



SMARTS  
КВАНТТЕЛЕКОМ



# Совместное распространение квантового канала системы квантового распределения ключа и информационных каналов оптической транспортной сети

Киселев Федор Дмитриевич

Старший научный сотрудник  
ООО «СМАРТС-Кванттелеком», Лаборатория Квантовых Коммуникаций  
Университет ИТМО

010010011011  
011101010010

ИТМО



- Постановка задачи
- Основные источники шумов
- Математическое моделирование
- Основные выводы и результаты
- Оптимизационные методы

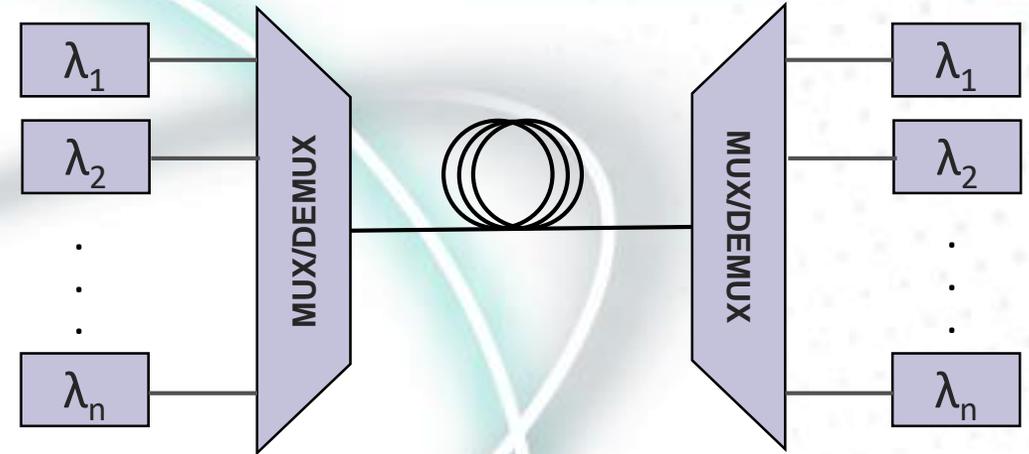
# Постановка задачи

## Квантовое распределение ключа (КРК):

**Метод генерации симметричного криптографического ключа между двумя удаленными абонентами безопасность которого основана на квантовых свойствах фотонов**

**Детектирование квантовых состояний света осуществляется с помощью детекторов одиночных фотонов. Процесс очень чувствителен к наличию засветки, поэтому для систем КРК выделяют так называемые «темные» волокна.**

**Выделение темного волокна увеличивает затраты на организацию квантовой сети, а иногда попросту не представляется возможным.**



# Основные источники шумов

## Три основных источника шумов:

- **Спонтанное комбинационное рассеяние (СКР)**

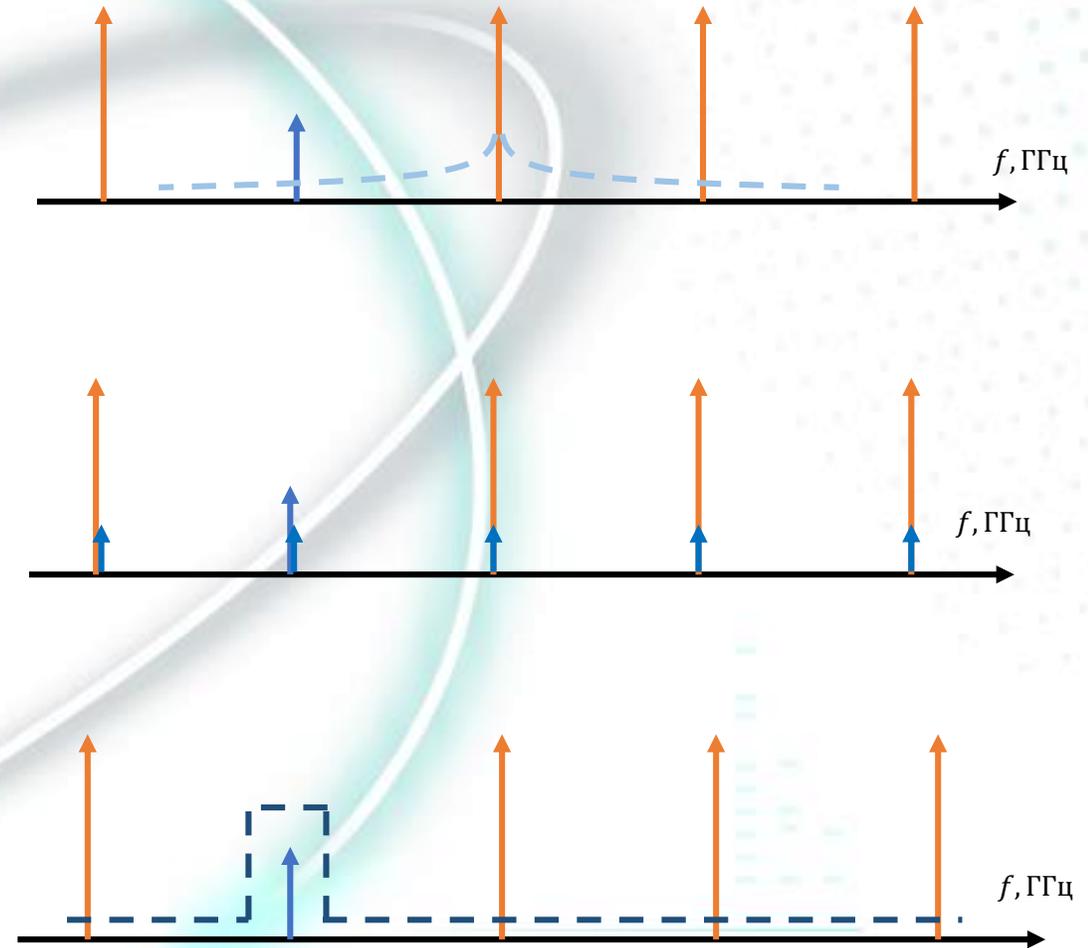
Процесс неупругого рассеяния света на молекулах вещества сопровождающийся поглощением и испусканием света на измененной длине волны. В оптическом волокне создает широкополосный спектр, состоящий из стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния.

- **Четырех-волновое смешение (ЧВС)**

Нелинейный эффект возникающий из-за нелинейности третьего порядка. В результате эффекта два или три оптических сигнала распространяющихся на разных длинах волн порождают еще один.

- **Линейные перекрестные помехи (ЛПМ)**

Шум возникающий из-за неидеальной работы фильтров в оптической схеме.



# Математическое моделирование

## Три основных источника шумов:

- **Спонтанное комбинационное рассеяние (СКР)**

Процесс неупругого рассеяния света на молекулах вещества сопровождающийся поглощением и испусканием света на измененной длине волны. В оптическом волокне создает широкополосный спектр, состоящий из стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния.

- **Четырех-волновое смешение (ЧВС)**

Нелинейный эффект возникающий из-за нелинейности третьего порядка. В результате эффекта два или три оптических сигнала распространяющихся на разных длинах волн порождают еще один.

- **Линейные перекрестные помехи (ЛПМ)**

Шум возникающий из-за неидеальной работы фильтров в оптической схеме.

$P_{\text{вых}}$  – оптическая мощность информационного канала на выходе из оптического волокна  
 $\Delta\lambda$  – полоса пропускания квантового канала  
 $ISOL$  – изоляция квантового канала

$$P_{\text{СКР,п}} = P_{\text{вых}} L \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{СКР,о}} = P_{\text{вых}} \frac{\sin(\xi L)}{\xi} \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{ЧВС}} = \frac{\eta D^2 \gamma^2 P_{\text{вых}}^3 e^{-\xi L}}{9\alpha^2} (1 - e^{-\xi L})^2$$

$$P_{\text{ЛПМ}}[\text{дБм}] = P_{\text{вых}}[\text{дБм}] - ISOL[\text{дБ}]$$

# Математическое моделирование

$P_{\text{вых}}$  – оптическая мощность информационного канала на выходе из оптического волокна  
 $\Delta\lambda$  – полоса пропускания квантового канала  
 $ISOL$  – изоляция квантового канала

## Три основных источника шумов:

- **Спонтанное комбинационное рассеяние (СКР)**

Процесс неупругого рассеяния света на молекулах вещества сопровождающийся поглощением и испусканием света на измененной длине волны. В оптическом волокне создает широкополосный спектр, состоящий из стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния.

$$P_{\text{СКР,п}} = P_{\text{вых}} L \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{СКР,о}} = P_{\text{вых}} \frac{\sin(\xi L)}{\xi} \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

- **Четырех-волновое смешение (ЧВС)**

Нелинейный эффект возникающий из-за нелинейности третьего порядка. В результате эффекта два или три оптических сигнала распространяющихся на разных длинах волн порождают еще один.

$$P_{\text{ЧВС}} = \frac{\eta D^2 \gamma^2 P_{\text{вых}}^3 e^{-\xi L}}{9\alpha^2} (1 - e^{-\xi L})^2$$

- **Линейные перекрестные помехи (ЛПМ)**

Шум возникающий из-за неидеальной работы фильтров в оптической схеме.

$$P_{\text{ЛПМ}}[\text{дБм}] = P_{\text{вых}}[\text{дБм}] - ISOL[\text{дБ}]$$

# Математическое моделирование

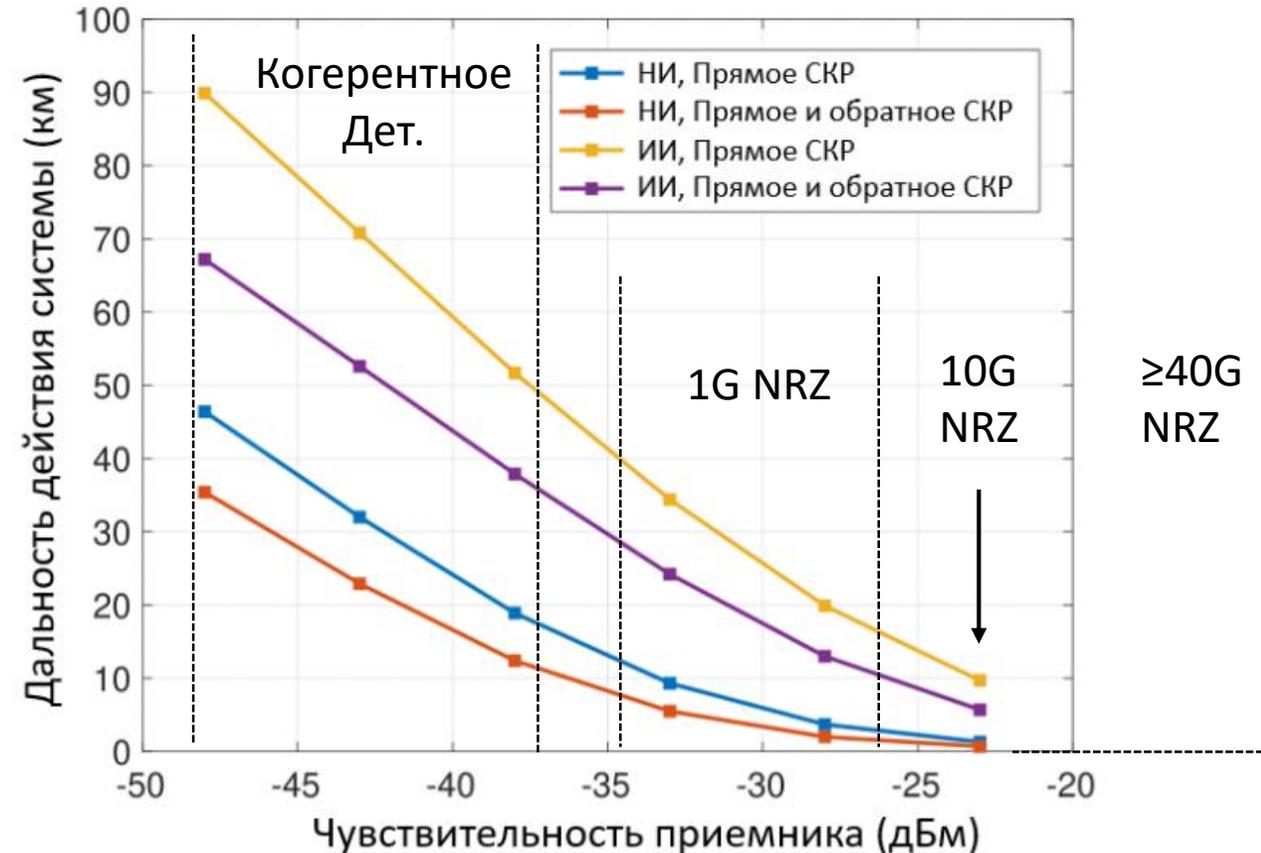
## Порог снижения оптической мощности информационных каналов:

$$P_{\text{ВЫХ}} [\text{дБм}] = R_x [\text{дБм}] + IL [\text{дБ}]$$

$P_{\text{ВЫХ}}$  – оптическая мощность информационного канала на выходе из оптического волокна  
 $R_x$  – чувствительность приемника информационного канала  
 $IL$  – потери в модуле приемника телекоммуникационного оборудования

Наилучший результат достигается в совокупности с когерентными методами детектирования (примерно от -38 до -48 дБм в зависимости от используемого формата модуляции)

Длина волны квантового канала 1550.12 нм (система КРКБЧ\*)  
40 информационных каналов



*Kiselev F., Goncharov R., Veselkova N., Samsonov E., Kiselev A., Egorov V.I. Performance of subcarrier-wave quantum key distribution in the presence of spontaneous Raman scattering noise generated by classical DWDM channels // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics - 2021, Vol. 38, No. 2, pp. 595-601*

\*Квантовое распределение ключа на боковых частотах

# Математическое моделирование

## Порог снижения оптической мощности информационных каналов:

$$P_{\text{ВЫХ}}[\text{дБм}] = R_x[\text{дБм}] + IL[\text{дБ}]$$

$P_{\text{ВЫХ}}$  – оптическая мощность информационного канала на выходе из оптического волокна

$R_x$  – чувствительность приемника информационного канала

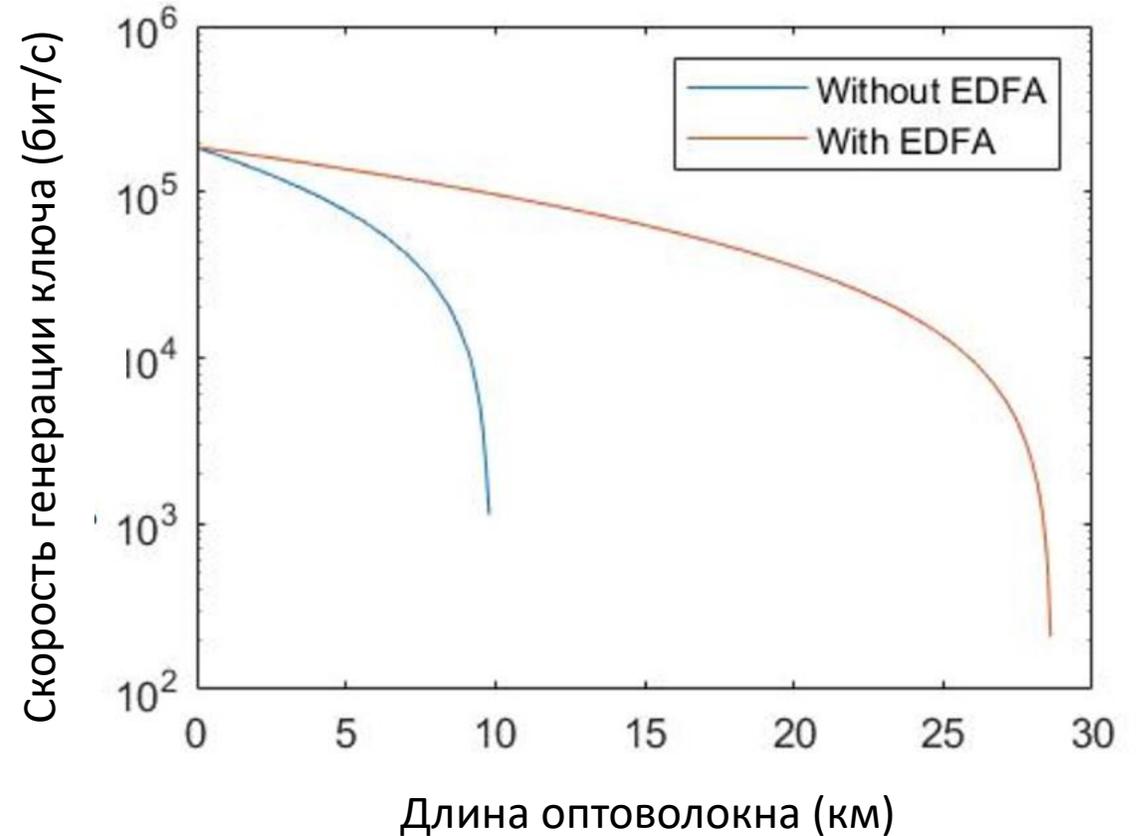
$IL$  – потери в модуле приемника телекоммуникационного оборудования

Использование оптического усилителя позволяет работать при еще меньших мощностях и тем самым увеличивает дальность действия систем КРК

Длина волны квантового канала 1550.12 нм (система КРК БЧ\*)

40 информационных каналов

$$R_x = -23 \text{ дБм}$$



\*Квантовое распределение ключа на боковых частотах

# Математическое моделирование

## Три основных источника шумов:

- **Спонтанное комбинационное рассеяние (СКР)**

Процесс неупругого рассеяния света на молекулах вещества сопровождающийся поглощением и испусканием света на измененной длине волны. В оптическом волокне создает широкополосный спектр, состоящий из стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния.

- **Четырех-волновое смешение (ЧВС)**

Нелинейный эффект возникающий из-за нелинейности третьего порядка. В результате эффекта два или три оптических сигнала распространяющихся на разных длинах волн порождают еще один.

- **Линейные перекрестные помехи (ЛПМ)**

Шум возникающий из-за неидеальной работы фильтров в оптической схеме.

$P_{\text{вых}}$  – оптическая мощность информационного канала на выходе из оптического волокна  
 $\Delta\lambda$  – полоса пропускания квантового канала  
 $ISOL$  – изоляция квантового канала

$$P_{\text{СКР,п}} = P_{\text{вых}} L \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{СКР,о}} = P_{\text{вых}} \frac{\sin(\xi L)}{\xi} \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{ЧВС}} = \frac{\eta D^2 \gamma^2 P_{\text{вых}}^3 e^{-\xi L}}{9\alpha^2} (1 - e^{-\xi L})^2$$

$$P_{\text{ЛПМ}}[\text{дБм}] = P_{\text{вых}}[\text{дБм}] - ISOL[\text{дБ}]$$

# Выбор длины волны для квантового канала

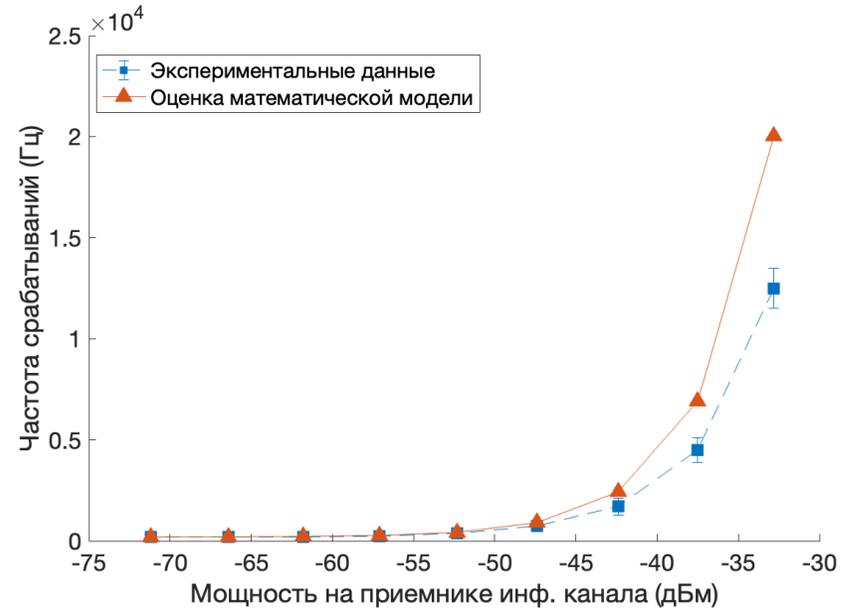
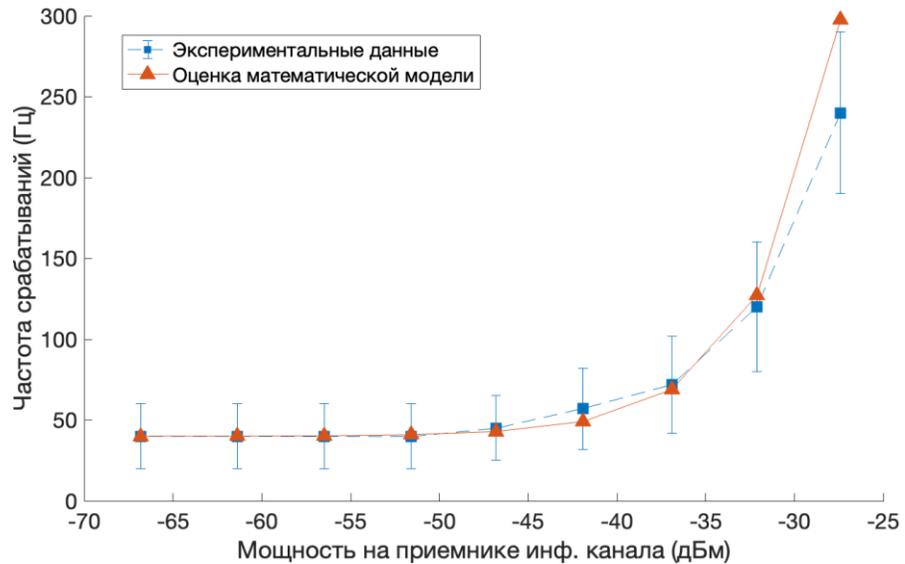
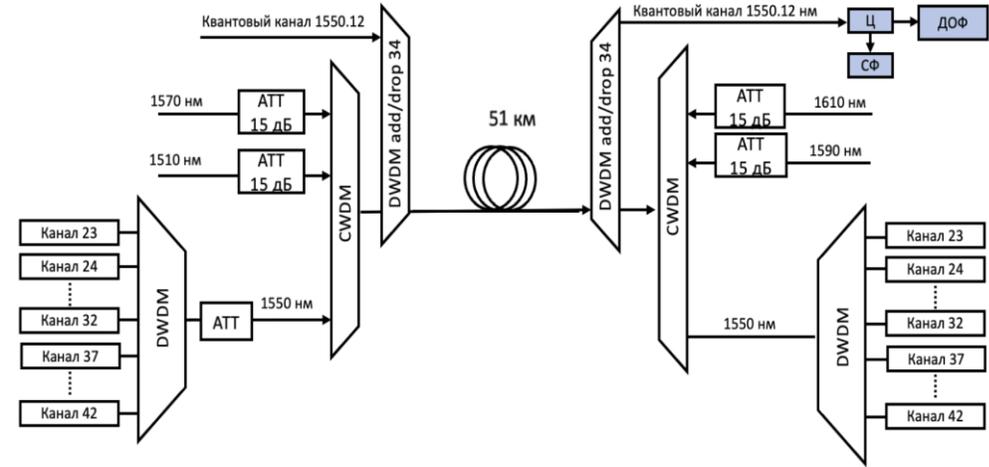
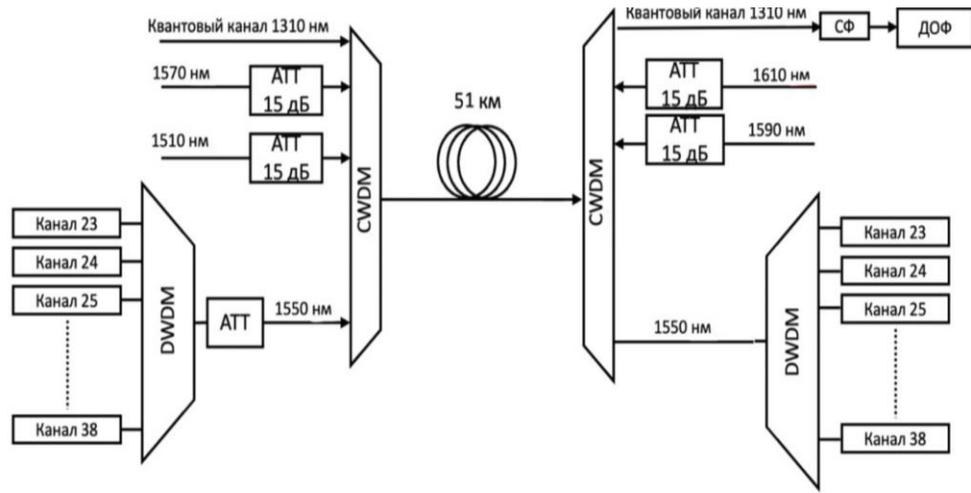
Сечение СКР



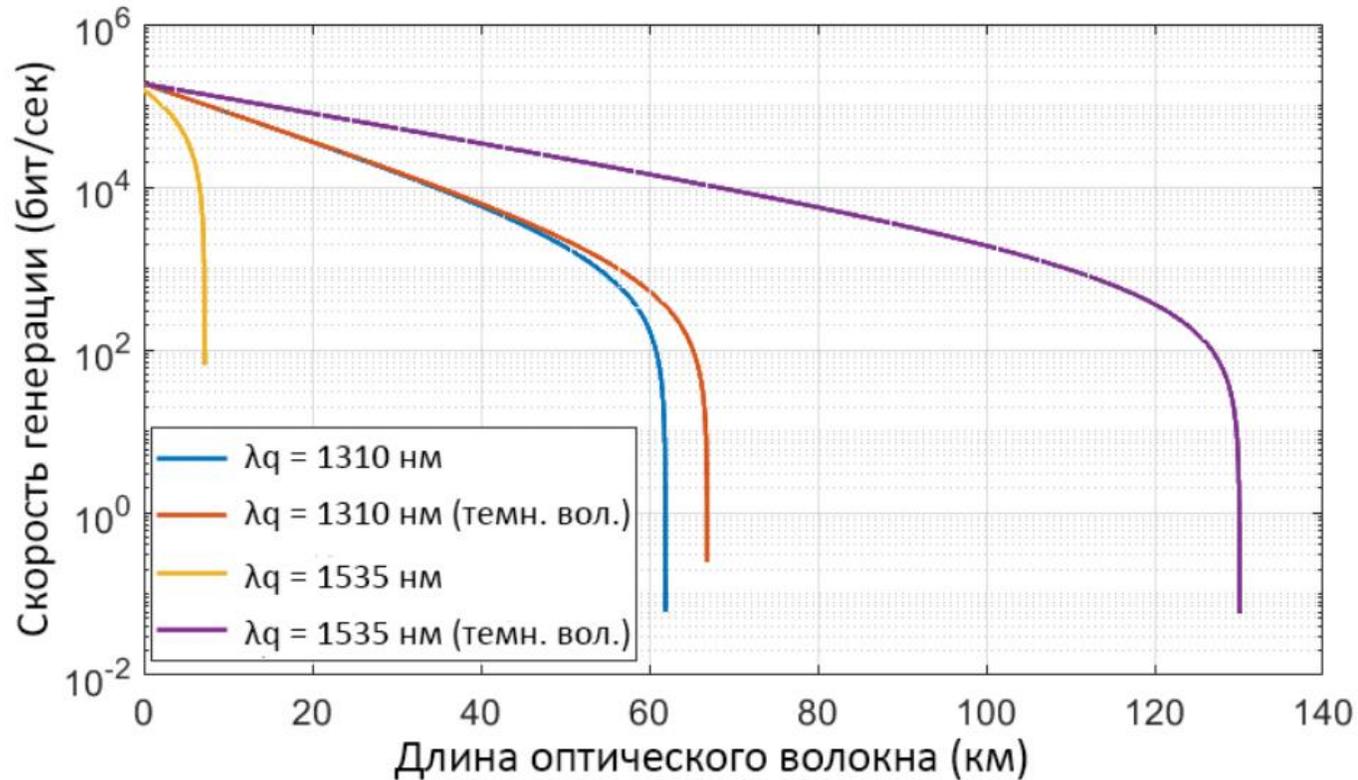
$$P_{\text{СКР,п}} = P_{\text{ВЫХ}} L \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{СКР,о}} = P_{\text{ВЫХ}} \frac{\sin(\xi L)}{\xi} \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

# Выбор длины волны для квантового канала



# Выбор длины волны для квантового канала



$$P_{\text{СКР,П}} = P_{\text{ВЫХ}} L \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{СКР,О}} = P_{\text{ВЫХ}} \frac{\sin(\xi L)}{\xi} \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

- Шум от СКР примерно на 2 порядка ниже если поместить квантовый канал в О-диапазон ( $\lambda_q = 1310$  нм)
- Основным источником шума для случая  $\lambda_q = 1310$  нм является не идеальность изоляции оптических каналов
- Повышенные потери в волокне частично компенсируются увеличенной эффективностью детектора.

# Математическое моделирование

## Три основных источника шумов:

- **Спонтанное комбинационное рассеяние (СКР)**

Процесс неупругого рассеяния света на молекулах вещества сопровождающийся поглощением и испусканием света на измененной длине волны. В оптическом волокне создает широкополосный спектр, состоящий из стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния.

- **Четырех-волновое смешение (ЧВС)**

Нелинейный эффект возникающий из-за нелинейности третьего порядка. В результате эффекта два или три оптических сигнала распространяющихся на разных длинах волн порождают еще один.

- **Линейные перекрестные помехи (ЛПМ)**

Шум возникающий из-за неидеальной работы фильтров в оптической схеме.

$P_{\text{ВЫХ}}$  – оптическая мощность информационного канала на выходе из оптического волокна  
 $\Delta\lambda$  – полоса пропускания квантового канала  
 $ISOL$  – изоляция квантового канала

$$P_{\text{СКР,п}} = P_{\text{ВЫХ}} L \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

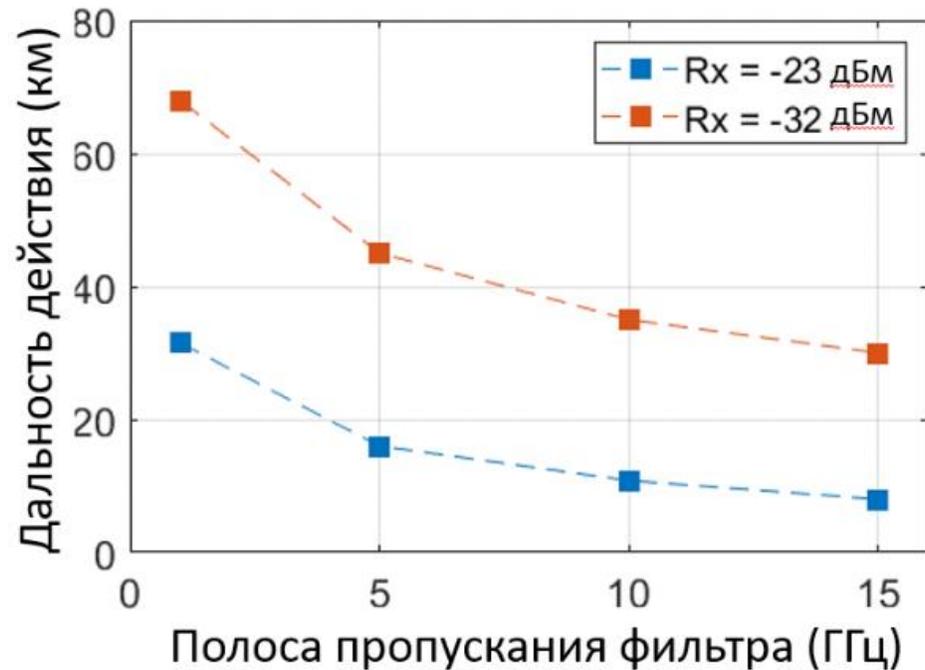
$$P_{\text{СКР,о}} = P_{\text{ВЫХ}} \frac{\sin(\xi L)}{\xi} \sum_{c=1}^N \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda$$

$$P_{\text{ЧВС}} = \frac{\eta D^2 \gamma^2 P_{\text{ВЫХ}}^3 e^{-\xi L}}{9\alpha^2} (1 - e^{-\xi L})^2$$

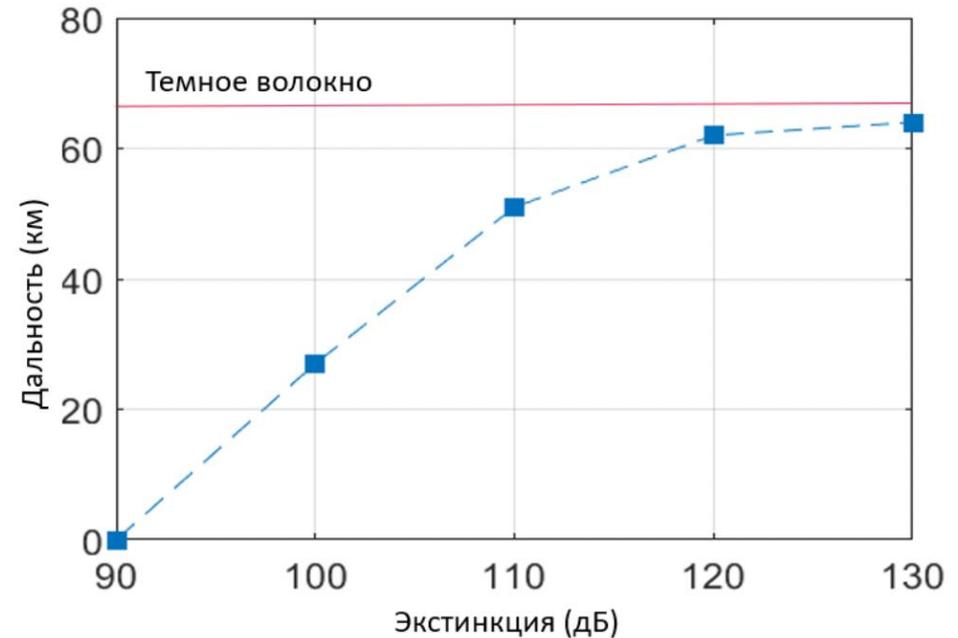
$$P_{\text{ЛПМ}}[\text{дБм}] = P_{\text{ВЫХ}}[\text{дБм}] - ISOL[\text{дБ}]$$

# Математическое моделирование

Длина волны квантового канала 1550.12 нм (система КРК БЧ)  
20 информационных каналов



Длина волны квантового канала 1310 нм (система КРК БЧ)  
40 информационных каналов;  $R_x = -23$  дБм

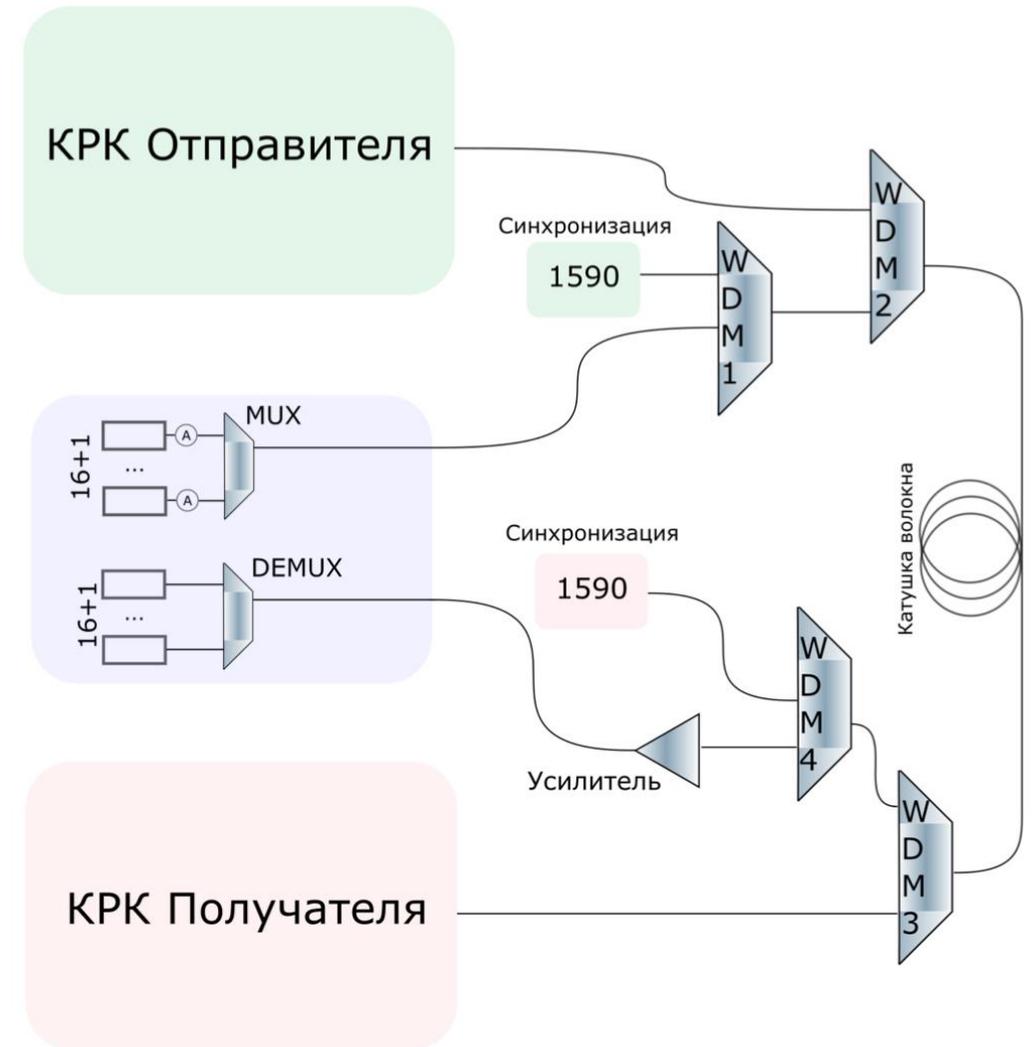


- Узкополосные фильтры в теории являются хорошим решением, однако на практике узкую полосу сложнее согласовывать с длиной волны лазера и стабилизировать
- Для подавления шума от ЛПМ необходимо обеспечивать высокий уровень изоляции (более 110 дБ), однако внесение дополнительных фильтров приводит к увеличению потерь на стороне получателя

# Основные выводы и результаты

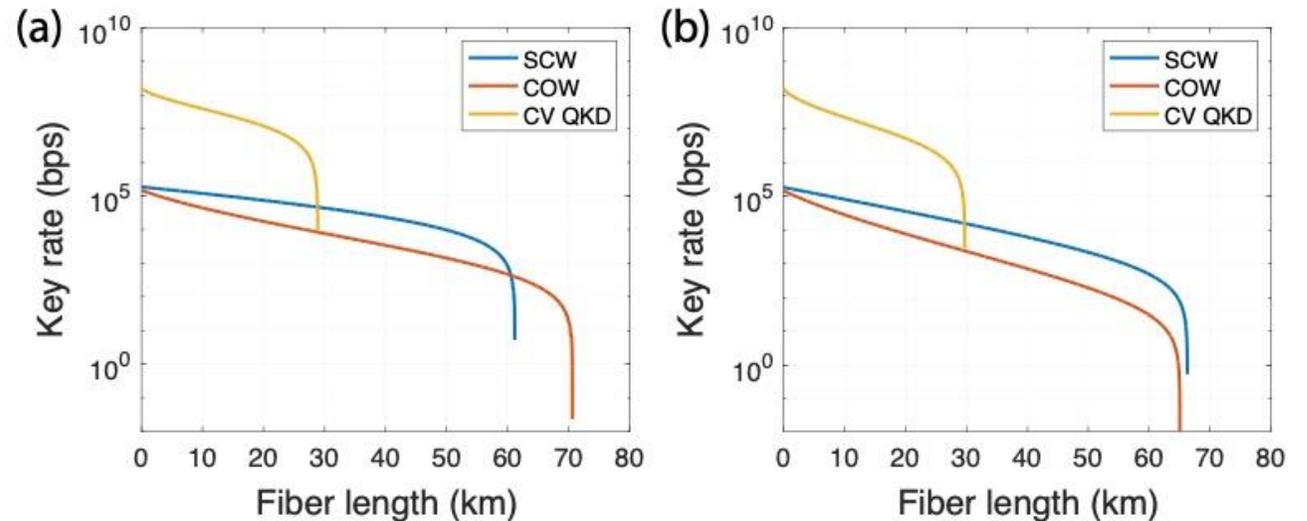
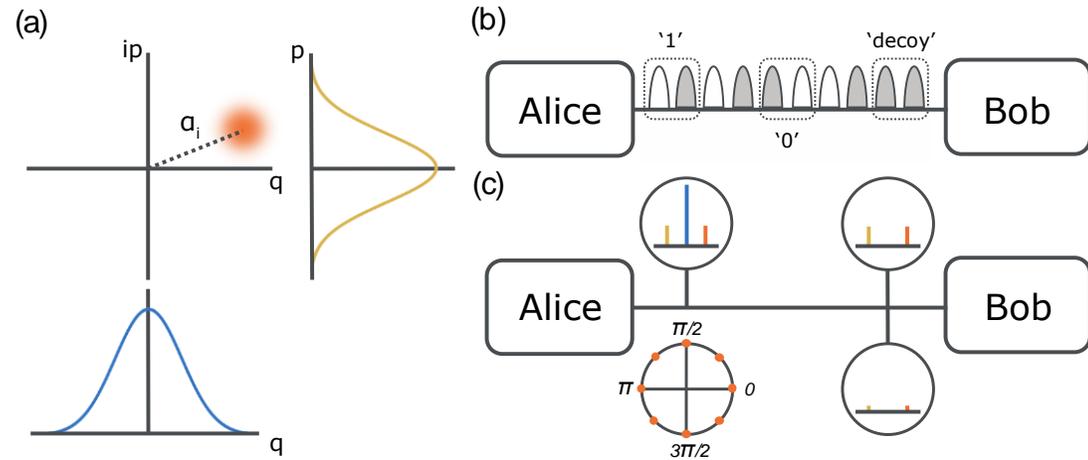
## Основные выводы математического моделирования:

- **Квантовый канал должен находиться на длине волны 1310 нм**
- **Необходимо использовать усилитель EDFA после вывода квантового канала для возможности дополнительного снижения мощности информационных каналов**
- **Необходимо использовать фильтры ВБР для обеспечения узкой полосы пропускания квантового канала**
- **Квантовый канал нужно вводить в линию последним и выводить первым для снижения оптических потерь от стыков в оптической схеме**
- **Необходимо обеспечить высокий уровень изоляции квантового канала (более 110 дБ)**
- **Лучше разделять информационные каналы по направлениям в различных волокнах**



# Основные выводы и результаты

- Были рассмотрены различные системы квантового распределения ключа, включая систему на непрерывных переменных, в приближении бесконечного ключа
- Система КРКНП при объединении с информационными каналами не подходит для магистральных сетей, однако может стать хорошим кандидатом для городских сетей за счет повышенной скорости генерации на коротких расстояниях.
- Дискретные протоколы в приближении бесконечного ключа показывают примерно одинаковые результаты (при одинаковых параметрах систем, таких как  $\mu$  и  $de$ ).





# Возможности оптимизации в С-диапазоне

## Величина шумов СКР и ЧВС зависит от выбора длины волны квантовых и информационных каналов:

- В работе использовался алгоритм имитации отжига для поиска оптимальных конфигураций в стандартных частотных сетках технологии DWDM



- В случае использования одного квантового канала алгоритм повторяет результаты полученные с обоснованным предположением

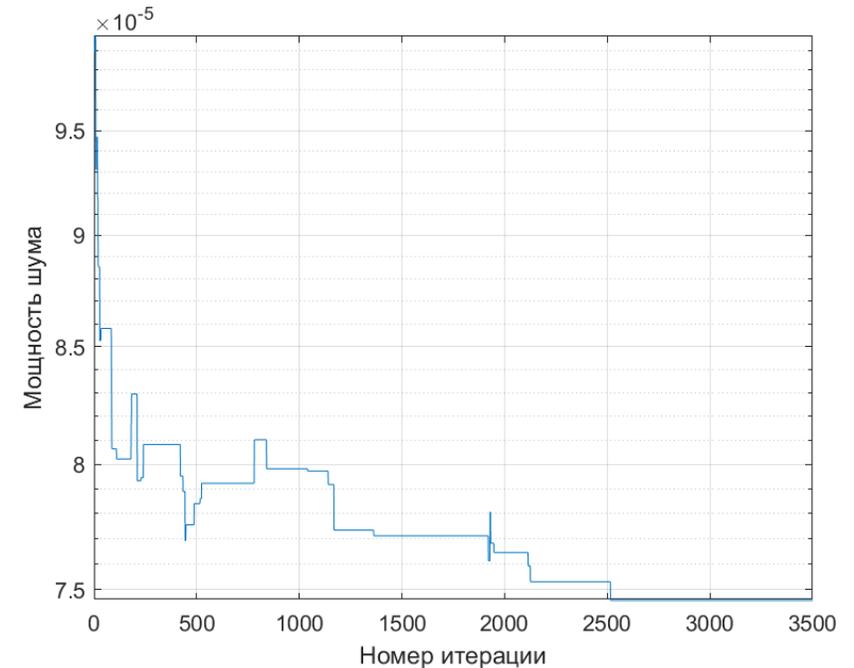
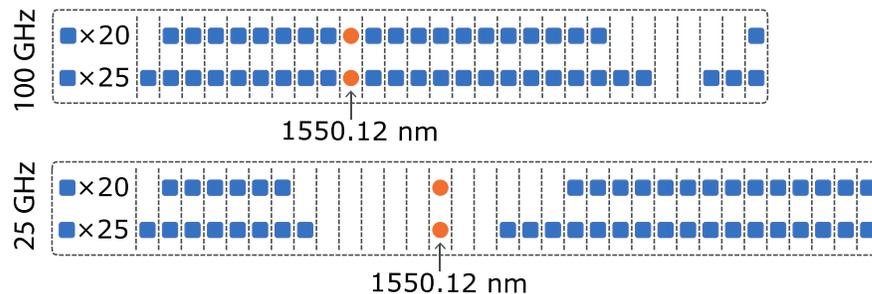


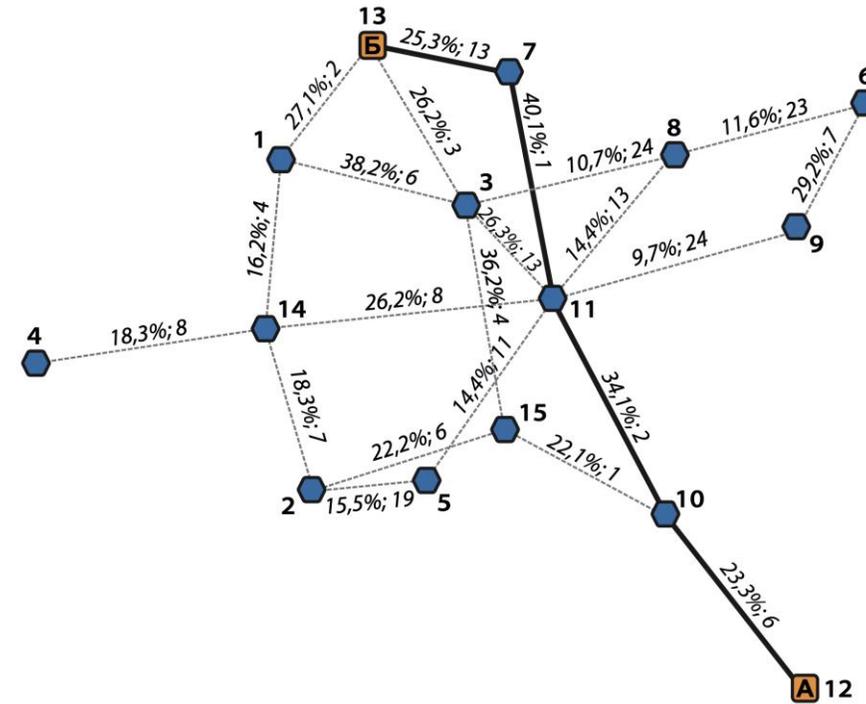
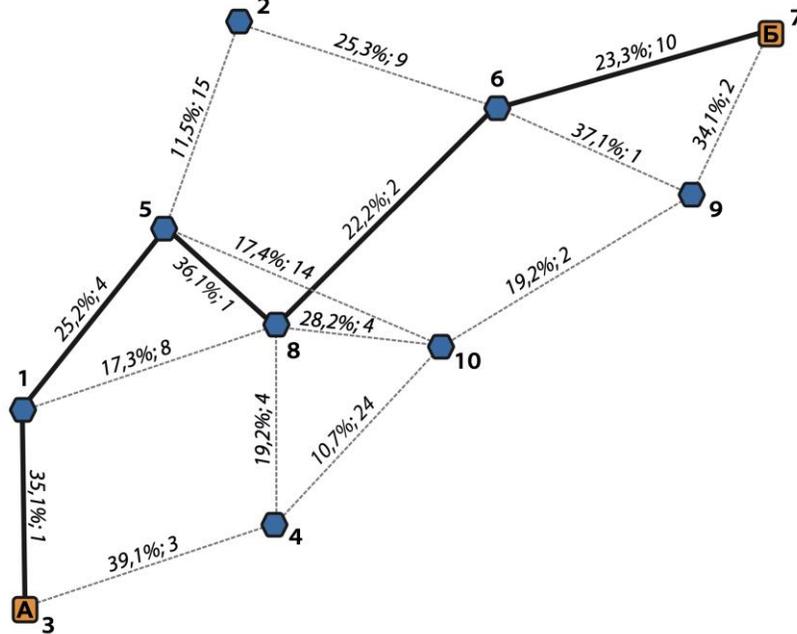
График сходимости

Оптимизация позволяет увеличить скорость выработки ключа и дальность действия (до **20%** по сравнению с неоптимальными конфигурациями взятыми наугад)

# Оптимизация маршрутов в разветвленных городских сетях

## Решение задачи поиска маршрута на графе с максимальной скоростью генерации ключа:

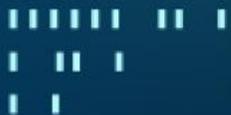
- Каждое ребро представляет собой волоконную линию с произвольным набором информационных каналов
- Квантовый канал на длине волны 1550.12



- Снижение мощности информационных каналов и перенос длины волны на 1310 нм являются самыми эффективными методами для достижения больших дальностей в присутствии большого числа информационных каналов.
- Оптические потери на данной длине волны в два раза больше чем на 1550 нм, что является основным ограничением данного подхода. Возможна компенсация с использованием более эффективного детектора одиночных фотонов.
- Для достижения дальностей, требуемых для магистральных сетей, на длине волны 1550 нм в присутствии большого числа информационных каналов необходимо использовать фильтры с полосой порядка 1 ГГц.
- Возможно совместное распространение квантового канала на 1550 нм и информационных каналов в городских сетях, где расстояние между узлами порядка 10 км.



SMARTS  
КВАНТТЕЛЕКОМ



## Контактная информация



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



+7 (812) 244-29-23



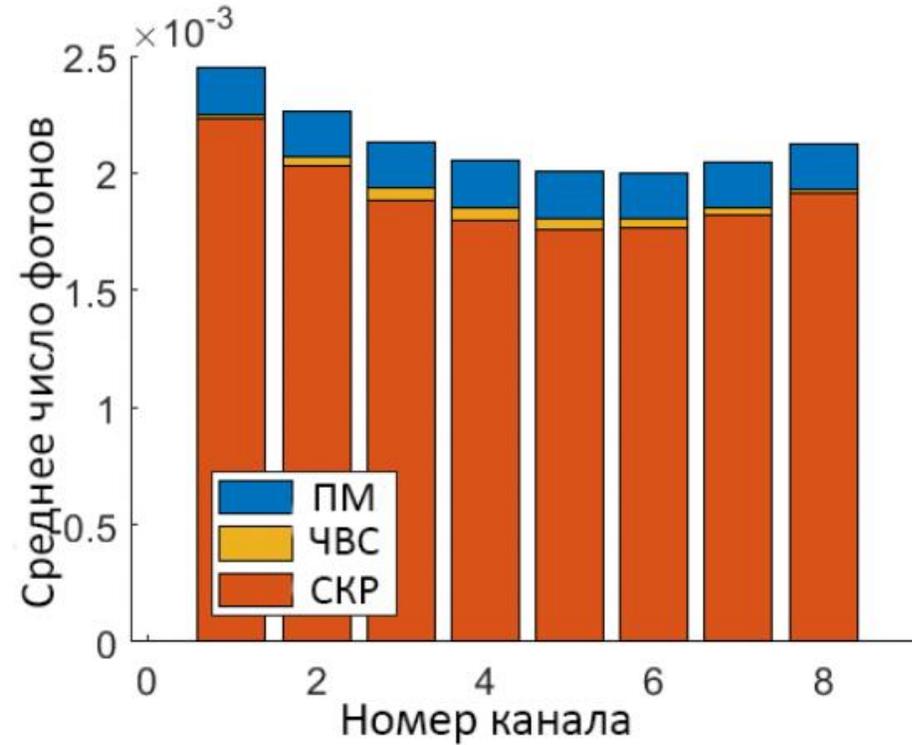
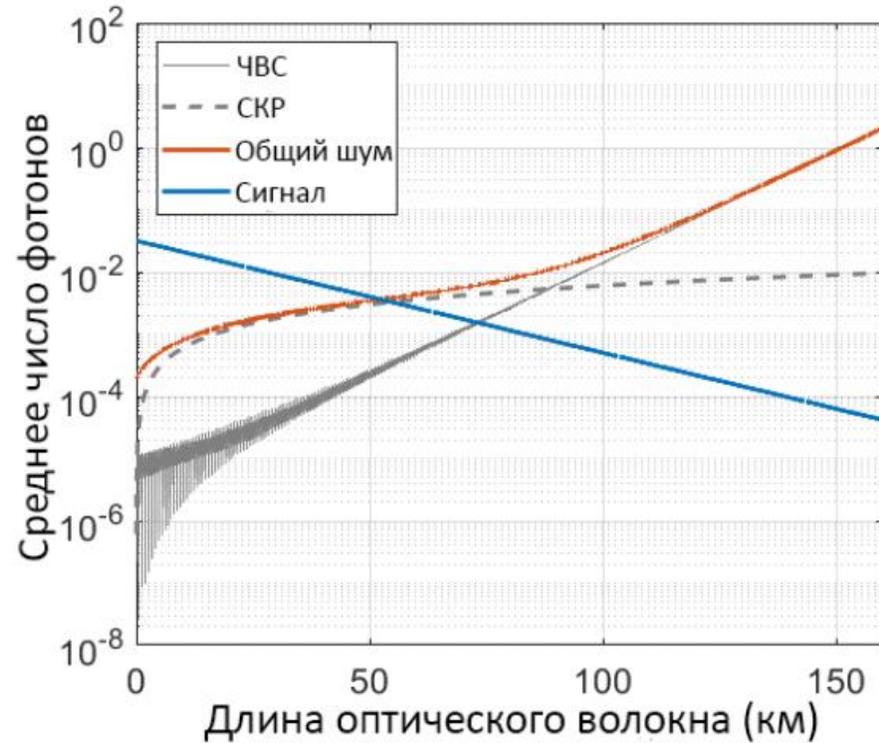
info@quanttelecom.ru



quanttelecom.ru

010010011011  
011101010010

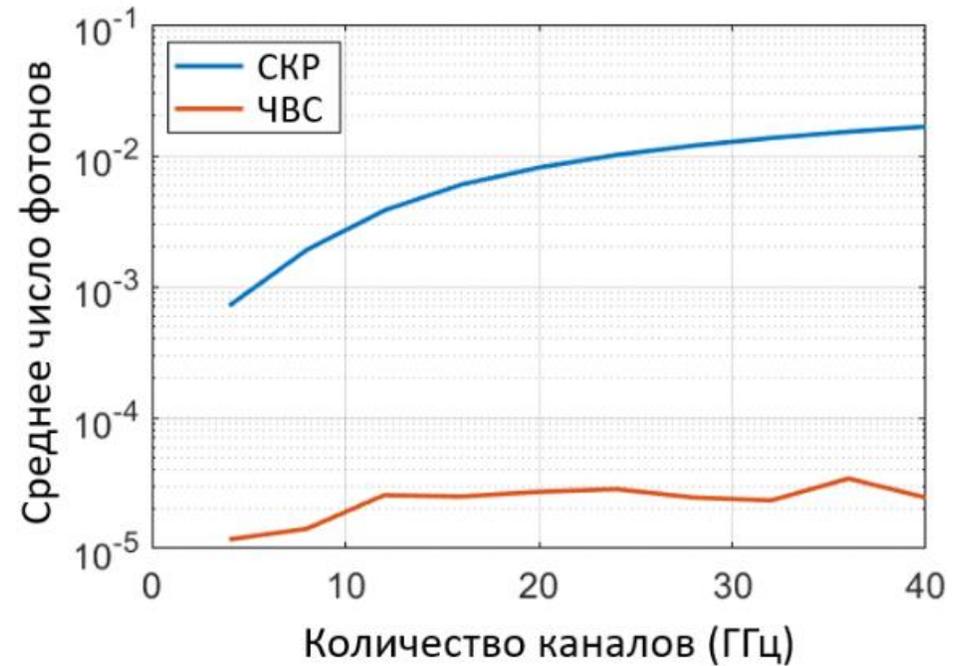
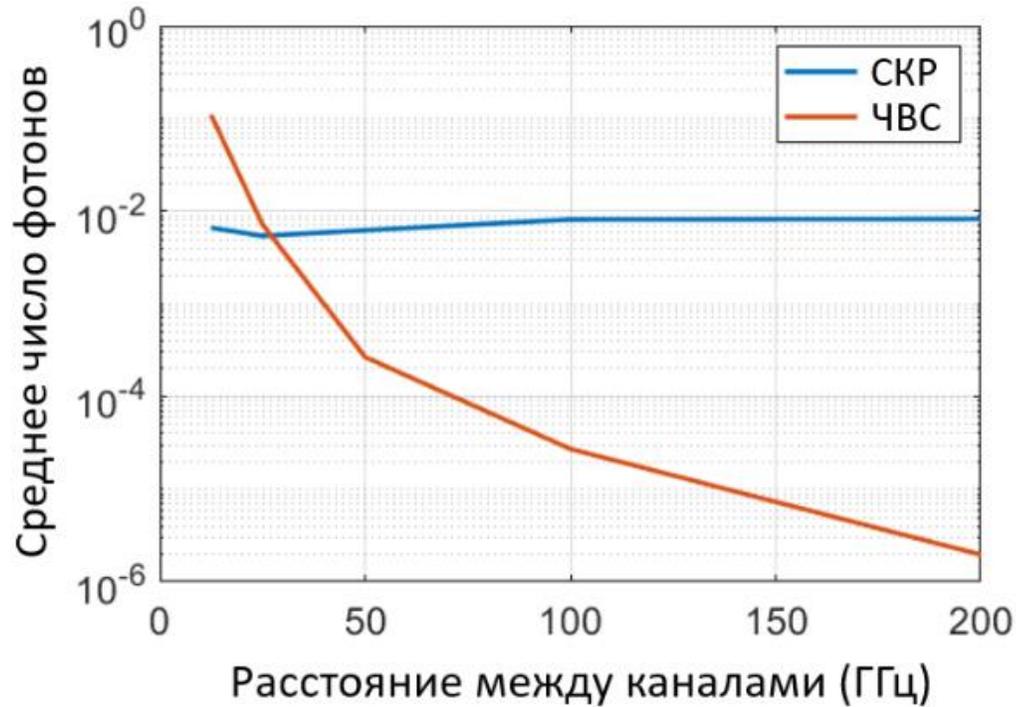
# Математическое моделирование



Результаты моделирования для 8 каналов с чувствительностью  $-28$  дБм с квантовым каналом на длине волны  $1550.92$  нм. Полоса пропускания квантового канала  $10$  ГГц.

Шум СКР существенно преобладает над остальными видами шумов.

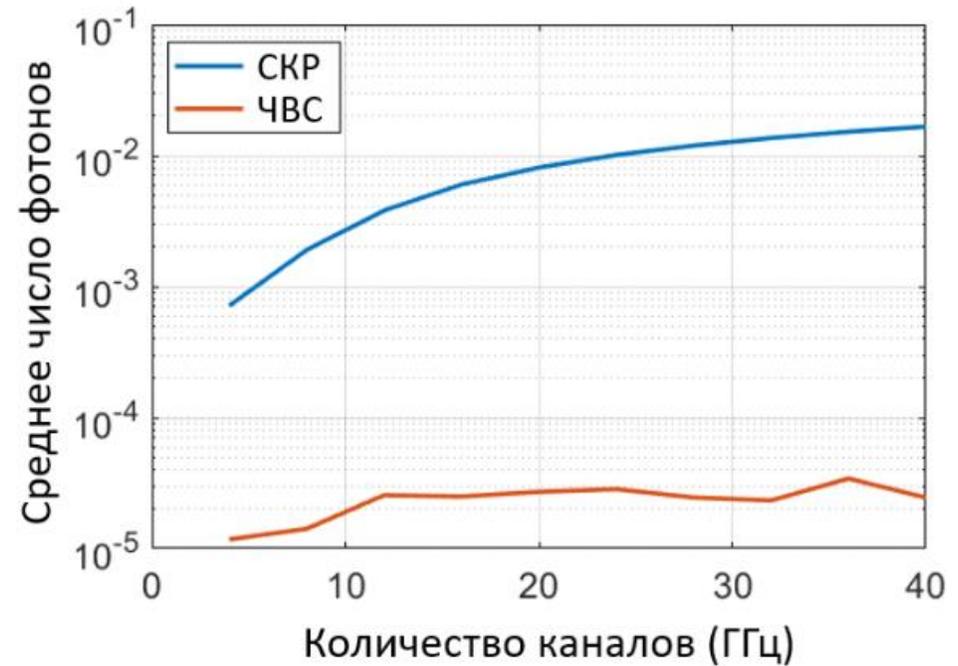
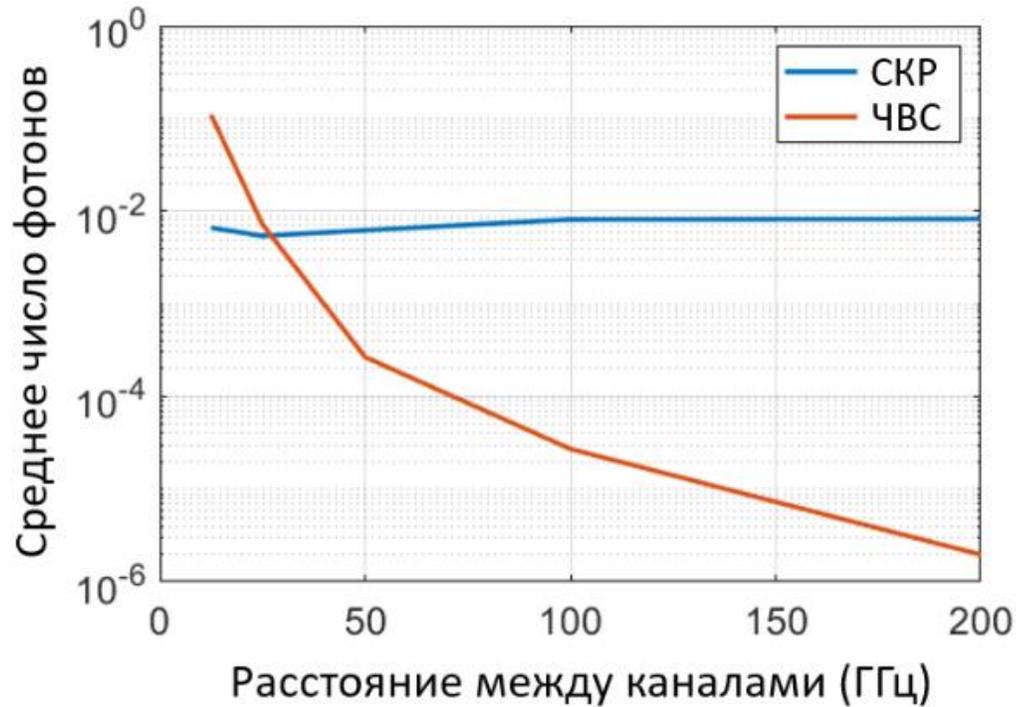
# Математическое моделирование



Результаты моделирования при различном количестве каналов и расстоянием между ними в частотной сетке. Информационные каналы с чувствительностью приемника -28 дБм. Квантовый канал на длине волны 1550.92 нм. Полоса пропускания квантового канала 10 ГГц.

Шум ЧВС становится существенным и начинает преобладать при использовании очень плотных частотных сеток.

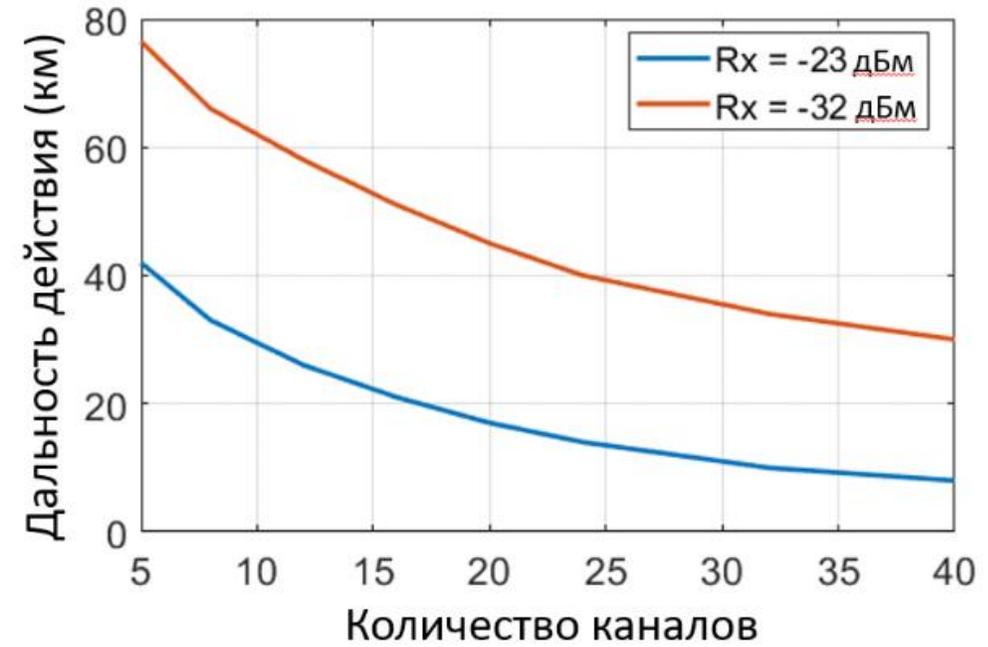
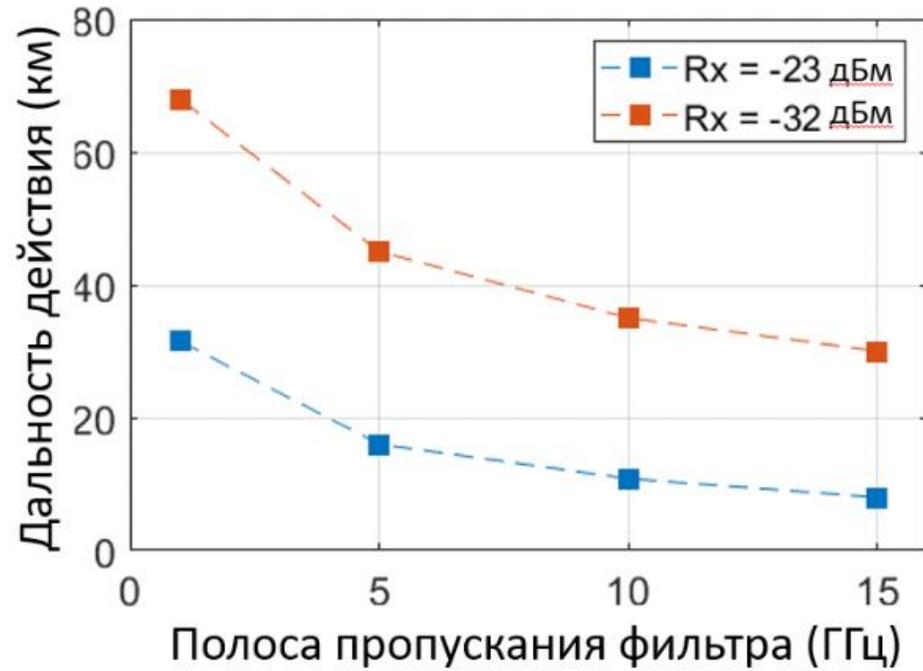
# Математическое моделирование



Результаты моделирования при различном количестве каналов и расстоянием между ними в частотной сетке. Информационные каналы с чувствительностью приемника -28 дБм. Квантовый канал на длине волны 1550.92 нм. Полоса пропускания квантового канала 10 ГГц.

Шум ЧВС становится существенным и начинает преобладать при использовании очень плотных частотных сеток.

# Математическое моделирование



Узкополосные фильтры ВР необходимы для реализации совместного распространения. При