) даже в лучших местах наблюдения и при типичной высоте телескопа 20–40 м над Землей. К тому же радиус когерентности [5], характеризующий силу атмосферной турбулентности, сильно флуктуирует на коротких временных масштабах (секунды) и часто уменьшается до нескольких сантиметров. Поэтому, несмотря на относительно малые размеры входных апертур солнечных телескопов, солнечные системы АО требуют еще большего количества элементов коррекции и более быстросрабатывающих, чем звездные.

Адаптивные системы для солнечных телескопов

Основным направлением наших научных исследований 2000-х гг. становится внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований по физике атмосферы в разработку основных принципов функционирования в атмосфере нового класса оптико-электронных систем — адаптивных оптико-электронных систем. Делается все больший акцент на анализе особенностей использования адаптивной фазовой коррекции для улучшения качества изображения и других характеристик астрономических телескопов.

Мировое астрономическое сообщество постановило, что новые телескопы должны быть только адаптивными. Для России в настоящее время это — единственный путь по внедрению систем АО в реально работающие телескопы.

Первые результаты

Мы предприняли попытку внедрить систему АО на метровом Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Института солнечно-земной физи-

ки (ИСЗФ) СО РАН. Исследования 1998 г. были посвящены сбору данных о дневном астроклимате района оз. Байкал. Было изучено поведение искажений изображения Солнца, формируемого в БСВТ, обусловленных особенностями данного региона. В результате в 1999 г. был создан первый вариант системы АО для БСВТ. Ее задача — обеспечить работу БСВТ при наличии в поле зрения датчика волнового фронта контрастного «пятна» или «поры». Макет системы АО обеспечивал [87–89] стабилизацию фрагмента изображения Солнца с использованием следящего устройства, работающего по измерению смещения центра тяжести изображения, а также улучшение качества изображения в 4–16 раз. Использовалось управляемое по двум координатам зеркало с пьезокерамическим приводом.

В рамках междисциплинарного интеграционного проекта «Адаптивный солнечный телескоп» сотрудниками ИОА СО РАН в 2001 г. был создан действующий макет новой адаптивной системы коррекции дрожания изображения для БСВТ ИСЗФ СО РАН, включающий в себя уникальные составляющие — адаптивный пьезоэлектрический привод и корреляционный измеритель флуктуаций оптических волн [90–93]. Были реализованы измерение и управление общим наклоном волнового фронта для малого фрагмента изображения Солнца на основе двух алгоритмов — по оптическому центру тяжести и с использованием корреляционного метода.

Был также изготовлен измеритель смещения изображения, обеспечивающий работоспособность в условиях малых вариаций интенсивности, работающий по корреляционной методике. В качестве первичного датчика этого измерителя были использованы коммерческая видеокамера и видеоадаптер ASUS AGP-V3800. Была построена система ввода, анализа и коррекции изображения на базе IBM-совместимой рабочей станции с частотой 25 кадров в секунду. Совместно с сотрудниками ИСЗФ СО РАН были выполнены испытания этой аппаратуры на телескопе БСВТ в обсерватории на оз. Байкал.

Эта система успешно используется для коррекции изображений на БСВТ. Она обеспечивает устойчивую работу солнечного телескопа на основе слежения за смещением солнечной грануляционной картины. В результате эффективность работы телескопа увеличивается в 16–25 раз.

Интеграционные проекты СО РАН

Дальнейшие исследования АО проводились в рамках комплексного междисциплинарного проекта СО РАН «Солнечный адаптивный телескоп». В 2003 г. был изготовлен макет измерителя смещения изображения, обеспечивающий работоспособность телескопа в условиях малых вариаций интенсивности, работающий на основе корреляционного слежения [94, 95].

Последующим развитием систем АО для солнечного телескопа стало создание и испытание такой системы на БСВТ с модифицированным корреляционным слежением [88–90]. В результате была

обеспечена работа системы на различных участках солнечного диска (в центре, на краю, вблизи солнечных пятен) при контрасте грануляционной картины, который в среднем лежал в интервале от 1 до 4%. Было исследовано влияние различных параметров изображения Солнца на работу корреляционного алгоритма. В последней версии созданная адаптивная система работала по измерениям смещения изображения областей спокойного Солнца – грануляционной картины – на основе модифицированного корреляционного алгоритма слежения.

Таким образом, нами была успешно решена задача коррекции наклонов волнового фронта, т.е. стабилизации положения изображения. В таблице приведены основные характеристики адаптивной системы коррекции дрожания изображения для БСВТ, для

сравнения показаны параметры существующих в мире в то время систем для солнечных телескопов.

Система АНГАРА

Следующим шагом в рамках этого проекта стала разработка (2006–2010 гг.) системы АО АНГАРА [91–96] для коррекции высших aberrаций волнового фронта, которая включала в себя гибкое многоэлементное зеркало и корреляционный датчик волнового фронта. Современный уровень коррекции с использованием одного активного зеркала показал, что созданная нами система АНГАРА, установленная на БСВТ, вполне работоспособна [96–100]. Фотографии самой системы и датчика волнового фронта приведены на рис. 4, 5 (цв. вкладки) и рис. 6.

Сравнение существующих систем АО для солнечных телескопов (данные за 2003 г.)

Параметр	США	Франция	Испания	КНР	Россия, БСВТ
Диаметр телескопа, мм	760	900	980	430	760
Объект слежения	Грануляция	Грануляция	Грануляция	Пятно/пора	Пора / грануляция
Алгоритм	Кросс-коррелятор	Кросс-коррелятор	Абсолют. разности	Абсолют. разности	Модифицир. коррелятор
Частота выборки, Гц	417	582	1350	419	164–245
Поле зрения, угл. с	10 × 10	2 × 2 ~ 12 × 12	14 × 14	5 × 5 ~ 20 × 20	33 × 33
Полоса частот, Гц	25	60	100	84–30	120
Качество коррекции (СКО, угл. с)	0,023	0,02	0,05	0,14	0,07

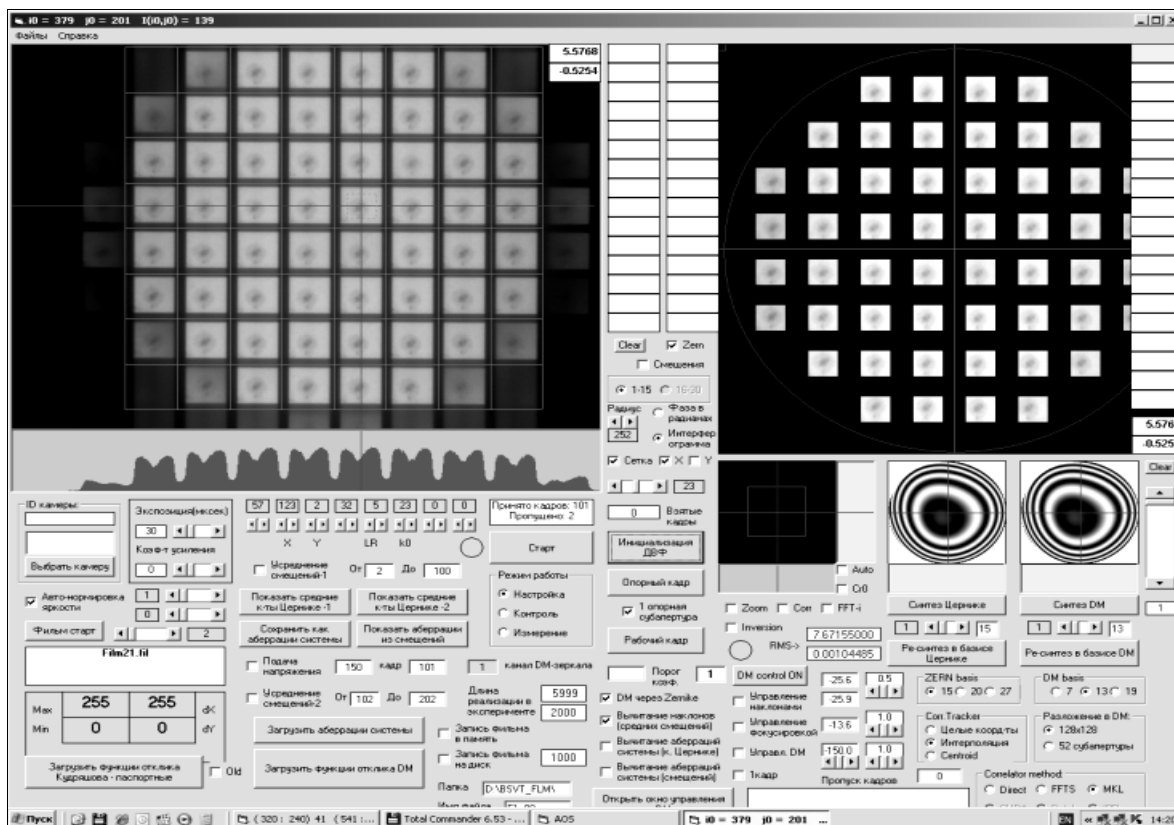


Рис. 6. Панель оператора системы АНГАРА

Тестирование системы АНГАРА проводилось с использованием различных видимых структур в изображении поверхности Солнца. Система работала с использованием солнечного пятна (рис. 7).

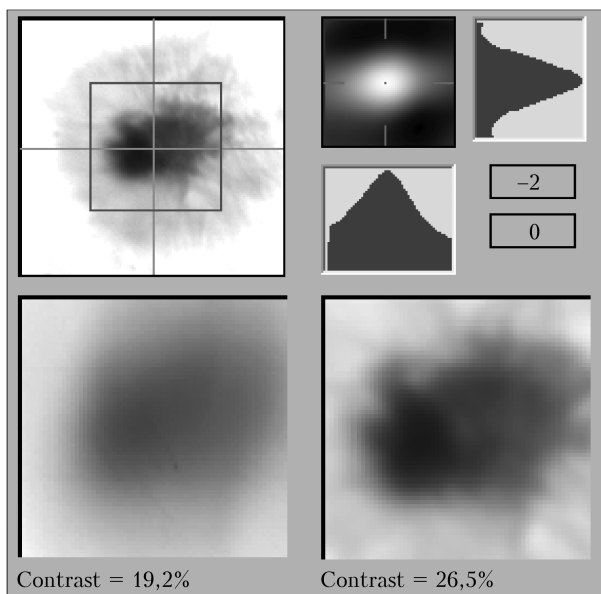


Рис. 7. Работа системы АНГАРА с использованием солнечного пятна, имеющего исходный контраст 19,2%, при короткой экспозиции

Была также опробована работа системы по солнечной поро. В результате по низкоконтрастному изображению солнечной поры удалось увеличить контраст изображения участка поверхности Солнца примерно в 1,5 раза (рис. 8).

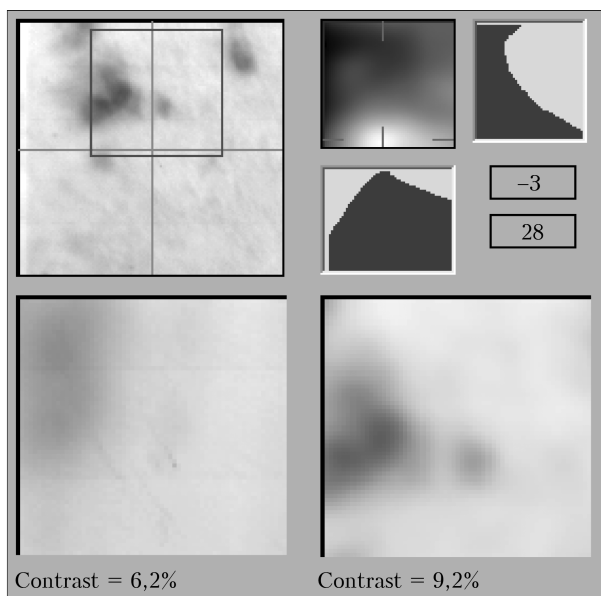


Рис. 8. Работа системы АНГАРА с использованием солнечной поры, имеющей исходный контраст 6,2%

В 2011–2012 гг. был запущен первый в России телескоп (БСВТ) с адаптивной системой АНГАРА и получен патент на полезную модель [100].

На рис. 9 показано, что отношение дисперсий процессов – без коррекции и при коррекции – составляет 24.

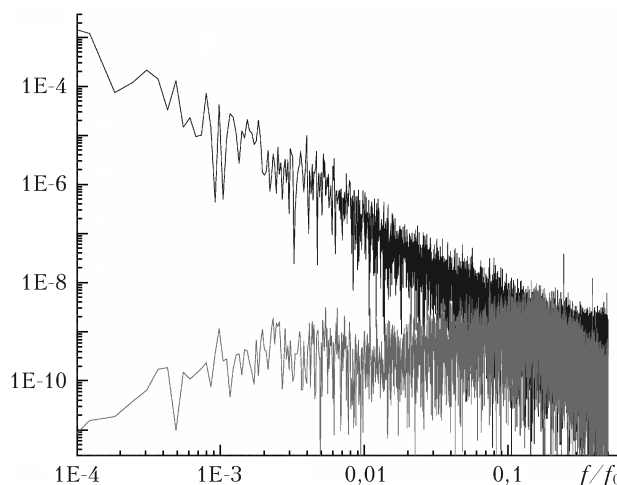


Рис. 9. Энергетический спектр случайного дрожания фрагмента изображения: черная кривая – без коррекции; серая кривая – при коррекции системой АНГАРА

Таким образом, наряду с системой солнечного телескопа Национальной обсерватории (NSO) США и системой коррекции для солнечных телескопов на Канарских островах, макет АНГАРА для БСВТ [100], созданный при участии ИОА СО РАН и ИСЗФ СО РАН, в настоящее время является наиболее продвинутым прототипом адаптивной системы для большеапертурных солнечных телескопов.

Испытания АО системы АНГАРА с модифицированным корреляционным датчиком [98, 99] на БСВТ показали достаточно высокую эффективность системы при использовании в качестве объекта слежения фрагментов грануляционной картины с контрастом 2–3%. Применение адаптивной системы не только повышает процент качественных изображений, но, что принципиально важно, дает возможность модернизации телескопа и реализации новых способов наблюдений Солнца.

Мульти-сопряженная адаптивная система на БСВТ

Мульти-сопряженная адаптивная оптика (МСАО) представляет собой дальнейшее развитие концепции систем АО. Ее суть заключается в исправлении действия турбулентности на волновой фронт с помощью более чем одного деформируемого зеркала [81–86]. Каждое такое зеркало оптически сопряжено с определенным расстоянием от телескопа в атмосфере. Основное преимущество использования МСАО заключается в увеличении поля зрения исправленного изображения. Сигналы управления деформируемыми зеркалами исходят уже не от одного, а от нескольких датчиков волнового фронта (ДВФ), каждый из которых при измерениях использует свою опорную звезду. Информация от нескольких ДВФ одновременно обрабатывается компьютером-реконструктором, чтобы восстановить трехмерное возмущение волнового

фронта, подобно тому, как это делается в медицинской томографии, где трехмерная структура объекта определяется из наблюдений под разными углами. В этом случае обеспечивается лучшее качество коррекции искажений по сравнению с использованием только одной опорной звезды. Непрерывный рост интереса к развитию методов трехмерной реконструкции турбулентности и их применению в МСАО непосредственно связан с перспективой исправления турбулентности на больших и, в будущем, на сверхбольших телескопах во всем видимом и ИК-диапазонах.

После создания системы АНГАРА работы по системам АО для солнечных телескопов получили дальнейшее развитие [101–106]. Так, в 2017 г. на БСВТ была создана элементная база для отработки методов регистрации и коррекции искажений оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы. Была установлена трехкаскадная система коррекции изображения [104–106]. Осуществлено развитие программного обеспечения для проведения статистического анализа качества формируемого изображения в БСВТ, объединена работа датчика волнового фронта, анализатора качества изображения и астрономического прибора – фильтра.

Исследование влияния на лазерные пучки эффекта теплового самовоздействия излучения

Решение фазовой проблемы в оптике получило развитие в работах коллектива по созданию эффективных алгоритмов адаптивной коррекции тепловых искажений, возникающих при транспортировке мощного лазерного излучения в атмосфере, а также по изучению влияния винтовых дислокаций фазы на качество коррекции. Впервые [106–111] нами было исследовано влияние сингулярных точек фазы (дислокаций волнового фронта) на турбулентное уширение пучков и размытие изображений в системах с адаптивной фазовой коррекцией искажений.

В численных экспериментах было показано, что именно возникновение сингулярных точек фазы в опорной волне приводит к снижению эффективности современных адаптивных систем. Это дает ключ к разработке новых схем адаптивной коррекции размытия пучков и изображений. Полученная теоретическая зависимость интенсивности в фокусе оптической системы согласуется с экспериментальными результатами [112] Линкольнской лаборатории США (рис. 10).

Впервые в наших работах было обнаружено возникновение сингулярных точек фазы в поле опорного излучения при адаптивной фазовой коррекции теплового самовоздействия мощных пучков. Показано, что именно эти особенности фазы опорной волны обуславливают возникновение колебательной неустойчивости при фазовой коррекции мощных пучков.

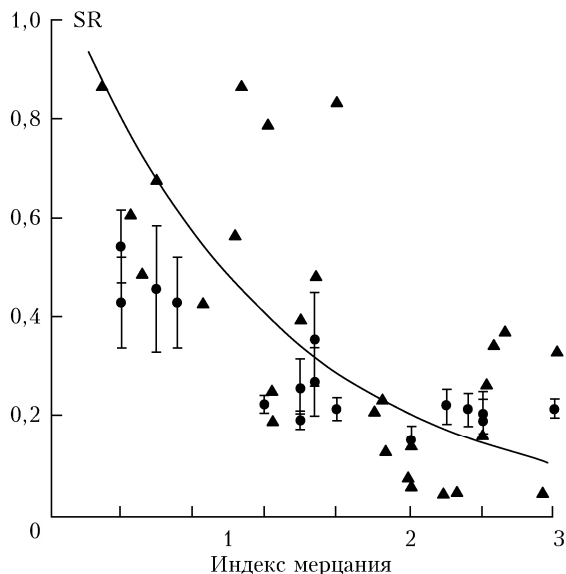


Рис. 10. Результаты исследования эффективности адаптивной коррекции турбулентного уширения лазерного пучка: нормированная интенсивность в фокусе пучка SR в зависимости от индекса мерцания, характеризующего уровень флуктуаций интенсивности. Символы (черные кружки и треугольники) соответствуют экспериментальным данным, полученным в различное время наблюдения в Линкольнской лаборатории США. Сплошная кривая — расчет по результатам [108, 109]

Предложен новый алгоритм адаптивной коррекции, позволяющий избежать возникновения неустойчивости и в несколько раз увеличить мощность пучка на мишени (рис. 11).

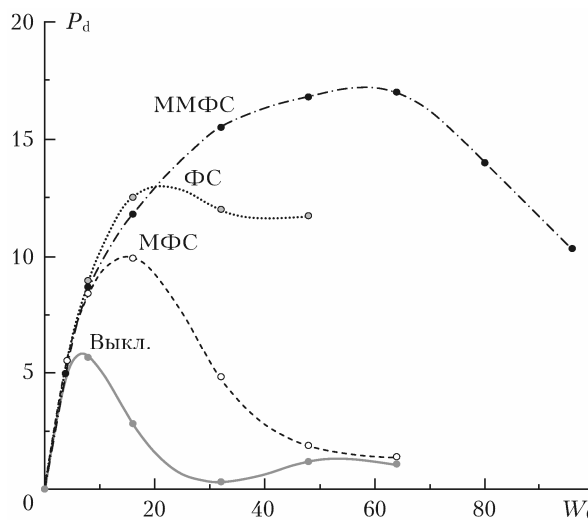


Рис. 11. Зависимость мощности в дифракционном кружке P_d от начальной интенсивности W_0 без коррекции искажений (Выкл.) и при использовании различных алгоритмов коррекции: фазовое сопряжение (ФС), модальное фазовое сопряжение и новый алгоритм — модифицированное модальное фазовое сопряжение (ММФС). Мощность и интенсивность даны в условных единицах

При исследовании характеристик фазы опорной волны в схемах адаптивной фазовой коррекции ма-

ломощных пучков в условиях турбулентных флуктуаций показателя преломления и мощных пучков в условиях теплового самовоздействия методами численного эксперимента было показано, что именно эти особенности фазы опорной волны обуславливают возникновение колебательной неустойчивости при фазовой коррекции мощных пучков и приводят к снижению эффективности коррекции турбулентных искажений. Предложен алгоритм модифицированного модального фазового сопряжения, позволяющий избежать возникновения дислокаций и неустойчивости и в несколько раз увеличить мощность пучка на мишени.

В итоге при исследовании распространения пучка в условиях сильной турбулентности, приводящей к флуктуациям интенсивности [108, 109], показано, что требования к размеру элемента и быстродействию адаптивной системы практически не изменяются при переходе в область сильных флуктуаций. В то же время обнаружено, что с ростом флуктуаций интенсивности уменьшается корреляция между локальным наклоном волнового фронта и разностью фаз, поэтому измерение локальных наклонов становится неэффективным. Вследствие этого датчик волнового фронта для адаптивной системы следует строить по принципу прямого измерения разности фаз.

Решение проблемы фазирования составного зеркала

Проблема фазирования составного зеркала также связана с построением крупных оптических зеркал для астрономических телескопов. По техническому заданию НПО «Астрофизика» в ЛКАО в 2004–2006 гг. были исследованы и разработаны новые интерференционные методы фазирования составных астрономических зеркал. При этом нами были рассмотрены [113, 114] искажения в наземном телескопе из-за расфазировки сегментов главного зеркала. Коррекция случайных смещений сегментов с амплитудой в несколько сотен длин волн обычно выполняется с использованием емкостных или индуктивных датчиков поверхности.

Нами был предложен алгоритм фазирования [113], позволяющий уменьшить остаточные случайные смещения сегментов зеркала до значений, меньших длины волны оптического излучения. Этот алгоритм построен на использовании когерентных пучков, генерируемых лазерным источником, которые отражались от двух соседних элементов и сводились в одну точку с помощью отклоняющих зеркал. Моделирование выполнялось для зеркала только с двумя сегментами, так как полагалось, что увеличение степеней свободы не внесет принципиальных изменений в процесс фазирования. Радикальное увеличение диапазона возможно с введением третьей длины волны. Численные эксперименты показали, что при использовании трех интерферирующих волн фазирование элементов составного зеркала можно осуществить даже при начальном отклонении порядка 33 мкм.

Двухзеркальные системы АО

Внимание сотрудников лаборатории всегда привлекала задача реализации амплитудно-фазового управления в адаптивной системе [114]. Сложность заключается в том, что для полной компенсации искажений на трассе распространения пучка необходимо точно воспроизвести амплитудный и фазовый профили опорного пучка. При измерении фазы датчиком Гартмана и ее задании упругим зеркалом возникают ошибки, приводящие к падению качества коррекции. Выполнение этих операций связано с определенными трудностями, учитывая тот факт, что это нужно сделать быстрее, чем изменятся искажения на трассе; но принципиальные ограничения вносят только особые точки волнового фронта [52–54]. Остальные сложности, возникающие при реализации управления, возможно решить за счет увеличения быстродействия и разрешения оптических элементов.

Возникают трудности при задании в системе амплитуды опорного пучка, которая в общем случае может иметь достаточно сложное распределение, потому что пучок на выходе лазера является гауссовым, супергауссовым, искаженным в резонаторе, но не тем, который необходим для компенсации неоднородностей.

Сотрудниками ЛКАО рассматривались два подхода. Согласно первому нужно закрыть или ослабить те части в распределении интенсивности, которые не соответствуют распределению опорного излучения [114, 115]. Недостатки очевидны — это, во-первых, потеря энергии в оптической системе, во-вторых — дополнительный нагрев элементов.

Второй подход заключался во введении в систему дополнительного зеркала [116]. Построенная таким образом адаптивная система имеет два и более управляемых зеркала. Зеркало М1 управляет фазой лазерного пучка, между зеркалами имеется промежуток пространства, в котором фазовая модуляция преобразуется в амплитудные изменения. В результате на выходе системы формируется пучок с профилем, совпадающим с профилем опорного излучения. Зеркало М2 обеспечивает формирование фазы, обратной фазе опорного излучения. Потери только при отражении от зеркал, они очень малы. Основная сложность — вычисление профиля зеркала М1, обеспечивающего требуемое распределение амплитуды. Численно было показано, что предложенная система работоспособна и высокоэффективна.

Работы по изучению особенностей атмосферной турбулентности

Для проведения измерений атмосферной турбулентности в горных условиях совместно с СКБ НИ «Оптика» СО АН СССР был разработан и изготовлен первый в мире фотоэлектрический измеритель дрожания изображения на базе малого астрономического телескопа АЗТ-7. Его испытания были проведены в 1982 г. в Специальной астрофизической

обсерватории АН СССР (теперь САО РАН) на телескопе ТТ-600 [117]. Это телескоп был установлен в обсерватории близи пос. Нижний Архыз.

В наших экспериментах еще в 1970-х гг. было отмечено несоответствие закону Колмогорова—Обухова [118–123]. Конечность величины внешнего масштаба турбулентности и ее влияние на характеристики формируемого изображения через атмосферу нами были убедительно доказаны при анализе эффективности астрономических телескопов и интерферометров наземного базирования. Также было показано, что сама величина внешнего масштаба турбулентности в приземном слое атмосферы зависит от термодинамической устойчивости атмосферы (рис. 12).

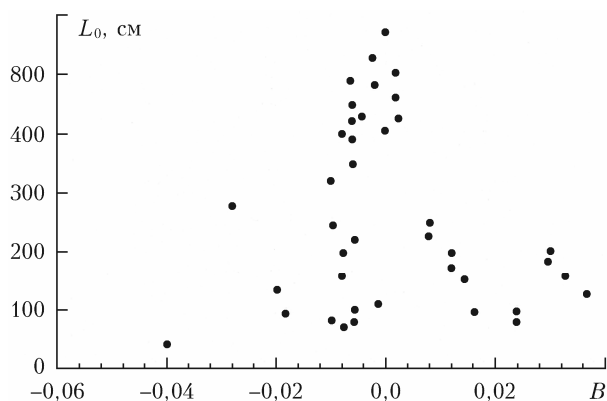


Рис. 12. Вариации среднего значения внешнего масштаба турбулентности, измеренные на высоте 2,5 м над подстилающей поверхностью, как функция параметра неустойчивости А. С. Монина

В настоящее время эти результаты и выводы из них признаны всем мировым оптическим сообществом и широко применяются при оценке эффективности телескопов с предельно большими апертурами [70]. Было даже введено новое понятие — эффективный внешний масштаб турбулентности [124] — для описания вертикального распространения оптических волн через всю толщу атмосферы (в приложении к астрономическим наблюдениям).

Впервые в СССР в 1984–1986 гг. в инженерной группе нашей лаборатории был разработан многофункциональный метеоконкомплекс [40, 125]. Он был испытан в экспедиции в Болгарии (1984 г., София), фактически это — прообраз современных акустических систем АМК и Метео-2, изготавливаемых в ИОА СО РАН и в ИМКЭС СО РАН.

С помощью этой аппаратуры в ЛКАО была разработана и экспериментально проверена оригинальная концепция приземной атмосферной турбулентности в условиях влияния подстилающей поверхности [126–142]. Выполнен обширный комплекс измерений турбулентности атмосферы в приземном слое для различных географических регионов и условий в атмосфере. Результаты обобщены в монографии [141] и в [143], где суммируются данные не только для регионов Сибири, но и для горных обсерваторий Средней Азии.

Были также разработаны новые трассовые измерители уровня турбулентности и средней скорости ветра [144, 145], дифференциальный измеритель дрожания изображения для трассовых измерений уровня турбулентности (ДИТ). Измеритель ДИТ в разные годы (2006–2011 гг.) был внедрен на НПО «Алмаз-Антей», НПО «Астрофизика» (2 комплекта), фирме «Визионика» (2 комплекта), ИПФ РАН, ЦНИП «Радуга», ИСЗФ СО РАН. С помощью этих приборов [146–148] также были получены многочисленные экспериментальные данные по югу Сибири.

Были разработаны предложения по построению комплекса для мониторинга атмосферы для астрономической обсерватории, в которой работают системы АО.

Результаты работы за последние 10 лет

Наконец, кратко перечислим наиболее важные результаты, полученные в последние годы.

Были продолжены работы по развитию методики применения лазерных опорных звезд для коррекции изображения, которые показали возможность использования сигнала обратного рассеяния от неоднородностей атмосферы в качестве опорного бакаена (например, [149–151]). Теперь эти исследования получили очень широкое развитие, и даже появилось отдельное научное направление — создание и применение лазерных опорных звезд.

В последние годы была разработана принципиально новая схема формирования лазерной опорной звезды, позволяющая реализовывать измерения флуктуаций общего наклона волнового фронта в схеме адаптивного телескопа [152–158]. Показана высокая эффективность коррекции изображения в телескопе наземного базирования с помощью двух лазерных опорных звезд.

Разработан и передан в эксплуатацию в ИСЗФ СО РАН анализатор качества изображения (2012 г.).

Создан программно-аппаратный комплекс анализа изображений, внедренный для работы на телескопе полного диска Солнца в Байкальской астрономической обсерватории СО РАН по программе «Импортозамещение» (2014 г.).

Разработан и изготовлен высокоскоростной корреляционный датчик волнового фронта, позволяющий менять свои параметры путем оперативной замены используемых растров, камер (2016 г.).

Разработаны (2017 г.) предложения по системе АО для создаваемого для ИСЗФ СО РАН 3-метрового солнечного телескопа КСТ-3.

Создана (2018 г.) первая в России адаптивная система видения в видимом диапазоне длин волн для наблюдения на протяженных атмосферных горизонтальных трассах [159].

Создан новый высокоскоростной тип-тилт корректор и получен (2018 г.) патент на полезную модель [160].

Внедрение результатов в практику

Свидетельством международного признания томской школы по проблеме атмосферной адаптивной оптики ИОА СО РАН в 1998 г. стало приглашение В.П. Лукина в качестве редактора тематического выпуска международного журнала *Applied Optics*. Также В.П. Лукиным были прочитаны лекции по адаптивной оптике в международных школах и организациях: 1993 г., Коржес, Франция; 1996 г., Лезуш, Франция; 1994 г., Линкольнская Национальная лаборатория, США; 1994–1996 гг., 2007 г., национальные лаборатории, Китай; 2007 г., Галвэй, Ирландия; 2013 г., Черновцы, Украина; 2018 г., Севастополь, Россия.

Было налажено сотрудничество с Институтом астрономии (2002 г., Лунд, Швеция) по проекту Евро-50, имеются контакты с Европейской южной обсерваторией (2003 г., Мюнхен, Германия) по проблеме применения лазерных опорных звезд. Выполнены расчеты эффективности различных схем применения лазерной опорной звезды для Очень большого телескопа (2003 г., Европейская южная обсерватория, Германия). Были проведены расчеты [161], осуществлено развитие модели для внешнего масштаба при использовании лазерной опорной звезды (2003, Лунд, Швеция).

Выполненные коллективом научные исследования были широко внедрены, прежде всего, в РФ. Так, в 1990 г. была создана лазерная опорная система с коррекцией влияния атмосферной рефракции, в 1995 г. были разработаны технические предложения для отечественного адаптивного телескопа АСТ-10, в 2002–2009 гг. в ряде организаций РФ был внедрен дифференциальный измеритель турбулентности, в рамках программы СО РАН «Импортозамещение» ряд научно-технических разработок был передан в ИСЗФ СО РАН, в 2004 г. был создан макет адаптивной системы для коррекции изображений в солнечном телескопе, использующий слежение за смещением изображения солнечной грануляционной картины.

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. Самые современные ОЭС достаточно дороги, так как требуют на начальном этапе своего проектирования 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. Основные параметры системы не могут не претерпевать изменений на различных этапах проектирования и изготовления, поэтому они строятся с учетом возможного изменения их основных параметров, что является одним из основных требований современного проектирования оптико-электронной аппаратуры. Такую возможность дают адаптивные оптические

системы. 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 АО, но и всей системы в целом.

Авторы благодарят за многолетнюю совместную работу докт. физ.-мат. наук В.А. Тартаковского, науч. сотр. В.А. Сенникова, инженера А.П. Янкова, а также специалистов, недавно пришедших в лабораторию: ведущего инженера А.Г. Борзилова, инженеров А.А. Селина и И.М. Пороева, техников Е.Л. Соина, М.В. Казакова, Д.В. Кучеренко, И.Д. Веретехина. Желаем им успешно завершить обучение и в скором времени влиться в наш коллектив.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № АААА-А17-117021310146-3.

1. *Babcock H.W.* // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 1953. V. 65. P. 229–236.
2. *Линник В.П.* О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображении звезды // *Оптика и спектроскоп.* 1957. Т. 57. 401.
3. *Tyson R.K.* *Principles of Adaptive Optics.* Doston: Academic Press, 1991. 203 p.
4. *Харди Д.У.* Активная оптика: новая техника управления световым пучком // *ТИИЭР.* 1978. Т. 66, № 6. С. 31–85.
5. *Hardy J.W., Feinlieb J., Wyant J.C.* Real-Time Phase Correction of Optical Imaging Systems // *Proc. Top. Meeting. University of Colorado. Boulder. USA.* 1974.
6. *Merkle F.* The VLT adaptive optics prototype system // *Messenger.* 1989. V. 58. P. 1–9.
7. *Татарский В.И.* Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 232 с.
8. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 278 с.
9. *Strohbehn J.W.* *Laser Beam Propagation in the Atmosphere.* Berlin: Springer-Verlag, 1978. P. 45–106.
10. *Fried D.L.* Limiting resolution looking down through the atmosphere // *J. Opt. Soc. Am.* 1966. V. 56. P. 1380.
11. *Labeyrie A.* Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images // *Astron. Astroph.* 1970. V. 3, N 6. P. 84–85.
12. *Fried D.L.* Statistics of a geometric representation of wavefront distortion // *J. Opt. Soc. Am.* 1965. V. 55. P. 1427–1435.
13. *Greenwood D.* Bandwidth specification for adaptive optics systems // *J. Opt. Soc. Am.* 1977. V. 67. P. 390–392.
14. *Greenwood D., Fried D.L.* Power spectra requirements for wave-front-compensative systems // *J. Opt. Soc. Am.* 1976. V. 66. P. 193–206.
15. *Емалеев О.Н., Назарчук В.И., Покасов В.В.* Следящий цифровой фазометр оптического диапазона // Авторское свидетельство № 397852. Опубл. 17.11.1973 г. Бюл. № 37. Приоритет от 10.01.1972 г.
16. *Обухов А.М.* О влиянии слабых неоднородностей атмосферы на распространение звука и света //

- Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1953. № 2. С. 155–165.
17. *Гурвич А.С.* Определение характеристик турбулентности из экспериментов по распространению света // Изв. АН СССР. ФАО. 1968. Т. 4, № 2. С. 160–169.
 18. *Лукин В.П., Покасов В.В., Хмелевцов С.С.* Исследование временных характеристик фаз оптических волн, распространяющихся в приземном слое атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 1972. Т. 15, № 12. С. 1861–1866.
 19. *Миронов В.Л., Лукин В.П., Покасов В.В., Хмелевцов С.С.* Флуктуации фазы модулирующего колебания оптической несущей при распространении в турбулентной атмосфере // Изв. АН СССР. Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18, № 3. С. 502–507.
 20. *Лукин В.П., Лукин И.П.* Распространение модулированных волн в турбулентной атмосфере. II. Корреляционная функция и частотный спектр флуктуаций фазы модулирующего колебания // Квант. электрон. 1978. Т. 5, № 5. С. 1124–1129.
 21. *Лукин В.П., Покасов В.В.* Флуктуации фазы оптических волн, распространяющихся в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 11. С. 1726–1729.
 22. *Миронов В.Л., Лукин В.П., Покасов В.В., Хмелевцов С.С.* Флуктуации фазы оптических волн, распространяющихся в турбулентной атмосфере // Изв. АН СССР. Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20, № 6. С. 1164–1170.
 23. *Миронов В.Л., Лукин В.П., Покасов В.В., Хмелевцов С.С.* Фазовые оптические измерения спектральной плотности флуктуаций показателя преломления атмосферы // Изв. АН СССР. ФАО. 1976. Т. 12, № 5. С. 550–553.
 24. *Лукин В.П., Покасов В.В., Сазанович В.М., Миронов В.Л.* Фазовые измерения внутреннего масштаба атмосферной турбулентности // Изв. АН СССР. ФАО. 1976. Т. 12, № 12. С. 1317–1319.
 25. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 232 с.
 26. *Лукин В.П., Покасов В.В., Гиме Н.С., Туровцева Л.С.* Восстановление спектра пульсаций показателя преломления в атмосфере из оптических измерений // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. 1977. Т. 13, № 1. С. 90–94.
 27. *Lukin V.P., Pokasov V.V.* Optical wave phase fluctuations // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 1. P. 121–135.
 28. *Лукин В.П.* Об эффективности компенсации фазовых искажений оптической волны // Квант. электрон. 1977. Т. 4, № 4. С. 923–927.
 29. *Lukin V.P.* Efficiency of some correction systems // Opt. Lett. 1979. V. 4, N 1. P. 15–17.
 30. *Лукин В.П.* Сравнительные характеристики некоторых алгоритмов коррекции // Квант. электрон. 1981. Т. 8, № 10. С. 2145–2153.
 31. *Лукин В.П., Чарноцкий М.И.* Принцип взаимности и адаптивное управление параметрами оптического излучения // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 5. С. 952–958.
 32. *Лукин В.П., Миронов В.Л.* Динамические характеристики адаптивных оптических систем // Квант. электрон. 1985. Т. 12, № 9. С. 1959–1962.
 33. *Лукин В.П.* Динамические характеристики прогнозирующих адаптивных оптических систем // Изв. АН СССР. Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, № 9. С. 1808–1812.
 34. *Lukin V.P., Zuev V.E.* Dynamic characteristics of optical adaptive systems // Appl. Opt. 1987. V. 26, N 1. P. 139–144.
 35. *Лукин В.П., Чарноцкий М.И.* О распространении обращенных волн в случайно-неоднородной среде // Изв. вузов. Физика. 1985. № 11. С. 51–63.
 36. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
 37. *Lukin V.P.* Atmospheric Adaptive Optics // SPIE Press. 1995. V. 23. 275 p.
 38. *Лукин В.П., Емалеев О.Н.* Коррекция угловых смещений оптических пучков // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 11. С. 2264–2271.
 39. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Фризен А.Г.* Модовая коррекция турбулентных искажений оптических волн // Квант. электрон. 1986. Т. 13, № 8. С. 1652–1656.
 40. *Антошкин Л.А., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Сукопкина В.Н., Хацко В.В., Янков А.П.* Аппаратура для метеорологических исследований в атмосфере // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 3. С. 240–241.
 41. *Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П.* Эксперименты по модовой коррекции искажений оптических волн // Атмосферная неустойчивость и адаптивный телескоп. Л.: Наука, 1988. С. 22–24.
 42. *Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П.* Пьезоэлектрический корректор наклонов волнового фронта // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 5. С. 211–212.
 43. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П.* Адаптивная оптическая система для коррекции изображения // Оптика атмосф. и океана. 1989. Т. 2, № 6. С. 621–627.
 44. *Лукин В.П.* Эффективность коррекции общих наклонов и дефокусировки волнового фронта // Оптика атмосф. и океана. 1989. Т. 2, № 6. С. 563–572.
 45. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Потанин С.Ф.* Адаптивная оптическая система для коррекции искажений изображения // Оптика атмосф. и океана. 1989. Т. 2, № 6. С. 621–627.
 46. *Лукин В.П.* Многоэлементная система коррекции изображения // Оптика атмосф. и океана. 1990. Т. 3, № 12. С. 1235–1243.
 47. *Antoshkin L.V., Lukin V.P., Botugina N.N., Emaleev O.N., Potanin S.F.* Experiments on the adaptive image formation // Proc. SPIE. 1993. V. 1968. P. 319–326.
 48. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П.* Эффективность коррекции изображения при управлении общими и локальными наклонами волнового фронта // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 10. С. 1472–1479.
 49. *Lukin V.P., Konayev P.A.* Thermal distortions of focused laser beams in the atmosphere // Appl. Opt. 1985. V. 24, N 3. P. 415–421.
 50. *Лукин В.П., Коняев П.А., Миронов В.Л.* Эффективность применения адаптивных оптических систем в условиях самовоздействия излучения в атмосфере // Изв. АН СССР. Серия физ. 1985. Т. 49, № 3. С. 536–540.
 51. *Коняев П.А., Лукин В.П.* Фокусировка мощного лазерного пучка при тепловом самовоздействии в движущейся среде // Квант. электрон. 1988. Т. 15, № 2. С. 341–346.
 52. *Зуев В.Е., Коняев П.А., Лукин В.П.* Минимизация атмосферных искажений оптических волн методами адаптивной оптики // Изв. вузов. Физика. 1985. № 11. С. 6–29.
 53. *Коняев П.А., Лукин В.П., Фортес Б.В.* Фазовая коррекция нелинейных искажений когерентного пучка // Оптика атмосф. и океана. 1988. Т. 1, № 4. С. 71–75.
 54. *Коняев П.А., Лукин В.П., Фортес Б.В.* О фазовой коррекции нелинейных искажений при фокусировке

- когерентного оптического излучения через атмосферу // Оптика атмосф. и океана. 1990. Т. 3, № 12. С. 1279–1285.
55. Канев Ф.Ю., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Зависимость качества воспроизведения адаптивным зеркалом заданной фазовой поверхности от числа сервоприводов и конфигурации из размещения // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 8. С. 962–969.
 56. Kanev F.Yu., Lavrinova L.N., Lukin V.P. Optimization of a flexible mirror in the problem of compensation of laser beams thermal blooming // Proc. ICO. 1993. P. 155–160.
 57. Buckley R. Diffraction by a Random Phase-Changing Screen: A Numerical Experiment // J. Atmos. Terr. Phys. 1975. V. 37. P. 1431–1446.
 58. Fleck J.A., Morris J.R., Feit M.D. // Appl. Phys. 1976. V. 10. P. 129–160.
 59. Кандидов В.П., Леденев В.И. О применении метода статистических испытаний к исследованию распространения волнового пучка в случайно-неоднородной среде // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. С. 438.
 60. Коняев П.А. Модификация метода расщепления для численного решения квазиоптических задач // Тез. докл. VII Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО АН СССР, 1983.
 61. Martin J.M., Flatte S.M. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media // Appl. Opt. 1988. V. 27. P. 2111–2117.
 62. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971.
 63. Collins S.A., Duncan D. // J. Opt. Soc. Am. 1975. V. 65. P. 1218–1236.
 64. Duncan D.D., Collins S.A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics // J. Opt. Soc. Am. 1975. V. 65. P. 1232–1240.
 65. Тельпуховский И.Е., Чесноков С.С. Модальное представление атмосферных неоднородностей при численном анализе статистических характеристик светового пучка // Оптика атмосф. и океана. 1991. Т. 4, № 12. С. 1290–1293.
 66. Fortes B.V., Lukin V.P. Phase correction of an image turbulence broadening under conditions of strong intensity fluctuations // Proc. SPIE. 1992. V. 1668. P. 477–488.
 67. Коняев П.А. Численное исследование тепловых искажений лазерных пучков в атмосфере: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Изд-во ТГУ, 1984. 240 с.
 68. Fortes B.V., Kanev F.Yu., Konyayev P.A., Lukin V.P. Potential capabilities of adaptive optical systems in the atmosphere // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V. 11, N 2. P. 903–907.
 69. Lukin V.P. Limiting capabilities of adaptive optical systems in the atmosphere // Proc. SPIE. 1991. V. 1543. P. 337–343.
 70. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 212 с.
 71. Fortes B.V., Kanev F.Yu., Konyayev P.A., Lukin V.P. Four-dimensional computer dynamic model of atmospheric optical systems // Proc. SPIE. 1994. V. 2222. P. 522–526.
 72. 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 атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 3. С. 409–418.
 73. 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 атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 3. С. 419–428.
 74. Канев Ф.Ю., Коняев П.А., Лукин В.П., Фортес Б.В. Численная модель адаптивной оптической системы. Часть III. Программная реализация модели // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 3. С. 429–434.
 75. Lukin V.P. Computer modeling of adaptive optics & sites for telescope design // Proc. OSA Tech. Proc. 1996. N 54. P. 373–378.
 76. Lukin V.P., Fortes B.V. Partial phase correction of turbulent distortions in telescope AST-10 // Appl. Opt. 1998. V. 37, N 21. P. 4561–4568.
 77. Lukin V.P., Fortes B.V. Ground-based spatial interferometers and atmospheric turbulence // Pure Appl. Opt. 1996. V. 5, N 1. P. 1–11.
 78. Лукин В.П., Фортес Б.В. Пространственные фазовые интерферометр наземного базирования и атмосферная турбулентность // Астроном. журн. 1996. Т. 73, № 3. С. 419–425.
 79. Лукин В.П., Емалеев О.Н., Петров А.И. Исследование оптических характеристик в следе самолета // VII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана». Томск, 2000. С. 119–123.
 80. Ricort G., Aime C., Roddier C., Borgino J. Adaptive optics for solar telescopes // Sol. Phys. 1981. V. 69. P. 223–231.
 81. Von der Luhe O., Widener A.L., Rimmele T., Spence G., Dunn R., Wiborg P. Solar-feature correlation tracher for ground-based telescopes // Astron. Astrophys. 1989. V. 224. P. 351–360.
 82. Von Der Luhe O. Image quality in high-resolution and high-cadence solar imaging // Adv. Spac. Res. 1991. V. 11, N 5. P. 275–286.
 83. Acton D.S., Smithson R.C. Solar imaging with a segmented adaptive mirror // Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 3161–3172.
 84. Scharnera B.G., Dettori P., Mats G., Lofdahl M.G., Shandb M. Adaptive optics for the new Swedish solar telescope // Proc. SPIE. 2002. V. 4853. P. 370–382.
 85. Didkovsky L.V., Dolgushyn A., Marquette W., Newnow J., Varsik J., Goode R.R., Hegwer S.L., Ren D., Fletcher S., Rimmele Th., Carsten J., Wang H. High-spatial-resolution imaging combining high-order Adaptive Optics, Frame Selection, and Speckle Masking Reconstruction // Proc. SPIE. 2002. V. 4853. P. 630.
 86. Rimmele T.R. Recent advances in solar adaptive optics // Proc. SPIE. 2004. V. 5490. P. 549004.
 87. Лукин В.П., Фортес Б.В., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Петров А.И., Янков А.П., Булатов А.В., Ковадло П.Г., Фирстова Н.М. Экспериментальная адаптивная оптическая система для БСВТ. I. Результаты тестирования и перспективы развития // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 12. С. 1161–1164.
 88. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Петров А.И., Фортес Б.В., Янков А.П. Экспериментальная адаптивная оптическая система для БСВТ. II. Эффективность стабилизации фрагмента изображения солнечного диска на входной щели спектрографа // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т.13, № 4. С. 420–423.
 89. Antoshkin L.V., Borovik A.B., Botygina N.N., Bulatov A.V., Emaleev O.N., Firsova N.M., Fortes B.V., Grigoryev V.M., Kovadlo P.G., Larinova L.N., Lukin V.P., Petrov A.I., Skomorovsky V.I., Yankov A.P. First-order adaptive system for correction of images in solar ground-based telescopes // Adaptive Opt. Syst. Tech. 2000. V. 4007. P. 232–238.

90. *Botugina N., Emallev O., Konyaev P., Lukin V., Antoshkin L., Yankov A.* Adaptive system for solar telescope // Proc. SPIE. 2001. V. 4493.
91. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Петров А.И., Янков А.П. Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 11. С. 1027–1030.
92. *Antoshkin L.V., Botugina N.N., Emallev O.N., Lukin V.P.* Problems of design of adaptive solar telescope // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 20–27.
93. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Янков А.П. Развитие дизайна адаптивной системы для солнечного телескопа // Автометрия. 2003. Т. 39, № 5. С. 77–90.
94. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Лавринов В.В., Лукин В.П. Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1077–1082.
95. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Янков А.П. Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа // Опт. журн. 2006. Т. 73, № 3. С. 55–60.
96. *Konyaev P.A., Emallev O.N., Botugina N.N., Grigor'ev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Antoshkin L.V., Skomorovski V.I., Yankov A.P.* Modified correlation tracking algorithm for tip-tilt correction system and project ANGARA on the Big Solar Vacuum Telescope // Proc. SPIE. 2006. V. 6272. P. 627251.
97. *Grigor'ev V.M., Lukin V.P., Antoshkin L.V., Botugina N.N., Emallev O.N., Konyaev P.A., Kovadlo P.G., Skomorovskii V.I.* Tests of the adaptive optical system with a modified correlation sensor at the big solar vacuum telescope // Proc. SPIE. 2008. V. 7108. P. 7108OK.
98. Григорьев В.М., Лукин В.П., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Носов В.В., Скоморовский В.И., Торгаев А.В. Возможность применения адаптивной оптики для солнечных телескопов // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 499–511; *Grigor'ev V.M., Lukin V.P., Antoshkin L.V., Botugina N.N., Emallev O.N., Konyaev P.A., Kovadlo P.G., Nosov V.V., Skomorovskii V.I., Torgaev A.V.* Applicability of adaptive optics for solar telescopes // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 3. P. 370–382.
99. *Botugina N.N., Emallev O.N., Konyaev P.A., Lukin V.P.* Wavefront sensors and algorithms for adaptive optical systems // Proc. SPIE. 2010. V. 7736. P. 773659-1–9.
100. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д., Чупраков С.А. Телескоп с адаптивной оптической системой. Патент на полезную модель № 11169. Приоритет от 29.06.2011 г.
101. 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.
102. *Lukin V.P., Grigor'ev V.M., Antoshkin L.V., Botugina N.N., Emallev O.N., Kovadlo P.G., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Skomorovski V.I., Trifonov V.D., Chuprakov S.A.* Development of adaptive optics elements for solar telescope // Proc. SPIE. 2012. V. 8447. P. 84476E.
103. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Чупраков С.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904; *Antoshkin L.V., Botugina N.N., Bolbasova L.A., Emallev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Kudryashov A.V., 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 // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 291–299.
104. 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 атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 990–997; *Botugina N.N., Emallev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P.* Development of components for adaptive optics systems for Solar Telescopes // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 216–224.
105. *Botugina 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. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2504689.
106. *Lukin V.P., Fortes B.V.* The influence of wavefront dislocations on phase conjugation instability at thermal blooming compensation // Proc. OSA Tech. Proc. 1996. N 54. P. 185–190.
107. *Lukin V.P., Fortes B.V.* The influence of wavefront dislocations on phase conjugation instability at thermal blooming compensation // Pure Appl. Opt. 1997. V. 6. P. 103–116.
108. *Lukin V.P., Fortes B.V.* Estimation of turbulent degradation and required spatial resolution of adaptive systems // Proc. SPIE. 1998. V. 3494. P. 191–202.
109. *Konyaev P.A., Lukin V.P.* Computation algorithms for simulation in atmospheric optics // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 12. P. B107–B112.
110. *Lukin V.P., Fortes B.V.* Phase-correction of turbulent distortions of an optical wave propagating under strong intensity fluctuations // Appl. Opt. 2002. V. 41, N 27. P. 5616–5624.
111. *Humphres R.A., Bradley L.C., Herrmann J.* Sodium-Layer synthetic beacon for adaptive optics // Lincoln Lab. J. 1992. P. 45–66.
112. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А. Фазирование сегментированного зеркала телескопа // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 12. С. 1084–1088.
113. *Kanev F.Y., Lukin V.P., Makenova N.* Algorithm for phasing a segmented mirror // Proc. SPIE. 2004. V. 5490. P. 1556–1563.
114. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Реализация амплитудно-фазового управления пучком в двухзеркальной адаптивной системе // Оптика атмосф. и океана. 1991. Т. 4, № 12. С. 1273–1277.
115. *Kanev F.Y., Lukin V.P., Makenova N.* Amplitude-phase control of a laser beam in a two-mirror adaptive system // Proc. SPIE. 2004. V. 5572. P. 310–318.
116. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А., Моусей Е.И. Новый алгоритм формирования требуемого распределения амплитуды при управлении фазой. Повышение эффективности двухзеркальной адаптивной системы // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 368–374.

117. *Лукин В.П., Губкин С.М., Емалеев О.Н., Мутницкий Н.Г., Покасов В.В.* Экспериментальные исследования астроклиматических характеристик Приэльбрусья // *Астроном. журн.* 1983. Т. 60, вып. 4. С. 789–794.
118. *Лукин В.П.* Оптические измерения внешнего масштаба атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 4. С. 354–377.
119. *Лукин В.П.* Исследование особенностей структуры крупномасштабной атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 12. С. 1294–1304.
120. *Lukin V.P.* Optical measurements of the outer scale of the atmospheric turbulence // *Proc. OSA. Digest Ser.* 1992. V. 19. P. 75–89.
121. *Лукин В.П.* О сопоставлении моделей спектра атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1993. Т. 6, № 9. С. 628–631.
122. *Lukin V.P.* Comparison of the spectral model of atmospheric turbulence // *Proc. SPIE.* 1994. V. 2222. P. 527–535.
123. *Лукин В.П.* Модели атмосферы и адаптивные оптико-электронные системы // *Оптика атмосф. и океана.* 1997. Т. 10, № 4–5. С. 516–541.
124. *Лукин В.П., Носов Е.В., Фортес Б.В.* Эффективный внешний масштаб атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1997. Т. 10, № 2. С. 162–171.
125. *Antoshkin L.V., Goleneva N.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N.* Method of Calculating the Cross-Wind Speed at the Entrance Aperture of an Adaptive System Based on Shack–Hartmann Wavefront Sensor Measurements // *Autom. Honit. Meas. (Engl. Transl.).* 2015. V. 51, N 6. P. 587–592.
126. *Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V.* Effect of underlying terrain on jitter of astronomic images // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5489. P. 235–244.
127. *Лукин В.П., Носов В.В., Емалеев О.Н., Носов Е.В.* Semiempirical hypotheses of the turbulence theory in anisotropic boundary layer // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5743. P. 110–130.
128. *Носов В.В., Емалеев О.Н., Носов Е.В., Лукин В.П.* Полуклассическая теория анизотропной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 10. С. 845–862.
129. *Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры в турбулентной атмосфере // *Моделирование нелинейных процессов и систем.* М.: СТАНКИН, 2008. С. 157–160.
130. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Result measurements of A.M. Kolmogorov and A.M. Obukhov constants in the Kolmogorov–Obukhov law // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7296. P. 70–76.
131. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Decrease of the light wave fluctuations in the coherent turbulence // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7296. P. 77–81.
132. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Structural function of temperature fluctuations in coherent turbulence // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7296. P. 94–96.
133. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Torgaev A.V.* Astroclimate paramaters of the surface layer in the Sayan solar observatory // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7296. P. 87–93.
134. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Torgaev A.V.* Results measurements of the astroclimate characteristics of the astronomical telescopes in the mountains observatories // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7296. P. 82–86.
135. *Носов В.В., Григорьев В.М., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // *Солнечно-земная физика.* 2009. Вып. 14. С. 97–113.
136. *Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Когерентная турбулентность в горной долине // *Тр. II Всерос. научно-технической конф. «Проблемы военной геофизики и контроля природной среды».* 2012. СПб.: Изд-во военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Т. 1. С. 203–210.
137. *Носов В.В., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Уменьшение флуктуаций оптических волн в когерентной турбулентности // *Тр. II Всерос. научно-технической конф. «Проблемы военной геофизики и контроля природной среды».* 2012. СПб.: Изд-во военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Т. 1. С. 211–217.
138. *Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Атмосферная когерентная турбулентность // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759; *Nosov V.V., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Torgaev A.V.* Atmospheric coherent turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
139. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Турбулентные масштабы теории подобия Монина–Обухова в анизотропном пограничном слое // *Тез. докл. междунар. конф. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата».* М.: ГЕОС, 2013. С. 38–43.
140. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные составляющие турбулентности // *Тез. докл. междунар. конф. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата».* М.: ГЕОС, 2013. С. 43–47.
141. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 152 с.
142. *Lukin V.P., Nosov V.V., Kovadlo P.G., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Causes of non-Kolmogorov turbulence in the atmosphere // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 12. P. B163–B168.
143. *Ильясов С.П., Лукин В.П., Носов В.В., Одищев С.Л., Тиллаев Ю.А.* Изучение астроклимата региона юга Сибири и Средней Азии // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 10. С. 973–980.
144. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
145. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коныев П.А., Лукин В.П.* Трассовый дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // *Опт. и спектроскоп.* 2010. Т. 109, № 4. С. 683–689.
146. *Носов В.В., Торгаев А.В., Ботьбасова Л.А., Лукин В.П.* Способ одновременного измерения радиуса Фрида и эффективного внешнего масштаба турбулентности атмосферы // *Тез. докл. междунар. конф. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата».* М.: ГЕОС, 2013. С. 37–38.
147. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Измерение поперечного ветрового переноса атмосферной турбулентности на основе датчика Шэка–Гартмана // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2009. Т. 17, № 12. С. 129–133.
148. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Туев М.В.* Особенности опережающей коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка–Гартмана // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 11. С. 1042–1047; *Antoshkin L.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Tuv M.V.* Peculiarities of forestalling correction of the turbulent distortions according to measurements of the Shack–

- Hartmann sensor // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 3. P. 313–318.
149. *Лукин В.П., Емалеев О.Н.* Коррекция случайных угловых смещений оптических пучков // *Квант. электрон.* 1980. Т. 7, № 6. С. 1270–1279.
 150. *Лукин В.П., Матюхин В.Ф.* Адаптивная коррекция изображения // *Квант. электрон.* 1983. Т. 10, № 12. С. 2465–2473.
 151. *Лукин В.П., Матюхин В.Ф., Шилохвост Ю.П.* Специальное авторское свидетельство. № 217315. Приоритет от 28.05.1984 г.
 152. *Bolbasova L.A., Lukin V.P.* Laser guide stars and models of atmospheric turbulence // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6936. P. 123–129.
 153. *Bolbasova L.A., Goncharov A., Lukin V.* Field-oriented wavefront sensor for laser guide stars // *Adaptive Opt. for Industry and Medic.* Imperial College Press. London. UK. 2008. P. 495–501.
 154. *Большасова Л.А., Лукин В.П.* Модовый изопланатизм фазовых флуктуаций // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 12. С. 1070–1075.
 155. *Bonaccini D., Bolbasova L., Goncharov A., Lukin V.* AO with LGS and mesospheric layer sensing // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7015. P. 70152V.
 156. *Большасова Л.А., Лукин В.П., Носов В.В.* О дрожании изображения лазерной опорной звезды в моностатической схеме формирования // *Опт. и спектроскоп.* 2009. Т. 107, № 5. С. 830–838.
 157. *Bolbasova L.A., Lukin V.P., Nosov V.V.* Residual tip-tilt motion of LGS in monostatic scheme // *Proc. SPIE.* 2010. V. 7736. P. 77362Q-1–10.
 158. *Большасова Л.А., Лукин В.П.* Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. М.: Изд-во «Физико-математическая литература», 2012. 125 с.
 159. *Kopylov E.A., Lavrinov V.V., Lukin V.P., Selin A.A.* Methods of image correction formed on horizontal long paths // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10677. 106773R. DOI: 10.1117/12.2309327.
 160. *Антошкин Л.В., Борзилов А.Г.* Двухкоординатный пьезокерамический корректор углов наклона волнового фронта // Патент на полезную модель № 181166. Приоритет. 8.12.2017 г. Дата государственной регистрации 5.07.2018 г.
 161. *Goncharov A., Owner-Peterson M., Anderson T., Lukin V.P.* The effective outer scale estimation for Euro50 site // *Proc. SPIE.* 2002. V. 5026. P. 112–118.

V.P. Lukin, L.V. Antoshkin, L.A. Bolbasova, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, F.Yu. Kanev, P.A. Konyayev, E.A. Kopylov, V.V. Lavrinov, L.N. Lavrinova, N.A. Makenova, V.V. Nosov, E.V. Nosov, A.V. Tor-gaev. **The history of the development of adaptive optics at IAO SB RAS.**

The development of adaptive optics as an effective means of eliminating irregular distortions, which occur during light propagation through an inhomogeneous medium, using controlled optical elements is described. Many ideas developed in recent years have been suggested quite long ago, but only now, due to the creation of elemental base of optoelectronic systems and devices, they come into use in many fields of science and technology. The current status of adaptive optics systems in solar astronomy is considered; some aspects of their use in distortion correction in high-power laser systems are analyzed. The retrospective analysis of the related studies at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, is presented.

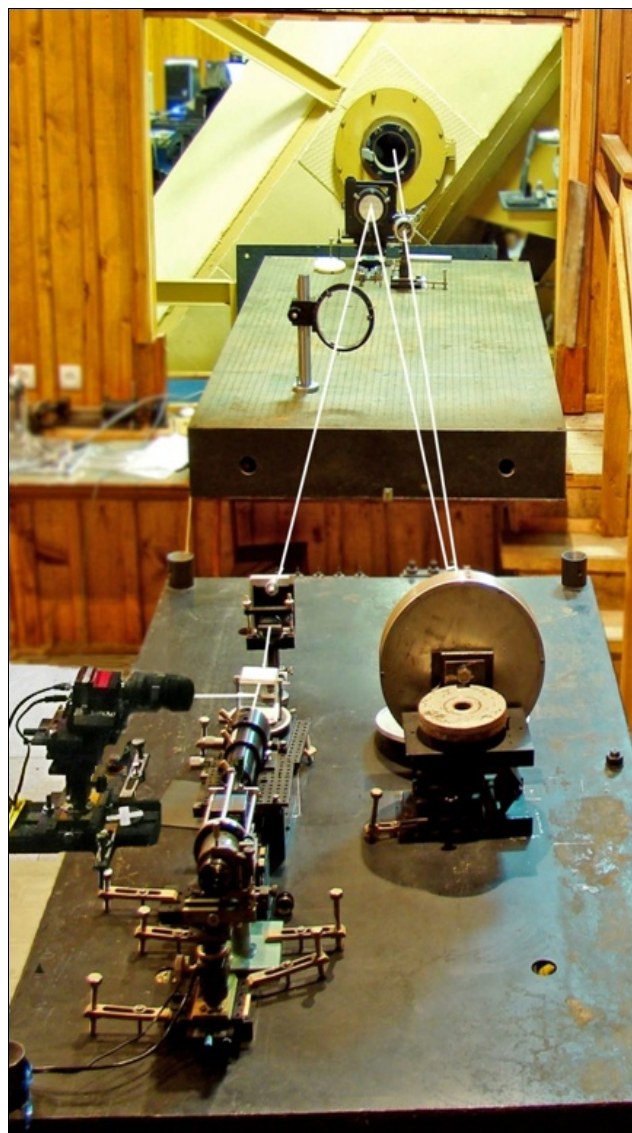


Рис. 4. Адаптивная система АНГАРА на БСВТ

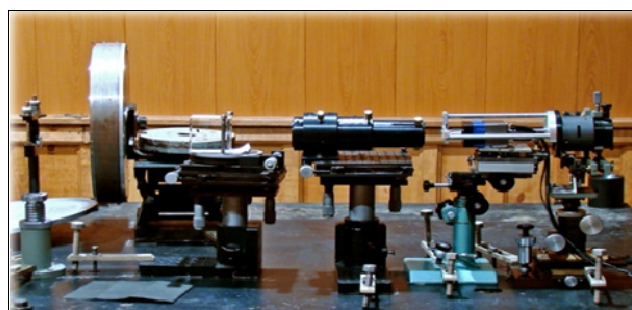


Рис. 5. Корреляционный датчик Шака-Гартмана системы коррекции