



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Национальный исследовательский центр
телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева»

(ФГАУ НИЦ Телеком)

ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827

ИНН/КПП 9709082715/770901001

25.11.2025 № 010/5671

На № 3666/02-17 от 23.10.2025

Отзыв ведущей организации

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального
директора ФГАУ НИЦ Телеком
по науке, канд. техн. наук, доцент

А.А. Захаров

«25» 11.2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации - федерального государственного автономного
учреждения «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций
имени М.И. Кривошеева» на диссертационную работу

Сапожникова Максима Вячеславовича «Методика оценки потерь в
спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной
турбулентности» представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций

Диссертационная работа Сапожникова М.В. посвящена созданию
методики оценки энергетических потерь, обусловленных особенностями
атмосферных явлений, влияющих на оптические характеристики в контексте
спутникового квантового распределения ключей (КРК).

Основным достижением работы является разработка методики оценки
энергетических потерь, учитывающей воздействие атмосферной
турбулентности для расчёта эффективности КРК. Эта методика была успешно
применена для численного моделирования спутниковых оптических каналов
связи с КРК. Предлагаемая методика позволила повысить точность оценки
показателей эффективности КРК.

Вход. №

123/25

«24»

11.2025

подпись

Актуальность темы исследования.

В условиях стремительного роста потребностей использования технологий спутниковой оптической связи и роста требований к защищённости передаваемой информации всё большее внимание уделяется системам спутникового квантового распределения ключей, которые позволяют реализовать принципиально новый уровень безопасности.

Несмотря на большой потенциал спутниковой оптической связи, такая связь в значительной степени зависит от воздействия атмосферных явлений, обусловленных географическим положением наземной станции, явлений поглощения и рассеяния, флуктуаций показателя преломления, вызванного перемешиванием воздушных масс с различной температурой (атмосферная турбулентность), различных видов рефракции (регулярной, случайной и аномальной).

Данные факторы приводят к затуханию сигнала, ограничению дальности связи, кратковременной или полной потере связи со спутником. Среди описанных атмосферных воздействий наибольший негативный вклад вносит атмосферная турбулентность, которая может вызывать несколько эффектов, таких как сцинтилляция (мерцание) и блуждание луча. Важность исследования локальной атмосферной турбулентности также возрастает в контексте изменения климата и увеличения частоты экстремальных погодных явлений.

Несмотря на наличие существующих методик оценки воздействия атмосферы на оптический канал, в том числе учитывающих параметры турбулентности, данные подходы зачастую не обеспечивают достаточной точности и универсальности в виду специфики их создания.

Учитывая рост интереса к спутниковым квантовым коммуникациям со стороны научного сообщества, государственных структур и частных компаний, а также необходимость создания устойчивых к внешним воздействиям систем связи, разработка методики оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, является актуальной научно-практической задачей.

Содержание диссертации и автореферата.

На рассмотрение в федеральное государственное автономное учреждение «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева» (ФГАУ НИЦ Телеком) были представлены автореферат и текст диссертации, которая состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 112 страницах, включая 28 рисунков и 2 таблицы. В библиографию включено 111 наименований источников. В приложении к диссертационной работе представлены акты о внедрении научных и практических результатов. Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертации. В нем изложены основные идеи и выводы диссертации, отражен личный вклад автора в проведенное исследование, охарактеризованы степень новизны и практическая значимость полученных результатов.

Личный вклад соискателя.

Результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту и составляющие основное содержание работы, разработаны и получены автором лично. Автором диссертации внесен решающий вклад при описании и подготовке публикаций, на которых основан материал диссертационной работы.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается: применением известных методов исследования, результатами, полученными с помощью теоретических выкладок, корректностью методик численного моделирования. Достоверность подтверждается качественным и количественным согласованием с данными экспериментальных исследований, а также с результатами, полученными другими авторами в смежных работах.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях. В ходе проведения работы над диссертационным исследованием было выпущено 17 печатных работ. В том числе: 7 научных работ в изданиях, входящих в перечень журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 работы, индексируемых в Web of Science и

Scopus, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 4 публикации, изданные в сборниках и трудах международных научных конференций.

Публикации соискателя, содержащие основные результаты, соответствуют требованиям пунктов 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней. Диссертация отвечает требованиям пункта 14 Положения о присуждении ученых степеней и не содержит заимствованных материалов или отдельных результатов без ссылок на авторов и источники заимствования.

Научная новизна:

1. Разработана методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча вследствие влияния атмосферной турбулентности, отличающаяся от существующих тем, что учитывает как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру;

2. Разработана методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, обусловленная влиянием атмосферной турбулентности, отличающаяся от существующих тем, что учитывает как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру;

3. Разработана методика оценки обусловленных атмосферной турбулентностью энергетических потерь, использующая сочетание методик количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, учитывающих как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методики оценки энергетических потерь путем учета атмосферной вихревой структуры турбулентной атмосферы.

Практическая значимость диссертационной работы. Предложенная методика расчета энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, реализована в виде программных комплексов, применяемых для моделирования спутниковых оптических каналов связи с КРК, обеспечила повышение точности оценки показателей эффективности КРК не менее чем в 1,2 раза, по сравнению с существующими.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Материалы диссертационной работы представляют интерес для организаций, занимающихся разработкой и развертыванием аппаратуры и систем беспроводной оптической связи.

Полученные результаты диссертационной работы используются компаниями ООО «КуСпэйс Технологии», ООО «КуРэйт» и АО «Мостком».

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре «Направляющие телекоммуникационные среды» МТУСИ.

Реализация результатов диссертационного исследования подтверждена соответствующими актами внедрения, которые представлены в приложении к диссертационной работе.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности
2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, а именно:

пункт 1. Разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций;

пункт 3. Исследование процессов представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио-, голографической и мультимедиа информации; разработка и совершенствование соответствующих алгоритмов и процедур;

пункт 18. Разработка научно-технических основ создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования.

Замечания по содержанию и изложению материала.

1. При моделировании скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности использовались исключительно непараметрические модели вертикального профиля структурной постоянной показателя преломления. При этом не были учтены параметрические модели.

2. В работе утверждается, что применение предложенной методики оценки энергетических потерь повышает точность расчёта коэффициента

квантовых ошибок на бит; однако, несмотря на наличие аналитического обоснования, отсутствует его экспериментальная верификация.

3. В работе не проведён анализ влияния параметров бортовых и наземных оптических терминалов, в первую очередь рабочей длины волны, апертуры приёмных и передающих телескопов на показатели эффективности КРК. Эти параметры в совокупности с атмосферной турбулентностью определяют скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и как следствие коэффициент квантовых ошибок на бит.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейших публикациях по теме исследования.

Общее заключение по работе. Указанные замечания к диссертации Сапожникова Максима Вячеславовича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности» не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы, защищаемые положения которой обладают научной новизной и практической значимостью.

Работа написана литературным языком, грамотно, стиль изложения доказательный. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, подробные расчёты. По каждому разделу в работе имеются выводы.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Сапожникова М.В. является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему. По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук,

а ее автор, Сапожников Максим Вячеславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждены на заседании секции научно-технического совета Научно-технического центра анализа электромагнитной совместимости ФГАУ НИЦ Телеком 21.11.2025, протокол № 035-25-11-01.

Заместитель директора ЦИПБТС,
канд. техн. наук



М.В. Иванкович

«24» 11 2025 г.

Подпись М.В. Иванкович заверяю

Директор службы персонала
ФГАУ НИЦ Телеком



В.А. Тютюнова

«24» 11 2025 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева» (ФГАУ НИЦ Телеком).

Адрес: 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 16.

Веб-сайт: <https://www.nic-t.ru>.

Тел.: +7 (499) 647-17-77.

Адрес электронной почты: info@nic-t.ru