

Совместное применение техники адаптивной оптики и нелинейно-оптического обращения волнового фронта для компенсации турбулентных искажений при фокусировке лазерного излучения на удаленных объектах

В.П. Лукин¹, Н.Н. Ботыгина¹, П.А. Коняев¹, О.В. Кулагин², И.А. Горбунов²

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск,

² Институт прикладной оптики РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация

Рассмотрены подходы к построению макета системы фокусировки лазерного излучения на удаленные объекты с использованием как элементов адаптивной оптики, так и методов нелинейно-оптического обращения волнового фронта, обеспечивающих компенсацию турбулентных искажений. Предварительно выполнены численные расчеты, в которых в качестве численного метода решения скалярного волнового уравнения в частных производных 2-го порядка для комплексной амплитуды волнового поля лазерного пучка использовался метод расщепления (split-step method). Этот метод в сочетании с методами спектрально-фазовых Фурье-преобразований и статистических испытаний является самым эффективным на сегодняшний день способом получения надёжных количественных результатов при решении инженерных задач волновой оптики атмосферы. Получены количественные данные по влиянию турбулентных искажений на атмосферных трассах на основные параметры когерентных пучков излучения – фокусировку, эффективный средний радиус и относительную долю энергии пучка в его дифракционном пятне. Получены предварительные результаты работы макета, подтверждающие выводы теории.

Ключевые слова: адаптивная оптика, фазовое сопряжение, обращение волнового фронта, датчик волнового фронта.

Цитирование: Лукин, В.П. Совместное применение техники адаптивной оптики и нелинейно-оптического обращения волнового фронта для компенсации турбулентных искажений при фокусировке лазерного излучения на удаленных объектах / В.П. Лукин, Н.Н. Ботыгина, П.А. Коняев, О.В. Кулагин, И.А. Горбунов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 519-532. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-725.

Citation: Lukin VP, Botygina NN, Konyaev PA, Kulagin OV, Gorbunov IA. The combined use of adaptive optics and nonlinear optical wavefront reversal techniques to compensate for turbulent distortions when focusing laser radiation on distant objects. Computer Optics 2020; 44(4): 519-532. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-725.

Введение

В настоящее время решение задачи коррекции атмосферных искажений лазерного излучения ведется по нескольким независимым направлениям. Активно развиваются как методы фазового и амплитудно-фазового управления пучком в системах адаптивной оптики (АО), так и методы, основанные на нелинейно-оптическом преобразовании – обращении волнового фронта (ОВФ). Еще одним направлением является использование разного рода цифровых постдетекторных методов и методик, а также привлечение инженерных решений. Отмеченные здесь методы применяются как для наземных систем передачи энергии и информации лазерным пучком, так и для астрономических инструментов.

Во многом подходы к построению адаптивных систем являются общими, однако для применения на горизонтальных атмосферных трассах появляется своя специфика. Прежде всего, она связана с тем, что горизонтальная трасса по силе турбулентности намного превосходит астрономическую (вертикаль-

ную) трассу. На протяженных горизонтальных трассах, помимо фазовых искажений, обуславливающих эффекты дрожания и размытия излучения, появляются «сильные» флуктуации интенсивности излучения, что приводит к появлению эффектов мерцания, а также к проявлению неоднозначности в описании фазовых искажений оптической волны.

Поэтому при выборе схемы построения макета системы адаптивной фокусировки лазерного излучения нами предварительно был выполнен литературный обзор, охватывающий период от 1982 до 2019 гг.

Как известно, сравнительно новое научное направление – адаптивная оптика зародилось во второй половине XX века. Исходно методы фазовой коррекции и методы ОВФ развивались параллельно, взаимно дополняя друг друга. Основу теории адаптивных оптических систем заложили работы американских и советских ученых [1–7]. Именно в работах ученых этих стран впервые были определены потенциальные возможности и основные ограничения различных алгоритмов коррекции искажений [5–11]. В большинстве ранее разработанных оптических схем

коррекции осуществлялось исключительно фазовое управление излучением, при этом неоднократно также отмечались недостатки такого подхода. Поэтому считается необходимым развитие методов [12–14] амплитудно-фазового управления излучением. Следует отметить, что в последнее время опять появился интерес к анализу возможностей адаптивной коррекции в условиях «сильных» флуктуаций интенсивности [15–17].

Актуальность исследований возможностей явления ОВФ в нелинейно-оптической среде стала также очевидной еще в 70–80-х годах прошлого века. В ранних работах по данной тематике [5, 6] изучались условия проявления этого эффекта, исследовались возможности компенсации искажений в лазерных схемах с помощью ОВФ и пути снижения порога возникновения ОВФ, выполнялась оптимизация энергетика процесса. Тогда же были начаты исследования особенностей ОВФ-излучения, проходящего через пространственно-неоднородную среду [18–23], и теоретические оценки возможности фокусировки лазерного излучения в турбулентной атмосфере, а также с учетом ветрового сноса [20–23]. Наряду с теоретическими, проводились экспериментальные исследования по перечисленным выше направлениям, в частности, в [24] экспериментально было показано, что коэффициент отражения в ОВФ-зеркале, основанном на четырехволновом взаимодействии света с гиперзвуком и названном авторами «четырёхволновое гиперзвуковое обрабатывающее зеркало» (ЧГОЗ), может достигать более 10^5 .

Известно, что первые исследования явления ОВФ проводились безотносительно к атмосферной оптике, коррекция искажений лазерного излучения исследовалась в лабораторных экспериментах, т.е. в контролируемых условиях замкнутого помещения. Аберрации являлись статическими, они не изменялись в процессе управления волновым фронтом, а это означает полное отсутствие требований к быстродействию оптической системы. Значительно более сложным следует считать проведение коррекции [21, 22] искажений лазерного излучения в натурном эксперименте, где условия распространения зависят от распределения показателя преломления на трассе, которые изменяются с высокой частотой.

Специфика задачи по передаче лазерного излучения через неоднородную среду с помощью ОВФ стала учитываться более целенаправленно позднее. Одним из направлений исследования адаптивных систем, работающих с использованием ОВФ-зеркала, является изучение возможности фокусировки излучения на многобликовый объект, т.е. когда опорная волна формируется при отражении на мишени пучка в виде нескольких ярких точек. Возможность использования ЧГОЗ для управления волновым фронтом в численном эксперименте показана в работе [25], в которой также были сформулированы требования к

быстродействию системы. В частности, для выполнения фокусировки авторы в [26] предлагали проводить сканирование объекта. Результаты соответствующих лабораторных исследований приводятся в [26], причем для компенсации статических искажений использовалось одно гибкое зеркало, т.е. проводимая коррекция была чисто фазовой.

Еще один подход к решению проблемы, возникающей при фокусировке на многобликовый объект, представлен в [25–27]. Согласно разрабатываемой технологии пучок несколько раз должен проходить дистанцию от адаптивной системы (фактически, от зеркала ЧГОЗ) до мишени. За счет обращения волнового фронта осуществляется фокусировка излучения на наиболее яркую точку в плоскости наблюдения, при этом полагается, что система аналогична резонатору лазера. Теоретическое обоснование метода изложено в статье [28], в [29] представлены результаты численных исследований и данные лабораторных экспериментов.

В завершение обзора публикаций, посвященных коррекции искажений на основе ОВФ, необходимо указать, что амплитудно-фазовое управление возможно не только с использованием ЧГОЗ, но и при управлении фазой пучков в двух плоскостях. Так, в [14] коррекция искажений выполнялась с использованием двух транспарантов, задающих специальным образом фазовый профиль. Основные результаты теоретических исследований были проверены в лабораторном эксперименте. Отмеченная возможность была продемонстрирована и в работах при численном моделировании двухзеркальной адаптивной системы.

Проведенный обзор литературных источников позволяет заключить, что как методам фазового управления пучком, так и ОВФ-системам свойственен ряд ограничений. Так, при фазовом управлении принципиально невозможной является полная компенсация искажений на протяженных трассах, в условиях, когда амплитуда опорной волны начинает значительно отличаться от исходной формы [12, 13]. Еще одним ограничением является невозможность воспроизведения упругим зеркалом фазы при наличии сингулярностей в волновом фронте [13, 14]. Теоретически и в численном эксперименте преимущества гибридной системы ранее были показаны в публикации [30], а создание работающего макета явилось целью нашего проекта. Такой подход к построению системы адаптивной фокусировки лазерного излучения на удаленном объекте действительно является актуальным в связи с тем, что при этом удается объединить два параллельно развиваемых подхода.

1. Построение макета устройства

Первые совместные разработки вылились в ряд публикаций [28, 29], и, наконец, в 2016 году созрела идея прямого объединения нелинейно-оптического ОВФ с классической адаптивной коррекцией, это бы-

ло отражено в публикации [30]. Заложенные в этой публикации идеи позволили в 2018–2019 гг. постро-

ить макет системы адаптивной оптики для фокусировки лазерного излучения на удаленном объекте.

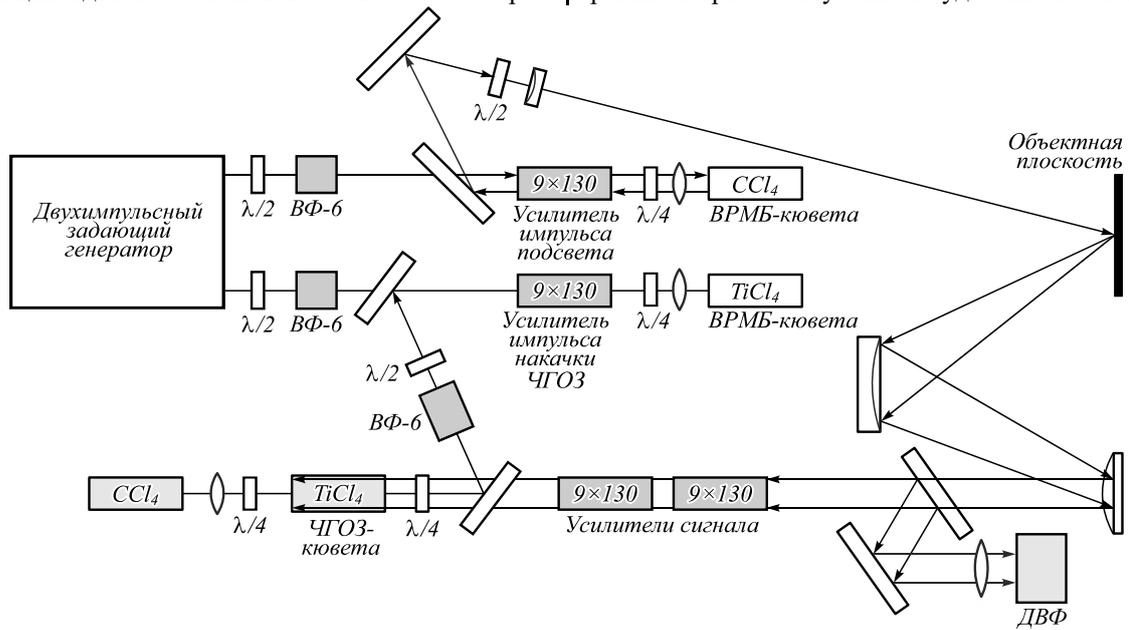


Рис. 1. Оптическая схема лазерной части макета экспериментальной установки

Для этого в ИПФ РАН была построена лазерная часть макета, включающая двухимпульсный лазер и систему приема и усиления сигнала на основе ЧГОЗ (см. рис.1). Такая схема приема входного оптического сигнала, наряду с обращением его волнового фронта, также обеспечивает его существенное усиление. Ключевой элемент схемы приема ЧГОЗ, т.е. метод ОВФ на основе четырехволнового взаимодействия света с гиперзвуком, был разработан и детально исследован на лабораторном уровне в ИПФ в 80-е годы (см. [5, 6, 24]). Этот способ приема, при котором импульс сигнальной волны смешивается и интерферирует со встречным импульсом волны накачки в нелинейно-оптической среде, возбуждая гиперзвуковую волну, на которой вторая накачка рассеивается в обратную волну, представляется наиболее оптимальным из всех нелинейно-оптических методов ОВФ, поскольку позволяет обеспечить предельно высокую чувствительность, сравнительно широкий угол видения, достаточно высокий динамический диапазон и предельно узкую полосу приема. Кроме того, этот способ имеет гораздо более высокое быстродействие ($\sim 10^{-9}$ с) по сравнению с другими нелинейно-оптическими способами и средствами обычной адаптивной оптики (быстродействие $\sim 10^{-3}$ с), что принципиально важно при работе на атмосферных трассах. Кроме того, при осуществлении данного взаимодействия в режиме абсолютной неустойчивости [5, 6, 24] возможно ОВФ с высоким коэффициентом отражения ($R \sim 10^6 - 10^7$), ограниченным только эффектами насыщения оптической накачки ЧГОЗ. В этом случае ЧГОЗ является по существу нелинейно-оптическим усилителем с высоким коэффициентом усиления. Поэтому важной особенностью является тот факт, что,

поскольку ЧГОЗ обеспечивает прием и усиление предельно слабых сигналов, макет может работать по слабоотражающим объектам.

Итак, на схеме лазерной части макета (рис. 1), представлены основные ее элементы. Здесь двухимпульсный задающий генератор (ЗГ) использован для формирования пары импульсов с управляемым временем задержки между ними для начального подсвета объектной плоскости и последующей накачки ЧГОЗ. Возможность управления временем задержки между импульсами необходима для синхронизации моментов поступления импульса сигнала (отраженный подсвет объекта) и импульса накачки в кювету ЧГОЗ.

Двухимпульсный ЗГ содержит диодно-накачиваемый непрерывный полупроводниковый лазер и пару накачиваемых диодами регенеративных усилителей. Четырехканальный сигнальный генератор использован для управления временем срабатывания регенеративных усилителей, он поддерживал джиттер между лазерными импульсами лучше, чем 1 нс. Поскольку расстояние до объекта может составлять величину до нескольких километров, задержка между импульсами должна регулироваться в интервале $0 \div 100$ мкс с наносекундной точностью, что и было обеспечено при создании ЗГ. Выходные импульсы имели энергию 5–10 мДж и длительность 25–30 нс.

За счет использования непрерывного полупроводникового лазера в основе ЗГ выходное излучение имеет узкую спектральную линию (одиночная продольная частотная мода) и сравнительно высокую кратковременную частотную стабильность при умеренном превышении порога генерации ЗГ. Оценки

спектральной ширины 3Г дали нам величину меньшую, чем $0,015 \text{ см}^{-1}$. Этот уровень вполне приемлем, поскольку не превышает спектральную ширину линии ВРМБ в используемых ВРМБ-средах. Поясним здесь, что аббревиатура ВРМБ означает вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна. Рассеянием Мандельштама–Бриллюэна называют рассеяние оптического излучения конденсированными средами в результате его взаимодействия с собственными упругими колебаниями этих сред.

Далее импульсы усиливались в двухпроходных усилителях мощности на основе активных элементов (АЭ) из Nd:YAG с размерами $\varnothing 9 \times 130 \text{ мм}$ (частота следования импульсов – до 100 Гц). Лазерная энергия импульсов может быть увеличена до 1 Дж на выходе из усилителей. Для обеспечения нужного для ЧГОЗ соотношения длин волн были использованы ВРМБ-кюветы, заполненные CCl_4 и TiCl_4 в качестве ВРМБ-зеркала после первого прохода через усилители импульса подсвета (верхний усилительный канал) и импульса накачки ЧГОЗ (нижний усилительный канал) соответственно. Лазерный сигнальный импульс (импульс подсвета, отражённый от объекта) принимался приемным объективом для дальнейшего усиления в предварительном сигнальном усилителе.

Общее усиление сигнала до кюветы ЧГОЗ (заполненной TiCl_4) должно превысить 2000 за проход для обеспечения максимальной входной чувствительности ЧГОЗ-приёмника-усилителя изображения, составляю-

щей 2–3 кванта на пиксель входного сигнала. Как результат, общее усиление сигнала после двух проходов сквозь усилители сигнала и отражения от ЧГОЗ-кюветы составляет до $10^{12} - 10^{14}$ при слабом входном сигнале. Промежуточные линзы, проецирующие изображение объекта через лазерные сигнальные усилители, не показаны здесь для упрощения рисунка. Пучок исходной накачки ЧГОЗ проходит сквозь кювету ЧГОЗ, затем фокусируется и отражается в ВРМБ-кювете, заполненной CCl_4 , при этом состоянии поляризации меняется из-за двойного прохождения сквозь четвертьволновую пластину. Этот отраженный пучок даёт вторую волну накачки ЧГОЗ. После вторичного прохождения сигнала через лазерные усилители обращенный и усиленный сигнал выводится в систему регистрации, в нашем случае на датчик волнового фронта (ДВФ 1, см. на рис. 2). Обращенный характер выходного сигнала по отношению к входному обеспечивает компенсацию фазовых искажений, вносимых в принимаемый входной сигнал при его прохождении по схеме лазерной части макета.

В это же время в ИОА СО РАН была построена фазовая часть макета системы адаптивной оптики, которая управляется тремя компьютерами (рис. 2). На рис. 2 использованы следующие обозначения: ТТЗ – корректор наклонов волнового фронта, или тип-тилт зеркало, ДЗ – деформируемое зеркало, ДВФ 1, ДВФ 2 – датчики волнового фронта.

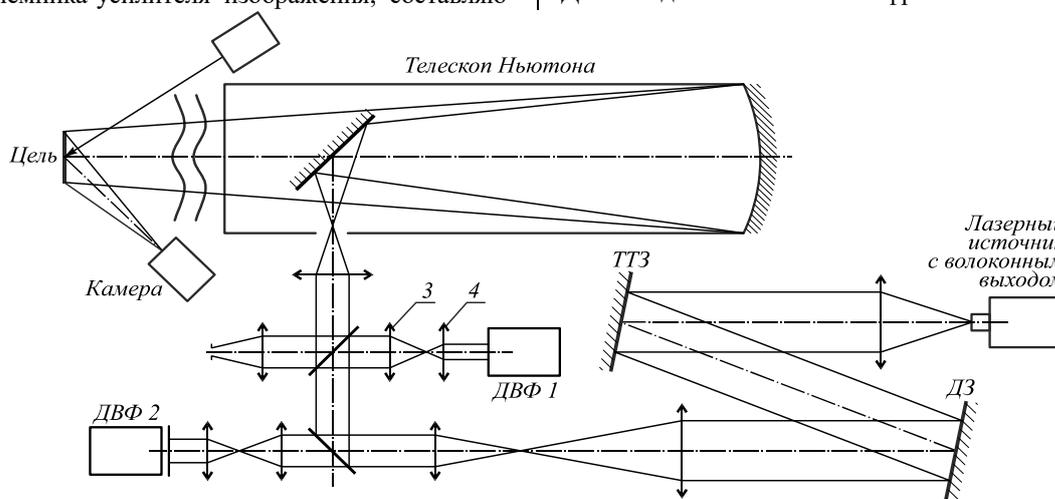


Рис. 2. Фазовая часть макета системы адаптивной оптики

Предполагалось, что при работе системы совместно с лазерным приемником фазовая часть макета по данным датчика волнового фронта будет обеспечивать измерения уровня интегрального значения (по трассе распространения) турбулентности, а также измерения скорости эволюции (скорость «ветра») турбулентных искажений. Используемые в макете компьютеры осуществляют расчет эффективности фокусировки лазерного пучка, а также в них выполняется моделирование работы приемника на основе ЧГОЗ как для одиночных импульсов, так и при усреднении (в частотном режиме).

При гибридном режиме работы всей системы фазовая часть макета обеспечивает с помощью первого датчика волнового фронта (ДВФ1) измерение фазовых искажений волнового фронта в реальном масштабе времени, далее измеренная фаза волны «навязывается» излучению дополнительного, включенного в состав макета, лазера с использованием двух активных оптических элементов: корректора наклонов и гибкого зеркала. В макете при этом фактически осуществляется работа [14] системы фазового сопряжения (ФС) с использованием сигнала от опорного источника. Кроме этого, в макет введен контур «ускоряющей» коррек-

ции, который имеет в составе второй датчик волнового фронта (ДВФ2). Данные фазовых измерений с этого второго датчика дают величину фазы отработанной системой двух активных зеркал, для этого данные с ДВФ2 постоянно сравниваются со значением фазы в первом датчике волнового фронта (ДВФ1).

Тестирование обеих составных частей макета происходило в своих институтах. Так, фазовая часть макета (рис. 3) прошла тестирование на атмосферной 110-метровой трассе в ИОА СО РАН.

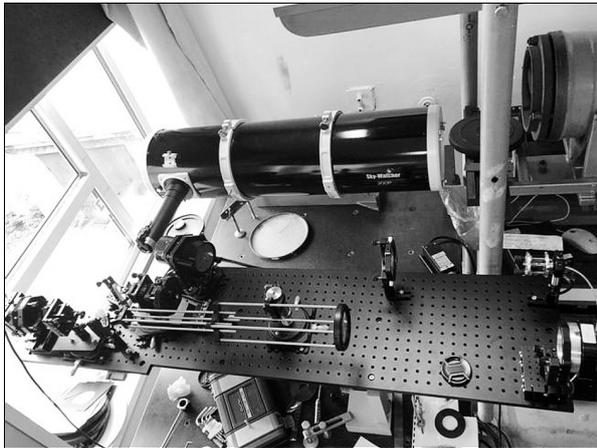


Рис. 3. Фото фазовой части макета при испытаниях в ИОА СО РАН. На снимке сверху виден телескоп Ньютона, ниже в пределах плиты чёрного цвета размещены остальные элементы схемы (рис. 2)

2. Моделирование распространения излучения в турбулентной атмосфере и работы системы адаптивного управления пучком излучения для фокусировки на удаленных объектах

Ранее в работах [11–14] на основе численных расчетов было показано, что фазово-сопряженные системы адаптивной оптики (АО) теряют свою эффективность в условиях, когда начинают проявляться существенные флуктуации интенсивности. Причем это имеет место как для оптических систем формирования изображения, так и при фокусировке лазерных пучков излучения. На рис. 4 показаны результаты расчетов поведения параметра Штреля SR как функции размера пучка при фокусировке излучения на протяженной трассе при различных режимах работы. Режимы работы системы задаются изменением уровня дисперсии флуктуаций интенсивности сигнала. По оси ординат отложена величина индекса мерцания [10, 11].

Этот результат был опубликован еще в 2002 году. В последующие годы были выполнены немногочисленные эксперименты [7, 23, 24] по приемо-передаче лазерного излучения в атмосфере на приземных трассах. Использовались два типа датчиков волнового фронта – классический датчик Шэка–Гартмана и корреляционный датчик Шэка–Гартмана. Сами датчики и все математическое обеспечение для них были сделаны в ИОА СО РАН. Эксперименты были выполнены на протяженных атмосферных трассах. По-

лученные в этих работах результаты подтверждают выводы работ [11–14].

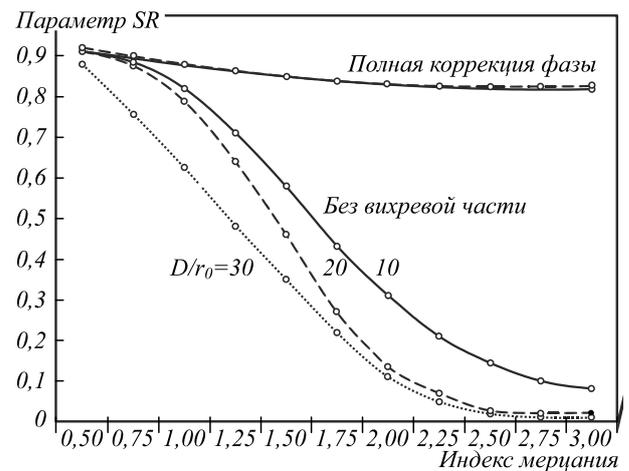


Рис. 4. Расчёт поведения параметра Штреля SR как функция размера пучка при фокусировке излучения на протяжённой трассе при различных режимах работы. Здесь D – диаметр апертуры телескопа, r_0 – радиус Фрида

Для сопоставления результатов проведенных экспериментов с макетом системы адаптивной фокусировки нами предварительно было выполнено численное моделирование. Моделирование распространения пучков в атмосфере и анализ коррекции искажений был проведён согласно схеме гибридной адаптивной системы, показанной на рис. 5 и 6. Нужно подчеркнуть, что указанное изображение действительно является схематичным, в частности, на рисунке не выделен задающий генератор, а приемник на основе ЧГОЗ и адаптивная система фазового управления показаны как блоки, без расшифровки отдельных элементов. В то же время на схеме демонстрируется ход всех пучков в системе и указаны все элементы, непосредственно влияющие на эффективность управления лазерным излучением. При построении схематической модели гибридной системы полагалось, что объект-цель освещается лазерным источником, генерирующим излучение с длиной волны 1,064 мкм. На схеме рис. 5 лазер подсветки обозначен цифрой 1, соответствующее излучение – цифрой 5, стрелки показывают направление его распространения. Пройдя расстояние Z (Z – это варьируемый параметр задачи) в турбулентной атмосфере, пучок отражается от рефлектора 2. Полученная в результате отражения расходящаяся волна 7 проходит то же самое расстояние Z в обратном направлении. При её падении на приемную апертуру телескопа 3 из волнового фронта вырезается область диаметром 20 см. В макете имеется адаптивная система 4, которая генерирует сигналы управления зеркалом, корректирующим волновой фронт формируемого системой излучения 6.

На рис. 5 указаны направления распространения волн в макете и представлены амплитудные распределения пучков в различных плоскостях. Так, на выходе телескопа 3 при выключенной обратной связи

(без управления) сигнал имеет амплитудное распределение вида 6.1. В результате атмосферных искажений профиль пучка 6 изменяется и в плоскости объекта распределение будет иметь форму, подобную представленной на врезке 6.2. При отражении пучка 6, имеющего распределение амплитуды 6.2, в результате формируется расходящаяся волна 7. Так как размер мишени-отражателя значительно меньше радиуса пучка 6 в плоскости мишени, в результате отражения из всего амплитудного распределения вырезается лишь его малая часть (7.1), в результате информация об искажениях теряется и волна 7 в плоскости мишени оказывается практически свободной от искажений. В то же время на врезке 6.2 можно видеть, что распределение амплитуды является спеклованным, т.е. в нем присутствуют области с равной нулю интенсивностью. Попадание такой области на мишень-отражатель будет приводить к полному замиранию сигнала, т.е. к отсутствию отраженной волны, к замыканию контура обратной связи и сбою в работе адаптивной системы. Влияние атмосферы на отраженное излучение 7 проявляется при его обратном распространении. В результате этого в плоскости апертуры адаптивной системы волна 7 приобретает характерные искажения вида 7.2.

Траектории пучков в самом телескопе и в адаптивной системе схематически показаны на рис. 6, где можно видеть, что дошедшее до оптической системы излучение 7 через систему зеркал и делителей попадает на блок 8, выполняющий обращение волнового фронта. В численном эксперименте это может быть использовано как идеальное устройство, без ограничений реализующее обращение, или некая приближенная к реальности модель ЧГОЗ. Полученная в результате обращения волна 6 проходит в обратном направлении весь тракт оптической системы, затем распространяется в атмосфере от телескопа к мишени.

В модели ЧГОЗ возможна также следующая траектория распространения излучения. Пройдя делитель 11, пучок 7 попадает в систему фазового сопряжения 10. В этом блоке реализуется идеальное (без ограничений) фазовое сопряжение или моделируется работа гибкого зеркала. После выполнения операции фазового сопряжения полученный пучок 6 через систему делителей и зеркал вновь направляется в телескоп и затем в атмосферу.

В двух рассмотренных вариантах адаптивная система не является гибридной. В первом случае мы добиваемся обращения волнового фронта, во втором – фазового сопряжения. Для сочетания двух методов управления необходимо добиться распространения излучения по следующей траектории: до ЧГОЗ (блок 8) пучок проходит так, как описано в первом варианте, а после обращения через делитель 11 поступает в систему фазового сопряжения 10. Особенностью этого является то, что в волновом фронте при

этом будут присутствовать шумы, обусловленные выполнением обращения в ЧГОЗ. Сформированное в системе фазового сопряжения излучение 6 через телескоп направляется в атмосферу.

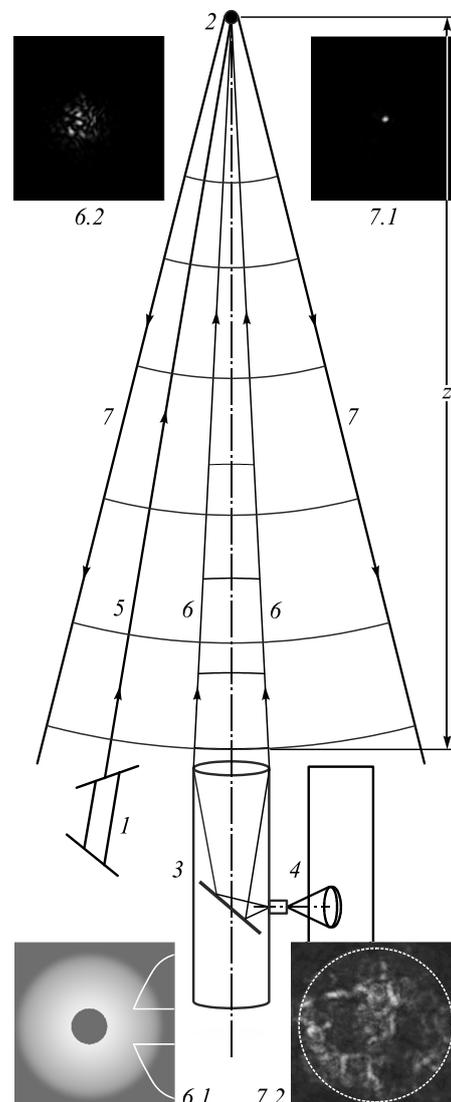


Рис. 5. Основные элементы оптической системы и сценарий численного эксперимента: 1 – лазер подсвета мишени, 2 – отражатель, 3 – телескоп, 4 – адаптивная система, Z – расстояние от телескопа до мишени (длина траектории). Пучки, формируемые в оптической системе: 5 – излучение подсвета мишени; 6 – корректируемое излучение (формируется в адаптивной системе и фокусируется телескопом), амплитудное распределение излучения: 6.1 – на выходной апертуре телескопа, 6.2 – на мишени; 7 – волна, отражённая отражателем, и её амплитудное распределение в плоскости отражателя (7.1) и в плоскости входной апертуры оптической системы (7.2)

Приведенное выше описание показывает, что для корректного моделирования работы гибридной адаптивной системы необходимо построение моделей распространения исходного лазерного пучка 5 от источника 1 к плоскости мишени-отражателя 2, распространения отраженной волны 7 от плоскости рефлектора до плоскости апертуры телескопа 3. Затем необ-

ходимо построить модель приемника на основе ЧГОЗ, в которую поступает излучение 7 и через которую замыкается обратная связь в гибридной системе. Следующая модель – это модель адаптивной системы фазового сопряжения, включающая датчик волнового фронта и зеркало. В результате её работы на выходе телескопа формируется пучок 6, диаметр которого равен 20 см. Его распространение необходимо моделировать уже с учетом фазовой и/или амплитудной модуляций волнового фронта.

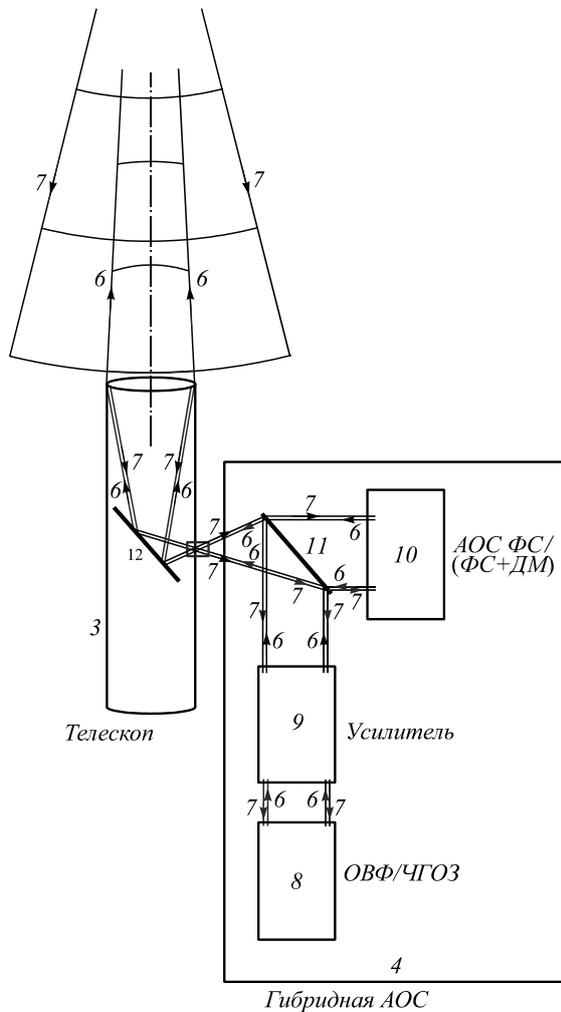


Рис. 6. Траектории пучков в телескопе и адаптивной системе: 3 – телескоп, 4 – полная адаптивная система, включающая систему фазового сопряжения и ЧГОЗ, 8 – блок ЧГОЗ, 9 – каскад усилителей, 10 – адаптивная система фазового сопряжения, 11 – полупрозрачная пластинка, 12 – плоское зеркало. Пучки, формируемые в оптической системе: 6 – корректируемое излучение (формируется в адаптивной системе или при ОВФ, фокусируется телескопом); 7 – опорная волна

3. Теоретическая оценка возможности коррекции искажений на основе фазового сопряжения сигнала от опорного источника

С использованием этой математической модели адаптивной системы были проведены численные исследования эффективности адаптивной коррекции

атмосферных искажений. Управление фазовым профилем (рис.5) проводилось для пучка 6 формируемым телескопом 3 на выходе адаптивной системы. Предварительно проводились аналитические расчеты, для этого использовалось диффузное аддитивное приближение для среднего радиуса когерентного пучка в случайно-неоднородной среде, хорошо апробированного ранее при решении задач оптики турбулентной атмосферы. А в качестве численного метода решения скалярного волнового уравнения в частных производных 2-го порядка для комплексной амплитуды волнового поля лазерного пучка использован метод расщепления (split-step method). Этот метод в сочетании с методами спектрально-фазовых Фурье-преобразований и статистических испытаний [14] является самым эффективным на сегодняшний день способом получения надёжных количественных результатов при решении инженерных задач волновой оптики атмосферы. Расчеты проводились на большой вычислительной сетке, а для ускорения были применены методы параллельных вычислений. Для характеристики качества излучения в плоскости наблюдения использовались такие параметры, как критерий фокусировки, представляющий собой долю энергии в пределах дифракционного размера пучка (для вакуума), и интенсивность на оси оптической системы. Также рассчитываются значения индекса мерцаний интенсивности, позволяющие оценить вариации амплитудного распределения излучения, наблюдаемые в процессе управления. Полученные данные усреднялись по тысяче реализаций случайного распределения показателя преломления по трассе распространения.

Варьируемыми параметрами задачи являлись:

- длина трассы (исследования проводились на трассах протяженностью 400, 600 и 1000 метров);
- интенсивность турбулентности, задаваемая отношением D/r_0 (D – диаметр апертуры телескопа, r_0 – радиус Фрида);
- положение лазера, используемого для освещения отражателя. Лазер устанавливался на расстоянии от оптической оси системы, равном радиусу телескопа, и непосредственно на оси системы.

Значения критерия фокусировки [12], регистрируемые в процессе управления, представлены на рис. 7а–в. Здесь же помещены данные, наблюдаемые при разомкнутой обратной связи (кривые 4), т.е. в случае, когда управление отсутствует. В оптической системе лазер-осветитель был сдвинут от оптической оси на расстояние, равное радиусу телескопа, изменение интенсивности турбулентности проводилось во всем диапазоне, допускаемом характеристиками численной модели.

Графики показывают, что обращение волнового фронта, при выполнении которого учитываются только ограничения, вносимые конечным размером апертуры источника излучения, позволяет получить

значения критерия, близкие к величине этого параметра, наблюдаем в среде без искажений. На рис. 7 это проявляется в том, что кривые 1, иллюстрирующие использование ОВФ, на всех графиках проходят на уровне, близком к единице, и отклонение составляет не более 10%.

При использовании для коррекции фазового сопряжения эффективность работы адаптивной систе-

мы несколько уменьшается (кривые 2 на рис. 7), но результаты остаются значительно более высокими, чем в случае, когда управление отключено. Например, на трассе длиной 400 м при $D/r_0 = 8,1$ (турбулентность высокой интенсивности) в результате управления среднее значение критерия увеличивается от 0,31 до 0,70, т.е. более чем в 2 раза, на трассе 1000 м – от 0,07 до 0,65, т.е. в 9,3 раза.

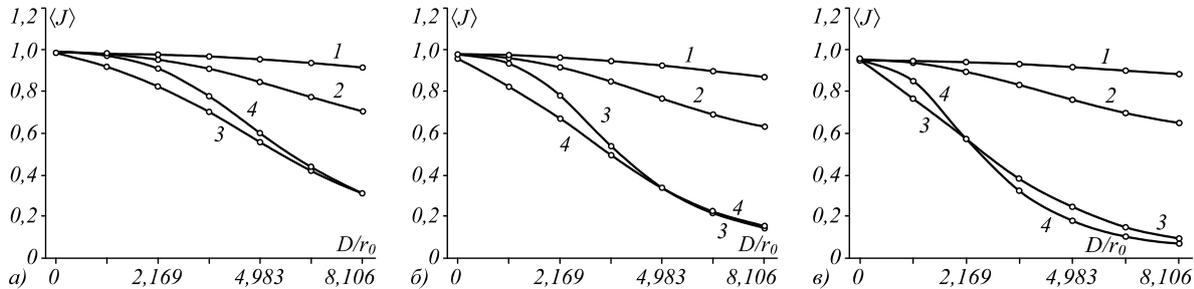


Рис. 7. Значения критерия фокусировки ($\langle J \rangle$), полученные в результате коррекции турбулентных искажений на трассах 400 м (а), 600 м (б) и 1000 м (в). Лазер подсвета смещён относительно оси адаптивной системы на 10 см.

Кривые: 1 – управление на основе ОВФ, 2 – на основе фазового сопряжения без учёта ограничений, вносимых элементами адаптивной системы, 3 – фазовое сопряжение (ФС) с учётом ограничений, вносимых датчиком и зеркалом, 4 – результаты, полученные без управления.

Длина волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм, диаметр апертуры источника излучения – 20 см

Учет ограничений, вносимых такими элементами адаптивной системы, как датчик волнового фронта Шэка–Гартмана и гибкое зеркало, значительно снижает качество коррекции (кривые 3 на рис. 7). Значения критерия, регистрируемые в этом случае, очень мало отличаются от результатов, наблюдаемых в отсутствие управления. По-видимому, указанную особенность можно объяснить не только тем, что недостаточное разрешение датчика и малое количество актюаторов зеркала приводят к отклонениям фазы, задаваемой в адаптивной системе от фазы опорного

сигнала и, как следствие, к уменьшению значений критерия. Также можно предположить, что энергия излучения в плоскости наблюдения (т.е. критерий фокусировки) измеряется в апертуре с большим радиусом, что не позволяет с высокой точностью отслеживать все изменения этого параметра.

Лучшее представление об эффективности адаптивного управления можно получить с использованием средней интенсивности корректируемого пучка, измеряемой на оптической оси системы (рис. 8).

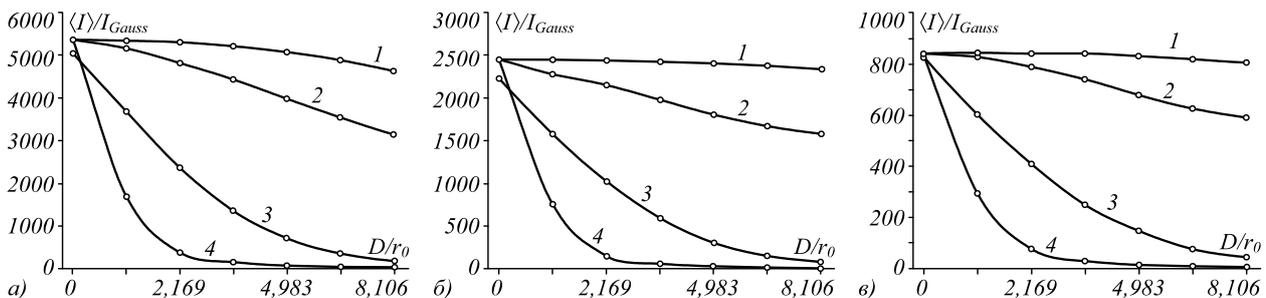


Рис. 8. Нормированная средняя интенсивность пучка, полученная в результате адаптивного управления. Длина трассы – 400 (фрагмент а), 600 (фрагмент б) и 1000 м (фрагмент в). Параметры задачи и номера кривых соответствуют рис. 7

Характерные особенности изменения интенсивности при управлении (рис. 8) остаются теми же, что и для критерия фокусировки. ОВФ позволяет добиться значений интенсивности, близких к дифракционно-ограниченной величине этого параметра (кривые 1). При фазовом сопряжении качество пучка в плоскости коррекции несколько снижается, но остаётся значительно более высоким по сравнению со случаем, когда управление отключено. Отметим, что аналогич-

ные выводы можно сделать и при анализе графиков, на которых представлен критерий фокусировки.

Отличие заключается в том, что величина рассматриваемого параметра увеличивается в результате коррекции. Например, в 6,3 раза достигается увеличение средней интенсивности на трассе длиной 400 м при $D/r_0 = 2,17$ (сравнение кривых 3 и 4, умеренная интенсивность турбулентности) и в 7,5 раз на этой же трассе при $D/r_0 = 8,1$ (высокая интенсивность турбулентности). На трассах большей длины адаптивное

управление также позволяет значительно увеличить величину средней интенсивности (рис. 8 б и в).

Еще одной особенностью, проявляющейся для средней интенсивности в процессе коррекции, является существенное уменьшение флуктуации этой величины, наблюдаемое при управлении пучком. Приведенные на рис.9 зависимости индекса мерцания от интенсивности турбулентных искажений показывают, что как при ОВФ, так и при фазовом сопряжении во всех трех случаях (т.е. для трасс длиной 400, 600 и 1000 м) индекс очень незначительно отличается от нуля (кривые 1 и 2 на рис. 9). Значения индекса увеличиваются, если в модели учитываются ограничения, вносимые датчиком и зеркалом (кривые 3). Но и в этих расчетах величина индекса мерцания значи-

тельно меньше, чем при отключенном управлении (вывод следует из сравнения кривых 3 и 4 на рис. 9).

Во всех численных экспериментах, результаты которых приведены в настоящем параграфе, лазер-осветитель, с помощью которого замыкалась обратная связь, был установлен на расстоянии 10 см от оптической оси системы, т.е. на расстоянии, равном радиусу телескопа. Сделано это было потому, что какое-либо смещение будет присутствовать и в реальной установке. Для изучения того, насколько указанное смещение влияет на качество коррекции искажений, нами была проведена еще одна серия численных экспериментов, в которых данный источник устанавливался на оси системы.

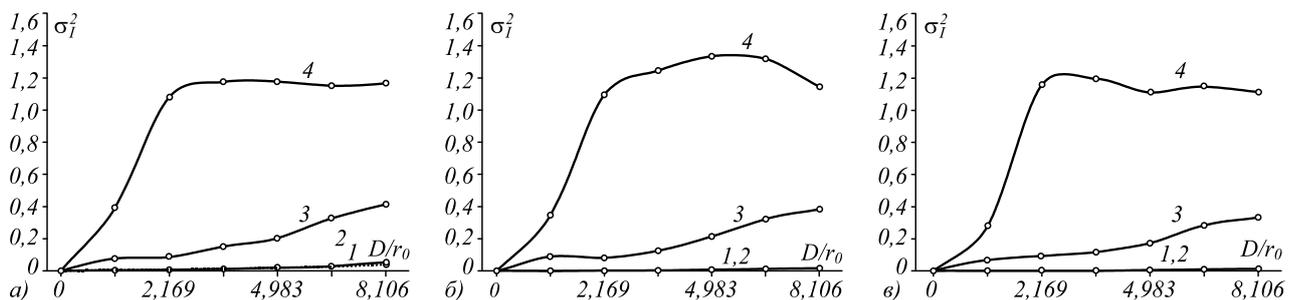


Рис. 9. Флуктуации интенсивности излучения, регистрируемые в процессе адаптивного управления. Кривые: 1 – управление на основе ОВФ, 2 – на основе применения метода фазового сопряжения (ФС) без учёта ограничений, вносимых элементами адаптивной системы, 3 – фазовое сопряжение с учетом ограничений, вносимых датчиком и зеркалом, 4 – результаты, полученные без управления. Длина трассы – 400 (а), 600 (б) и 1000 (в). Длина волны излучения $\lambda=1,064$ мкм, диаметр апертуры источника излучения – 20 см

Результаты регистрации критерия фокусировки и интенсивности на оси системы без смещения осветителя приводятся на рис. 10 и 11. Можем видеть, что представленные графики практически не отличаются от рис. 7 и 8, что означает, что подобный сдвиг лазерного источника не влияет на эффективность компенсации искажений в адаптивной системе.

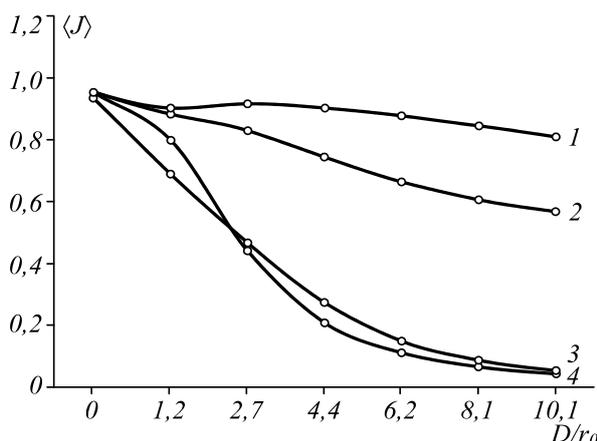


Рис. 10. Значения критерия фокусировки, полученные при управлении на трассе 1000 м. Осветитель помещён на ось оптической системы. График и номера кривых аналогичны графику, помещённому на рис. 7в

В целом, по результатам параграфа мы можем заключить, что даже с учетом ограничений, вносимых

датчиком волнового фронта и упругим зеркалом, фазовое управление пучком в адаптивной системе позволяет от 2 до 9 раз увеличить среднюю интенсивность излучения на оси адаптивной системы и уменьшить флуктуации этого параметра. В то же время при управлении практически невозможно добиться увеличения критерия фокусировки, характеризующего концентрацию энергии в плоскости наблюдения. По-видимому, данная особенность проявляется из-за того, что слишком большим является радиус апертуры устройства регистрации, в пределах которой измеряется этот критерий.

Смещение лазера, освещающего бликовую точку на мишени, на 10 см от оси оптической системы не приводит к изменению характерных особенностей процесса адаптивного управления пучком.

4. Экспериментальные работы на базе «Безводное» (июль–ноябрь 2019 г.)

Следует отметить, что в последнее время в мире увеличилось число исследований [15–17, 31–34], связанных с применением систем адаптивной оптики в условиях проявления «сильных» флуктуаций интенсивности. В этой связи появилась дополнительная мотивация по проведению экспериментальной проверки возможностей макета. Для проведения проверки работоспособности макета в условиях реальной

атмосферы была использована атмосферная трасса на экспериментальной базе ИПФ РАН. На этой базе имеется открытая горизонтальная атмосферная трасса, позволяющая проводить оптические наблюдения, протяженностью от 160 м до 1150 м. Предварительно эта трасса была исследована с точки зрения проявления на ней атмосферных эффектов. Для этого была разработана специальная методика трассовых измерений характеристик турбулентной атмосферы на экспериментальной базе «Безводное», исходя из целей и задач обеспечения работы макета системы.

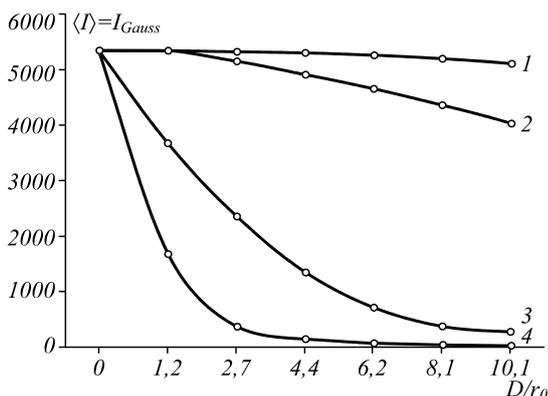


Рис. 11. Значения интенсивности на оси оптической системы, полученные при управлении на трассе 1000 м. Осветитель помещён на ось оптической системы. График и номера кривых аналогичны графику, помещённому на рис. 7в

В задачи входило изучение условий на атмосферной трассе ИПФ РАН, предназначенной для выполнения экспериментов по нелинейно-оптической адаптивной фокусировке лазерного излучения, а именно, определение основных статистических характеристик атмосферной турбулентности и метеорологических условий на экспериментальной базе ИПФ РАН:

- определение средних значений структурной характеристики C_n^2 флуктуаций оптического показателя преломления атмосферной турбулентности на различных участках трассы распространения излучения,
- определение средней горизонтальной скорости ветра, температуры и влажности воздуха на трассе,
- определение метеорологической дальности видимости.

При проведении измерений использовались следующие приборы:

- ультразвуковой автономный метеорологический комплекс АМК-03 для определения статистических характеристик атмосферной турбулентности и метеорологических условий,
- портативный измеритель метеорологической дальности видимости ИБ68, обеспечивающий измерение метеорологической дальности видимости в диапазоне от 0,2 до 20 км со среднеквадратической погрешностью измерения не более 25 %.

Измерения метеорологических параметров и статистических характеристик атмосферной турбулент-

ности проводились [35] ультразвуковым комплексом АМК-03. К основным регистрируемым и рассчитываемым характеристикам относятся: температура воздуха $\langle T \rangle$ (°C), компоненты вектора скорости ветра v (м/с) и направление горизонтального вектора скорости D (град), относительная влажность воздуха r (%); атмосферное давление P (мм рт. ст.); структурные характеристики флуктуаций температуры C_T^2 (град² см^{-2/3}) и оптического показателя преломления C_n^2 (см^{-2/3}), продольной составляющей скорости ветра C_V^2 ((м/с)² см^{-2/3}). Во всех точках трассовых измерений с комплексом АМК-03 должно проводиться осреднение за две минуты (120 с) при частоте снятия отсчетов измерений $f = 10$ Гц.

Также проводились измерения прозрачности атмосферы с использованием измерителя метеорологической дальности видимости ИБ68. В двух наиболее важных начальных точках у контейнера измерения повторялись, проводились 3 сеанса измерений в каждой точке. В остальных точках – 2–3 серии измерений. Фактически измерения были проведены в шести точках на выбранных характерных участках трассы. Высота этих точек измерения была выбрана равной высоте распространения излучения над землей, так чтобы измерительный датчик комплекса АМК-03 находился вблизи оптического пути лазерного излучения. В первых двух точках высота измерений и трассы над подстилающей поверхностью составила 3,8 м, во всех последующих – 2,5 м.

Результаты измерений структурной характеристики флуктуаций показателя преломления C_n^2 за 19 сентября 2019 г. в выбранных точках приведены на рис. 12. Видно, что наибольших значений структурная характеристика C_n^2 достигала на открытых участках трассы. Максимальное зарегистрированное по трассе значение $C_n^2 = 4,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$.

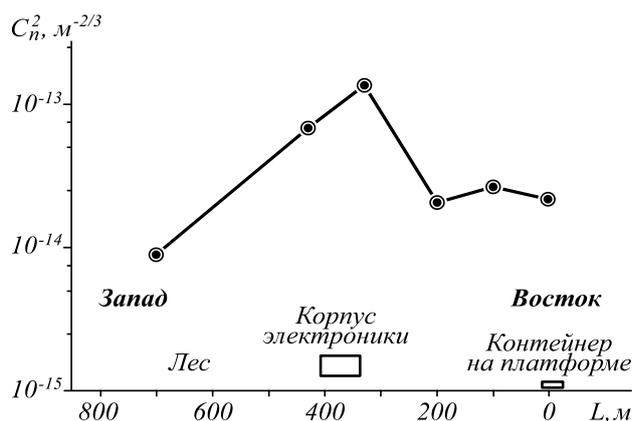


Рис. 12. Изменение по трассе среднего значения структурной характеристики флуктуаций показателя преломления

В том числе возле платформы с контейнером зарегистрировано среднее значение $\langle C_n^2 \rangle = 3,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, что согласуется с контрольными серийными измере-

ниями в этой точке, когда значение C_n^2 изменялось от $8,49 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ до $6,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Это умеренный, обычно наблюдаемый средний уровень значений C_n^2 для интенсивности атмосферной турбулентности. Интенсивность турбулентности ожидаемо снижалась на участках трассы, проходящих через лесные массивы. Так, на последних 500 м трассы в лесу измеренная интенсивность турбулентности упала до среднего уровня $1,9 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$.

По зарегистрированным данным с помощью измерителя 1Б68 метеорологической дальности видимости 18 сентября 2019 г. прозрачность атмосферы менялась в пределах 10,1 км до 12,7 км. Дальность видимости зависела от времени суток, увеличиваясь в вечернее время.

5. Результаты испытаний макета в атмосфере

Задачей этих экспериментальных исследований было испытание возможностей нелинейно-оптического когерентного приема оптических сигналов и фокусировки подсвета в комбинации с адаптивной системой, а также отработка методик по адаптивному концентрированию квазинепрерывного излучения. Для этого были состыкованы составные части макета, включающие лазерный приемник (рис. 1) и систему фазовой адаптивной коррекции (рис. 2). Схема лазерного приемника-усилителя входного сигнала, созданного в ИПФ РАН, представлена на рис. 1.

Макет системы устанавливался на трассах различной протяженности. На удалении от макета была размещена целевая зона, где был установлен анализатор флуктуаций параметров лазерного излучения. Камера анализатора была соединена с 2-импульсным лазером на длине волны 1,064 мкм посредством волоконной линии связи. Работа такого объединенного макета системы АО выполнялась согласно разработанной методике. При этом объектом испытаний являлся совокупный макет, обеспечивающий выполнение экспериментов по нелинейно-оптической адаптивной фокусировке лазерного излучения. Назначение этого макета – выполнение как лабораторных, так и натуральных экспериментов по адаптивной фокусировке лазерного излучения при частоте следования парных лазерных импульсов от единиц до сотни Гц.

Задачами испытаний на базе ИОФ РАН в части фазовой системы АО являлись доказательства возможности обеспечения работы датчиков волнового фронта с использованием сигнала, отраженного от удаленной малоразмерной цели и усиленного лазерным приемником, работающим в частотно-импульсном режиме, а также обеспечение адаптивного концентрирования квазинепрерывного излучения.

Работа макета при этом проводилась в следующем порядке. Первый импульс из последовательности парных импульсов, генерируемых лазером на длине волны 1,064 мкм, представляет собой сигнальный пучок, т.е. пучок подсвета, который фокусируется в

объектной плоскости на диффузном отражателе с известной диаграммой отражения, либо на сферическом отражателе. При этом оптическое пятно при исходной фокусировке имеет размер, который можно рассчитать по известным формулам. Отраженное от цели (это непроектная линза диаметром в 1 дюйм) излучение проходит по трассе в обратном направлении и, собранное приемно-передающим телескопом, попадает на вход в лазерный приемник-усилитель сигнала, где усиливается и преобразуется, в результате ОВФ-преобразования излучение приобретает обращенную фазу. Далее это усиленное излучение (см. рис.2) выходит из усилительного канала и после прохождения через поворотное дихроичное зеркало попадает на вход первого датчика волнового фронта (ДВФ1). Регулировка уровня сигнала на длине волны 1,064 мкм, подаваемого на вход ДВФ1, осуществляется путем установки ослабляющих фильтров. Как показали предварительные исследования, выполненные в период сентября–ноября 2019 г., принимаемый сигнал от ОВФ-преобразователя обеспечивает устойчивую работу ДВФ1, а также получение данных с компьютера для управления двумя активными элементами – ТТЗ и ДЗ. В макете использована камера, работающая на частоте не менее 300 Гц.

Вторая задача, решаемая макетом, – это обеспечение адаптивного концентрирования квазинепрерывного лазерного излучения с использованием дополнительного непрерывного лазерного излучения на длине волны 0,532 мкм и двух управляемых элементов ТТЗ и ДЗ. В качестве элемента ДЗ схемы (рис. 2) использовано зеркало [36] отечественного производства. Зеркало имеет 59 актюаторов, обеспечивающих управление фазовым профилем лазерного излучения, в пределах круга диаметром 56 мм. Рабочая полоса частот обработки превышала 200 Гц. Как показали испытания фазовой системы АО, в результате работы ДВФ2, ТТЗ и ДЗ имели место стабилизация положения лазерного пучка, уменьшение эффективного размера пучка непрерывного лазера в зоне цели, а также увеличение плотности мощности излучения на оси.

Контроль за обеспечением фокусировки непрерывного лазерного излучения на удаленной цели осуществлялся с помощью специальной камеры, соединенной с лазерным передатчиком волоконной линией связи. Получаемые данные при этом оказались сопоставимыми с результатами численных расчетов, выполняемых по данным измерений параметров атмосферы. Эксперименты проводились на трассах протяженностью от 360 м до 1150 м на экспериментальной базе ИПФ РАН «Безводное» в период с 04.10.2019 по 10.10.2019. При проведении измерений с помощью макета, выполняемых в различных атмосферных условиях, предварительно измерялись величины уровня атмосферной турбулентности, скорости ветра и условие по прозрачности атмосферы.

Заключение

Сформулируем следующие основные выводы:

- Получены количественные данные по влиянию турбулентных искажений когерентных пучков на атмосферных трассах на основные параметры формируемого через турбулентную среду лазерного пучка – критерия фокусировки, эффективно-го среднего радиуса и относительной доли энергии пучка в его дифракционном пятне.

- Приводятся оценки сравнительной эффективности метода ОВФ для компенсации амплитудно-фазовых искажений лазерных пучков в случайно-неоднородной среде. Проведены оценки эффективности метода фазового сопряжения опорной волны от бакена для компенсации фазовых искажений волнового фронта и адаптивной коррекции. Показано, что для трасс не более 1000 м метод ОВФ по сравнению с методом ФС обеспечивает концентрацию энергии от 6 до 8 раз выше.

- Проведённые теоретические исследования и полученные на основе численных расчётов количественные результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности применения методов адаптивной оптики в сочетании с ОВФ-приемником на основе ЧГОЗ для компенсации турбулентных искажений лазерных пучков на атмосферных трассах.

- Предложена и реализована схема экспериментальной установки адаптивной оптической системы, обеспечивающей воспроизведение обращённого в нелинейной среде волнового фронта излучения, полученного от отражающей цели, и фокусировку сформированного лазерного пучка на цели. При этом параметры оптических элементов схемы должны быть рассчитаны, исходя из ожидаемых атмосферных искажений волнового фронта, полученных при предварительном исследовании атмосферных трасс.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ИОА СО РАН: ведущего инженера А.Г. Борзилова и к.ф.-м.н. А.В. Торгаева за проведение измерений атмосферных параметров, к.ф.-м.н. В.В. Лавринова за разработку программы управления датчиком волнового фронта, д.ф.-м.н. Канева Ф.Ю. за помощь при написании обзора и при оформлении результатов расчетов в виде рисунков, инженеров Е.Л. Соина и А.А. Селина за помощь при проведении работ. Выражаем особую признательность и благодарность конструктору А.Н. Грицуте и ведущему инженеру О.Н. Емалееву за участие в разработке макета. Авторы благодарны также сотрудникам ИПФ РАН: программисту 1 категории С.О. Кулагину и инженеру-исследователю И.О. Кула-

гину за помощь при создании и запуске в работу лазерной части макета.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственным заданиям ИОА СО РАН и ИПФ РАН.

Литература

1. **Babcock, H.W.** The possibility of compensating astronomical seeing / H.W. Babcock // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1953. – Vol. 65. – P. 229-236.
2. **Линник, В.П.** О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображение звезды / В.П. Линник // Оптика и спектроскопия. – 1957. – Т. 25, № 4. – P. 401-402.
3. **Fried, D.L.** Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures / D.L. Fried // Journal of the Optical Society of America. – 1966. – Vol. 56. – P. 1372-1379.
4. **Лукин, В.П.** Атмосферная адаптивная оптика / В.П. Лукин. – Новосибирск: Наука, 1986. – 248 с.
5. **Зельдович, Б.Я.** Обращение волнового фронта / Б.Я. Зельдович, Н.Ф. Пилипецкий. – М: Наука, 1985. – 248 с.
6. **Беспалов, В.И.** Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы / В.И. Беспалов, Г.А. Пасманик. – М: Наука, 1986. – 134 с.
7. **Greenwood, D.** Special issue on adaptive optics / D. Greenwood // Lincoln Laboratory Journal. – 1992. – Vol. 1. – P. 3-170.
8. **Buffington, A.** Correction of atmospheric distortion with an image-sharpening telescope / A. Buffington, F.S. Crawford, R.A. Muller, A.J. Schwemin, R.G. Smits // Journal of the Optical Society of America. – 1977. – Vol. 67, Issue 3. – P. 298-303.
9. **Cathey, W.T.** Compensation for atmospheric phase effects at 10.6 micro / W.T. Cathey, C.L. Hayes, W.C. Davis, V.F. Pizzurro // Applied Optics. – 1970. – Vol. 9, Issue 3. – P. 701-707.
10. **Лукин, В.П.** Принцип взаимности и адаптивное управление параметрами оптического излучения / В.П. Лукин, М.И. Чарноцкий // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9, № 5. – С. 952-958.
11. **Лукин, В.П.** Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере / В.П. Лукин, Б.В. Фортеc. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. – 212 с.
12. **Lukin, V.P.** Potential capabilities of adaptive-optical systems in the atmosphere / V.P. Lukin, B.V. Fortes, F.Yu. Kanev, P.A. Konyaev // Journal of the Optical Society of America A. – 1994. – Vol. 11, Issue 2. – P. 903-907.
13. **Lukin, V.P.** Phase-correction of turbulent distortions of an optical wave propagating under conditions of strong intensity fluctuations / V.P. Lukin, B.V. Fortes // Applied Optics. – 2002. – Vol. 41, Issue 27. – P. 5616-5624.
14. **Лукин, В.П.** Фазовое и амплитудно-фазовое управление лазерным пучком при распространении его в атмосфере / В.П. Лукин, Ф.Ю. Канев, В.А. Сенников, Н.А. Макенова, В.А. Тартаковский, П.А. Коняев // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 9. – С. 825-832.
15. **Guthery, C.E.** Theory and design of a hybrid wave-front sensor for adaptive optics / C.E. Guthery, M. Hart // Imaging and Applied Optics 2019. OSA Technical Digest (Optical Society of America. 2019). – 2019. – PTu3C.4.

16. **Vorontsov, M.** Overview of long-range (149 km) laser beam propagation and atmospheric sensing experiments / M. Vorontsov // *Imaging and Applied Optics 2019. OSA Technical Digest (Optical Society of America. 2019).* – 2019. – JW2A.36.
17. **Charnotskii, M.** Fifty years of strong scintillation theory / M. Charnotskii // *Imaging and Applied Optics 2019. OSA Technical Digest (Optical Society of America. 2019).* – 2019. – PM1C.1.
18. **Саичев, А.И.** Отражение от зеркала, обращающего волновой фронт, с учётом обратного рассеяния в неоднородной среде / А.И. Саичев // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* – 1981. – Т. 24. – С. 1165-1167.
19. **Саичев, А.И.** Эффект компенсации обращающим волновой фронт искажений зеркалом волны, обусловленных рассеянием в неоднородной среде / А.И. Саичев // *Известия АН СССР. Радиотехника и электроника.* – 1982. – Т. 27. – С. 1601-1608.
20. **Малахов, А.И.** О средней интенсивности волны, отраженной от зеркала ОВФ в турбулентной среде / А.И. Малахов, А.В. Половинкин, А.И. Саичев // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* – 1983. – Т. 26, № 5. – С. 579-586.
21. **Ахунов, Х.Г.** Об эффективности фокусировки обращенного волнового поля в турбулентной атмосфере при наличии ветра / Х.Г. Ахунов, Ф.В. Бункин, Д.В. Власов, Ю.А. Кравцов // *Известия АН СССР. Радиотехника и электроника.* – 1984. – Т. 29, № 1. – С. 1-4.
22. **Ахунов, Х.Г.** О проявлениях эффективности обратного рассеяния при отражении от зеркала ОВФ / Х.Г. Ахунов, Ю.А. Кравцов // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* – 1983. – Т. 26, № 5. – С. 635-637.
23. **Андреев, Н.Ф.** Обращение оптических сигналов с большим коэффициентом отражения / Н.Ф. Андреев, В.И. Беспалов, А.М. Киселёв, А.З. Матвеев, Г.А. Пасманик, А.А. Шилов // *Письма в ЖЭТФ.* – 1980. – Т. 32, № 11. – С. 639-642.
24. **Кулагин, О.В.** Усиление и обращение волнового фронта слабых сигналов / О.В. Кулагин, Г.А. Пасманик, А.А. Шилов // *УФН.* – 1992. – Т. 162, № 6. – С. 129-157.
25. **Khizhnyak, A.** TIL system with nonlinear phase conjugation / A. Khizhnyak, V. Markov // *Proceedings of SPIE.* – 2007. – Vol. 6708. – 67080N.
26. **Khizhnyak, A.** Novel approach for beacon formation through simulated turbulence: initial lab-test results / A. Khizhnyak, V. Markov, I. Tomov, F. Wu // *Proceedings of SPIE.* – 2010. – Vol. 7588. – 758807.
27. **Khizhnyak, A.** Beacon-defined performance of adaptive optics / A. Khizhnyak, V. Markov, J. Chavez, Sh. Liu // *Proceedings of SPIE.* – 2012. – Vol. 8517. – 85170Y.
28. **Кулагин, О.В.** Компенсация фазовых искажений при наблюдении через турбулентную атмосферу с помощью ОВФ при четырех-волновом взаимодействии света с гиперзвуком / О.В. Кулагин, В.П. Лукин, А.М. Сергеев, D. Peterson, M. Valley. – В кн.: *Сборник трудов XVI Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы».* – Томск: 2009.
29. **Kanev, F.Yu.** Hybrid adaptive system performance / F.Yu. Kanev, O.V. Kulagin, V.P. Lukin. – In: *Proceedings of the International Conference “Laser Optics 2010”.* – Saint-Petersburg: 2010.
30. **Лукин, В.П.** Возможность совместного использования техники адаптивной оптики и нелинейно-оптического обращения волнового фронта для компенсации турбулентных искажений / В.П. Лукин, Ф.Ю. Канев, О.В. Кулагин // *Квантовая электроника.* – 2016. – Т. 46, № 5. – С. 481-486.
31. **Ryou, A.** Image amplification in a self-imaging degenerate optical cavity [Electronical Resource] / A. Ryou, Sh. Colburn, A. Majumdar // *arXiv:1905.01551v1.* – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1905.01551> (request date 18.03.2020).
32. **Brustlein, S.** Limits of amplification of weak images / S. Brustlein, F. Devaux, E. Lantz // *Journal of Modern Optics.* – 2006. – Vol. 53, Issue 5-6. – P. 799-807. – DOI: 10.1080/09500340500225962.
33. **Mosset, A.** Spatially noiseless optical amplification of images / A. Mosset, F. Devaux, E. Lantz // *Physical Review Letters.* – 2005. – Vol. 94. – 223603.
34. **Khizhnyak, A.** Pulse laser imaging amplifier for advanced Ladar systems / A. Khizhnyak, V. Markov, I. Tomov, D. Murrell // *Optical Engineering.* – 2016. – Vol. 56, Issue 3. – 031218.
35. **Гладких, В.А.** Цифровая ультразвуковая метеостанция / В.А. Гладких, А.Э. Макиенко // *Приборы.* – 2009. – № 7. – С. 21-25.
36. **Визионика.** Продукция [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.visionica.ru> (дата обращения 20.05.2020 г.).

Сведения об авторах

Лукин Владимир Петрович, 1946 года рождения, д.ф.-м.н. Основные научные результаты В.П. Лукина посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям по физике атмосферной турбулентности и основам построения атмосферных адаптивных оптических систем. В.П. Лукин – профессор кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Томского государственного университета (2005).

С 1981 года по настоящее время он является заведующим лабораторией Когерентной и адаптивной оптики Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск).

В.П. Лукин является автором более 725 научных работ (из них в базе РИНЦ – 647, SCOPUS – 310, WOS – 306), в том числе 16 монографий и 9 авторских свидетельств и патентов. E-mail: lukin@iao.ru.

Ботыгина Нина Николаевна, 1948 года рождения, старший научный сотрудник ИОА СО РАН, имеет более 100 публикаций по базе РИНЦ, область интересов – экспериментальные оптические измерения в атмосфере.

Коняев Петр Алексеевич, к.ф.-м.н., 1950 г. рождения, старший научный сотрудник ИОА СО РАН, им опубликовано свыше 110 научных работ. Область научных интересов – численные методы исследований пространства оптических волн в случайных средах.

Кулагин Олег Валентинович, 1960 года рождения, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИПФ РАН, автор более 70 научных публикаций, область интересов – лазерная техника, методы преобразования излучения.

Горбунов Иван А., 1984 года рождения, н.с. ИПФ РАН, имеет 12 публикаций в базе РИНЦ, область интересов – лазерная техника.

ГРНТИ: 29.31.29, 29.31.27

Поступила в редакцию 24 марта 2020 г. Окончательный вариант – 22 мая 2020 г.

The combined use of adaptive optics and nonlinear optical wavefront reversal techniques to compensate for turbulent distortions when focusing laser radiation on distant objects

V.P. Lukin¹, N.N. Botygina¹, P.A. Konyaev¹, O.V. Kulagin², I.A. Gorbunov²

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk,

²Institute of Applied Physics RAS, Nizhii Novgorod

Abstract

Approaches to constructing a mock-up of a system for focusing laser radiation on distant objects using both adaptive optics elements and nonlinear-optical wavefront reversal methods providing compensation for turbulent distortions are considered. Numerical calculations were preliminarily performed, in which the split-step method was used as a numerical method for solving a second-order partial differential wave equation for the complex amplitude of the wave field of a laser beam. This method, combined with methods of spectral-phase Fourier transforms and statistical tests, is the most effective way to obtain reliable quantitative results for solving engineering problems of atmospheric wave optics. Quantitative data are obtained on the effect of turbulent atmospheric distortions along propagation paths on the main parameters of coherent laser beams — focusing, effective average radius, and the proportion of the beam energy in its diffraction spot. The preliminary results obtained of the system mock-up performance confirm the conclusions of the theory.

Keywords: adaptive optics, phase conjugation, wavefront reversal, wavefront sensor.

Citation: Lukin VP, Botygina NN, Konyaev PA, Kulagin OV, Gorbunov IA. The combined use of adaptive optics and nonlinear optical wavefront reversal techniques to compensate for turbulent distortions when focusing laser radiation on distant objects. *Computer Optics* 2020; 44(4): 519-532. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-725.

Acknowledgements: The authors are grateful to the staff of the IOA SB RAS: Leading engineer A. Borzilov and Ph.D. Torgaeva A.V. for carrying out measurements of atmospheric parameters, Ph.D. Lavrinova V.V. for the development of a wavefront sensor control program; E. Soin engineers and Selina A.A. for their help with the work. We express special gratitude and thanks to the designer A.N. Gritsuta and lead engineer O. N. Emaleev for participating in the development of the layout. The authors are also grateful to the IAP RAS employees: 1st category programmer S.O. Kulagin and research engineer Kulagin I.O. for help in creating and launching the laser part of the layout. We are looking forward to future joint serious work on the proposed layout.

This work was financially supported by the RF Ministry of Science and Higher Education as part of the government projects of the IOA SB RAS and IAP RAS.

References

- [1] Babcock HW. The possibility of compensating astronomical seeing. *Publ Astron Soc Pac* 1953; 65: 229-236.
 - [2] Linnik VP. On the fundamental possibility of reducing the influence of the atmosphere on the image of a star [In Russian]. *Optics and Spectroscopy* 1957; 25(4): 401-402.
 - [3] Fried DL. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J Opt Soc Am* 1966; 56: 1372-1379.
 - [4] Lukin VP. *Atmospheric adaptive optics*. Bellingham: SPIE Press; 1995. ISBN: 978-0-8194-1871-5.
 - [5] Zeldovich BYa, Pilipetskiy NF. *The wave front reversal* [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1985.
 - [6] Bespalov VI, Pasmanik GA. *Nonlinear optics and adaptive laser systems* [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1986.
 - [7] Greenwood D. Special issue on adaptive optics. *Linc Lab J* 1992; 1: 3-170.
 - [8] Buffington A, Crawford FS, Muller RA, Schwemin AJ, Smits RG. Correction of atmospheric distortion with an image-sharpening telescope. *J Opt Soc Am* 1977; 67(3): 298-303.
 - [9] Cathey WT, Hayes CL, Davis WC, Pizzurro VF. Compensation for atmospheric phase effects at 10.6 micro. *Appl Opt* 1970; 9(3): 701-707.
 - [10] Lukin VP. Reciprocity principle and adaptive control of optical radiation parameters. *Sov J Quantum Electron* 1982; 12(5): 602-605.
 - [11] Fortes BV, Lukin VP. *Adaptive beaming and imaging in the turbulent atmosphere*. Bellingham, Washington: SPIE Press; 2002. ISBN: 0-8194-4337-9.
 - [12] Lukin VP, Fortes BV, Kanev FYu, Konyaev PA. Potential capabilities of adaptive-optical systems in the atmosphere. *J Opt Soc Am A* 1994; 11(2): 903-907.
 - [13] Lukin VP, Fortes BV. Phase-correction of turbulent distortions of an optical wave propagating under conditions of strong intensity fluctuations. *Appl Opt* 2002; 41(27): 5616-5624.
 - [14] Lukin VP, Kanev FYu, Sennikov VA, Makenova NA, Tartakovskii VA, Konyaev PA. Phase and amplitude – phase control of a laser beam propagating in the atmosphere. *Quantum Electronics* 2004; 34(9): 825-832.
 - [15] Guthery CE, Hart M. Theory and design of a hybrid wavefront sensor for adaptive optics. *Imaging and Applied Optics* 2019: OSA Technical Digest (Optical Society of America) 2019: PTu3C.4.
-

- [16] Vorontsov M. Overview of long-range (149 km) laser beam propagation and atmospheric sensing experiments. *Imaging and Applied Optics 2019: OSA Technical Digest (Optical Society of America) 2019: JW2A.36*.
- [17] Charnotskii M. Fifty years of strong scintillation theory. *Imaging and Applied Optics 2019: OSA Technical Digest (Optical Society of America) 2019: PM1C.1*.
- [18] Saichev AI. Reflection from a mirror reversing the wavefront, taking into account backscattering in an inhomogeneous medium [In Russian]. *Izvestia VUZov: Radiophys-ics 1981; 24: 1165-1167*.
- [19] Saichev AI. The effect of compensation by the wavefront reversing distortions by the wave mirror due to scattering in an inhomogeneous medium [In Russian]. *Izvestia Akademii Nauk USSR: Radiotekhnika i Elektronika 1982; 27: 1601-1608*.
- [20] Malakhov AI, Poloviikin AV, Saichev AI. About the average intensity of a wave reflected from a phase conjugation mirror in a turbulent medium [In Russian]. *Izvestia VUZov: Radiophysics 1983; 26(5): 579-586*.
- [21] Akhunov HG, Bunkin FV, Vlasov DV, Kravtsov YuA. On the efficiency of focusing a reversed wave field in a turbulent atmosphere in the presence of wind [In Russian]. *Izvestia Akademii Nauk USSR: Radiotekhnika i Elektronika 1984; 29(1): 1-4*.
- [22] Akhunov KhG, Kravtsov YuA. On the manifestations of the efficiency of backscattering upon reflection from a phase conjugation mirror [In Russian]. *Izvestia VUZov: Radiophysics 1983; 26(5): 635-637*.
- [23] Andreev NF, Bespalov VI, Kiselev AM, Matveev AZ, Pasmanik GA, Shilov AA. Wave-front inversion of weak optical signals with a large reflection coefficient. *JETP Letters 1980; 32(11): 625-629*.
- [24] Kulagin OV, Pasmanik GA, Shilov AA. Amplification and phase conjugation of weak signals. *Physics-Uspexhi 1992; 162(6): 129-157*.
- [25] Khizhnyak A, Markov V. TIL system with nonlinear phase conjugation. *Proc SPIE 2007; 6708: 67080H*.
- [26] Khizhnyak A, Markov V, Tomov I, Wu F. Novel approach for beacon formation through simulated turbulence: initial lab-test results. *Proc SPIE 2010; 7588: 758807*.
- [27] Khizhnyak A, Markov V, Chavez J, Liu Sh. Beacon-defined performance of adaptive optics. *Proc SPIE 2012; 8517: 85170Y*.
- [28] Kulagin OV, Lukin VP, Sergeev AM, Peterson D, Valley M. Compensation of phase distortions during observation through a turbulent atmosphere using phase conjugation during four-wave interaction of light with hypersound [In Russian]. In Book: *Proceedings of the XVI International Symposium "Atmosphere and Ocean Optics. Atmospheric Physics"*. Tomsk: 2009.
- [29] Kanev FYu, Kulagin OV, Lukin VP. Hybrid adaptive system performance. In Book: *Proceedings of the International Conference "Laser Optics 2010"*. Saint-Petersburg: 2010.
- [30] Lukin VP, Kanev FYu, Kulagin OV. Possibilities of joint application of adaptive optics technique and nonlinear optical phase conjugation to compensate for turbulent distortions. *Quantum Electronics 2016; 46(5): 481-486*.
- [31] Ryou A, Colburn Sh, Majumdar A. Image amplification in a self-imaging degenerate optical cavity. Source: (<https://arxiv.org/abs/1905.01551>).
- [32] Brustlein S, Devaux F, Lantz E. Limits of amplification of weak images. *J Mod Opt 2006; 53(5-6): 799-807*. DOI: 10.1080/09500340500225962.
- [33] Mosset A, Devaux F, Lantz E. Spatially noiseless optical amplification of images. *Phys Rev Lett 2005; 94: 223603*.
- [34] Khizhnyak A, Markov V, Tomov I, Murrell D. Pulse laser imaging amplifier for advanced Ladar systems. *Opt Eng 2016; 56(3): 031218*.
- [35] Gladkikh VA, Makienko AE. Digital ultrasonic weather station [In Russian]. *Instruments 2009; 7: 21-25*.
- [36] Visionica Ltd. Products. Source: (<http://www.visionica.biz/>).

Authors' information

Vladimir Petrovich Lukin, born in 1946, Dr. Sc. The main scientific results of V. Lukin devoted to theoretical and experimental studies in the physics of atmospheric turbulence and the fundamentals of constructing atmospheric adaptive optical systems. V.P. Lukin – Professor, Optoelectronic Systems and Remote Sensing department, Tomsk State University (2005).

From 1981 to the present, he is the head of the Laboratory of Coherent and Adaptive Optics at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Tomsk).

V.P. Lukin is the author of more than 725 scientific papers (of which 647 are in the RSCI database, SCOPUS – 310, WOS – 306 in the database), including 16 monographs and 9 copyright certificates and patents. E-mail: lukin@iao.ru.

Nina Nikolaevna Botygina, born in 1948, senior researcher at IOA SB RAS, has more than 100 publications on the basis of the RSCI, the area of interest is experimental optical measurements in the atmosphere.

Pyotr Alekseevich Konyaev, Ph.D., born in 1950, senior researcher at the IOA SB RAS, he has published over 110 scientific papers. The area of scientific interests is numerical methods for studying the propagation of optical waves in random media.

Oleg Valentinovich Kulagin, born in 1960, candidate of Physical and Mathematical sciences, senior researcher at IAP RAS, author of more than 70 scientific publications, area of interest – laser technology, radiation conversion methods.

Ivan A. Gorbunov, born in 1984, junior scientific of IAP RAS, has 12 publications in the RSCI database, the area of interest is laser technology.