

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-
проректор по научной работе

и стратегическому развитию
МГТУ им. Н.Э.Баумана



д.т.н., доцент

 Б.Н.Коробец

2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Галактионова Ильи Владимировича

«Увеличение эффективности фокусировки рассеянного

лазерного излучения методами адаптивной оптики»

по специальности 01.04.03 (1.3.4.) «Радиофизика»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация Галактионова И.В. посвящена разработке численных методов и экспериментальному исследованию улучшения процесса фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь оптически рассеивающую среду, на основе применения адаптивной оптики.

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день можно выделить 2 класса атмосферных задач, для которых важно компенсировать негативное влияние эффекта аэрозольного рассеяния: задачи фокусировки лазерного излучения при его ретрансляции в атмосфере или его наведении на фиктивную поверхность – плоскость мишени, а также задачи наблюдения за удалёнными объектами через рассеивающий слой атмосферы.



Упомянутые задачи требуют принципиально новых научно – технических решений, связанных с разработкой методов, учитывающих влияние особенностей рассеивающей атмосферы на пространственные и энергетические характеристики лазерного излучения, его регистрации и последующей обработки. С этой позиции актуальность тематики научного исследования соискателя Галактионова И.В., посвященной одной из выше указанных задач, а именно увеличению эффективности фокусировки рассеянного лазерного излучения методами адаптивной оптики, сомнений не вызывает.

Цель диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в численном и экспериментальном исследовании возможности применения методом 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.

Краткий анализ структуры и содержания работы

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

Во **введении** представлена актуальность научной тематики диссертационной работы, обоснованы решаемые научно – технические задачи, приведена классификация методов и проведен их сравнительный анализ, с точки зрения компенсации негативного влияния процесса рассеяния оптического излучения.

В **первой главе** рассматриваются две большие группы методов управления рассеянным излучением: методы оптимизации волнового фронта, основанные на пошаговом последовательном алгоритме, методы, основанные на алгоритмах фазового со-

пряжения и апертурного зондирования. На основании обзора источников исследования соискателем делается вывод о необходимости применения средств адаптивной оптики для задачи улучшения фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь рассеивающий атмосферный аэрозоль. Приводится обоснование возможности перехода от реальной атмосферной трассы к её имитационной модели на основе лабораторного эксперимента с существенным уменьшением линейных масштабов.

Автором разработана и представлена компьютерная модель распространения лазерного излучения сквозь рассеивающую среду на основе стохастического метода Монте-Карло. Модель рассеянного лазерного излучения построена на основе его представления в виде фотонов трёх типов: баллистических, приосевых и диффузных, каждый из которых имеет свою характерную траекторию распространения и определённый характер взаимодействия с мелкодисперсными частицами (аэрозолями) рассеивающей среды.

Во **второй главе** представлен принцип измерения искажений усреднённого волнового фронта лазерного излучения при помощи датчика Шака – Гартмана. Приводится описание созданной лабораторной экспериментальной установки на основе датчика Шака-Гартмана и результаты экспериментальных исследований, подтверждённые результатами численного моделирования. Автором приводится описание разработанной методики, экспериментальной установки и функционала созданного программного обеспечения для измерения концентрации рассеивающей суспензии полистироловых микросфер, использующей закон ослабления Бугера-Ламберта-Бэра.

В **третьей главе** соискателем анализируются существующие корректоры волнового фронта и их принцип работы при адаптации искажений поверхности равной фазы лазерного излучения, прошедшего через неоднородный слой оптической атмосферы. Автором приводится разработанный алгоритм численной коррекции искажений усреднённого волнового фронта, основанный на разложении экспериментально измеренной фазовой поверхности излучения, прошедшего сквозь рассеивающую среду, по измеренным функциям отклика электродов биморфного адаптивного зер-

кала. Представлена функциональная схема созданной лабораторной адаптивной оптической системы с биморфным зеркалом, датчиком Шака-Гартмана и анализатором интенсивности, предназначенной для улучшения качества фокусировки лазерного излучения, распространяющегося сквозь слой рассеивающей среды. Представлены результаты работы системы, демонстрирующие возможность применение метода фазового сопряжения для увеличения пиковой интенсивности пятна, сфокусированного в фокальной плоскости приёмной оптической системы канала регистрации, не менее чем на 13 %, а применение метода апертурного зондирования – не менее чем на 60 % для рассматриваемого диапазона концентрации рассеивателей.

Научная новизна результатов диссертационной работы

В диссертационной работе представлен ряд новых научных результатов:

1. Впервые разработана численная модель для 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 aberrации второго и четвёртого порядка, причём с ростом концентрации рассеивателей в среде в указанном выше диапазоне величина этих aberrаций 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 %.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждает применение адекватных математических моделей и экспериментальных методов в рамках, предложенных автором базовых теоретических положений с применением современных теоретических концепций и математических средств физической оптики, а также удовлетворительным качественным и количественным соответствием полученных научных результатов.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость полученных автором результатов диссертационной работы подтверждается соответствующим актом о внедрении.

Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту научной специальности 01.04.03 (1.3.4.) «Радиофизика» в части формулы специальности:

«...раздел физики, занимающийся изучением общих закономерностей генерации, передачи, приема, регистрации и анализа колебаний и волн различной физической природы, и разных частотных диапазонов, а также их применением в фундаментальных и прикладных исследованиях...»;

в части области исследования:

«2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах».

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает содержание, научные положения, выводы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертации, содержит информацию об основных полученных научных результатах и позволяет сделать заключение о высоком научном уровне работы и соответствующей научной квалификации соискателя.

Апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 34 работы, в том числе 27 работ, индексируемых в базе данных Scopus, 20 работ – в базе данных РИНЦ и 20 работ – в базе данных Web of Science.

Замечания по содержанию диссертации

В представленной соискателем диссертационной работе наряду с общей положительной оценкой следует сделать ряд замечаний:

1. Параграфы диссертационной работы: 2.1, 3.2 носят общий описательный характер и не отражают особенностей, связанных с постановкой исходной цели диссертационной работы, заключающейся в численном и экспериментальном исследовании применения методов адаптивной оптики для увеличения эффективности фокусировки рассеянного лазерного излучения видимого диапазона в случайно – неоднородной среде (с учётом процесса рассеяния).
2. В заключительной задаче рассеивающую среду представляет не стеклянная кювета (как написано в диссертационной работе), заполненная суспензией полистиро-

ловых микросфер в дистиллированной воде, а суспензия из полистироловых микросфер, сконцентрированных в дистиллированной воде, помещённой в стеклянную кювету.

3. В первой главе вводится модель рассеивающей среды, при прохождении которой рассеянное оптическое излучение представляется совокупностью трех типов фотонов: баллистических, приосевых и диффузных, каждый из которых имеет свою характерную траекторию распространения. Однако из материалов параграфа 1.7.1. неясно каким образом управляется каждый из типов фотонов и как при этом изменяется пространственная когерентность оптического излучения.

Указанные недостатки не уменьшают ценность полученных соискателем результатов и в целом не влияют на общую положительную оценку диссертации. В диссертации на основании выполненных автором исследований представлены теоретические положения, экспериментальные исследования и схемотехнические решения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в развитии современной адаптивной оптики.

Заключения по диссертационной работе

Диссертация «Увеличение эффективности фокусировки рассеянного лазерного излучения методами адаптивной оптики» Галактионова Ильи Владимировича является законченной и самостоятельной научной квалификационной работой, выполненной автором на высоком научном уровне.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Галактионова И.В. «Увеличение эффективности фокусировки рассеянного лазерного излучения методами адаптивной оптики» по актуальности, степени научной новизны и практической значимости, объёму выполненных исследований и их ценностям соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 (1.3.4.) «Радиофизика».

Отзыв на диссертационную работу Галактионова И.В. был обсужден и утверждён на заседании кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ имени Н.Э.Баумана (протокол № 07/21 от 2 июля 2021 г.).

Заведующий кафедрой
лазерных и оптико-электронных систем
МГТУ имени Н.Э. Баумана
д.т.н, доцент



Н.В. Барышников

Доцент кафедры
лазерных и оптико-электронных систем
МГТУ имени Н.Э. Баумана,
к.т.н., доцент



Д.Г.Денисов