

На правах рукописи

ГАЛАКТИОНОВ Илья Владимирович

**УВЕЛИЧЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОКУСИРОВКИ
РАСSEЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ**

01.04.03 — радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук» (ИДГ РАН, г. Москва).

Научный руководитель: Шелдакова Юлия Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук», г. Москва.

Научный консультант: Кудряшов Алексей Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

Официальные оппоненты: Канев Фёдор Юрьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», г. Томск;

Кириллин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится "___" _____ 2021 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Федеральном исследовательском центре Институт прикладной физики Российской академии наук (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте rfbran.ru Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики Российской академии наук.

Автореферат разослан "___" _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты численных и экспериментальных исследований улучшения фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь оптически рассеивающую среду, методами и средствами адаптивной оптики.

Актуальность исследований

Рассеяние света на оптических неоднородностях среды приводит к разрушению его пространственной когерентности, что оказывает негативное влияние как на передачу энергии и информации с помощью лазерного излучения по беспроводным каналам связи, так и на дальность видимости объектов и качество их изображений [1, 2]. В задачах беспроводной передачи энергии рассеяние приводит к уширению лазерного пучка, при этом его энергия перераспределяется и из центральной части переходит в ореол. Влияние рассеяния света на изображение наблюдаемого объекта выражается в ухудшении контрастности, детализации и уменьшении яркости. Решение задачи минимизации влияния эффекта рассеяния является актуальным для самых разных приложений: в медицине — для исследования глазного дна и бесконтактной диагностики опухолей; в океанологии — для исследования состава морской воды и увеличения дальности видимости под водой; в авиации, в военной отрасли — для распознавания образов и увеличения дальности видимости объектов в неблагоприятных погодных условиях; в энергетической и информационной отрасли — для беспроводной передачи энергии на околоземные орбиты и передачи информации на горизонтальных атмосферных трассах [3-5].

Можно выделить два класса атмосферных задач, для которых важно компенсировать негативное влияние эффекта аэрозольного рассеяния. Во-первых, это задачи фокусировки лазерного излучения в системах беспроводной передачи энергии или информации на дальние расстояния. В результате рассеяния, например, в тумане протяжённостью от сотен метров до нескольких километров может теряться существенная часть энергии излучения (95 % и более). Во-вторых, это задачи наблюдения за удалёнными объектами — рассеяние излучения существенно снижает дальность видимости. Например, в условиях тумана или пыльной бури дальность видимости колеблется от десятков метров до нескольких километров, в облаках и в условиях смога — от нескольких метров до нескольких сотен метров [6, 7].

Среди методов, предназначенных для компенсации негативного влияния процесса рассеяния оптического излучения, выделяют следующие три группы. В первую группу входят *методы пространственной и временной фильтрации* [8, 9], использующие для фокусировки или формирования изображения объекта только ту составляющую потока излучения, которая распространяется сквозь рассеивающую среду без взаимодействия с частицами (без рассея-

ния), и блокирующие рассеянное излучение. Недостаток таких методов заключается в том, что интенсивность нерассеянной компоненты излучения убывает экспоненциально [4] с ростом концентрации рассеивателей или протяжённости слоя среды согласно закону Бугера-Ламберта-Бэра. Это существенно ограничивает область применения методов пространственной и временной фильтрации.

Во вторую группу входят *методы формирования волнового фронта* [10] с помощью фазовых корректоров с высоким пространственным разрешением управляющих элементов, таких как фазовые пространственные модуляторы света (SLM) или микроэлектромеханические зеркала (MEMS). Эти методы используются для сильно рассеивающих сред или так называемых сплошных случайных сред по классификации Исимару [11] (например, для биологических тканей), где глубина проникновения излучения вглубь образца не превышает 1 мм [12], а концентрация рассеивателей может достигать десятков миллионов частиц на кубический миллиметр [4]. Поэтому такие методы предназначены для работы с многократно рассеянным диффузным излучением, требуют использования корректоров с высоким разрешением управляющих элементов, и, как следствие, применения небыстродействующих алгоритмов оптимизации для достижения желаемого результата.

К третьей группе относятся *методы адаптивной оптики*, позволяющие управлять фазой когерентного и частично-когерентного излучения с использованием адаптивных фазовых корректоров различных типов (биморфных зеркал, зеркал на пьезоактуаторах, сегментированных зеркал). Традиционная адаптивная оптика широко применяется в астрономии для компенсации атмосферной турбулентности, характеризуемой флуктуациями показателя преломления, и увеличения разрешения изображений наблюдаемых небесных объектов. Но, помимо турбулентных флуктуаций показателя преломления, в атмосфере на пути распространения излучения могут присутствовать мелко-дисперсные частицы — аэрозоль.

Режим, в котором работает традиционная адаптивная оптика, и режим, в котором применяются методы формирования волнового фронта, представляют собой 2 крайних, пограничных случая. В первом случае пространственная когерентность сохраняется по всей апертуре пучка, во втором случае — фаза в каждой точке апертуры не связана с фазой в соседних точках, то есть пространственная когерентность теряется. В настоящей работе мы исследовали срединный режим, так называемый режим кроссовера [13] — когда на пути распространения пучка присутствует рассеивающий аэрозоль, но концентрация частиц в нём такова, что достаточная доля излучения проходит слой аэрозоля без взаимодействия с рассеивателями (то есть сохраняет когерентность). Таким образом, можно считать, что в срединном режиме допустимо говорить о некоем среднем волновом фронте или об усреднённой фазе, компенсируя которую с помощью адаптивного зеркала, мы можем улучшить качество фокусировки излучения. Тем не менее, энергия в световом пучке в результате

рассеяния на оптических неоднородностях среды перераспределяется. Это приводит к тому, что при фокусировке светового пучка интенсивность в диске Эйри (далее – в фокальном пятне), регистрируемом оптической системой в фокальной плоскости, уменьшается. Для решения этой проблемы предлагается использовать методы адаптивной оптики. Корректность их применения объясняется режимом умеренного рассеяния в ограниченном слое атмосферного аэрозоля, при котором количество актов взаимодействия излучения с рассеивающими частицами не превышает десяти. В частности, необходимо проведение модельных и экспериментальных оценок искажений, вносимых рассеивающей средой в усреднённый волновой фронт излучения и приводящих к уширению пучка и, как следствие, к уменьшению эффективности его фокусировки. На основании выполненных статистических оценок необходимо провести расчёты параметров адаптивной системы и разработать алгоритмы для улучшения качества фокусировки (уменьшения диаметра пятна и увеличения пиковой интенсивности) лазерного пучка, распространяющегося сквозь рассеивающую среду и регистрируемого с помощью оптической системы.

Цель работы

Цель диссертационной работы заключается в численном и экспериментальном исследовании возможности применения методов и средств адаптивной оптики для увеличения эффективности фокусировки лазерного излучения видимого диапазона при распространении сквозь слой случайно-неоднородной среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9, которая характеризует атмосферный туман средней плотности протяжённостью от 300 метров до нескольких километров.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технические задачи:

1. Моделирование распространения коллимированного ограниченного лазерного пучка сквозь рассеивающую среду методом Монте-Карло.
2. Разработка математической модели датчика Шака-Гартмана для численной оценки искажений рассеянного излучения.
3. Создание экспериментальной установки для измерения искажений рассеянного излучения и верификации разработанной модели.
4. Разработка алгоритма численной оценки эффективности коррекции искажений параметров пространственно-угловой структуры рассеянного лазерного пучка и улучшения его фокусировки.
5. Создание лабораторной экспериментальной установки для анализа процесса фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь рассеивающую суспензию полистироловых микросфер в дистиллированной воде, помещённую в стеклянную кювету.

Научная новизна

1. Впервые разработана численная модель для качественной оценки искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды, с использованием принципа Шака-Гартмана.
2. Впервые численно и экспериментально показано, что в усреднённом волновом фронте лазерного излучения видимого диапазона при распространении сквозь рассеивающую среду с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9, которая соответствует туману средней плотности протяжённостью от 300 метров до нескольких километров, присутствует не только дефокусировка, но и сферические аберрации второго и четвёртого порядков, причём с ростом концентрации рассеивателей в среде в указанном выше диапазоне величина этих аберраций возрастает.
3. Впервые экспериментально показано, что применение метода фазового сопряжения в адаптивной оптической системе с датчиком Шака-Гартмана и биморфным зеркалом с 48 управляющими электродами, расположенными в 6 кольцах, позволяет увеличить пиковую интенсивность фокального пятна излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9, не менее чем на 13 %.
4. Впервые экспериментально показано, что применение метода апертурного зондирования в адаптивной оптической системе с ПЗС-камерой в качестве анализатора распределения интенсивности в дальней зоне и биморфным зеркалом с 48 управляющими электродами, расположенными в 6 кольцах, позволяет увеличить пиковую интенсивность фокального пятна излучения, прошедшего сквозь слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9, не менее чем на 60 %.

Практическая ценность

1. Разработанная модель датчика Шака-Гартмана, интегрированная в симулятор распространения лазерного излучения сквозь рассеивающую среду с использованием метода Монте-Карло, позволяет оценивать величину искажений усреднённого волнового фронта излучения, прошедшего случайно-неоднородную среду, в терминах полиномов Цернике.
2. Продемонстрированное в модели и подтверждённое лабораторным экспериментом наличие в усреднённом волновом фронте лазерного излучения видимого диапазона, распространяющегося сквозь рассеивающую среду с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9, не только дефокусировки, но и сферических аберраций четвёртого и шестого порядков, обуславливает необходимость использова-

ния средств и методов адаптивной оптики для улучшения фокусировки такого излучения.

3. Разработанный алгоритм и соответствующее программное обеспечение позволяют численно оценивать эффективность коррекции искажений усреднённого волнового фронта, используя лишь функции отклика адаптивного зеркала.
4. Использование метода фазового сопряжения и метода апертурного зондирования для управления лазерным излучением, прошедшим сквозь слой рассеивающей среды, с помощью биморфного деформируемого зеркала в составе адаптивной оптической системы позволяет увеличить пиковую интенсивность фокального пятна в дальней зоне.
5. Коррекция искажений усреднённого волнового фронта рассеянного излучения с помощью адаптивной оптической системы необходима для увеличения дальности распространения лазерного пучка через рассеивающий аэрозоль, что актуально для повышения эффективности систем беспроводной передачи информации, для задач беспроводной передачи энергии в атмосфере (например, для энергоснабжения труднодоступных объектов), для задач увеличения глубины проникновения зондирующего излучения в биологические ткани и многих других задач.

Методы исследования

Для моделирования распространения лазерного излучения сквозь слой рассеивающей среды применялся стохастический метод Монте-Карло. Численные оценки и экспериментальные измерения усреднённого волнового фронта лазерного излучения выполнялись с использованием метода Шака-Гартмана. Решение систем линейных алгебраических уравнений для вычисления коэффициентов разложения усреднённого волнового фронта по полиномам Цернике и для расчёта вектора управляющих напряжений на биморфном зеркале осуществлялось с применением метода наименьших квадратов. Для подтверждения разработанных численных моделей использовались методы и средства лабораторного эксперимента.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Численно и экспериментально показано, что в усреднённом волновом фронте лазерного излучения с длиной волны 0.65 мкм, распространяющегося сквозь рассеивающий слой толщиной 5 мм с показателем рассеяния в диапазоне от 0.2 до 2 мм⁻¹ (что соответствует оптической толщине от 1 до 10) и фактором анизотропии 0.9, сформированный взвешенными в дистиллированной воде полистироловыми микросферами диаметром 1 мкм и концентрацией в диапазоне от 10⁵ до 10⁶ мм⁻³, присутствует не только дефокусировка, но и сферические аберрации четвёртого и шестого порядков, причём с ростом концентрации рассеивателей величина этих аберра-

ций возрастает. Согласно принципу подобия, такая среда моделирует слой тумана протяжённостью от 300–500 метров до нескольких километров.

2. Применение метода фазового сопряжения в адаптивной оптической системе с датчиком Шака-Гартмана и биморфным деформируемым зеркалом с 48 управляющими электродами, расположенными в 6 кольцах, позволяет увеличить не менее чем на 13 % пиковую интенсивность фокального пятна, формируемого излучением, распространяющимся сквозь слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9.
3. Применение метода апертурного зондирования в адаптивной оптической системе с анализатором распределения интенсивности на основе ПЗС-камеры и биморфным зеркалом с 48 управляющими электродами, расположенными в 6 кольцах, позволяет увеличить не менее чем на 60 % пиковую интенсивность фокального пятна, формируемого излучением, распространяющимся сквозь слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9.

Апробация результатов работы

Материалы диссертации докладывались на следующих международных и российских конференциях: международная конференция OSA Imaging and Applied Optics Congress (Vancouver, Canada, 2020), международная конференция Optical Wireless and Fiber Power Transmission (Yokohama, Japan, 2019), международная конференция SPIE Optical Manipulation Conference (Yokohama, Japan, 2018); 16-я, 17-я и 18-я международная конференция Laser Optics (Санкт-Петербург, 2014, 2016 и 2018); ежегодная международная конференция SPIE. Photonics West (San Francisco, USA, 2015–2021); ежегодная международная конференция SPIE. Optics+Photonics (San Diego, USA, 2015–2019); 9-й, 11-й и 12-й международный воркшоп по адаптивной оптике для промышленности и медицины (Stellenbosch, SAR, 2013; Padova, Spain, 2017; Delft, Netherlands, 2019); семинар в High Energy Laser Joint Technology Office (Albuquerque, USA, 2014); семинар в Институте Френеля, (Марсель, Франция, 2013); международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2018); международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Иркутск, Россия, 2017, Москва, Россия, 2020); XXIII рабочая группа «Аэрозоли Сибири» (Томск, Россия, 2016); международный симпозиум Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (Москва–Санкт-Петербург, Россия, 2017); международная научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии» (Москва, Россия, 2017, 2018, 2020, 2021); международная конференция CAOL-2016 (Одесса, Украина, 2016).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 34 работы, в том числе 3 работы в рецензируемых журналах, 27 работ, индексируемых в базе данных Scopus, 20 работ — в базе данных РИНЦ и 20 работ — в базе данных Web of Science. Список всех опубликованных по теме диссертации работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично или в соавторстве при непосредственном его участии. Разработка пакета программ для численного моделирования, получение экспериментальных результатов, их обработка и анализ выполнены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 200 наименований. Общий объем диссертации 159 страниц, включая 75 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обосновывается актуальность разрабатываемой темы, отмечается её научная новизна и практическая ценность, формулируются выносимые на защиту положения, а также кратко излагается содержание и структура диссертации по главам.

Глава I. Рассеяние оптического излучения. Методы управления рассеянным излучением

Первая глава диссертации посвящена описанию основных параметров оптически рассеивающих сред, таких как индикатриса рассеяния, фактор анизотропии, показатель ослабления излучения, длина свободного пробега фотона. Приводится обзор литературы, посвящённой задачам наблюдения за объектами и фокусировки лазерного излучения сквозь рассеивающие среды, а также описание реализованной модели распространения излучения в рассеивающей среде. Основные результаты представленных в настоящей главе исследований опубликованы в работах из списка публикаций автора в конце автореферата [1, 5, 7, 25, 33, 34].

В первом параграфе приводится обзор литературных источников, посвящённых проблеме рассеяния излучения в различных случайно-неоднородных средах. Обосновывается актуальность и важность решения задач увеличения

дальности видения объектов и повышения качества фокусировки лазерного излучения для широкого спектра приложений: беспроводная передача энергии на дальние расстояния, уничтожение космического мусора на околоземной орбите, квантовая связь, обеспечение коммуникации с беспилотными летательными аппаратами, наблюдение за объектами сквозь туман, обнаружение летательных аппаратов сквозь облака, обнаружение объектов под водой, медицинская неинвазивная диагностика, например, для исследования состояния кровеносных сосудов и сетчатки глаза.

Во втором параграфе даётся определение рассеяния оптического излучения, описаны особенности упругого и неупругого рассеяния, рассмотрены различные виды рассеяния, такие как рассеяние Рэлея, Ми, Рамана (комбинационное), Манделъштама – Бриллюэна и Тиндала. Описываются особенности режимов однократного и многократного рассеяния, а также переходного режима [14].

В третьем параграфе приводятся причины оптической неоднородности среды [14], рассматриваются ключевые параметры рассеивающей среды, такие как относительный показатель преломления, индикатриса рассеяния, фактор анизотропии и показатель ослабления. Даётся определение индикатрисы рассеяния, приводятся различные формы индикатрис для разных соотношений размера рассеивателей и длины волны падающего излучения; представлены графики зависимости фактора анизотропии от длины волны излучения при заданных размерах рассеивателей и от размера рассеивателей при заданных значениях длины волны излучения; дано определение одной из ключевых характеристик рассеивающей среды — показателя ослабления излучения [15].

В четвёртом параграфе даётся математическое описание процесса рассеяния излучения в среде с использованием передаточных матриц.

В пятом параграфе рассматриваются активные методы управления рассеянным излучением: методы фазовой модуляции (основанные на пошаговом последовательном алгоритме, непрерывном последовательном алгоритме, декомпозиционном алгоритме и алгоритме, использующем передаточные матрицы) и бинарной амплитудной модуляции (основанные на генетическом алгоритме и алгоритме бинарных передаточных матриц) [16]; метод фазового сопряжения и метод апертурного зондирования. Приводится описание принципиальной схемы традиционной адаптивной оптической системы [17].

В шестом параграфе даётся обоснование возможности перехода от реальной атмосферной трассы, где характерный масштаб изменяется от сотен метров до десятков километров, к её имитационной лабораторной модели, уменьшающей характерный масштаб до нескольких миллиметров, за счёт использования принципа подобия [18]. Согласно этому принципу, если в различных средах одинаковы индикатрисы рассеяния и значения альbedo однократного рассеяния (вероятности выживания фотона), то и интенсивность света в точках с одинаковыми безразмерными координатами также одинакова. Это означает, что величина свободного пробега фотона в среде определяет

лишь масштаб подобия. То есть если требования принципа подобия будут удовлетворены, то результаты, получаемые в лабораторном эксперименте, где размеры рассеивающего слоя исчисляются миллиметрами, будут справедливы и для атмосферной трассы, где размеры рассеивающего слоя исчисляются десятками и сотнями метров. Конечно, при этом необходимо выдерживать пропорциональность таких оптических координат, как протяжённость рассеивающего слоя и расстояние между рассеивателями, определяемое концентрацией. В параграфе приводится пример расчёта подобия некоторых характеристик (таких, как индикатриса рассеяния и альbedo однократного рассеяния) атмосферной трассы с туманом в качестве аэрозольной рассеивающей среды и лабораторной трассы в виде суспензии полистироловых микросфер диаметром 1 мкм, взвешенных в дистиллированной воде. Концентрация рассеивателей в тумане средней плотности может составлять 1000 см^{-3} (или 1 мм^{-3}). С другой стороны, используя модельную (лабораторную) рассеивающую среду, мы можем создать концентрацию частиц порядка $10^5\text{--}10^6 \text{ мм}^{-3}$. То есть, согласно принципу подобия 1 мм модельной среды будет соответствовать примерно 100 м тумана средней плотности. Таким образом, используя в качестве модельной рассеивающей среды, например, стеклянную кювету с полезной толщиной 5 мм и заполняя её раствором, имитирующим рассеивающую среду с концентрацией от 10^5 до 10^6 мм^{-3} , можно получить эквивалент (с точки зрения оптических характеристик) слоя тумана средней плотности протяжённостью приблизительно от 500 м до 5 км.

В седьмом параграфе приводится описание реализованной модели рассеяния излучения и используемого для этого метода стохастического моделирования траекторий фотонов Монте-Карло [19]. Дается определение баллистических, приосевых и диффузных фотонов (Рис. 1, а). Моделирование перемещения фотона в рассеивающей среде осуществляется путём расчёта 3 параметров: длины свободного пробега l , угла рассеяния θ и азимутального угла ψ . Длина свободного пробега фотона — это расстояние между двумя последовательными событиями взаимодействия фотона с рассеивателем, которое вычисляется по формуле:

$$l = -\frac{1}{\mu_s} * \ln(\xi_l),$$

где μ_s — показатель рассеяния среды [20] (определяет количество актов рассеяния на единицу длины), ξ_l — равномерно-распределённая на полуинтервале $[0, 1)$ случайная величина. Азимутальный угол — это угол между проекцией нового направления движения фотона на плоскость, перпендикулярную начальному направлению, и некоторой фиксированной осью на этой плоскости. Для вычисления угла рассеяния θ и азимутального угла ψ используются следующие формулы [15]:

$$\cos \theta = \left\{ \frac{1}{2g} \cdot \left[1 + g^2 - \left(\frac{1-g^2}{1-g+2g\xi_\theta} \right)^2 \right], \text{ если } g > 0 \quad 2\xi_\theta - 1, \text{ если } g = 0 \right\},$$

$$\psi = 2\pi\xi_\psi,$$

где g — фактор анизотропии, ξ_θ, ξ_ψ — равномерно-распределённые на полуинтервале $[0, 1)$ случайные величины.

По результатам моделирования были построены графики зависимости количества баллистических, приосевых и диффузных фотонов от концентрации рассеивателей в среде (Рис. 1б). Из графика видно, что до значения концентрации порядка $8 \cdot 10^5 \text{ мм}^{-3}$ количество приосевых фотонов превышает количество диффузных фотонов. Одна из целей настоящей работы — изменить траектории рассеянных фотонов таким образом, чтобы увеличить пиковую интенсивность и уменьшить диаметр фокального пятна, используя методы и средства адаптивной оптики.

Глава оканчивается кратким описанием функционала разработанного программного обеспечения для моделирования распространения лазерного излучения сквозь рассеивающую среду. Представлены результаты успешной верификации реализованной модели на данных, получаемых с помощью модели «МСМЛ», написанной Лионгом Вангом и Стивенем Джакесом. Собственная реализация уже созданной ранее модели распространения излучения в рассеивающей среде была необходима для того, чтобы в дальнейшем её модифицировать, дополнив алгоритмом анализа волнового фронта по принципу Шака-Гартмана [21]. В качестве критериев сравнения использовались такие величины, как количество фотонов, прошедших сквозь слой рассеивающей среды и отраженных от неё, количество фотонов с заданным порядком рассеяния и количество фотонов, регистрируемых на заданном участке сенсора. Показано, что расчётная точность воспроизведения результатов превышает 99 %.

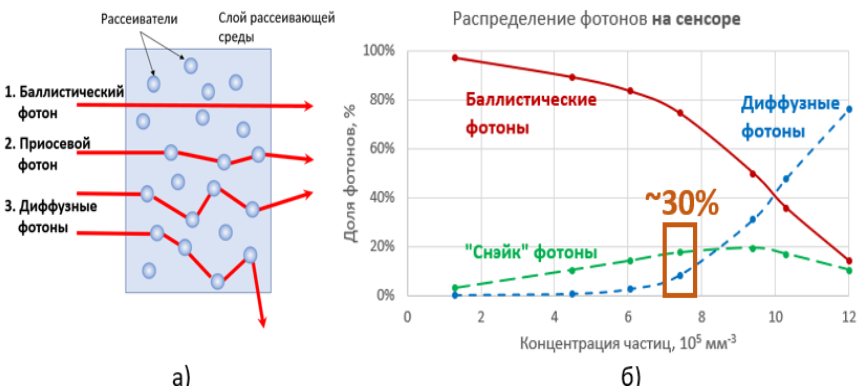


Рис. 1. а) Примеры траекторий баллистических, приосевых и диффузных фотонов при распространении в слое рассеивающей среды; б) график зависимости количества баллистических, приосевых и диффузных фотонов от концентрации рассеивающей среды для описанной конфигурации системы. По оси абсцисс отложены значения концентрации частиц, по оси ординат — доля фотонов на сенсоре (100% — это общее число фотонов, зарегистрированных на сенсоре). В качестве примера прямоугольником на графике выделена доля небаллистических фотонов (30 %), изменение траекторий которых может позволить увеличить пиковую интенсивность фокального пятна

Глава II. Измерение усреднённого волнового фронта излучения, распространяющегося сквозь рассеивающую среду

Вторая глава диссертации посвящена описанию разработанной модели оценки искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды, а также экспериментальной верификации модели. Основные результаты представленных в настоящей главе исследований опубликованы в работах из списка публикаций автора в конце автореферата [1, 3, 6, 30–32].

В первом параграфе приводится обоснование корректности измерения усреднённой фазы излучения, распространяющегося сквозь рассеивающую среду. Традиционная адаптивная оптика работает с фазой излучения — улучшает качество изображения наблюдаемого объекта или качество фокусировки лазерного пучка на мишени путём компенсации aberrаций волнового фронта. С точки зрения геометрической оптики в этом случае каждую точку на поверхности фазового корректора можно соединить единственным лучом с соответствующей точкой на приёмнике излучения. С другой стороны, если говорить о методах формирования волнового фронта (wavefront shaping) [13], то такого взаимно-однозначного соответствия между точками установить нельзя ввиду сильного многократного рассеяния света в объекте, в результате которого все лучи «перемешиваются» и формируют на приёмнике спекл-структуру вместо желаемого изображения объекта или фокального пятна. Два рассмотренных режима — режим, в котором работает традиционная адаптивная оптика, и режим, в котором применяются методы формирования волнового фронта, — представляют собой 2 крайних, пограничных случая. В первом случае пространственная когерентность сохраняется по всей апертуре пучка, во втором случае — фаза в каждой точке апертуры не связана с фазой в соседних точках, то есть пространственная когерентность теряется. Однако, как было показано в главе 1, количество баллистических фотонов (когерентная составляющая) преобладает в излучении, распространяющемся сквозь слой рассеивающей среды с рассматриваемыми нами концентрациями от 10^5 мм⁻³ до 10^6 мм⁻³. Например, для концентрации $7.4 \cdot 10^5$ мм⁻³ всего 20% фотонов — приосевые и 10% — диффузные. Таким образом, можно считать, что мы работаем в некоем срединном режиме, так называемом режиме кроссовера, когда можно вести речь о среднем волновом фронте или об усреднённой фазе. В параграфе описывается принцип измерения aberrаций волнового фронта излучения, используемый в датчике Шака-Гартмана [21]. Дается определение круговых полиномов Цернике [22], применяемых при аппроксимации волнового фронта.

Во втором параграфе описывается разработанная модель оценки искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды толщиной 5 мм с концентрацией частиц диаметром 1 мкм от 10^5 до 10^6 мм⁻³, с использованием принципа Шака-Гартмана (Рис. 2).

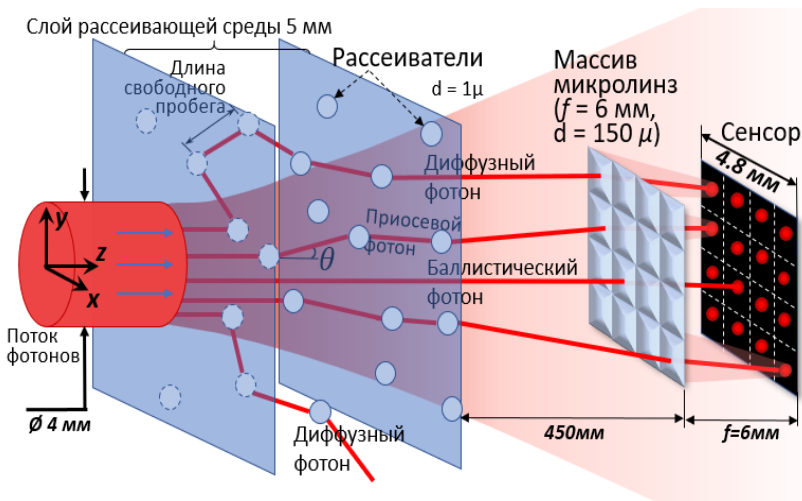


Рис. 2. Модель распространения потока фотонов сквозь слой рассеивающей среды и анализ искажений усреднённого волнового фронта с использованием принципа Шака-Гартмана. Размер микролинзового раstra в модели и в эксперименте составлял порядка 37×37 микролинз

Согласно результатам моделирования, с ростом концентрации рассеивателей наблюдается возрастание амплитуды центрально-симметричных искажений усреднённого волнового фронта до 1.9 мкм (среднеквадратичное отклонение возрастает до 0.4 мкм).

В третьем параграфе приводится описание созданной лабораторной экспериментальной установки с датчиком Шака-Гартмана, предназначенной для измерения искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь кювету с рассеивающей суспензией частиц (Рис. 3).

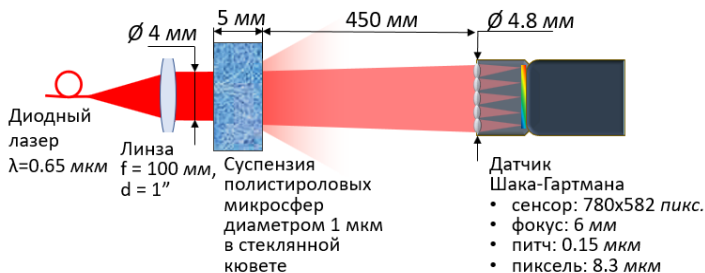


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь стеклянную кювету с суспензией полистироловых микросфер диаметром 1 мкм в дистиллированной воде

Представлены графики сравнения амплитуд искажений усреднённого волнового фронта, полученных в модели и в лабораторном эксперименте (Рис. 4). Графики показывают схожую тенденцию возрастания величины искажений усреднённого волнового фронта рассеянного лазерного пучка с ростом концентрации рассеивателей в среде в диапазоне от 10^5 мм^{-3} до 10^6 мм^{-3} как для модели, так и для лабораторного эксперимента. Расхождение графиков модели и эксперимента объясняется следующим образом. Во-первых, в модели не воспроизводится начальное распределение интенсивности диодного лазерного источника (Рис. 4, в), используемого в эксперименте — для генерации начального распределения фотонов по апертуре используется датчик равномерно-распределённых случайных чисел (Рис. 4, б). Во-вторых, в модели не учитывается дифракция в результате свободного распространения излучения. При больших значениях концентрации в результате дифракции фокальные пятна на датчике Шака-Гартмана в центральной части пучка смещаются от центров субапертур, что приводит к появлению дополнительной дефокусировки — в модели этого не наблюдается. По этой причине экспериментальная кривая возрастает быстрее модельной при больших значениях концентраций. В-третьих, в эксперименте помимо центрально-симметричных aberrаций в усреднённом волновом фронте присутствовали также прочие искажения (в частности, aberrация кома), которых в модели не могло быть в принципе ввиду симметричности природы рассеяния Ми на сферических частицах.

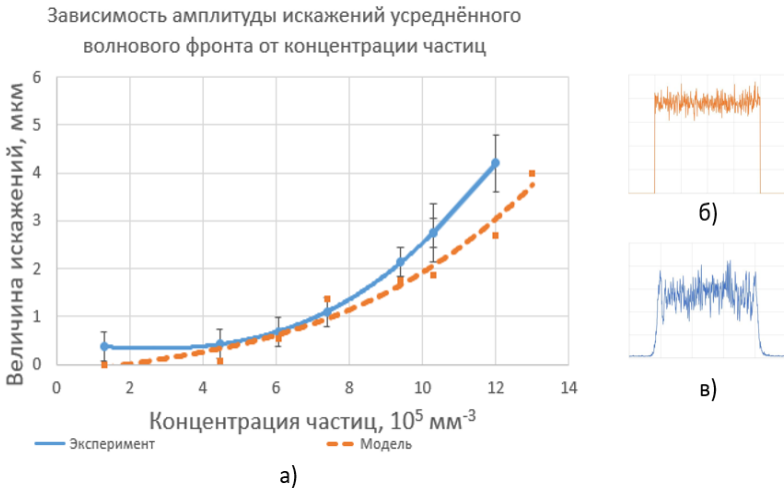


Рис. 4. а) Графики зависимости амплитуды искажений усреднённого волнового фронта от концентрации рассеивателей в диапазоне от 10^5 мм^{-3} до 10^6 мм^{-3} для модельных (пунктирная линия) и экспериментальных (сплошная линия) измерений; б) профиль распределения количества фотонов по апертуре в модели; в) профиль начальной интенсивности лазерного пучка до рассеивающей среды в эксперименте

Это было связано с тем, что стенки стеклянной кюветы были неплоскопараллельными — в результате в лазерный пучок вносился дополнительный наклон и, как следствие, aberrация кома. Амплитуда aberrаций усреднённого волнового фронта (Peak-to-valley, PV) лазерного пучка, прошедшего сквозь пустую кювету (Рис. 5), составила 1.05 мкм (1.62λ), среднеквадратическое отклонение (RMS) оказалось равным 0.3 мкм (0.46λ), наклон по оси X составил $-0.6 \mu\text{м}$ (-0.92λ), величина комы по оси X составила $-0.05 \mu\text{м}$ (-0.08λ). По мере заполнения кюветы рассеивающей суспензией увеличивалась также aberrация кома вследствие смещения пучка от оптической оси системы.

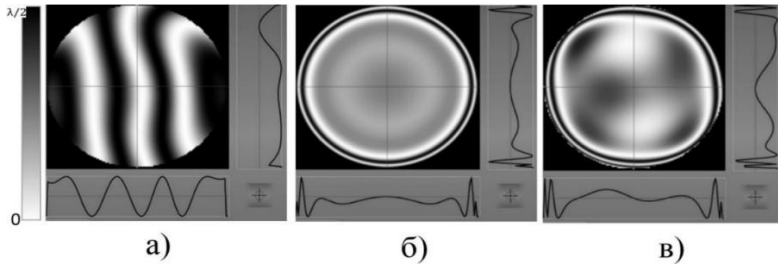


Рис. 5. а) Aberrации, вносимые стеклянной кюветой, б) «ожидаемая», симметричная интерферограмма усреднённого волнового фронта излучения, прошедшего сквозь рассеивающую среду с концентрацией рассеивателей $7.4 \times 10^5 \text{мм}^{-3}$, в) интерферограмма экспериментально измеренного усреднённого волнового фронта

Также в параграфе приводится описание разработанной методики, экспериментальной установки и функционала созданного программного обеспечения для измерения концентрации рассеивающей суспензии полистироловых микросфер, использующей закон ослабления излучения Бугера-Ламберта-Бэра [23]. Для измерения уровня интенсивности лазерного пучка, прошедшего сквозь стеклянную кювету с рассеивающей суспензией, использовалась ПЗС-камера Basler scA640-120gm с $\frac{1}{4}$ -дюймовым сенсором с разрешением 659×494 пикселей (физический размер сенсора $3.69 \times 2.77 \text{мм}$) и размером пикселя $5.6 \mu\text{м}$. Перед выполнением собственно эксперимента была проведена калибровка камеры на предмет линейности отклика сенсора на используемом участке чувствительности для заданной длины волны излучения. Зная экспериментально измеренные значения интенсивности излучения до и после добавления в кювету суспензии полистироловых микросфер и зная толщину кюветы, из закона Бугера-Ламберта-Бэра вычислялся показатель экстинкции μ_e :

$$\mu_e = -\frac{\ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right)}{l}.$$

Однако, поскольку для используемой длины волны 0.65 мкм поглощением полистироловых микросфер можно пренебречь, показатель экстинкции μ_e становится равным показателю рассеяния μ_s . Далее, зная толщину рассеивающего слоя, диаметр рассеивателей, показатель рассеяния и длину волны излучения, в численной модели, описанной в Главе 1, итерационным способом подбиралось значение концентрации рассеивателей и значение показателя рассеяния μ_s такое, чтобы соотношение интенсивностей до и после добавления рассеивателей в кювету совпадало с экспериментально полученным результатом.

Глава III. Фокусировка рассеянного лазерного излучения

Третья глава диссертации посвящена исследованию используемого деформируемого биморфного зеркала, описанию разработанного алгоритма численной коррекции искажений усреднённого волнового фронта и обсуждению результатов экспериментальной фокусировки рассеянного лазерного излучения. Основные результаты представленных в настоящей главе исследований опубликованы в работах из списка публикаций автора в конце автореферата [1, 2, 4, 15, 17–21, 25, 28, 33].

В первом параграфе приводится подробный обзор типов существующих корректоров волнового фронта с локальными и модальными функциями отклика и предъявляемых к ним требований, а также обосновывается выбор корректора на основе биморфного пьезоэлемента [24] для решения поставленной задачи фокусировки излучения сквозь рассеивающий аэрозоль.

Во втором и третьем параграфе представлено подробное описание разработанного и применяемого в работе биморфного адаптивного зеркала, состоящего из стеклянной подложки с отражающим покрытием и двух склеенных пластин из пьезокерамики (Рис. 6). При подаче управляющих напряжений на электроды, нанесённые на пьезокерамику, под действием обратного пьезоэлектрического эффекта пластины расширяются или сжимаются, что приводит к возникновению изгибающего момента, который деформирует отражающую поверхность зеркала, изменяя тем самым усреднённый волновой фронт излучения. В указанных параграфах приводятся основные характеристики зеркала и оценки его эффективности при коррекции аберраций усреднённого волнового фронта.

В четвёртом параграфе описывается эффективность воспроизведения заданных центрально-симметричных аберраций волнового фронта с помощью используемого биморфного зеркала. Для решаемой задачи это было необходимо, поскольку, как было показано в Главе 2, дефокусировка и сферическая аберрация низшего порядка вносят наибольший вклад в усреднённый волновой фронт излучения, распространяющегося сквозь оптически рассеивающий слой с концентрацией частиц от 10^5мм^{-3} до 10^6мм^{-3} .

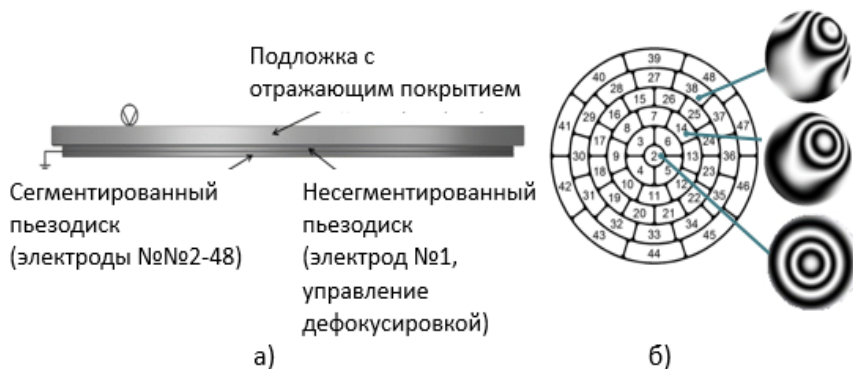


Рис. 6. Схема устройства биморфного деформируемого зеркала (а) и сетка электродов сегментированного пьезокерамического диска (б)

На Рис. 7 приведены интерферограммы волнового фронта, соответствующего полиномам Цернике №3 и №8, воспроизведённым с использованием биморфного адаптивного зеркала с 48 электродами. Амплитуда начальной поверхности волнового фронта, которую необходимо было воспроизвести, составляла 2 мкм и 1.2 мкм, соответственно. Остаточная ошибка воспроизведения — среднеквадратическое отклонение фазовой поверхности, вычисляемое как поточечная разность восстановленной и начальной поверхности — составила 0.03 мкм для дефокусировки и 0.005 мкм для сферической аберрации, что говорит о высокой эффективности воспроизведения заданных симметричных полиномов Цернике с помощью биморфного деформируемого зеркала.

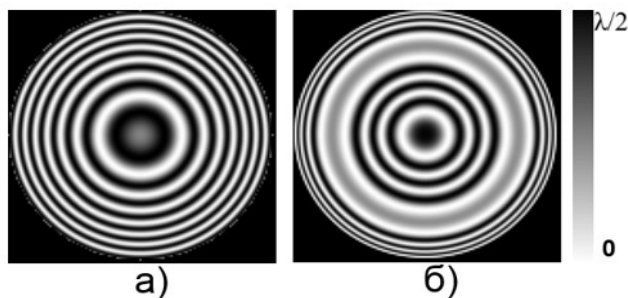


Рис. 7. Интерферограммы полиномов Цернике №3 (а) и №8 (б), воспроизведённых биморфным адаптивным зеркалом с 48 электродами

В пятом параграфе приводится разработанный алгоритм численной коррекции искажений усреднённого волнового фронта, основанный на разложении экспериментально измеренной усреднённой фазовой поверхности излучения, прошедшего сквозь рассеивающую среду, по измеренным функциям

отклика электродов биморфного адаптивного зеркала. Расчёт необходимых напряжений на электродах деформируемого зеркала осуществлялся таким образом, чтобы координаты центров фокальных пятен анализируемого пучка после подачи корректирующих напряжений максимально приблизились к координатам центров фокальных пятен опорного пучка.

Алгоритм численной коррекции аберраций усреднённого волнового фронта включал следующие действия:

1. Усреднённый волновой фронт в виде значений коэффициентов при полиномах Цернике, а также смещения фокальных пятен известны из экспериментальных измерений.

2. Из матрицы смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана $\{S_x^k, S_y^k\}$, соответствующей некоторому усреднённому волновому фронту, и матрицы значений функций отклика зеркала RF , также состоящей из смещений фокальных пятен, регистрируемых при подаче напряжения на каждый из электродов зеркала, получалась система линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов, являющихся значениями напряжений на электродах зеркала.

$$\{S_x^k, S_y^k\} = \sum_{j=1}^N U_j \cdot RF_j(x_k, y_k),$$

где S_x^k, S_y^k — известные значения смещений k -го фокального пятна по оси X и Y , соответственно, N — количество управляющих электродов зеркала, U_j — величина напряжения на j -м электроде, которую необходимо вычислить, $RF_j(x_k, y_k)$ — известное значение функции отклика j -го электрода в точке (x_k, y_k) .

Для решения такой системы уравнений использовался метод наименьших квадратов.

3. После вычисления вектора напряжений U , необходимых для компенсации измеренных смещений фокальных пятен, определялись соответствующие им смещения фокальных пятен $S_{corr_x^k}, S_{corr_y^k}$ по формуле:

$$\{S_{corr_x^k}, S_{corr_y^k}\} = \sum_{j=1}^N U_j \cdot RF_j(x_k, y_k),$$

4. Из значений смещений фокальных пятен $S_{corr_x^k}, S_{corr_y^k}$, определялось, какому усреднённому волновому фронту они соответствуют — то есть рассчитывались коэффициенты a_i при полиномах Цернике в результате решения системы линейных уравнений методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} \cdot \{S_{corr_x^k}, S_{corr_y^k}\} &= \left\{ \frac{\partial W(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \right\} \\ &= \left\{ \sum_i^N a_i \cdot \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x}, \sum_i^N a_i \cdot \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \right\}. \end{aligned}$$

5. Из вычисленных коэффициентов при полиномах Цернике для начальной поверхности усреднённого волнового фронта и рассчитанной поверхности зеркала, находилась поточечная разность этих поверхностей и определялась остаточная ошибка коррекции.

Выполненные численные оценки показали, что деформируемое зеркало способно эффективно скомпенсировать искажения усреднённого волнового фронта излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающих частиц с концентрацией от 10^5 до 10^6 мм⁻³ — в результате коррекции амплитуда искажений была уменьшена до 0.1 мкм (среднеквадратичное отклонение — до 0.016 мкм).

В шестом параграфе приводится схема созданной лабораторной адаптивной оптической системы (Рис. 8) с биморфным зеркалом, датчиком Шака-Гартмана и анализатором интенсивности, предназначенной для улучшения качества фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды с концентрацией частиц от 10^5 до 10^6 мм⁻³.

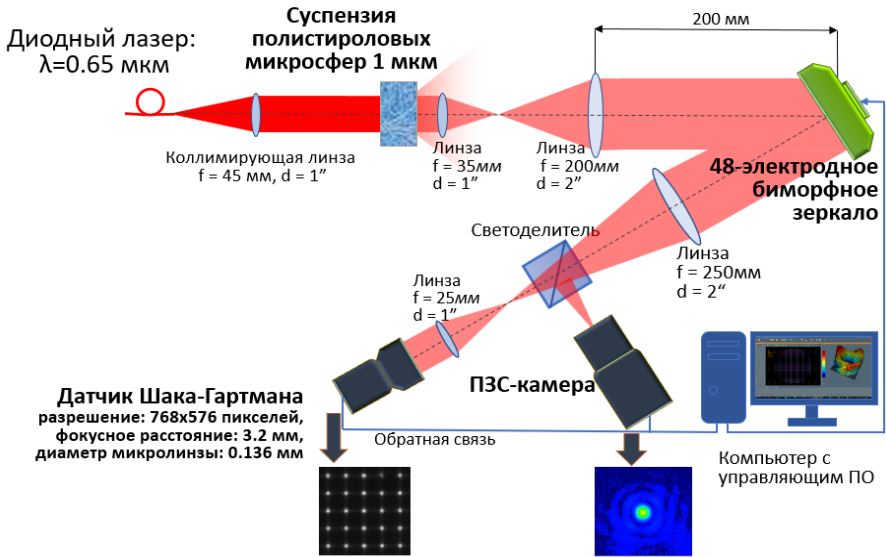


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для улучшения фокусировки лазерного пучка, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды, с помощью биморфного адаптивного зеркала

Излучение диодного лазера с длиной волны 0.65 мкм с волоконным выводом падало на коллимирующую линзу диаметром 25.4 мм и фокусным расстоянием 45 мм, далее параллельный пучок проходил сквозь стеклянную кювету с суспензией полистироловых микросфер диаметром 1 мкм, взвешенных в дистиллированной воде. Рассеянный пучок попадал на расширяющий теле-

скоп, состоящий из двух линз и сопрягающий плоскость выходной грани кюветы и плоскость биморфного зеркала DM2-50-48. После отражения от поверхности зеркала, пучок падал на сужающий телескоп, в котором с помощью светоделиителя разделялся на 2 части. Одна часть пучка попадала на датчик Шака-Гартмана для измерения усреднённого волнового фронта, а другая часть фокусировалась на ПЗС-камеру с микро-объективом, где формировалось фокальное пятно, улучшение качества которого и являлось одной из целей настоящей работы. Данные, получаемые с датчика Шака-Гартмана и с анализатора фокального пятна, поступали в персональный компьютер, где выполнялась их обработка и расчёт управляющих напряжений, которые необходимо было подавать на электроды адаптивного зеркала.

Для увеличения эффективности фокусировки использовались 2 алгоритма оптимизации: алгоритм фазового сопряжения [25] и алгоритм апертурного зондирования [26].

Алгоритм фазового сопряжения минимизировал смещения фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, вызванных аберрациями усреднённого волнового фронта, путём изменения профиля отражающей поверхности биморфного зеркала. Цель алгоритма заключалась в минимизации функционала:

$$\{S_x^k, S_y^k\} = \sum_{j=1}^N U_j \cdot RF_j(x_k, y_k) \rightarrow \text{MIN},$$

где S_x^k, S_y^k — известные значения смещений k -го фокального пятна по оси X и Y , соответственно, N — количество управляющих электродов зеркала, U_j — величина напряжения на j -м электроде, которую необходимо вычислить, $RF_j(x_k, y_k)$ — известное значение функции отклика j -го электрода в точке (x_k, y_k) .

Поскольку и смещения фокальных пятен, и функции отклика представлялись в матричном виде, необходимо было решить систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений напряжений U . Для этого использовался метод наименьших квадратов.

Цель алгоритма апертурного зондирования или алгоритма «восхождения на холм» заключалась в максимизации плотности энергии в фокальном пятне в дальней зоне, то есть в уменьшении диаметра фокального пятна до дифракционного при одновременном увеличении его пиковой интенсивности. В настоящей работе была подобрана следующая целевая функция, которую необходимо было минимизировать:

$$\frac{1}{M} \cdot (D_x + D_y) \cdot (D_x, D_y) \rightarrow \text{MIN},$$

где D_x — диаметр фокального пятна на ПЗС-камере вдоль оси X , D_y — диаметр фокального пятна на ПЗС-камере вдоль оси Y , M — пиковая интенсивность фокального пятна.

Эффективность работы адаптивной оптической системы оценивалась по приросту E пиковой интенсивности фокального пятна в дальней зоне до и после применения алгоритмов оптимизации:

$$E = \frac{I_{\text{после}} - I_{\text{до}}}{I_{\text{до}}} \cdot 100\%,$$

где $I_{\text{после}}$ — значение пиковой интенсивности фокального пятна после запуска алгоритма оптимизации, $I_{\text{до}}$ — значение пиковой интенсивности фокального пятна до запуска алгоритма оптимизации.

В конце шестого параграфа приводятся результаты работы системы, показывающие, что для рассеивающей среды с концентрацией частиц $3.3 \times 10^5 \text{мм}^{-3}$ применение метода фазового сопряжения (анализирующего данные с датчика Шака-Гартмана) позволяет увеличить пиковую интенсивность фокального пятна излучения не менее чем на 13 %, а применение метода апертурного зондирования (использующего данные с анализатора интенсивности и не использующего датчик Шака-Гартмана) — не менее чем на 60 % для рассматриваемого диапазона концентраций

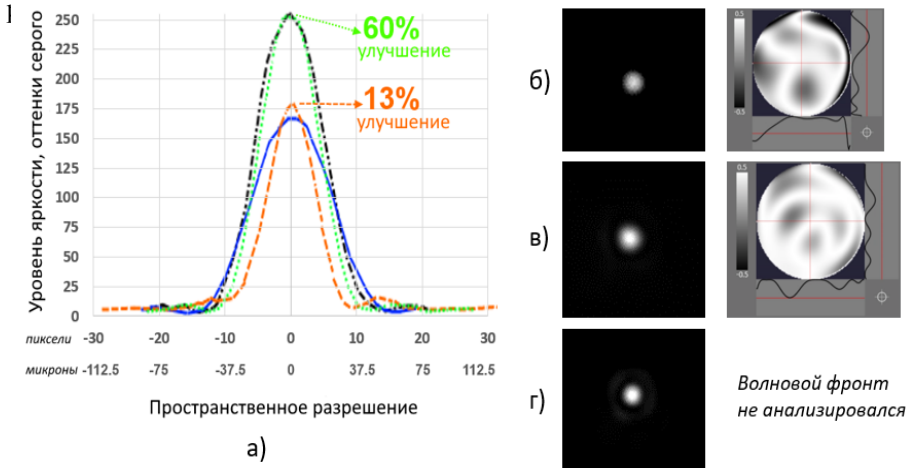


Рис. 9. Результаты улучшения качества фокусировки излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды с концентрацией $3.3 \times 10^5 \text{мм}^{-3}$: а) поперечные сечения распределения интенсивности фокального пятна в дальней зоне до оптимизации (сплошная синяя кривая) и после оптимизации с помощью алгоритма фазового сопряжения (пунктирная оранжевая кривая) и алгоритма апертурного зондирования (точечная зеленая кривая); б) распределение интенсивности фокального пятна и измеренная с помощью датчика Шака-Гартмана фаза (представленная в виде интерференционной картины) до оптимизации и в) после оптимизации с помощью алгоритма фазового сопряжения (прирост пиковой интенсивности — 13 %) и г) после оптимизации с помощью алгоритма апертурного зондирования (прирост пиковой интенсивности — 60 %). Чёрная штрихпунктирная кривая показывает сечение фокального пятна в отсутствие рассеивающей среды.

Сравнивая поперечные сечения фокальных пятен до (сплошная кривая на Рис. 9) и после оптимизации (пунктирная оранжевая кривая на Рис. 9) с помощью алгоритма фазового сопряжения, можно увидеть, что полуширина оптимизированного фокального пятна стала существенно меньше, но при этом не увеличилось пиковое значение. Это объясняется тем, что достаточно большое количество энергии оказалось сконцентрировано на периферии пятна – под пунктирной линией (Рис. 9, а) в интервалах (9, 20) пикселей и (-20, -8) пикселей по оси абсцисс – среднее значение уровня яркости в этих диапазонах оказывается равным порядка 13 единиц. В то же время, подобного «пьедестала» не наблюдается под сплошной синей кривой, соответствующей фокальному пятну до оптимизации. Таким образом, произошло перераспределение энергии в фокальном пятне. Для алгоритма апертурного зондирования подобной ситуации не наблюдалось по описанным ниже причинам.

Меньшую эффективность метода фазового сопряжения по сравнению с методом апертурного зондирования для фокусировки рассеянного лазерного излучения можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, метод фазового сопряжения основан на минимизации функционала, связанного с фазой излучения, что в идеале должно привести к увеличению пиковой интенсивности и уменьшению диаметра фокального пятна в дальней зоне. То есть выполняется оптимизация не фокального пятна напрямую, а некоторого функционала, косвенно связанного с фокальным пятном. Минимизация функционала $\Phi = \min\{\sum_i \Delta S^2\}$, то есть смещений фокальных пятен гартманнограммы ΔS , не всегда соответствует оптимальному волновому фронту (в нашем случае — плоскому). Одна из возможных причин для этого — соответствие различных комбинаций смещений фокальных пятен гартманнограммы одному и тому же значению функционала Φ , но различным амплитудам искажения волнового фронта (Рис. 10).

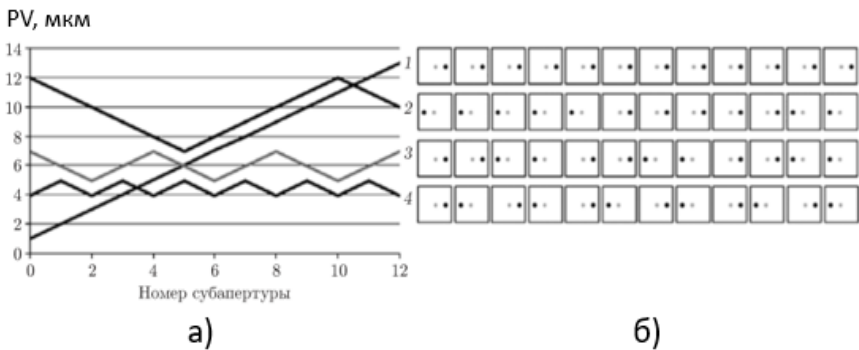


Рис. 10. Графики амплитуды волнового фронта (а) для четырёх разных наборов фокальных пятен (б)

Функционал Φ в каждом случае один и тот же, смещения пятен по амплитуде одинаковы, а различаются только направления смещений. Амплитуда волнового фронта PV в первом случае равна 12 мкм (кривая 1), во втором — 7 мкм, в третьем — 2 мкм, а четвертом случае — 1 мкм. Таким образом, с точки зрения алгоритма минимизации все случаи идентичны, в то время как восстановленные волновые фронты отличаются как по форме, так и — существенно — по амплитуде. Во-вторых, разрешающей способности используемого датчика Шака-Гартмана может быть недостаточно для учёта имеющихся искажений усреднённого волнового фронта. В-третьих, метод фазового сопряжения принципиально не может учесть аберраций, вносимых в пучок в результате отражения от светоделительной пластины и распространения до анализатора интенсивности (в том числе аберраций микрообъектива камеры). В-четвёртых, используемый в алгоритме фазового сопряжения метод наименьших квадратов может приводить к большей ошибке аппроксимации в случае анализа многократно рассеянного излучения по сравнению со случаем, когда рассеяние отсутствует и волновой фронт определяется корректно.

С увеличением концентрации рассеивателей отмечалось снижение эффективности фокусировки с увеличением концентрации рассеивающей среды. Это объяснялось уменьшением количества приосевых фотонов и увеличением количества диффузных фотонов. Проведённые численные оценки с помощью модели, описанной в Главе 1, показали, что доля приосевых фотонов, регистрируемых на сенсоре, составляла порядка 6 % для концентрации рассеивателей $3.3 \times 10^5 \text{ мм}^{-3}$ и уменьшалась до 3 % уже для концентрации $4.1 \times 10^5 \text{ мм}^{-3}$. Увеличение концентрации рассеивающих частиц приводит к режиму многократного рассеяния, когда более 99 % фотонов становятся диффузными, т.е. свет полностью рассеивается. Поэтому чем меньшая доля приосевых фотонов падает на адаптивное зеркало (и затем на датчик), тем меньший вклад оно может дать в улучшение качества фокусировки рассеянного лазерного пучка.

В конце главы делается вывод о том, что алгоритм апертурного зондирования может применяться в квазистатических рассеивающих средах ввиду невысокой скорости работы. В то же время алгоритм фазового сопряжения обеспечивает существенно большую скорость коррекции искажений, что может быть важно для динамически изменяющихся аэрозольных сред.

Заключение

В заключении представлены основные полученные в диссертационной работе результаты и выводы.

1. Разработана адаптивная оптическая система, которая позволяет улучшить качество фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9 (концентрация частиц диаметром 1 мкм — от

10^5 до 10^6 мм^{-3}), что, согласно принципу подобия, можно поставить в соответствие слою тумана протяжённостью от 300–500 м до нескольких километров. Адаптивная система работает с использованием двух алгоритмов улучшения качества фокусировки излучения — алгоритма фазового сопряжения и алгоритма апертурного зондирования — и включает в себя биморфное деформируемое зеркало, датчик Шака-Гартмана и анализатор распределения интенсивности. В работе рассмотрены и подробно описаны оба алгоритма. По результатам сравнения алгоритмов на лабораторной установке алгоритм апертурного зондирования показал существенно большую (в 4 раза) эффективность, чем алгоритм фазового сопряжения.

2. Создана компьютерная модель распространения лазерного излучения сквозь слой рассеивающей среды. Модель позволяет задавать такие параметры, как размеры слоя рассеивающей среды, радиус и концентрацию рассеивателей, показатели преломления рассеивателей и среды, количество фотонов, длину волны излучения, диаметр пучка, начальное распределение интенсивности пучка, вид и размер приёмной апертуры, размер единичной площадки на приёмной апертуре (размер пикселя), а также её положение относительно среды. Модель была реализована в виде приложения с графическим интерфейсом для операционной системы Windows. Проведённые численные оценки показали уширение лазерного пучка при прохождении сквозь рассеивающую среду с концентрацией частиц в диапазоне от 10^5 до 10^6 мм^{-3} . Получаемые в модели данные верифицировались с использованием аналогичной модели «MCML», разработанной Л. Вангом и С. Джакесом. Точность воспроизведения результатов составила более 99 %.
3. Получены зависимости количества баллистических, приосевых и диффузных фотонов, прошедших сквозь рассеивающую среду, от концентрации рассеивателей, на основании чего даны оценки возможности улучшения фокусировки пучка.
4. Разработанная модель оценки искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды с концентрацией частиц 10^5 – 10^6 мм^{-3} , с использованием принципа Шака-Гартмана показала возрастание амплитуды центрально-симметричных аберраций от 0 до 2 мкм (возрастание среднеквадратичного отклонения – от 0 до 0.43 мкм) с ростом концентрации рассеивателей. Построенная лабораторная экспериментальная установка с датчиком Шака-Гартмана для измерения искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды, подтвердила результаты численного моделирования.
5. Модель численной коррекции искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды, с использованием функций отклика биморфного адаптивного зер-

кала можно применять для оценки улучшения фокусировки пучка (увеличения параметра Штреля).

6. Применение метода фазового сопряжения в адаптивной оптической системе с датчиком Шака-Гартмана и биморфным деформируемым зеркалом диаметром 48 управляющими электродами, расположенными в 6 кольцах, позволяет увеличить не менее чем на 13 % пиковую интенсивность фокального пятна излучения, прошедшего слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9.
7. Применение метода апертурного зондирования в адаптивной оптической системе с анализатором распределения интенсивности на основе ПЗС-камеры и биморфным зеркалом с 48 электродами, расположенными в 6 кольцах, позволяет увеличить не менее чем на 60 % пиковую интенсивность фокального пятна излучения, прошедшего слой рассеивающей среды с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9.
8. Разработана методика экспериментального измерения концентрации рассеивающей суспензии полистироловых микросфер, использующая закон ослабления излучения Бугера-Ламберта-Бэра. Создано соответствующее программное обеспечение, а также собрана экспериментальная установка.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *van de Hulst H.* Light scattering by small particles. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1957. PP. 470.
2. *Bruce J., Pecora R.* Dynamic light scattering: with applications to chemistry, biology, and physics. Courier Corporation, 2000.
3. *Kaufmann J.* Free space optical communications: an overview of applications and technologies // Proceedings of the Boston IEEE Communications Society Meeting, 2011.
4. *Mosk A.P., Lagendijk A., Lerosey G., Fink M.* Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media // Nature Photonics 2012. V. 6. P. 283.
5. *Bashkatov A.N., Priezhev A.V., Tuchin V.V.* Laser technologies in biophotonics // Quantum Electronics 2012. V. 42, № 5. P. 379.
6. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. Рассеяние света молекулами и частицами / М.: МИР, 1979. 394.
7. *Грин X., Лейн В.* Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / ХИМИЯ, 1972. 428.
8. Microscopy apparatus: Patent US3013467 A / Minsky M, 1961.
9. *Huang D., Swanson E. A., Lin C. P., Schuman J. S., Stinson W. G., Chang W., Hee M. R., Flotte T., Gregory K., Puliavito C. A.* // Optical coherence tomography 1991. V. 254. № 5035. P. 1178–1181.
10. *Vellekoop I.M., Mosk A.P.* Focusing coherent light through opaque strongly scattering media // Optics Letters, 2007. V. 32. P. 2309.
11. *Исигару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Том 1 / М.: Мир, 1981. 280.
12. *So P.T.C., Dong C. Y., Masters B. R., Berland K. M.* Two-photon excitation fluorescence microscopy // Annu. Rev. Biomed. Eng., 2000. V. 2. № 1. P. 399–429.
13. *Vellekoop I.M.* Feedback-based wavefront shaping // Optics Express, 2015. V. 23, № 9. P. 12189–12206.
14. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами / М.: Мир, 1986. 664.
15. *Воробьева Е.А., Гуров И.П.* Модели распространения и рассеяния оптического излучения в случайно неоднородных средах // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Сборник научных статей. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2006. С. 82–98.
16. *Zhang X.* Binary wavefront optimization for focusing light through scattering media: candidate's dissertation, thesis on Master of Science / Athens, Georgia, 2014. 96 P.
17. *Линник В.П.* О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображение звезды // Оптика и спектроскопия, 1957. Т. 3. С. 401–402.

18. *Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л.* Перенос изображения в рассеивающей среде / Мн.: Наука и техника, 1985. 327 с.
19. *Кириллин М. Ю., Приезжев А. В.* Моделирование распространения лазерного пучка в плоском слое суспензии эритроцитов методом Монте-Карло: сравнение вкладов рассеяния с различными кратностями в угловое распределение света // Квантовая Электроника, 2002. Т. 32, № 10. С. 883–887.
20. *Wang L., Jacques S.* MCML - Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues // Computer programs and methods in biomedicine, 1995. № 47. P. 131.
21. *Platt B., Shack R.J.* History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing // J. Refract. Surg, 2001. V. 17, № 15. P. S573-7.
22. *Malacara-Hernandez D.* Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle // Optical Engineering, 1990. V. 29, № 6.
23. *Berrocal E., Sedarsky D.L., Paciaroni M.E., Meglinski I.V., Linne M.A.* Laser light scattering in turbid media Part I: Experimental and simulated results for the spatial intensity distribution // Optics Express, 2007. V. 15, № 17. P. 10649–10665.
24. *Kudryashov A., Alexandrov A., Rukosuev A., Samarkin V., Galarneau P., Turbide S., Châteauneuf F.* Extremely high-power CO2 laser beam correction // Applied Optics, 2015. V. 54, № 14. P. 4352-4358.
25. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики М.: Наука, 1985. 288 с.
26. *Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И.* Управляемые оптические системы / М.: Наука, Гл.ред.физ.-мат.лит., 1988. 272 с.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Galaktionov I., Sheldakova J., Nikitin A., Samarkin V., Parfenov V., Kudryashov A.* Laser beam focusing through a moderately scattering medium using bimorph mirror // Optics Express, 2020. V. 28, № 25. P. 38061-38075.
2. *Галактионов И. В., Кудряшов А.В., Шелдакова Ю.В., Бялко А.А., Борсони Ж.* Измерение и коррекция волнового фронта лазерного излучения в мутной среде // Квантовая Электроника, 2017. Т. 47. № 1. — С. 32–37.
(Перевод: *Galaktionov I. V., Kudryashov A.V., Sheldakova Y.V., Byalko A.A., Borsoni G.* Measurement and correction of the wavefront of the laser light in a turbid medium // Quantum Electron, 2017. Т. 47, № 1. P. 32–37.
3. *Галактионов И. В., Шелдакова Ю.В., Кудряшов А.В.* Анализ aberrаций лазерного излучения, прошедшего сквозь мутную среду // Квантовая электроника, 2015. Т. 45, № 2. С. 143–144.
(Перевод: *Galaktionov I., Sheldakova Y., Kudryashov A.* Wavefront analysis of the laser beam passed through turbid medium // Quantum Electronics, 2015. Т. 45, № 2. P. 143–144.)

4. **Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A.** Laser beam focusing through the scattering medium by means of adaptive optics // Proc. of SPIE, 2017. V. 10073. P. 100731L.

5. **Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A.** Scattered laser beam control using bimorph deformable mirror // Proc. of 18th International Conference “Laser Optics 2018”, 2018. P. R4-03.

6. **Galaktionov I., Kudryashov A.V., Sheldakova J., Byalko A., Borsoni G.** Laser beam propagation and wavefront correction in turbid media // Proc. of SPIE, 2015. V. 9617. P. 96170D.

7. **Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A.** Comparison of efficiency of bimorph mirror and spatial light modulator for laser beam focusing through a moderately scattering medium // Proc. SPIE 11560, XXVI International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics", 2020. P. 115602A.

8. **Kudryashov A.V., Galaktionov I.V., Sheldakova J.V.** The improvement of the focus of laser beam passed through the scattering atmosphere by means of adaptive optics // OSA Imaging and Applied Optics Congress, 2020. V. OF3B.5.

9. **Галактионов И., Шелдакова Ю., Никитин А., Кудряшов А.** Увеличение эффективности фокусировки рассеянного лазерного излучения с помощью жидкокристаллического фазового модулятора света // материалы Всероссийской научно-практической конференции Наука-общество-технологии-2020 (SST-2020), 2020. С. 29-31.

10. **Galaktionov I., Sheldakova J., Nikitin A., Kudryashov A.** Comparison of efficiency of bimorph deformable mirror and spatial light modulator for laser beam focusing through the scattering medium // Proc. of XII International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine (AOIM), 2019. P. 124–127.

11. **Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A.** Laser beam focusing through the scattering medium using bimorph deformable mirror and spatial light modulator // Proc. of SPIE 11135, Unconventional and Indirect Imaging, Image Reconstruction, and Wavefront Sensing, 2019, P. 111350B.

12. **Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A., Nikitin A.** Laser beam focusing improvement for wireless power transmission through the scattering atmosphere using adaptive optics // Proc. of 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2019), 2019.

13. **Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A.** Laser beam focusing through the dense multiple scattering suspension using bimorph mirror // Proc. SPIE 10886 Adaptive Optics and Wavefront Control for Biological Systems V, 2019. P. 1088619.

14. **Галактионов И., Кудряшов А.В., Никитин А.Н., Рукоусев А.Л., Мар Г.Н., Шелдакова Ю.В.** Исследование качества фокусировки лазерного пучка, рассеянного аэрозолям, с помощью адаптивной оптической системы // Сборник научных трудов ИДГ РАН, 2018. № 10. С. 200–204.

15. **Galaktionov I., Nikitin A., Samarkin V., Sheldakova J., Kudryashov A.** Laser beam focusing through the scattering medium — low order aberration correc-

tion approach // Proc. SPIE 10772, Unconventional and Indirect Imaging, Image Reconstruction, and Wavefront Sensing, 2018. P. 107720W.

16. *Sheldakova J., Kudryashov A., Rukosuev A., Nikitin A., Galaktionov I., Toporovsky V.* Adaptive optical system for laser beam formation // Proc. SPIE Optical manipulation conference 10712, 2018. P. 107121A.

17. *Галактионов И., Шелдакова Ю., Кудряшов А.* Моделирование процесса коррекции искажений рассеянного лазерного пучка с помощью биморфного адаптивного зеркала // материалы Всероссийской научно-практической конференции Наука-общество-технологии-2018 (SST-2018), Москва, 2018. С. 30–33.

18. *Галактионов И., Шелдакова Ю., Кудряшов А.* Фокусировка лазерного пучка сквозь рассеивающий аэрозоль методами адаптивной оптики // Тезисы докладов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика А. М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», 2018. С. 201.

19. *Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A.* Laser beam focusing through the scattering medium using 14-, 32- and 48-channel bimorph mirror // Proc. of 18th International Conference “Laser Optics 2018”, 2018. P. R4-p23.

20. *Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J.* Laser beam focusing through the scattering medium using bimorph mirror // Proc. of AOIM18 XII International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2018. P. 12.

21. *Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A., Samarkin V.* Comparison of the efficiency of laser beam focusing through the scattering medium using 14- and 31-channel bimorph mirrors // Proc. SPIE Photonics West 10518, 2018. P. 1051818.

22. *Sheldakova J., Kudryashov A., Galaktionov I., Samarkin V., Nikitin A., Rukosuev A.* Formation of the doughnut and super-gaussian intensity distribution by means of different types of wavefront correctors // Proc. SPIE Photonics West 10518, 2018. P. 105181E.

23. *Галактионов И.В., Кудряшов А.В., Мар Г.Н., Никитин А.Н., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В.* Фокусировка рассеянного лазерного излучения методами адаптивной оптики // Сборник научных трудов ИДГ РАН, 2017. № 9. С. 154–159.

24. *Toporovsky V.V., Kudryashov A.V., Sheldakova J.V., Galaktionov I.V.* Determination of optical properties of turbid media by Monte Carlo method // Proc. of International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics", 2017. P. 27.

25. *Галактионов И., Кудряшов А., Шелдакова Ю., Мар Г., Никитин А.* Адаптивная система для увеличения эффективности фокусировки лазерного излучения сквозь рассеивающую среду // Тезисы XXIII Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", 2017. С. 45.

26. *Галактионов И.В., Кудряшов А.В., Шелдакова Ю.В., Никитин А.Н., Самаркин В.В.* Адаптивная компенсация искажений и фокусировка рассеян-

ного лазерного пучка // Тезисы конференции Наука-общество-технологии-2017 (SST-2017), 2017. С. 401–405.

27. Топоровский В.В., **Галактионов И.В.**, Кудряшов А. В. Методы адаптивной оптики для компенсации искажений излучения, прошедшего рассеивающую биологическую среду // Тезисы конференции Наука-общество-технологии-2017 (SST-2017), 2017. С. 101–106.

28. **Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A., Samarkin V.** Laser beam focusing through the atmosphere aerosol // Proc. SPIE Optics + Photonics, 2017. V. 10410. P. 104100M.

29. **Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A.** The use of modified hill-climbing algorithm for laser beam focusing through the turbid medium // Proc. SPIE, 2017. V. 10090. P. 100901K.

30. **Галактионов И.В., Кудряшов А.В., Шелдакова Ю.В., Бялко А.А.** Коррекция аберраций рассеянного излучения методом фазового сопряжения // Тезисы докладов XXIII рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск, 2016. С. 109.

31. **Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A., Nikitin A.** Efficiency of the wavefront correction of scattered radiation by means of bimorph mirror // Proc. of CAOL-2016. P. 170–172.

32. **Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A., Byalko A., Kalenkov G.** Measurement and correction of the wavefront of laser beam propagated through scattering medium // Proc. of 17th International Conference “Laser Optics 2016”, 2016. P. 57.

33. **Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A.** Phase correction of laser beam passed through turbid medium // Proc. of 16th International Conference “Laser Optics 2014”, 2014. P. 19.

34. **Galaktionov I., Kudryashov A.** Localization and image reconstruction of inclusions embedded in biological tissue (turbid media) by means of adaptive optical system // Proc. of 9th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2013. P. 30.

ГАЛАКТИОНОВ Илья Владимирович

**УВЕЛИЧЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОКУСИРОВКИ
РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ**

Автореферат

Подписано к печати 16.06.2021 г.
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 2,0
Тираж 100 экз. Заказ № 16(2021).

Отпечатано в типографии ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46