

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-08-50-59

УДК 535.317.2

Оптическая система распределения квантового ключа по атмосферному каналу связи

Даниил Сергеевич Ширяев^{1✉}, Карина Романовна Разживина²,
Андрей Алексеевич Кундиус³, Никита Александрович Беляков⁴,
Иван Сергеевич Полухин⁵, Евгений Сергеевич Колодезный⁶

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹daniil_shiryaev@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>

²k.razzhivina@niuitmo.ru <https://orcid.org/0009-0000-6104-286X>

³aakundius@itmo.ru <https://orcid.org/0009-0003-6664-0676>

⁴belykovna@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0002-1271-0195>

⁵ispolukhin@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>

⁶evgenii_kolodeznyj@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

Аннотация

Предмет исследования. В статье представлена оптическая система для распределения квантового ключа по атмосферному каналу, которая состоит из двух телескопов передающей и приёмной частей системы квантового распределения ключа на боковых частотах модулированного излучения. **Цель работы.** Разработать оптическую систему, которая позволит использовать одномодовое волокно в качестве входа и выхода системы, а также обеспечит передачу оптического сигнала сверхмалой мощности без внесения дополнительных искажений и реализует протокол распределения квантового ключа по атмосферному оптическому каналу связи на расстояниях не менее 25 м. **Метод.** Для проведения измерений был получен атмосферный квантовый канал связи, который показал стабильную работу без прерывания распределения квантового ключа на протяжении всего процесса проведения измерений. Также было проведено моделирование распространения излучения для оценки вносимого ослабления оптического сигнала. **Основные результаты.** В результате моделирования оптические потери в системе распределения квантового ключа составили порядка 17 дБ. Атмосферный канал связи исследовался на расстояниях 5 м, 10 м и 25 м. Затухания оптического сигнала составили порядка 8 дБ, 13 дБ и 18 дБ, соответственно, которые измерялись с учётом всех оптических элементов системы, в том числе торцов выходного и входного волокон модулей квантового распределения ключей. В соответствии с вносимыми атмосферой оптическими потерями, скорости генерации квантового ключа составили порядка 500 бит/с, 350 бит/с и 190 бит/с с увеличением расстояния, а соответственно и вносимыми потерями. Вероятность погрешности квантования же находилась в диапазоне от 3% до 5%, что находится ниже порога в 6%, который определяет легитимность сформированного ключа и исключает атаку злоумышленника на канал связи. **Практическая значимость.** Совместимость разработанной системы с одномодовым оптическим волокном делает возможным встраивать её в существующую инфраструктуру магистральных линий передачи данных без дополнительных преобразователей оптического излучения. Полученные характеристики оптической системы распределения квантового ключа по атмосферному каналу связи позволяют применять её в системах связи интернета вещей, беспилотного транспорта и прочих движущихся объектах.

Ключевые слова: беспроводная оптическая связь, квантовое распределение ключей, квантовые коммуникации, оптическая система, система наведения, объектив, коллиматор

Благодарность: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442 (код научной темы FSER-2020-0013).

Ссылка для цитирования: Ширяев Д.С., Разживина К.Р., Кундиус А.А., Беляков Н.А., Полухин И.С., Колодезный Е.С. Оптическая система распределения квантового ключа по атмосферному каналу связи // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 8. С. 50–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-50-59>

Коды OCIS: 080.2740; 080.3620.

Optical system for distribution of quantum key over atmospheric communication channel

DANIIL S. SHIRYAEV¹✉, KARINA R. RAZZHIVINA², ANDREI A. KUNDIUS³,
NIKITA A. BELYAKOV⁴, IVAN S. POLUKHIN⁵, EVGENII S. KOLODEZNYI⁶

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹daniil_shiryaev@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>

²k.razzhivina@niuitmo.ru <https://orcid.org/0009-0000-6104-286X>

³aakundius@itmo.ru <https://orcid.org/0009-0003-6664-0676>

⁴belykovna@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0002-1271-0195>

⁵ispolukhin@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>

⁶evgenii_kolodezny@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

Abstract

Subject of study. The optical system of quantum key distribution based on the subcarrier wave modulation method over an atmospheric channel was designed. The optical system consists of transmitting and receiving telescopes. **The purpose of work.** Development of an optical system that allows to use of single-mode fiber as the input and output of the system and ensure the transmission of an ultra-low power optical signal without introducing additional distortion and implement a protocol for distributing a quantum key over an atmospheric optical communication channel at a distance of up to 25 m. **Method.** The experimental setup with atmospheric quantum communication channel was obtained, which showed stable quantum key distribution without interrupting throughout the entire measurement process. Radiation propagation simulations were also carried out to estimate the insertion loss of the optical signal. **Main results.** As a result of the simulation, the optical losses in the quantum key distribution system were about 17 dB. The atmospheric communication channel was studied at distances of 5 m, 10 m and 25 m. The attenuation of the optical signal was about 8 dB, 13 dB and 18 dB, respectively, which were measured considering all optical elements of the system, including the ferrules of the output and input fibers of the quantum key distribution modules. In accordance with the optical losses introduced by the atmosphere, the quantum key generation rates were on the order of 500 bit/s, 350 bit/s and 190 bit/s with increasing distance and, accordingly, insertion losses. The probability of a quantum error was in the range from 3% to 5%, which is below the threshold of 6%, which determines the legitimacy of the generated key and excludes an attack by an attacker on the communication channel. **Practical significance.** The compatibility of the developed optical system with single-mode optical fiber allows integration into the existing infrastructure of data transmission lines without additional optical radiation converters. The obtained characteristics of the optical system for distributing a quantum key over an atmospheric communication channel make it possible to use it in communication systems of the Internet of Things, unmanned vehicles and other moving objects.

Keywords: optical wireless communication, quantum keys distribution, quantum communications, optical system, guidance system, lens, collimator

Acknowledgment: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Research Project № 2019-1442.

For citation: Shiryaev D.S., Razzhivina K.R., Kundius A.A., Belyakov N.A., Polukhin I.S., Kolodeznyi E.S. Optical system for distribution of quantum key over atmospheric communication channel // Opticheskii Zhurnal. 2024.V. 91. № 8. P. 50–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-50-59>

OCIS codes: 080.2740; 080.3620.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительно возрастающие объёмы передаваемой пользователями информации являются стимулом для совершенствования существующих систем передачи данных и разработки новых, в частности, с высоким уровнем защищённости передаваемых данных. Увеличивается число разработок в области беспилотной техники и транспорта, для эксплуатации которых требуются высокая степень защиты передаваемой информации от перехвата или подмены. Классические беспроводные системы передачи данных, например, радиочастотные, не могут обеспечить достаточной защиты передаваемой информации от перехвата [1].

Применение квантовых технологий в системах передачи данных способно значительно повысить защиту передаваемых данных от перехвата, так как квантовый ключ формируется посредством последовательного потока одиночных фотонов и благодаря законам квантовой физики перехватить квантовый ключ становится невозможным без внесения погрешности в канал передачи [2]. На сегодняшний день разработано достаточное множество различных протоколов распределения квантового ключа между объектами сети [3, 4]. Одним из первых протоколов квантового распределения ключей (КРК) является протокол BB84 [5], который использует четыре квантовых состояния поляризации одиночных фотонов, формирующих два сопряжённых базиса поляризации. На сегодняшний день протокол BB84 часто используется для распределения квантового ключа между пользователями в системах КРК на боковых частотах модулированного излучения [6–8], в системах связи наземных объектов с летательными аппаратами [9–11], а также в системах наземной атмосферной коммуникации [12–14].

Для внедрения систем квантовых коммуникаций в существующие волоконно-оптические линии связи сейчас активно разрабатываются системы КРК с длиной волны излучения 1550 ± 5 нм [15–17]. Подвижные объекты

также необходимо обеспечить защищённым каналом связи, который можно реализовать на основе беспроводных систем КРК, потому что классические беспроводные системы передачи данных, как было описано выше, остаются слабо защищены от перехвата информации. Для повышения защиты информации от перехвата возможно применение атмосферных систем КРК.

Распределение квантового ключа в волоконно-оптической линии связи осуществляется посредством передачи по одномодовому оптическому волокну сигнала, который характеризуется сверхмалой оптической мощностью излучения (около 10 пВт) [18]. Поэтому для минимизации затухания и дисперсии оптического сигнала при реализации протокола BB84 применяется длина волны излучения 1550 нм.

Как было показано в работах [6–14], чаще всего атмосферные квантовые каналы связи реализуются на объёмной оптике со встроенными источниками и приёмниками излучения или с применением многомодового оптического волокна для входа и выхода атмосферного квантового канала. Описанный выше подход требует внесения в конструкцию атмосферной линии связи дополнительных оптических элементов для преобразования сигнала между магистральными системами КРК и оптической системой распределения ключа по атмосферному каналу, которые в свою очередь могут вносить дополнительные затухания и искажения в оптический сигнал сверхмалой оптической мощности по сравнению с подходом на основе одномодового оптического волокна. Решение задачи по разработке оптико-электронной системы, реализующей атмосферную передачу оптического сигнала без дополнительных оптических преобразователей, позволит совместить атмосферную связь с магистральными системами КРК, работающих на одномодовых оптоволоконных линиях связи. Из чего вытекает цель настоящей работы — разработать оптическую систему,

которая позволит использовать одномодовое волокно в качестве входа и выхода системы, а также обеспечит передачу оптического сигнала сверхмалой мощности без внесения дополнительных искажений и реализует протокол распределения квантового ключа по атмосферному оптическому каналу связи на расстояниях не менее 25 м.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Оптическая система распределения квантового ключа по атмосферному оптическому каналу связи состоит из модуля-отправителя КРК, подключённого одномодовым оптическим волокном к телескопу передающей части системы КРК; модуля-получателя КРК, подключённого одномодовым оптическим волокном к телескопу приёмной части системы КРК.

Телескопы передающей и приёмной частей системы КРК устанавливаются на опорно-поворотные устройства (ОПУ) с гибридными шаговыми двигателями. Телескоп передающей части системы КРК также содержит два источника лазерного излучения с длинами

волн излучения 1550 ± 5 нм (выход модуля отправителя КРК системы) и 1060 нм (Thorlabs LPS-1060-FC) (рис. 1). Телескопы передающей и приёмной частей КРК системы содержат дихроичные зеркала, отражающие излучение с длинами волн от 1000 нм до 1450 нм и пропускающие излучение с длинами волн от 1550 нм до 2000 нм [19].

Выходной сигнал модуля-отправителя КРК представляет собой модулированное по фазе излучение на длине волны 1550 ± 5 нм, на основе которого осуществляется формирование квантового ключа. Лазерный диод с длиной волны излучения 1060 нм выступает в качестве опорного пучка излучения, по которому осуществляется наведение телескопа передающей части КРК системы на телескоп приёмной части. Более подробно работа системы наведения представлена в нашей прошлой работе [19].

Основой оптической схемы телескопов передающей и приёмной частей КРК системы является объектив коллиматора с фокусным расстоянием 300 мм. Такое фокусное расстояние было выбрано, чтобы увеличить пространство между фиксирующей оснасткой для оптики,

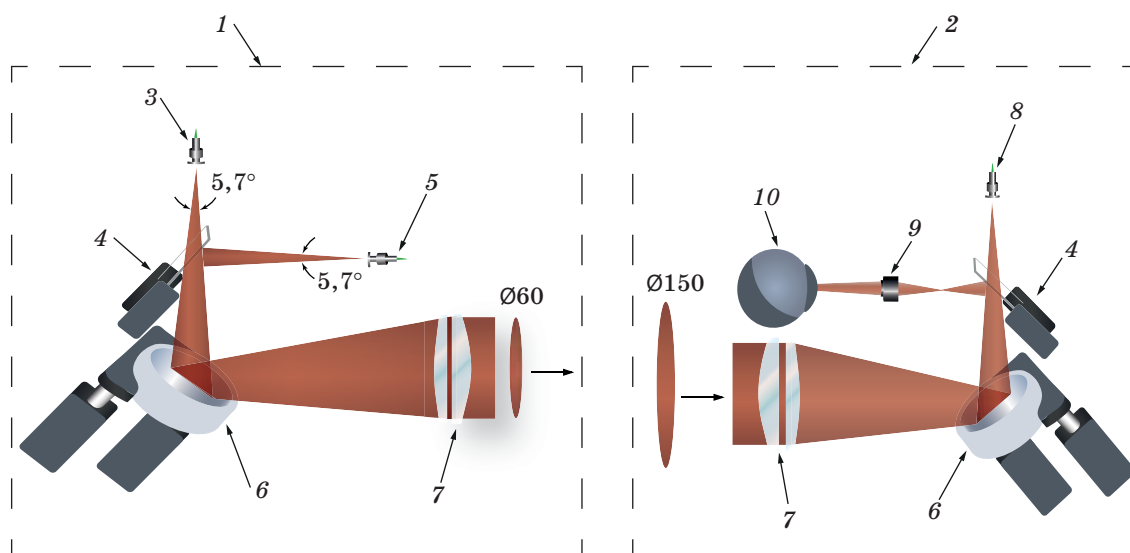


Рис. 1. Оптико-электронная система распределения квантового ключа по атмосферному каналу связи. 1 — телескоп передающей части КРК системы, 2 — телескоп приёмной части КРК системы, 3 — оптическое волокно выхода модуля отправителя КРК 1550 нм, 4 — плоское дихроичное зеркало, 5 — оптическое волокно лазера 1060 нм, 6 — плоское зеркало, 7 — объектив, 8 — оптическое волокно входа модуля получателя КРК 1550 нм, 9 — собирающая линза, 10 — веб-камера

Fig. 1. Optical electronic system of quantum key distribution over atmospheric channel. 1 — transmitting telescope of QKD system, 2 — receiving telescope of QKD system, 3 — 1550 nm transmitting QKD module output optical fiber, 4 — flat dichroic mirror, 5 — 1060 nm laser optical fiber output, 6 — flat mirror, 7 — lens, 8 — 1550 nm receiving QKD module input optical fiber, 9 — convex lens, 10 — web-camera

что упрощает процесс первичной юстировки оптической схемы телескопов КРК системы. Числовая апертура используемого одномодового волокна составляет $Na = 0,1$, а относительное отверстие $1/k = 1:5$.

Эффективная коллимация лазерного пучка достигается при равномерном распределении излучения в апертуре объектива, для чего необходимо согласовать числовые апертуры объектива и оптического волокна. При фокусном расстоянии объектива 300 мм и числовой апертуре $Na = 0,1$ диаметр объектива должен составлять 60 мм. Разработанный для решения поставленной задачи объектив диаметром 60 мм, фокусным расстоянием 300 мм и числовой апертурой $Na = 0,1$ состоит из двух линз. Первая линза — двояковыпуклая с толщиной по оси 8 мм, вторая — вогнуто-выпуклый мениск с толщиной по оси 4 мм, воздушный зазор между линзами составил 2 мм. Было проведено совмещение оптических осей линз объектива, после чего линзы были помещены в общую оправу.

Установка плоского зеркала с серебряным покрытием на оптической оси телескопа позволяет повернуть оптическую ось на угол 90° для уменьшения продольных размеров системы. Плоское зеркало устанавливается на угловой двухосевой транслятор, который обеспечивает погрешность установки оптической оси до 0,1 угловой минуты.

Помимо согласования числовых апертур объектива и оптического волокна для обеспечения симметричного заполнения апертуры объектива излучением коллимированного пучка необходимо обеспечить параллельность оптических осей коллиматоров для длины волны излучения 1550 ± 5 нм и 1060 нм. Параллельность оптических осей коллиматоров для различных длин волн излучения должна достигаться таким образом, чтобы расхождение пятен излучения, имеющих диаметр 100–150 мм, на расстоянии 50 м составляло не более 30 мм, что в угловой мере соответствует 2 минутам дуги (0,034 градуса). Смещение коллимированного пучка на 2–3 угловые минуты соответствует 0,18–0,3 мм линейного поперечного смещения лазерного пучка.

Оптическая схема телескопа приёмной части КРК системы аналогична оптической схеме телескопа передающей части КРК системы за исключением того, что зеркало с се-

ребряным покрытием установлено на угловой двухосевой транслятор с сервоприводами для обеспечения автоматизированной регулировки угла наклона зеркала (рис. 1). Диапазон регулировки углов наклона зеркала составляет до 9 градусов, что позволяет компенсировать погрешности наведения телескопов передающей и приёмной частей КРК системы друг на друга.

Телескопы передающей и приёмной частей КРК системы разрабатывались непосредственно для конкретной конструкции системы КРК [8], основанной на боковых частотах модулированного излучения, модуль-отправитель и модуль-получатель которой имеют одномодовый волоконный выход и вход, соответственно, с длиной волны излучения 1550 ± 5 нм. Поэтому для формирования ключа используется канал с длиной волны излучения 1550 ± 5 нм, а канал с длиной волны излучения 1060 нм применяется в качестве опорного для системы наведения телескопов друг на друга. Пучки излучения с длинами волн 1550 ± 5 нм и 1060 нм совмещены на одной оптической оси для обеспечения возможности отслеживания смещения пучка с торца оптического волокна модуля-получателя КРК по изменению положения пятна излучения опорного пучка. Для коррекции смещения пучка от торца приёмного оптического волокна применяется зеркало на моторизованном двухосевом угловом трансляторе, обеспечивающее компенсацию низкочастотных вибраций лазерного пучка в канале связи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Основным параметром для определения эффективности разработанных телескопов для работы в системе атмосферной оптической связи являются вносимые оптические потери. Оценка вносимых оптических потерь от торца волокна телескопа передающей части КРК системы до торца волокна телескопа приёмной части КРК системы проводилось при использовании пакета инженерного анализа оптических систем. Основной способ оценки эффективности разрабатываемой оптической системы — это оценить вносимые системой оптические потери. Поэтому моделирование осуществлялось для канала распределения квантового ключа. Поглощение атмосферой

не учитывалось по причине того, что источник оптического излучения, используемый в квантовом канале, излучает в диапазоне «окна прозрачности» атмосферы [20].

Торец одномодового волокна имеет числовую апертуру $Na = 0,1$ в воздушной среде, что соответствует углу раскрытия конуса излучения к оптической оси около $5,7$ градусов. Объектив коллиматора согласован с торцом оптического волокна телескопа передающей части КРК системы по параметру числовой апертуры, что позволяет не использовать дополнительные линзы для согласования во избежание ограничения пучка апертурой объектива коллиматора. Торец волокна располагается в фокальной плоскости объектива коллиматора и направляется в объектив. Пучок излучения из торца волокна попадает на дихроичное зеркало с коэффициентом пропускания $0,85$ для длины волны 1550 нм, после чего отражается от зеркала с серебряным покрытием с коэффициентом отражения $0,975$ на длине волны 1550 нм, а затем попадает на объектив. На линзы объектива нанесено просветляющее покрытие, обеспечивающее коэффициент пропускания $0,987$, а общий коэффициент пропускания передающего телескопа составляет $0,775$.

Погрешность совмещения оптических осей передающего и приёмного телескопов составляет до 3 -х угловых минут ($0,05$ градуса), что будет соответствовать линейному смещению пучка излучения на 44 мм при расстоянии между телескопами 50 м. Для гарантированного попадания излучения на объектив телескопа приёмной части КРК системы и попадания излучения на всю поверхность объектива коллиматора диаметром 60 мм необходимо, чтобы диаметр пучка излучения, попадающего на телескоп приёмной части, составлял не менее 150 мм. Тогда коэффициент пропускания составит порядка $0,124$ до первой поверхности объектива коллиматора с допущением равномерности профиля лазерного пучка.

Оптический путь в телескопе приёмной части будет повторять оптический путь в телескопе передающей части, итоговый коэффициент пропускания до плоскости построения изображения на торце одномодового волокна составит $0,096$. На плоскость торца одномодового волокна модуля-получателя КРК системы диаметром 9 мкм попадает пучок с дифракционным кольцом диаметром 20 мкм. Так как числовые

апертуры торца волокна и объектива коллиматора согласованы, всё излучение, за исключением отражённого от торца, будет введено в оптическое волокно, а итоговый коэффициент пропускания системы составит $0,018$, что соответствует ослаблению оптического сигнала не более $17,3$ дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

С целью верификации модели ослабления оптического сигнала и оценки качества квантового канала связи были проведены измерения характеристик квантового канала, а именно вероятности погрешности квантования по битам, оптические потери и скорость генерации квантового ключа.

Телескопы передающей и приёмной частей КРК системы были установлены на опорно-поворотные устройства Skywatcher AZ-EQ6 с гибридными шаговыми двигателями, обеспечивающие погрешность наведения телескопов друг на друга до 3 угловых минут. Оптические волокна модуля-отправителя и модуля-получателя КРК системы, предоставленных компанией ООО «Смартс-кванттелеком», устанавливаются в фокальные плоскости объективов коллиматоров телескопов передающей и приёмной частей соответственно, соединение канала синхронизации и служебного канала осуществлялось по оптическому волокну.

В ходе проведения эксперимента было осуществлено автоматическое наведение передающего телескопа на принимающий телескоп, после чего осуществлялось формирование квантового ключа (рис. 2). Модуль-отправитель КРК системы модулирует по фазе случайным образом импульс оптического излучения, выбирая из двух состояний фазы 0 или π . Оптический импульс проходит через атмосферный канал и попадает в модуль-получатель КРК системы. Модуль-получатель КРК системы снова осуществляет модуляцию полученного оптического импульса случайным образом по фазе, выбирая из двух состояний фазы 0 или π . Детектор одиночных фотонов регистрирует результат интерференции, полученный в результате второй модуляции. Модуль-получатель КРК системы по открытому каналу передаёт информацию о временных промежутках, в которых наблюдалась конструктивная интерференция, что формирует квантовый ключ [6].

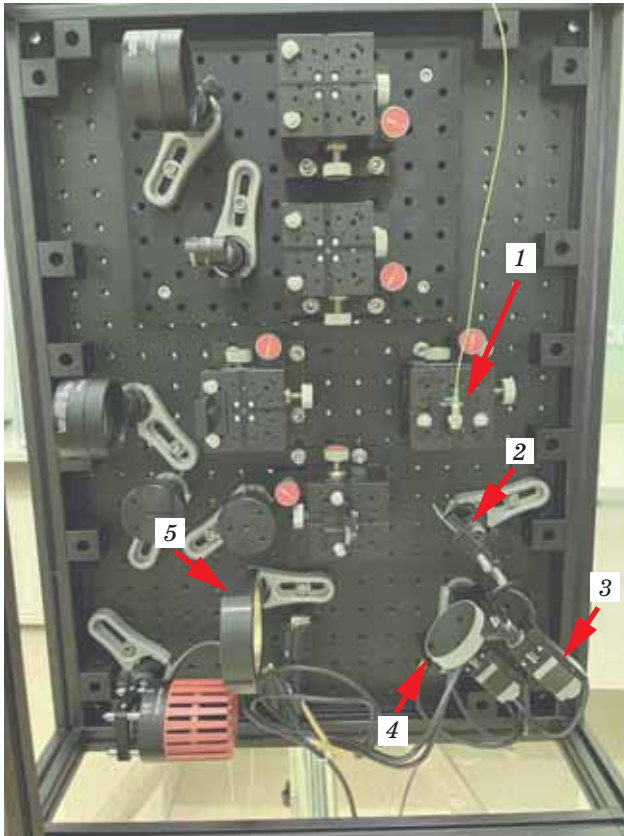


Рис. 2. Фотография телескопа приёмной части КРК системы, состоящего из оптического волокна входа модуля получателя 1550 нм 1, дихроичного зеркала 2, двухосевого углового транслятора 3, плоского зеркала с серебряным покрытием 4, объектива 5

Fig. 2. Photo of the receiving telescope of QKD system, which consists of 1550 nm receiving QKD module input optical fiber 1, dichroic mirror 2, motorized kinematic mirror mount 3, flat mirror with silver coating 4, lens 5

Измерение ослабления оптического сигнала осуществлялось по уровню сигнала, поступившего на детектор одиночных фотонов, а скорость генерации квантового ключа непосредственно рассчитывается из количества бит, полученных во время распределения квантового ключа, в единицу времени. Измерение вероятности погрешности квантования по битам в КРК системе на боковых частотах модулированного излучения проводится с помощью следующего выражения [6]:

$$QBER = \frac{1-V}{2} + \frac{p}{4\mu\eta 10^{\frac{-\alpha L - \beta}{10}}}, \quad (1)$$

где QBER — вероятность погрешности квантования по битам; V — видимость интерференционной картины; p — вероятность темнового счёта детектора одиночных фотонов; α — коэффициент затухания излучения в атмосфере; β — потери в модуле-получателе; μ — среднее число фотонов в импульсе; η — квантовая эффективность детектора одиночных фотонов; L — длина оптической линии связи.

При первичной юстировке оптической схемы телескопов передающей и приёмной частей КРК системы было выявлено значительное влияние астигматизма на качество пучка. Астигматизм возник в результате прохождения оптического пучка через плоскопараллельную пластину, а именно через дихроичное зеркало, установленное под углом к объективу коллиматора. Для компенсации астигматизма, вносимого дихроичным зеркалом, в оптическую схему была добавлена прозрачная плоскопараллельная пластина перед оптическим волокном модуля-получателя КРК.

Исследования атмосферного канала связи проводились на расстояниях 5 м, 10 м и 25 м между телескопами передающей и приёмной частей КРК системы. Затухания оптического сигнала при этом составили в среднем 8 дБ, 13 дБ и 18 дБ соответственно, при этом измерения проводились с вносимыми затуханиями

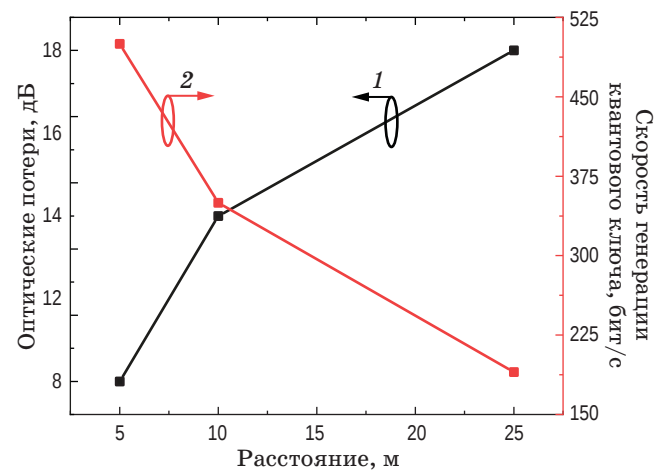


Рис. 3. Зависимость оптических потерь (кривая 1) и скорости генерации квантового ключа (кривая 2) от расстояния между телескопами передающей и принимающей частей КРК системы

Fig. 3. Dependence of optical losses (curve 1) and quantum key generation rate (curve 2) on distance between transmitting and receiving telescopes of QKD system

всех оптических элементов схемы, таких как объективы, зеркала, дихроичные зеркала и торцы волокон выхода и входа модулей отправителя и получателя КРК. Приведённые выше оптические потери позволили достичь скорости генерации ключа порядка 500 бит/с, 350 бит/с и 190 бит/с, соответственно (рис. 3). Значения оптических потерь и скорости генерации ключа приведены в среднем для сеанса измерения и округлены до целых. Сеансы измерений составляли по 30 минут для расстояний 5 м и 10 м, и 8 часов для расстояния 25 м. При этом вероятность погрешности квантования по битам во время проведения измерений находилась в диапазоне от 3% до 5% на протяжении всех сеансов измерений, что находится ниже порога в 6% [6]. Превышение порога в 6% свидетельствовало бы о проникновении в канал связи злоумышленника и дискредитировало бы канал связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана оптическая система, позволяющая использовать одномодовое волокно в качестве входа и выхода системы, а также обеспечивать передачу оптического сигнала сверхмалой мощности без внесения дополнительных искажений и реализовать протокол

распределения квантового ключа по атмосферному оптическому каналу связи на расстояниях от 5 м до 25 м.

Затухание оптического сигнала в образованном атмосферном оптическом канале связи составляло не более 18 дБ на расстояниях до 25 м между передающей и принимающей частями телескопов КРК системы, а скорость генерации квантовых ключей находилась в диапазоне от 190 бит/с до 500 бит/с при вероятности погрешности квантования по битам 3–5%. Значение вероятности погрешности квантования по битам не преодолевает пороговое значение в 6%, которое является показателем дискредитации безопасности квантового распределения ключа.

Разработанная оптико-электронная система позволяет распределять квантовый ключ через атмосферный оптический канал на длине волны 1550 ± 5 нм. Такую систему можно встраивать в магистральные оптоволоконные линии квантовых коммуникаций для обеспечения защищённого доступа к подвижным объектам (автомобиль, дрон, корабль). Основным преимуществом данной системы является то, что атмосферный квантовый канал является продолжением оптоволоконной линии связи и не требует никаких дополнительных устройств сопряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Brassard Gilles. Quantum communication complexity // *Foundations of Physics*. 2003. V. 33. P. 1593–1616. <https://doi.org/10.1023/A:1026009100467>
2. Wootters W.K., Zurek W.H. A single quantum cannot be cloned // *Nature*. 1982. V. 299. № 5886. P. 802–803. <https://doi.org/10.1038/299802a0>
3. Kumar A., Garhwal S. State-of-the-art survey of quantum cryptography // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. V. 28. P. 3831–3868. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09561-2>
4. Syed Rakib Hasan, Mostafa Zaman Chowdhury et al. Quantum communication systems: Vision, protocols, applications, and challenges // *IEEE Access*. 2023. V. 11. P. 15855–15877. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3244395>
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Computers Systems and Signal Processing Bangalore India*. 1984. P. 175.
6. Gleim A.V., Egorov V.I., Nazarov Y.V. et al. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference // *Optics express*. 2016. V. 24. № 3. P. 2619–2633. <https://doi.org/10.1364/OE.24.002619>
7. Глейм А.В., Анисимов А.А., Аснис Л.Н. и др. Квантовая рассылка криптографического ключа по опти-

REFERENCES

1. Brassard Gilles. Quantum communication complexity // *Foundations of Physics*. 2003. V. 33. P. 1593–1616. <https://doi.org/10.1023/A:1026009100467>
2. Wootters W.K., Zurek W.H. A single quantum cannot be cloned // *Nature*. 1982. V. 299. № 5886. P. 802–803. <https://doi.org/10.1038/299802a0>
3. Kumar A., Garhwal S. State-of-the-art survey of quantum cryptography // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. V. 28. P. 3831–3868. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09561-2>
4. Syed Rakib Hasan, Mostafa Zaman Chowdhury et al. Quantum communication systems: Vision, protocols, applications, and challenges // *IEEE Access*. 2023. V. 11. P. 15855–15877. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3244395>
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Computers Systems and Signal Processing Bangalore India*. 1984. P. 175.
6. Gleim A.V., Egorov V.I., Nazarov Y.V. et al. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference // *Optics express*. 2016. V. 24. № 3. P. 2619–2633. <https://doi.org/10.1364/OE.24.002619>
7. Gleim A.V., Anisimov A.A., Asnis L.N. et al. Quantum key distribution in an optical fiber at distances of up to

- ческому волокну на расстояние 200 км со скоростью 180 бит/с // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 3. С. 266. <https://doi.org/10.7868/S0367676514030090>
8. Miroshnichenko G.P., Kozubov A.V., Gaidash A.A. et al. Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack // Optics express. 2018. V. 26. № 9. P. 11292–11308. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011292>
 9. Moll F., Nauerth S., Fuchs C. et al. Communication system technology for demonstration of BB84 quantum key distribution in optical aircraft downlinks // Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans. SPIE. 2012. V. 8517. P. 9–16. <https://doi.org/10.1117/12.929739>
 10. Pugh C.J., Kaiser S., Bourgoin J.P. et al. Airborne demonstration of a quantum key distribution receiver payload // Quantum Science and Technology. 2017. V. 2. № 2. P. 024009. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aa701f>
 11. Liu H.Y., Tian X.H., Gu C. et al. Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes // Physical Review Letters. 2021. V. 126. № 2. P. 020503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.020503>
 12. Manderbach T.S. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km // Phys. Rev. Lett. 2007. T. 98. P. 01504-1–01504-2. <http://doi.org/10.1109/CLEOE-IQEC.2007.4386755>
 13. Heim B., Peuntinger C., Killoran N. et al. Atmospheric continuous-variable quantum communication // New Journal of Physics. 2014. V. 16. № 11. P. 113018. <http://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113018>
 14. Jain A., Khanna A., Bhatt J. et al. Experimental demonstration of free space quantum key distribution system based on the bb84 protocol // 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT49239.2020.9225317>
 15. Samsonov E., Goncharov R., Gaidash A. et al. Subcarrier wave continuous variable quantum key distribution with discrete modulation: mathematical model and finite-key analysis // Scientific Reports. 2020. V. 10. № 1. P. 10034. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66948-0>
 16. Gaidash A., Miroshnichenko G., Kozubov A. Subcarrier wave quantum key distribution with leaky and flawed devices // JOSA B. 2022. V. 39. № 2. P. 577–585. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.439776>
 17. Miroshnichenko G. P., Kozubov A.V., Gaidash A.A. et al. Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack // Optics express. 2018. V. 26. № 9. P. 11292–11308. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011292>
 18. Быковский А.Ю., Компанец И.Н. Квантовая криптография и комбинированные схемы коммуникационных сетей на ее основе // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 9. С. 777–801. <https://doi.org/10.1070/QEL16732>
 19. Ширяев Д.С., Разживина К.Р., Кундиус А.А. и др. Оптическая система для рассылки квантовых ключей по атмосферному каналу связи // Фотон-экспресс. 2023. № 6 (190). С. 501–502. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2023-6-501-502>
 20. Elder T., Strong J. The infrared transmission of atmospheric windows // Journal of the Franklin Institute. 1953. T. 255. № 3. P. 189–208. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(53\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0016-0032(53)90002-7)
 - 200 km and a bit rate of 180 bit/s // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2014. V. 78. P. 171–175. <https://doi.org/10.3103/S1062873814030095>
 8. Miroshnichenko G.P., Kozubov A.V., Gaidash A.A. et al. Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack // Optics express. 2018. V. 26. № 9. P. 11292–11308. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011292>
 9. Moll F., Nauerth S., Fuchs C. et al. Communication system technology for demonstration of BB84 quantum key distribution in optical aircraft downlinks // Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans. SPIE. 2012. V. 8517. P. 9–16. <https://doi.org/10.1117/12.929739>
 10. Pugh C.J., Kaiser S., Bourgoin J.P. et al. Airborne demonstration of a quantum key distribution receiver payload // Quantum Science and Technology. 2017. V. 2. № 2. P. 024009. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aa701f>
 11. Liu H.Y., Tian X.H., Gu C. et al. Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes // Physical Review Letters. 2021. V. 126. № 2. P. 020503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.020503>
 12. Manderbach T.S. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km // Phys. Rev. Lett. 2007. T. 98. P. 01504-1–01504-2. <http://doi.org/10.1109/CLEOE-IQEC.2007.4386755>
 13. Heim B., Peuntinger C., Killoran N. et al. Atmospheric continuous-variable quantum communication // New Journal of Physics. 2014. V. 16. № 11. P. 113018. <http://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113018>
 14. Jain A., Khanna A., Bhatt J. et al. Experimental demonstration of free space quantum key distribution system based on the bb84 protocol // 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT49239.2020.9225317>
 15. Samsonov E., Goncharov R., Gaidash A. et al. Subcarrier wave continuous variable quantum key distribution with discrete modulation: mathematical model and finite-key analysis // Scientific Reports. 2020. V. 10. № 1. P. 10034. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66948-0>
 16. Gaidash A., Miroshnichenko G., Kozubov A. Subcarrier wave quantum key distribution with leaky and flawed devices // JOSA B. 2022. V. 39. № 2. P. 577–585. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.439776>
 17. Miroshnichenko G. P., Kozubov A.V., Gaidash A.A. et al. Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack // Optics express. 2018. V. 26. № 9. P. 11292–11308. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011292>
 18. Bykovsky A.Y., Kompanets I.N. Quantum cryptography and combined schemes of quantum cryptography communication networks // Quantum Electronics. 2018. T. 48. № 9. P. 777. <https://doi.org/10.1070/QEL16732>
 19. Shiryayev D.S., Razzhivina K.R., Kundius A.A. et al. Optical system for quantum key distribution over atmospheric communication channel [in Russian] // Photon-express. 2023. № 6 (190). P. 501–502. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2023-6-501-502>
 20. Elder T., Strong J. The infrared transmission of atmospheric windows // Journal of the Franklin Institute. 1953. T. 255. № 3. P. 189–208. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(53\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0016-0032(53)90002-7)

АВТОРЫ

Даниил Сергеевич Ширяев — аспирант, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190031, Россия; Scopus ID: 57210103692; <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>; daniil_shiryaev@niuitmo.ru

Карина Романовна Разживина — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190031, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-6104-286X>; k.razzhivina@niuitmo.ru

Андрей Алексеевич Кундиус — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190031, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-6664-0676>; aakundius@itmo.ru

Никита Александрович Беляков — аспирант, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190031, Россия; Scopus ID: 57221529296; <https://orcid.org/0000-0002-1271-0195>; belykovna@rambler.ru

Иван Сергеевич Полухин — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190031, Россия; Scopus ID: 56251826100; <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>; ispolukhin@itmo.ru

Евгений Сергеевич Колодезный — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190031, Россия; Scopus ID: 56520395600; <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>; evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Одобрена после рецензирования 20.02.2024

Принята к печати 28.06.2024

AUTHORS

Daniil S. Shiryaev — PhD Student, Junior Research Fellow, ITMO University, Saint-Petersburg, 190031, Russia; Scopus ID: 57210103692; <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>; daniil_shiryaev@niuitmo.ru

Karina R. Razzhivina — Engineer, ITMO University, Saint-Petersburg, 190031, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-6104-286X>; k.razzhivina@niuitmo.ru

Andrei A. Kundius — PhD Student, Engineer, ITMO University, Saint-Petersburg, 190031, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-6664-0676>; aakundius@itmo.ru

Nikita A. Belyakov — PhD Student, Junior Research Fellow, ITMO University, Saint-Petersburg, 190031, Russia; Scopus ID: 57221529296; <https://orcid.org/0000-0002-1271-0195>; belykovna@rambler.ru

Ivan S. Polukhin — Research Fellow, ITMO University, Saint-Petersburg, 190031, Russia; Scopus ID: 56251826100; <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>; ispolukhin@itmo.ru

Evgenii S. Kolodeznyi — PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory, ITMO University, Saint-Petersburg, 190031, Russia; Scopus ID: 56520395600; <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>; evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

The article was submitted to the editorial office 10.01.2024

Approved after review 20.02.2024

Accepted for publication 28.06.2024