

**ОТЗЫВ официального оппонента Кириллина Михаила Юрьевича**  
на диссертацию на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук Галактионова Ильи Владимировича  
на тему: «Увеличение эффективности фокусировки рассеянного лазерного  
излучения методами адаптивной оптики»  
по специальности 01.04.03 — «Радиофизика»

Диссертация И.В. Галактионова посвящена исследованию искажений волнового фронта лазерного пучка при его распространении в слое случайно-неоднородной среды и их компенсации с использованием методов и элементов адаптивной оптики. Традиционно методы адаптивной оптики применяются при распространении пучков в нерассеивающих (или слабо рассеивающих) средах, таких как чистая атмосфера, или в сильно рассеивающих средах, примером которых могут служить биологические ткани. 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. Диссертационная работа И.В. Галактионова посвящена исследованию так называемого режима кроссовера, когда доля баллистических фотонов в пучке после прохождения рассеивающей среды остается существенной, но заметный вклад также дают фотоны, рассеянные на малые углы. Для исследования искажений волнового фронта предложено использовать датчик Шака-Гартмана, а для компенсации искажений — систему с обратной связью, включающую датчик Шака-Гартмана и адаптивное зеркало с небольшим количеством управляющих электродов, использование которой в конечном итоге позволяет добиться улучшения качества фокусировки излучения.

Диссертационная работа И.В. Галактионова состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Работа изложена на 159 страницах и включает 75 рисунков и 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 200 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, научная новизна и практическая ценность, приводятся основные положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание и структура диссертации по главам.

**Первая** глава диссертации посвящена обзору литературы в области рассеяния света, адаптивной оптики и принципов видения через мутные среды. В главе описываются особенности упругого и неупругого рассеяния, обозревается применение методов адаптивной оптики для улучшения качества изображений. Отдельное внимание уделено детальному описанию метода Монте-Карло, положенного в основу модели формирования сигнала на датчике Шака-Гартмана.

**Вторая** глава посвящена описанию разработанного автором подхода к

регистрации искажений усреднённого волнового фронта рассеянного пучка с использованием принципа Шака-Гартмана. Приводятся результаты моделирования распространения ограниченного пучка сквозь рассеивающие среды с различными концентрациями рассеивателей. Описывается разработанная лабораторная экспериментальная установка, предназначенная для подтверждения результатов моделирования. Показано хорошее соответствие между экспериментально полученными результатами и предсказаниями модели.

**Третья** глава посвящена описанию разработанной лабораторной адаптивной оптической системы, включающей биморфное зеркало, датчик Шака-Гартмана и анализатор интенсивности, предназначенной для улучшения качества фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды. Представлено подробное описание разработанного и применяемого в работе биморфного адаптивного зеркала. Описывается разработанный алгоритм численной оценки эффективности 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. Апробация разработанной системы проведена на наборе суспензий полистироловых микросфер с концентрациями частиц в интервале  $10^5 - 10^6 \text{ мм}^{-3}$ . Также в главе приводится подробный обзор типов существующих корректоров волнового фронта с локальными и модальными функциями отклика и предъявляемых к ним требований, обосновывается выбор корректора на основе биморфного пьезоэлемента для решения поставленной задачи фокусировки излучения сквозь рассеивающий аэрозоль.

**Актуальность темы.** В диссертационной работе И.В. Галактионова исследуется эффективность применения системы с обратной связью на основе деформируемого биморфного зеркала и датчика Шака-Гартмана для фокусировки лазерного излучения на длине волны 0.65 мкм, прошедшего через слой оптически-рассеивающей среды. Среди методов, предназначенных для компенсации негативного влияния эффекта рассеяния излучения, обычно выделяют три группы. В первую группу входят методы пространственной и временной фильтрации, использующие для фокусировки или формирования изображения объекта только баллистическую компоненту излучения и блокирующие рассеянную компоненту. Во вторую группу входят методы формирования волнового фронта с помощью фазовых корректоров с высоким пространственным разрешением управляющих элементов, таких как фазовые пространственные модуляторы света (SLM) или микроэлектромеханические зеркала (MEMS). 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 пьезоактюаторах, сегментированных зеркал). Как известно, традиционная адаптивная оптика широко применяется в астрономии для компенсации атмосферной турбулентности и увеличения разрешения изображений наблюдаемых небесных тел. Но, помимо турбулентных флуктуаций показателя преломления, в атмосфере на пути распространения излучения может присутствовать рассеивающий аэрозоль. Рассеяние света на частицах атмосферного аэрозоля оказывает негативное влияние на передачу энергии и информации с помощью лазерного излучения по беспроводным каналам связи. Часть энергии в результате рассеяния на оптических неоднородностях среды перераспределяется из центральной области фокального пятна в ореол. В результате уменьшается как пиковая интенсивность, так и плотность мощности в пятне. Решению этой проблемы и посвящена диссертационная работа И.В. Галактионова. В качестве корректора волнового фронта выбрано биморфное деформируемое зеркало со световой апертурой 50 мм и 48 управляющими электродами, в качестве рассеивающей среды, моделирующей атмосферный туман средней плотности — суспензия полистироловых микросфер диаметром 1 мкм, взвешенных в дистиллированной воде. Оптическая толщина среды варьировалась в диапазоне от 1 до 10. Важное место в работе занимает часть, посвящённая моделированию распространения ограниченного коллимированного лазерного пучка сквозь слой рассеивающей среды, а также измерению искажений усреднённого волнового фронта рассеянного пучка с помощью принципа Шака-Гартмана. Тема рассматриваемой диссертации безусловно является актуальной, а полученные автором результаты представляют интерес для научной общественности.

### **Научная новизна и практическая значимость исследований**

В диссертационной работе получены и представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость.

- Впервые разработана основанная на методе Монте-Карло модель формирования сигнала на датчике Шака-Гартмана при исследовании пучка, прошедшего через рассеивающую среду.
- С помощью разложения по полиномам Цернике впервые показано, что в усреднённом волновом фронте лазерного излучения видимого диапазона при распространении через рассеивающую среду с оптической толщиной в диапазоне от 1 до 10 и фактором анизотропии 0.9, присутствует не только дефокусировка, но и сферические aberrации второго и четвёртого порядка, причём с ростом концентрации рассеивателей в среде в исследуемом диапазоне величина этих aberrаций возрастает.

- 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 %, а применение метода апертурного зондирования — не менее чем на 60 %.

Несмотря на положительное впечатление от диссертационной работы И.В. Галактионова, хотелось бы указать на ряд недостатков:

1. В тексте работы в нескольких местах утверждается, что глубина проникновения излучения в биоткани не превышает 1 мм. В общем случае это утверждение является неверным. Для уточнения необходимо указать более узкий спектральный диапазон, либо указать, что речь идет о сохранении когерентности излучения.
2. При описании моделирования формирования сигнала на датчике Шака-Гартмана методом Монте-Карло отсутствует конкретизация, какая именно форма фазовой функции используется в модели. Учитывая параметры моделируемой среды, логично было бы использовать фазовую функцию для сферы, рассчитанную по теории Ми, тогда как формула (18) описывает фазовую функцию Хеньи-Гринштейна. Работу также усилило бы обсуждение зависимости полученных результатов от вида фазовой функции при сохранении фактора анизотропии.
3. Одним из основных результатов работы является демонстрация возможности увеличения пиковой интенсивности пучка после прохождения слоя рассеивающей среды на 13% с помощью метода фазового сопряжения с применением разработанной системы с обратной связью. Было бы логично обсудить, насколько критичным является такое улучшение фокусировки пучка с точки зрения конкретных приложений.
4. Не очень понятен смысл введения параметра точности воспроизведения результатов, описываемого формулой (20). Очевидно, что эта величина будет зависеть от числа используемых при моделировании фотонных пакетов, однако, обсуждение этой зависимости и конкретизация этого параметра в тексте отсутствуют.
5. В качестве вывода к главе 2 приводится описание методики измерения концентрации частиц в суспензии, основанной на измерении коллимированного пропускания слоя среды. Следует отметить, что такой подход не является новым. Более того, если речь идет именно о методике, она должна быть верифицирована для широкого набора образцов путем сопоставления с результатами независимых исследований. Также следует уточнить, для каких диапазонов оптических свойств образцов применима разработанная методика.
6. При сравнении результатов моделирования и эксперимента (рис. 47) было

бы логично указать, исходя из каких предпосылок как выбраны гладкие кривые, которыми аппроксимируются зависимости (они имеют разный характер для экспериментальных и модельных данных). При анализе расхождения результатов численного моделирования и эксперимента утверждается, что выброс для концентрации  $7.4 \times 10^5 \text{ мм}^{-3}$  обусловлен ошибкой дискретизации. Это утверждение требует пояснения, поскольку непонятно, о чем идет речь. Также было бы логично обсудить, насколько хорошо зарегистрированные искажения усредненного волнового фронта аппроксимируются линейной комбинацией полиномов Цернике в эксперименте и в модели.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Полученные в ходе выполнения работы результаты в достаточной степени апробированы в виде докладов на российских и международных конференциях по тематике проведенных исследований. Диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, соответствующее требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Считаю, что соискатель И.В. Галактионов заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный  
исследовательский центр Институт  
прикладной физики Российской академии наук»

к.ф.-м.н., с.н.с



Кириллин Михаил Юрьевич

13 сентября 2021 г.

Контактные данные:

тел.: +7 831 4164619, e-mail: mkirillin@yandex.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация: 01.04.21. - «Лазерная физика»

Адрес места работы:  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46  
Федеральное государственное бюджетное  
научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт  
прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)  
Тел: +7 (831) 436-62-02 , e-mail: [dir@ipfran.ru](mailto:dir@ipfran.ru)

Согласен на обработку персональных данных



Кириллин Михаил Юрьевич

Подпись М.Ю. Кириллин удостоверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н., с.н.с.

Тел. +7 (831) 436-86-10; e-mail: [igor@ipfran.ru](mailto:igor@ipfran.ru)



Корюкин Игорь Валерьевич