



Топ-10 перспективных технологий квантовой связи

Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) НИУ ВШЭ с помощью системы анализа больших данных iFORA определил десятку наиболее перспективных направлений разработок, которые задают вектор развития квантовой связи в мире на ближайшие несколько лет.

Справочно: Система интеллектуального анализа больших данных iFORA разработана ИСИЭЗ НИУ ВШЭ с применением передовых технологий искусственного интеллекта и включает более 800 млн документов (научные публикации, патенты, нормативная правовая база, рыночная аналитика, отраслевые медиа, материалы международных организаций, вакансии, другие виды источников). В 2020 г. iFORA отмечена в журнале *Nature* в качестве эффективного инструмента поддержки принятия решений в интересах бизнеса и органов власти. ОЭСР относит систему к успешным инициативам в области цифровизации науки. Для данного исследования проанализированы более 1.3 тыс. англоязычных источников за 2019–2023 гг., отражающих актуальную повестку в мире.

Квантовые коммуникации – принципиально новый физический подход к обеспечению конфиденциальности и целостности данных и одно из самых перспективных направлений развития телекоммуникационной отрасли. К 2032 г. глобальный спрос на технологии квантовой связи, которые уже стремительно завоевывают рынок, может [превысить 8 млрд долл.](#) (прирост почти в 10 раз за десятилетие). Своевременный переход на квантово-устойчивые решения для защиты критической инфраструктуры становится приоритетной задачей информационной безопасности для государства и бизнеса, и значимость ее все более усиливается на фоне перспектив появления квантовых компьютеров, которые сделают уязвимыми традиционные методы криптографии. Однако массовому внедрению технологий квантовых коммуникаций пока препятствует высокая стоимость развертывания квантовых сетей и ряд физических и технических ограничений их реализации, необходимость преодоления которых намечает отдельные направления разработок (табл. 1).

Таблица 1. Топ-10 наиболее перспективных технологий и решений квантовой связи

| Ранг | Технологии и решения | Индекс значимости | Уровень готовности технологии |
|------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| 1 | Квантовый интернет | 1.00 | |
| 2 | Квантовое распределение ключей | 0.53 | |
| 3 | Квантовый банкинг | 0.27 | |
| 4 | Дальнедействующая квантовая связь | 0.19 | |
| 5 | Квантовая память | 0.14 | |
| 6 | Квантовый спутник | 0.14 | |
| 7 | Квантовый повторитель | 0.13 | |
| 8 | Оптоволоконные квантовые коммуникации | 0.12 | |
| 9 | Многоузловые квантовые сети | 0.11 | |
| 10 | Гибридные квантовые сети | 0.08 | |

Легенда: Исследования и разработки Прототип Готовый продукт

Индекс значимости технологии показывает ее относительную встречаемость в проанализированном массиве источников (более 1.3 тыс. англоязычных профессиональных СМИ за 2019–2023 гг.), где 1 соответствует максимальному числу упоминаний. При расчете учитываются частота встречаемости термина, его специфичность и векторная центральность. Частота встречаемости сама по себе недостаточна для отражения реальной актуальности термина, важно, чтобы он обозначал конкретное научно-технологическое направление и не был слишком общим (эту задачу решает показатель специфичности), а векторная центральность отражает степень его связи с другими направлениями поиска. При этом высокий спрос и интерес к технологии не связаны с уровнем ее готовности к массовому распространению. **Уровень готовности технологии** показывает, на какой стадии жизненного цикла находится технология в настоящий момент.

Квантовый интернет (№ 1 в рейтинге) является наиболее ожидаемой технологией квантово-защищенной связи. Развертывание единой квантовой сети позволит связать квантовые процессоры и различные устройства и сенсоры (например, удаленные атомные часы или телескопы), обеспечив высочайшую точность синхронизации операций. Фундаментом для реализации квантового интернета является *квантовая телепортация* – процесс передачи квантового состояния физического объекта на идентичный объект, находящийся в другом месте, без прямого переноса квантовой частицы. Первый экспериментальный прототип квантового интернета уже создан в китайской столице: в 2023 г. с помощью развернутого квантового канала связи протяженностью 64 км [продемонстрировали](#) рекордную скорость передачи данных (7.1 кубитов¹ в секунду). Достигнутая скорость квантовой телепортации пока недостаточна для развертывания полномасштабного квантового интернета. И в обозримом будущем он [вряд ли заменит](#) действующую Всемирную сеть, а, наиболее вероятно, будет использоваться в качестве сопутствующей технологии гибридной вычислительной экосистемы для решения специализированных задач в отдельных отраслях – государственном управлении, финансовом секторе, на транспорте и др. В долгосрочной перспективе создание квантового интернета приведет к смене парадигмы безопасности глобальных коммуникаций и предвещает появление универсальных квантовых компьютеров.

Высокий интерес банковского сектора к защите финансовых транзакций между странами привел к появлению концепции **квантового банкинга**, или квантовой финансовой системы (№3), основанной на технологии блокчейна и квантовых вычислений. Одним из ее компонентов станут *квантовые деньги* – новая децентрализованная форма цифровой валюты, защищенная от подделки квантовой криптографией. Но для полноценного развертывания квантовой финансовой системы необходимо создание отказоустойчивого квантового компьютера. По ряду [оценок](#), это может произойти к 2035 г.

Самым зрелым и технологически развитым направлением квантовых коммуникаций является **квантовое распределение ключей** (№2). Реализованные на данный момент в системах квантовых коммуникаций решения представляют собой аппаратный комплекс передачи данных с гибридной квантово-классической защитой телекоммуникационной сети и обеспечивают только безопасную передачу ключа по открытому каналу связи между абонентами, а сама пересылаемая информация пока защищается классическими методами и по-прежнему может быть уязвима в случае потенциальных атак квантовых компьютеров. Высокая стоимость и низкая совместимость с существующей сетевой инфраструктурой сдерживают широкое внедрение данной технологии. Ее использование в настоящее время наиболее целесообразно в организациях, работающих в критически важных областях.

Большинство текущих решений и протоколов позволяют обмениваться информацией только двум сторонам, что также ограничивает практическую применимость квантового распределения ключей. В этой связи становится актуальным создание **многоузловых квантовых сетей** (№9), поддерживающих одновременно связь между большим числом абонентов. В 2018 г. в Австрии [создали](#) квантовую сеть, имеющую полностью связанную архитектуру, в которой один источник запутанных фотонов распределяет квантовые состояния между многими пользователями, минимизируя нагрузку на вычислительные ресурсы каждого из них. При этом сеть можно легко масштабировать на значительное число абонентов без снижения уровня безопасности. Экспериментальный прототип самой передовой многоузловой квантовой сети из трех узлов в 2023 г. [разработан](#) в Китае на территории города Хэфэй.

По принципу физической реализации квантовые коммуникации делятся на **оптоволоконные** (№8) (наземный канал связи), разворачиваемые с помощью **квантового спутника** (№6) (атмосферный канал связи) и **гибридные** (№10) (сочетающие атмосферный и наземный каналы). Современные системы квантового распределения ключей разрабатываются в основном на базе оптоволоконных линий связи с прямым соединением, связывающим только двух абонентов, и имеют физические ограничения дальности передачи квантовой информации (всего несколько сотен километров). Для решения этой проблемы в различных точках сети создается несколько узлов в доверенной среде (т. е. в пространстве с гарантированным уровнем безопасности), что делает их реализацию весьма дорогостоящей.

Снятие ограничений по протяженности – ключевое условие для создания **дальнодействующей квантовой связи** (№4). Для поддержания на больших расстояниях высокоскоростной наземной квантовой связи разрабатываются специальные устройства – **квантовые повторители** (ретрансляторы) (№7). Именно от их действенности во многом зависит успех создания

¹ Кубит (или квантовый бит) – основная единица информации в квантовых вычислениях.

квантового интернета. [Первый прототип](#) полноценного повторителя эффективностью более 80% создали в 2021 г. в Китае. Двумя годами позже в Австрии разработали еще один прототип квантового повторителя на основе ионов в ловушке, который [обеспечивает](#) передачу квантовой информации на расстояние более 800 км.

Для эффективной работы повторителей квантовых сигналов необходима **квантовая память** (№5) – устройство, способное сохранять квантовое состояние световых частиц в течение продолжительного времени. Существует множество различных подходов к реализации квантовой памяти, основанных на разных физических системах (сверхпроводники, атомы, ионы, молекулы, кристаллы и др.). Однако многие из созданных прототипов обладают низкой скоростью работы и плохо совместимы с существующими системами квантовой связи. В 2023 г. в мире был [создан](#) прототип квантовой памяти на ионах в ловушке, обладающий рекордным временем хранения квантовых состояний (около 10 сек). Позже [представили](#) квантовую память на основе атомов, которая может подойти для массового производства и использования.

Увеличить дальность передачи квантовой информации, помимо квантовых повторителей, могут **квантовые спутники** (№6) на низких околоземных орбитах. Они позволяют передавать зашифрованные сообщения на наземные станции, при этом на значительно большие расстояния между сторонами коммуникации по сравнению с наземным способом квантовой связи. Подобная система создана только в Китае на базе спутников «Мо-цзы» (Mozi, 2016) и «Цзинань-1» (Jinan 1, 2022). Однако китайские устройства до сих пор имеют серьезное техническое ограничение – низкую скорость генерации ключей. Кроме того, спутник «Мо-цзы» пока работает лишь в ночное время.

Резюме

Квантовые технологии формируют новый ландшафт передачи и защиты данных. Прежде чем описанные в настоящем обзоре решения кардинально изменят сферу коммуникаций и принципы информационной безопасности, ученым предстоит преодолеть ряд физических и технических ограничений, сдерживающих по отдельным направлениям развитие данного кластера технологий. Так, серьезным препятствием в реализации значимых для квантово-защищенной связи решений на базе квантового распределения ключей являются малая дальность передачи, низкая скорость, небольшое число взаимодействующих пользователей. Возможные сценарии преодоления такого рода сложностей предполагают, например: создание квантовых повторителей и памяти для обеспечения большей дальности наземных сетей, разработку квантового спутника для формирования атмосферного канала передачи информации и реализацию принципа квантовой телепортации для запуска самого амбициозного проекта квантовой связи – квантового интернета.



Источники: Расчеты на основе системы интеллектуального анализа больших данных iFORA (правообладатель – ИСИЭЗ НИУ ВШЭ); результаты проекта «Экспертно-аналитическое сопровождение деятельности по развитию высокотехнологичных направлений в 2024 г., включая подготовку ежегодного доклада (“белой книги”) о развитии отдельных высокотехнологичных направлений» тематического плана научно-исследовательских работ, предусмотренных Государственным заданием НИУ ВШЭ.

■ Материал подготовила **А. Г. Малашина**

Данный материал НИУ ВШЭ может быть воспроизведен (скопирован) или распространен в полном объеме только при получении предварительного согласия со стороны НИУ ВШЭ (обращаться issek@hse.ru). Допускается использование частей (фрагментов) материала при указании источника и активной ссылки на интернет-сайт ИСИЭЗ НИУ ВШЭ (issek.hse.ru), а также на автора материала. Использование материала за пределами допустимых способов и/или указанных условий приведет к нарушению авторских прав.
