

# Оптический журнал

Оптическое приборостроение

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-66-74

УДК 535.8, 535.01

## Применение оптимизационных методов для решения задачи минимизации шумов в системах квантового распределения ключей при их интегрировании в волоконно-оптические линии связи с применением технологии плотного мультиплексирования по длине волны

Ангелина Дмитриевна Тарабрина<sup>1✉</sup>, Даниил Вадимович Тупяков<sup>2</sup>,  
Ирина Олеговна Воронцова<sup>3</sup>, Роман Константинович Гончаров<sup>4</sup>,  
Александр Вячеславович Зиновьев<sup>5</sup>, Семен Владимирович Смирнов<sup>6</sup>,  
Федор Дмитриевич Киселев<sup>7</sup>, Владимир Ильич Егоров<sup>8</sup>

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

6, 7, 8 ООО «Кванттелеком», Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>[adtarabrina@itmo.ru](mailto:adtarabrina@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7114-8438>

<sup>2</sup>[tupryakov.daniil@gmail.com](mailto:tupryakov.daniil@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-8804-6569>

<sup>3</sup>[iovorontsova@itmo.ru](mailto:iovorontsova@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9861-0816>

<sup>4</sup>[rkgoncharov@itmo.ru](mailto:rkgoncharov@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0002-9081-8900>

<sup>5</sup>[avzinov@itmo.ru](mailto:avzinov@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0789-998X>

<sup>6</sup>[s.smirnov@itmo.ru](mailto:s.smirnov@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0002-8562-2452>

<sup>7</sup>[fdkiselev@itmo.ru](mailto:fdkiselev@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0002-3894-511X>

<sup>8</sup>[viegorov@itmo.ru](mailto:viegorov@itmo.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0767-0261>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Применимость оптимизационного алгоритма имитации отжига в решении задачи поиска оптимальных конфигураций расположения квантового и информационных каналов для проведения успешного сеанса квантового распределения ключа при рассмотрении сеток с различными частотными расстояниями между каналами, а именно 12,5, 25, 50 и 100 ГГц. Целью данной работы являются оптимизация поиска схем расположения квантового и информационных каналов на сетке с плотным мультиплексированием по длине волны посредством применения оптимизационных методов, основанных на анализе влияния канальных шумов на проведение сеанса квантового распределения ключа, и исследование этих методов. **Метод.** Значения мощности, характерные для квантовых сигналов, существенно ниже, чем для классических. По этой причине шум от информационных каналов при распространении в одном волокне с квантовыми сильно снижает работоспособность систем квантового распределения ключа. Решить данную проблему можно, уменьшив уровень шума в канале, что достигается посредством выбора и использования оптимального спектрального размещения каналов. Поиск таких схем расположения каналов, называемых в работе конфигурациями, может быть решен несколькими способами. К числу последних можно отнести так называемый метод обоснованного предположения, а также подход, заключающийся в решении задачи оптимизации с помощью применения оптимизационного алгоритма имитации отжига, которые и являются предметом исследования данной работы. Проведено сравнение результатов применения этого метода с аналогичными, полученными методом обоснованного предположения. В работе приведены описания указанных выше методов и их интерпретирование в контексте решения задач текущей работы и математические

модели расчета шумов спонтанного комбинационного рассеяния, четырехволнового смешения и линейных перекрестных помех. Описаны оптимальные схемы расположения квантового и информационных каналов на сетке с плотным мультиплексированием по длине волны (конфигурации), полученные двумя указанными методами. Оптимальными признавались конфигурации, у которых суммарное значение всех учитываемых в математической модели канальных шумов принимало наименьшие значения. **Основные результаты.** В работе описаны оптимальные конфигурации, полученные методами имитации отжига и обоснованного предположения. Показано, что в случаях, когда основной вклад в суммарные потери приходится на спонтанное комбинационное рассеяние, применим метод обоснованного предположения, при этом информационные каналы следует располагать в соответствии с графиком сечения комбинационного рассеяния. В случаях, когда вклад четырехволнового смешения соизмерим и превышает спонтанное комбинационное рассеяние, предпочтительно использование алгоритма имитации отжига для решения задачи поиска оптимальных конфигураций, при этом информационные каналы располагаются на удалении от квантового: чем меньше шаг сетки, тем дальше информационные каналы располагаются от квантового для оптимальных конфигураций, а увеличение числа каналов приводит к уменьшению этого расстояния разнесения внутри сетки с фиксированным шагом. **Практическая значимость.** Практические реализации волоконно-оптических линий связи в настоящее время неразрывно связаны с применением технологий мультиплексирования, в частности плотного мультиплексирования каналов с разделением по длине волны, с целью удовлетворения постоянно растущей потребности в увеличении информационной емкости каналов связи и построения квантовых сетей. Выделение отдельных волокон под системы квантового распределения ключа не является оптимальным, поэтому необходима интеграция известных технологий мультиплексирования каналов в системы квантового распределения ключа. Однако вследствие присутствия в волоконно-оптических линиях связи нежелательных канальных шумов наблюдается быстрый рост коэффициента квантовых ошибок, что в итоге приводит к невозможности осуществить успешный сеанс квантового распределения ключа. Это обуславливает необходимость аккуратного и корректного анализа вкладов канальных шумов с целью их минимизации путем подбора оптимального расположения классических и квантовых каналов на частотной сетке.

**Ключевые слова:** квантовое распределение ключа, мультиплексирование с разделением по длине волны, метод обоснованного предположения, алгоритм имитации отжига, волоконно-оптические линии связи

**Благодарность:** проект реализуется при финансовой поддержке ОАО «РЖД».

**Ссылка для цитирования:** Тарабрина А.Д., Тупяков Д.В., Воронцова И.О., Гончаров Р.К., Зиновьев А.В., Смирнов С.В., Киселев Ф.Д., Егоров В.И. Применение оптимизационных методов для решения задачи минимизации шумов в системах квантового распределения ключей при их интегрировании в волоконно-оптические линии связи с применением технологии плотного мультиплексирования по длине волны // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 66–74. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-66-74

**Коды OCIS:** 270.5565, 270.5568, 270.558

## ВВЕДЕНИЕ

Системы квантового распределения ключей (КРК) приобретают все большую популярность, поскольку они могут обеспечивать безопасность передачи информации, гарантированную фундаментальными законами физики [1]. Как правило, для передачи квантовых сигналов используют отдельное, так называемое темное, волокно, которое отводится в качестве резервного. Однако с ростом трафика темные волокна задействуют для увеличения пропускной способности сети. Следует также

отметить, что прокладывать отдельное волокно под квантовые каналы дорого и не всегда возможно, поэтому перспективным является распространение информационных и квантовых каналов в одном волокне с использованием мультиплексирования по длине волны [2].

Значения мощности, характерные для квантовых сигналов, существенно ниже, чем для классических. По этой причине шум от информационных каналов при распространении в одном волокне с квантовыми сильно снижает производительность систем КРК. Ранее

было показано [3], что основными источниками канальных шумов при этом являются спонтанное комбинационное рассеяние (СКР), четырехволновое смещение (ЧВС) и линейные перекрестные помехи (ЛПП). Именно эти эффекты учитываются в данной работе при проведении численного моделирования. Добиться увеличения производительности систем КРК при этом можно посредством выбора и использования оптимального спектрального размещения каналов. Поиск таких схем расположения каналов, далее называемых конфигурациями, может быть осуществлен несколькими способами. К числу последних можно отнести так называемый метод обоснованного предположения, а также подход, заключающийся в решении задачи оптимизации с помощью применения оптимизационного алгоритма имитации отжига, которые и являются предметом исследования данной работы.

В настоящей работе методами численного моделирования проведено исследование применимости оптимизационного алгоритма имитации отжига для решения задачи поиска оптимальных конфигураций расположения квантового и информационных каналов в случае использования технологии плотного мультиплексирования каналов по длине волны (*dense wavelength division multiplexing* — DWDM) и рассмотрения сеток с различными частотными расстояниями между каналами, а именно 12,5, 25, 50 и 100 ГГц. Для подтверждения корректности работы алгоритма имитации отжига в применении к решению поставленной задачи оптимизации поиска конфигураций, а также с целью получения качественных выводов относительно работы алгоритма проведено сравнение полученных результатов с аналогичными, полученными методом обоснованного предположения. В работе приведены описания указанных выше методов и математические модели расчета шумов СКР, ЧВС и ЛПП. В результате получены оптимальные конфигурации расположения квантового и информационных каналов на сетке DWDM. Оптимальными признавались конфигурации, в которых суммарное значение всех учитываемых в модели канальных шумов принимало наименьшие значения. По результатам были сформулированы основные выводы о применимости рассматриваемых методов для поиска

оптимальных конфигураций. Таким образом, цель данной работы заключается в оптимизации поиска схем расположения квантового и информационных каналов на сетке DWDM посредством применения оптимизационных методов, основанных на анализе влияния канальных шумов на проведение сеанса КРК, и в исследовании этих методов.

## ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ КВАНТОВОГО И ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ НА СЕТКЕ С ПЛОТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

В данной работе рассматриваются два подхода к поиску оптимального спектрального расположения каналов: метод обоснованного предположения, где выбор каналов осуществляется, основываясь на исходных данных о спектре спонтанного комбинационного рассеяния, и подход с использованием алгоритма имитации отжига.

### Метод обоснованного предположения

Расположение каналов на сетке DWDM существенно влияет на характер поведения шумов в канале. Ранее было продемонстрировано, что наибольший вклад при этом приходится на СКР [4]. По этой причине рассматриваемые конфигурации в первую очередь подбирались таким образом, чтобы минимизировать именно данный вид канальных шумов.

В работе [5] авторами предлагается располагать квантовый канал между группами классических и размещать квантовые каналы на меньших длинах волн, а классические — на больших. В основе данного подхода лежит анализ графика сечения СКР: последний принимает наименьшие значения в областях, смещенных в область значений, больших (правее) и меньших (левее) длины волны накачки. Однако следует отметить, что в указанной работе используется сетка с шагом 200 ГГц, что не вполне соответствует нашему случаю. Тем не менее, проделывая аналогичную процедуру, подбирались конфигурации, соответствующие нашим условиям. Квантовому каналу присваивались значения длин волн из рассматриваемого С-диапазона

DWDM с шагом сетки 100 ГГц, в то время как классические каналы размещались на длинах волн в соответствии с наблюдениями, приведенными выше. В каждом случае была рассчитана суммарная мощность трех видов канальных шумов — СКР, ЧВС и ЛПП. Оптимальной признавалась конфигурация, при которой максимально задействованы области, соответствующие наименьшим значениям графика сечения СКР.

Такой метод применим в ограниченном числе случаев. Для того чтобы расширить возможности подбора оптимальных конфигураций, предлагается воспользоваться алгоритмом имитации отжига.

### Метод имитации отжига

Для поиска оптимального решения любой задачи можно использовать метод прямого перебора вариантов. Однако зачастую их количество очень велико, а полный перебор всех решений связан с большими затратами времени и ресурсов. В таких случаях наиболее эффективными становятся алгоритмы оптимизации, которые позволяют при существенном сокращении вычислительной сложности получить некоторое хорошее решение, близкое к оптимальному с заданной точностью.

Метод имитации отжига — это итеративный алгоритм оптимизации, относящийся к классу стохастических, который применяется для поиска глобального экстремума некоторой целевой функции. В общем виде алгоритм для поиска глобального минимума выглядит следующим образом:

$E : S \rightarrow R$  целевая функция,

$F : S \rightarrow S$  закон получения кандидата в новое состояние,

$T : N \rightarrow R$  закон изменения температуры (должен быть убывающим),

$RAND : (0, 1) \rightarrow (0, 1)$  функция, случайно выбирающая число на интервале от 0 до 1.

#### НАЧАЛО алгоритма

- Задается максимальное  $t_{\max}$  и минимальное  $t_{\min}$  значения температуры.

- Задается произвольное начальное состояние  $S_1$ .

- Задается начальное значение температуры  $t_1 = t_{\max}$ .

- Пока  $t_i > t_{\min}$

- Создается кандидат в состояние  $S_c = F(S_{i-1})$  на основании предыдущего состояния  $S_{i-1}$ .

- Вычисляется разность целевых функций  $\Delta E = E(S_{i-1}) - E(S_c)$  в состояниях  $S_{i-1}$  и  $S_c$ .

- Если  $\Delta E \geq 0$ , тогда  $S_i = S_c$

- Если  $\Delta E < 0$ , тогда переход  $S_i = S_c$  осуществляется с вероятностью  $P(\Delta E) = \exp(\Delta E / t_i)$ .

- Понижаем температуру  $t_{i+1} = T(i)$ .

- После достижения минимальной температуры получаем последнее состояние  $S$ , которое будет искомым.

**КОНЕЦ** алгоритма.

Для поиска оптимального взаимного расположения классических и квантовых каналов в качестве целевой функции выбирается суммарная мощность шумовых сигналов и оптимальным считается состояние с минимальным значением целевой функции. В этом случае условие перехода в состояние-кандидат выглядит следующим образом:

Если  $\Delta E \geq 0$  (шум в старом состоянии больше, чем в новом), то это новое состояние становится исходным, иначе (когда в новом состоянии шума больше, чем в старом), если  $\exp(\Delta E / t_i) > RAND(0, 1)$ , то новое состояние становится исходным. Значит, даже в случае худшего с точки зрения шума состояния оно может быть принято алгоритмом как подходящее. Это дает возможность выхода из локальных минимумов на начальных этапах, так как температура высокая и, следовательно, высока вероятность признания подходящими состояний с более высоким значением шума. В процессе оптимизации температура постепенно снижается, и в конце вероятность «перепрыгнуть» на плохое состояние стремится к нулю. Таким образом, определяется искомый глобальный минимум и вместе с ним состояние, соответствующее оптимальной схеме расположения классических и квантового каналов.

### ИСТОЧНИКИ КАНАЛЬНЫХ ШУМОВ

При распространении по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) квантовый сигнал неизбежно претерпевает потери, вызванные шумовыми сигналами, образованными одновременным распространением мощных информационных сигналов. В данной статье рассмотрены три эффекта, вносящие основной вклад в общий шум, а именно СКР, ЧВС и ЛПП.

## Спонтанное комбинационное рассеяние

Комбинационное рассеяние — нелинейный эффект третьего порядка, приводящий к появлению в ВОЛС широкополосного шума. Суть явления заключается в неупругом рассеянии фотона на оптическом фононе, возникающем из-за конечности времени отклика нелинейной поляризованности среды третьего порядка. Влияние СКР на квантовые каналы зависит от относительного спектрального сдвига между квантовыми и информационными каналами и является существенным для систем КРК [6, 7], однако, анализируя спектр СКР (уровень шума СКР принимает наименьшие значения с двух сторон от длины волны накачки), шум можно минимизировать посредством подбора конфигураций расположения информационных и квантовых каналов [5].

Спонтанное комбинационное рассеяние порождает шум, присутствующий в прямом и обратном направлениях распространения сигналов в оптоволоконном канале. При однодirectionalном распространении спектрально уплотненных каналов возникает прямое СКР, а при встречном — обратное. Однако в данной работе рассматривается ситуация, когда сигналы в квантовом и информационных каналах распространяются в оптическом волокне в одном направлении.

В случае прямого СКР шум, вызванный присутствием классических каналов, определяется, как описано в работах [8, 9]

$$P_{\text{ram},f} = P_{\text{out}} L \sum_{c=1}^{N_{\text{ch}}} \rho(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $P_{\text{out}}$  — выходная мощность из волокна одного классического канала,  $L$  — длина оптического волокна,  $N_{\text{ch}}$  — количество информационных каналов в системе DWDM,  $\rho(\lambda_c, \lambda_q)$  — нормированное сечение рассеяния длин волн информационных ( $\lambda_c$ ) и квантового ( $\lambda_q$ ) каналов,  $\Delta\lambda$  — полоса пропускания системы фильтрации квантовых каналов.

## Четырехвольновое смешение

Следующим нелинейным эффектом третьего порядка является ЧВС. В результате этого эффекта формируются суммарные или разностные относительно частот информационных каналов шумовые частоты [10], которые могут

попадать в квантовый канал [11]. Как и в случае СКР, влияние эффекта ЧВС классических каналов на квантовый может быть минимизировано путем правильного выбора классического разделения каналов или регулированием выполнения условия фазового синхронизма [8].

При использовании однородной сетки каналов квантовый канал неизбежно попадает в спектральную полосу продуктов ЧВС. Для трех сигналов накачки с частотами  $f_i$ ,  $f_j$  и  $f_k$  значение пиковой мощности  $P_{ijk}$  сигнала, сгенерированного на новой частоте  $f_i + f_j - f_k$ , определяется как [8]

$$P_{ijk} = \eta \gamma^2 D^2 p^2 \exp(-\xi L) \times \left( \frac{(1 - \exp(-\xi L))^2}{9\xi^2} \right) P_i P_j P_k. \quad (2)$$

В уравнении (2)  $D$  — параметр вырождения,  $P_{i(j,k)}$  и  $f_{i(j,k)}$  — входные значения мощности и оптических частот взаимодействующих полей соответственно,  $\gamma$  — нелинейный коэффициент третьего порядка,  $\xi$  — коэффициент потерь,  $\eta$  — эффективность фазового синхронизма, полученная как

$$\eta = \xi^2 / (\xi^2 + \Delta\beta^2) \times \left[ 1 + 4 \exp(-\xi L) \frac{\sin^2 \left( \frac{\Delta\beta L}{2} \right)}{(1 - \exp(-\xi L))^2} \right], \quad (3)$$

которая определяется фактором совпадения фаз  $\Delta\beta$  [8]

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \times \left[ D_c + \frac{dD_c}{d\lambda} \left( \frac{\lambda^2}{c} \right) (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (4)$$

соответственно. Здесь  $D_c$  и  $dD_c/d\lambda$  — параметры дисперсии оптического волокна,  $\lambda$  — длина волны результирующего сигнала ЧВС.

Таким образом, результирующая мощность шума, возникающего в оптическом волокне вследствие эффекта ЧВС<sup>1</sup>, может быть полу-

<sup>1</sup> *four-wave mixing* — FWM.

чена как сумма всех произведений результирующих сигналов ЧВС с частотами, совпадающими с частотой квантового канала  $f_q$ ,

$$P_{\text{FWM}} = \sum P_{ijk}, f_i + f_j - f_k = f_q. \quad (5)$$

Подбор оптимальных конфигураций спектрального расположения каналов позволяет минимизировать количество продуктов ЧВС, попадающих в квантовый канал.

#### Линейные перекрестные помехи

Линейные перекрестные помехи<sup>1</sup> связаны с попаданием части излучения, соответствующего нежелательным длинам волн, на фотодетектор [12] в результате неидеальности демультиплексора. Утечка мощности из фильтра в квантовый канал может быть определена следующим образом:

$$P_{\text{LCXT}} = P_{\text{out}} - \text{ISOL}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{out}}$  (дБм) — выходная мощность одного классического канала,  $\text{ISOL}$  (дБ) — неэффективность фильтра, отделяющего квантовый канал от классического.

#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе дальнейшей работы методами численного моделирования было осуществлено одновременное распространение в одном волокне 10 классических и одного квантового каналов. Для моделирования была использована сетка частот стандартных DWDM-технологий с расстоянием между несущими 100 ГГц, которые вычисляются по формуле

$$v_n = 191,6 + Nv, \quad (7)$$

где  $N$  — номер канала,  $v$  — шаг сетки.

Оптимизация спектрального расположения 10 информационных и одного квантового каналов на сетке 100 ГГц была проведена двумя названными выше методами. Конфигурация, полученная с использованием алгоритма имитации отжига, не отличается от построенной в предположении того, что оптимальным является размещение информационных каналов справа и слева от квантового с целью мак-

симально задействовать области минимума графика сечения СКР (рис. 1).

Перейдем к поиску оптимальных конфигураций в случае большего числа информационных каналов. Когда области минимума сечения СКР справа и слева от длины волны накачки становятся переполнены, задействованной оказывается третья область минимума графика сечения СКР.

В системах КРК, интегрированных в ВОЛС DWDM с упомянутыми выше параметрами, вклад эффекта ЧВС в общий шум канала является несущественным. Однако по мере уменьшения частотных расстояний между каналами наблюдается рост мощности ЧВС. В связи с этим далее рассмотрим соотношение ЧВС и СКР в системах с частотными расстояниями между каналами 50, 25, 12,5 ГГц.



Рис. 1. Конфигурация, полученная с применением метода обоснованного предположения и алгоритма имитации отжига

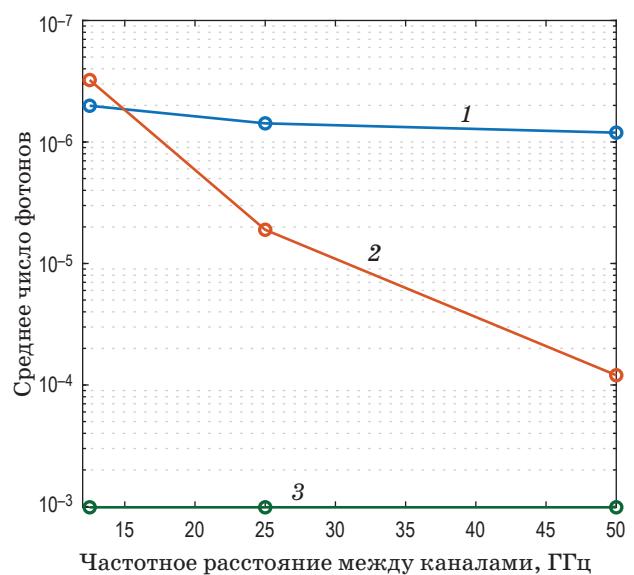
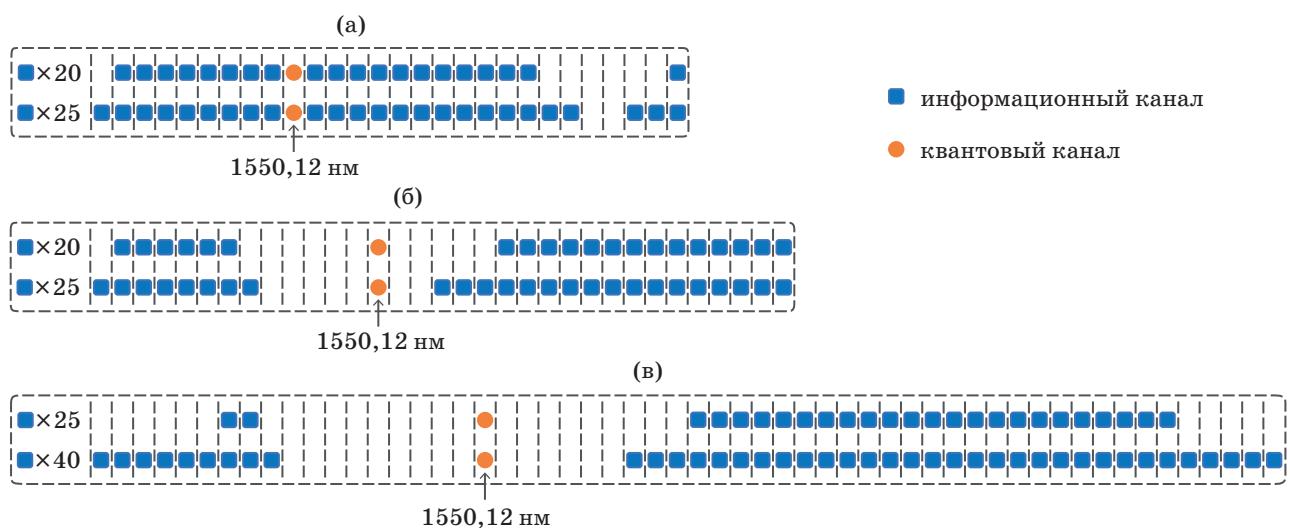


Рис. 2. Сравнение мощности трех видов шумов в зависимости от частотного расстояния между каналами ( $L = 50$  км). СКР — 1, ЧВС — 2, ЛПП — 3

<sup>1</sup> linear channel crosstalk — LCXT.



**Рис. 3.** Схематическое представление предлагаемых конфигураций для сеток с частотными расстояниями между каналами 100 (а), 25 (б) и 12,5 (в) ГГц

Из рис. 2 видно, что при уменьшении шага сетки до 50 ГГц уровень мощности ЧВС и соответствующего шума по-прежнему меньше, чем СКР. Однако при дальнейшем уменьшении шага до 25 ГГц превосходство значения мощности СКР над ЧВС уменьшается и не превышает один порядок, а при шаге сетки 12,5 ГГц вклад ЧВС становится сравним с СКР.

Два последних варианта (сетки с частотными расстояниями между каналами 12,5 и 25 ГГц) были проанализированы с применением алгоритма имитации отжига. Результаты моделирования конфигураций с квантовым каналом, расположенным на фиксированной длине волны 1550,12 нм, и разным количеством информационных каналов с частотными расстояниями между каналами 25 и 12,5 ГГц представлены на рис. 3.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что в результате работы алгоритма расположение информационных каналов выбирается таким образом, что ближайшие к квантовому каналу частотные слоты остаются не занятыми: отступ составляет порядка 1 нм. Из этого можно заключить, что наибольший вклад в шум ЧВС вносят информационные каналы, расположенные вплотную к квантовому. При этом чем меньше шаг сетки, тем дальше информационные каналы располагаются от квантового в оптимальных конфигурациях. В свою очередь увеличение

числа информационных каналов для каждого из значений частотного расстояния между каналами приводит к уменьшению этого расстояния между квантовым и информационными каналами во всех рассмотренных случаях. Тем не менее, в остальном тенденция к расположению информационных каналов таким образом, чтобы минимизировать шум СКР, сохраняется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами численного моделирования проведено исследование применимости оптимизационного алгоритма имитации отжига для решения задачи поиска оптимальных конфигураций расположения квантового и информационных каналов при рассмотрении DWDM-сеток с различными частотными расстояниями между каналами (12,5, 25, 50 и 100 ГГц). В результате показано, что в случаях, когда основной вклад в суммарные потери приходится на СКР, применим метод обоснованного предположения: информационные каналы следует располагать в соответствии с графиком сечения комбинационного рассеяния. В случаях, когда вклад ЧВС соизмерим и превышает СКР, предпочтительно использование алгоритма имитации отжига для решения задачи поиска оптимальных конфигураций. Анализ результатов показал, что при этом информационные каналы рас-

полагаются на удалении от квантового: чем меньше шаг сетки, тем дальше информационные каналы располагаются от квантового в оптимальных конфигурациях, а увеличение числа каналов приводит к уменьшению

этого расстояния разнесения внутри сетки с фиксированным шагом. Рассмотрение конфигураций с несколькими квантовыми каналами открывает потенциал для будущих исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // Rev. Modern Phys. 2002. V. 74. № 1. P. 145. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.145>
2. Townsend P.D. Simultaneous quantum cryptographic key distribution and conventional data transmission over installed fibre using wavelength-division multiplexing // Electron. Lett. 1997. V. 33. № 3. P. 188–190. DOI: 10.1049/el:19970147
3. Kumar R., Qin H., Alléaume R. Coexistence of continuous variable QKD with intense DWDM classical channels // New J. Phys. 2015. V. 17. № 4. P. 043027. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/4/043027>
4. Kiselev F., Veselkova N., Goncharov R., Egorov V. A theoretical study of subcarrier-wave quantum key distribution system integration with an optical transport network utilizing dense wavelength division multiplexing // J. Phys. B: Atomic, Molecular and Opt. Phys. 2021. V. 54. № 13. P. 135502. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/ac076a>
5. Bahrani S., Razavi M., Salehi J.A. Wavelength assignment in hybrid quantum-classical networks // Scientific Reports. 2018. V. 8. № 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21418-6>
6. Lin R., Chen J. Minimizing spontaneous Raman scattering noise for quantum key distribution in WDM networks // 2021 Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibit. (OFC). San Francisco, CA, USA. June 6–10 2021. P. 1–3.
7. Cai C., Sun Y., Ji Y. Intercore spontaneous Raman scattering impact on quantum key distribution in multicore fiber // New J. Phys. 2020. V. 22. № 8. P. 083020. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aba023>
8. Mlejnek M., Kaliteevskiy N., Nolan D. Reducing spontaneous Raman scattering noise in high quantum bit rate QKD systems over optical fiber // arXiv preprint. 2017. arXiv:1712.05891. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.05891>
9. Eraerds P., Walenta N., Legré M., et al. Quantum key distribution and 1 Gbps data encryption over a single fibre // New J. Phys. 2010. V. 12. № 6. P. 063027. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/12/6/063027>
10. Boyd R.W. Nonlinear optics. 4th ed. San Diego, CA: Academic Press, 2020. 634 p.
11. Lin Q., Yaman F., Agrawal G.P. Photon-pair generation in optical fibers through four-wave mixing: Role of Raman scattering and pump polarization // Phys. Rev. A — Atomic, Molecular, and Optical Phys. 2007. V. 75. № 2. P. 023803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.023803>
12. Hill A., Payne D. Linear crosstalk in wavelength-division-multiplexed optical-fiber transmission systems // J. Lightwave Technol. 1985. V. 3. № 3. P. 643–651. DOI: 10.1109/JLT.1985.1074232

## АВТОРЫ

**Ангелина Дмитриевна Тарабрина** — студент, лаборант, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-7114-8438>; [adtarabrina@itmo.ru](mailto:adtarabrina@itmo.ru)

**Даниил Вадимович Тупяков** — студент, лаборант, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8804-6569>; [tupyakov.daniil@gmail.com](mailto:tupyakov.daniil@gmail.com)

**Ирина Олеговна Воронцова** — студент, инженер, Лидирующий исследовательский центр «Национальный

## AUTHORS

**Angelina D. Tarabrina** — Student, Laboratory assistant, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-7114-8438>; [adtarabrina@itmo.ru](mailto:adtarabrina@itmo.ru)

**Daniil V. Tupyakov** — Student, Laboratory Assistant, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8804-6569>; [tupyakov.daniil@gmail.com](mailto:tupyakov.daniil@gmail.com)

**Irina O. Vorontsova** — Student, Engineer, Leading research center «National center for quantum internet»,

центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID 57208314288; <https://orcid.org/0000-0001-9861-0816>; [iovorontsova@itmo.ru](mailto:iovorontsova@itmo.ru)

**Роман Константинович Гончаров** — студент, инженер, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID 57208314288; <https://orcid.org/0000-0002-9081-8900>; [rkgoncharov@itmo.ru](mailto:rkgoncharov@itmo.ru)

**Александр Вячеславович Зиновьев** — студент, инженер, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0789-998X>; [avzinovev@itmo.ru](mailto:avzinovev@itmo.ru)

**Семен Владимирович Смирнов** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; научный сотрудник, ООО «Кванттелеком», Санкт-Петербург, 199178, Россия; Scopus ID 57209025430; <https://orcid.org/0000-0002-8562-2452>; [s.smirnov@itmo.ru](mailto:s.smirnov@itmo.ru)

**Федор Дмитриевич Киселев** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; старший научный сотрудник, ООО «Кванттелеком», Санкт-Петербург, 199178, Россия; Scopus ID 57214097409; <https://orcid.org/0000-0002-3894-511X>; [fdkiselev@itmo.ru](mailto:fdkiselev@itmo.ru)

**Владимир Ильич Егоров** — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Лидирующий исследовательский центр «Национальный центр квантового интернета», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; начальник отдела научных исследований, ООО «Кванттелеком», Санкт-Петербург, 199178, Россия; Scopus ID 55429352600; <https://orcid.org/0000-0003-0767-0261>; [viegorov@itmo.ru](mailto:viegorov@itmo.ru)

ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID 57208314288; <https://orcid.org/0000-0001-9861-0816>; [iovorontsova@itmo.ru](mailto:iovorontsova@itmo.ru)

**Roman K. Goncharov** — Student, Engineer, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID 57208314288; <https://orcid.org/0000-0002-9081-8900>; [rkgoncharov@itmo.ru](mailto:rkgoncharov@itmo.ru)

**Aleksander V. Zinoviev** — Student, Engineer, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0789-998X>; [avzinovev@itmo.ru](mailto:avzinovev@itmo.ru)

**Semyon V. Smirnov** — PhD in Physics, Senior Researcher, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; Researcher, LLC «Quanttelecom», Saint-Petersburg, 199178, Russia; Scopus ID 57209025430; <https://orcid.org/0000-0002-8562-2452>; [s.smirnov@itmo.ru](mailto:s.smirnov@itmo.ru)

**Fedor D. Kiselev** — PhD in Physics, Senior Researcher, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; Senior Researcher, LLC «Quanttelecom», Saint-Petersburg, 199178, Russia; Scopus ID 57214097409; <https://orcid.org/0000-0002-3894-511X>; [fdkiselev@itmo.ru](mailto:fdkiselev@itmo.ru)

**Vladimir I. Egorov** — PhD in Physics, Leading Researcher, Leading research center «National center for quantum internet», ITMO University, Saint-Petersburg, 199034, Russia; Head of the Scientific Research Department, LLC «Quanttelecom», Saint-Petersburg, 199178, Russia; Scopus ID 55429352600; <https://orcid.org/0000-0003-0767-0261>; [viegorov@itmo.ru](mailto:viegorov@itmo.ru)