

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук *Хмелева Александра Валерьевича* на диссертацию *Сапожникова Максима Вячеславовича* на тему «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Актуальность темы диссертации

Развитие технологии спутниковой оптической связи является одной из приоритетных задач в области телекоммуникаций. Прогресс в данной сфере требует как совершенствования аппаратной реализации приемо-передающих устройств, так и разработки новых методик моделирования каналов оптической связи и подходов к компенсации факторов, негативно влияющих на качество передаваемого сигнала. Указанные задачи, особенно актуальны в контексте создания систем спутникового квантового распределения ключей, обеспечивающих принципиально новый уровень информационной безопасности.

Диссертационная работа М.В. Сапожникова посвящена разработке методики оценки энергетических потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций, обусловленных атмосферной турбулентностью, влияющей на эффективность квантового распределения ключей (КРК). Автором предложена методика, учитывающая пространственно-временные особенности атмосферной турбулентности, которая позволила повысить точность численных результатов таких показателей эффективности КРК, как скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и коэффициента квантовых ошибок на бит.

Общая характеристика содержания диссертации

Текст диссертации содержит 112 страниц и состоит из трех разделов, включая введение, заключение, список литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность, определены цель и частные задачи исследования, сформулирована научная задача, на решение которой направлена работа, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе представлен обзор существующих подходов по оценке основных факторов, ограничивающих использование квантового распределения ключей. Особое внимание уделено анализу границ применимости данных факторов.

Во втором разделе автором предложена оригинальная методика расчёта энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью. Она включает две методики: количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке. Разработанные методики учитывают описанные особенности формирования и существования совокупности атмосферных вихрей, которые служат основой для моделирования слоистой атмосферы.

В третьем разделе проведена экспериментальная проверка предложенной методики на данных квантового сеанса связи со спутником Micius. Сравнение с результатами, полученными по существующим моделям, подтверждает, что предложенная методика оценки энергетических потерь повышает точность оценки скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности не менее чем в 1,2 раза.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

В приложении представлены акты внедрения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Обоснованность и достоверность основных выводов и положений

Достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждаются согласованностью качественных и количественных характеристик с экспериментальными данными и результатами практического внедрения.

Публикации по теме диссертации

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.

Новизна исследований и полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

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.

Научная значимость полученных автором диссертации результатов

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.

Замечания по работе

1. На рисунках 2.1-2.2 диссертации представлены плотности вероятности отклонения оптического излучения на апертуре приёмника, однако физический смысл оси абсцисс остаётся неясным. Не указано, относительно какого направления (например, геометрической линии

визирования без учёта атмосферы или траектории с учётом регулярной рефракции) производится отсчёт координаты x . Также не объяснено, что представляет собой нулевая точка шкалы, является ли она проекцией геометрической оси луча в отсутствие атмосферы или положением, соответствующим среднему отклонению при учёте регулярной рефракции.

2. В третьем разделе диссертационной работы при сравнении смоделированной скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и экспериментальных данных не уточняется для какого типа трассы (горизонтального или вертикального) и типа канала (восходящего или нисходящего) проводится сравнение.

3. В третьем разделе говорится, что «эффективность системы квантового распределения ключей ... оценивается с использованием... скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности R_{sift} , и коэффициента квантовых ошибок на бит QBER». Однако анализ предлагаемой модели и эксперимента проводится только в рамках рассмотрения скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности. Было бы полезно проанализировать рассматриваемые модели и эксперимент с точки зрения уровня квантовых ошибок на бит для вспомогательных квантовых состояний или состояний «ловушек».

4. Помимо прочего, имеются некоторые замечания редакционного характера, касающиеся стилистического совершенствования текста и устранения мелких погрешностей.

Заключение

Перечисленные замечания не снижают положительной оценки работы. Корректная постановка исследовательских задач, теоретическая и практическая значимость, подтвержденные соответствующими актами, обоснованность полученных результатов позволяют сделать вывод о научной квалификации автора диссертации. Задачи, решенные в диссертации, имеют принципиальное значение для развития беспроводных спутниковых квантовых коммуникаций. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.15. – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» по п.1. Разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций, п.3. Исследование процессов представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио-, голографической и

мультимедиа информации; разработка и совершенствование соответствующих алгоритмов и процедур и п.18. Разработка научно-технических основ создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования.

Диссертация Сапожникова Максима Вячеславовича на тему «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности», соответствует критериям, установленным Положением Постановления Правительства «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 №842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, в частности п.9, а её автор - Сапожников Максим Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

ФИО составителя отзыва:	Хмелев Александр Валерьевич
Должность:	Научный сотрудник ООО «КуСпэйс Технологии»
Ученая степень (шифр и название научной специальности):	кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.6. – «Оптика»
Ученое звание:	-
Почтовый адрес:	121205, г. Москва, территория инновационного центра Сколково, ул. Луговая, д. 4, стр. 7, пом. 10
Телефон:	8 (495) 280-12-91
E-mail:	info@qspace.tech

Научный сотрудник ООО «КуСпэйс Технологии», к.ф.-м.н

Хмелев Александр Валерьевич

18 ноября 2025 г.

Подпись Александра Валерьевича Хмелева заверяю.

Генеральный директор ООО «КСТ»

Толстых Валентин Александрович

18 ноября 2025 г.

