

# ЗАДЕЙСТВОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВУЗОВСКОЙ НАУКИ ДЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ СЕТИ

## USE OF THE POTENTIAL OF UNIVERSITY SCIENCE TO DEPLOY A REGIONAL QUANTUM NETWORK

**A. Chuvakov  
S. Gavlievsky**

*Summary.* This article analyzes domestic and foreign experience in creating quantum networks. The main problems that arise when deploying a quantum regional network are formulated. Solutions based on the use of a systematic approach are proposed.

*Keywords:* quantum communications, quantum networks, quantum keys, generation and delivery of quantum keys, quantum network structure, modeling, system analysis.

**Чуваков Александр Владимирович**

*К.х.н., доцент, Самарский государственный  
технический университет,  
avch2105@gmail.com*

**Гавлиевский Сергей Леонидович**

*Д.т.н., профессор, профессор, Самарский  
государственный технический университет  
gslhome@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной статье проанализирован отечественный и зарубежный опыт создания квантовых сетей. Сформулированы основные проблемы, возникающие при развертывании квантовой региональной сети. Предложены решения, базирующиеся на использовании системного подхода.

*Ключевые слова:* квантовые коммуникации, квантовые сети, квантовые ключи, выработка и доставка квантовых ключей, структура квантовой сети, моделирование, системный анализ.

### Введение

Правительственная комиссия по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности под председательством заместителя председателя Правительства Российской Федерации Дмитрия Чернышенко одобрила дорожную карту развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации», разработанную ОАО «РЖД» совместно с ведущими экспертами и научными организациями. Инфраструктура «РЖД» объединяет более 75 тыс. км оптико-волоконных сетей и собственные системы связи по всей стране. Интегрируя наши возможности с усилиями участников рынка и регуляторов, мы сможем выстроить модель кооперации от базовых научных разработок до конечного применения», — сказал заместитель генерального директора — главный инженер ОАО «РЖД» Сергей Кобзев [1].

Важнейшей проблемой создания квантовых сетей является выработка и доставка квантовых ключей. В данной статье рассматриваются различные варианты практического решения этой задачи на сети регионального оператора с учетом наличия у него оптоволоконной сети широкополосного доступа, развернутой на базе рекомендаций Broadband Forum [2].

### Дорожная карта развития квантовых коммуникаций

Технология квантового распределения ключей (КРК) базируется на доказанной теореме о запрете клонирова-

ния произвольного неизвестного квантового состояния. Благодаря использованию этого принципа, технология квантовых коммуникаций решает широко известную проблему распределения симметричных ключей в сфере информационной безопасности, т.к. копирование одиночных фотонов, несущих в своем состоянии информацию о ключах, невозможно, а попытка перехвата будет обнаружена еще на стадии создания ключа до его использования. Этот эффект позволяет двум и более легитимным сторонам получить симметричный ключ, гарантированно известный только им.

В документе Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии» показан пример инфраструктуры квантовых сетей в РФ к 2024 г. [1]. В этом примере (см. рис. 1) укрупненно изображено подключение региональных филиалов к центральным офисам крупнейших российских компаний.

Новый рынок квантовых коммуникаций будет обслуживать операторы связи, органы государственной власти, финансовые организации, организации здравоохранения, операторы критической инфраструктуры (таких как ОАО «РЖД») и других участников. Кроме того, как на российском, так и на зарубежном рынке появится возможность коммерциализации услуг квантовой связи и отечественных продуктов квантовой криптографии.

### Ограничения дальности и скорости передачи данных

Известно, что потери в оптоволоконных кабелях растут экспоненциально с увеличением его длины. Для

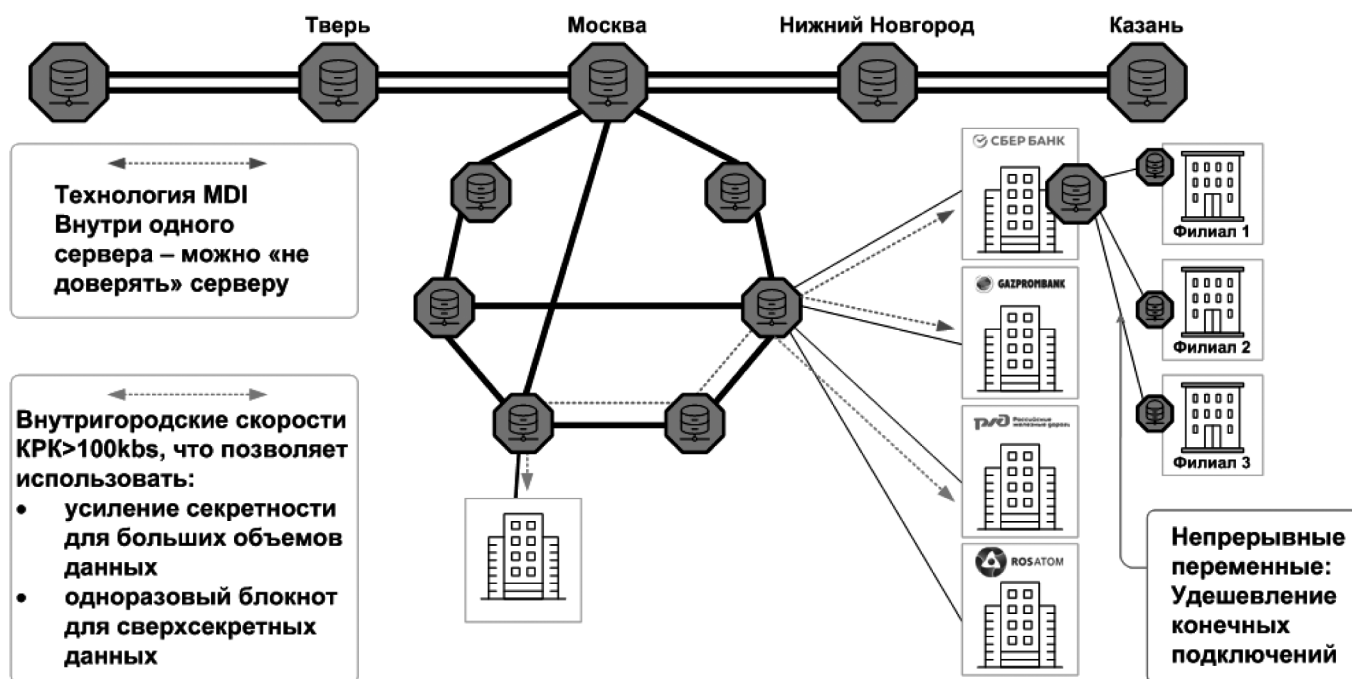


Рис. 1. Пример инфраструктуры квантовых сетей в РФ к 2024 г.

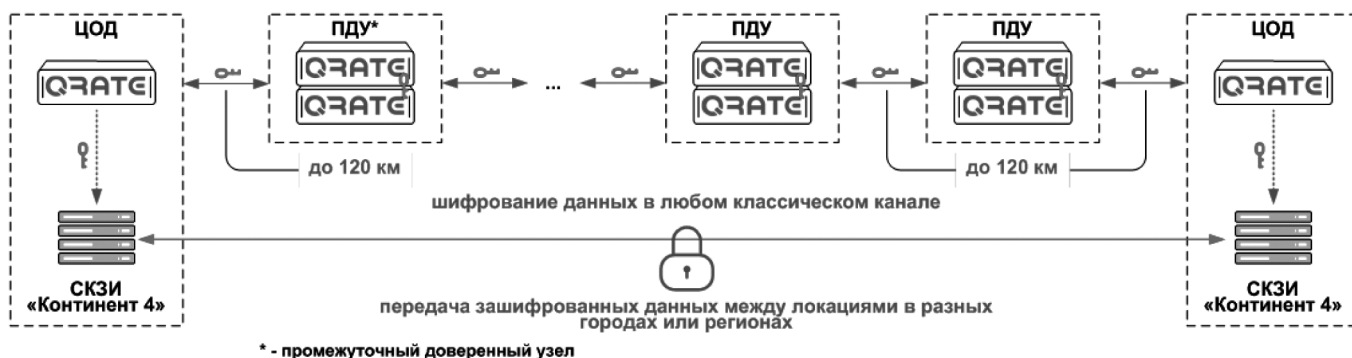


Рис.2. Увеличение дальности за счет использования промежуточных доверенных узлов

традиционных систем и систем связи это стандартная техническая задача, которую решают обычные устройства типа повторителей, коммутаторов и маршрутизаторов, которые восстанавливают и усиливают сигнал. Именно, благодаря такой возможности современные телекоммуникационные сети смогли охватить весь мир.

В сетях квантовой связи сохранение целостности состояния передаваемого фотона имеет решающее значение. Любые изменения его состояния во время передачи восстановить невозможно. Если бы нужно было измерить состояние фотона, это было бы эквивалентно действиям перехватчика, ставящим под угрозу безопасность связи.

Поэтому квантовая связь сегодня возможна только на ограниченных расстояниях. Лучшие лабораторные образцы квантовых систем едва преодолели порог дальности 400 километров. При этом они обеспечивают

крайне низкую по современным стандартам скорость — около 1 бита в секунду [8].

Из-за этого существующие квантовые сети, в основном, обеспечивают защищенную связь на расстояниях в десятки километров. Их используют, например, для передачи данных между офисами банков в пределах крупного города.

Несколько научных групп сейчас работают над разработкой квантовых повторителей, которые могли бы «усилить» квантовый сигнал, но пока эти исследования не вышли из стадии экспериментов.

Решением проблемы может быть создание квантовых сетей из «отрезков», связанных между собой специальными «доверенными» узлами, способными принимать, читать и передавать дальше квантовые данные.

Выше (см. рис. 2) приведено именно такое решение [3], обеспечивающее:

- Создание защищенной корпоративной сети передачи данных с использованием алгоритмов ГОСТ;
- Защиту магистральных каналов связи;
- Защиту трафика систем видео-конференц-связи;
- Защиту каналов связи между ЦОД.

В общем случае структура квантовой сети может быть сложной, пример из рекомендации ITU-T Y.3800 [4] приведен ниже (см. рис. 3).

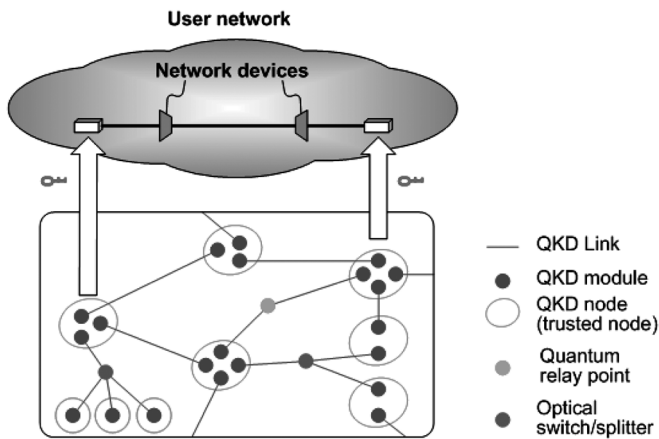


Рис. 3. Структура квантовой сети, описанная в рекомендации ITU-T Y.3800

### Система квантового распределения ключей на боковых частотах модулированного излучения

С точки зрения внедрения квантовых коммуникаций в существующие линии связи телекоммуникационного стандарта перспективным является метод квантовой коммуникации на боковых частотах модулированного излучения Subcarrier Wave Quantum Key Distribution (SCW QKD) [5].

Основное отличие систем SCW (Side-Channel Waves) QKD (Quantum Key Distribution) заключается в том, что сигнал передается через побочные частоты за счет фазовой модуляции, а не генерируется непосредственно источником. Этот уникальный метод позволяет использовать различные протоколы фазовой квантовой связи, что делает его универсальным при генерации квантовых состояний.

Системы SCW предлагают преимущества систем Plug and Play без недостатков двунаправленной схемы. Они также позволяют значительно повысить эффективность использования полосы пропускания в оптических каналах связи: теоретическая спектральная эффективность достигает 40 % по сравнению с 2–4 % в других системах QKD.

Возможность передачи нескольких квантовых каналов при наличии сильного излучения на несущей частоте в одном окне DWDM обеспечивает эффективную

интеграцию систем квантовой связи в квантовые и оптические сети. Этот метод также обеспечивает высокую видимость квантового сигнала и снижает частоту ошибок квантовых битов (QBER) благодаря простоте ввода и согласования оптической фазы.

Рассмотрим особенности метода SCW QKD:

- для рассылки состояния одиночных фотонов используются так называемые боковые частоты;
- такой подход ведет к высокой устойчивости к внешним воздействиям на канал связи и большой пропускной способности квантового канала связи;
- по скорости и дальности передачи информации сопоставим с абсолютными рекордами в области квантовой коммуникации.

В [6] отмечается, что реализованное на базе этого метода оборудование обеспечивает:

- генерацию абсолютно-стойких ключей (одноразовый блокнот) на основе законов физики;
- определение наличия «нарушителя» в квантовой линии;
- устойчивость системы к внешним помехам и повышению скорости данных;
- работу в действующих оптоволоконных сетях связи в формате Plug-n-Play («подключи и работай»);
- обеспечение безопасности перед угрозой квантовых компьютеров;
- работу в стандартных оптических волокнах;
- передачу до 10 независимых каналов на каждой паре боковых частот внутри одного окна DWDM.

### Основные направления мировых разработок

В [7] отмечается, что главные усилия при создании квантовых сетей направлены на решение следующих вопросов:

- использование волоконно-оптических линий связи для:
  - шифрования квантовыми ключами данных, передаваемыми по магистральным линиям связи;
  - создания локальных защищенных сетей с электронным документооборотом;
  - создания крупномасштабных сетевых структур через доверенные узлы
- использование атмосферно космических каналов связи для:
  - распределения квантовых ключей между мобильными и стационарными объектами;
  - распределения ключей между низкоорбитальными спутниками и наземными объектами;
  - распределения ключей между низко и высокоорбитальными спутниками;

- создания глобальных квантовых сетей, охватывающих значительные территории.

### Использование моделирования и системного анализа при планировании развёртывания квантовой сети

Моделирование, расчет характеристик и системный анализ необходимы для проектирования сложных систем, включая квантовые сети. Это справедливо даже в том случае, если узлы сети построены с использованием коммерчески доступного оборудования зарубежного или отечественного производства.

Моделирование предполагает расчет характеристик качества обслуживания для различных категорий пользователей и оценку эффективности использования каналов и оборудования на основе параметров сети и нагрузки. Результаты моделирования служат исходными данными для системного анализа и дают представление о пригодности конкретного решения по проектированию сети и потенциальные улучшения.

Рассмотрим некоторые характеристики квантовой сети, которые должны быть определены в процессе моделирования:

- Важнейшей характеристикой квантовой сети является время доставки ключей, а если более точно, то время, через которое пользователи могут сменить старые ключи на новые;
- Коэффициент готовности сети — надежность квантовой сети. В процессе работы оборудование может выходить из строя, а оптоволокно может повреждаться как случайно, так и преднамеренно. Топология сети должна обеспечивать достаточную структурную надежность, гарантирующую работоспособность сети при возникновении отказов;
- Время восстановления работоспособности сети при переходе на резервное оборудование и волокна;
- Портовую мощность квантовой сети (количество пользователей сети);
- Реальный уровень загрузки оборудования квантовой сети. Наличие ресурсов для подключения дополнительных пользователей;
- Выявление узких мест.

### Задействование потенциала вузовской науки

В [1] отмечается вклад ведущих вузов РФ в создании квантовой сети. Создание научных лабораторий в МГУ, МИСиС, МТУСИ, подключение их к квантовой сети позволило отработать протоколы и получить практический опыт создания и администрирования такого рода объектов. Особенно следует отметить, что в рамках соз-

дания сети удалось интегрировать усилия крупнейших компаний РЖД, Ростелеком, Газпром, ведущих российских вендоров и системных интеграторов, отраслевой и вузовской науки. Сегодня важно распространить и перенести этот опыт на региональный уровень.

Процесс научного обоснования проектирования или реконструкции сети включает в себя следующие этапы:

1. Анализ основных параметров сети, включая показатели качества обслуживания.
2. Выбор подходящей технологии построения сети из имеющихся вариантов.
3. Выбор сетевого решения или схемы связи.
4. Разработка моделей для анализа и расчета характеристик сети посредством моделирования.
5. Проведение системного анализа и выработка научно обоснованного решения.
6. Корректировка ранее принятых проектных решений при необходимости.

Привлечение аспирантов и докторантов выгодно благодаря их всестороннему знанию своей предметной области, включая отечественный и зарубежный опыт, владению иностранными языками, знакомству с программированием и информационными технологиями. Их потенциал может быть эффективно использован на всех этапах исследования.

Реалии таковы, что технические специалисты полагаются на свой опыт и интуицию, а не на системный анализ, а системные аналитики могут не до конца понимать конкретные задачи проектировщиков. Неспециалистам в области квантовых сетевых технологий требуется четкое изложение проблемы на понятном им языке.

### Заключение

Практика проектирования квантовых сетей, основанная на универсальных рекомендациях, опыте и интуиции проектировщиков, приемлема для построения сетей относительно небольшого размера.

С увеличением размера сети становится все сложнее определить нагрузку на каналы и оборудование, оценить последствия сбоев и рассчитать характеристики сети. Системный анализ играет решающую роль в таких сложных сетях, выступая в качестве наиболее важного и интегрированного интеллектуального компонента процесса проектирования.

Компаниям, не имеющим квалифицированных специалистов по системному анализу, может быть выгодно использовать потенциал промышленности и университетской науки посредством аутсорсинга. Это может включать создание научных групп в рамках ведущих отраслевых университетов, первоначально на базе базо-

вых кафедр. Эти группы со временем могут постепенно превратиться в научные школы.

В данной статье рассмотрен только один аспект внедрения в цифровую экономику квантовых технологий,

а именно — квантовые коммуникации. В дальнейшем предполагается рассмотреть три других важнейших направления: квантовые вычисления, квантовые сенсоры и метрология.

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии». [https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/?utm\\_referrer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f](https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/?utm_referrer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f)
2. Technical Reports Broadband Forum [https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/?utm\\_referrer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f](https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/?utm_referrer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f)
3. Системы квантовых коммуникаций. [https://www.securitycode.ru/upload/iblock/e3b/Quantum\\_communication\\_systems.pdf](https://www.securitycode.ru/upload/iblock/e3b/Quantum_communication_systems.pdf)
4. Recommendation ITU-T Y.3800. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3800-201910-1>
5. Козубов А.В., Гайдаш А.А., Кынев С.М., Егоров В.И., Иванова А.Е., Глейм А.В., Мирошниченко Г.П., Основы квантовой коммуникации: часть 1. — СПб: Университет ИТМО, 2019. — 85 с.
6. КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ СВЯЗИ/ <https://www.smarts.ru/static/metrika/images/pdf/22.pdf>
7. Сергей Кулик. Квантовые атмосферные и космические каналы связи. ЦЕНТР КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МГУ имени М.В. Ломоносова. [https://infotecs.ru/upload/iblock/b5c/BIB\\_onlayn\\_kvantovyy.pdf](https://infotecs.ru/upload/iblock/b5c/BIB_onlayn_kvantovyy.pdf)
8. Гайдаш А.А., Егоров В.И., Иванова А.Е., Козубов А.В., Кынев С.М., Наседкин Б.А., Самсонов Э.О., Квантовые технологии — СПб: Университет ИТМО, 2023. — 136 с.

---

© Чуваков Александр Владимирович (avch2105@gmail.com); Гавлиевский Серго Леонидович (gslhome@yandex.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»