



**СМАРТС
КВАНТТЕЛЕКОМ**

**Исследование и перспективы квантовых
коммуникаций с использованием квантового
повторителя на многомодовых когерентных
состояниях**

**Гончаров Роман Константинович,
Научный сотрудник, ООО «СМАРТС-Кванттелеком»
Инженер ЛИЦ НЦКИ, Университет ИТМО**

r.goncharov@quanttelecom.ru

Что такое квантовый повторитель?

Определение

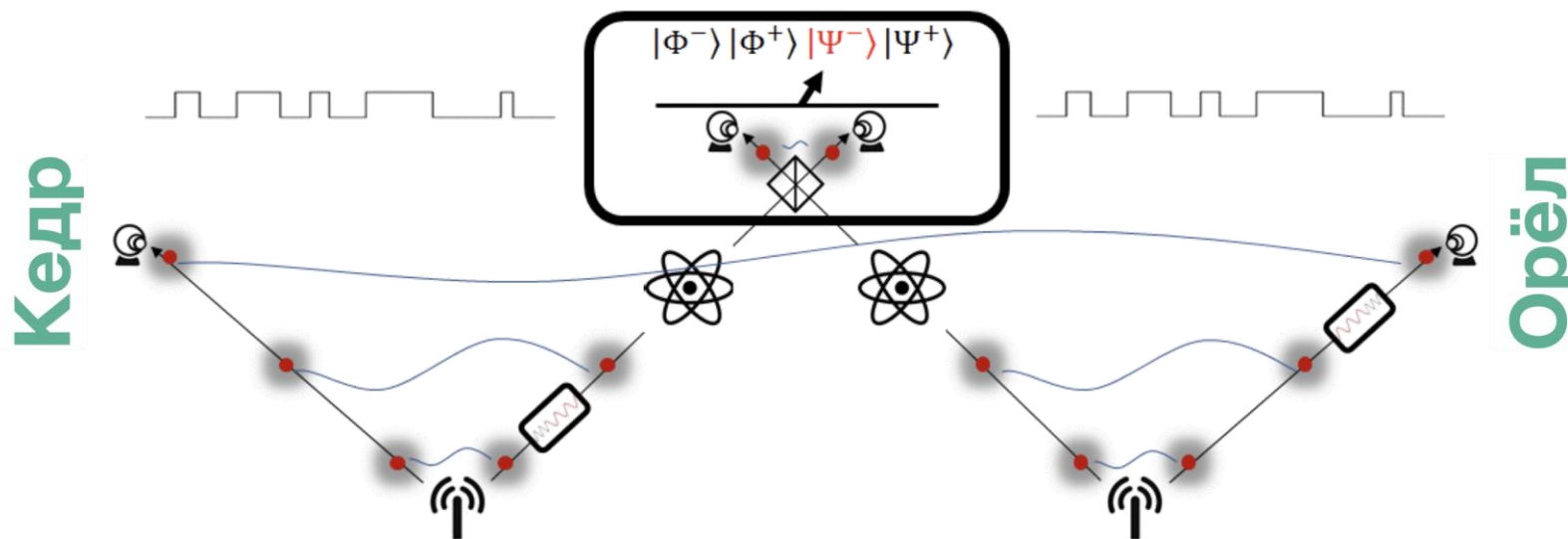


SMARTS
КВАНТТЕЛЕКОМ

2

Квантовый повторитель решает задачу квантовой коммуникации, то есть генерации квантовых состояний, запутанных между удаленными узлами. Концепция квантовых повторителей была предложена как метод преодоления ограничения потерь в системах «точка-точка».

Это позволит распределять квантовую информацию на большие расстояния путём ретрансляции.



Что такое квантовый повторитель?

Поколения



SMARTS
КВАНТТЕЛЕКОМ

3

Поколение	Метод подавления ошибок	Особенности
Первое	Вероятностное подавление ошибок	<ul style="list-style-type: none">- генерация объявленной запутанности;- двусторонняя классическая связь для очищения запутанности;
Второе	Вероятностное подавление ошибок потерь Детерминированное подавление ошибок операций	<ul style="list-style-type: none">- использует нелокальные операции CNOT;- квантовые коды исправления ошибок ;- скорость ограничена задержкой двусторонней классической связи;
Третье	Детерминированное подавление ошибок потерь и операций	<ul style="list-style-type: none">- квантовые коды исправления ошибок;- односторонняя передача сигналов- высокие скорости связи;- сложнее в реализации

Что такое квантовый повторитель?

Поколения



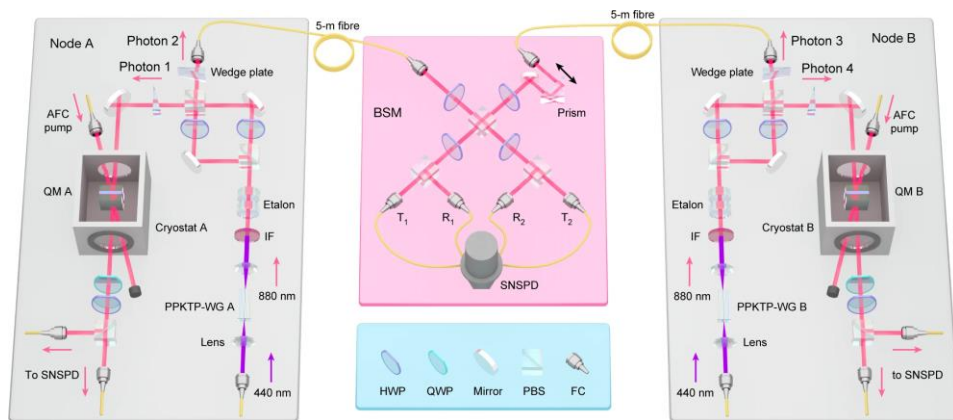
SMARTS
КВАНТТЕЛЕКОМ

4

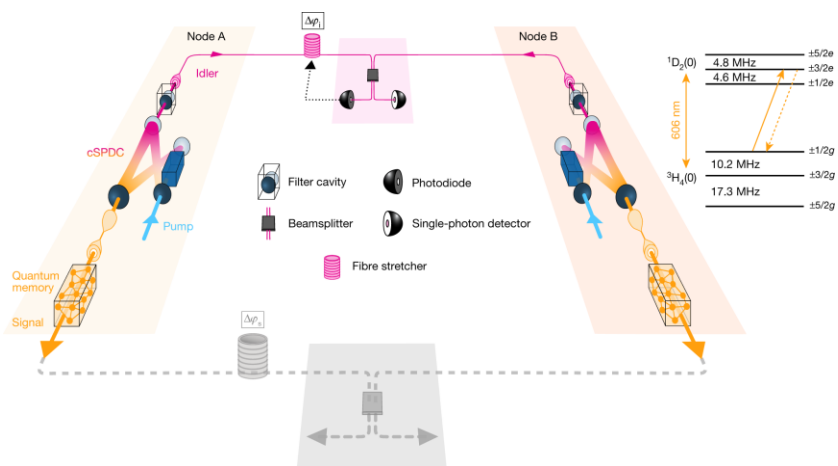
Поколение	Метод подавления ошибок	Особенности
Первое	Вероятностное подавление ошибок	<ul style="list-style-type: none">- генерация объявленной запутанности;- двусторонняя классическая связь для очищения запутанности;
Второе	Вероятностное подавление ошибок потерь Детерминированное подавление ошибок операций	<ul style="list-style-type: none">- использует нелокальные операции CNOT;- квантовые коды исправления ошибок ;- скорость ограничена задержкой двусторонней классической связи;
Третье	Детерминированное подавление ошибок потерь и операций	<ul style="list-style-type: none">- квантовые коды исправления ошибок;- односторонняя передача сигналов- высокие скорости связи;- сложнее в реализации

Что такое квантовый повторитель?

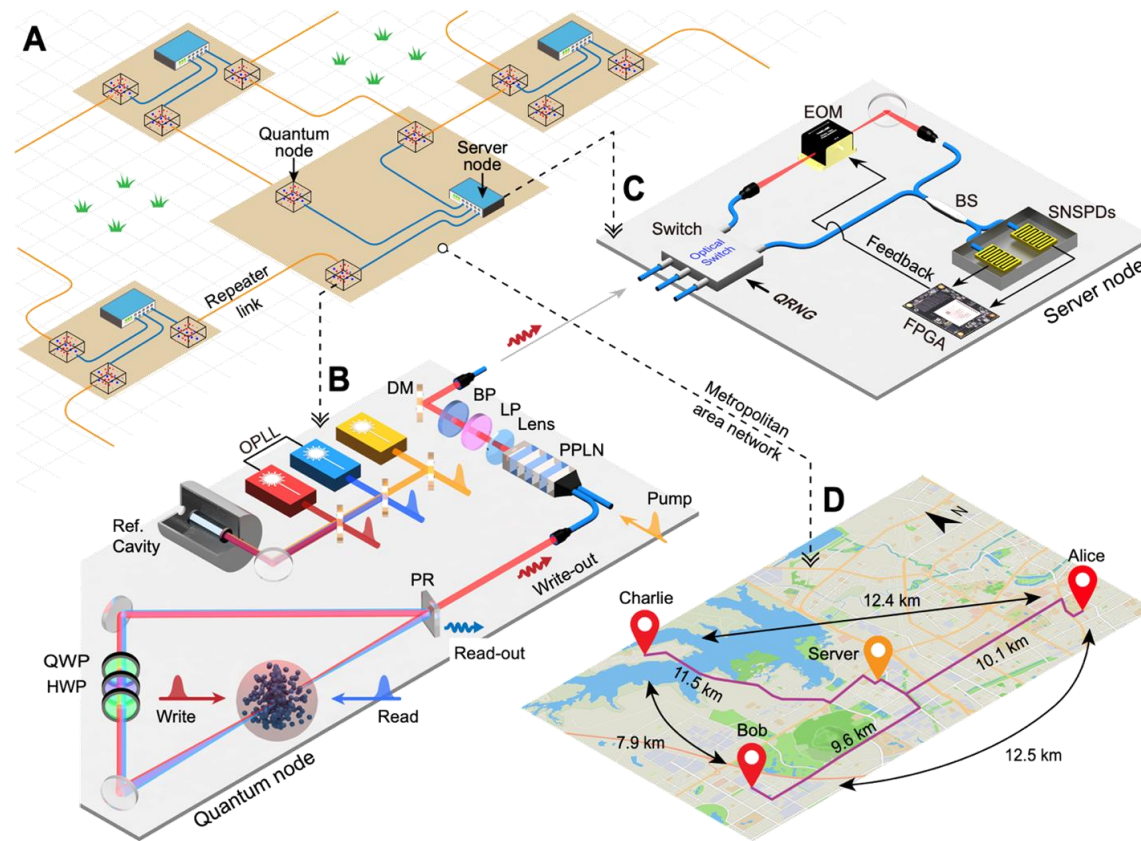
Экспериментальные реализации



Liu X. et al. Heralded entanglement distribution between two absorptive quantum memories // Nature. – 2021. – T. 594. – №. 7861. – C. 41-45.



Lago-Rivera D. et al. Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories // Nature. – 2021. – T. 594. – №. 7861. – C. 37-40.



Liu J. L. et al. A multinode quantum network over a metropolitan area // arXiv preprint arXiv:2309.00221. – 2023.



Входные состояния — суперпозиции когерентных состояний:

$$|S_A\rangle = |\Psi_{\nu'}^{(A)}(\alpha)\rangle, \quad |S_B\rangle = |\Psi_{\nu}^{(B)}(\beta)\rangle, \quad \nu, \nu' \in \{+, -\},$$

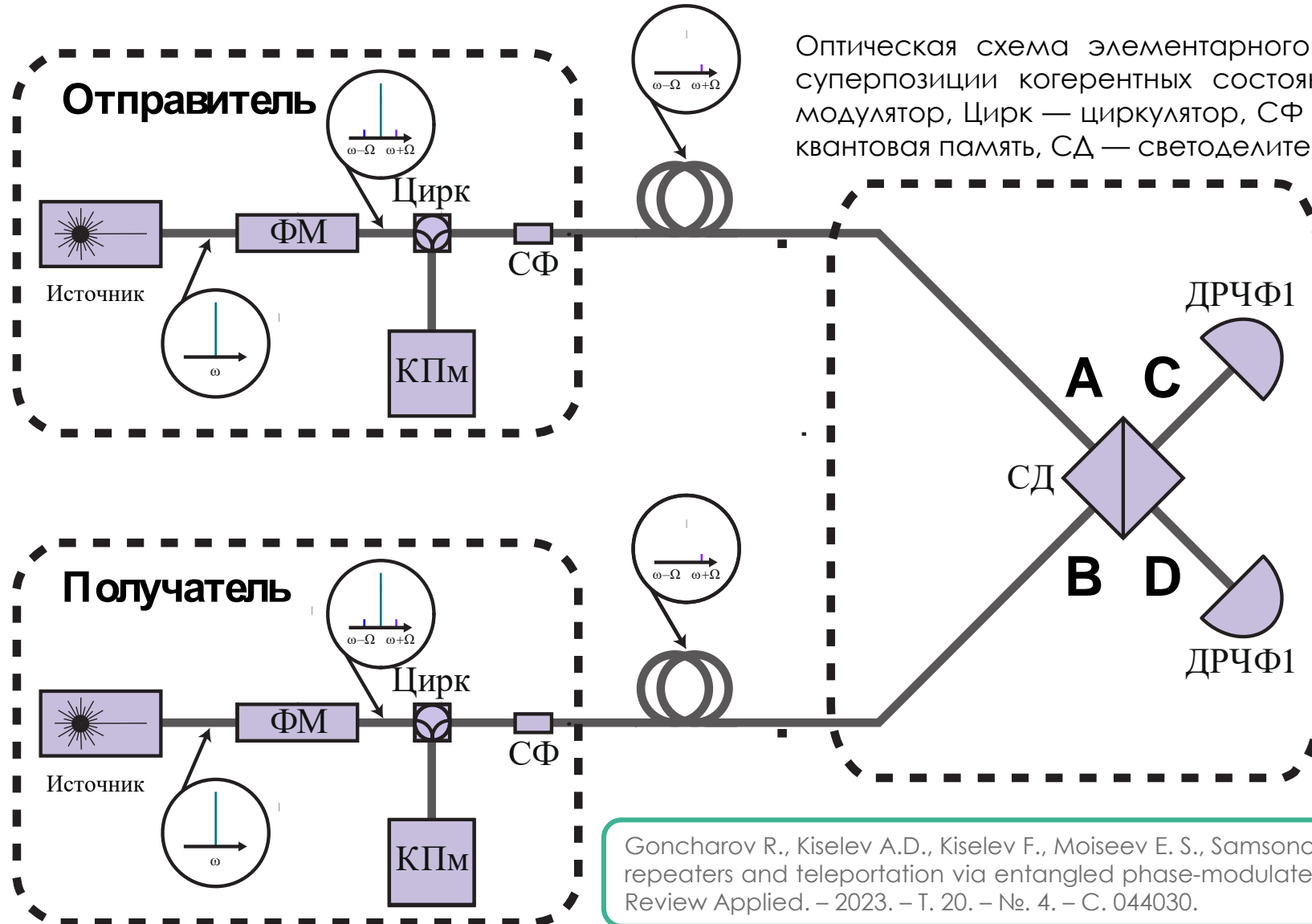
$$|\Psi_{\pm}(\alpha)\rangle = \frac{1}{\sqrt{M_{\pm}(\alpha)}} |\alpha^{(\pm)}\rangle, \quad |\alpha^{(\pm)}\rangle \equiv |\alpha\rangle \pm |-\alpha\rangle, \quad M_{\pm}(\alpha) = \langle \alpha^{(\pm)} | \alpha^{(\pm)} \rangle = 2(1 \pm \exp(-2|\alpha|^2)).$$

Модулированные состояния $|\Psi\rangle_{AB} = |\Psi_{\nu'}^{(A)}(\alpha)\rangle \otimes |\Psi_{\nu}^{(B)}(\beta)\rangle$

$$|S_A\rangle \rightarrow |\Psi_A\rangle = |\Psi_{\nu'}^{(A)}(\alpha)\rangle, \quad |S_B\rangle \rightarrow |\Psi_B\rangle = |\Psi_{\nu}^{(B)}(\beta)\rangle$$

$$|\Psi_{\pm}^{(A)}(\alpha)\rangle = \frac{1}{\sqrt{M_{\pm}(\alpha)}} |\alpha^{(\pm)}\rangle_A, \quad |\Psi_{\pm}^{(B)}(\beta)\rangle = \frac{1}{\sqrt{M_{\pm}(\beta)}} |\beta^{(\pm)}\rangle_B,$$

$$|\alpha^{(\pm)}\rangle_A = |\alpha\rangle_A \pm |-\alpha\rangle_A, \quad |\beta^{(\pm)}\rangle_B = |\beta\rangle_B \pm |-\beta\rangle_B, \quad M_{\pm}(\alpha) = 2(1 \pm \exp(-2|\alpha|^2)), \quad |\alpha|^2 = \sum_{\mu=-S}^S |\alpha_{\mu}|^2.$$



Оптическая схема элементарного звена КПв на БЧ. Источник — суперпозиции когерентных состояний, ФМ — электрооптический модулятор, Цирк — циркулятор, СФ — спектральный фильтр, КПМ — квантовая память, СД — светоделитель, ДРЧФ — детектор

Goncharov R., Kiselev A.D., Kiselev F., Moiseev E. S., Samsonov E., Moiseev S. A., & Egorov V Quantum repeaters and teleportation via entangled phase-modulated multimode coherent states // Physical Review Applied. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 044030.

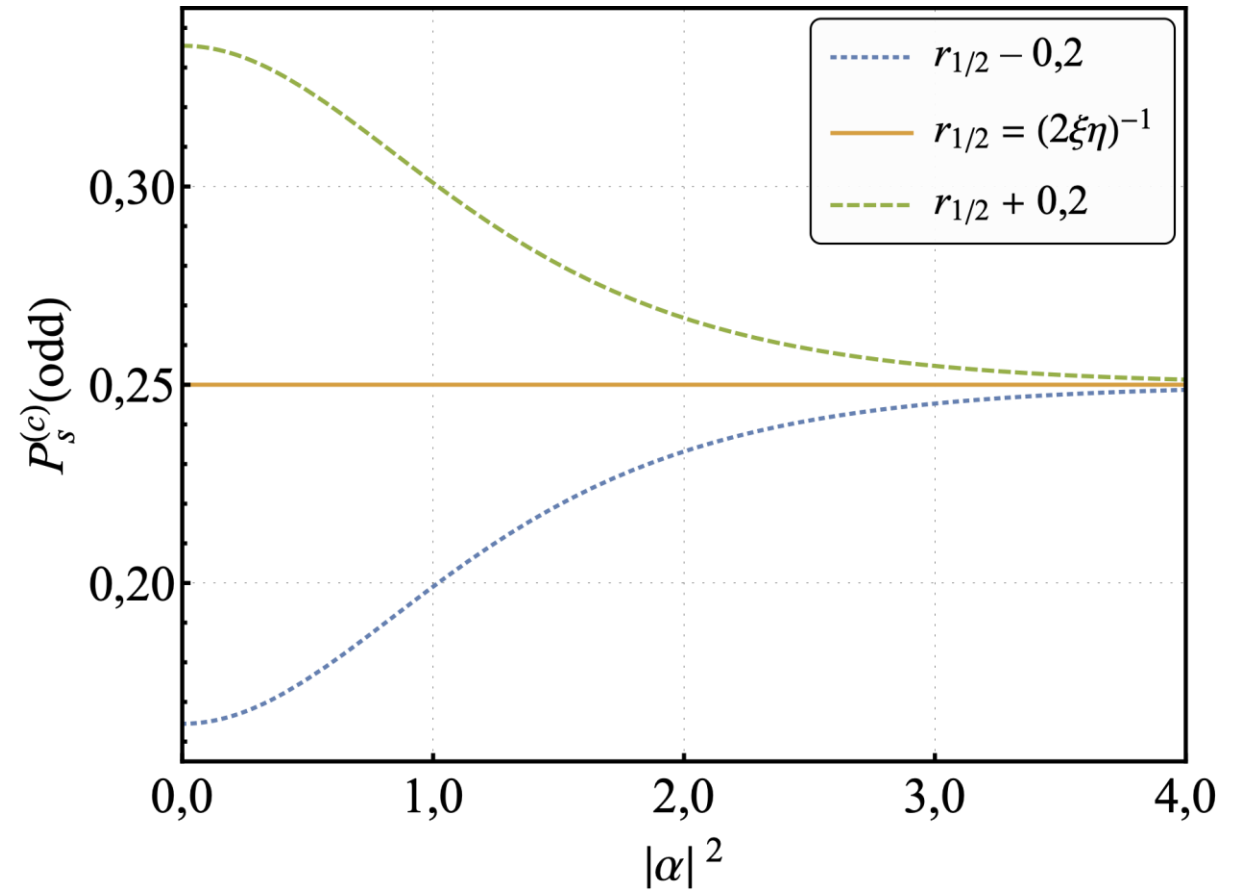
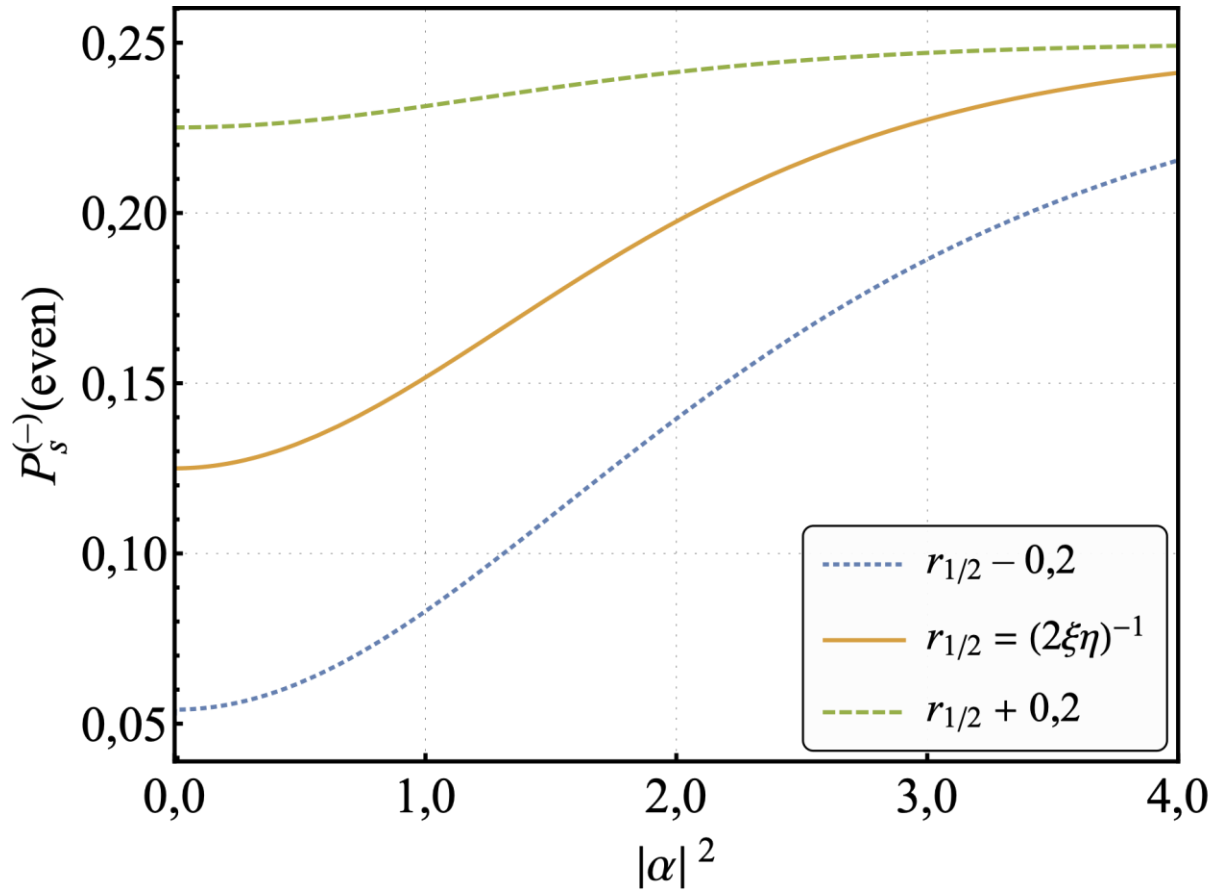
Разработанная схема

Вероятность успеха

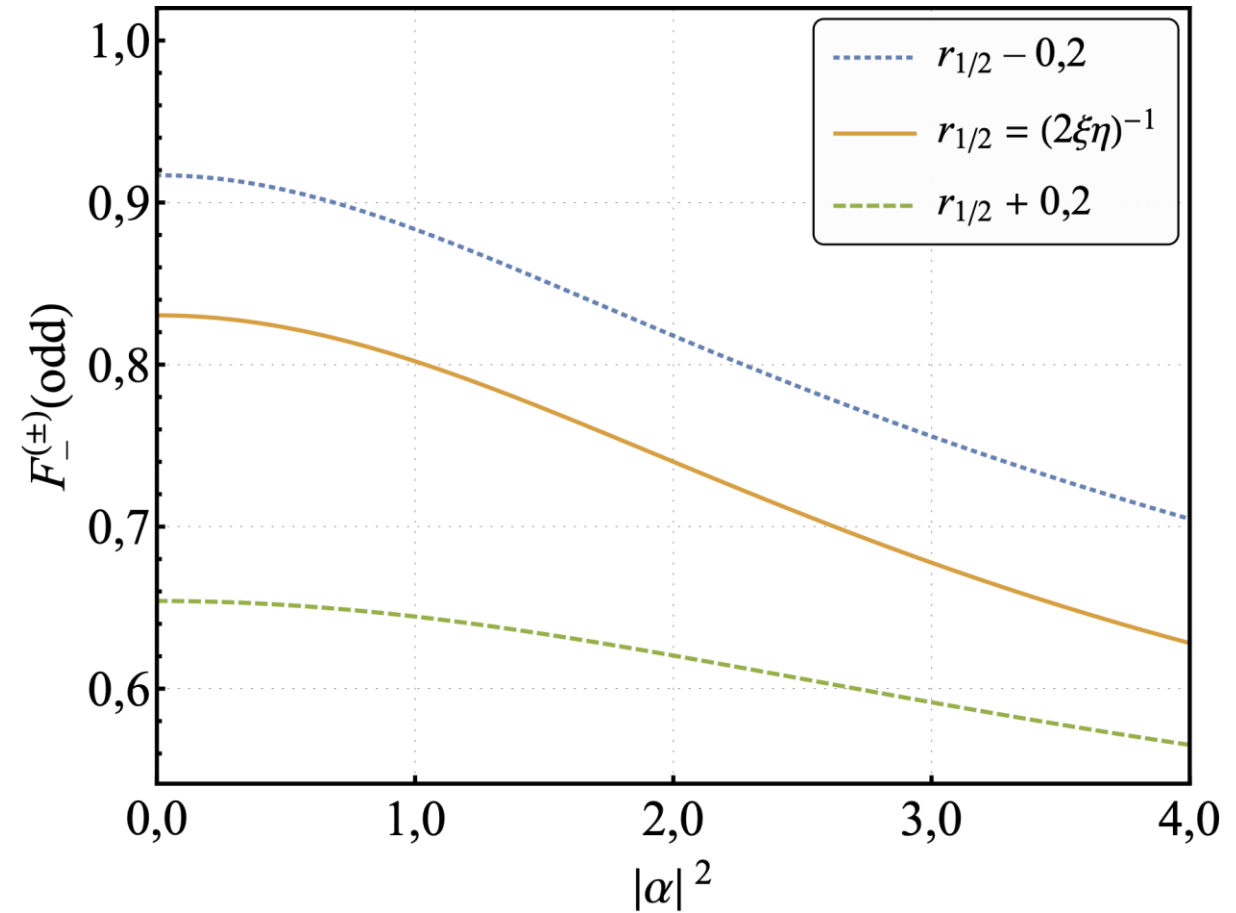
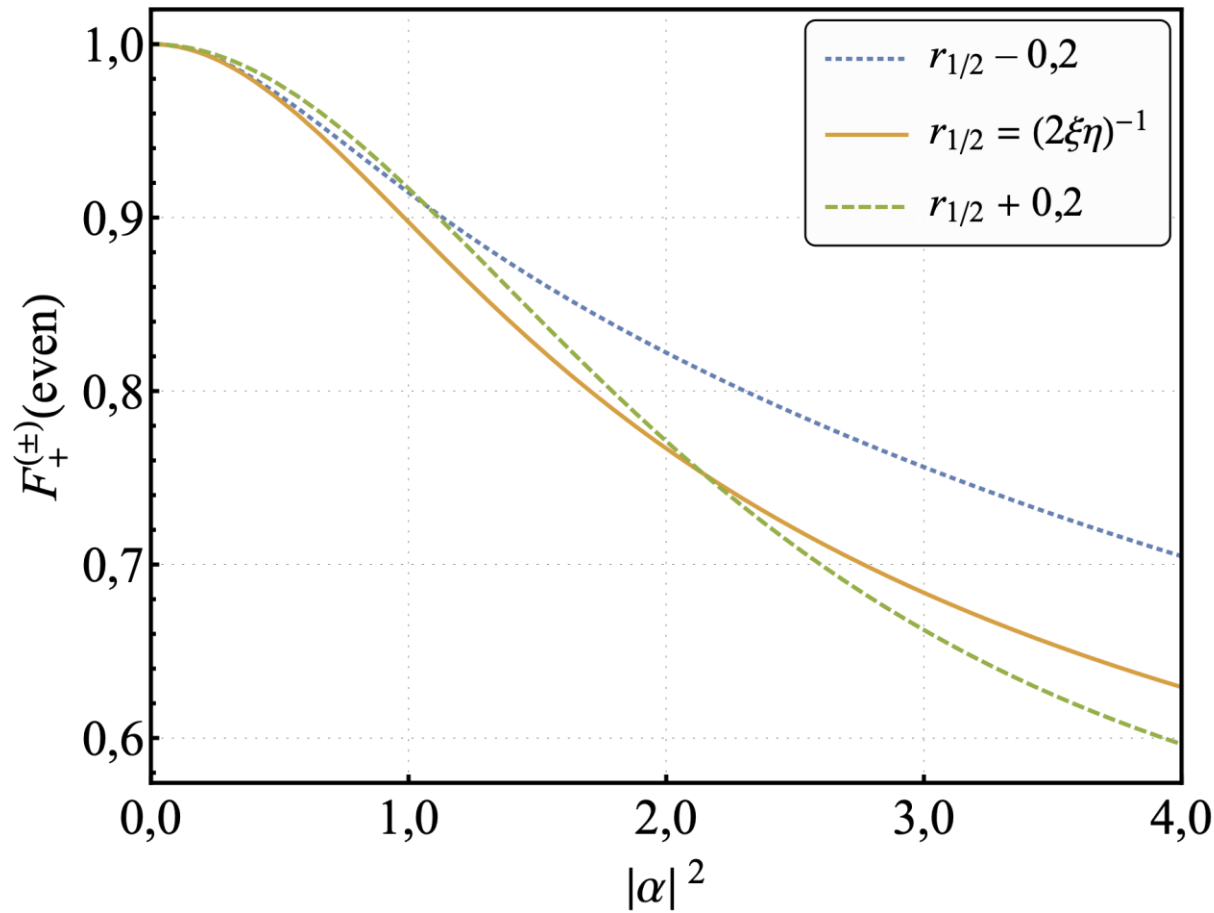


SMARTS
КВАНТТЕЛЕКОМ

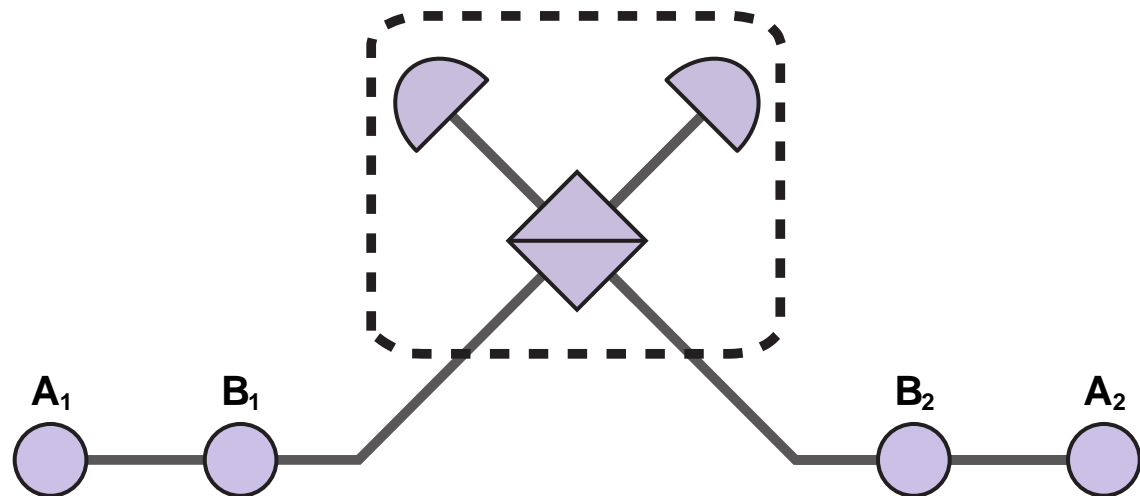
8



Зависимость вероятности успешного детектирования от квадрата модуля амплитуды входного состояния. $r_{1/2}$ — доля сигнала, посланного в канал; ξ — эффективность детектора; η — коэффициент пропускания канала.



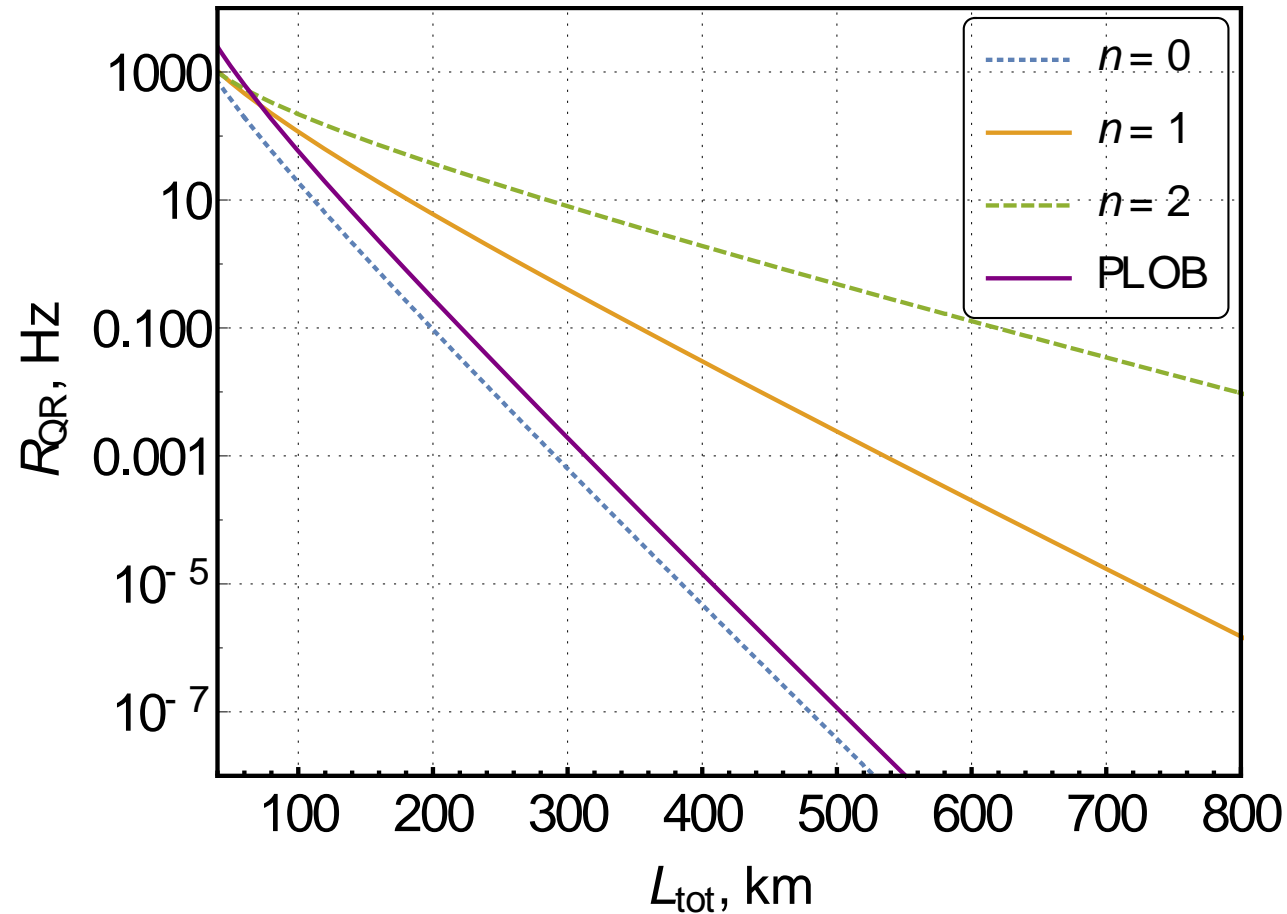
Зависимость точности воспроизведения от квадрата модуля амплитуды входного состояния. $r_{1/2}$ — доля сигнала, посланного в канал; ξ — эффективность детектора; η — коэффициент пропускания канала.



Согласно широко используемому приближению только среднего значения, среднее время ожидания генерации запутанности может быть приближенно оценено следующей простой формулой

$$K_{QR} \approx K_a^{(n)} = \left(\frac{3}{2P_{\text{swp}}} \right)^n \frac{1}{P_g},$$

где P_{swp} — вероятность переброса запутанности, P_g — вероятность успешной генерации состояния, 2^n — число элементарных звеньев.



Зависимость эффективной скорости генерации запутанности от длины канала в сравнении с PLOB-границей для систем квантовых коммуникаций типа «точка-точка»



Описанное приближение применимо только для случая, когда число звеньев равно 2^n . Кроме того, известно, что формула справедлива, когда P_{swp} и P_g малы.

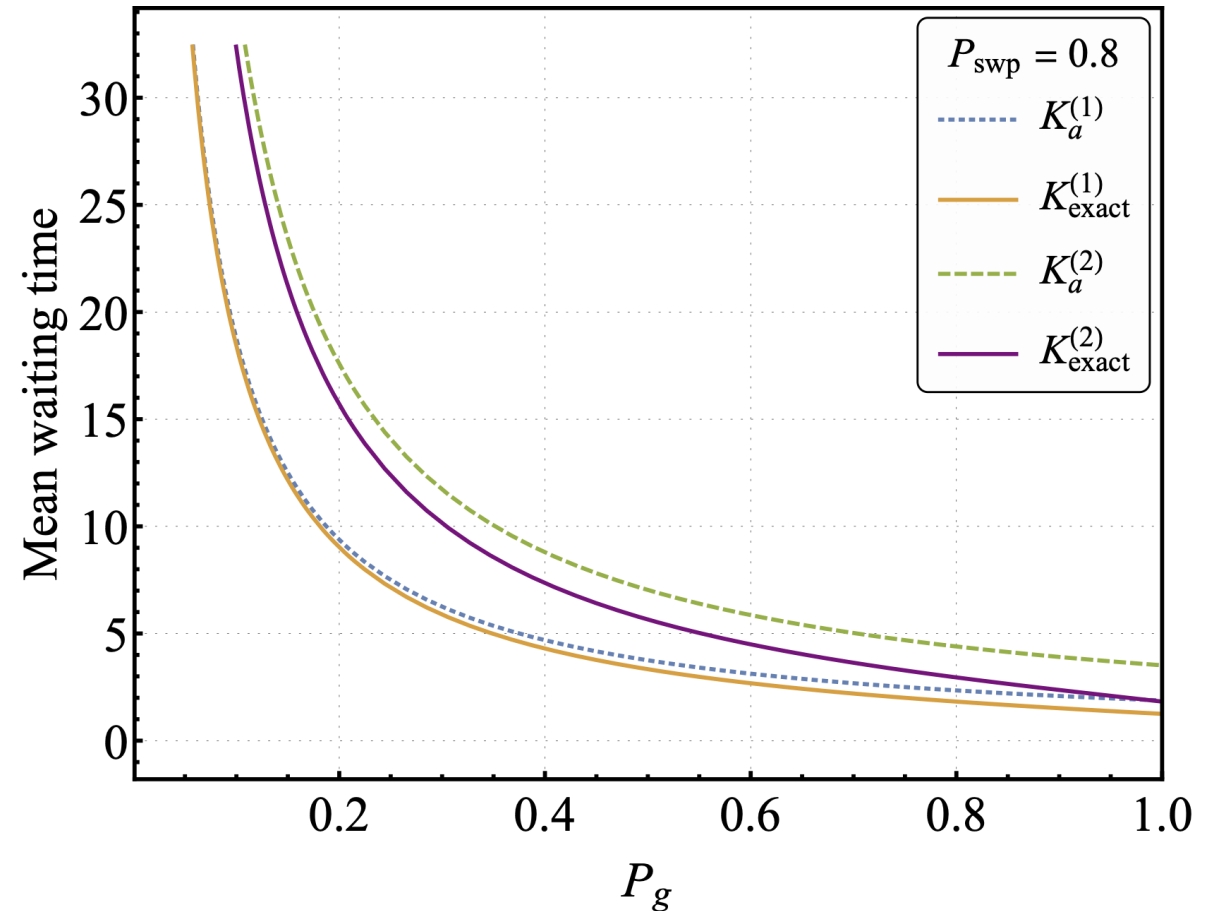
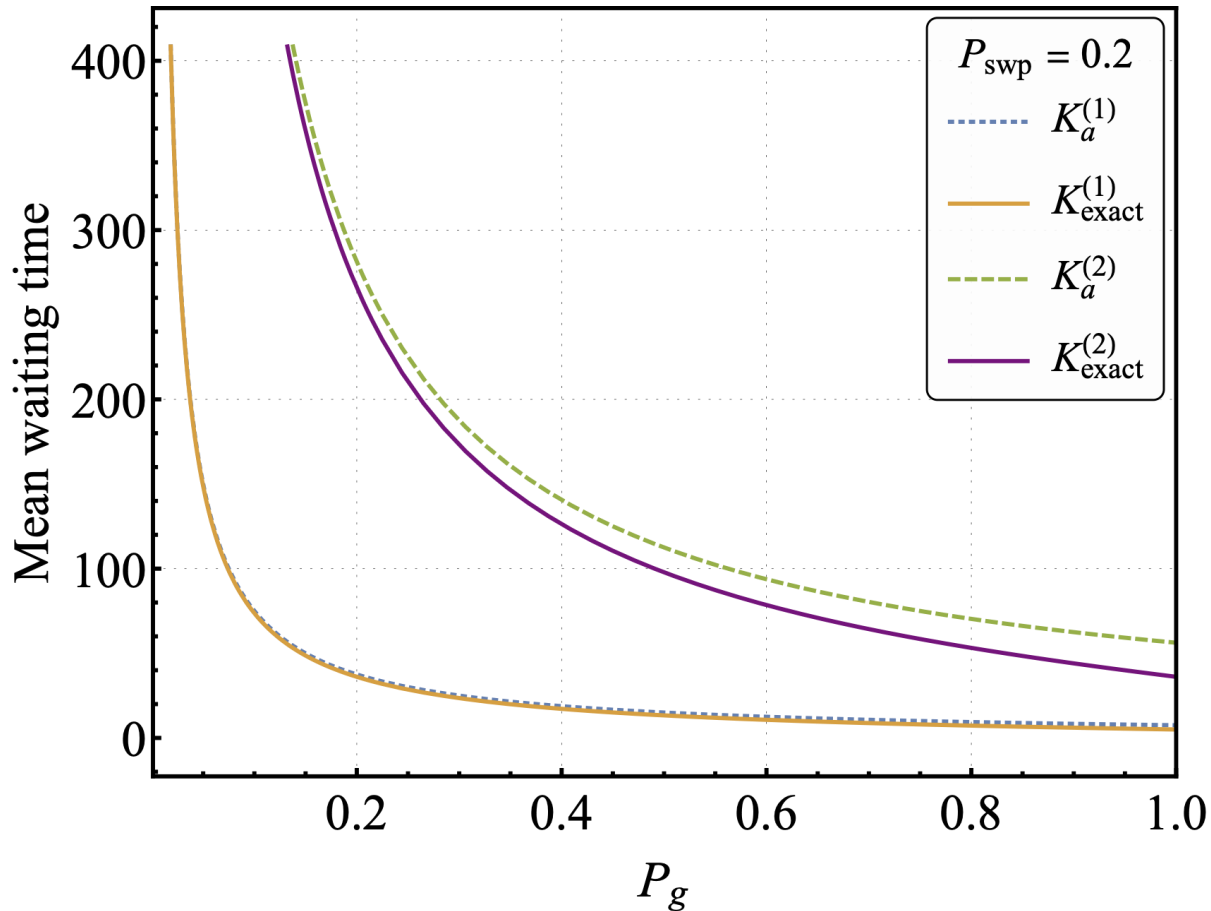
Мы оцениваем оба случая $n = 1$ и $n = 2$, сравнивая с точными выражениями:

$$K_{\text{exact}}^{(1)} = \frac{3 - 2P_g}{P_{\text{swp}}P_g(2 - P_g)},$$

$$K_{\text{exact}}^{(2)} = \frac{2P_{\text{swp}}^2P_g^4(P_g - 1)(2P_g - 3) - P_{\text{swp}}(20P_g^5 - 72P_g^4 + 93P_g^3 - 53P_g^2 + 10P_g + 4) + 3(3 - 2P_g)^2(2P_g^2 - 3P_g + 2)}{P_{\text{swp}}^2P_g(2 - P_g)(P_{\text{swp}}P_g^2 - (P_{\text{swp}} + 2)P_g + 3)(-P_{\text{swp}}P_g^3 + 4P_g^2 - 6P_g + 4)}.$$

Collins O. A. et al. Multiplexed memory-insensitive quantum repeaters // Physical Review Letters. – 2007. – Т. 98. – №. 6. – С. 060502.

Shchukin E., Schmidt F., van Loock P. Waiting time in quantum repeaters with probabilistic entanglement swapping // Physical Review A. – 2019. – Т. 100. – №. 3. – С. 032322.



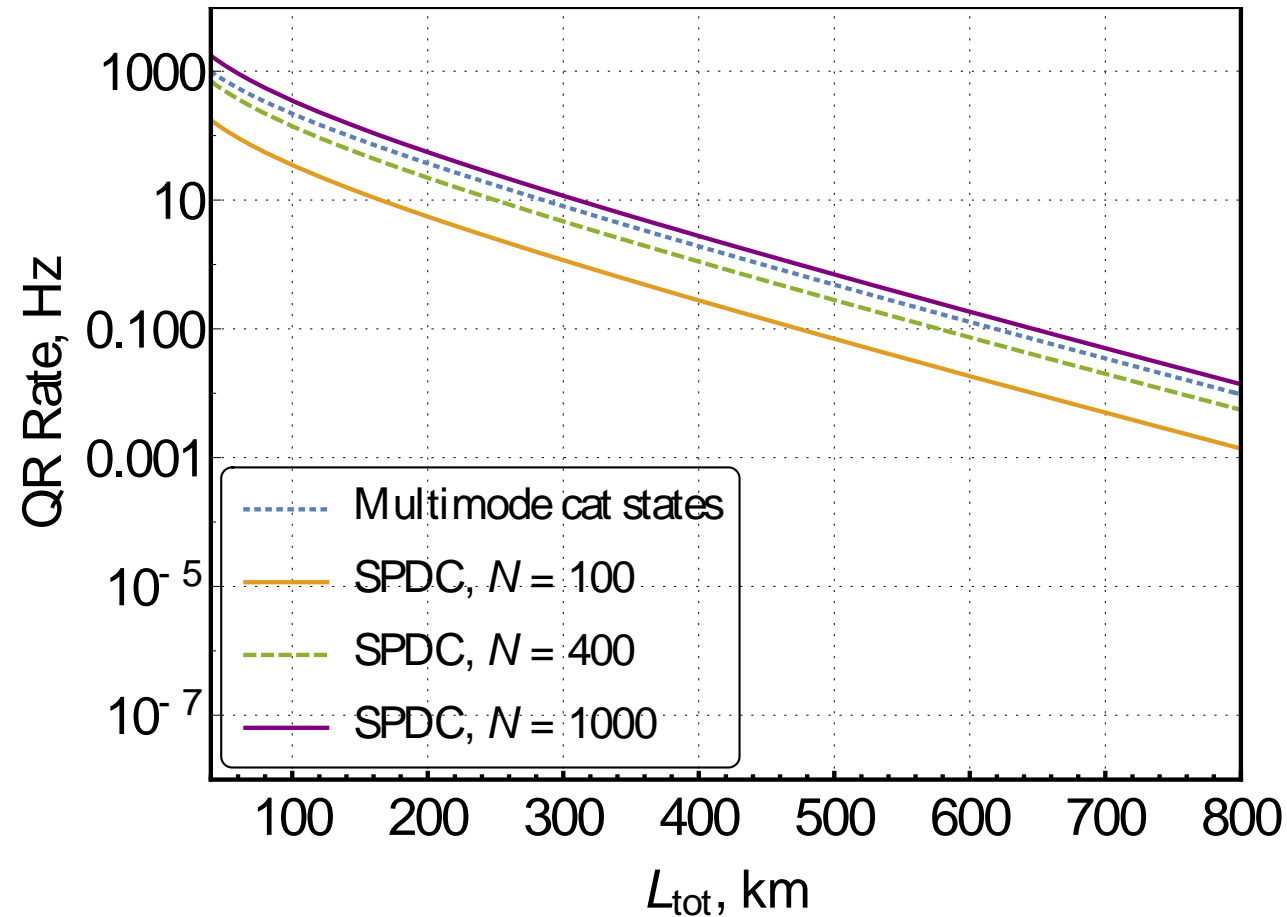
Зависимость среднего времени ожидания от вероятностей успеха и переброса запутанности в случае приближительных и точных оценок производительности.



Сравнивая повторитель на суперпозициях когерентных состояний и состояниях фотонных пар, мы используем приближённое выражение для разветвленной схемы повторителя при $n = 2$, учитывающее кодирование множества временных мод с малой вероятностью генерации пары фотонов для увеличить значение верности. Тогда среднее время ожидания составит:

$$K_{\text{SPDC}} = \frac{27(2 - \xi\eta_m)(4 - 3\xi\eta_m)}{N p e^{-L_{\text{tot}}/4} \eta_D (\xi\eta_m)^4},$$

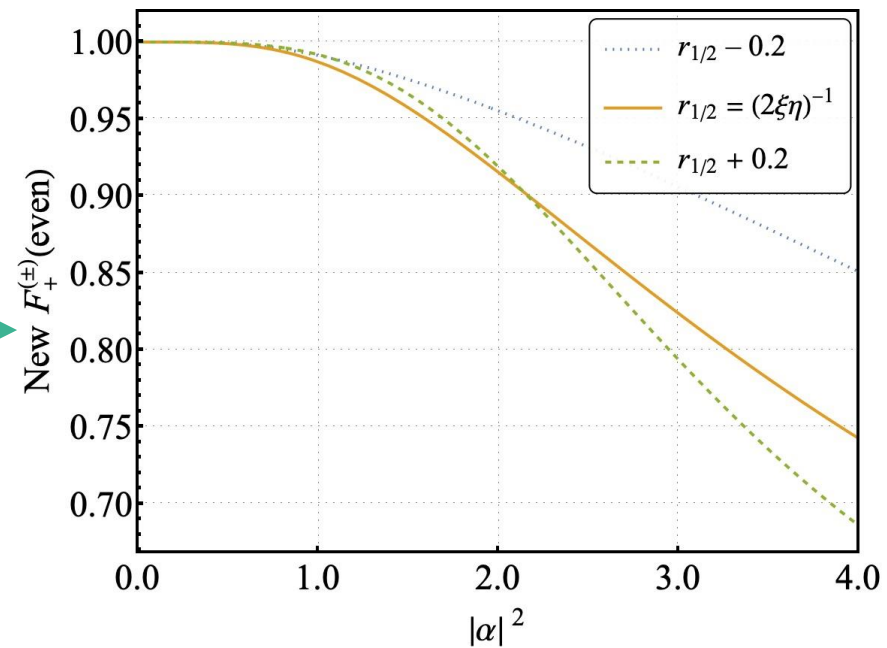
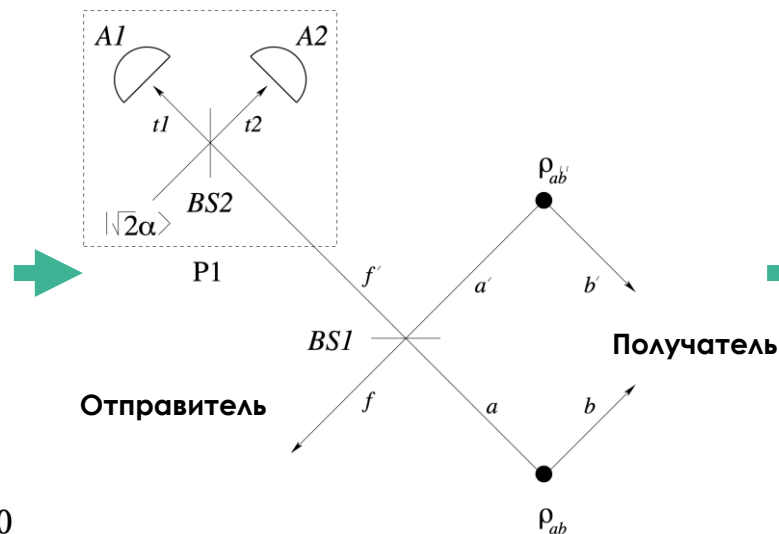
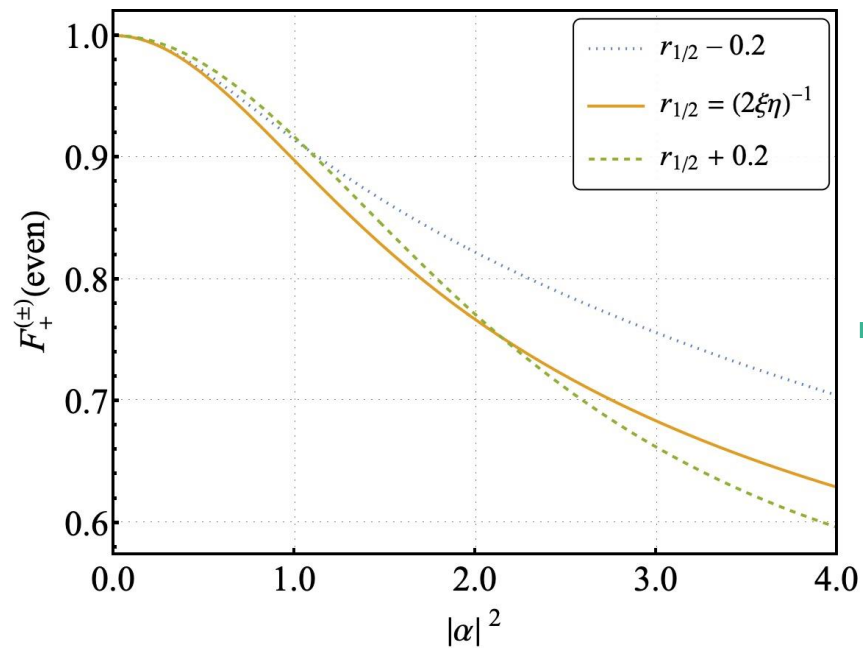
где N — количество временных мод, хранящихся в квантовой памяти, $[1 + \sqrt{p/2} (e^{i\phi_A} a^\dagger a'^\dagger + e^{i\phi_B} b^\dagger b'^\dagger) + O(p)] |0\rangle$. Ры:



Зависимость эффективной скорости генерации запутанности от длины канала, рассчитанная для двухфотонного источника ($p = 0,009$, N варьируется) и для суперпозиций когерентных состояний ($|a|^2 = 1$).

Подходы к улучшению производительности

Очищение состояний



Суть процедуры очищения заключается в использовании имеющегося ресурса запутанности для повышения точности воспроизведения распределяемых состояний.

Проблемы:

- вероятностная природа квантовых вентиляей;
- снижение эффективной скорости генерации запутанности;
- перегруженность оптической схемы;
- необходимость в дополнительной системе синхронизации и мониторинга.



Вместо парадигмы симметричное/антисимметричное состояние можно использовать конвенциональные на данный момент неортогональные кубиты из суперпозиций когерентных состояний:

$$|0_L\rangle = |\mathcal{C}_\alpha^+\rangle = \mathcal{N}_+(|\alpha\rangle + |-\alpha\rangle)$$

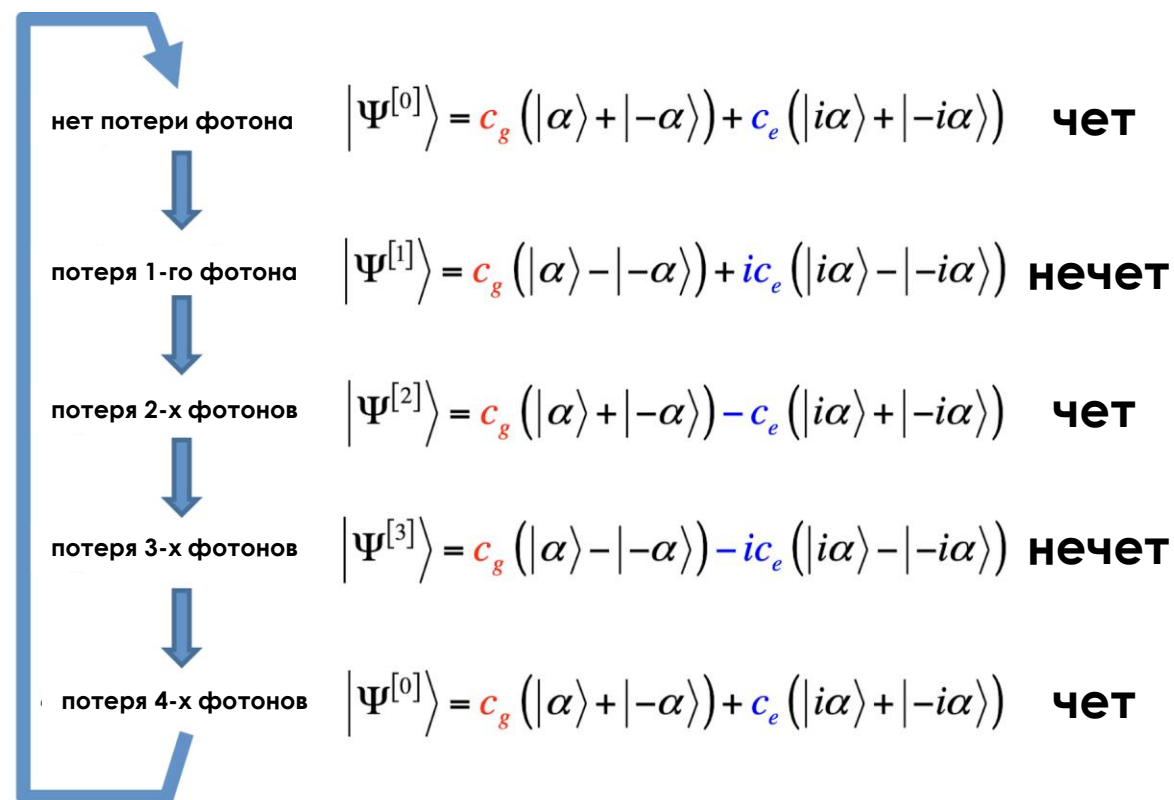
$$|1_L\rangle = |\mathcal{C}_{i\alpha}^+\rangle = \mathcal{N}_+(|i\alpha\rangle + |-i\alpha\rangle),$$

$$\mathcal{N}_+ = 1/\sqrt{2(1 + e^{-2\alpha^2})}$$

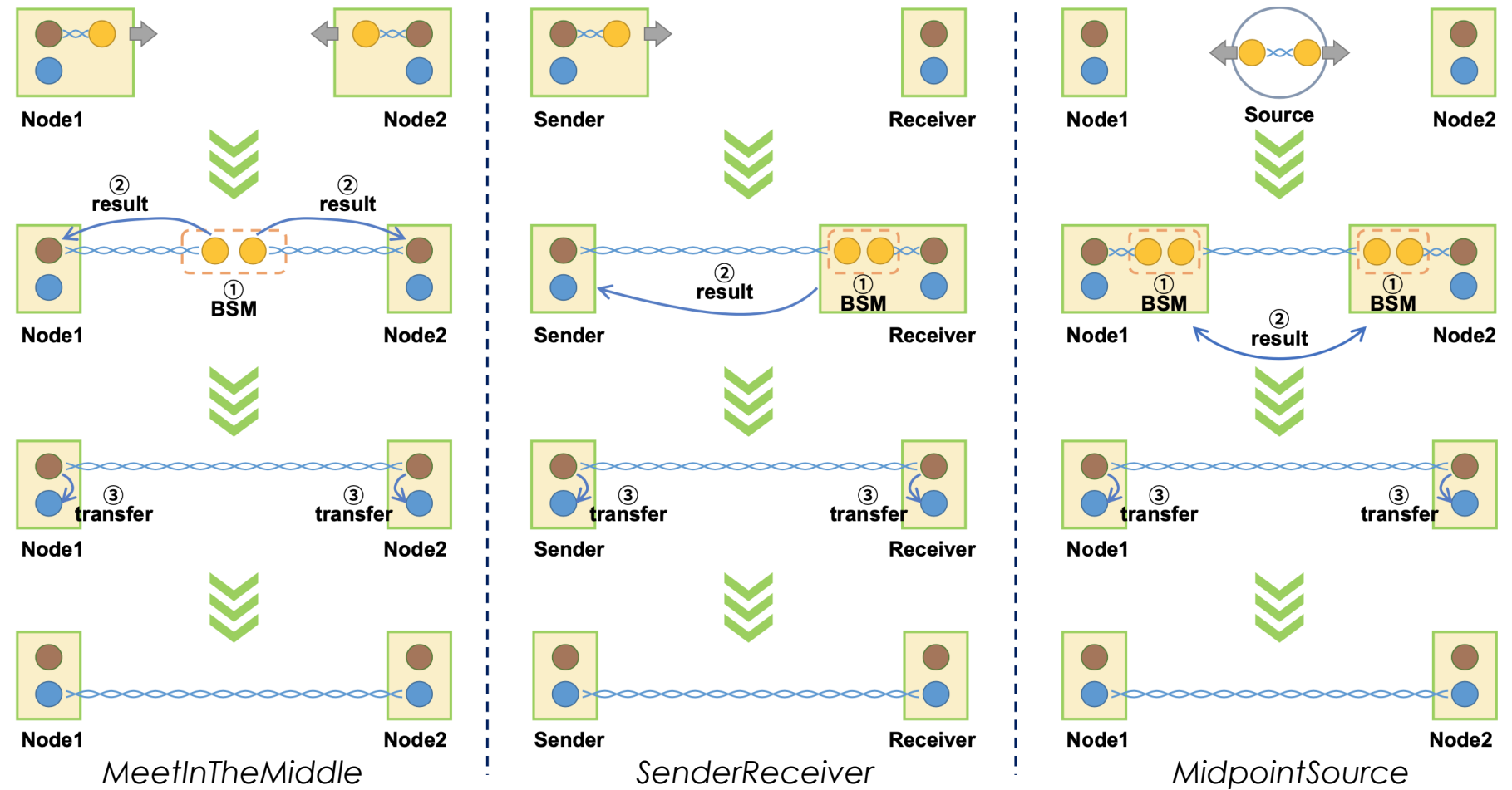
По-прежнему необходимо использовать вероятностные вентили, но процедура исправления ошибок проще.

Mirrahimi M. et al. Dynamically protected cat-qubits: a new paradigm for universal quantum computation // New Journal of Physics. – 2014. – Т. 16. – №. 4. – С. 045014.

Su D., Dhand I., Ralph T. C. Universal quantum computation with optical four-component cat qubits // Physical Review A. – 2022. – Т. 106. – №. 4. – С. 042614.



Li Y. et al. A Survey of Quantum Internet Protocols From a Layered Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024.



Схематические иллюстрации трех схем генерации запутанности. Серые стрелки указывают на отправку сигнала. Синие кружки представляют собой состояния в памяти, коричневые кружки — состояния для коммуникации, а желтые кружки — оптический сигнал

Выводы

и дальнейший план работы



- Проведён анализ производительности квантового повторителя. В рассмотрении применялся подход удвоения числа звеньев, что снижает сложность построения конечной сети (сеть в таком случае будет симметричной) и позволяет использовать более простые приближенные выражения.
- Были определены значения вероятности успешной генерации запутанности и вероятности переброса запутанности, при которых приближенные выражения приближаются к точным.
- Продемонстрировано, что схема на суперпозициях когерентных состояний позволяет получить прирост в скорости генерации запутанности относительно схемы на источниках фотонных пар при тех же параметрах квантового канала.
- Продемонстрирован результат использования стандартной схемы очищения запутанности, которую, тем не менее, сложно реализовать на практике.
- Дальнейший план работы включает в себя поиск новых подходов к очищению запутанности и применение других известных подходов к построению сети и кодировке в целях улучшения производительности.



**SMARTS
КВАНТТЕЛЕКОМ**

Контактная информация



199178, Санкт-Петербург, В.О., 6 линия д.59, корп. 1, лит. Б



+7 (812) 244-29-23



info@quanttelecom.ru

[кванттелеком.рф](http://quanttelecom.pф)