

Научная статья

УДК 535.14

doi: 10.17223/19988605/63/12

Масштабируемая спутниковая сеть для квантового распределения ключей на основе кубсата

Алексей Валерьевич Дуплинский¹, Александр Валерьевич Хмелев²,
Виталий Евгеньевич Мерзлинкин³, Любовь Васильевна Письмениук⁴,
Руслан Мухтарович Бахшалиев⁵, Ксения Андреевна Тихонова⁶, Иван Сергеевич Нестеров⁷,
Владимир Леонидович Курочкин⁸, Юрий Владимирович Курочкин⁹

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} *QSpace Technologies, Москва, Россия*

^{1, 6} *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

² *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

³ *КуРейт, Москва, Россия*

^{3, 8, 9} *Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия*

^{8, 9} *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

¹ *al.duplinsky@goqrates.com*

² *a.khmelev@goqrates.com*

³ *v.merzlinkin@goqrates.com*

⁴ *l.pismeniuk@goqrates.com*

⁵ *r.bakhshaliev@goqrates.com*

⁶ *k.tikhonova@goqrates.com*

⁷ *i.nesterov@goqrates.com*

⁸ *v.kurochkin@rqc.ru*

⁹ *yk@goqrates.com*

Аннотация. Квантовое распределение ключей – технология, позволяющая с высоким уровнем секретности вырабатывать ключ шифрования для безопасного обмена информацией между пользователями. В последнее десятилетие концепция квантовой защищенной связи получает все более широкое распространение в мире. В данной статье изложена идея процесса квантового распределения ключей в рамках масштабируемой спутниковой сети на основе стационарной наземной станции с апертурой 600 мм, мобильной приемной станции с апертурой 300 мм и наноспутника в качестве передающего квантовые состояния доверенного узла. Представлены принципы разработки, описаны приемные и передающие элементы сети.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; квантовые коммуникации; спутниковые коммуникации; детектор одиночных фотонов; оптика открытого пространства; квантовые сети; лазерные коммуникации.

Для цитирования: Дуплинский А.В., Хмелев А.В., Мерзлинкин В.Е., Письмениук Л.В., Бахшалиев Р.М., Тихонова К.В., Нестеров И.С., Курочкин В.Л., Курочкин Ю.В. Масштабируемая спутниковая сеть для квантового распределения ключей на основе кубсата // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 63. С. 103–110. doi: 10.17223/19988605/63/12

Original article

doi: 10.17223/19988605/63/12

Cubesat based scalable quantum key distribution satellite network

Alexey V. Duplinsky¹, Aleksander V. Khmelev², Vitalii E. Merzlinkin³, Liubov V. Pismeniuk⁴,
Ruslan M. Bakhshaliev⁵, Ksenia A. Tikhonova⁶, Ivan S. Nesterov⁷, Vladimir L. Kurochkin⁸,
Yury V. Kurochkin⁹

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} *QSpace Technologies, Moscow, Russian Federation*

^{1, 6} *HSE University, Moscow, Russian Federation*

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation³ QRate, Moscow, Russian Federation^{3, 8, 9} National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation^{8, 9} Russian Quantum Center, Moscow, Russian Federation¹ al.duplinsky@goqrates.com² a.khmelev@goqrates.com³ v.merzlinkin@goqrates.com⁴ l.pismeniuk@goqrates.com⁵ r.bakhshaliev@goqrates.com⁶ k.tikhonova@goqrates.com⁷ i.nesterov@goqrates.com⁸ v.kurochkin@rqc.ru⁹ yk@goqrates.com

Abstract. Quantum key distribution is a technology that allows to generate an encryption key with a high level of secrecy for the secure exchange of information between users. Over the past decade, the concept of quantum secure communications has become more prevalent globally. In this article, we outlined the idea of the quantum key distribution process within a scalable satellite network based on a stationary receiving ground station with an aperture of 600 mm, a mobile receiving station with an aperture of 300 mm, and a nanosatellite for transmitting quantum states as a trusted node. The principles of development are presented, the receiving and transmitting elements of the network are described.

Keywords: quantum key distribution; quantum communications; satellite communications; single photon detector; free-space optics; quantum networks; laser communications.

For citation: Duplinsky, A.V., Khmelev, A.V., Merzlinkin, V.E., Pismeniuk, L.V., Bakhshaliev, R.M., Tikhonova, K.V., Nesterov, I.S., Kurochkin, V.L. Kurochkin, Y.V. (2023) Cubesat based scalable quantum key distribution satellite network. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 63. pp. 103–110. doi: 10.17223/19988605/63/12

Введение

Одно из прикладных применений квантовых явлений – квантовое распределение ключей (КРК) – метод получения общего секретного ключа шифрования между абонентами, где защищенность передачи такого ключа гарантируется законами квантовой физики. Такие эффекты, как запрет клонирования квантового состояния и неразличимость неортогональных состояний, гарантируют секретность связи, а стойкость получаемого ключа перед квантовым компьютером определяет основные преимущества данного типа коммуникации перед классическим шифрованием.

Большинство систем КРК использует для передачи информации фотоны, вследствие чего широкое распространение получила оптоволоконная квантовая коммуникация. Однако данный способ связи накладывает физические ограничения на масштабируемость таких систем из-за наличия затухания сигнала в оптическом волокне. По этой причине практическое применение оптоволоконных систем КРК ограничено сотнями километров [1].

Реализация спутниковой системы квантового распределения ключей позволяет расширить границы использования существующих систем КРК [2]. Помимо возможности развертывания каналов КРК до масштабов Земли без использования большого количества доверенных узлов, спутниковая технология дает возможность распространить КРК на объекты, подключение к которым оптического волокна невозможно либо неэкономично [2].

Сейчас в мире на разных этапах реализации существует множество проектов спутниковой квантовой связи: QEYSSat (Канада) [3], SpooQy-1 (Сингапур) [4], британские QUARC [5] и ROKS [6], QUBE (Германия) [7], а также совместные международные проекты Nanobob (Франция–Австрия) [8] и SPEQTRE (Великобритания–Сингапур) [9]. Однако первым успешно функционирующим спутником, передающим квантовые состояния, является аппарат «Мо-Цзы», который был запущен в Китайской Народной Республике в 2016 г. [10]. Более того, с помощью этого спутника в 2021 г. была реализована самая масштабная на сегодняшний день квантовая коммуникационная сеть общей протяженностью 4 600 км [11].

Ранее нами уже были описаны шаги по созданию квантовой сети на основе разработанных стационарных приемных станций для спутникового КРК [12]. Впоследствии результаты тестов и экспериментальных измерений приемных модулей [13–15], показавших работоспособность, легли в основу разработки миниатюрной мобильной приемной станции, а также основополагающего элемента планируемой сети – сверхмалого спутника формата кубсат для КРК с Землей.

В данной работе описана процедура получения двумя наземными станциями общего секретного ключа, используя спутник в качестве промежуточного доверенного узла. Представлены разработанные и спроектированные элементы квантовой сети, а именно первый российский квантовый спутник и наземные приемные станции двух типов.

1. Схема сети

Схема разрабатываемой спутниковой сети для квантового распределения ключей включает в себя передающий элемент – спутник, и несколько приемных узлов сети в виде наземных станций. Использование спутника предполагается в качестве передающего доверенного узла таким образом, что в ходе проведения сеансов квантового распределения ключей им запоминается криптографический ключ.

После того как с обеими наземными станциями проведены сеансы связи, результат побитового сложения ключей на спутнике оглашается по открытому каналу. Далее наземные станции из опубликованного ключа получают общий секретный ключ, также побитовым сложением своего ключа и опубликованного. В конце данной процедуры приемные станции могут использовать полученный общий секретный ключ для защищенного сеанса передачи информации по классическому каналу связи.

Применение спутника в качестве передающего элемента сети обусловлено особенностями распространения направленного оптического излучения в атмосфере. Турбулентность негативно влияет на качество оптического пучка и в основном наблюдается вблизи поверхности Земли. Это приводит к тому, что при распространении излучения по каналу Земля–спутник (uplink) луч обладает большей областью блуждания, чем при передаче по каналу спутник–Земля (downlink), так как турбулентные слои окажутся в начале пути распространения луча.

Стоит также отметить, что функционал спутника и приемных станций предназначен для квантового распределения ключей согласно протоколу decoy-state BB84. Данный протокол предполагается использовать на основе поляризационного кодирования информации с применением четырех поляризационных состояний одиночных фотонов из двух базисов. В силу того, что атмосфера вносит допустимо малые поляризационные искажения в фотонные состояния, данный подход для спутникового КРК является предпочтительным, а сам принцип был экспериментально подтвержден в работе [11].

2. Наземные приемные станции

Стационарная наземная приемная станция – элемент перспективной спутниковой сети КРК – расположена в Московской области, менее чем в 60 км от центра Москвы. Такое местонахождение предполагает близость крупных элементов информационной инфраструктуры, а также высокую концентрацию оптоволоконных сетей. В перспективе это позволит интегрировать спутниковую сеть КРК с городской оптоволоконной сетью квантовой связи.

Телескоп диаметром 600 мм, а также конструктив оптической схемы позволяют отлаживать алгоритмы, ставить эксперименты и оперативно обрабатывать перспективные технологии для спутникового КРК. Двухконтурная система наведения и стабилизации позволяет отслеживать направленное излучение со спутника со среднеквадратичной угловой ошибкой не более 10 мкрад.

В схеме осуществляется работа с оптическим излучением на длине волны 850 нм для квантового канала, 532 нм для канала синхронизации и системы наведения, длина волны 671 нм используется для лазера-маяка. Квантовый сигнал, попадая в приемный телескоп, далее поступает в блок обработки и анализа, а затем в поляризационный анализатор, выполняющий функцию декодера. После сигнал заводится в оптоволокно и регистрируется детекторами одиночных фотонов. Одновременно с этим

осуществляется запись временных меток в канале синхронизации для последующего сопоставления временных промежутков на спутнике и наземной станции. На рис. 1, а приведена схема стационарной приемной станции спутникового квантового распределения ключей, в которой используются следующие обозначения: CPL – коллиматор; POL – поляризатор; PBS – поляризационный светоделительный куб; HWP – полуволновая пластина; BS – 50:50 светоделительный куб; IF1 – интерференционный фильтр (центральная длина волны 850 нм; полуширина 10 нм); HWP-m – моторизованная полуволновая пластина; BE – расширитель пучка; DM – дихроичное зеркало; L1 – линза; FSM – быстрое зеркало; RCT – телескоп системы Ричи-Кретьена с апертурой 600 мм; CAM – камера; IF2 – интерференционный фильтр (центральная длина волны 532 нм; полуширина 10 нм); 5 ch SPDs – 5-канальный модуль детекторов одиночных фотонов; TDC – время-цифровой преобразователь; PA – поляризационный анализатор (декодер); APS – модуль анализа и обработки оптических сигналов.

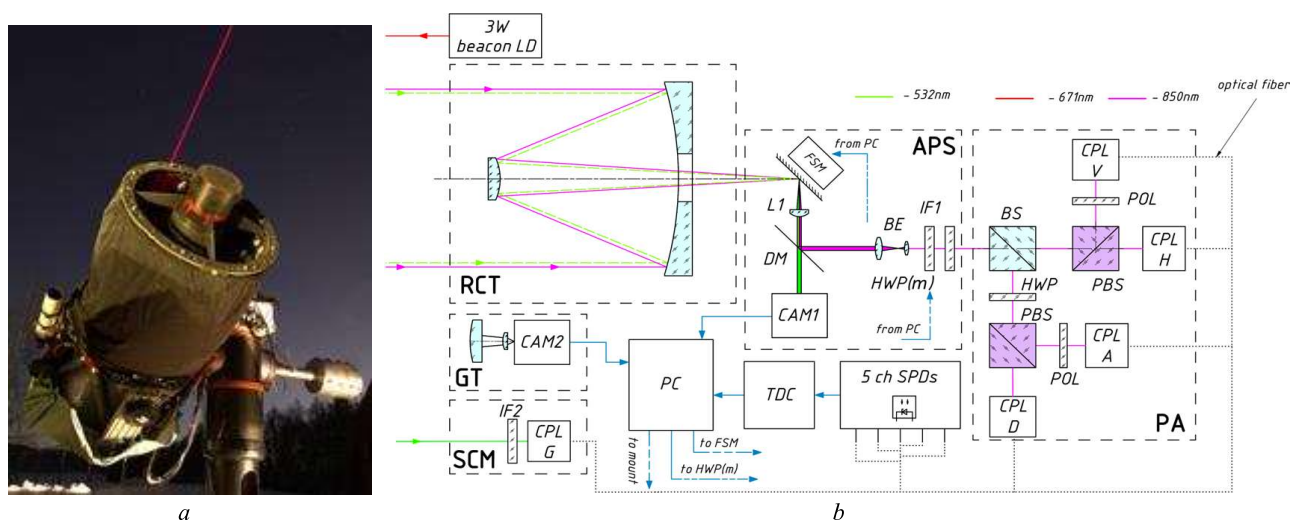


Рис. 1. Стационарная приемная станция спутникового квантового распределения ключей (а) и ее схема (b)

Fig. 1. Stationary receiving station of satellite quantum key distribution (a) and its scheme (b)

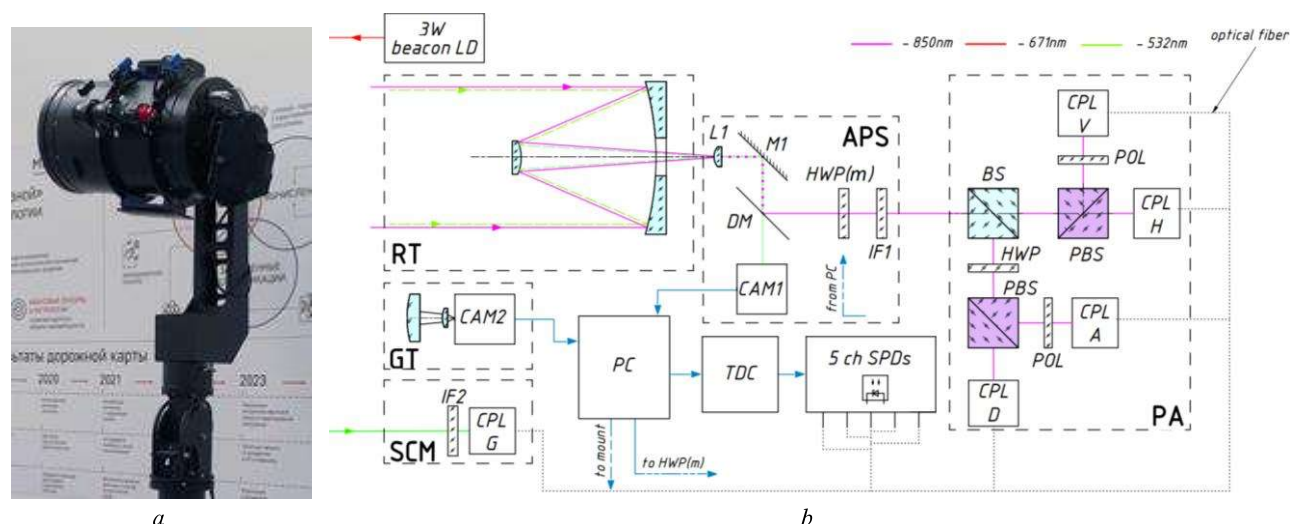


Рис. 2. Мобильная приемная станция спутникового квантового распределения ключей (а) и ее схема (b)

Fig. 2. Mobile receiving station of satellite quantum key distribution (a) and its scheme (b)

В качестве еще одного элемента спутниковой сети КРК выступает мобильная приемная станция. В конструкции этого наземного модуля используются уменьшенный относительно стационарной станции приемный телескоп с апертурой 300 мм, миниатюрные оптические элементы модуля анализа и обработки оптических сигналов, а также декодера. Помимо этого, за счет снижения массы системы

в конструкции станции удалось применить упрощенное опорно-поворотное устройство, использующее при этом точную систему углового позиционирования. Это вместе с увеличенным полем зрения оптической части станции позволило отказаться от контура точной стабилизации оптического сигнала при ожидаемой угловой ошибке ведения спутника около 70 мкрад.

Такая станция (рис. 2, а) мобильна, что позволяет оперативно развернуть ее деятельность в любой точке Земли, тем самым масштабируя протяженность сети, а также возможное количество абонентов – потребителей ключей. На рис. 2, б обозначено: CPL – коллиматор; POL – поляризатор; PBS – поляризационный светоделительный куб; HWP – полуволновая пластина; BS – 50:50 светоделительный куб; IF1 – интерференционный фильтр (центральная длина волны 850 нм; полуширина 10 нм); HWP-m – моторизованная полуволновая пластина; M1 – зеркало; L1 – линза; FSM – быстрое зеркало; RT – приемный телескоп с апертурой 300 мм; CAM – камера; IF2 – интерференционный фильтр (центральная длина волны 532 нм; полуширина 10 нм); 5 ch SPDs – 5-канальный модуль детекторов одиночных фотонов; TDC – время-цифровой преобразователь; PA – поляризационный анализатор (декодер); APS – модуль анализа и обработки оптических сигналов.

3. Сверхмалый спутник для КРК

Все перечисленные во введении зарубежные проекты спутникового КРК, за исключением аппарата «Мо-Цзы» [11], предполагают использование сверхмалых спутников формата кубсат. Более того, ученые Китайского научно-технического университета также заявляют об актуальности использования недорогих малых квантовых спутников, и уже сейчас на орбиту выведен их новый низкоорбитальный квантовый микро-наноспутник, запущенный с космодрома Цзюань 27 июля 2022 г.

В настоящий момент запущено уже более 1 800 спутников формата кубсат, а в ближайшие 6 лет прогнозируется запуск еще около 2 000 штук. Использование такого формата позволяет свести к минимуму разработку в части спутниковой платформы и максимально использовать стандартные решения, которые можно адаптировать под технические требования нашего передающего модуля. Доступность сверхмалых спутников способствует снижению рисков при отработке технологии и проверке технических решений. Кроме того, появляется возможность постепенного увеличения функционала сети за счет внедрения передовых модулей с новыми запусками, что также упрощает рост количества передающих спутников и увеличивает зону покрытия квантовой сети. Все это открывает перспективы для реализации межспутникового КРК и увеличения пропускной способности сети.

Основным функционалом спроектированной полезной нагрузки (рис. 3) для сверхмалого спутника формата кубсат является квантовое распределение ключей по открытому каналу спутник–Земля.

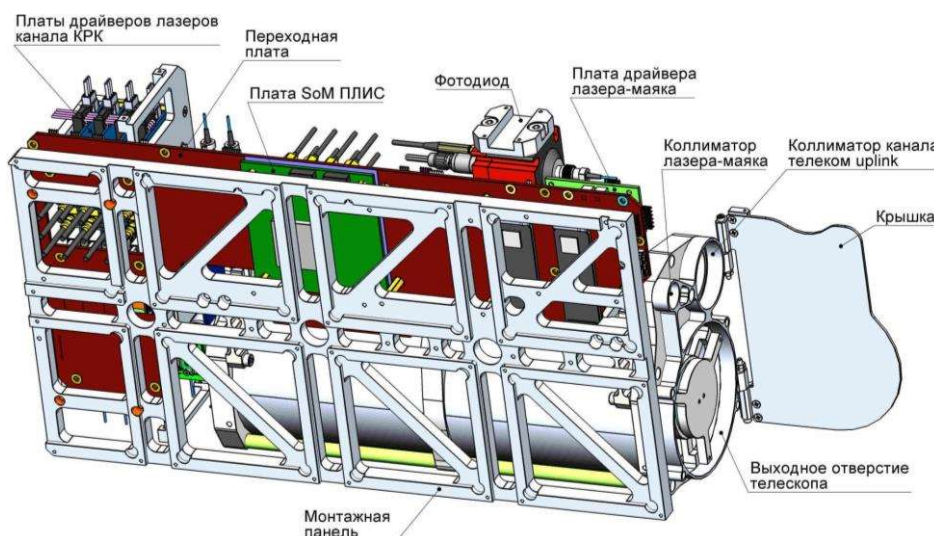


Рис. 3. Общий вид полезной нагрузки сверхмалого спутника формата кубсат для квантового распределения ключей
Fig. 3. General view of the payload of an ultra-small satellite of the cubesat format for the quantum key distribution

В спутнике можно выделить несколько подсистем: систему точного наведения, оптический тракт (включая передающий телескоп), лазер-маяк, систему квантового распределения ключей, а также блок приема / передачи для классической лазерной связи (телеком). Дуплексная телеком оптическая связь в данном случае необходима по причине передачи больших объемов данных в процессе генерации и обработки ключа по каналам спутник–Земля и Земля–спутник. Передача большого объема данных с использованием доступных радиочастотных диапазонов приведет к значительным временным затратам. Применение же лазерной связи позволяет сократить это время и значительно расширить функционал аппарата, а наличие систем наведения и стабилизации, требуемых для работы системы КРК, предоставляет возможность интеграции ее в оптическую схему спутника.

Взаимное наведение оптических систем спутника и наземной приемной станции осуществляется при помощи лазеров-маяков, выступающих в качестве опорных световых сигналов. Камера системы наведения спутника детектирует сигнал маяка наземной станции на длине волны 671 нм, собственный маяк спутника работает на длине волны 532 нм, при этом выполняя также функции передатчика сигналов синхронизации. Непосредственно сама генерация и передача квантовых состояний осуществляется на длине волны 850 нм. После сеанса КРК, в последующие пролеты, спутник и наземная станция проводят обмен информацией по классическому телеком каналу оптической связи с целью исправления ошибок и усиления секретности полученного ключа.

Заключение

Спутниковое квантовое распределение ключей является молодым направлением научно-технического прогресса с единичными примерами практической реализации. В свою очередь, использование сверхмалых спутников формата кубсат открывает возможности для реализации технологии квантовой коммуникации и способствует ускорению процесса ее развития.

Описан принцип работы ячейки спутниковой квантовой сети, состоящей из двух наземных станций и одного спутника в качестве доверенного узла, способных распределить общий секретный ключ на масштабах планеты. Рассмотрены функционирующие наземные станции, разработанные для приема квантового сигнала со спутника.

Кроме того, нами представлен спроектированный спутниковый аппарат в формате кубсат, предназначенный для КРК, а также описан его основной функционал. В дальнейшем использование недорогих сверхмалых спутников для КРК может стать первым шагом на пути к сети с глобальным покрытием, а также ускорить процесс практических испытаний технических решений и модернизации алгоритмов.

Список источников

1. Wang S., Yin Z.Q., He D.Y., Chen W., Wang R.Q., Ye P., Han Z.F. Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre // *Nature Photonics*. 2022. V. 16 (2). P. 154–161.
2. Liu H.Y., Tian X.H., Gu C., Fan P., Ni X., Yang R., Zhu S.N. Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks // *National science review*. 2021. V. 7 (5) P. 921–928.
3. Jennewein T., Bourgoin J.P., Higgins B., Holloway C., Meyer-Scott E., Erven C., Laflamme R. QEYSSAT: A mission proposal for a quantum receiver in space // *SPIE OPTO Proc.* 2014. V. 8997: Advances in photonics of quantum computing memory and communication VII. P. 21–27.
4. Lim H. Y., Vergoossen T., Bedington R., Bai X., Villar A., Lohrmann A., Ling A. Thermo-mechanical design for a miniaturized quantum light source on board the spooqy-1 cubesat // *arXiv preprint*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.14442>
5. Mazzearella L., Lowe C., Lowndes D., Joshi S.K., Greenland S., McNeil D. ... Oi D.K.L. QUARC: quantum research cubesat – a constellation for quantum communication // *Cryptography*. 2020. V. 4 (1). Art. 7.
6. Mercury C., Mohapatra S., Colquhoun C., Greenland S., Cebecauer M., Karagiannakis P., Rarity J. Payload Testing of a Weak Coherent Pulse Quantum Key Distribution Module for the Responsive Operations on Key Services (ROKS) Mission // *Proc. SSC21-IX-04*. 2021. P. 1–8. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5069&context=smallsat>
7. Haber R., Garbe D., Schilling K., Rosenfeld W. Qube-a cubesat for quantum key distribution experiments // *Proc. SSC18-III-05*. 2018. P. 1–8. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4081&context=smallsat>
8. Kerstel E., Gardelein A., Barthelemy M., Fink M., Joshi S.K., Ursin R. Nanobob: A CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration // *EPJ Quantum Technology*. 2018. V. 5 (1). P. 1–6.

9. Dalibot C., Tustain S. The preliminary thermal design for the SPEQTRE CubeSat // 2020 International Conference on Environmental Systems. URL: <https://hdl.handle.net/2346/86436>
10. Liao S.K., Cai W.Q., Liu W.Y., Zhang L., Li Y., Ren J.G., Pan J.W. Satellite-to-ground quantum key distribution // *Nature*. 2017. V. 549 (7670). P. 43–47.
11. Chen Y.A. et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4600 kilometres // *Nature*. 2021. V. 589 (7841). P. 214–219.
12. Kurochkin V.L., Khmelev A.V., Mayboroda V.F., Bakhshaliev R.M., Duplinsky A.V., Kurochkin Y.V. Elements of satellite quantum network // *International Conference on Micro-and Nano-Electronics*. 2022. V. 12157. P. 492–499.
13. Kurochkin V.L., Khmelev A.V., Petrov I.V., Miller A.V., Feimov A.A., Mayboroda V.F., Kurochkin Y.V. Registration of the quantum state of a single photon to create a satellite quantum network // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1680 (1). Art. 012031.
14. Khmelev A.V., Duplinsky A.V., Mayboroda V.F., Bakhshaliev R.M., Balanov M.Y., Kurochkin V.L., Kurochkin Y.V. Recording of a Single-Photon Signal from Low-Flying Satellites for Satellite Quantum Key Distribution // *Technical Physics Letters*. 2021. V. 47 (12) P. 858–861.
15. Khmelev A.V., Duplinsky A.V., Kurochkin V.L., Kurochkin Y.V. Stellar calibration of the single-photon receiver for satellite-to-ground quantum key distribution // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2086 (1). Art. 012137.

References

1. Wang, S., Yin, Z.Q., He, D. Y., Chen, W., Wang, R., Ye, P. & Han, Z.F. (2022) Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre. *Nature Photonics*. 16(2). pp. 154–161. DOI: 10.1038/s41566-021-00928-2
2. Liu, H.Y., Tian, X.H., Gu, C., Fan, P., Ni, X., Yang, R. & Zhu, S.N. (2020) Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks. *National Science Review*. 7(5). pp. 921–928. DOI: 10.1093/nsr/nwz227
3. Jennewein, T., Bourgoin, J. P., Higgins, B., Holloway, C., Meyer-Scott, E., Erven, C. & Laflamme, R. (2014) QEYSSAT: a mission proposal for a quantum receiver in space. *SPIE OPTO Proc.* 8997. pp. 21–27.
4. Lim, H.Y., Vergoossen, T., Bedington, R., Bai, X., Villar, A., Lohrmann, A. & Ling, A. (2020) *Thermo-mechanical design for a miniaturized quantum light source on board the spooqy-1 cubesat*. [Online] Available from: <https://arxiv.org/abs/2006.14442>.
5. Mazzarella, L., Lowe, C., Lowndes, D., Joshi, S.K., Greenland, S., McNeil, D. & Oi, D.K.L. (2020) QUARC: quantum research cubesat – a constellation for quantum communication. *Cryptography*. 4(1). Art. 7. DOI: 10.3390/cryptography4010007
6. Mercury, C., Mohapatra, S., Colquhoun, C., Greenland, S., Cebecauer, M., Karagiannakis, P. & Rarity, J. (2021) Payload testing of a weak coherent pulse quantum key distribution module for the responsive operations on key services. *Proc. SSC21-IX-04*. pp. 1–8.
7. Haber, R., Garbe, D., Schilling, K. & Rosenfeld, W. (2018) Qube-a cubesat for quantum key distribution experiments. *Proceedings SSC18-III-05*. pp. 1–8. [Online] Available from: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4081&context=smallsat>
8. Kerstel, E., Gardelein, A., Barthelemy, M., Fink, M., Joshi, S. K. & Ursin, R. (2018) Nanobob: A CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration. *EPJ Quantum Technology*. 5(1). pp. 1–6.
9. Dalibot, C. & Tustain, S. (2020) The preliminary thermal design for the SPEQTRE CubeSat. *International Conference on Environmental Systems*. [Online] Available from: <https://hdl.handle.net/2346/86436>
10. Liao, S.K., Cai, W.Q., Liu, W.Y., Zhang, L., Li, Y., Ren, J.G. & Pan, J.W. (2017) Satellite-to-ground quantum key distribution. *Nature*. 549(7670). pp. 43–47.
11. Chen, Y.A. et al. (2021) An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometers. *Nature*. 589(7841). pp. 214–219.
12. Kurochkin, V.L., Khmelev, A.V., Mayboroda, V.F., Bakhshaliev, R.M., Duplinsky, A.V. & Kurochkin, Y.V. (2022) Elements of satellite quantum network. *International Conference on Micro-and Nano-Electronics 2021*. 12157. pp. 492–499.
13. Kurochkin, V.L., Khmelev, A.V., Petrov, I.V., Miller, A.V., Feimov, A.A., Mayboroda, V.F., ... & Kurochkin, Y.V. (2020) Registration of the quantum state of a single photon to create a satellite quantum network. *Journal of Physics: Conference Series*. 1680(1). Art. 012031.
14. Khmelev, A.V., Duplinsky, A.V., Mayboroda, V.F., Bakhshaliev, R.M., Balanov, M.Y., Kurochkin, V.L., & Kurochkin, Y.V. (2021) Recording of a Single-Photon Signal from Low-Flying Satellites for Satellite Quantum Key Distribution. *Technical Physics Letters*. 47(12). pp. 858–861.
15. Khmelev, A.V., Duplinsky, A.V., Kurochkin, V.L., & Kurochkin, Y.V. (2021) Stellar calibration of the single-photon receiver for satellite-to-ground quantum key distribution. *Journal of Physics: Conference Series*. 2086(1). Art. 012137.

Информация об авторах:

Дуплинский Алексей Валерьевич – аспирант Департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»; инженер ООО «КуСпэйс Технологии» (Москва, Россия). E-mail: al.duplinsky@goqrte.com

Хмелев Александр Валерьевич – аспирант Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет); младший научный сотрудник ООО «КуСпэйс Технологии» (Долгопрудный, Россия). E-mail: a.khmelev@goqrte.com

Мерзлинкин Виталий Евгеньевич – аспирант Национального исследовательского технологического университета МИСиС; младший научный сотрудник ООО «КуСпэйс Технологии» (Москва, Россия). E-mail: v.merzlinkin@goqrte.com

Письменюк Любовь Васильевна – инженер ООО «КуСпэйс Технологии» (Москва, Россия). E-mail: l.pismeniuk@goqrte.com

Бахшалиев Руслан Мухтарович – инженер оптических квантовых коммуникаций ООО «КуСпэйс Технологии» (Москва, Россия). E-mail: r.bakhshaliev@goqrte.com

Тихонова Ксения Андреевна – инженер-электронщик, программист ПЛИС ООО «КуСпэйс Технологии» (Москва, Россия). E-mail: k.tikhonova@goqrte.com

Нестеров Иван Сергеевич – инженер-электронщик ООО «КуСпэйс Технологии» (Москва, Россия). E-mail: i.nesterov@goqrte.com

Курочкин Владимир Леонидович – кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией квантовых коммуникаций Центра компетенций НТИ «Квантовые коммуникации» Национального исследовательского технологического университета МИСиС (Москва, Россия). E-mail: v.kurochkin@rqc.ru

Курочкин Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, директор Центра компетенций НТИ «Квантовые коммуникации» Национального исследовательского технологического университета МИСиС (Москва, Россия). E-mail: yk@goqrte.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Duplinsky Alexey V. (Post-graduate Student, Department of Electronic Engineering, National Research University Higher School of Economics. Engineer at QSpace Technologies LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: al.duplinsky@goqrte.com

Khmelev Aleksander V. (Post-graduate Student, Moscow Institute of Physics and Technologies, Dolgoprudny, Russian Federation. Researcher at QSpace Technologies LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: a.khmelev@goqrte.com

Merzlinkin Vitalii E. (Post-graduate Student, National university of science and technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation. Researcher at QRate LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: v.merzlinkin@goqrte.com

Pismeniuk Liubov V. (Engineer at QSpace Technologies LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: l.pismeniuk@goqrte.com

Bakhshaliev Ruslan M. (Quantum Communication Optical Engineer at QSpace Technologies LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: r.bakhshaliev@goqrte.com

Tikhonova Ksenia A. (Electronic Engineer, FPGA programmer at QSpace Technologies LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: k.tikhonova@goqrte.com

Nesterov Ivan S. (Electronics Engineer at QSpace Technologies LLC, Moscow, Russian Federation). E-mail: i.nesterov@goqrte.com

Kurochkin Vladimir L. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Quantum Communications Laboratory of the Competence Center of the NTI “Quantum Communications” at the National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation). E-mail: v.kurochkin@rqc.ru

Kurochkin Yury V. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the NTI Competence Center “Quantum Communications” at the National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation). E-mail: yk@goqrte.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Received 30.10.2022; accepted for publication 09.06.2023

Поступила в редакцию 30.10.2022; принята к публикации 09.06.2023