

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.36

Измерения параметров атмосферы на протяженных трассах. III. Экспериментальные исследования макета системы адаптивной оптики

Л.А. Больбасова, А.Г. Борзилов, Д.В. Казаков, В.П. Лукин[✉], Е.Л. Соин*

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

Поступила в редакцию 21.04.2023 г.;
после доработки 6.07.2023 г.;
принята к печати 29.09.2023 г.

Настоящая работа продолжает цикл экспериментальных исследований флуктуаций параметров оптических волн на протяженных трассах. Изучаются возможности применения системы адаптивной оптики для фокусировки лазерного излучения на протяженных трассах в атмосфере. Представлена и описана система адаптивной оптики, входящей в состав гибридной системы, обеспечивающей фокусировку лазерного пучка излучения на протяженной атмосферной трассе. Система фокусировки на основе датчика волнового фронта Шэка–Гартмана, деформируемого управляемого зеркала и корректора наклонов волнового фронта реализует алгоритм фазового сопряжения по сигналу от точечного опорного источника. Полученные результаты показывают как возможности, так и ограничения для эффективной работы системы на протяженной турбулентной трассе.

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

Введение

Атмосферная турбулентность вместе с другими неоднородностями (поглощающие газы, аэрозоль, облачные структуры) делает всю атмосферу в целом случайно-неоднородной средой и ограничивает возможности современных оптико-электронных систем [1–3]. Самый радикальным методом, минимизирующим негативное действие атмосферы, является применение систем адаптивной оптики (АО).

В настоящее время наиболее эффективно системы АО применяются в астрономических телескопах. Однако при работе с лазерными пучками они пока не показали столь же впечатляющих результатов. Можно говорить только о первых попытках применения систем АО для решения задач управления параметрами лазерного излучения.

Одно из направлений развития систем АО — формирование мощного оптического излучения путем когерентного (или некогерентного) сложения нескольких пучков излучения волоконных лазеров. Для генерации лазерного излучения высокой мощности в последние годы широко используются многоканальные системы с когерентным сложением

пучков [4–10]. В таких системах каждый из каналов содержит усилители и устройства, предназначенные для управления фазовым сдвигом, для получения которого используются электрооптические ячейки, нелинейно-оптические элементы, пьезооптические устройства. Развиваются также многоканальные системы с фазировкой излучения каждого из каналов за счет нелинейно-оптического неуправляемого взаимодействия пучков (в частности, оптические волокна с несколькими активными сердцевинами).

К сожалению, многоканальные системы не лишены недостатков, в частности проблематичной является синхронизация каналов для получения когерентного выходного излучения. В качестве примеров здесь можно привести экспериментальные работы [8–10], в которых пассивная синхронизация выполнена за счет введения оптической связи между каналами. Получение одномодового излучения также достигается путем управления параметрами системы (активная синхронизация). Анализ литературных источников [4–10] показывает, что, несмотря на достигнутый в данной области прикладной оптики прогресс, нерешенным остается ряд проблем, имеющих фундаментальное и прикладное значение.

Основу теории АО-систем заложили работы американских и советских ученых [3, 11–17]. Именно в них впервые были определены потенциальные возможности и основные ограничения различных алгоритмов коррекции искажений оптического

* Лидия Адольфовна Больбасова (sla@iao.ru); Александр Григорьевич Борзилов (alex.borzilov@mail.ru); Денис Вадимович Казаков (kdv@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Егор Леонидович Соин (sel@iao.ru).

излучения [12–17]. В большинстве ранее разработанных оптических схем коррекции осуществлялось исключительно фазовое управление излучением, при этом неоднократно отмечались недостатки такого подхода. В связи с этим считается необходимым развитие методов [17–19] амплитудно-фазового управления излучением.

Еще одним направлением в развитии систем АО стало применение нелинейных эффектов, в том числе методов, обеспечивающих обращение волнового фронта (ОВФ), таких как вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, вынужденное комбинационное рассеяние света и др. В свое время это направление в оптике имело огромную популярность. Сначала методы классической фазовой коррекции [1–3, 11–19] и методы ОВФ [20–25] развивались параллельно, взаимно дополняя друг друга.

Актуальность исследований возможностей ОВФ в нелинейно-оптической среде стала очевидной еще в 1970–1980-х гг. В ранних работах по данной тематике изучались условия проявления этого эффекта, возможности компенсации искажений в лазерных схемах с помощью ОВФ и пути снижения порога возникновения ОВФ, выполнялась оптимизация энергетика процесса. Тогда же начали проводиться исследования особенностей ОВФ-излучения, проходящего через пространственно-неоднородную среду [22–27], и теоретические оценки возможности фокусировки лазерного излучения в турбулентной атмосфере, а также с учетом ветрового сноса [24]. Специфика же передачи лазерного излучения через неоднородную среду с помощью ОВФ более целенаправленно стала изучаться позднее.

Одно из направлений исследования адаптивных систем, работающих с использованием ОВФ-зеркала, – изучение возможности фокусировки излучения на многобликовом объекте, т.е. когда опорная волна формируется при отражении на мишени пучка в виде нескольких ярких точек [26, 27]. Для фокусировки излучения авторы [27] предлагали сканировать объект. Амплитудно-фазовое управление возможно не только с использованием ОВФ, но и при управлении фазой пучков в двух плоскостях. Так, в [16–19] коррекцию искажений предлагается выполнять с использованием двух зеркал, задающих специальным образом фазовый профиль.

На сегодняшний день остается во многом нерешенной проблема применения стандартной техники АО, а именно измерительных датчиков волнового фронта (ДВФ) и управляемых оптических элементов для высокоточной передачи на большие расстояния в атмосфере как информации (связь, локация), так и энергии (лазерное воздействие, накачка энергией). Серьезным шагом в развитии подхода к созданию систем АО (например, для фокусировки лазерного излучения на большие расстояния в атмосфере) может стать применение гибридных методов [28, 29] в сочетании с нелинейными методами усиления излучения [25, 30].

Обзор литературных источников позволяет заключить, что в использовании методов фазового управления лазерным пучком и ОВФ-систем есть 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 [15–18]. Еще одно ограничение – невозможность воспроизведения упругим зеркалом фазы при наличии сингулярностей в волновом фронте [17, 18].

Существует очень мало публикаций [31–36], в которых рассматриваются вопросы применения АО для фокусировки лазерного излучения на протяженных трассах в турбулентной атмосфере. Поэтому одной из задач данной статьи является устаревание этого недостатка. Стартовым моментом для настоящей работы стала наша работа [29], в которой обсуждается уникальная, не имеющая мировых аналогов гибридная система АО, сочетающая преимущества двух рассмотренных выше подходов. Теоретически и экспериментально преимущества гибридной системы были показаны в [28]. Цель настоящей работы – создание действующего макета фазовой системы адаптивной коррекции для фокусировки лазерных пучков.

1. Макет фазовой системы АО коррекции

1.1. Состав макета

Макет гибридной системы адаптивной фокусировки лазерного излучения [29] был создан совместными усилиями Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород) и Института оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН, г. Томск). Он построен таким образом, что с помощью ДВФ измеряются фазовые искажения принимаемого волнового фронта в реальном масштабе времени, далее измеренная фаза волны «навязывается» излучению специального включенного в состав макета лазерного источника с волоконным выходом с использованием двух активных оптических элементов: корректора наклонов (ТТЗ) и управляемого деформируемого зеркала (ДЗ). Блок, обеспечивающий усиление оптического сигнала и ОВФ, разработан в ИПФ РАН. Макет системы АО создан в ИОА СО РАН.

Фазовая система АО в условиях турбулентной атмосферы [37] работает по алгоритму фазового сопряжения с использованием сигнала от опорного источника по типу «открытого» контура слежения [38]. Макет фазовой части гибридной системы (рис. 1), разработанный нами для экспериментов на протяженных атмосферных трассах, состоит из приемопередающего телескопа системы Ньютона Sky Watcher P2001 HEQ5, ДВФ на юстировочном столе [36, 39], зеркала для коррекции наклонов ТТЗ с блоком усилителей [40], ДЗ для коррекции высших аберраций с блоком усилителей и 59 зонами управления, компьютера с программами для адаптивного управления [41], видеокамеры МАКО

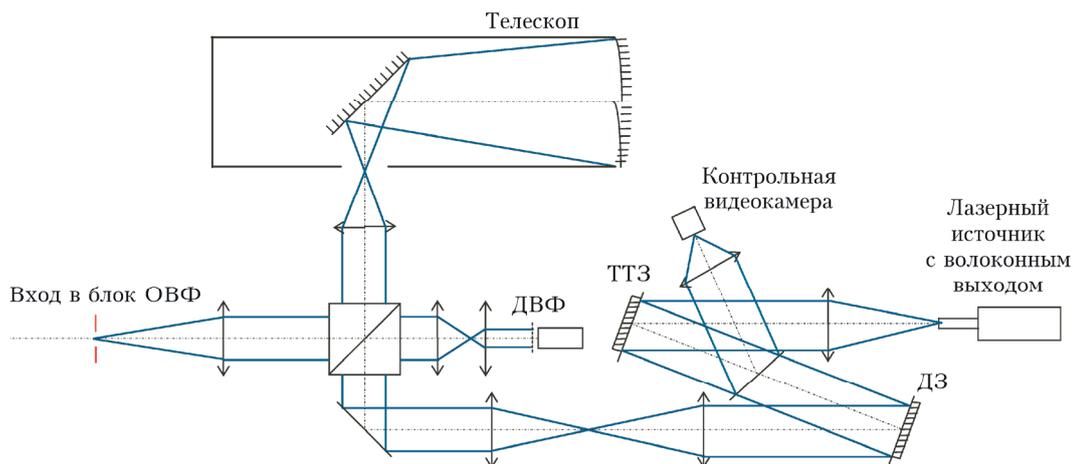


Рис. 1. Схема макета АО-системы фазовой коррекции, согласованной с блоком ОВФ

для регистрации изображения фокусируемого на экран лазерного пучка в целевой зоне, а также согласующих оптических компонентов, механических компонентов (держатели, направляющие, крепежные детали и несущая плита для размещения макета).

ДВФ, входящий в макет фазовой системы АО, может работать на двух длинах волн: 1,064 и 0,532 мкм. Он построен по классической схеме Шэка–Гартмана. Оптическая часть ДВФ состоит из растра, представляющего собой матрицу дифракционных микролинз, и высокоразрешающей видеокамеры, установленной в плоскости регистрации изображения этого растра. Оптический растр, устанавливаемый на входной апертуре видеокамеры ДВФ, делит ее на матрицу субапертур 20×20 .

1.2. Предварительные испытания макета на атмосферном стенде ИОА СО РАН

Испытания макета фазовой системы АО с целью проверки его работы независимо от эффективности системы ОВФ проводились в ИОА СО РАН на атмосферном стенде с открытой трассой длиной 110 м, проходящей примерно на высоте 10 м над подстилающей поверхностью. В задачи испытаний входили проверка характеристик макета и подготовка (при необходимости) предложений по усовершенствованию его конструкции для натурных экспериментов в атмосфере.

Макет АО-системы на стенде ИОА СО РАН представлен на рис. 2. Он состоит из телескопа Ньютона с апертурой диаметром 200 мм, деформируемого зеркала, корректора наклонов волнового фронта ТТЗ, ДВФ с системой формирования излучения. Дополнительный лазер с волоконным выводом излучения формирует опорный источник.

В ходе испытаний проверялась работа составляющих макета: ДВФ, ТТЗ, адаптивного ДЗ и канала регистрации распределения энергии в лазерном излучении в результате фазосопряженного управления его фокусировкой при его распространении в турбулентной атмосфере на горизонтальной трассе.



Рис. 2. Лабораторный макет АО-системы фазовой коррекции на стенде ИОА СО РАН

Излучение на входе в телескоп можно считать сферической опорной волной, что имитирует работу с удаленным объектом. Оптическое излучение, пройдя оптику телескопа и систему формирования, попадает в ДВФ, работающий на опорной сферической волне в видимом диапазоне. С помощью программы [41] ДВФ измеряет дрожание изображения опорного источника, обусловленного атмосферной турбулентностью, в фокальной плоскости микрораstra датчика. При этом в пределах каждой субапертуры осуществляется расчет положения центра тяжести фокального пятна. Далее программа на основе матрицы измеренных случайных смещений центров тяжести фокальных пятен рассчитывает углы наклонов волнового фронта в пределах каждой из субапертур и восстанавливает двумерное распределение искажений волнового фронта. Следующим шагом является разложение фазовых искажений по полиномам Цернике и расчет подаваемого сигнала для управления ТТЗ и ДЗ на основе измеренных заранее функций отклика каждого из актуаторов ДЗ. Для подачи сигналов на зеркало используются система 59-канальных электронных усилителей и блок управления пьезоприводами корректора наклонов.

На основе алгоритма фазового сопряжения система компенсирует (т.е. управление идет в противофазе) все искажения, произошедшие в измеренном фазовом фронте за время между двумя соседними кадрами с камеры ДВФ. Формируемое системой лазерное излучение, пройдя по 110-метровой атмосферной трассе, проецируется на специальный отражающий экран.

Несколько серий измерений проходили в различных условиях по уровню турбулентности: день, утро, ночь. Уровень турбулентности на трассе определялся по параметру Фрида, измеряемому с помощью ДВФ [42], непосредственно по данным оптических измерений, причем использовались уточненные нами формулы, учитывающие исходный размер опорного источника.

Предварительные испытания позволили оценить предельные возможности макета фазовой системы АО исходя из параметров компонент, входящих в него. Так, ДВФ работает на длинах волн 1,064 и 0,532 мкм и обеспечивает обработку сигналов с быстродействием порядка 200 кадров в секунду при числе субапертур в микроапертуре 20×20 . Поэтому минимальное измеряемое значение радиуса Фрида, обусловленное действием турбулентности атмосферы, равно 1 см. Предельно малое измеряемое значение фазовых искажений составляет $1/15$ от длины волны. Макет системы АО может работать с сигналом от независимого опорного источника, а также с излучением, создаваемым при отражении от цели.

2. Эксперименты в атмосфере на протяженных неоднородных трассах

В августе 2022 г. прошли испытания макета системы фазовой коррекции на протяженных атмосферных трассах с неоднородным распределением турбулентности [42].

В приближении метода плавных возмущений [37] были проведены численные расчеты масштаба когерентности и дисперсии флуктуаций логарифма амплитуды для сферической волны на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм на открытых горизонтальных атмосферных трассах протяженностью от 100 до 1100 м. Полученные данные позволяют оценить взаимодействие лазерного излучения и турбулентности атмосферы, в частности, ожидаемый эффект от работы системы фазовой коррекции при работе с опорным источником — имитатором, в качестве которого использовался расходящийся лазерный пучок, т.е. практически сферическая опорная волна.

Турбулентность атмосферы приводит к уширению размеров формируемых лазерных пучков. Оценить ширину лазерного пучка во флукутуирующей среде можно с помощью формул из [37], где отмечается, что измеренный эффективный размер пучка будет зависеть как от типа фокусировки, так и от времени усреднения при измерениях. Предварительные теоретические расчеты позволяют сопоставить размер (масштаб) когерентности оптической

волны и размер первой зоны Френеля на трассе, поскольку, как показано в [28, 29], размер опорного источника (или отражателя) для обеспечения высокого уровня фазовой адаптивной коррекции должен быть меньше, чем размер первой зоны Френеля на трассе.

Макет располагался на установочной плите (см. рис. 2). Для обеспечения работы системы АО использовался опорный сигнал, создаваемый непрерывным излучением лазера на длине волны 0,532 мкм. Лазер размещался в плоскости цели и формировал расходящийся пучок, который распространялся навстречу принимающему телескопу.

В первую очередь проверялась работа ДВФ макета системы путем сравнения с ДИТ-2010 (дифференциальным измерителем турбулентности) при работе на одной и той же трассе. В частности, на горизонтальной трассе длиной 360 м сравнительные измерения [42] выполнялись в течение 25.08.2022 г. на длине волны 0,532 мкм. При этом в ДИТ-2010 для получения данных по параметру Фрида применялась дифференциальная методика [36], а ДВФ получал эти данные из измерений дисперсии модовых составляющих фазовых флуктуаций [38, 42]. Оказалось [42], что среднее измеренное значение параметра Фрида составило 4,33 см, при этом относительное среднеквадратическое отклонение между показаниями двух измерителей составило 0,7 см, а относительное различие — 16%.

Из-за aberrаций формирующего телескопа [43] и сильной расходимости пучка фокусируемого волоконного лазера получить минимальный размер пятна (< 1 см) при работе на трассе практически не удается, поэтому уменьшение размера пучка в результате работы макета довольно трудно заметить. Чтобы уменьшить пятно фокусировки, была использована описанная в [44] методика юстировки. Для этого между телескопом и деформируемым зеркалом разместили масштабирующую систему из двух линз. Смещение ближайшей к телескопу линзы на расстояние, равное $\delta l = F_1^2 R$, позволяет добиться уменьшения лазерного пучка (F_1 — фокусное расстояние линзы, R — радиус кривизны зеркала телескопа). Применяя дополнительную оптику и систему фазовой коррекции, в экспериментах удалось обеспечить как стабилизацию пучка, так и уменьшение его размера.

Результаты измерений фазового фронта с помощью ДВФ представлены на рис. 3 (цв. вкладка), где в терминах полиномов Цернике показаны aberrации волнового фронта лазерного пучка [45]. Данные были получены с помощью программы [41], обеспечивающей как работу ДВФ, так и управление ДЗ. Запись измерений проводилась в течение 30 с (длина волны 0,532 мкм) на горизонтальной трассе длиной 100 м при достаточно слабой турбулентности. Из рис. 3 видно, что наибольшую амплитуду имеют такие aberrации, как кома, дефокусировка, астигматизм, что соответствует теории распространения оптических волн в турбулентной атмосфере, а также сферическая aberrация, являющаяся инструментальной aberrацией оптической системы телескопа [43].

В таблице представлены данные измерений, которые позволяют проанализировать вклад каждой aberrации фазовых флуктуаций в относительное уменьшение параметра Штреля [42, 46]. Как видно, наибольший вклад в деградацию лазерного пучка оказывают aberrации № 5, 7, 12; меньший вклад дают aberrации № 4, 8, 17, 18.

Вклад aberrаций в уменьшение параметра Штреля

№	Название aberrации	Параметр Штреля
3	Астигматизм Y	0,984
4	Дефокус	0,944
5	Астигматизм X	0,356
6	Трилистник Y	0,993
7	Кома Y	0,431
8	Кома X	0,949
9	Трилистник X	0,999
10	Четырехлистник Y	0,999
11	Вторичный астигматизм Y	0,999
12	Сферическая aberrация	0,389
13	Вторичный астигматизм X	0,999
14	Четырехлистник X	0,997
15	Пятилистник Y	0,998
16	Вторичный трилистник Y	0,999
17	Вторичная кома Y	0,974
18	Вторичная кома X	0,966
19	Вторичный трилистник X	0,998
20	Пятилистник X	0,997

Отметим, что доминирующей aberrацией оптической системы телескопа Ньютона является кома, при этом не исключается появление сферической aberrации и астигматизма [44, 45].

На рис. 4 (цв. вкладка) представлены картины распределения энергии (или функция размытия точки – ФРТ) в фокальном пятне излучения фокусируемого лазерного пучка, а на рис. 5 (цв. вкладка) – соответствующие этим ФРТ гистограммы aberrаций при разложении волнового фронта по полиномам Цернике.

При сравнении фрагментов рис. 5 отчетливо видно, что ДЗ компенсирует практически все aberrации. Согласно полученным результатам (рис. 5), наиболее выраженной aberrацией до и после коррекции остается сферическая, вызванная качеством оптической системы телескопа, используемого в системе АО. Безусловно, большой остается aberrация кома, также обусловленная оптической системой телескопа Ньютона.

Отметим, что наблюдающиеся кольца на рис. 4 не являются дифракционными, а формируются совместным действием сферической aberrации и дефокусировки оптической системы телескопа. Как показывают наши оценки, отсутствие сферической aberrации позволило бы получить в данном эксперименте параметр Штреля, равный 0,532. Отсутствие комы повышает параметр Штреля с 0,278 до 0,532, а вторичной комы – лишь до 0,362. Таким образом, использование оптической системы телескопа без сферической aberrации [44] и применение корректора комы позволит существенно увеличить параметр Штреля.

Заключение

Созданный нами макет АО-системы фазовой коррекции продемонстрировал ее способность измерять и корректировать искажения волнового фронта в широком диапазоне модовых компонентов. ДВФ при работе с лазером-имитатором показал возможность измерений основных составляющих искажений волнового фронта. Получаемые по его данным значения параметра Фрида совпадают с точностью не меньше 16% с данными измерителя ДИТ-2010. Система адаптивной фазовой коррекции лазерного пучка позволяют увеличить параметр Штреля по фокусировке лазерного пучка при условии использования высококачественного фокусирующего телескопа.

При существующих параметрах макета практический эффект от коррекции искажений невелик (это следует из измерения размеров пучка в плоскости фокусировки при коррекции и без нее). Для высокого качества коррекции искажений размер отражателя должен быть меньше, чем размер первой зоны Френеля для рабочего излучения на трассе.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников фирмы «Визионика» А.В. Ларичева и Н.Г. Ирошникова за помощь при работе с программой для ДВФ.

Финансирование. Работы выполнены в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Список литературы

1. *Babcock W.* The possibility of compensating astronomical seeing // Publ. Astron. Soc. Pac. 1953. V. 65. P. 229–236.
2. *Линник В.П.* О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображение звезды // Опт. и спектроскоп. 1957. № 4. С. 401–402.
3. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
4. *Fotiadi A.A.* All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers // Opt. Lett. 2009. V. 34, N 22. P. 3574–3576.
5. *Vorontsov M.A.* Adaptive array of phase-locked fiber collimators: Analysis and experimental demonstration // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics. 2009. V. 15, N 2. P. 269–280.
6. *Bellanger C.* Coherent fiber combining by digital holography // Opt. Lett. 2008. V. 33, N 24. P. 2937–2939.
7. *Xinyan Fan, Jingjiao Liu, Jinsheng Liu, Jingli Wu.* Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array // Chinese Opt. Lett. 2010. V. 8, N 1. P. 48–51.
8. *Gopinath J.T., Chann B., Fan T.Y., Sanchez-Rubio A.* 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array // Opt. Express. 2008. V. 16, N 13. P. 9405–9409.
9. *Wang B., Mies E., Minden M., Sanchez A.* All-fiber 50 W coherently combined passive laser array // Opt. Lett. 2009. V. 34, N 7. P. 863–865.
10. *Pu Zhou, Yanxing Ma, Xiaolin Wang, Haotong Ma, Jianhua Wang, Xiaojun Xu, Zejin Liu.* Coherent beam combination of a hexagonal distributed high power fiber

- amplifier array // *Appl. Opt.* 2009. V. 48, N 33. P. 6537–6540.
11. *Fried D.L.* Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures // *J. Opt. Soc. Am.* 1966. N 56. P. 1372–1379.
 12. *Greenwood D.* Special Issue on Adaptive Optics. *J. Lincoln Lab.* 1992. N 1. P. 3–170.
 13. *Buffington V., Crowford P.S., Muller K.A.* Correction of atmospheric distortion with an image-sharpening telescope // *J. Opt. Soc. Am.* 1977. V. 67, N 3. P. 208.
 14. *Cathey V.T., Hayes C.L., David W.C., Pizzurro A.F.* Compensation for atmospheric phase effects at 10.0 μm // *Appl. Opt.* 1970. V. 20, N 3. P. 701.
 15. *Лукин В.П., Чарноцкий М.И.* Принцип взаимности и адаптивное управление параметрами оптического излучения // *Квант. электрон.* 1982. Т. 9, № 5. С. 952–958.
 16. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 212 с.
 17. *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.
 18. *Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Сенников В.А., Макенва Н.А., Тартаковский В.А., Коняев П.А.* Фазовое и амплитудно-фазовое управление лазерным пучком при распространении его в атмосфере // *Квант. электрон.* 2004. Т. 33, № 9. С. 825–832.
 19. *Barchers J.D.* Evaluation of the impact of finite-resolution effects on scintillation compensation using two deformable mirrors // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2001. V. 18, N 12. P. 3098–3109.
 20. *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф.* Обращение волнового фронта. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 248 с.
 21. *Беспалов В.И., Пасманик Г.А.* Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. М: Наука, 1986. 134 с.
 22. *Саичев А.И.* Отражение от зеркала, обращаемого волновой фронт, с учетом обратного рассеяния в неоднородной среде // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1981. Т. 24. С. 1165–1167.
 23. *Малахов А.И., Половишкин А.В., Саичев А.И.* О средней интенсивности волны отраженной от зеркала ОВФ в турбулентной среде // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1983. Т. 26, № 5. С. 579–586.
 24. *Ахунов Х.Г., Бункин Ф.В., Власов Д.В., Кравцов Ю.А.* Об эффективности фокусировки обращенного волнового поля в турбулентной атмосфере при наличии ветра // *Изв. АН СССР. Радиотехника и электроника.* 1984. Т. 29, № 1. С. 1–4.
 25. *Андреев Н.Ф., Беспалов В.И., Киселёв А.М., Матвеев А.З., Пасманик Г.А., Шилов А.А.* Обращение оптических сигналов с большим коэффициентом отражения // *Письма в ЖЭТФ.* 1980. Т. 32, вып. II. С. 639–642.
 26. *Khizhnyak A., Markov V.* TIL system with nonlinear phase conjugation // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6708. P. 67080H-1-5.
 27. *Khizhnyak A., Markov V., Chavez Joseph, Liu Sh.* Beacon-defined performance of adaptive optics // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8517. DOI: 10.1117/12.930631.
 28. *Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Кулагин О.В.* Возможность совместного использования техники адаптивной оптики и нелинейно-оптического обращения волнового фронта для компенсации турбулентных искажений // *Квант. электрон.* 2016. Т. 46, № 5. С. 481–486.
 29. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Коняев П.А., Кулагин О.В., Горбунов И.А.* Совместное применение адаптивной оптики и нелинейно-оптического обращения волнового фронта для компенсации турбулентных искажений при фокусировке лазерного излучения на удаленных объектах // *Компьютерная оптика.* 2020. Т. 44, № 4. С. 519–532. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-725 519.
 30. *Кулагин О.В., Пасманик Г.А., Шилов А.А.* Усиление и обращение волнового фронта слабых сигналов // *Успехи физ. наук.* 1992. Т. 162, № 6. С. 129–157.
 31. *Weyrauch Th., Vorontsov M.A.* Mitigation of atmospheric-turbulence effects over a 2.4-km near horizontal propagation path with 134 control-channel MEMS/VLSI adaptive transceiver system // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5162. DOI: 10.1117/12.508080.
 32. *Baker K.L., Stappaerts E.A., Gavel D., Wilks S.C., Tucker J., Silva D.A., Olsen J., Olivier S.S., Young P.E., Kartz M.W., Flath L.M., Kruelevitch P., Crawford J., Azucena O.* High-speed horizontal-path atmospheric turbulence correction with a large-actuator-number microelectromechanical system spatial light modulator in an interferometric phase-conjugation engine // *Opt. Lett.* 2004. V. 29, N 15. P. 1781–1783.
 33. *Mackey R., Dainty Ch.* Adaptive optics correction over a 3 km near horizontal path // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7108. P. 71080I-1.
 34. *Wu-Ming Wu, Yu N.* Angular anisoplanatism of a focused beam using beacons over horizontal path // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9796. 97960J. DOI: 10.1117/12.2230627.
 35. *Brady A., Leonhard N., Rosler C., Gier M., Bottner P., Reinlein C.* Demonstrated pre-compensation of a focused laser beam with up to 0.27 mrad point-ahead-angle over a 1-km horizontal communication path // *Proc. ICSO.* 2019. V. 11180. P. 111801E.
 36. *Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Lukin V.P.* Wavefront sensors for adaptive optical systems // *Meas. Sci. Rev.* 2010. V. 10, N 3. P. 101–106.
 37. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
 38. *Шанин О.И.* Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.
 39. *Андреева М.С., Ирошников Н.Г., Корябин А.В., Ларичев А.В., Шмальгаузен В.И.* Использование датчика волнового фронта для оценки параметров атмосферной турбулентности // *Автометрия.* 2012. Т. 48, № 2. С. 103–111.
 40. *Антошкин Л.В., Борзилов А.Г.* Патент № 2695281 на изобретение «Устройство управления двухкоординатным пьезокерамическим оптическим дефлектором» // Приоритет от 13.06.2018. Регистрация в Государственном реестре изобретений 22 июля 2019.
 41. *Ларичев А.В., Ирошников Н.Г.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Специализированное программное обеспечение для обработки изображений», версия 13 (Shah) № 2021619024 от 3.06.2021 г.
 42. *Борзилов А.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Соин Е.Л.* Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. II. Оптические измерители уровня турбулентности // *Оптика атмосферы и океана.* 2023. Т. 39, № 7. С. 557–583.

43. *Notes on AMATEUR TELESCOPE OPTICS*. URL: <https://www.telescope-optics.net> (last access: 10.09.2022).
44. *Fuhrmann T.* Spherical lens aberration minimization method for short-range free-space light transmission // *Opt. Engin.* 2022. V. 61, N 8. P. 085101-1–18.
45. *Noll R.J.* Zernike polynomials and atmospheric turbulence // *J. Opt. Soc. Am.* 1976. V. 66, N 3. P. 207–211.
46. *Лукин В.П.* Требования к динамическим характеристикам систем адаптивной оптики // *Квант. электрон.* 2022. Т. 52, № 7. С. 652–660.

L.A. Bolbasova, A.G. Borzilov, D.V. Kazakov, V.P. Lukin, E.L. Soin. **Measurements of atmospheric parameters on extended paths. III. Experimental tests of the adaptive optics system prototype.**

This work continues the series of experimental studies of fluctuations of the parameters of optical waves along extended paths. In this part, we study possibilities of using an adaptive optics system for focusing laser radiation along long paths in the atmosphere. The adaptive optics system is described, which is part of a hybrid system that provides focusing of a laser radiation beam along an extended atmospheric path. A focusing system, which uses a Shack–Hartmann wavefront sensor, a deformable controllable mirror, and a wavefront tilt corrector implements a phase conjugation algorithm based on a signal from a point reference source. To accompany the experiment, optical and acoustic meters of the level of turbulence and wind speed were used. The results show both opportunities and limitations for the efficient operation of the system on a long turbulent path.

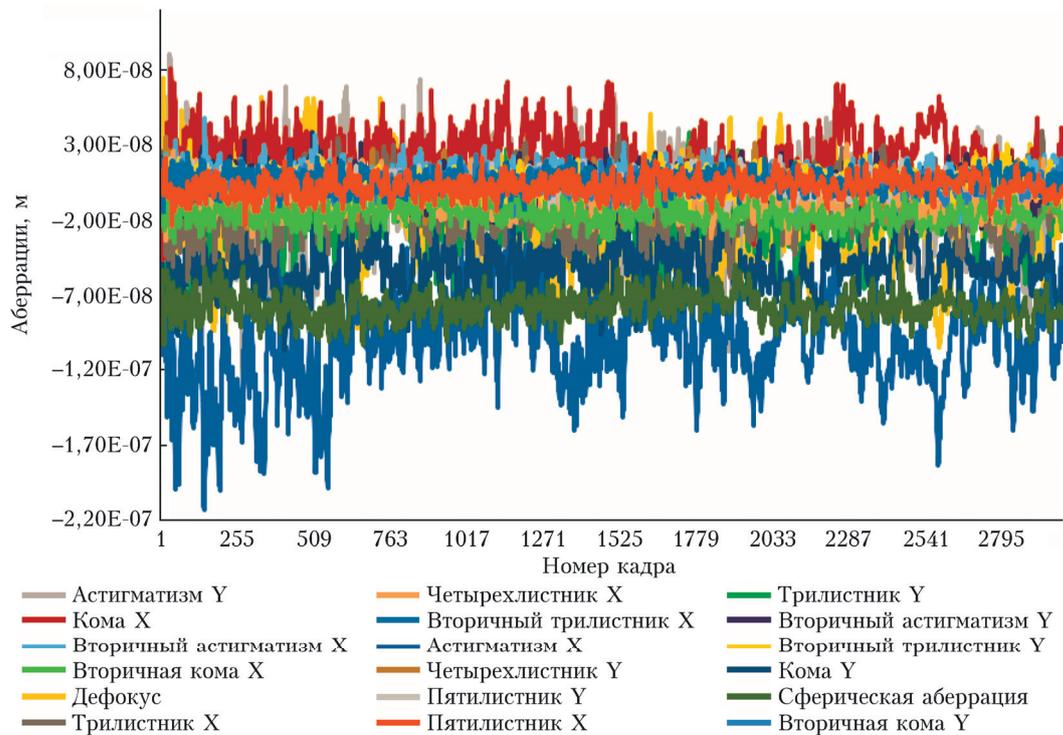


Рис. 3. Модальное разложение аберраций, вносимых турбулентной атмосферой (наклоны исключены)

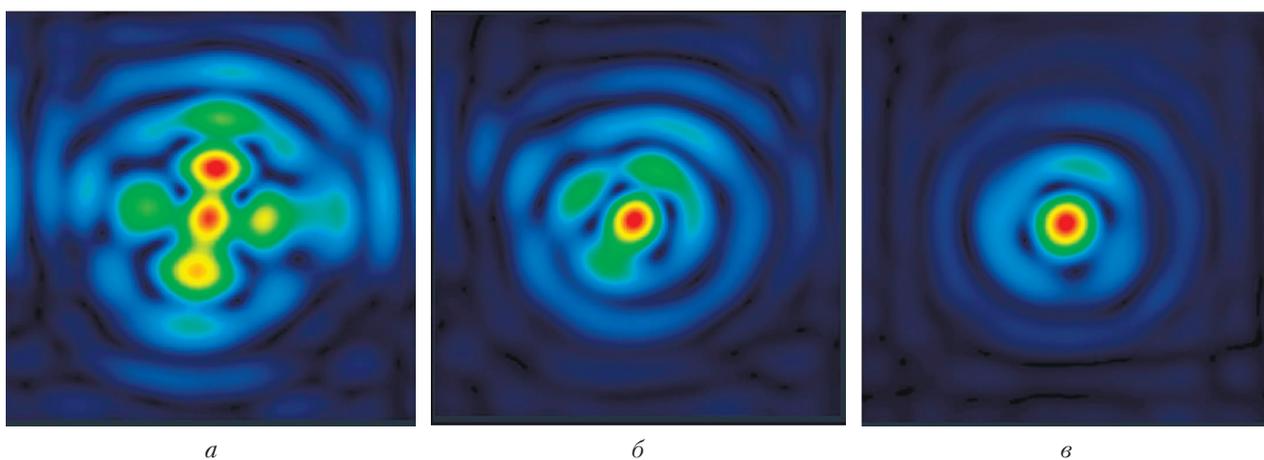


Рис. 4. Картины распределения энергии в фокальном пятне излучения фокусируемого лазерного пучка: две различные реализации ФРТ без коррекции (параметр Штреля $St < 0,1$) (*a*, *б*); с включенной коррекцией ($St = 0,28$) (*в*)

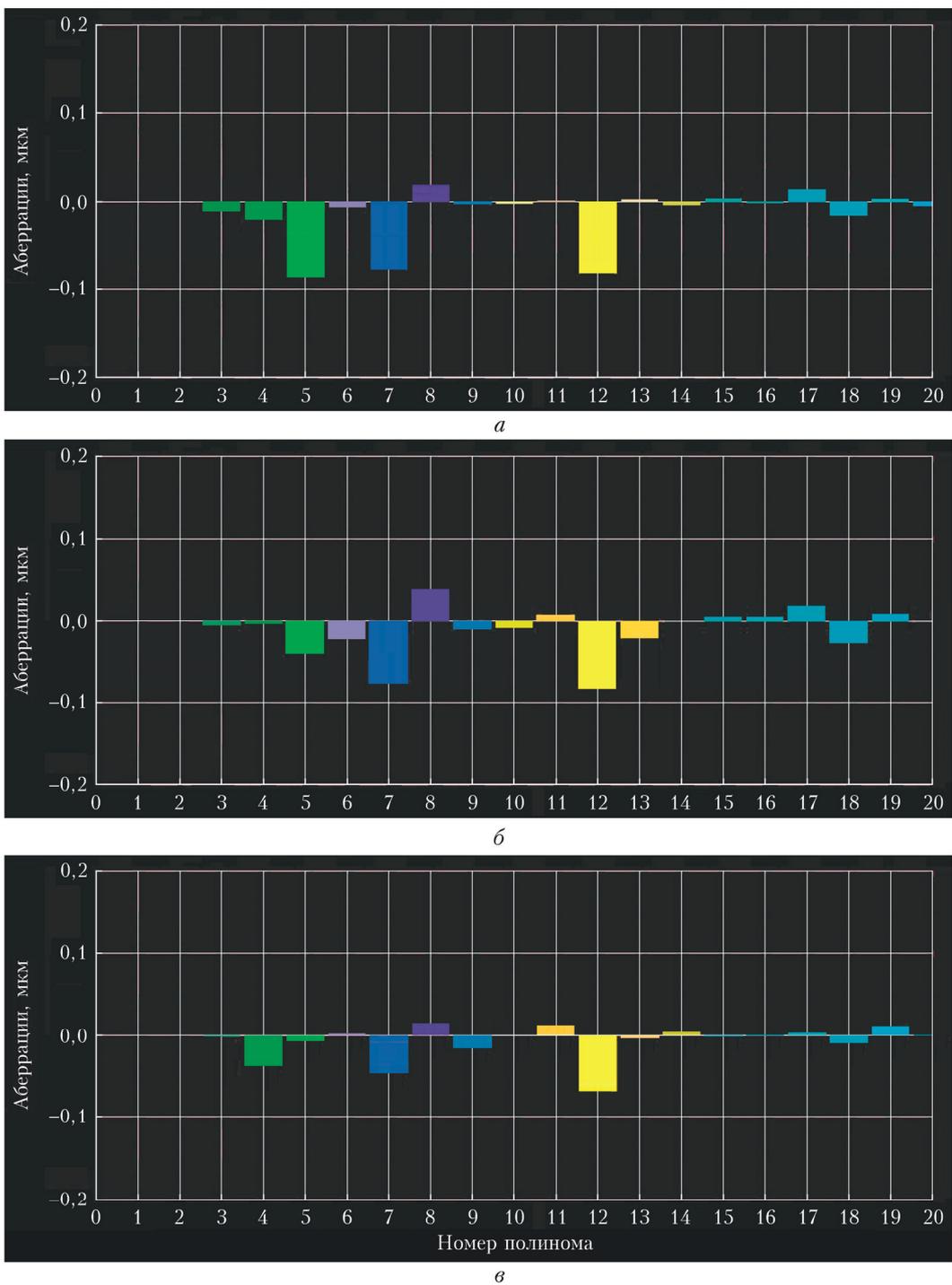


Рис. 5. Гистограммы аберраций при разложении волнового фронта по полиномам Цернике до пятого порядка: две различные реализации фазового профиля до (*a*, *б*) и после коррекции (*в*)