

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Гончаров Р. К.¹, Киселев А. Д.², Егоров В. И.³

DOI: 10.21681/2311-3456-2025-5-96-102

Цель исследования: провести систематизацию и критический анализ существующих подходов к подавлению ошибок в квантовых повторителях, а также в оценке их преимуществ и ограничений для реализации масштабируемых квантовых сетей и квантового интернета.

Методы исследования: в работе проведен детальный анализ современной литературы, включающий сопоставление различных схем квантовых повторителей, а также оценку ресурсных затрат и производительности.

Результаты исследования: квантовые повторители можно условно разделить на три поколения, каждое из которых демонстрирует оптимальную эффективность в определенных условиях. Первое поколение, реализующее вероятностное подавление ошибок посредством генерации объявленной запутанности и двустороннего очищения запутанности, проста в реализации и обеспечивает базовую функциональность квантовой сети, однако требует значительных временных затрат из-за необходимости обмена классическими сигналами и длительного хранения квантовых состояний. Второе поколение сочетает вероятностную генерацию запутанности с детерминированным исправлением ошибок операций посредством квантовых кодов исправления ошибок, что снижает требования к долговременной квантовой памяти и ускоряет процесс распределения запутанности, хотя обмен классическими сигналами между соседними узлами остается обязательным. Третье поколение полностью полагается на детерминированное подавление ошибок с использованием односторонней передачи классической информации, что позволяет существенно сократить временные задержки и достичь высоких скоростей генерации запутанных состояний, несмотря на необходимость более плотного расположения повторителей и высококачественных локальных вентиляей. Кроме того, обзор охватывает новые направления, такие как повторители без памяти и полностью фотонные повторители. Проведенный сравнительный анализ ресурсных затрат демонстрирует, что оптимизация параметров работы повторителей является ключевым фактором для реализации масштабируемых квантовых сетей, что имеет непосредственное значение для квантового распределения ключей, квантовой метрологии и распределенных квантовых вычислений.

Научная новизна: научная новизна заключается в интеграции разрозненных подходов к реализации квантовых повторителей в единое целостное представление, что позволяет объективно оценить их эффективность по ключевым параметрам. Обзор подчеркивает перспективы применения новых классов повторителей, таких как повторители без памяти и полностью фотонные схемы, которые могут стать важным элементом в развитии квантового интернета.

Ключевые слова: квантовая сеть, запутанность, элементарное звено, классификация.

Введение

В области квантовых коммуникаций передача квантовых состояний и генерация запутанности между удаленными сторонами существенно важны для таких приложений, как квантовое распределение ключей (КРК), квантовая метрология, распределенные вычисления и телепортация [1–3]. Обмен квантовой информации с высокой точностью воспроизведения (от англ. *fidelity*) исходного квантового состояния на больших расстояниях ограничен оптическими потерями и шумом. Фундаментальная граница PLOB⁴ определяет пределы передачи в системах «точка-точка»

(~200 км для оптоволокна). Невозможность клонирования квантовых состояний⁵ требует альтернативных подходов: установка доверенных узлов между приемником и передатчиком, по свойствам повторяющие легитимных пользователей; применение недоверенного промежуточного узла, например MDI (от англ. *measurement-device-independent*)⁶; или же применение квантовых повторителей [4]. Последние разделяют канал передачи на сегменты (генерация запутанности) и распределяют запутанность между этими сегментами (переброс запутанности), такой подход

1 Гончаров Роман Константинович, младший научный сотрудник лаборатории квантовых коммуникаций, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург. E-mail: rkgoncharov@itmo.ru

2 Киселев Алексей Дониславович, доктор физико-математических наук, профессор научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург. E-mail: alexei.d.kiselev@gmail.com

3 Егоров Владимир Ильич, кандидат физико-математических наук, доцент научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург. E-mail: viegorov@itmo.ru

4 Pirandola, S. Fundamental limits of repeaterless quantum communications / S. Pirandola, R. Laurenza, C. Ottaviani, L. Banchi // Nature Communications. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 15043. DOI: 10.1038/ncomms15043.

5 Wootters, W.K. A single quantum cannot be cloned / W.K. Wootters, W.H. Zurek // Nature. – 1982. – Vol. 299. – № 5886. – P. 802-803. DOI: 10.1038/299802a0.

6 Lo, H.-K. Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution / H.-K. Lo, M. Curty, B. Qi // Physical Review Letters. – 2012. – Vol. 108. – № 13. – P. 130503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.130503.

позволяет распределять запутанность на большие расстояния без прямой отправки состояний.

Несмотря на то, что доступные квантовые повторители пока нереализуемы широко, практические подходы уже исследуются [5–8], и появляются первые интеграции в городских квантовых сетях [9–11].

В настоящей работе обсуждается классификация квантовых повторителей в соответствии с методами подавления ошибок, проведено сравнение соответствующих схем между собой и выявляются их преимущества, а также обсуждаются перспективы развития квантовых сетей на запутанности.

Методы подавления ошибок и классификация квантовых повторителей

Квантовые коммуникации сталкиваются с двумя основными проблемами при попытке распределения запутанных состояний: потери в канале и на оборудовании и ошибки операций, вносимые каналом, квантовыми вентилями и памятью. В этом отношении квантовые повторители можно классифицировать в зависимости от используемых методов подавления ошибок: вероятностное подавление ошибок и детерминированное подавление ошибок.

Вероятностные протоколы требуют двусторонней классической связи для информирования соответствующих узлов о том, следует ли переходить к следующему шагу протокола; тем самым снижая скорость передачи данных. Для подавления ошибок потерь применяется протокол генерации объявленной (от англ. *heralded*) запутанности, а популярной схемой обнаружения ошибок операций является протокол двустороннего очищения (от англ. *distillation*) запутанности⁷.

Детерминированные протоколы используют квантовые коды исправления ошибок или одностороннее очищение запутанности. Логический кубит кодируется в блок физических кубитов, которые отправляются по каналу с потерями, и далее восстанавливаются при помощи квантового исправления ошибок. Для этого требуется односторонняя классическая передача информации, не влияющая на пропускную способность квантового канала. Однако такой подход может исправить ошибки только вплоть до 3 дБ потерь в канале из-за теоремы о запрете клонирования.

Направления исследований квантовых повторителей можно разделить на три поколения на основе их методов подавления ошибок потерь и ошибок операций⁸. Каждое поколение работает лучше всего для определенного набора значений рабочих параметров, таких как локальная скорость работы

вентиля, точность воспроизведения вентиля и эффективность соединения элементов в схеме.

Первое поколение квантовых повторителей и протокол DLCZ

Первое поколение квантовых повторителей [12; 13] использует вероятностное подавление ошибок. Среди подобных протоколов выделяется протокол DLCZ, где запутывание осуществляется между удаленными атомными ансамблями. Этот протокол специально разработан для стимуляции квантовой памяти с помощью лазерных импульсов.

Пусть легитимные стороны разделены средой с потерями и некоторым расстоянием L . При этом в случае первого поколения требуется $N_{\text{qm}} \sim 4 \frac{L}{L_0} - 2$ устройств квантовой памяти [4], где L_0 — расстояние между соседними узлами. Отметим, что значение N_{qm} далее будет разниться от поколения к поколению. Среди работ о последних экспериментальных разработках в области развития квантовой памяти можно выделить следующие [14–23].

Цель протокола DLCZ состоит в запутывании возбужденных состояний посредством интерференции излучаемых соседними звеньями фотонов на светоделителе в центральном реле. Однако этот процесс может потребовать нескольких попыток, что требует от повторителей возможности длительного хранения квантовой информации из иницилирующего импульса, что типично для протоколов, основанных на объявленной запутанности.

Первая реализация DLCZ включала в себя охлажденные лазером облака захваченных щелочных атомов, известных своими устойчивыми оптическими переходами⁹. Впоследствии протокол был улучшен и дополнен¹⁰. Появились и другие реализации, например, с использованием источника пар фотонов, а также схожие по принципу работы протоколы на базе однофотонных состояний¹¹ и состояний кота Шредингера [13].

Оценка производительности описанных протоколов, т.е. оценка среднего времени ожидания K (среднее количество попыток для генерации запутанности между конечными узлами) в разветвленной сети является нетривиальной задачей. Для повторителя из двух сегментов точное выражение было получено в работе¹², в то время как для произвольного количества звеньев применяются либо подход

7 Briegel, H.-J.H.-J.H.-J. Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication / H.-J.H.-J.H.-J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac, P. Zoller // Physical Review Letters. – 1998. – Vol. 81. – № 26. – P. 5932. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.5932.

8 Muralidharan, S. Optimal architectures for long distance quantum communication / S. Muralidharan, L. Li, J. Kim et al. // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – № 1. – P. 20463. DOI: 10.1038/srep20463.

9 Liu, C. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses / C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi, L. V. Hau // Nature. – 2001. – Vol. 409. – № 6819. – P. 490–493. DOI: 10.1038/35054017.

10 Sangouard, N. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics / N. Sangouard, C. Simon, H. De Riedmatten, N. Gisin // Reviews of Modern Physics. – 2011. – Vol. 83. – № 1. – P. 33–80. DOI: 10.1103/RevModPhys.83.33.

11 Sangouard, N. Long-distance entanglement distribution with single-photon sources / N. Sangouard, C. Simon, J. Minář et al. // Physical Review A. – 2007. – Vol. 76. – № 5. – P. 050301. DOI: 10.1103/PhysRevA.76.050301.

12 Collins, O. A. Multiplexed Memory-Insensitive Quantum Repeaters / O. A. Collins, S. D. Jenkins, A. Kuzmich, T. A. B. Kennedy // Phys. Rev. Lett. – 2007. – Vol. 98. – № 6. – P. 060502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.060502.

марковских цепочек¹³, требующий большой вычислительных мощностей при росте числа сегментов, либо более эффективный рекурсивный подход [24] для числа звеньев 2^k , где k — уровень вложенности. Часто используют простое приближение для случая удвоения числа элементарных звеньев:

$$K_n \approx \left(\frac{3}{2p_{\text{swap}}} \right)^k \cdot \frac{1}{p_{\text{gen}}}, \quad (1)$$

где p_{gen} — вероятность успешной генерации запутанности и p_{swap} — вероятность переброса запутанности.

Такое приближение, хоть и остается достаточно точным при высоких вероятностях генерации и переброса запутанности, несколько переоценивает время ожидания [24].

Второе поколение квантовых повторителей

Второе поколение повторителей¹⁴ использует вероятностный подход для ошибок потерь и детерминированный — для ошибок операций. В этой архитектуре запутанность между соседними узлами устанавливается посредством генерации объявленной запутанности, а далее выполняется кодирование логического кубита с использованием квантового исправления ошибок. Скорость генерации в таком случае ограничена временной задержкой, связанной с двусторонней классической связью между соседними узлами и работой локальных вентилях. При этом, если совокупная вероятность ошибок операций остается достаточно малой, допускается реализация схемы без дополнительного кодирования, как, например, для повторителей на основе одиночных ионных кубитов [25].

Физические ресурсы, затрачиваемые в повторителе второго поколения, зависят от размера n используемого кодового блока. Для каждого повторителя требуется число кубитов, равное удвоенному размеру блока, для хранения закодированных состояний, а общее число кубитов, сохраняемых в памяти, масштабируется как $N_{\text{qm}} \sim n \frac{L}{L_0}$. При этом размер кодового блока растет полилогарифмически с расстоянием, что позволяет при достижении достаточной точности локальных вентилях и малых операционных ошибок добиться более высокой скорости передачи данных по сравнению с первым поколением.

Применение мультиплексирования (наличие нескольких передатчиков и приемников на узле) может повысить вероятность успешного установления запутанности между соседними узлами, что способствует сокращению общего времени генерации

запутанности [6; 26]. Однако использование двусторонней классической связи для подтверждения успешного выполнения процедур остается ограничивающим фактором по скорости, что стимулирует дальнейшее развитие схем перехода к односторонней передаче сигналов, характерной для третьего поколения.

Третье поколение квантовых повторителей

Третье поколение¹⁵ полностью полагается на детерминированный подход, исправляя как ошибки потерь, так и ошибки операций посредством квантового исправления ошибок и одностороннего протокола хеширования. Квантовая информация сначала кодируется в блок физических кубитов, которые передаются через квантовый канал. На этапе детектирования, если уровень ошибок остается ниже допустимого порога, применяется квантовый код для восстановления исходного логического кубита, после чего блок повторно передается следующему узлу повторителя.

Отсутствие двусторонней классической связи (требуется лишь односторонняя передача сигналов для очищения запутанности) сокращает временные задержки и позволяет достигать скоростей генерации запутанности, ограниченных только временем локальных операций.

Квантовые коды исправления ошибок для третьего поколения включают коды четности¹⁶, поверхностные коды [27], коды с использованием многоуровневых систем [28]; биномиальные коды или GKP коды^{17,18}. При этом общее число квантовых ячеек определяется размером кодового блока и масштабируется аналогично второму поколению. Однако протоколы требуют плотного расположения узлов (и меньших L_0), поскольку исправление ошибок эффективно вплоть до потерь 3 дБ.

Совместное развитие квантовых повторителей различных поколений

Для количественной оценки эффективности квантовых повторителей вводится функция затрат, учитывающая как временные, так и физические ресурсы. Временной ресурс определяется задержками двусторонней классической связи (характерной для первого и второго поколений) и временем локальных операций (доминирующим для второго и третьего

13 Shchukin, E. Waiting time in quantum repeaters with probabilistic entanglement swapping / E. Shchukin, F. Schmidt, P. van Loock // Physical Review A. – 2019. – Vol. 100. – № 3. – P. 032322. DOI: 10.1103/PhysRevA.100.032322.

14 Mazurek, P. Long-distance quantum communication over noisy networks without long-time quantum memory / P. Mazurek, A. Grudka, M. Horodecki et al. // Physical Review A. – 2014. – Vol. 90. – № 6. – P. 062311. DOI: 10.1103/PhysRevA.90.062311.

15 Muralidharan, S. Ultrafast and Fault-Tolerant Quantum Communication across Long Distances / S. Muralidharan, J. Kim, N. Lütkenhaus et al. // Physical Review Letters. – 2014. – Vol. 112. – № 25. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.250501.

16 Ralph, T. C. Loss-Tolerant Optical Qubits / T. C. Ralph, A. J. F. Hayes, A. Gilchrist // Physical Review Letters. – 2005. – Vol. 95. – № 10. – P. 100501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.100501.

17 Albert, V. V. Performance and structure of single-mode bosonic codes / V. V. Albert, K. Noh, K. Duivenvoorden et al. // Physical Review A. – 2018. – Vol. 97. – № 3. – P. 032346. DOI: 10.1103/PhysRevA.97.032346.

18 Noh, K. Quantum Capacity Bounds of Gaussian Thermal Loss Channels and Achievable Rates With Gottesman-Kitaev-Preskill Codes / K. Noh, V. V. Albert, L. Jiang // IEEE Transactions on Information Theory. – 2019. – Vol. 65. – № 4. – P. 2563–2582. DOI: 10.1109/TIT.2018.2873764.

поколений). Физические затраты отражаются в общем числе ячеек памяти, необходимых для реализации объявленной запутанности или квантовых кодов исправления ошибок. При этом функция затрат определяется как [4; 29]:

$$C(L) = \frac{N_{qm}}{r} = \frac{N}{r} \times \frac{L}{L_0}, \quad (2)$$

где r — скорость генерации потенциального ключа в бит/с; N — число кубитов, необходимое для каждой установки квантового повторителя.

Анализ показывает, что при высоких ошибках операций, доминируют схемы первого поколения. При промежуточных значениях ошибок и относительно высоких потерях на оборудовании повторители второго поколения оказываются более выгодными, а при низких потерях на оборудовании, малых ошибках в работе вентилях и высокой скорости локальных операций оптимальным является третье поколение. Таким образом, параллельно прорабатываются решения для всех трех поколений. Многообещающим подходом является использование гибридных схем, сочетающих различные типы квантовых повторителей [30] для соответствующих диапазонов длин каналов.

Существует ряд обзоров, посвященных различным аспектам квантовых повторителей [4; 26; 31; 32]. Например, обзор¹⁹ посвящен протоколу DLCZ и его улучшениям. Классификация протоколов по трем поколениям более подробно рассматриваются²⁰ в [4]. В более позднем обзоре [4] также обсуждаются недавно появившиеся повторители без памяти [33] и полностью фотонные повторители [34]. Суть последних заключается в том, что они реализуются исключительно на фотонных ресурсах. При этом ожидается возможность совместной интеграции повторителей без памяти и с памятью [34]. В работе [4]

особое внимание все более важной роли квантовых повторителей для развития квантового интернета [32; 35–37].

Выводы

В данной работе были рассмотрены ключевые аспекты квантовых коммуникаций при помощи квантовых повторителей, что позволило:

- обосновать преимущества и недостатки использования вероятностных и детерминированных схем в контексте оптимизации скорости и эффективности распределения запутанности;
- определить применимость различных поколений повторителей, что имеет прямое значение для развития масштабируемых квантовых сетей.

Рассмотренные подходы позволяют повысить эффективность передачи квантовой информации, расширяя допустимые расстояния вплоть до тысяч километров. Это имеет важное значение в таких научных областях, как КРК, квантовая метрология и распределенные квантовые вычисления, где устойчивость и скорость обмена квантовой информацией являются ключевыми факторами.

Отдельное внимание в обзоре уделено современным экспериментальным результатам и интеграции протоколов квантовых повторителей в существующие городские квантовые сети. Ряд исследований продемонстрировал, что предложенные схемы подтверждают свою практическую применимость. Следует также отметить, что внедрение квантовых повторителей в критическую инфраструктуру связи потребует не только решения технических задач подавления ошибок и масштабирования, но и обеспечения кибербезопасности всего программного стека, управляющего этими системами, что является предметом отдельного исследования [38].

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00484).

Литература

1. Pirandola, S. Advances in quantum cryptography / S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi et al. // *Advances in Optics and Photonics*. – 2020. – Vol. 12. – № 4. – P. 1012. DOI: 10.1364/AOP.361502.
2. Аверьянов, В. С. О первичных технических устройствах и требованиях к ключам безопасности квантовых систем / В. С. Аверьянов, И. Н. Карцан // *Вопросы кибербезопасности*. – 2023. – № 2(54). – С. 65–72. DOI: 10.21681/2311-3456-2023-2-65-72.
3. Петренко, С. А. Модель квантовых угроз безопасности информации для национальных блокчейн-экосистем и платформ / С. А. Петренко, А. А. Балябин // *Вопросы кибербезопасности*. – 2025. – № 1(65). – С. 7–17. DOI: 10.21681/2311-3456-2025-1-7-17.
4. Azuma, K. Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet / K. Azuma, S.E. Economou, D. Elkouss et al. // *Reviews of Modern Physics*. – 2023. – Vol. 95. – № 4. – P. 045006. DOI: 10.1103/RevModPhys.95.045006.
5. Wallnöfer, J. Faithfully Simulating Near-Term Quantum Repeaters / J. Wallnöfer, F. Hahn, F. Wiesner et al. // *PRX Quantum*. – 2024. – Vol. 5. – № 1. – P. 010351. DOI: 10.1103/PRXQuantum.5.010351.
- 19 Sangouard, N. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics / N. Sangouard, C. Simon, H. De Riedmatten, N. Gisin // *Reviews of Modern Physics*. – 2011. – Vol. 83. – № 1. – P. 33–80. DOI: 10.1103/RevModPhys.83.33.
- 20 Muralidharan, S. Optimal architectures for long distance quantum communication / S. Muralidharan, L. Li, J. Kim et al. // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – № 1. – P. 20463. DOI: 10.1038/srep20463.

6. Chakraborty, T. Towards a spectrally multiplexed quantum repeater / T. Chakraborty, A. Das, H. van Brug et al. // npj Quantum Information. – 2025. – Vol. 11. – № 1. – P. 3. DOI: 10.1038/s41534-024-00946-2.
7. Avis, G. Analysis of multipartite entanglement distribution using a central quantum-network node / G. Avis, F. Rozpędek, S. Wehner // Phys. Rev. A. – 2023. – Vol. 107. – № 1. – P. 12609. DOI: 10.1103/PhysRevA.107.012609.
8. Krutyanskiy, V. Telecom-Wavelength Quantum Repeater Node Based on a Trapped-Ion Processor / V. Krutyanskiy, M. Canteri, M. Meraner et al. // Physical Review Letters. – 2023. – Vol. 130. – № 21. – P. 213601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.213601.
9. Kucera, S. Demonstration of quantum network protocols over a 14-km urban fiber link / S. Kucera, C. Haen, E. Arenskötter et al. // npj Quantum Information. – 2024. – Vol. 10. – № 1. – P. 88. DOI: 10.1038/s41534-024-00886-x.
10. Liu, J.-L. Creation of memory-memory entanglement in a metropolitan quantum network / J.-L. Liu, X.-Y. Luo, Y. Yu et al. // Nature. – 2024. – Vol. 629. – № 8012. – P. 579–585. DOI: 10.1038/s41586-024-07308-0.
11. Knaut, C. M. Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network / C. M. Knaut, A. Suleymanzade, Y. C. Wei et al. // Nature. – 2024. – Vol. 629. – № 8012. – P. 573–578. DOI: 10.1038/s41586-024-07252-z.
12. Goncharov, R. Performance of Quantum Repeaters Using Multimode Schrödinger Cat States / R. Goncharov, A. D. Kiselev, V. Egorov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Vol. 88. – № 6. – P. 901–908. DOI: 10.1134/S1062873824706809.
13. Goncharov, R. Quantum repeaters and teleportation via entangled phase-modulated multimode coherent states / R. Goncharov, A. D. Kiselev, E. S. Moiseev et al. // Physical Review Applied. – 2023. – Vol. 20. – № 4. – P. 044030. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.044030.
14. Davidson, J. H. Improved light-matter interaction for storage of quantum states of light in a thulium-doped crystal cavity / J. H. Davidson, P. Lefebvre, J. Zhang et al. // Physical Review A. – 2020. – Vol. 101. – № 4. – P. 042333. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.042333.
15. Moiseev, E. S. Broadband quantum memory in a cavity via zero spectral dispersion / E. S. Moiseev, A. Tashchilina, S. A. Moiseev, B. C. Sanders // New Journal of Physics. – 2021. – Vol. 23. – № 6. – P. 063071. DOI: 10.1088/1367-2630/ac0754.
16. Lago-Rivera, D. Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories / D. Lago-Rivera, S. Grandi, J. V. Rakonjac et al. // Nature. – 2021. – Vol. 594. – № 7861. – P. 37–40. DOI: 10.1038/s41586-021-03481-8.
17. Askarani, M. F. Long-Lived Solid-State Optical Memory for High-Rate Quantum Repeaters / M. F. Askarani, A. Das, J. H. Davidson et al. // Physical Review Letters. – 2021. – Vol. 127. – № 22. – P. 220502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.220502.
18. Wang, P.-C. Proposal and proof-of-principle demonstration of fast-switching broadband frequency shifting for a frequency-multiplexed quantum repeater / P.-C. Wang, O. Pietx-Casas, M. Falamarzi Askarani, G. C. do Amaral // Journal of the Optical Society of America B. – 2021. – Vol. 38. – № 4. – P. 1140. DOI: 10.1364/JOSAB.412517.
19. Bustard, P. J. Toward a Quantum Memory in a Fiber Cavity Controlled by Intracavity Frequency Translation / P. J. Bustard, K. Bonsma-Fisher, C. Hnatovsky et al. // Physical Review Letters. – 2022. – Vol. 128. – № 12. – P. 120501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.120501.
20. Businger, M. Non-classical correlations over 1250 modes between telecom photons and 979-nm photons stored in $^{171}\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ / M. Businger, L. Nicolas, T. S. Mejia et al. // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13. – № 1. – P. 6438. DOI: 10.1038/s41467-022-33929-y.
21. Senkalla, K. Germanium Vacancy in Diamond Quantum Memory Exceeding 20 ms / K. Senkalla, G. Genov, M. H. Metsch et al. // Physical Review Letters. – 2024. – Vol. 132. – № 2. – P. 026901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.026901.
22. Moiseev, S. A. Optical Quantum Memory on Macroscopic Coherence / S. A. Moiseev, K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, E. S. Moiseev // Physical Review Letters. – 2025. – Vol. 134. – № 7. – P. 070803. DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.070803.
23. Моисеев, С. А. Оптическая квантовая память на атомных ансамблях: физические принципы, эксперименты и возможности применения в квантовом повторителе / С. А. Моисеев, М. М. Миннегалиев, К. И. Герасимов и др. // Успехи физических наук. – 2025. – Т. 195. – № 5. – С. 455–477. DOI: 10.3367/UFNr.2024.06.039694.
24. Brand, S. Efficient Computation of the Waiting Time and Fidelity in Quantum Repeater Chains / S. Brand, T. Coopmans, D. Elkouss // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2020. – Vol. 38. – № 3. – P. 619–639. DOI: 10.1109/JSAC.2020.2969037.
25. Asadi, F. K. Protocols for long-distance quantum communication with single 167 Er ions / F. K. Asadi, S. C. Wein, C. Simon // Quantum Science and Technology. – 2020. – Vol. 5. – № 4. – P. 045015. DOI: 10.1088/2058-9565/abae7c.
26. Yan, P.-S. A survey on advances of quantum repeater / P.-S. Yan, L. Zhou, W. Zhong, Y.-B. Sheng // EPL (Europhysics Letters). – 2021. – Vol. 136. – № 1. – P. 14001. DOI: 10.1209/0295-5075/ac37d0.
27. Hu, T. Quantum Network Routing Based on Surface Code Error Correction / T. Hu, J. Wu, Q. Li // 2024 IEEE 44th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). – IEEE, 2024. – P. 1236–1247.
28. Schmidt, F. Error-corrected quantum repeaters with Gottesman-Kitaev-Preskill qudits / F. Schmidt, D. Miller, P. van Loock // Physical Review A. – 2024. – Vol. 109. – № 4. – P. 042427. DOI: 10.1103/PhysRevA.109.042427.
29. Azuma, K. Networking quantum networks with minimum cost aggregation / K. Azuma // npj Quantum Information. – 2025. – Vol. 11. – № 1. – P. 51. DOI: 10.1038/s41534-025-01000-5.
30. Djordjevic, I. B. Hybrid CV-DV Quantum Communications and Quantum Networks / I. B. Djordjevic // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 23284–23292. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3154468.
31. Сукачёв, Д. Д. Протяжённые квантовые сети / Д. Д. Сукачёв // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191. – № 10. – С. 1077–1094. DOI: 10.3367/UFNe.2020.11.038888.
32. Azuma, K. Tools for quantum network design / K. Azuma, S. Bäuml, T. Coopmans et al. // AVS Quantum Science. – 2021. – Vol. 3. – № 1. – P. 14101. DOI: 10.1116/5.0024062.
33. Li, P.-Z. Memoryless Quantum Repeaters Based on Cavity-QED and Coherent States / P.-Z. Li, P. van Loock // Advanced Quantum Technologies. – 2023. – Vol. 6. – № 8. – P. 2200151. DOI: 10.1002/qute.202200151.
34. Benchasattabuse, N. Engineering Challenges in All-Photonic Quantum Repeaters / N. Benchasattabuse, M. Hajdušek, R. Van Meter // IEEE Network. – 2025. – Vol. 39. – № 1. – P. 132–139. DOI: 10.1109/MNET.2024.3411802.
35. Wei, S. Towards Real-World Quantum Networks: A Review / S. Wei, B. Jing, X. Zhang et al. // Laser & Photonics Reviews. – 2022. – Vol. 16. – № 3. – P. 2100219. DOI: 10.1002/lpor.202100219.
36. Li, Y. A Survey of Quantum Internet Protocols From a Layered Perspective / Y. Li, H. Zhang, C. Zhang et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Vol. PP. – P. 1–1. DOI: 10.1109/COMST.2024.3361662.

37. Singh, A. Quantum Internet—Applications, Functionalities, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions / A. Singh, K. Dev, H. Siljak et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23. – № 4. – P. 2218-2247. DOI: 10.1109/COMST.2021.3109944.
38. Марков, А. С. Важная веха в безопасности открытого программного обеспечения / А. С. Марков // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 1(53). – С. 2–12. DOI: 10.21681/2311-3456-2023-1-2-12.

RESEARCH OF APPROACHES TO THE IMPLEMENTATION OF A QUANTUM REPEATER

Goncharov R.²¹, Kiselev A. D.²², Egorov V.²³

Keywords: quantum network, entanglement, elementary link, classification.

Purpose of the study: systematization and critical analysis of existing approaches to error suppression in quantum repeaters, as well as to assess their advantages and limitations for the implementation of scalable quantum networks and the quantum internet.

Methods of research: the paper provides a detailed analysis of modern literature, including a comparison of various quantum repeater schemes, as well as an assessment of resource costs and performance.

Result(s): quantum repeaters can be divided into three generations, each of which demonstrates optimal efficiency under certain conditions. The first generation, implementing probabilistic error suppression by generating heralded entanglement and two-way entanglement distillation, is easy to implement and provides the basic functionality of a quantum network, but requires significant time due to the need to exchange classical signals and long-term storage of quantum states. The second generation combines probabilistic entanglement generation with deterministic operation error suppression using quantum error correction, which reduces the requirements for long-term quantum memory, although the exchange of classical signals between neighboring nodes remains mandatory. The third generation relies entirely on deterministic error suppression using one-way classical communication, which allows for a significant reduction in time delays and high entanglement generation rates, despite the need for a denser arrangement of repeaters and high-quality local gates. In addition, the review covers new areas such as memoryless repeaters and all-photonic repeaters. The conducted comparative analysis of resource costs demonstrates that optimization of repeater operating parameters is a key factor for the implementation of scalable quantum networks, which is of direct importance for quantum key distribution, quantum metrology, and distributed quantum computing.

Scientific novelty: the scientific novelty lies in the integration of disparate approaches to the implementation of quantum repeaters into a single holistic representation, which allows for an objective assessment of their efficiency by key parameters. The review highlights the potential for new classes of repeaters, such as memoryless repeaters and all-photonic circuits, to become important elements in the development of a quantum internet.

References

1. Pirandola, S. Advances in quantum cryptography / S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi et al. // Advances in Optics and Photonics. – 2020. – Vol. 12. – № 4. – P. 1012. DOI: 10.1364/AOP.361502.
2. Aver'janov, V. S. O pervichnyh tehnikeskikh ustroystvakh i trebovaniyakh k klucham bezopasnosti kvantovykh sistem / V. S. Aver'janov, I. N. Karcan // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2023. – № 2(54). – С. 65–72. DOI: 10.21681/2311-3456-2023-2-65-72.
3. Petrenko, S. A. Model' kvantovykh ugroz bezopasnosti informacii dlja nacional'nykh blokchejn-jekosistem i platform / S. A. Petrenko, A. A. Baljabin // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2025. – № 1(65). – С. 7–17. DOI: 10.21681/2311-3456-2025-1-7-17.
4. Azuma, K. Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet / K. Azuma, S. E. Economou, D. Elkouss et al. // Reviews of Modern Physics. – 2023. – Vol. 95. – № 4. – P. 045006. DOI: 10.1103/RevModPhys.95.045006.
5. Wallnöfer, J. Faithfully Simulating Near-Term Quantum Repeaters / J. Wallnöfer, F. Hahn, F. Wiesner et al. // PRX Quantum. – 2024. – Vol. 5. – № 1. – P. 010351. DOI: 10.1103/PRXQuantum.5.010351.
6. Chakraborty, T. Towards a spectrally multiplexed quantum repeater / T. Chakraborty, A. Das, H. van Brug et al. // npj Quantum Information. – 2025. – Vol. 11. – № 1. – P. 3. DOI: 10.1038/s41534-024-00946-2.
7. Avis, G. Analysis of multipartite entanglement distribution using a central quantum-network node / G. Avis, F. Rozpędek, S. Wehner // Phys. Rev. A. – 2023. – Vol. 107. – № 1. – P. 12609. DOI: 10.1103/PhysRevA.107.012609.
8. Krutyanskiy, V. Telecom-Wavelength Quantum Repeater Node Based on a Trapped-Ion Processor / V. Krutyanskiy, M. Canteri, M. Meraner et al. // Physical Review Letters. – 2023. – Vol. 130. – № 21. – P. 213601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.213601.
9. Kucera, S. Demonstration of quantum network protocols over a 14-km urban fiber link / S. Kucera, C. Haen, E. Arenskötter et al. // npj Quantum Information. – 2024. – Vol. 10. – № 1. – P. 88. DOI: 10.1038/s41534-024-00886-x.
21. Roman Goncharov, junior research fellow, Laboratory for quantum communications, ITMO University, Saint Petersburg. E-mail: rkgoncharov@itmo.ru
22. Aleksei D. Kiselev, Dr.Sc., Associate Professor, Research and Educational Center for Photonics and Optical IT, ITMO University, Saint Petersburg. E-mail: alexei.d.kiselev@gmail.com
23. Vladimir Egorov, Ph.D., Associate Professor, Research and Educational Center for Photonics and Optical IT, ITMO University, Saint Petersburg. E-mail: viegorov@itmo.ru

10. Liu, J.-L. Creation of memory-memory entanglement in a metropolitan quantum network / J.-L. Liu, X.-Y. Luo, Y. Yu et al. // *Nature*. – 2024. – Vol. 629. – № 8012. – P. 579–585. DOI: 10.1038/s41586-024-07308-0.
11. Knaut, C. M. Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network / C. M. Knaut, A. Suleymanzade, Y. C. Wei et al. // *Nature*. – 2024. – Vol. 629. – № 8012. – P. 573–578. DOI: 10.1038/s41586-024-07252-z.
12. Goncharov, R. Performance of Quantum Repeaters Using Multimode Schrödinger Cat States / R. Goncharov, A. D. Kiselev, V. Egorov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2024. – Vol. 88. – № 6. – P. 901–908. DOI: 10.1134/S1062873824706809.
13. Goncharov, R. Quantum repeaters and teleportation via entangled phase-modulated multimode coherent states / R. Goncharov, A. D. Kiselev, E. S. Moiseev et al. // *Physical Review Applied*. – 2023. – Vol. 20. – № 4. – P. 044030. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.044030.
14. Davidson, J. H. Improved light-matter interaction for storage of quantum states of light in a thulium-doped crystal cavity / J. H. Davidson, P. Lefebvre, J. Zhang et al. // *Physical Review A*. – 2020. – Vol. 101. – № 4. – P. 042333. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.042333.
15. Moiseev, E. S. Broadband quantum memory in a cavity via zero spectral dispersion / E. S. Moiseev, A. Tashchilina, S. A. Moiseev, B. C. Sanders // *New Journal of Physics*. – 2021. – Vol. 23. – № 6. – P. 063071. DOI: 10.1088/1367-2630/ac0754.
16. Lago-Rivera, D. Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories / D. Lago-Rivera, S. Grandi, J. V. Rakonjac et al. // *Nature*. – 2021. – Vol. 594. – № 7861. – P. 37–40. DOI: 10.1038/s41586-021-03481-8.
17. Askarani, M. F. Long-Lived Solid-State Optical Memory for High-Rate Quantum Repeaters / M. F. Askarani, A. Das, J. H. Davidson et al. // *Physical Review Letters*. – 2021. – Vol. 127. – № 22. – P. 220502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.220502.
18. Wang, P.-C. Proposal and proof-of-principle demonstration of fast-switching broadband frequency shifting for a frequency-multiplexed quantum repeater / P.-C. Wang, O. Pietx-Casas, M. Falamarzi Askarani, G. C. do Amaral // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2021. – Vol. 38. – № 4. – P. 1140. DOI: 10.1364/JOSAB.412517.
19. Bustard, P. J. Toward a Quantum Memory in a Fiber Cavity Controlled by Intracavity Frequency Translation / P. J. Bustard, K. Bonsma-Fisher, C. Hnatovsky et al. // *Physical Review Letters*. – 2022. – Vol. 128. – № 12. – P. 120501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.120501.
20. Businger, M. Non-classical correlations over 1250 modes between telecom photons and 979-nm photons stored in $^{471}\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ / M. Businger, L. Nicolas, T. S. Mejia et al. // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13. – № 1. – P. 6438. DOI: 10.1038/s41467-022-33929-y.
21. Senkalla, K. Germanium Vacancy in Diamond Quantum Memory Exceeding 20 ms / K. Senkalla, G. Genov, M. H. Metsch et al. // *Physical Review Letters*. – 2024. – Vol. 132. – № 2. – P. 026901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.026901.
22. Moiseev, S. A. Optical Quantum Memory on Macroscopic Coherence / S. A. Moiseev, K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, E. S. Moiseev // *Physical Review Letters*. – 2025. – Vol. 134. – № 7. – P. 070803. DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.070803.
23. Moiseev, S. A. Opticheskaja kvantovaja pamjat' na atomnyh ansambljah: fizicheskie principy, jeksperimenty i vozmozhnosti primeneniya v kvantovom povtoritele / S. A. Moiseev, M. M. Minnegaliev, K. I. Gerasimov i dr. // *Uspehi fizicheskikh nauk*. – 2025. – T. 195. – № 5. – S. 455–477. DOI: 10.3367/UFNr.2024.06.039694.
24. Brand, S. Efficient Computation of the Waiting Time and Fidelity in Quantum Repeater Chains / S. Brand, T. Coopmans, D. Elkouss // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2020. – Vol. 38. – № 3. – P. 619–639. DOI: 10.1109/JSAC.2020.2969037.
25. Asadi, F. K. Protocols for long-distance quantum communication with single 167 Er ions / F. K. Asadi, S. C. Wein, C. Simon // *Quantum Science and Technology*. – 2020. – Vol. 5. – № 4. – P. 045015. DOI: 10.1088/2058-9565/abae7c.
26. Yan, P.-S. A survey on advances of quantum repeater / P.-S. Yan, L. Zhou, W. Zhong, Y.-B. Sheng // *EPL (Europhysics Letters)*. – 2021. – Vol. 136. – № 1. – P. 14001. DOI: 10.1209/0295-5075/ac37d0.
27. Hu, T. Quantum Network Routing Based on Surface Code Error Correction / T. Hu, J. Wu, Q. Li // 2024 IEEE 44th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). – IEEE, 2024. – P. 1236–1247.
28. Schmidt, F. Error-corrected quantum repeaters with Gottesman-Kitaev-Preskill qudits / F. Schmidt, D. Miller, P. van Loock // *Physical Review A*. – 2024. – Vol. 109. – № 4. – P. 042427. DOI: 10.1103/PhysRevA.109.042427.
29. Azuma, K. Networking quantum networks with minimum cost aggregation / K. Azuma // *npj Quantum Information*. – 2025. – Vol. 11. – № 1. – P. 51. DOI: 10.1038/s41534-025-01000-5.
30. Djordjevic, I. B. Hybrid CV-DV Quantum Communications and Quantum Networks / I. B. Djordjevic // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 23284–23292. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3154468.
31. Sukachjov, D. D. Protjazhjonnye kvantovye seti / D. D. Sukachjov // *Uspehi fizicheskikh nauk*. – 2021. – T. 191. – № 10. – S. 1077–1094. DOI: 10.3367/UFNe.2020.11.038888.
32. Azuma, K. Tools for quantum network design / K. Azuma, S. Bäuml, T. Coopmans et al. // *AVS Quantum Science*. – 2021. – Vol. 3. – № 1. – P. 14101. DOI: 10.1116/5.0024062.
33. Li, P.-Z. Memoryless Quantum Repeaters Based on Cavity-QED and Coherent States / P.-Z. Li, P. van Loock // *Advanced Quantum Technologies*. – 2023. – Vol. 6. – № 8. – P. 2200151. DOI: 10.1002/qute.202200151.
34. Benchasattabuse, N. Engineering Challenges in All-Photonic Quantum Repeaters / N. Benchasattabuse, M. Hajdušek, R. Van Meter // *IEEE Network*. – 2025. – Vol. 39. – № 1. – P. 132–139. DOI: 10.1109/MNET.2024.3411802.
35. Wei, S. Towards Real-World Quantum Networks: A Review / S. Wei, B. Jing, X. Zhang et al. // *Laser & Photonics Reviews*. – 2022. – Vol. 16. – № 3. – P. 2100219. DOI: 10.1002/lpor.202100219.
36. Li, Y. A Survey of Quantum Internet Protocols From a Layered Perspective / Y. Li, H. Zhang, C. Zhang et al. // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2024. – Vol. PP. – P. 1-1. DOI: 10.1109/COMST.2024.3361662.
37. Singh, A. Quantum Internet—Applications, Functionalities, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions / A. Singh, K. Dev, H. Siljak et al. // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2021. – Vol. 23. – № 4. – P. 2218–2247. DOI: 10.1109/COMST.2021.3109944.
38. Markov, A. S. Vazhnaja vеха v bezopasnosti otkrytogo programmnoгo obespechenija / A. S. Markov // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2023. – № 1(53). – S. 2–12. DOI: 10.21681/2311-3456-2023-1-2-12.