

ОТЗЫВ
официального оппонента
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

Диссертационная работа М.В. Сапожникова посвящена разработке методики оценки энергетических потерь в спутниковом оптическом канале связи, обусловленных атмосферной турбулентностью, влияющих на эффективность спутникового квантового распределения ключей.

Актуальность выбранной темы обусловлена интенсивным развитием оптической связи и возрастающей необходимостью обеспечения устойчивости защищённых каналов передачи информации, реализуемых на основе систем квантового распределения ключей (КРК), в условиях распространения оптического излучения через атмосферу. В этом случае особое значение приобретает учёт факторов атмосферной турбулентности, оказывающий существенное влияние на параметры канала и, как следствие, на скорость генерации просеянного ключа и уровень квантовых ошибок.

Основным результатом диссертационного исследования является создание методики оценки энергетических потерь, позволяющей повысить точность численных результатов показателей эффективности спутниковых систем КРК. Автором произведена верификация предложенной методики, включая количественное и качественное сравнение полученных результатов с данными натурного эксперимента по спутниковому КРК.

Общая характеристика содержания диссертации

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

Во введении обоснована актуальность, определены цель и 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 приведен анализ существующих подходов к оценке атмосферных потерь, ограничивающих применение квантового распределения ключей. Проанализированы основные атмосферные факторы влияющих на КРК, выделена атмосферная турбулентность как

доминирующий эффект, и показаны ключевые недостатки современных методик.

Во втором разделе соискателем предложена методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью. Данная методика основана на двух разработанных и описанных методиках количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, учитывающих как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

В третьем разделе соискателем проведена верификация предложенной методики на данных эксперимента по квантовому распределению ключей между спутником Мо-цзы (Micius) и наземной станцией в Звенигороде. Установлено, 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.

Обоснованность и достоверность основных выводов и положений

Основные положения и выводы работы являются обоснованными. 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. В работе не указан конкретный протокол квантового распределения ключей, на основе которого проводилось моделирование скорости генерации просеянного квантового ключа. Между тем аналитические выражения для показателей эффективности КРК могут отличаться в зависимости от выбранного протокола (например, BB84, B92, BBM92 и др.), а также от принятых допущений относительно модели квантового канала и параметров ошибок.

2. В численном моделировании скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности по предложенной в работе методике оценки энергетических потерь отсутствует указание исходных численных параметров, используемых в методиках количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке.

3. Из текста диссертации неясно, какой именно язык программирования использовался при написании программного обеспечения, применяемого для численных экспериментов.

Заключение

В целом, несмотря на указанные замечания, представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Задачи, решенные в диссертации, имеют важное значение для развития

спутниковых квантовых коммуникаций. Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.15. – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» по п.1., п.3. и п.18.

Диссертация Сапожникова Максима Вячеславовича на тему «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности», соответствует п.9 «Положения «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 №842, о критериях предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор - Сапожников Максим Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Почтовый адрес: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Телефон: +7 (495) 408-45-54.

Адрес электронной почты: andreev.sn@mipt.ru.

Официальный оппонент:

Директор научно-технического центра телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», д.ф.-м.н. по научной специальности 01.04.21. – «Лазерная физика».

Степан Николаевич Андреев

25 ноября 2025 г.

Подпись руки
ЗАВЕРЯЮ:
АДМИНИСТРАТОР КАНЦЕЛЯРИИ
АДМИНИСТРАТИВНОГО ОТДЕЛА
О. А. КОРАБЛЕВА

С. И. Андреев

