

Internet Research Task Force (IRTF)
Request for Comments: 9340
Category: Informational
ISSN: 2070-1721

W. Kozlowski
S. Wehner
QuTech
R. Van Meter
Keio University
B. Rijsman
Individual
A. S. Cacciapuoti
M. Caleffi
University of Naples Federico II
S. Nagayama
Mercari, Inc.
March 2023

Architectural Principles for a Quantum Internet

Архитектурные принципы квантовой сети Internet

Аннотация

Представление квантовой сети (internet) заключается в улучшении имеющихся технологий Internet за счёт квантовых коммуникаций между любыми двумя точками на Земле. Для достижения этой цели нужно с нуля создать сетевой стек с учётом принципиально новых свойств квантовой запутанности. Были реализованы первые сети с квантовой запутанностью но пока нет практических предложений по организации, использованию и управлению такими сетями. В этом документе предпринята попытка заложить основу и представить некоторые архитектурные принципы квантовых сетей. Документ содержит общие рекомендации и создаёт основу для обсуждения физиками и специалистами по сетям. Документ является результатом работы исследовательской группы Quantum Internet (Quantum Internet Research Group или QIRG).

Статус документа

Документ не относится к категории Internet Standards Track и публикуется для информации.

Документ является результатом работы IRTF¹. IRTF публикует результаты относящихся к Internet исследований и разработок. Эти результаты могут оказаться не пригодными для реализации. Данный RFC представляет согласованное мнение исследовательской группы Quantum Internet в рамках IRTF. Документы, одобренные для публикации IRSG, не претендуют на статус Internet Standard (см. раздел 2 в RFC 7841).

Информацию о текущем статусе документа, ошибках и способах обратной связи можно найти по ссылке <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9340>.

Авторские права

Авторские права (Copyright (c) 2023) принадлежат IETF Trust и лицам, указанным в качестве авторов документа. Все права защищены.

К документу применимы права и ограничения, указанные в BCP 78 и IETF Trust Legal Provisions и относящиеся к документам IETF (<http://trustee.ietf.org/license-info>), на момент публикации данного документа. Прочтите упомянутые документы внимательно. Фрагменты программного кода, включённые в этот документ, распространяются в соответствии с упрощённой лицензией BSD, как указано в параграфе 4.e документа IETF Trust Legal Provisions, без каких-либо гарантий (как указано в Simplified BSD License).

Оглавление

1. Введение.....	2
2. Квантовая информация.....	2
2.1. Квантовые состояния.....	2
2.2. Кубит.....	3
2.3. Множество кубитов.....	3
3. Запутанность как фундаментальный ресурс.....	4
4. Достижение квантовой связности.....	4
4.1. Проблемы.....	4
4.1.1. Проблема измерения.....	4
4.1.2. Теорема о невозможности клонирования.....	4
4.1.3. Достоверность.....	5
4.1.4. Неадекватность прямой передачи.....	5
4.2. Пары Белла.....	5
4.3. Телепортация.....	5
4.4. Жизненный цикл запутанности.....	6
4.4.1. Создание элементарного канала.....	6
4.4.2. Переключение запутанности.....	6
4.4.3. Обработка ошибок.....	7

¹Internet Research Task Force - комиссия по исследовательским задачам Internet.

4.4.3.1. Очистка.....	7
4.4.3.2. Корректировка квантовых ошибок.....	7
4.4.3.3. Схемы обработки ошибок.....	7
4.4.4. Доставка.....	8
5. Архитектура Quantum Internet.....	8
5.1. Проблемы.....	8
5.2. Классические коммуникации.....	9
5.3. Абстрактная модель сети.....	9
5.3.1. Плоскости управления и данных.....	9
5.3.2. Элементы квантовой сети.....	9
5.3.3. Сборка воедино.....	10
5.4. Физические ограничения.....	10
5.4.1. Срок действия памяти.....	10
5.4.2. Скорость.....	11
5.4.3. Коммуникационные кубиты.....	11
5.4.4. Однородность.....	11
6. Принципы архитектуры.....	11
6.1. Цели Quantum Internet.....	11
6.2. Принципы Quantum Internet.....	13
7. Мысленный эксперимент, вызванный классическими сетями.....	14
8. Вопросы безопасности.....	15
9. Взаимодействие с IANA.....	15
10. Литература.....	15
Благодарности.....	18
Адреса авторов.....	18

1. Введение

Квантовые сети - это распределенные системы квантовых устройств, использующие фундаментальные явления квантовой механики, такие как суперпозиция, запутанности и квантовые измерения, для достижения возможностей, выходящих за рамки классических (не квантовых) сетей [Kimble08]. В зависимости от стадии развития квантовой сети [Wehner18] такие устройства могут варьироваться от простых фотонных устройств, способных одновременно подготавливать и измерять единственный квантовый бит (кубит - qubit), до крупномасштабных квантовых компьютеров будущего. Квантовые сети предназначены не для замены классических сетей, а скорее для формирования гибридных сетей, поддерживающих новые возможности, которые без этого не реализовать [VanMeterBook]. Например, наиболее известное применение квантовой связи - квантовое распространение ключей (Quantum Key Distribution или QKD) [QKD], может создавать и распространять пару симметричных ключей шифрования так, что безопасность всего процесса опирается на законы физики (и может быть доказана математически), а не на неразрешимость некоторых математических проблем [Bennett14] [Ekert91]. Небольшие сети с QKD уже развернуты на небольших (около 100 км) расстояниях [Elliott03] [Peev09] [Aguado19] [Joshi20].

Парадигма квантовых сетей предлагает ещё ряд приложений в дополнение к квантовой криптографии, таких как распределенные квантовые вычисления [Cirac99] [Crepeau02], защищённые квантовые вычисления в облаке [Fitzsimons17], измерительные сети с квантовым улучшением [Giovannetti04], высокоточные телескопы с длинной базой [Gottesman12]. Эти приложения гораздо требовательней, чем QKD, и сети, способные их поддерживать, пока находятся в зачаточном состоянии. Лишь недавно была реализована полностью квантовая сеть с множеством узлов, способная передавать, принимать и обрабатывать распределенную квантовую информацию [Pompili21.1].

Несмотря на предпринятые усилия по физической реализации и подключению устройств, а также повышению их скорости и устойчивости к ошибкам, на момент создания этого документа не было разработано никаких предложений по запуску таких сетей. Если провести аналогию с классической сетью, мы сейчас находимся на этапе, когда можно начать физически подключать устройства и передавать данные, но передача, приём, управление буферами, синхронизация соединений и т. п. должны осуществляться приложением напрямую через низкоуровневые специализированные и привязанные к оборудованию интерфейсы вместо управления через сетевой стек с удобным высокоуровневым интерфейсом, таким как сокет. Лишь недавно была предпринята первая попытка создания такого стека в лабораторных условиях [Pompili21.2]. Кроме того, несмотря на наличие физических механизмов передачи квантовой информации, нет отказоустойчивых протоколов для управления такой передачей.

Этот документ, созданный исследовательской группой Quantum Internet (QIRG), знакомит с квантовыми сетями и представляет общие рекомендации по проектированию и построению таких сетей. В целом документ задуман как введение в предметную область для сетевых инженеров и исследователей. Его не следует считать окончательным утверждением о способах развертывания квантовых сетей. Документ обсуждался в почтовой конференции QIRG и на нескольких встречах IETF. Документ представляет согласованный взгляд членов QIRG, как специалистов в предметной области (квантовые и сетевые вопросы), так и новичков, являющихся целевой аудиторией.

2. Квантовая информация

Для понимания квантовых сетей требуется базовое понимание теории квантовой информации. В последующих параграфах приводятся базовые сведения, требуемые для понимания принципов работы квантовой сети, рассчитанные на специалистов по классическим сетям. Знакомство читателя с квантовой физикой не предполагается. Более глубокие сведения о квантовых информационных системах можно получить из [SutorBook] и [NielsenChuang].

2.1. Квантовые состояния

Квантовомеханическая система описывается своим квантовым состоянием. Это абстрактный объект, полностью описывающий систему в определённый момент. В сочетании с правилами эволюции системы во времени, такими как квантовые устройства, состояние также предоставляет полное описание системы в любой момент времени. Для вычисления и сетей классическим эквивалентом квантового состояния является строка или поток логических битов. Эти биты обеспечивают полное описание значений, которые можно прочитать из строки в данный момент, а в сочетании с правилами эволюции во времени, такими как логические схемы, будут известны значения в любой момент.

Подобно отдельному классическому биту, квантовомеханическая система может быть простой и состоять из одной «частицы», например, атома или фотона. В этом случае квантовое состояние даёт полное описание этой отдельной частицы. Подобно тому, как строка битов состоит из множества битов, одно квантовое состояние может описывать ансамбль из множества частиц. Однако квантовые состояния подчиняются законам квантовой механики и их поведение существенно отличается от поведения строки битов. В этом разделе приводится сводка основных концепций для понимания этих различий, а затем последствия этого для сетей.

2.2. Кубит

Различия между квантовыми и классическими вычислениями начинаются на уровне битов. Классические компьютеры работают с двоичным алфавитом {0, 1}. Квантовый бит, называемый кубитом, существует в том же двоичном пространстве, но, в отличие от классического бита, его состояние может существовать в суперпозиции двух возможностей

$$|qubit\rangle = a |0\rangle + b |1\rangle$$

где $|X\rangle$ обозначение квантового состояния в нотации Дирака (ket) - значение, содержащееся в кубите (0 и 1 - коэффициенты, a и b - комплексные числа, называемые амплитудами вероятности). Физически такое состояние может быть реализовано с использованием разных методов, таких как спин электрона, поляризация фотона, уровни энергии в атоме и т. п.

При измерении кубит теряет суперпозицию и необратимо переходит в одно из двух базовых состояний - $|0\rangle$ или $|1\rangle$. Выбор результирующего состояния может быть недетерминированным, но его можно определить по измерению, результатом которого является классический бит 0 или 1, соответствующий $|0\rangle$ или $|1\rangle$. Вероятность получить при измерении состояние $|0\rangle$ будет $|a|^2$, $|1\rangle$ - $|b|^2$, где $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Эта случайность связана не с игнорированием лежащих (underlying) механизмов, а с фундаментальным свойством квантовомеханической системы [Aspect81].

Свойство суперпозиции играет важную роль фундаментальных вентильных операциях над кубитом. Поскольку кубит может существовать в суперпозиции своих базовых состояний, элементарный квантовый вентиль способен воздействовать одновременно на все состояния суперпозиции. Рассмотрим, например, вентиль NOT (HE)

$$\text{NOT} (a |0\rangle + b |1\rangle) \rightarrow a |1\rangle + b |0\rangle$$

Важно отметить двусмысленность термина «кубит». В первом значении кубит относится к физической квантовой системе, квантовое состояние которой можно выразить как суперпозицию двух базовых состояний, которые часто обозначают $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Здесь кубит относится к физической реализации, аналогичной триггеру (flip-flop), переключателю (switch), напряжению или току для классического бита. Во втором значении кубит относится к абстрактному квантовому состоянию квантовой системы в двумя базовыми состояниями. В этом случае кубит сродни логическому значению бита из классических вычислений, т. е. логическому нулю или логической единице. Эти концепции связаны, поскольку физический кубит (в первом смысле) можно использовать для хранения абстрактного кубита (второй смысл). Оба толкования применяются в литературе и смысл обычно понятен из контекста.

2.3. Множество кубитов

Когда несколько кубитов объединяется в одно квантовое состояние, пространство возможных состояний расширяется экспоненциально и эти состояния могут сосуществовать в суперпозиции. Например, общая форма 2-кубитового регистра будет иметь вид

$$a |00\rangle + b |01\rangle + c |10\rangle + d |11\rangle$$

где коэффициенты имеют такую же интерпретацию амплитуды вероятности как для 1-кубитового состояния. Каждое состояние представляет возможный результат измерения для 2-кубитового регистра state. Например, $|01\rangle$ указывает состояние, где первый кубит находится в состоянии $|0\rangle$, а второй - в состоянии $|1\rangle$.

Однокубитовый вентиль воздействует на соответствующий кубит в каждом из состояний суперпозиции, а двухкубитовый вентиль - на все соответствующие состояния суперпозиции, но результат гораздо интересней. Рассмотрим 2-кубитовый регистр, где первый кубит находится в состоянии суперпозиции $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, а другой - в состоянии $|0\rangle$. Это можно представить в виде

$$(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2} \otimes |0\rangle = (|00\rangle + |10\rangle)/\sqrt{2}$$

где \otimes указывает тензорное произведение (математический механизм объединения квантовых состояний).

Константа $1/\sqrt{2}$ называется коэффициентом нормализации и отражает тот факт, что сумма вероятностей получения при измерении значений $|0\rangle$ и $|1\rangle$ для первого кубита равна 1.

Рассмотрим 2-кубитовый вентиль Controlled NOT (CNOT), принимающий на входе 2 кубита - управление (control) и цель (target) и применяющий вентиль NOT для цели, если кубит control установлен.

Таблица 1. Таблица истинности CNOT.

IN	OUT
00	00
01	01
10	11
11	10

Рассмотрим применение вентиля CNOT для состояния, где первый кубит является управляющим. Применим двухкубитовый вентиль ко всем состояниям суперпозиции

$$\text{CNOT} (|00\rangle + |10\rangle)/\sqrt{2} \rightarrow (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$$

Что интересного в этой операции с 2-кубитовым вентиляем? Конечное состояние является **запутанным**. Это состояние невозможно представить как произведение двух отдельных кубитов, они перестали быть независимыми, т. е. невозможно описать квантовое состояние любого из отдельных кубитов способом, не зависящим от другого кубита. Лишь квантовое состояние системы, состоящей из двух кубитов обеспечивает физически полное описание 2-кубитовой системы. Состояния двух отдельных кубитов скоррелированы сверх того, что возможно в классическом случае. Ни один из кубитов не находится в определённом состоянии $|0\rangle$ или $|1\rangle$, а при измерении любого из них результат для второго **всегда** будет таким же. Конечное состояние $(|00\rangle$ или $|11\rangle)$ случайно, как и раньше, но состояния обоих кубитов

всегда одинаковы. Это можно представить как бросание «связанных» монет, когда обе всегда выпадают «орлом» или «решкой», что не наблюдается в классическом понимании.

После выполнения измерения два кубита снова становятся независимыми. Конечным состоянием будет $|00\rangle$ или $|11\rangle$ и оба можно тривиально разложить на произведение двух отдельных кубитов. Запутанность была «потреблена» (consume) и запутанное состояние нужно подготавливать заново.

3. Запутанность как фундаментальный ресурс

Запутанность является фундаментальным свойством квантовых сетей. Рассмотрим состояние из предыдущего параграфа

$$(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$$

Ни один из кубитов не находится в определённом состоянии $|0\rangle$ или $|1\rangle$ и нужно знать состояние всего регистра, чтобы полностью описать поведение двух кубитов.

Запутанные кубиты обладают интересным свойством нелокальности. Рассмотрим передачу одного из кубитов в другое устройство. Это устройство в принципе может находиться где угодно, на другом краю комнаты, в другой стране и даже на другой планете. При введении пренебрежимо малого шума два кубита будут сохранять запутанное состояние, пока не будет выполнено измерение. Физическое расстояние не имеет значения для запутанности.

Это лежит в основе квантовых сетей, поскольку возможно использовать неклассические корреляции, обеспечиваемые запутанностью для получения совершенно новых типов прикладных протоколов, которые недоступны в классических коммуникациях. Примерами таких приложений являются квантовая криптография [Bennett14] [Ekert91], слепые квантовые вычисления [Fitzsimons17], распределённые квантовые вычисления [Crepeau02].

У запутанности есть два очень специфических свойства, из которых можно извлечь некоторые интуитивные сведения о типах приложений, поддерживаемых квантовой сетью. Первое свойство связано с тем фактом, что запутанность включает более сильные по сравнению с классическими корреляции, обеспечивающие возможности решения задач, требующих координации. В качестве тривиального примера рассмотрим согласие между двумя узлами, которые хотят договориться о значении одного бита. Они могут использовать квантовую сеть для подготовки состояния $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ с каждым узлом, содержащим один из двух кубитов. После измерения на любом из этих узлов состояние двух кубитов схлопывается до $|00\rangle$ или $|11\rangle$, поэтому, несмотря на случайность результата и его отсутствие до измерения, значения для двух узлов всегда будут совпадать. Можно также построить более общее многокубитовое состояние $(|00\dots\rangle + |11\dots\rangle)/\sqrt{2}$ и выполнить такой же алгоритм для произвольного числа узлов. Эти более сильные по сравнению с классическими корреляции обобщаются и на более сложные схемы измерения.

Вторым свойством запутанности является то, что её невозможно обобщить (share), т. е. при максимальной запутанности между парой кубитов для них невозможна запутанность с третьим кубитом [Terhal04]. Поэтому запутанность формирует приватное и по своей природе недоступное (untappable) соединение между двумя узлами.

Запутанность создаётся за счёт локальных взаимодействий между двумя кубитами или в результате (способа) создания кубитов (например, запутанные пары фотонов). Для создания распределённого запутанного состояния можно физически переслать один из кубитов на удалённый узел. Можно также напрямую запутывать кубиты, разнесённые физически, но это все равно потребует локальных взаимодействий между некоторыми другими кубитами, с которыми разнесённые кубиты были запутаны изначально. Поэтому именно передача кубитов проводит разделительную черту между настоящей квантовой сетью и набором квантовых компьютеров, соединённых через классическую сеть.

Квантовая сеть определяется как набор узлов, способных обмениваться кубитами и распределять запутанные состояния между собой. Квантовый узел, способный взаимодействовать с другим квантовым узлом лишь классически, не является членом квантовой сети.

На основе запутанных состояний, распределённых по сети, можно создавать более сложные службы и приложения, например, [ZOO].

4. Достижение квантовой связности

В этом разделе объясняется смысл понятия квантовой связности и физических процессов на абстрактном уровне.

4.1. Проблемы

Квантовую сеть нельзя построить простой экстраполяцией классических моделей на их квантовые аналоги. Передача кубитов «по проводу» не так проста, как для классических битов. Есть технологические и фундаментальные проблемы, делающие классические подходы непригодными в квантовом контексте.

4.1.1. Проблема измерения

В классических компьютерах и сетях хранящиеся в памяти биты можно считывать в любой момент. Это полезно для разных целей, таких как копирование, обнаружение и исправление ошибок и т. п. С кубитами такое невозможно.

Измерение состояния кубита разрушает его суперпозицию, а также любую запутанность, в которую кубит мог быть вовлечён. После обработки кубита его будет невозможно считать, пока не будет достигнута точка вычисления, определяемая протоколом обработки кубита. Поэтому невозможно применять методы, используемые в классических вычислениях, для обнаружения и исправления ошибок. Тем не менее, существуют квантовые схемы обнаружения и исправления ошибок, учитывающие проблему измерения. Способ обработки ошибок будет влиять на архитектуру сети.

4.1.2. Теорема о невозможности клонирования

Читать состояние кубита напрямую невозможно и возникает вопрос о возможности скопировать кубит «не глядя» в него. Квантовая механика не позволяет и это [Park70] [Wootters82].

Теорема о невозможности клонирования утверждает, что нельзя создать точную копию произвольного неизвестного квантового состояния. Поэтому нет возможности применять механизмы классических сетей для сигнализации, повторной передачи и т. п., так как они основаны на копировании исходных данных. Поскольку любой физический

канал сопряжён с потерями, связь между узлами квантовой сети является сложной задачей и решать её должна архитектура сети.

4.1.3. Достоверность

В общем случае предполагается, что классический пакет приходит к получателю без ошибок, вносимых аппаратными шумами на пути передачи. Это проверяется на различных уровнях с помощью механизмов обнаружения и исправления ошибок. Поскольку нет возможности читать или копировать квантовое состояние, важность обнаружения и корректировки ошибок возрастает.

Для описания качества квантового состояния служит физическая величина, которую называют достоверностью (fidelity) [NielsenChuang]. Достоверность выражается числом от 0 до 1 (большее значение соответствует более высокой достоверности) и при значении меньше 0,5 состояние считается непригодным для использования. Достоверность показывает, насколько квантовое состояние близко к тому, которое пытались создать. Это вероятность того, что состояние будет вести себя так же, как желаемое состояние. Достоверность является важным свойством квантовой системы, позволяющим количественно оценить влияние на конкретное состояние шумов из различных источников (ошибки вентиляей, потери в канале, шумы среды).

Важно отметить, что квантовым приложениям не требуется идеальная достоверность и пока та превышает неких порог, зависящий от приложения, оно просто будет реагировать снижением скорости на снижение достоверности. Поэтому вместо попыток гарантировать доставку идеальных состояний (технологически сложно) приложения будут задавать нижний порог достоверности а сеть будет пытаться обеспечить достоверность не ниже этого порога. Более высокая достоверность может быть обеспечена оборудованием, создающим состояния с лучшей достоверностью (иногда можно пожертвовать скоростью ради этого), или реализацией квантовых механизмов обнаружения и исправления ошибок (см. [Mural16] и главу 11 в [VanMeterBook]).

4.1.4. Неадекватность прямой передачи

Концептуально самым простым способом распределить запутанное состояние является простая передача одного из кубитов на другую сторону через цепочку узлов с достаточной упреждающей коррекцией квантовых ошибок (Quantum Error Correction или QEC, см. параграф 4.4.3.2) для снижения потерь до приемлемого уровня. Несмотря на теорему о невозможности клонирования и невозможность прямого измерения квантового состояния, имеются механизмы корректировки ошибок для квантовых коммуникаций [Jiang09] [Fowler10] [Devitt13] [Mural16]. Однако QEC предъявляет очень высокие требования к ресурсам (нужны физические кубиты) и их исходной достоверности. Реализация очень сложна и применение QEC не предполагается, пока не станут доступными новые поколения квантовых сетей (см. рисунок 2 в [Mural16] и 4.4.3.3. Схемы обработки ошибок). Пока же квантовые сети полагаются на обмен запутанностью (entanglement swapping, 4.4.2. Переключение запутанности) и телепортацию (4.3. Телепортация). Этот вариант основан на наблюдении отсутствия необходимости распространения произвольного запутанного квантового состояния. Требуется лишь распространение любого из состояний, известных как пары Белла [Briegel98].

4.2. Пары Белла

Состояния пары Белла являются запутанными состояниями двух кубитов

$$\begin{aligned} &|00\rangle + |11\rangle, \\ &|00\rangle - |11\rangle, \\ &|01\rangle + |10\rangle, \\ &|01\rangle - |10\rangle, \end{aligned}$$

где коэффициент нормализации $1/\sqrt{2}$ для простоты не указан. Подходит любая из 4 указанных выше пар Белла, поскольку любую пару Белла можно преобразовать в другую пару Белла с помощью локальных операций, выполняемых лишь над одним из кубитов. Когда каждый кубит из пары Белла содержится в отдельном узле, любой узел может применить последовательность 1-кубитовых вентиляей исключительно к своему кубиту, чтобы преобразовать состояние в другой вариант.

Распространить пару Белла между двумя узлами гораздо проще, чем передать через сеть произвольное квантовое состояние. Поскольку состояние известно, обработка ошибок упрощается, а корректировка ошибок в малом масштабе (например, очистка запутанности, описанная в параграфе 4.4.3.1. Очистка), в сочетании с повторными попытками становится приемлемой стратегией.

Причина использования пар Белла, а не иных 2-кубитовых состояний, заключается в том, что они представляют собой максимально запутанный 2-кубитовый набор базовых состояний. Максимальная запутанность означает, что состояния имеют самые сильные неклассические корреляции среди всех возможных 2-кубитовых состояний. Поскольку 1-кубитовые локальные операции не могут увеличить запутанность, менее запутанные состояния будут вносить некоторые ограничения на распределенные квантовые алгоритмы. Это делает пары Белла особенно полезными в качестве базовых элементов для распределенных квантовых приложений.

4.3. Телепортация

Достаточность распространение лишь пар Белла, основана на факте распространения с их помощью любого другого запутанного состояния. Этого можно достичь с помощью телепортации квантового состояния [Bennett93]. Такая телепортация принимает неизвестное состояние кубита, которое мы хотим передать и восстанавливает его в желаемом месте. Это не нарушает теоремы о невозможности копирования, поскольку исходное состояние разрушается в процессе телепортации.

Для телепортации требуется распространить запутанную пару между источником и получателем до начала телепортации. Затем источник запутывает передаваемый кубит со своей стороной пары и выполняет считывание двух кубитов (сумма этих операций называется измерением состояния Белла). Это поглощает запутанность пары Белла, превращая исходный и целевой кубиты в независимые состояния. Измерение даёт 2 классических бита, которые источник передаёт получателю через классический канал. На основе значений двух полученных классических битов получатель выполняет одну из 4 возможных корректировок (корректировки Паули) на своей стороне пары, что переводит его в неизвестное состояние кубита, которое хотели передать. Необходимость передачи результатов

измерения по классическому каналу означает, к сожалению, что запутанность невозможно использовать для передачи информации со скоростью выше скорости света.

Неизвестное квантовое состояние, которое было передано, никогда не передавалось в саму сеть, поэтому сети достаточно лишь создавать пары Белла между двумя узлами. Таким образом, основное различие между классической и квантовой плоскостью данных заключается в том, что классическая плоскость передаёт пользовательские данные, а квантовая предоставляет пользователю ресурсы для самостоятельной передачи данных без дальнейшего участия (квантовой) сети.

4.4. Жизненный цикл запутанности

Сведение задачи квантовой связности к генерации пары Белла свело проблему к более простому и фундаментальному случаю, но не решило её. В этом параграфе рассматривается генерация запутанных пар и доставка двух кубитов в конечные точки.

4.4.1. Создание элементарного канала

В квантовой сети запутанность всегда создаётся сначала локально (на узле или дополнительном элементе), после чего один или оба запутанных кубита переносятся по квантовому каналу. В этом контексте фотоны (частицы света) являются естественными кандидатами для переноса запутанности. Поскольку эти фотоны передают квантовые состояния из одного места в другое с высокой скоростью, их называют «летающими кубитами (flying qubit)». Основа такого выбора связана с обеспечиваемыми фотонами преимуществами, такими как умеренное взаимодействие с окружающей средой, ведущее к умеренной декогеренции, удобное управление стандартными оптическими компонентами, высокая скорость и низкие потери. Однако фотоны сложно сохранить, поэтому преобразователь (transducer) должен переводить состояние летающего кубита в кубит, пригодный для обработки информации и/или хранения, который часто называют материальным кубитом (matter qubit).

Поскольку в этом процессе могут возникать отказы, для эффективной генерации и сохранения запутанности требуется возможность различать успешные и неудачные попытки. Схемы генерации запутанности, способные анонсировать успешное создание, называются схемами генерации объявленной (heralded) запутанности. Имеется три таких базовых схемы генерации объявленной запутанности на основе скоординированных действий на разных концах канала [Scaipuoti19]

В промежуточной точке

В этой схеме источник пары запутанных фотонов размещается между двумя узлами с материальными кубитами и передаёт запутанный фотон через квантовый канал каждому из этих узлов. На узлах вызываются преобразователи (transducer) для передачи запутанности из летающих кубитов в материальные. Преобразователи знают, была ли передача успешной и могут анонсировать успешную генерацию запутанности с помощью обмена сообщениями через классический канал.

В источнике

Здесь один из двух узлов передаёт летающий кубит, запутанный с одним из двух его материальных кубитов. Преобразователь (transducer) на другом конце канала переносит запутанность летающего кубита в один из своих материальных кубитов. Как и в предыдущей схеме преобразователь знает, была ли передача успешной и может сообщить об успешной генерации запутанности в классическом сообщении, передаваемом другому узлу.

На обеих сторонах

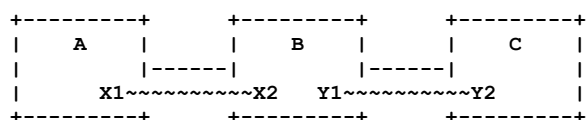
Здесь каждый узел передаёт летающий кубит, запутанный с одним из его материальных кубитов. Детектор на пути между узлами выполняет связанное измерение летающих кубитов, которое стохастически проецирует удалённые материальные кубиты в запутанное квантовое состояние. Детектор знает, была ли запутанность успешной и может уведомить об успешной генерации, передавая сообщение каждому из узлов по классическому каналу.

Схема с источником в промежуточной точке более устойчива к потере фотонов, но в других схемах узлы лучше контролируют создание запутанных пар.

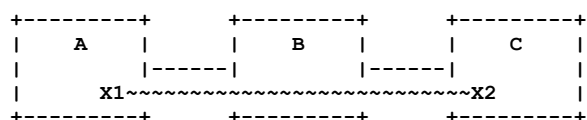
Отметим, что пока фотоны движутся в определённом направлении по квантовому каналу, результирующая запутанная пара кубитов не имеет связанного с ней направления. Физически нет ни восходящего, ни нисходящего конца пары.

4.4.2. Переключение запутанности

Проблема генерации запутанных пар непосредственно через канал заключается в том, что эффективность снижается с ростом длины канала. При длине больше нескольких десятков километров по оптическому волокну или 1000 км в открытом пространстве (через спутник) скорость фактически снижается до 0, а теорема о невозможности копирования не позволяет усилить сигнал. Решением служит переключение запутанности [Briegel98]. Пара Белла между двумя любыми узлами в сети может быть организована путём комбинирования пар, созданных на каждом отдельном канале пути между двумя конечными точками. Каждый узел на пути может потребить две пары на двух каналах, к которым он подключён, для создания новой запутанной пары между двумя удалёнными концами. Этот процесс называют переключением запутанности (см. рисунок ниже).



Здесь X1 и X2 - кубиты запутанной пары X, а Y1 и Y2 - кубиты запутанной пары Y. Запутанность обозначается символами ~. На приведённом выше рисунке узлы A и B используют пару X, а B и C - пару Y, но нам нужна запутанность между узлами A и C. Для этого просто телепортируется кубит X2 с использованием пары Y. Это требует от узла B измерить состояние Белла для кубитов X2 и Y1, что приведёт к разрушению запутанности между Y1 и Y2. Однако, X2 заново создаётся на месте Y2, принося с собой запутанность с X1, как показано на рисунке ниже.



В зависимости от потребностей сети и/или приложения окончательная корректировка Паули может не потребоваться на узле-получателе, поскольку результатом этой операции тоже является пара Белла. Однако два классических бита, формирующих результат измерения на узле В, всё же требуется передать, поскольку в них содержатся сведения о том, какая из 4 пар Белла была на самом деле создана. Если корректировка не производится, получателю нужно указать, какая из пар Белла получена.

Этот процесс телепортирования пар Белла с использованием других запутанных пар называется обменом (переключением) запутанностью. Квантовые узлы, создающие запутанные пары на больших расстояниях, путём переключения запутанности, называются в академической литературе квантовыми повторителями [Briegleb98] и в документе используется этот же термин.

4.4.3. Обработка ошибок

4.4.3.1. Очистка

Ни создание пар Белла, ни переключение запутанности не избавлены от шумов, поэтому с каждым каналом и каждым переключением достоверность состояния снижается. Однако можно создать состояния пар Белла с более высокой достоверностью из двух или более пар с меньшей достоверностью с помощью процесса, называемого очисткой или дистилляцией (distillation, иногда purification) [Dur07].

Для очистки квантового состояния применяется второе (иногда и третье) состояние в качестве инструмента проверки утверждения из первого состояния, например, чётность/нечётность первого состояния. Состояния тестового инструмента разрушаются в процессе, поэтому для очистки требуются значительные ресурсы. При отказе проверки тестовое состояние также должно отбрасываться. Очистка требует меньшей точности и ресурсов по сравнению с QEC, но распределенные протоколы вносят задержки кругового обхода из-за применения классических коммуникаций [Bennett96].

4.4.3.2. Корректировка квантовых ошибок

Подобно классической корректировке ошибок, QEC кодирует логические кубиты с использованием нескольких физических (raw) кубитов для защиты от ошибок, описанных в параграфе 4.1.3 [Jiang09] [Fowler10] [Devitt13] [Mural16]. Кроме того, как и его классический аналог, QEC может не только исправлять ошибки состояния, но и учитывать потерю кубитов. Если физические кубиты, кодирующие логический кубит, размещены на одном узле, процедура корректировки может выполняться локально даже при запутанности логического кубита с удалёнными кубитами.

Хотя схема QEC исходно была предназначена для защиты кубита от шумов, QEC подходит и для очистки запутанности. Дистилляция с применением QEC эффективна экономически, но может требовать высокой базовой достоверности.

4.4.3.3. Схемы обработки ошибок

Квантовые сети были разделены на 3 «поколения» (Таблица 2) в зависимости от применяемой схемы обработки ошибок [Mural16]. Эти «поколения» больше похожи на категории и не обязательно предполагают разницу во времени и устаревание, хотя более поздним поколениям требуются более совершенные технологии. Выбор используемого поколения зависит от аппаратной платформы и устройства сети.

Таблица 2. Классическая сигнализация и поколения обработки ошибок.

	Первое поколение	Второе поколение	Третье поколение
Устойчивость к потерям	Объявленная генерация запутанности (двухсторонняя классическая сигнализация)	Объявленная генерация запутанности (двухсторонняя классическая сигнализация)	QEC (без классической сигнализации)
Устойчивость к ошибкам	Очистка запутанности (двухсторонняя классическая сигнализация)	Очистка запутанности (односторонняя классическая сигнализация) или QEC (без классической сигнализации)	QEC (без классической сигнализации)

Поколения определяются направлениями классической сигнализации, требуемой распределенными протоколами для устойчивости к потерям и ошибкам. Классическая сигнализация передаётся обычными битами, что вносит задержки кругового обхода. Как указано в параграфе 4.4.3.1, эти задержки влияют на производительность квантовой сети, особенно при увеличении расстояний между взаимодействующими узлами.

Устойчивость к потерям связана с допустимостью к потере кубитов, передаваемых между узлами. Объявленная генерация запутанности, как указано в параграфе 4.4.1, подтверждает приём запутанного кубита с помощью сигнала оповещения. Пара напрямую связанных квантовых узлов пытается создать запутанную пару, пока не будет получен сигнал оповещения (heralding). Как указано в параграфе 4.4.3.2, можно использовать QEC для восполнения потерянных кубитов, что избавляет от необходимости повторных попыток. Поскольку процедура корректировки состоит из локальных операций, ей не требуется сигнал оповещения. Однако это возможно лишь при уровне потери фотонов от передачи до измерения не более 50%.

Устойчивость к ошибкам связано с допустимостью ошибок квантового состояния. Очистка запутанности является простейшим механизмом повышения устойчивости к ошибкам, но она вызывает задержки кругового обхода из-за применения двухсторонней классической сигнализации. QEC может исправлять ошибки состояния локально и поэтому не требует классической сигнализации между квантовыми узлами. Между этими крайними вариантами имеется также очистка с применением QEC, где нужна односторонняя классическая сигнализация.

Ниже приведена сводка для трёх «поколений».

1. Квантовые сети первого поколения используют оповещения (heralding) для устойчивости к потерям и очистку запутанности для устойчивости к ошибкам. Такие сети можно реализовать даже при ограниченном числе доступных квантовых вентилях.
2. Квантовые сети второго поколения добавляют QEC для устойчивости к ошибкам (но не к потерям). Сначала QEC будет применяться лишь для очистки запутанности, когда требуется односторонняя классическая сигнализация. Затем коды QEC будут применяться для создания логических пар Белла, которым не нужна классическая сигнализация для устойчивости к ошибкам. Оповещения остаются для устойчивости к потерям.

3. Квантовые сети третьего поколения напрямую передают соседним узлам кубиты с кодами QEC для устойчивости к ошибкам, как описано в параграфе 4.1.4. Пары Белла для элементарного канала могут создаваться без оповещений или иной классической сигнализации. Кроме того, может применяться архитектура с прямой передачей, где кубиты передаются *насквозь* (end to end) подобно классическим пакетам, не полагаясь на пары Белла или переключение запутанности.

Несмотря на существенные различия при обработке ошибок в разных поколениях, маловероятно, что все квантовые сети будут последовательно применять один и тот же метод. Это связано с разными требованиями к оборудованию в разных поколениях и практической возможностью обновления сети. Поэтому неизбежно возникновение границ между различными схемами обработки ошибок. Это повлияет на содержимое и семантику сообщений, которые должны передаваться через такие границы как при организации соединений, так и в процессе работы [Nagayama16].

4.4.4. Доставка

В конечном итоге пары Белла должны быть доставлены приложению (или протоколу вышележащего уровня) на двух конечных узлах. Подробный список требований выходит за рамки этого документа. Конечным узлам потребуется, как минимум, информация для сопоставления конкретной пары Белла с кубитом в их локальной памяти, который является частью этой запутанной пары.

5. Архитектура Quantum Internet

Из предыдущих разделов видно, что основные услуги, предоставляемые квантовой сетью, существенно отличаются от услуг классических сетей. Поэтому неудивительно, что архитектура квантовых сетей сильно отличается от классической сети Internet.

5.1. Проблемы

В этом параграфе рассматриваются основные фундаментальные проблемы, связанные с организацией квантовых сетей. Здесь рассматриваются лишь фундаментальные отличия, а технологические ограничения обсуждаются в параграфе 5.4. Физические ограничения.

1. Пары Белла не эквивалентны пакетам, передающим информацию.

В большинстве классических сетей, включая Ethernet, IP и MPLS, пользовательские данные помещаются в пакеты. Кроме данных пользователя каждый пакет имеет набор заголовков с управляющими сведениями, которые позволяют маршрутизаторам и коммутаторам пересылать пакеты в направлении получателя. Пакеты являются фундаментальными единицами в классических сетях.

В квантовой сети запутанные пары кубитов являются базовыми единицами сети. Сами кубиты не содержат каких-либо заголовков, поэтому квантовые сети должны будут передавать всю управляющую информацию по отдельным классическим каналам, которые ретрансляторы (повторители) должны сопоставлять с кубитами, хранящимися в их памяти. Кроме того, в отличие от классического пакета, находящегося в одном узле, пара Белла состоит из двух кубитов, размещённых на двух узлах. Это оказывает фундаментальное влияние на управление квантовыми сетями и разработку протоколов для них. Чтобы создать протяжённые (long-distance) пары Белла, узлам, возможно, придётся хранить кубиты в своей квантовой памяти и ждать прихода управляющей информации, прежде чем выполнить следующую операцию. Такая сигнализация внесёт добавочную задержку, которая будет зависеть от расстояния между двумя конечными узлами пары Белла. Обработка ошибок, такая как очистка запутанности, является типичным примером обмена управляющей информацией [Nagayama21] (см. 4.4.3.3. Схемы обработки ошибок).

2. Квантовые сети store and forward (сохранить и переслать) и store and swap (сохранить и поменять) требуют разных методов управления состоянием.

Как указано в параграфе 4.4.1, квантовые каналы предоставляют пары Белла, которые являются ненаправленными сетевыми ресурсами, в отличие от направленных кадров в классических сетях. Это феноменологическое различие ведёт к архитектурным различиям между квантовыми и классическими сетями. Квантовые сети объединяют множество пар Белла элементарных каналов для создания сквозной (end-to-end) пары Белла, тогда как классические сети доставляют сообщения с одного конца на другой путём поэтапной (hop by hop) пересылки.

Классические сети получают данные на один интерфейс, сохраняют их в локальных буферах, а затем пересылают данные через другой подходящий интерфейс. Квантовые сети сохраняют пары Белла, а затем переключают запутанность вместо пересылки в плоскости данных. Такие квантовые сети относятся к типу store and swap и им не нужно заботиться о порядке генерации пар Белла, поскольку они являются ненаправленными. Однако, несмотря на это, очень важно, чтобы переключались нужные запутанные пары, а результаты промежуточных измерений (см. параграф 4.4.2. Переключение запутанности) передавались и сопоставлялись на других узлах с нужными кубитами. Иначе сквозная запутанная пара будет создана не между ожидаемыми конечными точками или будет иметь неожиданное квантовое состояние. Например, Алиса вместо кубита, запутанного с Бобом, получит кубит, запутанный с Чарли. Это различие ведёт к использованию в квантовых сетях алгоритмов управления и оптимизации, отличающихся от принятых в классических сетях в том смысле, что переключение запутанности происходит с учётом состояния, в отличие от пересылки пакетов. Отметим, что квантовые сети третьего поколения (4.4.3.3. Схемы обработки ошибок) могут поддерживать архитектуру store and forward в дополнение к store and swap.

3. Запутанная пара полезна лишь в том случае, когда известно местоположение обоих кубитов.

Пакет классической сети в каждый момент времени находится лишь в одном месте. Если пакет как-либо изменён (заголовки или данные), сведения об этом не нужно передавать кому-либо в сети и пакет просто пересылается обычным способом.

Запутанность - это явление, при котором два или более кубита существуют в физически распределённом состоянии. Операции над одним из кубитов меняют состояние пары. Поскольку владелец конкретного кубита

не может просто прочитать его состояние, он должен координировать свои действия с владельцем другого кубита пары. Поэтому владелец любого кубита, входящего в запутанную пару, должен знать местоположение другого кубита пары. Это не обязательно явное пространственное местоположение и достаточно идентификатора пары, способа взаимодействия между владельцами пары и связи между идентификатором пары и отдельными кубитами.

4. Для создания запутанности требуется временное состояние.

Пересылка пакетов в классической сети в значительной степени является операцией без сохранения состояния. При получении пакета маршрутизатор выполняет поиск в своей таблице пересылки и отправляет пакет через подходящий выход. Маршрутизатору не нужно сохранять в памяти какие-либо сведения о пакете.

Квантовый узел должен быть способен принимать решения о кубитах, которые он получает и сохраняет в памяти. Поскольку кубиты не имеют заголовков, получение запутанной пары не приносит каких-либо управляющих сведений, на основании которых ретранслятор может принять решение. Соответствующие сведения будут поступать по классическому каналу. Это означает, что ретранслятор должен сохранять временное состояние, поскольку кубит и относящиеся к нему управляющие сведения обычно не будут приходить одновременно.

5.2. Классические коммуникации

В этом документе уже упомянуты две роли классических коммуникаций в квантовой сети:

- передача классических битов как части распределенных протоколов обмена запутанностью и телепортации;
- передача по сети управляющих сведений, включая фоновые протоколы маршрутизации и сигнализации для создания сквозной запутанности.

Классические коммуникации являются важнейшей частью любой квантовой сети. Предполагается, что у всех узлов квантовой сети имеется классическая связь с каждым другим узлом квантовой сети (в рамках административного домена). Поэтому квантовый узел должен параллельно управлять двумя плоскостями данных - квантовой и классической. Кроме того, узел должен сопоставлять управляющие сведения, полученные по классическим каналам, с кубитами, которыми он управляет в квантовой плоскости данных.

5.3. Абстрактная модель сети

5.3.1. Плоскости управления и данных

Протоколы плоскости управления для квантовых сетей будут иметь много обязанностей, подобно их классическим аналогам - изучение топологии сети, управление ресурсами, заполнение таблиц плоскости данных и т. п. Большинству из этих протоколов не нужны манипуляции квантовыми данными и они смогут работать на основе обмена классическими сообщениями. Для некоторых функций плоскости управления может потребоваться обработка квантовых данных [QI-Scenarios]. Поскольку польза определения отдельной квантовой плоскости данных не очевидна и её функциональность в значительной мере совпадает с функциональностью классической плоскости управления, отдельная квантовая плоскость управления здесь не рассматривается.

Однако разделение плоскостей данных более чётко и рассматриваются квантовая и классическая плоскость данных. Классическая плоскость данных обрабатывает и пересылает классические пакеты, а квантовая обрабатывает и переключает запутанные пары. Квантовые сети третьего поколения могут также пересылать кубиты в дополнение к обмена парами Белла.

В дополнение к сообщениям плоскости управления имеются также сообщения с управляющей информацией, связанные с детализацией отдельных запутанных пар, такие как уведомления (heralding message), применяемые при создании элементарных каналов (4.4.1. Создание элементарного канала). С точки зрения функциональности эти сообщения ближе к заголовкам классических пакетов, нежели к сообщениям плоскости управления, поэтому здесь они считаются частью квантовой плоскости данных. Таким образом, квантовая плоскость данных включает также обмен классическими управляющими сведениями с детализацией отдельных кубитов и запутанных пар.

5.3.2. Элементы квантовой сети

Квантовые повторители (ретрансляторы) являются основными элементами квантовой сети. Однако эти ретрансляторы не только переключают запутанность в работающей квантовой сети, но и выполняют ещё ряд действий:

1. создание запутанности на локальной канале между соседними узлами;
2. расширение запутанности от локальных пар до протяжённых (long-range) через обмен запутанностью;
3. очистка (distillation) для управления достоверностью созданных пар;
4. участие в управлении сетью (маршрутизация и т. п.).

Не все квантовые повторители в сети будут одинаковы и здесь выделено несколько категорий.

Квантовые маршрутизаторы (управляемые квантовые узлы)

Квантовый маршрутизатор - это квантовый повторитель с плоскостью управления, участвующей в управлении сетью и способной принимать решения о переключении кубитов для создания запрошенных сквозных пар.

Автоматизированные квантовые узлы

Автоматизированным квантовым узлом называется квантовый повторитель, имеющий лишь плоскость данных и не участвующий в плоскости управления сети. Поскольку теорема о невозможности копирования не позволяет использовать усиление, каналы большой протяжённости будут создаваться в форме цепочек из множества автоматизированных узлов.

Конечные узлы

Конечные узлы квантовой сети должны быть способны принимать и обрабатывать запутанные пары, но от них не требуется переключение запутанности (т. е. они могут не быть квантовыми ретрансляторами). Им не требуется и квантовая память, поскольку квантовые приложения можно реализовать измерением кубитов при их получении.

Неквантовые узлы

Не всем узлам квантовой сети нужна квантовая плоскость данных. Неквантовым узлом может быть любое устройство, способное обрабатывать классический сетевой трафик.

Кроме того, в квантовых сетях следует выделить два типа каналов.

Квантовый канал

Канал, который можно использовать для создания запутанной пары между двумя соединёнными напрямую квантовыми ретрансляторами. Это может включать промежуточные элементы, описанные в параграфе 4.4.1. Создание элементарного канала, а также выделенные классические каналы, применяемые исключительно для координации создания запутанности на квантовом канале.

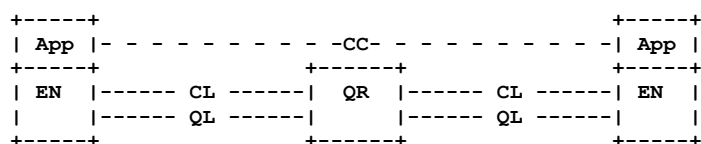
Классический канал

Канал между любыми узлами сети, способный переносить классический сетевой трафик.

Отметим, что пассивные элементы, такие как оптические коммутаторы, не разрушают квантовые состояния, поэтому можно соединить множество квантовых узлов между собой через оптическую сеть и выполнять оптическую коммутацию вместо маршрутизации путём переключения запутанности. Для этого требуется координация с процессом создания запутанности на элементарном канале, а повторители должны преодолевать ограничения на протяжённость. Однако такая архитектура представляется вполне подходящей для локальных сетей.

5.3.3. Сборка воедино

На рисунке ниже представлен двухэтапный путь базовой квантовой сети



App - приложение пользовательского уровня

EN - конечный узел

QL - квантовое соединение (Link)

CL - классическое соединение (Link)

CC - классический канал (через одно или несколько соединений CL)

QR - квантовый повторитель (ретранслятор)

Приложению (App), работающему на двух конечных узлах (EN), подключённых к сети, в какой-то момент потребуется сеть для создания используемых им запутанных пар. Это может потребовать согласования между EN (возможно, заранее), поскольку оба должны открыть коммуникационную точку, которую сеть может использовать для идентификации двух конечных точек соединения. Оба EN используют доступный в сети классический канал (CC) для решения этой задачи.

Когда сеть получает запрос на создание сквозных запутанных пар, она использует классические каналы (CL) для координации и запроса требуемых ресурсов. Это может быть некая комбинация предшествующих управляющих сведений (например, таблиц маршрутизации) и сигнальных протоколов, но детали этого процесса ещё требуют исследований. Мысленный эксперимент представлен в разделе 7. Мысленный эксперимент, вызванный классическими сетями.

В процессе или после распространения управляющих сведений сеть выполняет требуемые квантовые операции, такие как создание запутанности через отдельные квантовые каналы (QL), переключение запутанности в квантовых повторителях (QR) и дальнейшая сигнализация для передачи результатов переключения запутанности и других управляющих сведений. Поскольку пары Белла не содержат пользовательских данных, некоторые из этих операций могут быть выполнены до получения запроса (в ожидании потребности).

Отметим, что термин сигнализация здесь применяется в очень широком смысле и охватывает множество типов сообщений, требуемых для управления генерацией запутанности. Например, создание анонсированной (heralded) запутанности требует очень точной синхронизации времени между соседними узлами, поэтому инициирование создания и объявления запутанности может происходить по собственному (возможно физически отдельному) соединению CL, как в демонстрации сетевого стека, приведённой в [Pomrili21.2]. Сигнализация более высокого уровня с менее жёсткими требованиями к синхронизации (например, сигналы плоскости управления) может выполняться через своё соединение CL.

Запутанная пара доставляется приложению, как только она будет готова, вместе с соответствующим идентификатором пары. Однако готовность пары не обязательно означает завершения всех каналов пары и обменов запутанностью, поскольку некоторые приложения могут выполняться при неполной паре. В таком случае оставшиеся переключения запутанности будут распространять действия по сети на другой конец, иногда требуя операций исправления в EN.

5.4. Физические ограничения

Приведённая выше модель не включает каких-либо деталей аппаратной реализации, однако при создании реальной нужно рассмотреть некоторые физические ограничения. Некоторые из ограничений являются фундаментальными и развитие технологий не устранили их. Другие могут являться особенностями ранних реализаций новой технологии. Здесь рассматривается очень абстрактный сценарий, а ссылки на физические основы приведены в [Wehner18].

5.4.1. Срок действия памяти

В дополнение к несовершенству дискретных операций сохранение кубитов в памяти является весьма нетривиальной задачей. Основная сложность при создании постоянного хранилища связана с изоляцией квантовой системы от

окружения. Среда вносит в систему неуправляемые источники шумов, которые влияют на достоверность состояния, этот процесс называют декогеренцией. При значительном снижении достоверности состояния нужно отбрасывать.

Срок действия памяти зависит от конкретного физического устройства и в 2020 г. на доступном тогда оборудовании срок хранения имел порядок секунд [Abobeih18], хотя для кубитов, не подключённых к квантовой сети было продемонстрировано хранение в течение минуты [Bradley19]. Продолжительность хранения возросла с развитием технологий и продолжит увеличиваться. Однако при реализации квантовых сетей в ближайшем будущем нужно быть готовыми работать с краткосрочной памятью, например, за счёт сокращения задержки на важных путях.

5.4.2. Скорость

Создание запутанности на канале между двумя соединёнными узлами - не слишком эффективный процесс и требует множества попыток [Hensen15] [Dahlberg19]. Например, максимально достижимыми показателями для узлов «азот-вакансия», которые кроме генерации запутанности способны сохранять и обрабатывать полученные кубиты, является частота порядка 10 Гц. В сочетании с малым сроком действия памяти это сильно сокращает временные рамки для организации связности в масштабе сети.

На других платформах наблюдались более высокие скорости создания запутанности, но обычно это происходило за счёт других возможностей оборудования, таких как отсутствие квантовой памяти и/или ограниченные возможности обработки [Wei22]. Тем не менее, доступных скоростей недостаточно для практического применения, сверх экспериментов по подтверждению концепций. Однако ожидается рост скорости по мере развития технологий квантовых сетей [Wei22].

5.4.3. Коммуникационные кубиты

Большинство вариантов физической архитектуры, способных сохранять кубиты, могут создавать запутанность лишь для подмножества доступных кубитов, называемые коммуникационными [Dahlberg19]. После генерации пары Белла с использованием коммуникационного кубита его состояние можно перенести в память. Это может вносить дополнительные ограничения для сети. В частности, если у данного узла имеется лишь 1 коммуникационный кубит, узел не сможет создать пары Белла по двум каналам одновременно и потребуются создавать их по одной.

5.4.4. Однородность

В настоящее время все имеющиеся реализации квантовых сетей однородны и не взаимодействуют между собой. В общем случае очень сложно объединить разные технологии обработки квантовой информации.

Имеется много разных физических аппаратных платформ для реализации оборудования квантовых сетей. Технологии различаются способами хранения и манипуляций с кубитами в памяти, а также способами генерации запутанности с соседями через канал. Например, оборудование на основе оптических элементов и ансамблей атомов [Sangouard11] очень эффективно для высокоскоростной генерации запутанности, но имеет ограниченные возможности обработки после создания запутанности. Платформы на основе азота и вакансий [Hensen15] и платформы с захваченными ионами [Moehring07] предлагают большую степень управления кубитами, но им сложнее создавать запутанность с высокой скоростью.

Для преодоления недостатков различных платформ связывание разных технологий поможет построить полнофункциональные сети. Например, конечные узлы могут использовать технологию с хорошей обработкой кубитов для комплексных приложений, а автоматизированные квантовые узлы, которые служат лишь повторителями в линейной цепочке, где обработка намного проще, могут реализовать технологии с высокой скоростью запутывания на значительных расстояниях [Askarani21].

Это дополнительно усугубляется тем, что квантовые компьютеры (т. е. узлы квантовой сети) зачастую основаны не на тех аппаратных платформах, которые применяются в повторителях, что требует преобразований (transduction) между ними. Это особенно актуально для квантовых компьютеров, основанных на сверхпроводящих технологиях, которые можно подключать к оптическим сетям. Однако даже квантовые компьютеры с захваченными ионами, которые показали себя наиболее обещающими для квантовых сетей, все равно должны подключаться к другим платформам, которые более эффективно и быстро создают запутанность на значительных расстояниях (сотни километров).

6. Принципы архитектуры

С учётом того, что наиболее практичным способом реализации связности квантовой сети является использование пар Белла и повторителей с переключением запутанности, какими принципами следует руководствоваться при создании таких сетей, чтобы они были функциональными, отказоустойчивыми, эффективными и, что важнее всего, работали? Кроме того, возникают вопросы проектирования сетей, которые будут работать с ограничениями, вносимыми доступным сегодня оборудованием, и не создадут больших проблем для будущих технологий.

Поскольку технологии квантовых сетей являются совершенно новыми и, вероятно, претерпят многочисленные изменения в процессе развития, этот документ не является набором правил, а содержит рекомендации для первых поколений квантовых сетей, основанные на принципах и наблюдениях, доступных сообществу. Преимущество наличия такого документа, созданного сообществом на раннем этапе, заключается в том, что он содержит сведения о квантовой информации и сетевых технологиях, которые нужны для успешного создания квантовых сетей.

6.1. Цели Quantum Internet

Излагая любой набор принципов, нужно осознавать конечную цель, поскольку неизбежно придётся идти на компромиссы. Ниже представлен список, созданный на основе истории компьютерных сетей и несомненно похожий на созданный в своё время для классической сети Internet [Clark88]. Однако, несмотря на сходство целей, связанные с их достижением проблемы часто существенно различаются. Приведённый ниже список будет, скорей всего, меняться со временем.

1. Поддержка распределённых квантовых приложений.

Эта цель представляется тривиальной, но она указывает тонкий и достаточно важный момент, подчёркивающий существенное различие между квантовыми и классическими сетями. В конечном счёте передача квантовых данных не является целью квантовой сети, это лишь один из возможных компонентов протоколов квантовых приложений [Wehner18]. Хотя передачу, несомненно, можно использовать в качестве основы для квантовых приложений, она не является наиболее базовой из числа возможных. Например, QKD на основе запутанности, являющийся наиболее известным протоколом квантовых приложений, полагается лишь на более строгие по сравнению с классическими корреляции и природную секретность запутанных пар Белла и не передаёт произвольные квантовые состояния [Ekert91].

Основной целью quantum internet является поддержка протоколов распределённых квантовых приложений и крайне важно, чтобы они могли работать хорошо и эффективно. Поэтому важно разработать показатели производительности, значимые для приложений, чтобы стимулировать разработку протоколов квантовых сетей. Например, скорость генерации пар Белла не будет значимой, если не учитывать также достоверность тих пар. Обычно намного проще создавать пары с низкой достоверностью, но квантовым приложениям может потребоваться несколько попыток, а возможно и прерывание работы, если достоверность будет слишком мала. Обзор требований для различных квантовых приложений приведён в [Wehner18], а обзор вариантов применения - в [QI-Scenarios].

2. Поддержка «завтрашних» распределённых квантовых приложений.

Единственным неизменным принципом Internet следует считать постоянную изменчивость [RFC1958]. Технические изменения происходят постоянно, а размер и возможности квантовых сетей будут меняться на порядок. Таким образом, явной целью архитектуры квантовых сетей internet является способность воспринимать такие изменения. Нам посчастливилось быть свидетелями развития классической сети Internet в течение десятилетий и мы видели, что работало, а что нет. Для квантовых сетей очень важно избегать жёстких переходов (flag day, например, от NCP до TCP/IP) или обновлений, внедрение которых тянется десятилетиями (например, IPv6).

Поэтому важно, чтобы любая архитектура, предлагаемая для сетей общего назначения с квантовыми повторителями, позволяла включать новые устройства и решения по мере их появления. Архитектуру не следует ограничивать соображениями, связанными с ранними вариантами оборудования и приложений. Например, уже можно эффективно применять QKD в городских сетях и такие сети уже доступны коммерчески. Однако они не основаны на квантовых повторителях и поэтому пока не поддерживают переход к более сложным приложениям.

3. Поддержка неоднородности.

Имеется множество предложений по практической реализации оборудования квантовых повторителей и каждое из них имеет свои преимущества и недостатки. Некоторые могут предлагать высокую скорость создания пар Белла на индивидуальных каналах за счёт усложнения операций обмена запутанностью, другие могут быть хороши во всех отношениях, но более сложны в построении.

В дополнение к физическим границам могут быть различия в способах обработки ошибок (4.4.3.3. Схемы обработки ошибок). Эти различия влияют на содержимое и семантику сообщений, передаваемых через границы как при организации соединений, так и в процессе работы.

Оптимальная конфигурация сети будет, скорее всего, использовать преимущества нескольких платформ для оптимизации предоставляемых услуг. Поэтому явной целью является включением с самого начала поддержки различного оборудования и технологий.

4. Обеспечение безопасности на сетевом уровне.

Вопрос безопасности в квантовых сетях так же важен, как и в классической сети Internet, особенно с учётом того, что повышенная защита, обеспечиваемая квантовой запутанностью является одним из основных движущих факторов.

К счастью, с точки зрения приложений, квантовые криптографические протоколы не требуются в сети для обеспечения гарантий конфиденциальности и целостности передаваемых кубитов или генерируемой запутанности (хотя они могут предъявлять требования к классическим каналам, например, требовать проверку подлинности [Wang21]), пока базовые реализации соответствуют (или являются хорошим приближением) теоретическим моделям квантовой криптографии. Приложения будут использовать классические сети для обеспечения сквозной защиты результатов, полученных при обработке запутанных кубитов. Например, в QKD применяется классическое согласования (reconciliation) [Tang19] для исправления ошибок и усиления приватности [Elkouss11] при создании ключа защиты, но необработанные биты, вводимые в эти протоколы должны приходиться от измерения запутанных кубитов [Ekert91]. В другом приложении - защищённых делегированных квантовых вычислениях - клиент скрывает свои расчёты от сервера, передавая тому кубиты и затем запрашивая (в классическом сообщении) измерение их сервером в закодированной форме. После этого клиент декодирует результат, полученный от сервера, для получения окончательного результата вычислений [Broadbent10]. Здесь снова классическая сеть применяется для достижения цели защищённых расчётов, а сами удалённые расчёты являются строго квантовыми.

Хотя приложения могут обеспечивать свою сквозную защиту, сетевым протоколам следует самостоятельно защищать сеть и ограничивать нарушения её работы. Приложения остаются защищёнными, но они могут не работать или становиться неэффективными при атаках. Например, если злоумышленник может измерять каждый кубит, передаваемый между сторонами, пытающимися создать ключ с помощью QKD, создание секретного ключа станет невозможным. Вопросы безопасности в квантовых сетях более подробно рассматриваются в [Satoh17] и [Satoh20].

5. Простота мониторинга.

Для управления, оценки производительности или отладки сети требуется возможность отслеживания сети с гарантией наличия механизмов защиты конфиденциальности и целостности подключённых к сети устройств.

Для квантовых сетей характерны новые проблемы в этой сфере, поэтому одной из целей архитектуры квантовых сетей должна быть простота мониторинга.

Фундаментальный элемент квантовой сети - кубит - невозможно активно отслеживать, поскольку операция считывания уничтожает его содержимое. Одним из следствий этого является невозможность измерения достоверности отдельной пары. Достоверность значима лишь как статистическая величина, которая требует постоянного мониторинга создаваемых пар Белла, достигаемого за счёт отказа от некоторых пар для их использования в томографии или иных методах.

Кроме того, по одной стороне запутанной пары невозможно сказать без привлечения дополнительных классических данных, где находится другой кубит. Извлечь эти сведения из самих кубитов невозможно. Это означает, что для отслеживания запутанных пар требуется обмен классическими данными, которые могут включать (i) ссылку на запутанную пару, которая позволяет распределенным приложениям координировать действия с кубитами одной пары, и (ii) два бита из каждого переключения (обмена) запутанности, требуемые для идентификации конечного состояния пары Белла (4.4.2. Переключение запутанности).

6. Обеспечение доступности и отказоустойчивости.

Любая практическая и удобная сеть (классическая или квантовая) должна быть способна продолжать работу, несмотря на потери и отказы, а также быть устойчивой к злоумышленникам, пытающимся отключить связность. Различие между классическими и квантовыми сетями состоит в том, что квантовые сети имеют две плоскости данных и два типа каналов (квантовые и классические). Поэтому доступность и отказоустойчивость будут, скорее всего, требовать более сложной обработки, чем в классических сетях.

Отметим, что приватность не указана среди явных целей защиты, поскольку эти требования зависят от варианта применения. Например, QKD обеспечивает повышенную защиту лишь для распространения симметричных ключей [Bennett14] [Ekert91]. Обработка, манипуляции, обобщение, шифрование и дешифрование данных остаются полностью классическими, ограничивая преимущества приватности, которые можно получить при использовании квантовой сети. С другой стороны, имеются приложения, такие как квантовые вычисления вслепую, которые дают пользователю возможность выполнить квантовые расчёты на удалённом сервере, который при этом не будет знать сути этих вычислений, а также входные и выходные данные [Fitzsimons17]. Поэтому приватность должна рассматриваться на уровне каждого приложения [QI-Scenarios].

6.2. Принципы Quantum Internet

Принципы поддерживают цели, но сами целями не являются - цели определяют, что мы хотим построить, а принципы задают способы достижения целей. Цели служат также основой для определения показателей успеха, а принципы не разделяют успехи и неудачи. Дополнительные сведения о проектировании квантовых сетей можно найти в [VanMeter13.1] и [Dahlberg19].

1. Запутанность является фундаментальной службой.

Ключевой услугой квантовой сети является распространение запутанности между узлами сети и все распределенные квантовые приложения строятся на основе этого ресурса. Приложения, вроде кластеризованных квантовых вычислений, распределенных сетей квантового зондирования и некоторых типов защищённых квантовых сетей, потребляют квантовую запутанность как ресурс. Некоторые приложения (например, QKD) просто измеряют запутанные кубиты для получения общего секретного ключа [QKD], а другие (например, распределенные квантовые вычисления) создают более сложные абстракции и операции над запутанными кубитами, например распределенные вентили CNOT [DistCNOT] или телепортацию произвольных состояний кубитов [Teleportation].

Квантовая сеть может также распределять многоэлементные (multipartite) запутанные состояния (с 3 и более кубитами) [Meignant19], полезные для таких приложений, как групповое согласование ключей (conference key agreement или SKA) [Murta20], распределенные квантовые вычисления [Cirac99], совместное использование секретов [Qin17] и синхронизация часов [Kumar14], хотя следует отметить, что такие состояния можно также создавать из множества запутанных пар, распределенных между конечными узлами.

2. Пары Белла неразличимы.

Любые пары Белла между одними и теми же узлами неразличимы для приложения при условии, что они удовлетворяют требуемому порогу достоверности. Это наблюдение будет, вероятно, очень важным для более оптимального выделения ресурсов в сети, например, при распределении ресурсов по запросам приложений. Однако кубиты, составляющие пару, сами не будут неразличимыми и два узла, работающих с парой, должны координировать свои действия над кубитами, чтобы убедиться в их принадлежности к одной паре.

3. Достоверность является частью сервиса.

Пары Белла, доставляемые конечным точкам, должны быть достаточно достоверными. В отличие от классических сетей, где большинство ошибок эффективно устраняется до попадания в приложение, многим квантовым приложениям для работы нужна лишь несовершенная (imperfect) запутанность. Однако у квантовых приложений обычно имеется порог достоверности пар Белла, ниже которого они не могут работать. Требования приложений к достоверности пар различаются и сеть отвечает за баланс использования ресурсов в соответствии с потребностями приложений. Возможно, что для сети будет «дешевле» доставлять пары с малой достоверностью, которая всё же выше требуемого приложением порога, чем гарантировать высокую достоверность пар для всех приложений.

4. Время является дорогим ресурсом.

Время не является единственным дефицитным ресурсом (кубиты и память тоже дефицитны), но в конечном итоге срок действия квантовой памяти задаёт одно из самых жёстких условий для работы расширенной сети квантовых узлов. В современном оборудовании скорость создания пар Белла мала, срок действия памяти краток и число коммуникационных кубитов ограничено. Эти факторы совместно означают, что даже короткое ожидание в очереди на том или ином узле может приводить к декогеренции пары Белла или снижению

достоверности сквозной пары ниже порога. Поэтому контроль времени «простоя» кубитов, содержащих квантовые состояния, должен выполняться очень осторожно, в идеале с минимизацией простоя и, возможно, с перемещением состояния кубита во временное хранилище в квантовой памяти с большим сроком действия.

5. Гибкость в плане возможностей и ограничений.

- Архитектура должна быть способна функционировать в условиях физических ограничений, вносимых доступным оборудованием. Оборудование ближайшего будущего, вероятно, будет иметь малую скорость генерации запутанности, квантовую память, способную в лучшем случае хранить несколько кубитов, и скорость декогеренции, которая приведёт к непригодности множества созданных пар.
- Архитектуре не следует усложнять работу сети на любом оборудовании, которое может появиться в будущем. Физические возможности повторителей будут расти, а внедрение технологии заново является очень сложной задачей.

7. Мысленный эксперимент, вызванный классическими сетями

В заключение рассмотрим вероятную архитектуру квантовой сети по аналогии с MPLS. Это не предложение по архитектуре, а просто мысленный эксперимент, дающий читателю представление о функциональных компонентах, нужных для функциональной квантовой сети. В качестве основы выбрана классическая технология MPLS, поскольку она хорошо известна и понятна в сетевом сообществе.

Создание сквозных пар Белла между удалёнными конечными точками - это распределённая задача с учётом состояния, требующая значительной предварительной координации. Ориентированный на соединения подход представляется наиболее естественным для квантовых сетей. В ориентированной на соединения квантовой сети при желании пары конечных точек начать создание сквозных пар Белла они должны сначала создать квантовый виртуальный канал (Quantum Virtual Circuit или QVC). По аналогии с сетями MPLS конечные точки должны организовать пути с коммутацией по меткам (Label Switched Path или LSP) до начала обмена трафиком. Ориентированная на соединения квантовая сеть может поддерживать виртуальные каналы с множеством конечных точек для создания групповой (multipartite) запутанности. Аналогией в MPLS являются многоточечные LSP для групповой передачи.

Когда квантовое приложение создаёт QVC, оно может указать параметры качества обслуживания (Quality of Service или QoS), такие как требуемая пропускная способность в сквозных парах Белла за секунду (Bell Pairs Per Second или BPPS) и требуемую достоверность пар Белла. По аналогии в сетях MPLS приложения задают при создании LSP пропускную способность в бит/с (Bits Per Second или BPS) и другие ограничения. Требования QoS у приложений различаются. Например, таким приложениям, как QKD, которым не нужно обрабатывать запутанные кубиты и достаточно просто измерять их и сохранять результат, может потребоваться много запутанности, но они будут устойчивы к задержкам и их вариациям для отдельных пар. А приложениям для распределённых или облачных квантовых вычислений может потребоваться меньше запутанных пар, но взамен потребуется их генерация в один приём для совместной обработки, прежде чем какая-либо из них будет декогерирована.

Квантовой сети нужна функция маршрутизации для расчёта оптимального пути (последовательности маршрутизаторов и каналов) для каждого нового QVC. Эта функция может быть централизованной или распределённой и в последнем случае квантовой сети нужен распределённый протокол маршрутизации. Классические сети используют такие протоколы маршрутизации как OSPF и IS-IS, однако в квантовых сетях определения кратчайшего пути и наименьшей стоимости могут отличаться с учётом таких характеристик квантовой сети, как достоверность [VanMeter13.2].

С учётом очень ограниченной доступности ресурсов в ранних квантовых сетях функции организации трафика (Traffic Engineering или TE) вряд ли будут полезны. Без TE виртуальные каналы QVC всегда используют кратчайший путь, но и в этом случае нет гарантии получения каждой квантовой конечной точкой пар Белла с требуемой скоростью и достоверностью. Это аналогично услугам доставки по возможности (best effort) в классических сетях. При наличии TE для QVC выбирается путь с гарантией запрошенных ресурсов (например, BPPS), а также учитываются возможности маршрутизаторов и каналов, уже занятые другими виртуальными каналами. Это аналогично расширениям TE для OSPF и IS-IS с целью отслеживания доступных ресурсов и учёту ограничений при выборе кратчайшего пути (Constrained Shortest Path First или CSPF), чтобы при расчёте оптимального пути принимать во внимание доступность ресурсов и другие ограничения. Использование TE предполагает контроль вызовов (Call Admission Control или CAC), когда сеть отклоняет виртуальные соединения, для которых невозможно заранее гарантировать запрошенное качество обслуживания. Как вариант, сеть может вытеснить соединения с низким приоритетом для освобождения ресурсов.

Квантовым сетям нужны сигнальные функции - после расчёта QVC сигнализация служит для установки «правил пересылки» в плоскости данных каждого квантового маршрутизатора на пути. Сигнализация может быть распределённой, подобно протоколу резервирования ресурсов (Resource Reservation Protocol или RSVP) в MPLS, или централизованной, подобно OpenFlow.

Квантовым сетям нужна абстракция оборудования для задания правил пересылки. Это позволит отвязать плоскость управления (маршрутизацию и сигнализацию) от плоскости данных (фактическое создание пар Белла). Правила пересылки задаются с помощью абстрактных элементов, такие как «создание локальных пар Белла», «переключение пар Белла» или «очистка пар Белла». В классических сетях для этого применяются абстракции на основе сопоставлений (например, поиск в таблицах по заголовку) и действия (например, изменение полей или пересылка пакета в конкретный интерфейс). Абстракции плоскости данных в квантовых сетях будут существенно отличаться от классических по причине фундаментальных различий в технологиях, и необходимости поддержки состояния в квантовых сетях. Фактически, выбор правильных абстракций будет одной из важнейших задач при разработке функционально совместимых протоколов квантовых сетей.

В квантовых сетях трафик плоскости управления (сообщения маршрутизации и сигнализации) передаётся по классическим каналам, а трафик плоскости данных (кубиты пар Белла) - по отдельным квантовым каналам. Это отличается от большинства классических сетей, где оба типа трафика используют общий канал, а пакет содержит пользовательские данные и заголовки. Однако имеется классическая аналогия работе квантовых сетей - в обобщённых сетях MPLS (GMPLS) для трафика данных и управления применяются разные каналы. Кроме того, сети GMPLS поддерживают плоскости данных, где заголовки плоскости данных отсутствуют, например, сети с

мультиплексированием по длине волны (Dense Wavelength Division Multiplexing или DWDM) и времени (Time-Division Multiplexing или TDM).

8. Вопросы безопасности

Безопасность указана в документе как одна из явных целей архитектуры (6.1. Цели Quantum Internet), однако информационный характер документа не предполагает включение каких-либо конкретных механизмов.

9. Взаимодействие с IANA

Этот документ не требует действий IANA.

10. Литература

- [Abobeih18] Abobeih, M.H., Cramer, J., Bakker, M.A., Kalb, N., Markham, M., Twitchen, D.J., and T.H. Taminiau, "One-second coherence for a single electron spin coupled to a multi-qubit nuclear-spin environment",¹ Nature communications Vol. 9, Iss. 1, pp. 1-8, DOI 10.1038/s41467-018-04916-z, June 2018, <<https://www.nature.com/articles/s41467-018-04916-z>>.
- [Aguado19] Aguado, A., Lopez, V., Lopez, D., Peev, M., Poppe, A., Pastor, A., Folgueira, J., and V. Martin, "The Engineering of Software-Defined Quantum Key Distribution Networks",² IEEE Communications Magazine Vol. 57, Iss. 7, pp. 20-26, DOI 10.1109/MCOM.2019.1800763, July 2019, <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8767074>>.
- [Askarani21] Askarani, M.F., Chakraborty, K., and G.C. do Amaral, "Entanglement distribution in multi-platform buffered-router-assisted frequency-multiplexed automated repeater chains",³ New Journal of Physics Vol. 23, Iss. 6, 063078, DOI 10.1088/1367-2630/ac0a35, June 2021, <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ac0a35>>.
- [Aspect81] Aspect, A., Grangier, P., and G. Roger, "Experimental Tests of Realistic local Theories via Bell's Theorem",⁴ Physical Review Letters Vol. 47, Iss. 7, pp. 460-463, DOI 10.1103/PhysRevLett.47.460, August 1981, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.47.460>>.
- [Bennett14] Bennett, C.H. and G. Brassard, "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing",⁵ Theoretical Computer Science Vol. 560 (Part 1), pp. 7-11, DOI 10.1016/j.tcs.2014.05.025, December 2014, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304397514004241?via%3Dihub>>.
- [Bennett93] Bennett, C.H., Brassard, G., Crépeau, C., Jozsa, R., Peres, A., and W.K. Wootters, "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels",⁶ Physical Review Letters Vol. 70, Iss. 13, pp. 1895-1899, DOI 10.1103/PhysRevLett.70.1895, March 1993, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.70.1895>>.
- [Bennett96] Bennett, C.H., DiVincenzo, D.P., Smolin, J.A., and W.K. Wootters, "Mixed-state entanglement and quantum error correction",⁷ Physical Review A Vol. 54, Iss. 5, pp. 3824-3851, DOI 10.1103/PhysRevA.54.3824, November 1996, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevA.54.3824>>.
- [Bradley19] Bradley, C.E., Randall, J., Abobeih, M.H., Berrevoets, R.C., Degen, M.J., Bakker, M.A., Markham, M., Twitchen, D.J., and T.H. Taminiau, "A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute",⁸ Physical Review X Vol. 9, Iss. 3, 031045, DOI 10.1103/PhysRevX.9.031045, September 2019, <<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.9.031045>>.
- [Briegel98] Briegel, H.-J., Dür, W., Cirac, J.I., and P. Zoller, "Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication",⁹ Physical Review Letters Vol. 81, Iss. 26, pp. 5932-5935, DOI 10.1103/PhysRevLett.81.5932, December 1998, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.81.5932>>.
- [Broadbent10] Broadbent, A., Fitzsimons, J., and E. Kashefi, "Measurement-Based and Universal Blind Quantum Computation",¹⁰ Springer-Verlag 978-3-642-13678-8, DOI 10.1007/978-3-642-13678-8_2, June 2010, <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-13678-8_2>.
- [Cacciapuoti19] Cacciapuoti, A.S., Caleffi, M., Van Meter, R., and L. Hanzo, "When Entanglement Meets Classical Communications: Quantum Teleportation for the Quantum Internet",¹¹ IEEE Transactions on Communications Vol. 68, Iss. 6, pp. 3808-3833, DOI 10.1109/TCOMM.2020.2978071, June 2020, <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9023997>>.
- [Cirac99] Cirac, J.I., Ekert, A.K., Huelga, S.F., and C. Macchiavello, "Distributed quantum computation over noisy channels",¹² Physical Review A Vol. 59, Iss. 6, 4249, DOI 10.1103/PhysRevA.59.4249, June 1999, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevA.59.4249>>.

¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

³Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁴Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁵Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁶Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁷Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁸Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹⁰Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

- [Clark88] Clark, D., "The design philosophy of the DARPA internet protocols",¹ SIGCOMM '88: Symposium proceedings on Communications architectures and protocols, pp. 106-114, DOI 10.1145/52324.52336, August 1988, <<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/52324.52336>>.
- [Crepeau02] Crépeau, C., Gottesman, D., and A. Smith, "Secure multi-party quantum computation",² STOC '02: Proceedings of the thirty-fourth [sic] annual ACM symposium on Theory of computing, pp. 643-652, DOI 10.1145/509907.510000, May 2002, <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/509907.510000>>.
- [Dahlberg19] Dahlberg, A., Skrzypczyk, M., Coopmans, T., Wubben, L., Rozpędek, F., Pompili, M., Stolk, A., Pawełczak, P., Knegjens, R., de Oliveira Filho, J., Hanson, R., and S. Wehner, "A link layer protocol for quantum networks",³ SIGCOMM '19 Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication, pp. 159-173, DOI 10.1145/3341302.3342070, August 2019, <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3341302.3342070>>.
- [Devitt13] Devitt, S.J., Munro, W.J., and K. Nemoto, "Quantum error correction for beginners",⁴ Reports on Progress in Physics Vol. 76, Iss. 7, 076001, DOI 10.1088/0034-4885/76/7/076001, June 2013, <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/76/7/076001>>.
- [DistCNOT] "Distributed CNOT", Quantum Network Explorer by QuTech, 2023, <<https://www.quantum-network.com/applications/7/>>.
- [Dur07] Dür, W. and H.J. Briegel, "Entanglement purification and quantum error correction",⁵ Reports on Progress in Physics Vol. 70, Iss. 8, pp. 1381-1424, DOI 10.1088/0034-4885/70/8/R03, July 2007, <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/70/8/R03>>.
- [Ekert91] Ekert, A.K., "Quantum cryptography based on Bell's theorem",⁶ Physical Review Letters Vol. 67, Iss. 6, pp. 661-663, DOI 10.1103/PhysRevLett.67.661, August 1991, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.67.661>>.
- [Elkouss11] Elkouss, D., Martinez-Mateo, J., and V. Martin, "Information Reconciliation for Quantum Key Distribution",⁷ Quantum Information and Computation Vol. 11, No. 3 and 4, pp. 0226-0238, DOI 10.48550/arXiv.1007.1616, March 2011, <<https://arxiv.org/abs/1007.1616>>.
- [Elliott03] Elliott, C., Pearson, D., and G. Troxel, "Quantum cryptography in practice",⁸ SIGCOMM 2003: Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, pp. 227-238, DOI 10.1145/863955.863982, August 2003, <<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/863955.863982>>.
- [Fitzsimons17] Fitzsimons, J.F. and E. Kashefi, "Unconditionally verifiable blind quantum computation",⁹ Physical Review A Vol. 96, Iss. 1, 012303, DOI 10.1103/PhysRevA.96.012303, July 2017, <<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.96.012303>>.
- [Fowler10] Fowler, A.G., Wang, D.S., Hill, C.D., Ladd, T.D., Van Meter, R., and L.C.L. Hollenberg, "Surface Code Quantum Communication",¹⁰ Physical Review Letters Vol. 104, Iss. 18, 180503, DOI 10.1103/PhysRevLett.104.180503, May 2010, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.104.180503>>.
- [Giovannetti04] Giovannetti, V., Lloyd, S., and L. Maccone, "Quantum-Enhanced Measurements: Beating the Standard Quantum Limit",¹¹ Science Vol. 306, Iss. 5700, pp. 1330-1336, DOI 10.1126/science.1104149, November 2004, <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1104149>>.
- [Gottesman12] Gottesman, D., Jennewein, T., and S. Croke, "Longer-Baseline Telescopes Using Quantum Repeaters",¹² Physical Review Letters Vol. 109, Iss. 7, 070503, DOI 10.1103/PhysRevLett.109.070503, August 2012, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.109.070503>>.
- [Hensen15] Hensen, B., Bernien, H., Dréau, A.E., Reiserer, A., Kalb, N., Blok, M.S., Ruitenberg, J., Vermeulen, R.F.L., Schouten, R.N., Abellán, C., Amaya, W., Pruneri, V., Mitchell, M.W., Markham, M., Twitchen, D.J., Elkouss, D., Wehner, S., Taminiau, T.H., and R. Hanson, "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres",¹³ Nature Vol. 526, pp. 682-686, DOI 10.1038/nature15759, October 2015, <<https://www.nature.com/articles/nature15759>>.
- [Jiang09] Jiang, L., Taylor, J.M., Nemoto, K., Munro, W.J., Van Meter, R., and M.D. Lukin, "Quantum repeater with encoding",¹⁴ Physical Review A Vol. 79, Iss. 3, 032325, DOI 10.1103/PhysRevA.79.032325, March 2009, <<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.79.032325>>.
- [Joshi20] Joshi, S.K., Aktas, D., Wengerowsky, S., Lončarić, M., Neumann, S.P., Liu, B., Scheidl, T., Currás-Lorenzo, G., Samec, Z., Kling, L., Qiu, A., Razavi, M., Stipčević, M., Rarity, J.G., and R. Ursin, "A trusted node-free eight-user metropolitan quantum communication network",¹⁵ Science Advances Vol. 6, no. 36, eaba0959, DOI 10.1126/sciadv.aba0959, September 2020, <<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aba0959>>.

¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

³Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁴Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁵Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁶Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁷Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁸Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹⁰Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹³Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹⁴Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹⁵Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

- [Kimble08] Kimble, H.J., "The quantum internet",¹ Nature Vol. 453, Iss. 7198, pp. 1023-1030, DOI 10.1038/nature07127, June 2008, <<https://www.nature.com/articles/nature07127>>.
- [Komar14] Kómár, P., Kessler, E.M., Bishof, M., Jiang, L., Sørensen, A.S., Ye, J., and M.D. Lukin, "A quantum network of clocks",² Nature Physics Vol. 10, Iss. 8, pp. 582-587, DOI 10.1038/nphys3000, June 2014, <<https://www.nature.com/articles/nphys3000>>.
- [Meignant19] Meignant, C., Markham, D., and F. Grosshans, "Distributing graph states over arbitrary quantum networks",³ Physical Review A Vol. 100, Iss. 5, 052333, DOI 10.1103/PhysRevA.100.052333, November 2019, <<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.100.052333>>.
- [Moehring07] Moehring, D.L., Maunz, P., Olmschenk, S., Younge, K.C., Matsukevich, D.N., Duan, L.-M., and C. Monroe, "Entanglement of single-atom quantum bits at a distance",⁴ Nature Vol. 449, Iss. 7158, pp. 68-71, DOI 10.1038/nature06118, September 2007, <<https://www.nature.com/articles/nature06118>>.
- [Mural16] Muralidharan, S., Li, L., Kim, J., Lütkenhaus, N., Lukin, M.D., and L. Jiang, "Optimal architectures for long distance quantum communication",⁵ Scientific Reports Vol. 6, pp. 1-10, DOI 10.1038/srep20463, February 2016, <<https://www.nature.com/articles/srep20463>>.
- [Murta20] Murta, G., Grasselli, F., Kampermann, H., and D. Bruß, "Quantum Conference Key Agreement: A Review",⁶ Advanced Quantum Technologies Vol. 3, Iss. 11, 2000025, DOI 10.1002/qute.202000025, September 2020, <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qute.202000025>>.
- [Nagayama16] Nagayama, S., Choi, B.-S., Devitt, S., Suzuki, S., and R. Van Meter, "Interoperability in encoded quantum repeater networks",⁷ Physical Review A Vol. 93, Iss. 4, 042338, DOI 10.1103/PhysRevA.93.042338, April 2016, <<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.93.042338>>.
- [Nagayama21] Nagayama, S., "Towards End-to-End Error Management for a Quantum Internet",⁸ arXiv 2112.07185, DOI 10.48550/arXiv.2112.07185, December 2021, <<https://arxiv.org/abs/2112.07185>>.
- [NielsenChuang] Nielsen, M.A. and I.L. Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information", Cambridge University Press, 2010, <<http://mmrc.amss.cas.cn/tlb/201702/W020170224608149940643.pdf>>.
- [Park70] Park, J.L., "The concept of transition in quantum mechanics",⁹ Foundations of Physics Vol. 1, Iss. 1, pp. 23-33, DOI 10.1007/BF00708652, March 1970, <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00708652>>.
- [Peev09] Peev, M., Pacher, C., Alléaume, R., Barreiro, C., Bouda, J., Boxleitner, W., Debuisschert, T., Diamanti, E., Dianati, M., Dynes, J.F., Fasel, S., Fossier, S., Fürst, M., Gautier, J.-D., Gay, O., Gisin, N., Grangier, P., Happe, A., Hasani, Y., Hentschel, M., Hübel, H., Humer, G., Länger, T., Legré, M., Lieger, R., Lodewyck, J., Lorünser, T., Lütkenhaus, N., Marhold, A., Matyus, T., Maurhart, O., Monat, L., Nauerth, S., Page, J.-B., Poppe, A., Querasser, E., Ribordy, G., Robyr, S., Salvail, L., Sharpe, A.W., Shields, A.J., Stucki, D., Suda, M., Tamas, C., Themel, T., Thew, R.T., Thoma, Y., Treiber, A., Trinkler, P., Tualle-Brouri, R., Vannel, F., Walenta, N., Weier, H., Weinfurter, H., Wimberger, I., Yuan, Z.L., Zbinden, H., and A. Zeilinger, "The SECOQC quantum key distribution network in Vienna",¹⁰ New Journal of Physics Vol. 11, Iss. 7, 075001, DOI 10.1088/1367-2630/11/7/075001, July 2009, <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/11/7/075001>>.
- [Pompili21.1] Pompili, M., Hermans, S.L.N., Baier, S., Beukers, H.K.C., Humphreys, P.C., Schouten, R.N., Vermeulen, R.F.L., Tiggelman, M.J., dos Santos Martins, L., Dirkse, B., Wehner, S., and R. Hanson, "Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits",¹¹ Science Vol. 372, No. 6539, pp. 259-264, DOI 10.1126/science.abg1919, April 2021, <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abg1919>>.
- [Pompili21.2] Pompili, M., Delle Donne, C., te Raa, I., van der Vecht, B., Skrzypczyk, M., Ferreira, G., de Kluijver, L., Stolk, A.J., Hermans, S.L.N., Pawelczak, P., Kozlowski, W., Hanson, R., and S. Wehner, "Experimental demonstration of entanglement delivery using a quantum network stack",¹² npj Quantum Information Vol. 8, 121, DOI 10.4121/16912522, October 2022, <<https://www.nature.com/articles/s41534-022-00631-2>>.
- [QI-Scenarios] Wang, C., Rahman, A., Li, R., Aelmans, M., and K. Chakraborty, "Application Scenarios for the Quantum Internet", Work in Progress, Internet-Draft, draft-irtf-qirg-quantum-internet-use-cases-15, 10 March 2023, <<https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-irtf-qirg-quantum-internet-use-cases-15>>.
- [Qin17] Qin, H. and Y. Dai, "Dynamic quantum secret sharing by using d-dimensional GHZ state", Quantum information processing Vol. 16, Iss. 3, 64, DOI 10.1007/s11128-017-1525-y, January 2017, <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11128-017-1525-y>>.
- [QKD] "Quantum Key Distribution", Quantum Network Explorer by QuTech, 2023, <<https://www.quantum-network.com/applications/5/>>.
- [RFC1958] Carpenter, B., Ed., "Architectural Principles of the Internet", RFC 1958, DOI 10.17487/RFC1958, June 1996, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc1958>>.

¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

³Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁴Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁵Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁶Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁷Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁸Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹⁰Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

- [Sangouard11] Sangouard, N., Simon, C., de Riedmatten, H., and N. Gisin, "Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics",¹ *Reviews of Modern Physics* Vol. 83, Iss. 1, pp. 33-80, DOI 10.1103/RevModPhys.83.33, March 2011, <<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.83.33>>.
- [SatoH17] SatoH, T., Nagayama, S., Oka, T., and R. Van Meter, "The network impact of hijacking a quantum repeater",² *Quantum Science and Technology* Vol. 3, Iss. 3, 034008, DOI 10.1088/2058-9565/aac11f, May 2018, <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aac11f>>.
- [SatoH20] SatoH, T., Nagayama, S., Suzuki, S., Matsuo, T., Hajdušek, M., and R. Van Meter, "Attacking the Quantum Internet",³ *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 2, pp. 1-17, DOI 10.1109/TQE.2021.3094983, September 2021, <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9477172>>.
- [SutorBook] Sutor, R.S., "Dancing with Qubits", Packt Publishing, November 2019, <<https://www.packtpub.com/product/dancing-with-qubits/9781838827366>>.
- [Tang19] Tang, B.-Y., Liu, B., Zhai, Y.-P., Wu, C.-Q., and W.-R. Yu, "High-speed and Large-scale Privacy Amplification Scheme for Quantum Key Distribution",⁴ *Scientific Reports* Vol. 9, DOI 10.1038/s41598-019-50290-1, October 2019, <<https://www.nature.com/articles/s41598-019-50290-1>>.
- [Teleportation] "State teleportation", *Quantum Network Explorer* by QuTech, 2023, <<https://www.quantum-network.com/applications/1/>>.
- [Terhal04] Terhal, B.M., "Is entanglement monogamous?",⁵ *IBM Journal of Research and Development* Vol. 48, Iss. 1, pp. 71-78, DOI 10.1147/rd.481.0071, January 2004, <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5388928>>.
- [VanMeter13.1] Van Meter, R. and J. Touch, "Designing quantum repeater networks",⁶ *IEEE Communications Magazine* Vol. 51, Iss. 8, pp. 64-71, DOI 10.1109/MCOM.2013.6576340, August 2013, <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6576340>>.
- [VanMeter13.2] Van Meter, R., SatoH, T., Ladd, T.D., Munro, W.J., and K. Nemoto, "Path selection for quantum repeater networks",⁷ *Networking Science* Vol. 3, Iss. 1-4, pp. 82-95, DOI 10.1007/s13119-013-0026-2, December 2013, <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13119-013-0026-2>>.
- [VanMeterBook] Van Meter, R., "Quantum Networking", ISTE Ltd/John Wiley and Sons. Inc., Print ISBN 978-1-84821-537-5, DOI 10.1002/9781118648919, April 2014, <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118648919>>.
- [Wang21] Wang, L.-J., Zhang, K.-Y., Wang, J.-Y., Cheng, J., Yang, Y.-H., Tang, S.-B., Yan, D., Tang, Y.-L., Liu, Z., Yu, Y., Zhang, Q., and J.-W. Pan, "Experimental authentication of quantum key distribution with post-quantum cryptography",⁸ *npj Quantum Information* Vol. 7, pp. 1-7, DOI 10.1038/s41534-021-00400-7, May 2021, <<https://www.nature.com/articles/s41534-021-00400-7>>.
- [Wehner18] Wehner, S., Elkouss, D., and R. Hanson, "Quantum internet: A vision for the road ahead",⁹ *Science* Vol. 362, Iss. 6412, DOI 10.1126/science.aam9288, October 2018, <<https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aam9288>>.
- [Wei22] Wei, S.-H., Jing, B., Zhang, X.-Y., Liao, J.-Y., Yuan, C.-Z., Fan, B.-Y., Lyu, C., Zhou, D.-L., Wang, Y., Deng, G.-W., Song, H.-Z., Oblak, D., Guo, G.-C., and Q. Zhou, "Towards Real-World Quantum Networks: A Review",¹⁰ *Laser and Photonics Reviews* Vol. 16, 2100219, DOI 10.1002/lpor.202100219, January 2022, <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lpor.202100219>>.
- [Wootters82] Wootters, W.K. and W.H. Zurek, "A single quantum cannot be cloned", *Nature* Vol. 299, Iss. 5886, pp. 802-803, DOI 10.1038/299802a0, October 1982, <<https://www.nature.com/articles/299802a0>>.
- [ZOO] "The Quantum Protocol Zoo", November 2019, <<https://wiki.verigloud.fr/>>.

Благодарности

Авторы благодарны Carlo Delle Donne, Matthew Skrzypczyk, Axel Dahlberg, Mathias van den Bossche, Patrick Gelard, Chonggang Wang, Scott Fluhrer, Joey Salazar, Joseph Touch и всему сообществу QIRG за очень полезные рецензии и комментарии у документа.

WK и SW подтверждают финансирование от EU Flagship on Quantum Technologies, Quantum Internet Alliance (No. 820445).

rdv подтверждает поддержку Air Force Office of Scientific Research по гранту FA2386-19-1-4038.

Адреса авторов

Wojciech Kozlowski
 QuTech
 Building 22
 Lorentzweg 1
 2628 CJ Delft
 Netherlands
 Email: w.kozlowski@tudelft.nl

¹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

²Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

³Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁴Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁵Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁶Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁷Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁸Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

⁹Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

¹⁰Полный текст доступен по [ссылке](#). Прим. перев.

Stephanie Wehner

QuTech
Building 22
Lorentzweg 1
2628 CJ Delft
Netherlands
Email: s.d.c.wehner@tudelft.nl

Rodney Van Meter

Keio University
5322 Endo, Fujisawa, Kanagawa
252-0882
Japan
Email: rdv@sfc.wide.ad.jp

Bruno Rijsman

Individual
Email: brunorijsman@gmail.com

Angela Sara Cacciapuoti

University of Naples Federico II
Department of Electrical Engineering and Information Technologies
Claudio 21
80125 Naples
Italy
Email: angelasara.cacciapuoti@unina.it

Marcello Caleffi

University of Naples Federico II
Department of Electrical Engineering and Information Technologies
Claudio 21
80125 Naples
Italy
Email: marcello.caleffi@unina.it

Shota Nagayama

Mercari, Inc.
Roppongi Hills Mori Tower 18F
6-10-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo
106-6118
Japan
Email: shota.nagayama@mercari.com

Перевод на русский язык

Николай Малых
nmalykh@protokols.ru