

УДК 681.7

Исследование распространения и адаптивно-оптической коррекции лазерного пучка на изолированной от внешнего воздействия атмосферной трассе

В.Ю. Венедиктов^{1,2}, Д.В. Венедиктов², А.В. Горелая¹, А.Д. Дмитриева¹,
Д.И. Дмитриев³, А.В. Кудряшов⁴, И.Л. Ловчий³, А.Д. Цветков³,
Е.В. Шалымов¹, Ю.В. Шелдакова⁴, Е.В. Шубенкова^{1*}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

² Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 3

³ НИИ оптико-электронного приборостроения
188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, п/я 23

⁴ ООО «Активная оптика НайтН»
115407, г. Москва, ул. Судостроительная, д. 18, корп. 5

Поступила в редакцию 12.08.2016 г.

Рассмотрена работа адаптивной оптической системы и ее компонентов на искусственной атмосферной трассе, которая позволяет оказывать контролируемое и воспроизводимое воздействие на излучение вдоль пути его распространения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований искажений волнового фронта полихроматического излучения с помощью двух датчиков волнового фронта Шака—Гартмана (Shack—Hartmann). Проведено качественное и количественное сравнение параметров волнового фронта, выявлена взаимосвязь между параметрами волнового фронта и длиной волны излучения для различных длин атмосферного тракта.

Ключевые слова: адаптивная оптика, атмосферная трасса, абберации волнового фронта, датчик волнового фронта; adaptive optics, atmospheric beamlet, wavefront aberrations, wavefront sensor.

Введение

В настоящее время уделяется большое внимание теоретическим и экспериментальным исследованиям адаптивных оптических систем (АОС) для коррекции волнового фронта излучения, прошедшего искажающую среду. Большая часть исследований акцентирует внимание на отдельных технических аспектах функционирования существующих адаптивных оптических систем и на работе отдельных конструктивных элементов, например корректоров волнового фронта. Информация о законах изменения свойств искажающей среды, имеющих место при реальной работе системы, существенно ограничена. Такие данные могут быть получены по результатам экспериментального исследования. Они позволяют выявить принципиальные ограничения применимости оптико-

электронных систем и решить задачи коррекции реальных искажений. Особенно актуально это в задачах наведения лазерного пучка, задачах распространения излучения в пространственных оптических линиях связи и т.д. Поэтому целесообразно проводить исследования в следующих направлениях: развивать новые подходы к формированию систем и компонентов адаптивной оптики, рассматривать различные варианты испытательных стендов для тестирования АОС.

Натурные исследования АОС требуют долгой и сложной практической и методической подготовки, при этом необходимо обеспечить высокую повторяемость условий открытого воздушного атмосферного пути, в котором проводится эксперимент. В реальных условиях повторяемость параметров атмосферы на открытых трассах низкая. Решением данной проблемы является использование искусственной атмосферной трассы (ИАТ) с исходно очень низкими собственными и управляемыми (искусственно вносимыми) искажениями, что позволяет повысить воспроизводимость параметров атмосферы.

На базе Научно-исследовательского института оптико-электронного приборостроения (РФ, Ленинградская область, г. Сосновый Бор) ранее была

* Владимир Юрьевич Венедиктов (vlad_venediktov@yahoo.com); Дмитрий Владимирович Венедиктов; Алина Владимировна Горелая; Анна Дмитриевна Дмитриева; Дмитрий Иванович Дмитриев; Алексей Валерьевич Кудряшов; Игорь Леонидович Ловчий; Аркадий Дмитриевич Цветков; Егор Вадимович Шалымов; Юлия Вячеславовна Шелдакова; Елена Викторовна Шубенкова.

построена ИАТ с возможностью искусственно создавать возмущения состояния атмосферы на пути следования лазерного пучка. Этот опытный стенд был разработан для исследования распространения мощного лазерного излучения [1, 2], изучения нелинейных оптических явлений в лазерном пучке и повышения направленности и мощности излучения лазеров путем обращения волнового фронта. Для исследования характеристик АОС ранее применялось математическое моделирование и открытые атмосферные трассы; ИАТ была использована для этих целей впервые.

Искусственная атмосферная трасса формируется 15 плоскими зеркалами дифракционного качества диаметром 500 мм с высоким коэффициентом отражения на длинах волн 0,53 и 1,06 мкм. Расстояние между двумя рядами зеркал составляет 40 м, а максимально возможная протяженность распространения оптического излучения по зигзагообразному пути составляет 700 м. Трасса размещена внутри здания, изолированного от внешних воздействий, что обеспечивает высокую стабильность и воспроизводимость атмосферных условий внутри. Нагреватели и вентиляторы, расположенные по периметру площадки для испытаний и в основаниях держателей зеркал, позволяют обеспечить контролируемые, воспроизводимые искажения атмосферы на всем пути распространения исследуемого излучения. ИАТ является уникальным стендом для исследования и тестирования различного рода оптических систем, в том числе АОС.

На первом этапе исследований использовалась АОС с замкнутой петлей обратной связи производства фирмы «Активная оптика НайтН». Эта система имеет рабочую частоту не более 25 Гц и предназначена для коррекции искажений в мощных лазерных системах, но не в атмосфере, ввиду малой частоты обработки искажений. Тем не менее, как видно далее, в «мягких» условиях изолированной от внешнего воздействия трассы и такая система обеспечила высокое качество коррекции.

Эксперимент показал, что в стабильных атмосферных условиях (без применения нагревателей и вентиляторов) искажения волнового фронта излучения, накопленные при прохождении ИАТ, имеют величину 1–2 мкм (максимальное значение отклонения фазы волнового фронта от начально заданного плоского), а относительный уровень флуктуаций среднеквадратического отклонения фазы в пределах каждого испытания меняется слабо и составляет порядка 1% от длины волны. Использование замкнутого контура коррекции, применяемого в АОС, позволяет, управляя параметрами кривизны биморфного зеркала диаметром 50 мм, обеспечить исправление искажений до дифракционного качества (до минимального пикового значения искажений формы фронта около 0,1 мкм). Эксперимент (см. также [3]) подтвердил теоретические выводы и показал пригодность ИАТ для обработки АОС и их компонентов.

Одним из основных компонентов АОС является датчик волнового фронта. Датчики волнового

фронта Шака–Гартмана (Shack–Hartmann) нашли широкое применение в различных навигационных, локационных, военных тактических системах наблюдения, а также в системах дистанционного зондирования Земли. Они применяются в качестве устройства измерения волнового фронта излучения различного спектрального диапазона. Техническая реализация разрабатываемых датчиков волнового фронта непосредственно влияет на конечные качественные характеристики АОС. В статье рассмотрены результаты испытания системы адаптивной оптики для анализа волнового фронта полихроматического излучения, распространяющегося в слаботурбулентной среде, и приведены итоги сравнительного исследования двух датчиков Шака–Гартмана, использующих камеры BASLERA6011-2 (далее датчик 1) и DMK 42BUC03 (далее датчик 2), оба производства компании «Активная оптика НайтН». Разработана схема исследований, обеспечивающая проведение эксперимента на двух длинах волн одновременно. С помощью имеющихся датчиков была измерена форма исследуемых волновых фронтов. Исходя из полученных искажений волнового фронта была проведена качественная оценка параметров турбулентности в зависимости от длины атмосферного тракта и получен представительный ансамбль данных, отображающий процессы, происходящие до и после коррекции.

Экспериментальные исследования

Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. На первом этапе использовалось монохроматическое излучение. Исследовались искажения, вносимые в его волновой фронт ИАТ, и возможность их адаптивно-оптической коррекции. На втором этапе с помощью двух датчиков Шака–Гартмана производилось сравнение искажений при распространении полихроматического (двухдлинного-волнового) излучения. Второй этап, в свою очередь, был разделен на две стадии: лабораторная калибровка и настройка синхронного измерения двумя датчиками и сравнение аберраций волнового фронта на двух длинах волн, измеренных двумя датчиками одновременно.

Рассмотрим оптическую схему эксперимента для адаптивной коррекции (рис. 1). Источником излучения служил непрерывный неодимовый лазер 1, работающий на основной и второй гармониках $\lambda = 1,06$ и 0,53 мкм. В эксперименте использовалось попеременно видимое или инфракрасное излучение, выделяемое с помощью светофильтра. Плоский волновой фронт лазерного пучка дифракционного качества диаметром 50 мм и мощностью около 100 мВт формируется с помощью диафрагмы 2, клина 3, сферического зеркала 4, плоского зеркала 5 и подается на вход ИАТ. Оптический тракт состоит из 15 плоских зеркал дифракционного качества диаметром 500 мм с покрытием, отражающим более 98% на длинах волн 0,53 и 1,06 мкм. В нашем эксперименте мы использовали три варианта длины ИАТ (80, 160 и 320 м), сформированные зеркалами 7–11. Опорный фронт излучения, считающийся идеальным

в условиях решения данной задачи (с которым сравнивается волновой фронт всех исследуемых в последующем пучков), формировался плечом того же атмосферного тракта с почти нулевой длиной и минимальными искажениями фронта (зеркала 6, 12).

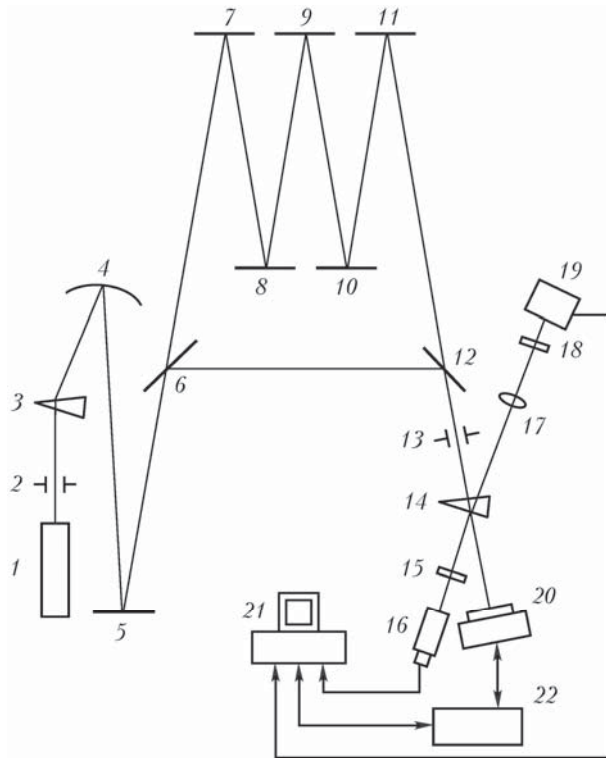


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Источники искусственной турбулентности (вентиляторы и обогреватели), расположенные в зоне ИАТ, обеспечивают контролируемое изменение турбулентности в пределах известной величины характеристического параметра турбулентных пульсаций $C_n^2 = 10^{-15} - 10^{-10} \text{ м}^{-2/3}$, однако на данном этапе исследований они не использовались. В представленном эксперименте источником турбулентности являлись только остаточные флуктуационные движения потоков воздуха.

С выхода ИАТ после отражения от зеркала 12 луч попадает на диафрагму 13 и оптический клин 14, который направляет его в приемную часть установки. Приемная часть установки для первого этапа исследований состояла из АОС и дополнительной системы контроля качества пучка в дальней зоне. Адаптивная система состоит из гибкого адаптивного зеркала 20 (биморфное зеркало с 32 электродами, диаметр 50 мм, серебряное покрытие, частота обновления рельефа около 25 Гц), ослабляющего фильтра 15, датчика волнового фронта Шака–Гартмана 16, блока управления зеркалом 22 и компьютера 21. Система контроля в дальней зоне состоит из объектива 17 с фокусным расстоянием 20 м, ослабляющего фильтра 18, ССД-камеры 19, сигнал с которой записывается и обрабатывается компьютером 21. Такое устройство позволяет фиксировать распре-

деление интенсивности в дальней зоне для неискаженного пучка, пучка после прохождения атмосферы с турбулентностью и после устранения искажений АОС.

Используемое программное обеспечение позволяет вычислить среднеквадратическое отклонение (СКО) фазы волнового фронта от идеально плоского, коэффициенты при полиномах Цернике, а также визуализировать информацию в виде псевдоинтерферограмм, синтезированных из вычисленного распределения фазы. Результаты измерений СКО приведены в табл. 1. С изображениями псевдоинтерферограмм и записями изображений в дальней зоне можно дополнительно ознакомиться в работе [3].

Таблица 1

Параметры волнового фронта до и после коррекции

Длина волны, мкм	Длина трассы, м	До коррекции СКО, мкм	После коррекции СКО, мкм
0,53	80	0,047	0,022
	160	0,054	0,041
	320	0,161	0,053
1,06	80	0,042	0,032
	160	0,064	0,030
	320	0,070	0,050

Как видно из представленных данных, исследуемая система успешно компенсирует небольшие по глубине искажения волнового фронта (максимальное значение отклонения амплитуды волнового фронта для данного этапа составляет порядка 0,5 мкм), несмотря на относительно низкую частоту работы 25 Гц.

Измерения проводились на протяжении более двух месяцев, в это время за пределами помещения искусственной трассы происходили значительные изменения давления, температуры воздуха, влажности, ветра; однако параметры пучка, пропущенного через ИАТ, существенно не менялись.

Следует заметить, что даже слабые источники тепла (например, тепловое излучение самих экспериментаторов) оказывают заметное и невоспроизводимое воздействие на искажения волнового фронта, вносимые ИАТ. Поэтому после перенастройки и переюстировки оптической системы все экспериментаторы удалялись из зоны ИАТ, и перед проведением измерений выдерживалось некоторое время, необходимое для релаксации лабораторной атмосферы после перемещения в ней людей. Это время оказалось весьма значительным. Так, из табл. 2 видно, даже после 20 мин релаксации атмосферы глубина искажений волнового фронта оказалась несколько выше, чем после 1 ч, и эти искажения хуже корректируются, что говорит об их нестационарности.

Экспериментальные исследования первого этапа подтвердили постоянство атмосферных условий, объективную возможность коррекции искажений волнового фронта с помощью АОС, что позволяет рекомендовать площадку ИАТ в качестве испытательного стенда для датчиков волнового фронта и адаптивных оптических систем других типов.

Результаты экспериментальных исследований влияния времени релаксации остаточных искажений на статистические характеристики волнового фронта

Длина волны, мкм	Длина трассы, м	Время релаксации воздуха на ИАТ	Режим работы	СКО волнового фронта, мкм	Разброс СКО, мкм
0,53	80	20 мин	Без коррекции	0,053	0,005
			С коррекцией	0,028	0,002
		1 ч	Без коррекции	0,041	0,004
			С коррекцией	0,014	0,002

На втором этапе исследований проводилось исследование искажений, вносимых ИАТ в полихроматический (на основной и второй гармониках неодимового лазера) пучок излучения при использовании для измерений двух датчиков. Этап включал в себя два эксперимента. На предварительной стадии проводились взаимная калибровка датчиков на лабораторном столе и настройка синхронного двухканального измерения волнового фронта на одной и той же длине волны и сопоставление данных с двух датчиков.

Принципиальная схема лабораторной калибровки представлена на рис. 2, а.

В результате лабораторной калибровки и синхронных измерений с помощью двух независимых датчиков волнового фронта были получены псевдоинтерферограммы аберраций, гартманогаммы, коэффициенты Цернике и среднее квадратическое отклонение волнового фронта от заданного волнового фронта с минимальными искажениями. Значения, полученные с двух датчиков, различаются на 10–15% (минимальное и максимальное значения вариаций волнового фронта для датчика 1 составляют порядка 0,07 и 0,12 мкм соответственно, а для датчика 2 — 0,09 и 0,18 мкм), что может быть использовано в качестве поправки к данным датчика.

В качестве примера на рис. 2, б представлены псевдоинтерферограммы, полученные при работе двух датчиков с использованием специально искаженного аберратора волнового фронта. Восстановленные из вычисленного распределения фаз псевдо-

интерферограммы строятся в долях длины волны излучения. Для датчика 1 при длине волны 1,06 мкм цветовое распределение нормированной фазы составляет от 0 до 1, а для датчика 2 на длине волны 0,53 мкм — от $-0,5$ до 0,5.

После сопоставления показаний двух датчиков при использовании монохроматического излучения было осуществлено лабораторное сравнение их показаний для полихроматического излучения. На данном этапе использовался тот же двухдлинноволновый неодимовый лазер. Излучение на длинах волн 0,53 и 1,06 мкм пропускать через аберраторы, вносящие в волновой фронт статические искажения. Перед датчиком 1 устанавливался фильтр, пропускающий только ИК-излучение, а перед датчиком 2 — фильтр, пропускающий, наоборот, только видимый свет. На рис. 3, а и б показано влияние аберраторов с различной формой искажений на форму исследуемого излучения для каждой из длин волн. Полихроматическая калибровка двух датчиков показала, что аберратор одинаково влияет на показания обоих датчиков, что дает основание проводить эксперименты с использованием двух датчиков на ИАТ.

Общая схема второго этапа эксперимента (рис. 4, а) была сходна с изображенной на рис. 1, но ее приемная часть состояла из клина 17, фильтров 15, 19, линзы 18, двух датчиков волнового фронта Шака–Гартмана (16 — датчик 1, 20 — датчик 2) и компьютера 21 с необходимым программным обеспечением. Сравнение аберраций волнового фронта, измеренных с использованием двух датчиков

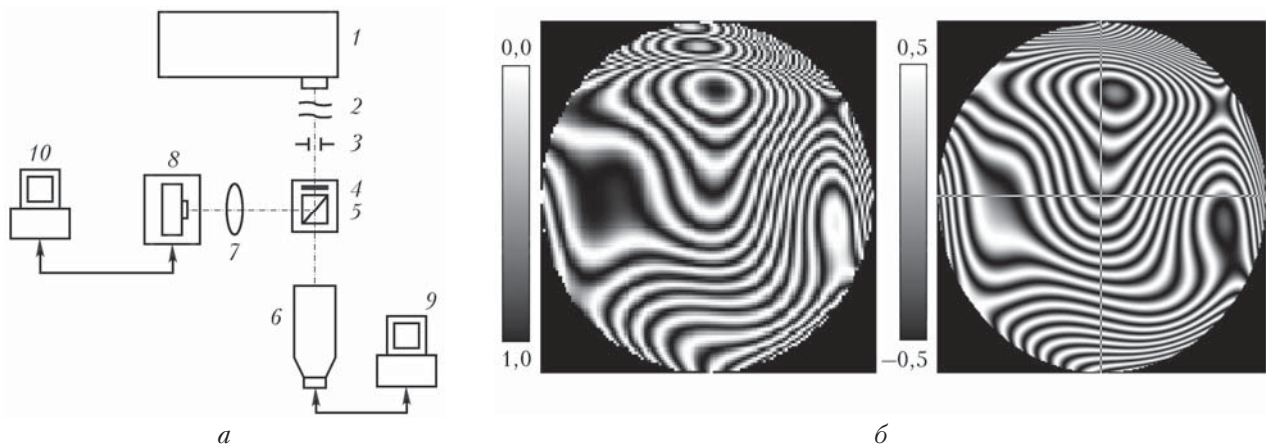


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной калибровки: а — 1 — источник плоской волны; 2 — аберратор; 3 — диафрагма; 4 — светофильтр; 5 — светоделительный куб; 6 — датчик 1; 7 — собирающая линза; 8 — датчик 2; 9, 10 — приемные устройства; б — псевдоинтерферограммы, полученные для одного и того же волнового фронта (на одной длине волны) при использовании двух датчиков

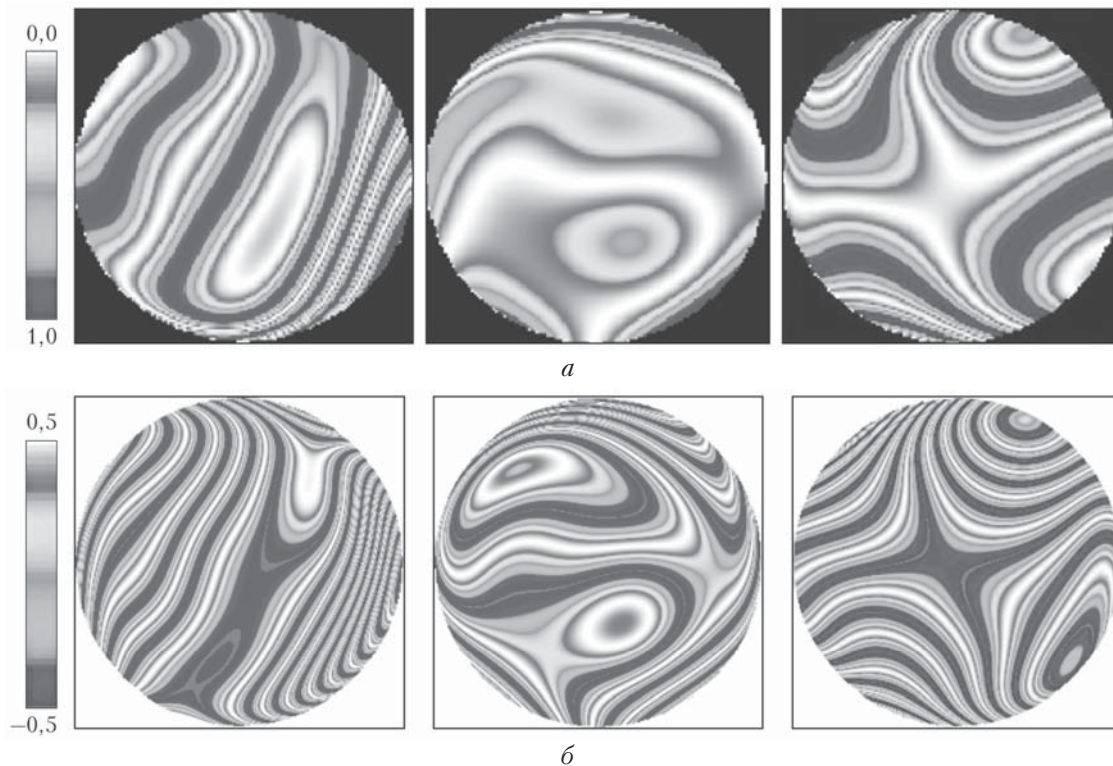


Рис. 3. Псевдоинтерферограммы, полученные при внесении аббератором искажений различной формы для излучения с длиной волны: $a - 1,06$; $b - 0,53$ мкм

и с учетом согласованности по чувствительности, позволило определить СКО волнового фронта при различных протяженностях оптического тракта (табл. 3).

Таблица 3
Зависимость СКО формы волнового фронта от длины ИАТ

Длина волны, мкм	Длина ИАТ, м		
	80	160	320
1,06	0,11	0,14	0,18
0,53	0,14	0,23	0,29

На рис. 4, b и $в$ представлены псевдоинтерферограммы искажений волнового фронта для различных длин ИАТ и длин волн $\lambda = 1,06$ и $0,53$ мкм соответственно (см. также [4]). Из этих рисунков и данных табл. 3 видно, что деформация волнового фронта ИК-излучения (измеренная в абсолютных величинах длины) в 1,3–1,6 раз меньше, чем для зеленого излучения. Этот результат находится в качественном соответствии с предсказаниями [5, 6].

Заключение

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты коррекции начального волнового фронта лазерного пучка адаптивной оптической системой с быстродействием 25 Гц. В результате исследований получены систематические характеристики СКО волнового фронта лазерных пучков с дли-

ной волны излучения $\lambda = 0,53$ и $1,06$ мкм, распространяющихся в искажающей среде. Реализованная схема позволяет проводить исследования на двух длинах волн одновременно на искусственной атмосферной трассе различной длины.

По результатам исследования параметров излучения была выявлена качественная зависимость уровня турбулентности от времени релаксации трассы, которая показывает снижение среднего уровня флуктуаций волнового фронта, а также уменьшение его среднеквадратического отклонения от плоского.

В ходе испытаний датчиков волнового фронта Шака–Гартмана с камерами BASLERA6011-2 и DMK 42BUC03 была проведена взаимная калибровка двух датчиков для измерения параметров волнового фронта. По данным псевдоинтерферограмм и среднеквадратическому отклонению формы волнового фронта была выявлена оптимальная поправка к чувствительности датчика с камерой DMK 42BUC03 относительно датчика с камерой BASLERA6011-2, составляющая 10–15%. При непосредственном сравнении волновых фронтов видно, что они имеют схожую форму, несмотря на различный спектральный диапазон длин волн, что говорит об объективности представленной поправки.

Основываясь на вышеизложенном, можно говорить о том, что ИАТ является идеальным полигоном для создания стабильных, повторяемых условий для тестирования различных оптических систем и их компонентов, в частности, относительно медленных устройств адаптивной коррекции и различных типов датчиков волнового фронта.

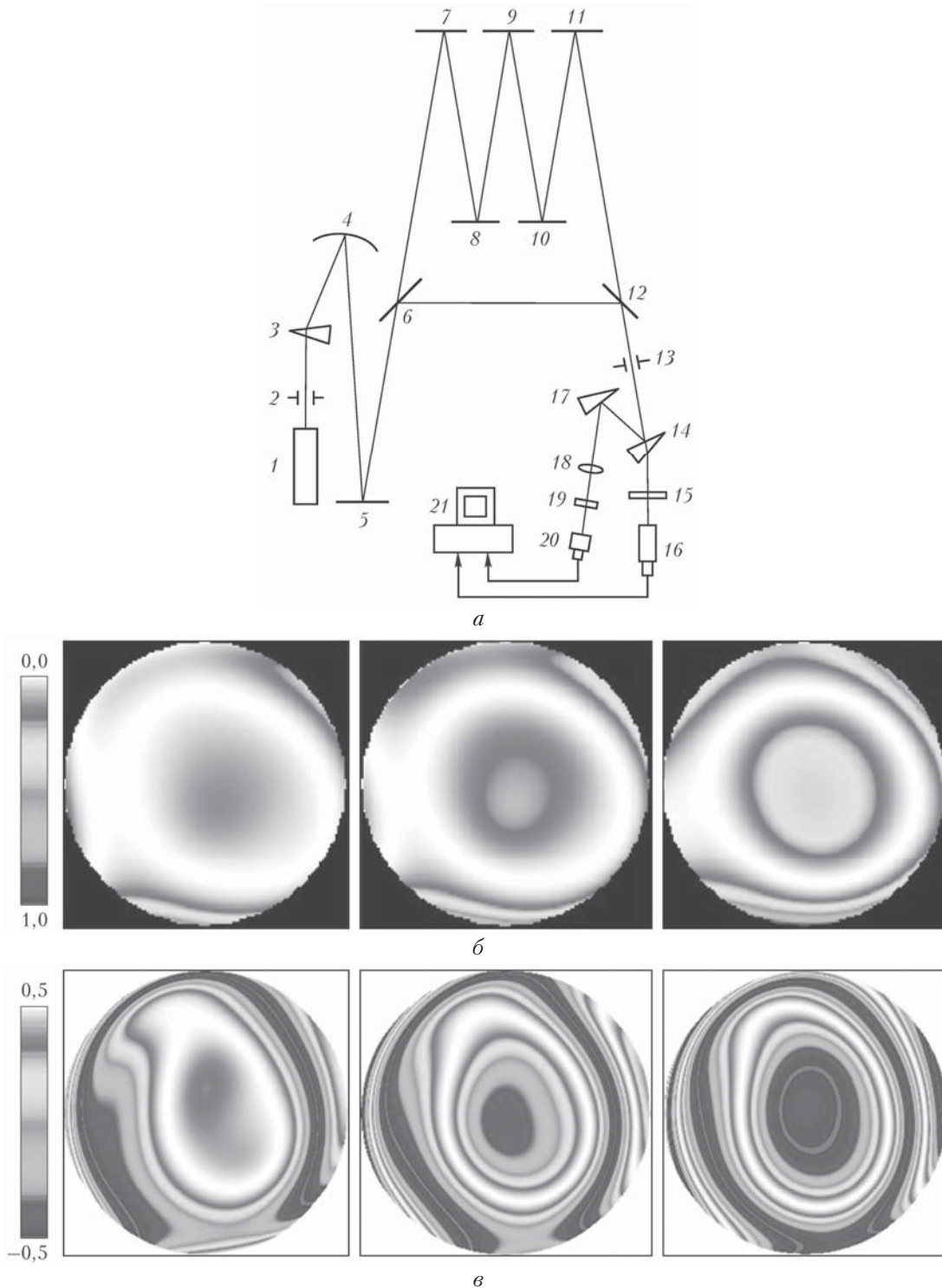


Рис. 4. Структурная схема эксперимента по сравнению волнового фронта двух датчиков при распространении излучения на длинах волн 0,53 и 1,06 мкм (а); псевдоинтерферограммы aberrаций для излучения с длиной волны 1,06 мкм и ИАТ длиной 80, 160, 320 м (б); псевдоинтерферограммы aberrаций для излучения с длиной волны 0,53 мкм и ИАТ длиной 80, 160, 320 м (в)

Настоящее исследование было частично профинансировано за счет средств Задания № 8.752.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки РФ.

1. *Sirazetdinov V.S.* Investigation of laser radiation propagation on extended paths on the LAS stand // *J. Opt. Technol.* 1999. V. 66, N 11. P. 970–973.
2. *Sirazetdinov V.S., Starikov A.D.* Physical modeling of directional transport of laser radiation // *J. Opt. Technol.* 1994. V. 61, N 11. P. 797–800.

3. *Venediktov V., Dmitriev D., Lovchii I., Gorelaya A., Shubenkova E., Tsvetkov A.* In-door artificial atmospheric beamlet as a test-bed for adaptive optics // Proc. SPIE. 2014. V. 9248. P. 9248U-1–9248U-6.
4. *Gorelaya A.V., Shubenkova E.V., Dmitriev D.I., Dmitrieva A.D., Kudryashov A.V., Lovchii I.L., Shalymov E.V., Sheldakova Yu.V., Tsvetkov A.D., Venediktov D.V., Venediktov V.Yu.* Investigation of dual-wave-length laser beam propagation along the in-door atmospheric path // Proc. SPIE. 2015. V. 9641. P. 96410C.
5. *Fortes B.V., Lukin V.P.* Spectral and dynamic characteristics of the adaptive imaging systems // Atmos. Ocean. Opt. 1991. V. 4, N 12. P. 905–909.
6. *Lukin V.P.* On the variance of the Eikonal difference for different wave frequencies // Atmos. Ocean. Opt. 1988. V. 1, N 9. P. 38–42.

V.Yu. Venediktov, D.V. Venediktov, A.V. Gorelaya, A.D. Dmitrieva, D.I. Dmitriev, A.V. Kudryashov, I.L. Lovchii, A.D. Tsvetkov, E.V. Shalymov, Yu.V. Sheldakova, E.V. Shubenkova. **The study of propagation and adaptive optics correction of a laser beam along an atmospheric path protected from external influence.**

The paper considers the performance of an adaptive optics system and its components at an artificial atmospheric beamlet, which can provide the controlled and reproducible influence onto the radiation beam along its path. The paper outlines the results of experimental investigation of the polychrome radiation wavefront distortions measured with the use of two Shack–Hartmann sensors. Qualitative and quantitative comparisons of wavefront parameters were carried out. The relationships between the wavefront parameters and the radiation wavelength were revealed for various lengths of the atmospheric path.