

## Обзор технологии квантового распределения ключей на непрерывных переменных в свободном пространстве

Д.А. Каргина<sup>1</sup>, Р.К. Гончаров<sup>1,2</sup>, М.В. Дашков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Лаборатория квантовых коммуникаций,  
197101, Россия, г. Санкт-Петербург, л. Кадетская, д. 3;

<sup>2</sup> ООО «СМАРТС-Кванттелеком»,

199178, Россия, г. Санкт-Петербург, б. линия В.О., д. 59, корп. 1, литер Б, пом. 17/6Н;

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ),  
443090, Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 77

### Аннотация

Квантовое распределение ключей в свободном пространстве открывает новые возможности для разработки систем квантовых коммуникаций, облегчая процесс развертывания квантовых сетей в физически труднодоступных зонах и на широких ландшафтах без использования оптического волокна. Этот подход позволяет преодолевать ограничения, связанные с прокладкой кабелей, и обеспечивает более гибкую инфраструктуру для передачи квантовой информации. Вместе с применением протоколов на непрерывных переменных возможно организовать безопасную передачу информации с помощью оптимальных масштабируемых систем связи, несмотря на пагубное воздействие окружающей среды. В данной работе обсуждаются основные достижения и технические аспекты реализации квантового распределения ключей на непрерывных переменных в атмосферном канале с рассмотрением основных воздействий атмосферы, таких как турбулентность, рассеяние и блуждание луча. Представлено текущее состояние конструируемых квантовое распределение ключей на непрерывных переменных в открытом пространстве и их практические реализации, включая успешные экспериментальные проекты и прототипы. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития технологий, включая интеграцию с существующими телекоммуникационными сетями и потенциальные области применения.

**Ключевые слова:** квантовое распределение ключей, атмосферные квантовые каналы, турбулентность, непрерывные переменные.

**Цитирование:** Каргина, Д.А. Обзор технологии квантового распределения ключей на непрерывных переменных в свободном пространстве / Д.А. Каргина, Р.К. Гончаров, М.В. Дашков // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 1. – 1684 – DOI: 10.18287/COJ1684.

**Citation:** Kargina DA, Goncharov RK, Dashkov MV. Overview of free-space continuous-variable quantum key distribution technology. Computer Optics 2026; 50(1): 1684. DOI: 10.18287/COJ1684.

### Введение

Основная цель квантового распределения ключей (КРК) – генерация стойкого симметричного ключа между удаленными легитимными сторонами через незащищенный канал связи. Под незащищенностью обычно понимают физическую доступность переданных состояний третьей стороне, которая способна проводить все разрешенные квантовой механикой манипуляции с квантовым состоянием в канале с целью получить информацию о ключе. Однако любые взаимодействия с исходным квантовым состоянием будут его искажать, что не останется незамеченным с точки зрения легитимных пользователей (увеличивается уровень ошибок). Таким образом, КРК при соблюдении необходимых условий способен гарантировать защищенность информации от подслушивания, а ключ, сгенерированный в таком сеансе связи, может считаться стойким при наличии соответствующего доказательства для конкретного протокола.

Для масштабирования квантовых сетей для повсеместного использования требуется гибридизация, подразумевающая соединение различных типов сетей: как на основе волоконно-оптических линий связи, которые изучены в большей степени [1–3], так и с использованием технологии связи через свободное пространство, требующей более глубокого теоретического анализа и новых инженерных решений. Развитие в этом ключе открывает новые возможности к созданию межконтинентальной квантовой сети [4]. Такая масштабная сеть может быть нацелена на реализацию квантового интернета, соединяющего широкое разнообразие клиентов: частные и публичные лица, институты и компании, правительства и государственные учреждения. На данный момент концепция квантового интернета представляется недостаточно четко сформулированной, но принимаются попытки описать общую организацию такой сети, оказывающейся отличной от привычного интернета [5, 6].

С момента своего появления основным направлением развития систем квантовых коммуникаций в открытом пространстве стала спутниковая связь. Этот интерес был вызван необходимостью поиска альтернативы дальнепротяженным волоконно-оптическим каналам, в которых передача квантового ключа на расстояния более 500 км затруднена сильным затуханием сигнала [7, 8]. Использование околоземного спутника в качестве одного из участников связи или промежуточного узла между двумя наземными станциями открывает возможность передачи квантового ключа на расстояния, превышающие 1000 км, благодаря отсутствию сильного затухания квантового сигнала в верхних слоях атмосферы [9–11]. Разработка квантовых сетей в открытом пространстве позволяет обеспечить безопасный сеанс связи между разнесенными в пространстве объектами в широком диапазоне сценариев, включающих в себя связь между наземными станциями [12–15] и соединение движущихся [16–18] и беспилотных объектов [19, 20]. Развитие данной области является естественным шагом на пути к организации крупномасштабной квантовой сети. Существенные ограничения связи во всех сценариях во многом определяются параметрами атмосферного канала, в связи с чем понимание эволюции этих параметров во времени и их оценка дают возможность точно оценить скорость генерации ключа. С этой целью были разработаны модели, описывающие поведение атмосферы, а также влияние атмосферного канала на скорость и стойкость генерируемого ключа.

Для реализации КРК используются протоколы на дискретных переменных (ДП) и на непрерывных переменных (НП). ДП протоколы в атмосферных каналах хорошо изучены [21–24], однако на сегодняшний день остаются препятствия в технической реализации, а именно, реализации в дневное время, необходимость в дополнительном оборудовании для пространственно-временной фильтрации сигнала, использование адаптивной оптики для преодоления турбулентностей среды. В то же время в последние годы стали развиваться протоколы НП в открытом пространстве, основанные на кодировании сигнальных квадратур [25–29]. Такие протоколы используют более доступные (по сравнению с детекторами одиночных фотонов) методы когерентного детектирования [30]. В табл. 1 приведено сравнение протоколов НП и ДП в контексте атмосферных каналов.

Табл. 1. Сравнение протоколов НП и ДП в их производительности

Параметр сравнения	НП	ДП
Приготовление состояний	Амплитудная и (или) фазовая модуляция	Поляризационное, фазовое кодирование, кодирование по времени
Скорость генерации ключа	Высокая, порядка Мбит/с	Высокая, порядка Мбит/с
Размеры приемного модуля	Малый размер за счет использования балансных детекторов	Большой размер в случае использования эффективных сверхпроводниковых детекторов
Используемое оборудование	Совместимость с телекоммуникационным оборудованием	В основном специфическое оборудование
Средняя длина канала в однопроходном случае	до 50 км	более 50 км
Детектирование	Гомодинное/гетеродинное детектирование	Счетчик одиночных фотонов, имеющий время простоя

Мотивация использования НП заключается в преимуществе когерентного детектирования, автоматически фильтрующего большую часть шумов за счет мощного локального осциллятора (опорного излучения). Это позволяет избавиться от пагубного воздействия теплового шума, часто возникающего в атмосферных каналах днем [31, 32]. Другим преимуществом НП является совместимость с телекоммуникационным оборудованием, в частности, с балансными детекторами. Именно поэтому НП перспективно в области недорогих реализаций на фотонных интегральных схемах [33, 34], что позволяет создавать стабильное, компактное и доступное оборудование для КРК.

Естественным продолжением исследований различных подходов КРК – объединение ДП- и НП-протоколов. Если раньше между этими двумя подходами проходила четкая граница по области применения, то на сегодняшний день ведутся дискуссии, как эффективно объединить две технологии в гибридную систему. Стадию таких разработок можно определить как начальную, однако масштабируемость квантовых сетей напрямую зависит от объединения двух подходов. Такая гибридная система обладала бы преимуществами обеих систем, повышая эффективность и распределение ключей даже в сложных условиях. С этой целью важно иметь больше как экспериментальных, так и теоретических работ в этом направлении [6, 35].

В этой работе проведен всесторонний обзор использования технологии КРКНП в открытом пространстве, начиная от описания работы стандартного протокола НП в условиях атмосферного канала, заканчивая рассмотрением различных сценариев погодных условий и дополнительных шумов, а также их влияния на канал в целом и на генерацию стойкого ключа. Рассмотрены наиболее распространенные модуляции сигнала, приведены особенности активной и пассивной модуляции. Обсуждается использование беспилотных летательных объектов в каналах квантовой связи.

Статья структурирована следующим образом: в параграфе 1 приводится описание протоколов на непрерывных переменных с обсуждением основ балансного детектирования, в параграфе 2 обсуждаются базовые

принципы построения квантового канала и процесса генерации ключа в открытом пространстве. Далее, в параграфах 3 и 4, описывается модель атмосферного канала и рассматриваются пагубные воздействия на квантовое состояние, распространяющееся в такой среде. В параграфах 5 и 6 приведено несколько актуальных сценариев модуляции КРКНП, а именно дискретная и гауссова модуляция, а также плюсы пассивного приготовления состояний. В параграфе 7 рассматривается влияние погодных условий на протоколы, а в параграфе 8 приводятся основные эксперименты, касающиеся движимых объектов в КРК.

### 1. Введение в протоколы на непрерывных переменных

В этом параграфе мы абстрагируемся от влияния среды и сосредоточимся на особенности протоколов НП. Существует несколько наиболее важных критериев, позволяющих систематизировать множество существующих протоколов. К ним относятся: тип состояния, количество мод, тип детектирования и тип модуляции. Разобранные в данном параграфе примеры далее будут использованы в следующих параграфах как основа для изучения сложносоставных и реалистичных сценариев работы протоколов НП в открытом пространстве.

Наиболее простой и распространенный пример протокола КРКНП – это протокол с использованием гауссовской модуляции (GG02). Его версия с гомодинным детектированием подробно разобрана в [26], пример с гетеродинным детектированием позднее изучен в работе [38].

В случае гауссовой модуляции Алиса использует когерентное состояние  $|\alpha_k\rangle$  с комплексной амплитудой  $\alpha = re^{i\phi}$  из набора с квадратурами  $q$  и  $p$ , подчиняющимися закону нормального распределения  $N(0, V_k)$  с дисперсией  $V_k$ :

$$|\alpha_k\rangle = |q_k + ip_k\rangle. \quad (1)$$

Состояние  $|\alpha_k\rangle$  описывает элемент из множества возможных состояний, случайно приготовленных Алисой, и стандартно удовлетворяет соотношению с оператором рождения  $\hat{a}$ :

$$\hat{a}|\alpha_k\rangle = \alpha_k|\alpha_k\rangle. \quad (2)$$

Оператор числа фотонов определяется соответственно как  $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$  (эрмитово сопряжение). Среднее число фотонов  $\langle n_j \rangle$  в каждом отдельно взятом состоянии  $j$  оценивается следующим образом:

$$\langle n_j \rangle = \langle \alpha_j | \hat{n} | \alpha_j \rangle = |\alpha_j|^2 = q_j^2 + p_j^2. \quad (3)$$

Приготовленное состояние Алиса отправляет Бобу, который в зависимости от типа детектирования (гомодинное или гетеродинное) использует балансный детектор или детекторы для измерения одной квадратуры или двух. Процесс балансного детектирования описан на рис. 1. Переход от детекторов одиночных фотонов к системам с балансным детектированием обусловлен возможностью интеграции с телекоммуникационным оборудованием, в частности, с различными видами многоуровневой модуляции. В случае систем КРК использование балансного детектирования дает возможность регистрировать слабый сигнал без использования детекторов одиночных фотонов, что является одним из основных преимуществ перед системами КРКДП.

Состояние, приготовленное Алисой с определенной модуляцией по квадратурам  $q$  и  $p$ , вместе с ЛО попадает на светоделитель 50/50 получателя, после чего измеряется одна или обе квадратуры при помощи одного или двух балансных детекторов. Состояние  $|\alpha_k\rangle$  и ЛО будут иметь разность фаз  $\theta$ , тогда измеренная разность числа фотонов в двух плечах балансного светоделителя запишется следующим образом:

$$\Delta n = |\alpha_{10}|(q \cos \theta + p \sin \theta), \quad (4)$$

где  $\alpha_{10}$  – амплитуда ЛО.

В случае гомодинного детектирования задача Боба сводится к случайному выбору угла  $\theta = 0$  или  $\theta = \pi/2$  для каждой моды. Это позволяет измерить случайным образом одну из квадратур. Обе квадратуры удастся измерить при использовании гетеродинного детектирования, где детектируется сигнал на разностной частоте, или двойного гомодинного детектирования (в литературе о КРКНП также встречается под наименованием «гетеродинного»), где сигнал разбивается в соотношении 50/50 светоделителем и одновременно производится гомодинное детектирование с выбором  $\theta = 0$  для измерения  $q$  в одном и  $\theta = \pi/2$  для измерения  $p$  в другом плече, то есть применяется 90-градусный оптический гибрид. Несмотря на удвоение извлеченной информации с помощью техники гетеродинного детектирования, в канал обязательно будет внесено как минимум 3 дБ дополнительных потерь.

Продолжая классификацию, в различных вариантах КРКНП возможно использование когерентных или сжатых состояний [36], которые, в свою очередь, классифицируются как одномодовые или многомодовые. В протоколе, построенном на когерентных состояниях, модуляция производится по амплитуде и фазе, а затем осуществляется балансное детектирование. В протоколе на сжатых состояниях чаще используются двумодовые состояния, где моды распределяются между легитимными пользователями, то есть описывается сценарий распределения запутанного состояния.

В качестве альтернативы когерентным состояниям можно выделить тепловые состояния. В сущности, последние являются зашумленным аналогом когерентных состояний, что делает тепловые и когерентные состояния математически эквивалентными. В настоящее время активно исследуется применение тепловых состояний в протоколах КРКНП [36, 37]. Оказывается, что в случае прямого согласования при использовании гомодинного детектирования можно повысить стойкость при учете доверенного шума отправителя даже при больших значениях дисперсии начальных тепловых состояний. Следует также отметить, что протоколы КРКНП на основе сжатых состояний могут превосходить протоколы, берущие за основу когерентные состояния. При этом условия сжатые состояния берутся в допущении бесконечного сжатия (с параметром сжатия, стремящимся к бесконечности). Такое условие естественным образом практически невозможно реализовать экспериментально. Дополнительным фактором является то, что генерация сжатых состояний представляет существенно более сложную задачу, чем генерация когерентных (по сути являющихся состояниями ослабленного лазерного излучения).

Для доказательства стойкости протоколов КРКНП необходимо учитывать реалистичные случаи с несовершенствами оборудования и учетом конечной длины ключа. В асимптотическом случае при рассмотрении ключей бесконечной длины: скорость генерации ключа в пересчете на одну посылку выражается через границу Деветака–Винтера [39] с учетом эффективности согласования  $\beta \in [0,1]$ :

$$K_{asy} = \beta I(A: B) - \chi(B: E), \tag{5}$$

где  $I(A: B)$  – взаимная информация между отправителем и получателем, зависящая от соотношения сигнал/шум,  $\chi(B: E)$  – граница Холева, определяющая максимальное количество информации, которое нарушитель смог извлечь из квантового канала [40].

В распространенном протоколе КРКНП GG02 [26] Алиса отправляет Бобу  $n$  сигналов, где распределение по каждой квадратуре соответствует гауссовскому закону с нулевым средним и дисперсией  $V_k$ , после чего Боб с помощью гомодинного детектирования измеряет одну сигнальную квадратуру. Для оценки скорости генерации стойкого ключа конечного размера [41] следует использовать следующую оценку:

$$K_{fs} \geq w(1 - r) \left( K_{asy} - \frac{\Delta}{\sqrt{n}} + \frac{\Omega}{n} \right), \tag{6}$$

где  $w$  – вероятность успешного прохождения процедуры коррекции ошибок,  $r$  – доля сигнала для оценки параметров,  $\Omega, \Delta$  – параметры, учитывающие эффекты конечного ключа и зависящие от характеристик системы, включая размер алфавита и  $\epsilon$ -параметры стойкости [42].

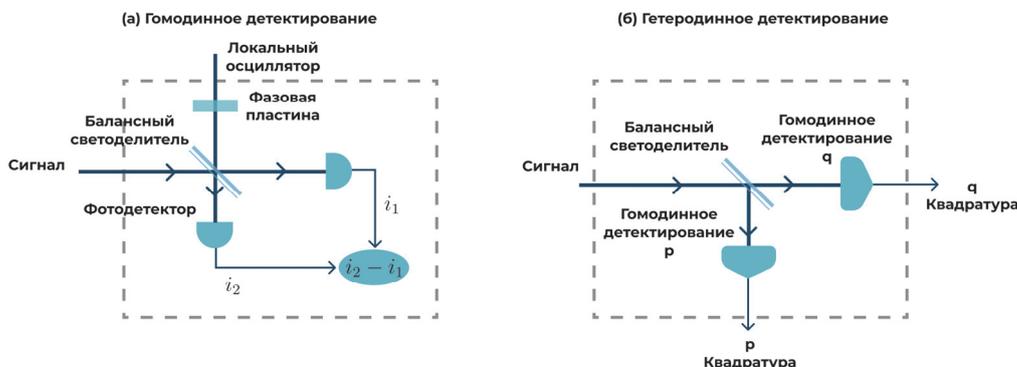


Рис. 1. Принципы гомодинного и гетеродинного детектирования. (а) Гомодинное детектирование: сигнальная мода объединяется с локальным осциллятором на светоделителе 50/50. После прохождения светоделителя каждая мода измеряется с помощью фотодетектора, генерирующего фототок  $i$ , пропорциональный числу фотонов в выходной моде. Измеряя разность между двумя фототоками, можно измерить квадратуру  $q$  или  $p$  в зависимости от фазы локального осциллятора. (б) Гетеродинное детектирование: применяя гомодинное детектирование к обеим квадратурам (локальный осциллятор делится пополам на светоделителе 50/50, после чего к одному из плеч применяется фазовый сдвиг), операторы  $p$  и  $q$  могут быть измерены одновременно ценой введения дополнительных потерь

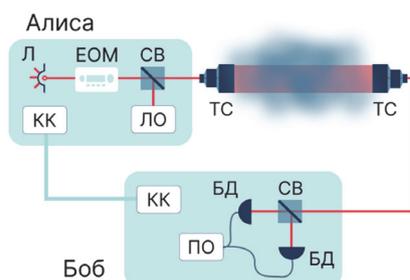
## 2. Описание системы КРК в свободном пространстве

Представим в обобщенном виде описание устройства КРКНП в открытом пространстве. Мы рассматриваем схему, базовыми составляющими которой являются отправитель Алиса, генерирующий квантовые состояния, и получатель Боб, проводящий измерения этих состояний. Обе стороны разнесены в пространстве, а коммуникация происходит через атмосферный канал связи.

Кодирование состояний в протоколах НП происходит за счет фазовой и амплитудной модуляции квадратур электромагнитного поля. Источником состояний здесь выступает, как правило, когерентный лазер на телекоммуникационной длине волны 1550 нм, генерирующий когерентные или сжатые состояния. После генерации состояний Алиса в соответствии с определенным распределением производит фазовую и

амплитудную модуляцию, после чего сигнал ослабляется и смешивается на светоделителе с локальным осциллятором (ЛО). После прохождения системы линз и зеркал телескопа Алисы сигнал передается в атмосферный канал, где он претерпевает изменения под воздействием турбулентности, рассеяния, сцинтилляции. На этом этапе, помимо деградации сигнала, к нему примешивается фоновый тепловой шум от Солнца, Луны и других излучающих объектов (засветка). В модуле Боба сигнал вновь проходит телескопическую систему, фокусируется на светоделителе и попадает на балансный детектор, где Боб определяет квадратуру задетектированного сигнала. Более подробно про балансное детектирование в условиях атмосферы описано в работах [43, 44]. Далее используется классический канал для оценки параметров, постобработки и исправления ошибок. Важно отметить, что во время сеанса связи оба модуля должны находиться в прямой видимости друг друга. Обобщенная схема КРК в атмосфере для НП представлена на рис. 2.

Стоит также отметить, что модули Алисы и Боба могут быть дополнительно оснащены системами адаптивной оптики [45, 46] с целью прецизионной настройки для уменьшения искажений сигнала, вносимых атмосферой. Другим полезным инструментом, используемым для компенсации дополнительных шумов в канале, является пространственная и временная фильтрация, помещенная в модуль Боба.



*Рис. 2. Схема КРКНП между Алисой и Бобом в атмосферном канале. Сигнал генерируется в модуле Алисы посредством лазера, отправляется на электронно-оптический модулятор, где производится амплитудная и(или) фазовая модуляция, после чего сигнал сводится с локальным осциллятором. Попадая на телескопическую систему в модуле Алисы, сигнал расширяется и распространяется в турбулентной атмосфере, претерпевая изменения. Затем сигнал падает на телескопическую систему Боба, где он разводится балансным светоделителем, после чего происходит балансное детектирование. Важно отметить, что в данной схеме ЛО генерируется на стороне Алисы, а процесс разделения ЛО и исходного состояния по времени и поляризации опущен для простоты схемы. Далее сигнал обрабатывается с помощью имеющегося ПО, где производится постобработка. Модули Алисы и Боба также связаны публичным классическим каналом связи. Сокращения: Л – лазер, ЕОМ – электронно-оптический модулятор, ЛО – локальный осциллятор, КК – классический канал, ТС – телескопическая система, СВ – светоделитель, БД – балансный детектор, ПО – программное обеспечение*

Рассмотренная схема является упрощенной. Для реальной технической задачи часто требуются сложносоставные компоненты для поддержания высокой скорости генерации стойкого ключа в условиях турбулентной атмосферы. Но даже из общего описания схемы следует, что система претерпевает ряд случайных процессов, напрямую влияющих на эффективность генерации. Данный факт отражает основную особенность передачи сигнала через среду: а именно, динамическое случайное изменение параметров окружающей среды, вызывающее блуждание, затухание и деградацию сигнала в атмосфере. В следующих параграфах будет уделено внимание описанию этих эффектов, а также техническим реализациям.

### 3. Атмосферные эффекты

Турбулентная атмосфера способна разрушать квантовое состояние, вносить дополнительные помехи и, следовательно, понижать эффективность работы протоколов в целом [47 – 49]. В сравнении с оптоволоконным каналом, пропускание среды может случайным образом эволюционировать со временем, поэтому результаты оценки параметров для волоконно-оптического канала не могут быть явно перенесены на атмосферный канал. Однако несмотря на то, что среда вносит потери в канал, возможны сценарии, при которых сеанс связи остается успешным, а сгенерированный ключ – стойким [50, 51]. Таким образом, анализ производительности системы КРК в открытом пространстве строится на основе поведения параметров среды, от оценки которых будет зависеть точность предсказания эффективности и стойкости системы КРК, а также результат постобработки [52]. Сложность оценки параметров заключается в наличии случайно изменяющихся во времени и пространстве величин, тем самым вынуждая строить приближенные модели, описывающие в том или ином виде поведение атмосферы. При этом квантовые системы с НП протоколами выделяются особой устойчивостью к дополнительным шумам в канале за счет наличия ЛО [53 – 55].

Модель турбулентности квантового атмосферного канала определяется силой флуктуаций коэффициента пропускания, который описывает степень рассеяния и поглощения сигнала в атмосфере. Одним из ключевых факторов, влияющих на характер турбулентности, является сцинтилляция – явление, при котором градиент температуры создает в атмосфере зоны с различной плотностью, что приводит к случайным флуктуациям интенсивности сигнала [56 – 58]. Эти неоднородности формируют зоны с различной оптической плотностью, из-

за чего световые волны, проходящие через атмосферу, испытывают случайные изменения интенсивности. Это приводит к вариациям амплитуды и фазы сигнала, что усложняет передачу информации по квантовому каналу.

Параметр Рытова является безразмерной величиной и количественно характеризует степень воздействия турбулентности на световые волны. Он напрямую зависит от структурной константы показателя преломления  $C_n^2$ , которая описывает интенсивность турбулентности атмосферы в зависимости от высоты и условий в конкретной области, частоты сигнала (или волнового числа), а также расстояния  $z$ , которое сигнал проходит через турбулентную среду. Структурная константа  $C_n^2$  [59, 60] является ключевым параметром в моделировании атмосферных возмущений, в частности влияет на уширение пучка (рис. 3). Таким образом, параметр Рытова выражается через структурную константу:

$$\sigma_{Ry}^2 \sim C_n^2 k^{7/6} z^{11/6}, \quad (7)$$

где  $k$  – волновое число.

При увеличении значения параметра Рытова наблюдаются более интенсивные флуктуации сигнала, что может привести к значительным искажениям при передаче информации через атмосферу. В квантовых коммуникационных системах, где важно поддерживать целостность и качество передаваемых квантовых состояний, такие флуктуации могут существенно снижать эффективность передачи и увеличивать вероятность ошибок. Поэтому для моделирования и прогнозирования качества каналов связи в условиях атмосферной турбулентности необходимо детальное понимание влияния параметров, таких как  $C_n^2$ , на общее поведение турбулентности.

Таким образом, параметр Рытова играет центральную роль в оценке степени турбулентности квантового атмосферного канала, и его учет позволяет предсказывать возможные флуктуации и потери сигнала на различных расстояниях в зависимости от уровня турбулентности в атмосфере.

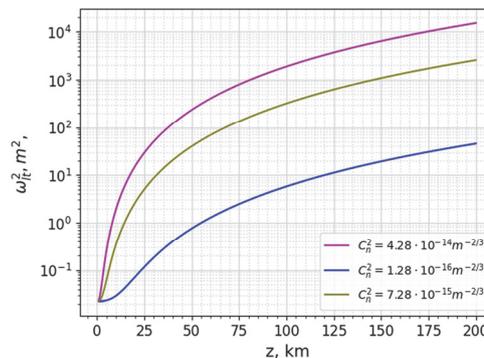


Рис. 3. Уширение пучка  $\omega_R$  из-за турбулентности в зависимости от расстояния  $z$  при различной силе турбулентности

Режим турбулентности, когда  $\sigma_{Ry}^2 < 1$ , называют слабым, так как сцинтилляции незначительны, в то время как условие  $\sigma_{Ry}^2 > 1$  показывает, что турбулентность сильная [59]. Режиму умеренной турбулентности соответствует значение  $\sigma_{Ry}^2 \approx 1$ .

Такой подход позволяет более точно учитывать особенности взаимодействия лазерного излучения с неоднородностями в атмосфере. Однако при анализе распространения пучка в атмосфере необходимо учитывать не только влияние турбулентности, но и потери, вызванные дифракцией. Дифракция является важным фактором, который влияет на характеристики пучка, особенно при больших расстояниях передачи.

Распространяясь в среде, свет будет испытывать рассеяние и множественное переотражение на частицах среды, что приводит к уширению, смещению и искажению формы пучка. На протяжении всего сеанса связи телескопы Алиса и Боба должны находиться в прямой зоне видимости, тогда как дифракция будет нарушать перекрытие между пучком и апертурой приемника, понижая эффективность канала, что напрямую влияет на скорость генерации ключа (рис. 4). Однако блуждание луча может быть компенсировано с помощью соответствующей системы управления, т. е. системы поиска, наведения и отслеживания пучка [65, 66].

Следует отметить, что в условиях сильной турбулентности вклад дифракции в искажение лазерного пучка становится особенно значимым и может существенно ухудшить качество передачи сигнала в системах оптической связи. Влияние турбулентности можно разделить на два основных компонента:

1. Уширение размера пучка на коротких дистанциях характеризуется параметром  $w_{st}$ . Это уширение происходит из-за рассеяния света на мелкомасштабных неоднородностях в атмосфере. Уширение пучка приводит к тому, что энергия светового сигнала распределяется по большей площади, что снижает плотность энергии на приемнике и, соответственно, ослабляет сигнал. Важно отметить, что в режиме, когда влияние турбулентности на атмосферный канал крайне мало, уширение  $w_{st}$  будет связано только с дифракционными потерями.
2. Смещение центра пучка от начального направления распространения, описываемое величиной  $\sigma_{tv}$ . Смещение является результатом блуждания пучка вследствие сильных флуктуаций в атмосфере. Этот эффект

вызывает отклонение центра распределения энергии пучка от идеальной траектории, что может привести к тому, что только часть пучка попадает на приемник (рис. 6) в связи с ограниченностью размеров апертуры приемника. Смещение пучка становится критическим в тех случаях, когда система связи требует высокой точности наведения, например, в спутниковой или околоземной связи на дальние расстояния.

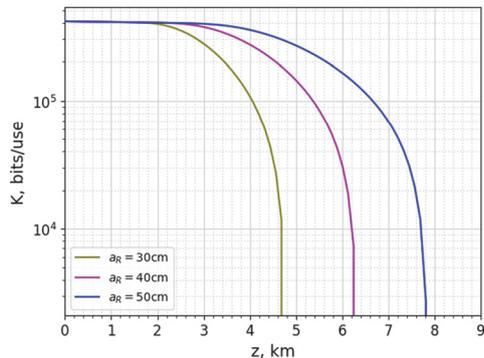


Рис. 4. Зависимость скорости генерации ключа от пройденного расстояния  $z$  в атмосфере для различных апертур приемника. Параметры системы: размер пучка  $\omega_0 = 30$  см, структурная константа  $C_n^2 = 1,28 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ , длина волны  $\lambda = 1550$  мкм, частота повторения  $f_{sum} = 5 \times 10^6$  Гц

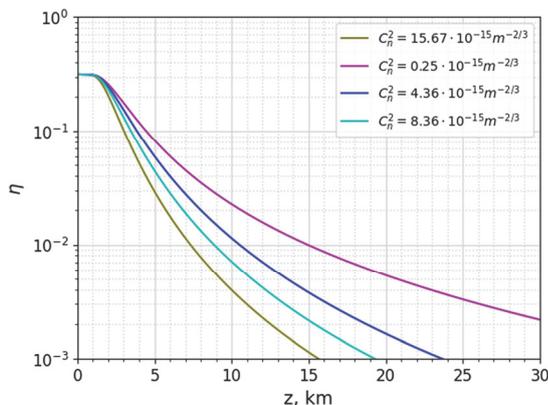


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропускания  $\eta$  от пройденного в атмосфере расстояния для различной турбулентности среды, характеризующейся структурной константой  $C_n^2$

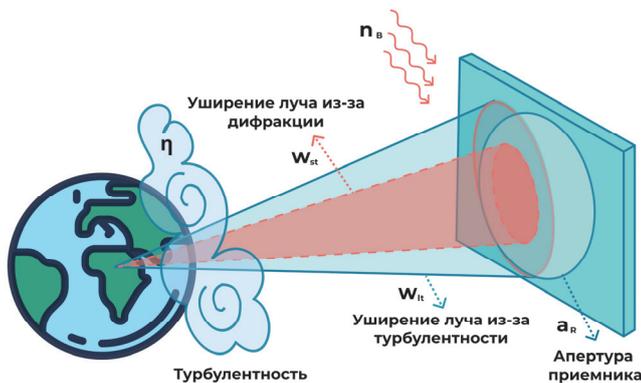


Рис. 6. Иллюстрация явления блуждания и уширения луча и особенности распространения света в турбулентных каналах связи. На изображении можно увидеть, как луч, первоначально имеющий прямолинейную траекторию, подвергается случайным отклонениям от своего первоначального пути. Эти отклонения вызваны турбулентностью и дифракцией. На изображении видно, что турбулентность оказывает значительное воздействие на распространение в дальних каналах и может привести к потере информации в силу ограниченности апертуры приемника

Для более полного описания эффектов, вызванных атмосферной турбулентностью, используется эллиптическая модель распространения лазерного луча. Эта модель учитывает анизотропию и асимметрию распределения энергии в поперечном сечении пучка. В эллиптической модели учитываются такие эффекты, как различное уширение пучка по различным осям и асимметричное распределение интенсивности, что позволяет более точно описывать поведение пучка в реальных условиях [53, 67].

Эллиптическая модель является важным инструментом для анализа и моделирования процессов распространения света через турбулентную среду, поскольку она позволяет учитывать как скинтилляции, так и

эффекты блуждания и уширения. Это особенно важно для систем оптической связи, где точное прогнозирование и компенсация искажений пучка могут значительно повысить качество и надежность передачи информации.

Оба компонента, уширение пучка  $w_{st}$  и смещение его центра  $\sigma_{TB}$ , дают вклад в диаметр пучка  $w_t$  на больших расстояниях:

$$w_t^2 = w_{st}^2 + \sigma_{TB}^2. \tag{8}$$

Помимо дифракции и турбулентности существуют другие неизбежные атмосферные эффекты, которые требуют внимания. В их число входит атмосферная экстинкция, которая приходит из-за поглощения и рассеяния гауссовского луча в атмосфере. Это дополнительное затухание, растущее с дальностью распространения  $z$ , определяется фактором  $\gamma$ , зависящим от высоты  $h$ . В общем случае атмосферную экстинкцию можно учесть с помощью введения следующего коэффициента пропускания:

$$\eta_{atm} = e^{\gamma(h)z}. \tag{9}$$

Далее все эффекты атмосферы, влияющие на распространение луча, можно учесть с помощью полного коэффициента пропускания среды  $\eta_{tot}$  (рис. 5):

$$\eta_{tot} = \eta_{dif} \eta_{atm} \eta_{eff} \tag{10}$$

где  $\eta_{dif}$  – коэффициент пропускания дифракционных потерь,  $\eta_{atm}$  – коэффициент пропускания от атмосферной экстинкции,  $\eta_{eff}$  – пропускание установки Боба (учет потерь на оборудовании).

Таким образом, модель атмосферы для КРК сводится к учету всех возможных эффектов в соответствующих поправках для коэффициента пропускания. Более подробно этот вопрос изучен в работах [42, 61, 62, 63].

#### 4. Влияние тепловых флуктуаций

В контексте КРК тепловой шум является одним из существенных ограничений, влияющих на эффективность и надежность передачи информации. Конечная мода, падающая на приемник, будет включать в себя дополнительное количество шумов [68]. Эти шумы возникают как результат совместного распространения полезного сигнала и тепловых возмущений, вызванных внешними факторами. Основное воздействие теплового шума проявляется в увеличении вероятности ошибок при детектировании сигналов, что в итоге может приводить к прерыванию сеансов связи, особенно в дневное время, когда уровень теплового шума достигает своего пика. В таких условиях удержание устойчивого канала связи становится особенно сложной задачей, требующей дополнительных мер для компенсации влияния шумов.

Число тепловых фотонов, падающих на детектор, зависит от яркости неба, меняющейся в зависимости от времени суток и состояния погоды. Помимо светового загрязнения, естественная причина возникновения шумов – наличие Солнца и Луны, существенных источников тепловых фотонов. В дневное время излучение Солнца значительно увеличивает уровень фоновых шумов, что особенно критично для работы систем КРК на длинных дистанциях, где сигнал ослабляется, а шум, напротив, усиливается. Ночью влияние шумов снижается, однако излучение Луны, а также искусственные источники света, такие как освещение в городах, все еще оказывают заметное воздействие. Таким образом, тепловые шумы являются неизбежным фактором, который необходимо учитывать при разработке и оптимизации систем КРК. Среднее число тепловых фотонов  $n_{th}$  принимаемых приемников в одной моде с длиной волны  $\lambda$  можно охарактеризовать [69, 70]:

$$n_{th} = \frac{\pi a^2 B_\lambda}{h\omega} \Omega \Delta\omega \Delta t, \tag{11}$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\omega$  – частота тепловых фотонов,  $B_\lambda$  – яркость неба,  $\Delta\omega$  – ширина полосы спектральной фильтрации,  $\Omega$  – угловое поле видимости,  $\Delta t$  – временное окно.

При этом не исключены тепловые фотоны  $n_{ext}$ , сгенерированные внутри модуля Боба (избыточный шум оборудования). Такие процессы приводят к флуктуации фазы квантового состояния, вызывая декогеренцию и деградацию состояния. Тогда суммарное число тепловых фотонов, приходящих на детектор, запишется в виде:

$$n_{tot} = \eta_{eff} n_{th} + n_{ext}. \tag{12}$$

Учет тепловых шумов оказывается принципиально важным для спутниковых систем: время нахождения спутника в зоне земной тени (ночью) обратно пропорционально высоте орбиты спутника, следовательно, спутниковые системы большую часть времени находятся в зоне солнечного излучения. При этом вероятность нахождения спутниковой системы на низкой опорной орбите (НОО) в зоне солнечного излучения составляет ~70%, в то время как для спутника на ГСО этот показатель возрастает до ~99%. Отношение фонового теплового шума днем и ночью достигает 5 порядков.

Влияние тепловых шумов было изучено для протоколов ДП в ряде исследований [31, 32, 70, 71]. Была продемонстрирована уязвимость таких протоколов к влиянию тепловых шумов, в частности, сокращение длины

канала в дневное время оказывается существенным: если ночные эксперименты превышают 1 км, то днем расстояния будут ограничены 150 – 300 м [72]. При этом проблема тепловых шумов оказывается универсальной с точки зрения различных типов КРК и затрагивает схемы с квантовой телепортацией, несовершенством устройств, квантовыми повторителями и другими. В качестве решения было предложено использовать лавинные фотодетекторы и лазеры на телекоммуникационных длинах волн, менее чувствительные к солнечному излучению [54].

Одним из ключевых преимуществ телекоммуникационного оборудования является его способность обеспечивать простое и эффективное объединение оптоволоконного и атмосферного каналов с минимальными потерями на соединениях, что открывает широкие возможности для создания гибридных систем КРК. Такое совмещение позволяет не только повысить масштабируемость системы, но и обеспечить компактность оборудования, а также снизить нагрузку на спутниковые компоненты КРК. Это особенно актуально в условиях ограничений по массе и энергопотреблению космических аппаратов.

Однако для обеспечения надежной работы системы КРК в условиях, подверженных влиянию теплового шума и атмосферных возмущений, требуется использование специализированных методов и технологий. Среди таких методов можно выделить применение систем адаптивной оптики, узких пространственных и спектральных фильтров [73]. Временная фильтрация определяет временное окно прихода сигнала, спектральная фильтрация позволяет отсекал ненужное излучение, а пространственная – исправляет искажение пространственной интенсивности пучка. При этом, как правило, пространственная и спектральная фильтрация реализуются вместе. В свою очередь, адаптивные методы коррекции способны подстраиваться под текущие атмосферные условия. Эти подходы в сочетании с использованием оптимальных длин волн и улучшением чувствительности приемников позволяют минимизировать влияние тепловых шумов и обеспечить стабильную передачу квантовых ключей даже в неблагоприятных условиях. Для достижения этой цели принципиально важно развитие полупроводниковых технологий [74, 75]. Это включает создание более чувствительных фотодетекторов, более мощных лазеров с узкой полосой излучения и интегральных систем, которые позволят снизить энергопотребление и улучшить эффективность работы квантовых систем.

В то же время для НП влияние тепловых шумов оказывается незначительным, что ранее было теоретически и экспериментально продемонстрировано [55]. В подавлении тепловых шумов главную роль играет когерентное детектирование. Например, в случае, когда ЛО генерируется на стороне Алисы, передаваемый сигнал и ЛО подвержены одинаковым атмосферным флуктуациям, следовательно, они компенсируются при процедуре детектирования за счет вычитающей схемы. По этой причине осуществление протокола НП не требует пространственной и временной фильтрации [76], в то время как для ДП протоколов необходимо использовать дополнительное оптическое оборудование. Было продемонстрировано, что гомодинное детектирование подходит для экспериментов на НОО [77], благодаря чему можно рассматривать протоколы КРКНП как оптимальный вариант для создания квантовой сети в дневное время без ограничений на фоновое излучение, открывая возможности для использования оборудования НП в космических миссиях.

Несмотря на устойчивость НП к тепловым шумам, существуют определенные ограничения, связанные с использованием локального осциллятора. В частности, интенсивность ЛО может подвергаться флуктуациям, вызванным воздействием третьих сторон на канал связи или другими дополнительными шумами.

На практике, чтобы избежать проблемы передачи ЛО в открытом пространстве, можно использовать реализацию КРКНП на боковых частотах. В таком подходе фазового кодирования опорным сигналом выступает центральная частота излучения, тогда как кодирование сигнала происходит на ослабленных боковых частотах. Теоретический анализ технологии фазового кодирования боковых частот для КРКНП представлен в работах [78–79], экспериментальная демонстрация когерентного детектирования с несущей частотой в качестве ЛО описана в работе [80].

### **5. Модуляция в турбулентной атмосфере**

Для КРКНП активно исследуются различные модуляции с целью увеличения скорости генерации ключа при условии доказанной стойкости протокола. Среди наиболее распространенных подходов можно выделить два: упомянутый протокол с гауссовской модуляцией когерентных состояний (GG02) и протокол с дискретной модуляцией, включающий фазовую манипуляцию и квадратурно-амплитудную модуляцию когерентных состояний. На рис. 7 приводятся примеры распространенных в НП модуляций. Выбор конкретного типа модуляции зависит от ряда факторов, включая скорость генерации ключа, длину канала, практическую сложность реализации и устойчивость к шумам в канале.

Гауссовская модуляция представляет собой один из наиболее перспективных подходов в протоколах КРКНП. Она предполагает активную модуляцию когерентных состояний, что требует использования амплитудных и фазовых модуляторов, или IQ-модуляторов, управляемых квантовым генератором случайных чисел. Этот подход позволяет кодировать информацию в фазовом пространстве амплитуд и фаз, обеспечивая высокую плотность информации и, следовательно, потенциал для достижения высокой скорости распределения ключей. Протоколы с гауссовской модуляцией уже успешно продемонстрировали свою работоспособность в различных

теоретических моделях (такой тип модуляции упрощает доказательство стойкости) и экспериментальных установках [81 – 83].

Однако реализация гауссовской модуляции сталкивается с рядом технических вызовов. Одной из главных проблем является необходимость использования модуляторов с высоким коэффициентом экстинкции для точного управления амплитудой и фазой сигнала. Это критически важно для минимизации ошибок, которые могут возникнуть в процессе модуляции. Кроме того, стабильность модуляции становится ключевым фактором, так как даже малые флуктуации параметров модуляторов могут существенно повлиять на точность передачи данных. Эти требования усложняют реализацию гауссовской модуляции, например, в интегральной оптике, где размеры оборудования и энергозатраты часто ограничены, а высокая стабильность работы компонентов требует новых инженерных решений.

Тем не менее, несмотря на отмеченные технические трудности, протоколы КРКНП с гауссовской модуляцией когерентных состояний имеют значительный потенциал. Одним из главных преимуществ является возможность достижения высоких скоростей генерации ключа, что делает их особенно привлекательными для приложений, требующих быстрой передачи данных. Это преимущество продемонстрировано как в лабораторных условиях, где удалось добиться высокой точности и стабильности передачи, так и в полевых условиях, где протоколы показали свою устойчивость к реальным внешним факторам, таким как атмосферные шумы и потери в канале [64, 84].

Для успешного внедрения гауссовской модуляции в реальных системах квантовой связи необходимо решить ряд технических проблем. Одной из наиболее актуальных задач является разработка высокоскоростных модуляторов, которые будут обладать высокой стабильностью, точностью и одновременно быть экономически доступными. Современные модуляторы на основе технологии LiNbO<sub>3</sub> уже демонстрируют хорошие результаты, однако для дальнейшего прогресса необходим переход к более интегрированным и компактным решениям, таким как кремниевые фотонные платформы.

Кроме того, важным направлением является развитие алгоритмов коррекции ошибок и компенсации шумов, возникающих в процессе модуляции и передачи сигнала. Использование таких технологий, как квантовая коррекция ошибок, может существенно повысить точность и надежность передачи данных, даже в условиях высокой турбулентности или значительных потерь в канале.

В отличие от гауссовской модуляции, протокол дискретной модуляции [87, 88] использует конечный набор когерентных состояний, из которых Алиса каждый раз случайно выбирает одно и отправляет Бобу, которое далее детектируется гомодинным или гетеродинным детектором. При этом, хотя гауссовская модуляция имеет более высокую устойчивость к избыточному шуму в канале, протокол дискретной модуляции обладает рядом преимуществ, связанных с его практической реализацией. Во-первых, дискретная модуляция предъявляет более низкие требования к устройствам модуляции, так как используется ограниченный набор предопределенных состояний, что упрощает конструкцию модуляторов. Во-вторых, такие системы обеспечивают высокую совместимость с существующими телекоммуникационными инфраструктурами, включая оптоволоконные и спутниковые каналы связи. Это позволяет проектировать оборудование с меньшими затратами, особенно в сценариях, где скорость распределения ключей не является критически важным параметром.

Одним из ключевых факторов, делающих дискретную модуляцию привлекательной, является ее применимость в условиях ограниченных ресурсов, таких как спутниковая связь. В спутниковых системах, где каждая деталь оборудования должна быть легкой, компактной и энергоэффективной, дискретная модуляция представляет собой оптимальный компромисс между производительностью и сложностью реализации. Использование небольшого набора когерентных состояний снижает нагрузку на аппаратную часть модуляторов и детекторов, что позволяет разрабатывать системы с минимальным весом и энергопотреблением [89].

Кроме того, дискретная модуляция является идеальным выбором для сценариев, где нет необходимости достигать максимально возможной скорости генерации ключа. Например, в системах, ориентированных на периодическое обновление ключей для защиты данных, такие системы могут функционировать с высокой степенью эффективности, обеспечивая надежность связи и экономичность оборудования. Это делает дискретную модуляцию перспективной технологией для интеграции в спутниковые и гибридные квантово-классические сети. Однако следует отметить, что вопрос о доказательстве стойкости для случая дискретной модуляции еще не решен окончательно.

В табл. 2 приведено сравнение гауссовской и дискретной модуляции.

Как обсуждалось ранее, дополнительный шум в ЛО может вызывать дополнительные потери и затухания в канале, что в первую очередь приводит к снижению эффективности канала КРК. Исследования показывают, что с точки зрения устойчивости к дополнительному шуму в ЛО, гауссовская модуляция представляется наиболее подходящей. В то же время для достижения приемлемых скоростей экономически оптимально использование дискретной модуляции [90].

Однако прогресс в области квантовых коммуникаций не ограничивается исключительно классическими подходами, такими как использование когерентных состояний. Помимо стандартных когерентных состояний, ведутся активные исследования по использованию нетривиальных квантовых состояний в атмосферном канале. Такие состояния обладают уникальными свойствами, обусловленными их статистикой распределения, что потенциально может обеспечивать наилучшую устойчивость к шумам и атакам со стороны злоумышленника [36, 91 – 92].

Табл. 2. Сравнение гауссовской и дискретной модуляции

Параметр сравнения	Гауссовская модуляция	Дискретная модуляция
Тип кодирования	Непрерывное (плотное)	Дискретное (с ограниченным базисом состояний)
Требование к оборудованию	Высокое	Могут быть использованы классические протоколы кодирования
Устойчивость к шуму	Высокая	Низкая
Доказана стойкость	Да	Да, но каждый протокол требует отдельного рассмотрения
Коррекция ошибок и постобработка	Требует сложных алгоритмов	Простая реализация, есть совместимость с классическими методами цифровой обработки сигналов
Применение	Подходит для высокоскоростных сетей	Подходит для менее требовательных приложений на коротких расстояниях

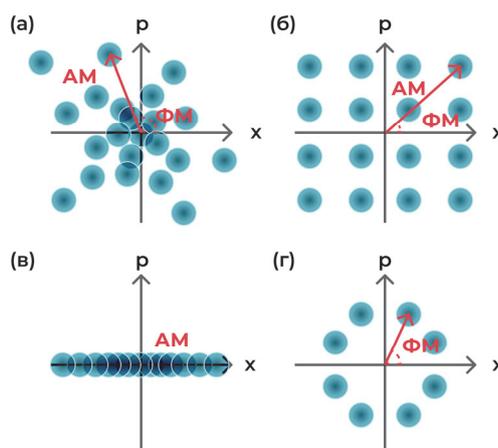


Рис. 7. Различные типы модуляции НП: (а) гауссовская модуляция по сигнальным квадратурам. Когерентные состояния в фазовом пространстве подчиняются двумерному гауссовскому распределению, где распределение квадратур  $x$  и  $p$  независимо; (б) дискретная модуляция с фазовой и амплитудной модуляцией (квадратурно-амплитудная модуляция). Здесь задан базис из 16 состояний; (в) одномерная модуляция по квадратурам  $x$  и только амплитудная модуляция; (г) только фазовая модуляция состояний с одинаковой амплитудой (фазовая манипуляция).  
Сокращения: АМ – амплитудный модулятор, ФМ – фазовый модулятор

Несмотря на значительный научный интерес, на сегодняшний день целесообразность применения таких состояний подтверждена экспериментально только на коротких дистанциях [85, 86]. Это связано с рядом технических и физических ограничений, таких как влияние атмосферных потерь, сложность генерации и детектирования неклассических состояний, а также их повышенная чувствительность к флуктуациям среды.

Несмотря на отмеченные ограничения, дальнейшие исследования неклассических состояний могут открыть новые перспективы. В частности, развитие технологий генерации и детектирования неклассических состояний, а также улучшение методов компенсации атмосферных потерь могут существенно повысить эффективность и стойкость квантового распределения ключей. Это особенно актуально для задач, связанных с построением масштабных квантовых сетей, где надежность передачи данных на большие расстояния через атмосферные и спутниковые каналы имеет первостепенную роль.

Таким образом, изучение возможностей использования нетривиальных квантовых состояний остается важным направлением в развитии КРК, обладающим потенциалом для преодоления существующих технических барьеров и создания более совершенных систем обеспечения информационной безопасности.

### 6. Схемы с тепловым источником

Практические реализации КРК в реальных условиях вынуждены сталкиваться с рядом вызовов, определенных технической сложностью прикладных устройств, их стоимостью и возможностью масштабирования. Традиционные подходы активного приготовления состояний, включающих в себя использование амплитудных и фазовых модуляторов, требует прецизионной высокопроизводительной электроники. С другой стороны, необходимость качественного генератора случайных чисел для верной статистики выбора состояний из базиса также усложняет реализацию. Чтобы обойти возникшие технические сложности, был создан альтернативный подход приготовления состояний, основанный на тепловом источнике [88]. Тепловой источник является перспективным решением, реализующим протокол пассивного приготовления состояний, не нуждающийся в генераторе случайных чисел, по сути являясь им. Это открывает возможности для создания экономичных и портативных чипов, которые недавно были продемонстрированы для волоконной сети [94].

Ключевое преимущество пассивного приготовления состояний заключается в использовании флуктуаций поля теплового источника, заменяя амплитудные и фазовые модуляторы, а также квантовый генератор случайных чисел, необходимых в протоколах с активной модуляцией. Такая реализация основывается на содержании случайных флуктуаций амплитуды и фазы в тепловом излучении, которые могут быть использованы для кодирования информации.

В частности, это обеспечивает необходимое распределение вероятностей для выбора состояний, что эквивалентно использованию генератора случайных чисел в протоколах активной модуляции. Тепловой источник значительно упрощает аппаратную схему и позволяет обойти технические сложности традиционных протоколов КРКНП.

Переход от активной к пассивной модуляции привлекателен с точки зрения эффективности при одновременном снижении стоимости оборудования. Пассивная модуляция отличается простотой реализации, что способствует более легкой интеграции соответствующих систем в существующую инфраструктуру, особенно в условиях открытого пространства. Такая интеграция имеет преимущества для применения в реальных условиях, где надежность, компактность и экономичность устройства играют ключевую роль.

Недавние исследования, результаты которых представлены в работе [84], демонстрируют потенциал реализации пассивного приготовления состояний. В данной работе была предложена портативная система на базе чипа с тепловым источником, способная функционировать в условиях динамически меняющейся атмосферы.

Ключевым достижением этой работы является реализация одновременного мониторинга нескольких параметров системы, включая пропускание, поляризацию и фазу. Это позволило значительно повысить устойчивость системы к внешним воздействиям, таким как атмосферные турбулентности, изменения погодных условий и другим факторам, которые традиционно создают сложности для передачи квантовых сигналов.

Результаты экспериментов показали, что предложенная система способна обеспечивать распределение стойкого квантового ключа на дистанции до нескольких километров, даже в условиях нестабильной атмосферы. Это является важным шагом вперед в направлении практического применения квантовых технологий в атмосферных каналах. Подобные достижения свидетельствуют о том, что переход к пассивной модуляции не только упрощает техническую реализацию систем, но и повышает их надежность и универсальность, что особенно важно для работы в сложных условиях открытого пространства.

Кроме того, использование портативной системы на базе чипа с тепловым источником демонстрирует высокую перспективность для создания компактных и энергоэффективных квантовых устройств, которые могут быть легко интегрированы в различные платформы, включая дроны, спутники и наземные мобильные станции. Возможность работы в условиях нестабильной атмосферы также открывает перспективы для широкого применения подобных систем в городских и удаленных районах, где традиционные методы передачи данных могут быть менее эффективны. Таким образом, развитие технологий пассивной модуляции, в сочетании с улучшением методов мониторинга ключевых параметров сигнала, закладывает основу для создания более доступных, надежных и масштабируемых систем квантового распределения ключей, способных работать в реальных условиях.

### ***7. Распространение в сложных погодных условиях***

Квантовые коммуникации в свободном пространстве открывают широкие возможности для гибкого и быстрого развертывания квантовых сетей, позволяя обойтись без необходимости использования оптоволоконных сетей в качестве посредника. Использование атмосферных каналов актуально в ситуациях, когда использование оптоволоконных линий невозможно или экономически нецелесообразно, например, в труднодоступных или удаленных районах, между подвижными объектами или на короткие расстояния.

Однако при использовании атмосферного канала для передачи квантовых состояний приходится иметь дело с нестабильностью условий канала, в частности, из-за погоды: дождя, снега, тумана [95]. В отличие от постоянных условий внутри волоконно-оптических линий связи, атмосферный канал подвержен случайным флуктуациям, что существенным образом влияет на распространение квантовых состояний.

Для количественной оценки влияния погодных условий на распространение квантовых состояний в атмосфере используются различные модели и методы, основанные на теории рассеяния. Несмотря на указанные сложности, квантовые коммуникации в свободном пространстве активно развиваются. Дальнейшие исследования и разработки в этой области направлены на повышение дальности, надежности и скорости передачи квантовой информации в атмосферном канале, а также на создание адаптивных и интеллектуальных систем, способных эффективно работать в различных погодных условиях.

Соединение «точка–точка» требует постоянной прямой видимости между передатчиком и приемником. Переменное атмосферное затухание, вызванное поглощением и рассеянием света на частицах среды, становится значительным препятствием для передачи квантовой информации. Если сцинтилляция имеет ярко выраженное проявление в ясный день, то эффекты уширения, блуждания луча и рассеяния становятся более выраженными при отклонении от нормальных погодных условий.

Теория рассеяния света в квантовой механике существенно отличается от классической теории в силу наличия операторных соотношений. Одним из ключевых аспектов, требующих особого внимания, является учет квантовой статистики фотонов. Кроме того, важную роль играют корреляции между фотонами, которые могут существенно изменять картину рассеяния, особенно в случае многократного рассеяния. В таких условиях квантовые эффекты могут приводить к сложным изменениям квантовых состояний света, что требует создания теорий, учитывающих не только отдельные акты рассеяния, но и их совокупное влияние на конечное состояние системы. Были предприняты попытки разработки целостной теории рассеяния квантового света [53, 96], однако ее все еще нельзя назвать полноценной. Сложность заключается в учете многократного рассеяния фотонов на частицах атмосферы и в описании изменения квантовых состояний света в процессе рассеяния. Таким образом, на сегодняшний день разработка полноценной теории рассеяния квантового света остается одной из сложных, но крайне интересных задач современной физики.

Туман, сильный снег, изморозь и дождь – основные погодные условия, способные нарушить работу коротких линий связи в свободном пространстве. Наличие дополнительных частиц разного размера в воздухе повышает рассеяние света, что означает угловое перераспределение интенсивности падающего света, а также может значительно снижать дальность распространения. В зависимости от размера частиц можно классифицировать тип рассеяния каждого из осадков. В табл. 3 представлено соотношение различных частиц осадков с типами рассеяния, им соответствующим.

Табл. 3. Сравнение типов рассеяния на частицах в зависимости от длины волны и размеров неоднородностей

	Рассеяние Рэлея	Рассеяние Ми	Геометрическое рассеяние
Соотношение между размерами неоднородностей и длиной волны	$r \ll \lambda$	$r = \lambda$	$r \gg \lambda$
Частицы	Молекулы воздуха	Дымка Туман Пыль	Туман Дождь Снег

При нормальных погодных условиях влияние атмосферного затухания будет обратно пропорционально длине волны, однако это может оказаться неверным для туманной погоды. Однако в снег, дождь или туман, то есть при видимости меньше 500 м, оказывается, что атмосферное затухание не зависит или слабо зависит от длины волны.

Данные предположения были подтверждены с помощью теории рассеяния Ми, также известного как аэрозольное рассеяние, и проверены экспериментально [97, 98]. Можно охарактеризовать действие погодных условий на состояния: действие дождя и снега оказывает незначительное влияние на деформацию луча, но делает вклад в экстинкцию, а туман оказывает сильное влияние на сжатые и запутанные гауссовские состояния, приводя к декогеренции, что снижает надежность передачи квантовой информации.

Туман же знаменует крайне большое удельное затухание (потери на единицу длины распространения) за короткий промежуток времени. Это означает, что даже на коротких дистанциях порядка сотни метров сигнал может ослабнуть достаточно, чтобы сеанс связи был прерван. Сила воздействия тумана будет зависеть от параметров самой системы и местных климатических условий [99, 100].

По этой причине система должна обладать большим запасом мощности, чтобы компенсировать затухание, вызванное туманом, при изменении погоды. При проектировании систем КРК необходимо учитывать эти факторы и выбирать оптимальные параметры для обеспечения надежной связи в различных погодных условиях. Кроме того, велись дискуссии о возможности использования КРКНП в контексте связи между спутником и подводной лодкой [101, 102], где учет влияния тумана на распространение света в водной среде также является важным фактором.

Размер частиц атмосферных аэрозолей – от 2 нм до 100 мкм. Затухание сигнала напрямую будет зависеть от размера, концентрации и распределения в воздухе этих частиц. Были разработаны основные модели, описывающие поведение аэрозолей в определенных метеорологических условиях.

Основным параметром, характеризующим влияние тумана на распространение света, является параметр метеорологической дальности видимости (МДВ) – максимальное расстояние, на котором можно различить объект. Или, более строго, видимость – это расстояние, на котором мощность сигнала ослабляется до 2 % от его первоначальной величины. Ее среднее значение в условиях тумана составляет около 1 километра, однако оно может сильно варьироваться в зависимости от типа и плотности тумана. В табл. 4 представлены значения параметра МДВ  $V$  и величины атмосферной экстинкции  $\alpha_V$  для основных типов тумана.

Табл. 4. Значения видимости и атмосферной экстинкции в зависимости от ослабления сигнала из-за рассеяния Ми

Погодные условия	Видимость, км	$\alpha_V$ , дБ/км
Плотный туман	0,05	315
Густой туман	0,2	75
Легкий туман	0,7	20
Дымка	2	6,6
Чистый воздух	10	1,1
Абсолютно чистый воздух	20	0,54

Атмосферная экстинкция в условиях тумана выразится через МДВ  $V$  следующим образом:

$$\alpha = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^\delta, \quad (13)$$

где параметр  $\delta$  зависит от величины видимости.

$$\delta = \begin{cases} 1,6, & V > 50 \text{ км}, \\ 1,3, & 6 \text{ км} < V < 50 \text{ км}, \\ 0,585V^{1/3}, & V < 6 \text{ км}. \end{cases} \quad (14)$$

Выделяют два основных типа тумана: радиационный и адвективный. Оба типа тумана отличаются по своим физическим свойствам (размеру и концентрации капель, оптической плотности) и оказывают разное влияние на распространение света. Подробный обзор можно найти в работе [103].

Радиационный туман образуется в результате охлаждения почвы под действием радиации, что обычно происходит ночью или ранним утром, и рассеивается с восходом солнца. Такой тип тумана приводит к охлаждению прилегающего к поверхности слоя воздуха до точки росы, вызывая конденсацию водяного пара, что приводит к образованию тумана. Радиационный туман обычно возникает в долинах вблизи водоемов и местах, где воздух более влажный. Он часто имеет небольшую вертикальную протяженность (до нескольких сотен метров) и состоит из мелких капель воды (диаметром 1 – 10 мкм) с относительно низкой концентрацией (100 – 1000 капель/см<sup>3</sup>).

Адвективный туман обычно образуется из-за движения влажных и теплых воздушных масс над более холодными поверхностями на уровне земли. При контакте с холодной поверхностью воздух охлаждается, что приводит к конденсации водяного пара и образованию тумана. Вертикальная протяженность адвективного тумана, в отличие от радиационного, может достигать нескольких километров. Такой туман состоит из более крупных капель воды диаметром 10 – 50 мкм с более высокой концентрацией порядка 1000 – 5000 капель/см<sup>3</sup>. Он может сохраняться несколько суток и часто сопровождается морозящими осадками.

### 8. Дроны и движимые объекты

Основные эксперименты, реализованные в прошлом десятилетии, ставились, как правило, между стационарными объектами. В последние годы наблюдается значительный прогресс в развитии технологий КРК, смещающий фокус исследований от стационарных объектов к мобильным платформам [9, 17, 18]. Данное направление зародилось как отработка связи между неподвижной станцией и движущимся телескопом, имитирующим движение спутника. Однако впоследствии выделилось отдельное направление по интеграции систем КРК с подвижными автоматизированными устройствами, такими как беспилотный транспорт и летающие дроны, с целью создания гибких и адаптивных квантовых сетей.

Первый эксперимент с мобильным устройством был представлен в работе [16], где описано распространение квантового ключа между наземной станцией и летящим самолетом, имитирующим движение спутника. Этот эксперимент показал принципиальную возможность организации квантовой связи с подвижным объектом, но также выявил ряд технических сложностей, связанных с нестабильностью канала связи и необходимостью точного наведения и слежения за движущимся объектом. Становится необходимым использовать усовершенствованную систему наведения и слежения, которая гарантирует стабильную передачу сигналов на однофотонном уровне и обеспечивает стабильное наведение луча в условиях постоянного движения.

Использование протокола КРКДП, основанного на кодировании информации в состояниях поляризации фотонов, требует прецизионно точной настройки ориентации блока отправителя и получателя, а также постоянного контроля взаимной ориентации, необходимой для подвижных блоков. В сценариях воздушной связи, где передатчик и приемник могут совершать взаимные вращения, компенсация этих вращений становится критически важной задачей [104]. Для решения этой проблемы разрабатываются различные методы активной и пассивной стабилизации поляризации.

Активные методы обычно предполагают использование сложных систем обратной связи, которые отслеживают изменения в поляризации оптического сигнала и корректируют ориентацию системы в реальном времени с помощью специальных устройств. Такие системы могут быть оснащены гироскопами и акселерометрами, которые позволяют точно отслеживать движение и вращение передатчика и приемника, внося необходимые коррективы для поддержания согласованности блоков связи.

Пассивные методы стабилизации, в свою очередь, предполагают использование оптических элементов, которые минимизируют влияние вращений и других внешних факторов на поляризацию сигнала. Например, можно использовать специальное оптическое волокно с низкой чувствительностью к изменениям внешней среды или определенные конструкции оптических компонент, включающих в себя зеркала и специальные оптические линзы, которые автоматически сохраняют поляризацию света, независимо от ориентации передатчика и приемника.

Другим перспективным подходом являются адаптивные оптические системы и алгоритмы машинного обучения, которые могут предсказывать и компенсировать изменения в поляризации на основе анализа данных

об условиях окружающей среды и поведении системы. Эти решения потенциально могут значительно повысить надежность квантовой связи в условиях постоянного движения передатчика и приемника, что особенно важно для применения КРК в реальных сценариях, таких как спутниковая квантовая связь или беспилотные летательные аппараты [45 – 46, 105].

Таким образом, точная и стабильная настройка поляризационных состояний является ключевым фактором для успешного функционирования систем КРК. Разработка и внедрение методов компенсации вращений и нестабильностей в передатчике и приемнике остаются активной областью исследований, и дальнейшие достижения в этой области могут значительно расширить возможности применения КРК в различных сценариях, включая глобальные сети квантовой связи.

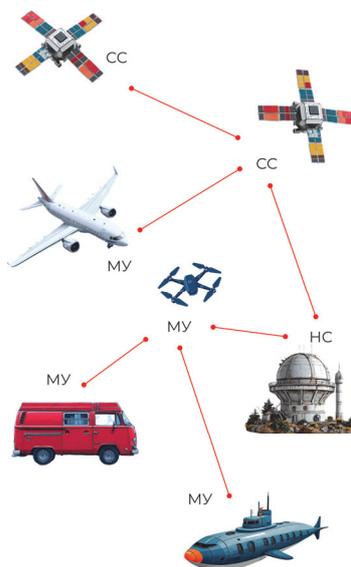


Рис. 8. Пример квантовой сети между подвижными объектами посредством атмосферного канала.  
СС – спутниковая система, МУ – мобильное устройство, НС – наземная станция

Другое актуальное решение для связи между подвижными объектами – использование мобильных узлов или дронов. Сеть дронов, оснащенных модулями КРК, позволяет организовать гибкую оптическую ретрансляцию сигнала, что особенно актуально в условиях ограниченной прямой видимости или при необходимости связи на большие расстояния. При этом основным ограничением данных систем являются требования по весу и объему готового модуля КРК, так как сам дрон имеет ограниченную грузоподъемность. Это стимулирует разработку миниатюрных и энергоэффективных КРК-систем, адаптированных для использования на беспилотных платформах.

Использование дронов в качестве ретрансляторов сигнала представляет значительный интерес [20], поскольку позволяет компенсировать уширение пучка при распространении в атмосфере и снизить суммарные потери в канале. В условиях, когда сигнал проходит через воздушную среду, такие факторы, как турбулентность, поглощение и рассеяние, могут значительно ослабить его мощность. Дроны, выступающие в роли промежуточных узлов, помогают снизить эти потери, разбивая суммарное расстояние на несколько коротких участков. Это позволяет улучшить качество передаваемой информации и повысить общую эффективность канала связи при условии, что дроны являются доверенными узлами.

Однако расстояние между дронами ограничено пределом длины Рэлея, которая определяется как расстояние, на котором дифракционные эффекты начинают значительно влиять на распространение пучка, вызывая его уширение и, как следствие, дополнительные потери. Для большинства практических применений в условиях атмосферы этот предел составляет примерно один километр. Это ограничение накладывает определенные требования на конфигурацию сети дронов и на их способность поддерживать заданное расстояние друг от друга.

Кроме того, стоит отметить, что концепция с использованием дронов-ретрансляторов особенно эффективна в многоузловых сетях, где каждый дрон может выполнять не только функцию передачи сигнала, но и выступать в качестве активного участника квантового обмена, например, в качестве генератора собственного ключа. Это открывает возможности для построения гибких и стойких сетей, где мобильные узлы могут не только поддерживать связь, но и обеспечивать высокий уровень безопасности передачи данных.

Однако это приводит к появлению дополнительных требований к конфигурации подобной сети. В первую очередь дроны необходимо оснастить сложными системами управления и навигации. Также каждый дрон должен обладать достаточной вычислительной мощностью и оборудованием для выполнения задач генерации и распределения ключей, что усложняет конструкцию и увеличивает требования к энергии, необходимой для поддержания их работы в течение продолжительного времени.

Технические решения для этих задач могут включать использование GPS-навигации, инерциальных сенсоров или даже систем визуального позиционирования для обеспечения точности удержания положения дронов. Также может быть задействована система автоматической координации полета, позволяющая дронам динамически адаптировать свои позиции в зависимости от условий окружающей среды и поведения других узлов сети. Важно, чтобы дроны могли постоянно обмениваться информацией о своем положении и корректировать полет для минимизации погрешностей в расстоянии. Пример конфигурации сети дронов, интегрируемых в локальную систему связи, представлен на рис. 9.

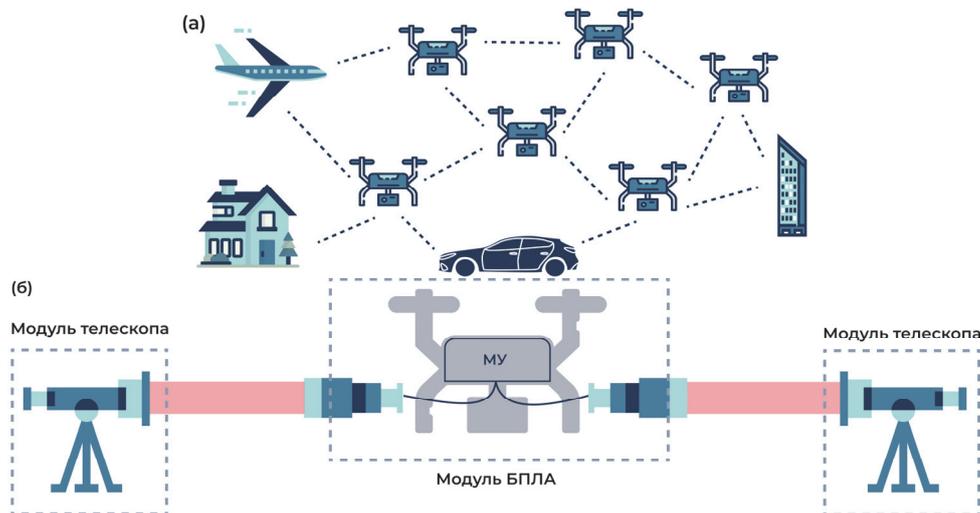


Рис. 9. Квантовая сеть и физическая реализация с мобильными узлами на базе БПЛА. (а) Пример квантовой сети, состоящей из многоузловой структуры и обеспечивающей доступ для пользователей в любое время. (б) Схема оптической связи между БПЛА и приемником. Сигнал передается от модуля управления (МУ) БПЛА в модуль телескопа приемника. Связь может одновременно передаваться между несколькими приемниками, тем самым БПЛА выступает в качестве ретранслятора сигнала в принципе с неограниченным числом трансляций

Многоузловая сеть дронов позволяет не только расширить зону покрытия квантовой сети, именно поэтому использование дронов может стать решением для шифрования частной информации в пределах городской инфраструктуры [19]. Беспилотники, благодаря своей маневренности и способности перемещаться по сложным траекториям, могут получить доступ к удаленным и труднодоступным районам, заполняя территориальные пробелы, недоступные для волоконных линий связи или систем «спутник–наземная станция». Таким образом, можно объединять изолированные локации или преодолевать обширные пространства, обеспечивая непрерывную квантовую связь в сложных условиях. Гибкость и мобильность таких устройств позволяет динамически менять топологию этих объектов, позволяя подстраиваться под меняющиеся условия и требования пользователей.

Тем не менее вопрос о целесообразности использования дронов в качестве мобильной и гибкой платформы для КРК остается открытым и требует дополнительных исследований. Для успешной реализации систем КРК на дронах необходимо решить ряд технических задач, связанных с миниатюризацией оборудования, стабилизацией канала связи и обеспечением криптографической стойкости системы. Стоит отметить некоторый прогресс в развитии модели канала с отслеживанием беспилотника, подтверждения стойкости протоколов КРК с помощью дронов и их устойчивости к атакам [20, 106, 107].

В работе [108] исследуется ряд технических ограничений, которые необходимо решить для практической реализации КРК с использованием БПЛА в качестве мобильных узлов или ретрансляторов. К основным проблемам использования БПЛА в КРК относится поддержание прецизионного выравнивания луча между дронами и наземными станциями. Подвижность и дрожание дронов из-за атмосферной турбулентности, а также дифракции луча, как обсуждалось ранее, приводит к деградации сигнала и прерыванию сеанса связи.

Другим важным фактором является уменьшение влияния атмосферной турбулентности на целостность квантового сигнала. Турбулентность вызывает случайные флуктуации показателя преломления воздуха, что приводит к искажению волнового фронта, уширению луча и потере когерентности.

Кроме того, важной задачей является оптимизация размера, веса и энергопотребления оборудования КРК, устанавливаемого на дроны. Для обеспечения длительного времени полета и эффективного использования ресурсов необходимо минимизировать габариты и вес компонентов. Также необходимо оптимизировать энергопотребление этих компонентов и использовать эффективные алгоритмы управления энергией.

Примером успешной реализации системы с дроном КРКНП является работа [109], в которой авторы оценивают производительность системы дронов в условиях турбулентности, и показывают, что система способна поддерживать высокую скорость передачи стойких ключей. Передовые методы модуляции и управления

дисперсией помогают повысить эффективность распределения ключей и качество сигнала, следовательно, полученные результаты подтверждают перспективность использования беспилотных платформ для создания безопасных квантовых мобильных сетей.

В дальнейшем предлагается развить многоуровневую гибридную квантовую систему, осуществляющую обмен стойкими ключами между спутниками, беспилотниками, самолетами, другими движимыми и стационарными объектами. Такая сеть позволит обеспечить безопасную связь в глобальном масштабе и предоставит новые возможности для защиты информации в различных сферах деятельности, от телекоммуникаций и финансового сектора до военной и правительственной связи.

Развитие технологий КРК с использованием дронов требует решения ряда дополнительных задач, таких как обеспечение безопасности и защиты от несанкционированного доступа, разработка протоколов маршрутизации и управления топологией сети, интеграция с существующими системами связи и навигации. Также необходимы дальнейшие исследования влияния атмосферных условий, таких как осадки, дифракция и турбулентность, на производительность и надежность системы КРК с дронами.

Таким образом, использование беспилотных летательных аппаратов открывает новые возможности для создания гибких и масштабируемых квантовых сетей связи. Однако для практической реализации этой технологии необходимо решить ряд технологических решений, связанных с обеспечением стабильности и качества квантового канала в условиях атмосферных возмущений и подвижности платформы. Дальнейшие исследования и разработки в этой области обеспечат создание надежных и эффективных систем квантовой связи на основе беспилотных платформ для различных приложений, таких как защищенная передача данных, квантовый интернет и распределенные вычисления.

### *Заключение*

КРКНП в открытом пространстве представляет собой одно из основных направлений в развитии квантовых коммуникаций, открывающее новые горизонты для создания высокоскоростных, безопасных и гибких сетей квантовой связи. В отличие от протоколов, основанных на дискретных переменных, непрерывные переменные кодируют состояния света с помощью амплитудной и фазовой модуляции, что позволяет достичь более высокой пропускной способности канала и использовать телекоммуникационные устройства в системах связи.

Тем не менее реализация КРКНП в атмосферных каналах сопряжена с рядом серьезных технических проблем, обусловленных случайными флуктуациями среды, наличием дополнительных шумов и сложными погодными условиями. Атмосферная турбулентность, вызванная изменениями температуры и плотности воздуха, приводит к искажению волнового фронта светового пучка, что затрудняет его фокусировку на приемной стороне и увеличивает потери сигнала. Дополнительные шумы, обусловленные рассеянным светом, тепловым излучением и другими источниками, снижают отношение сигнал/шум и могут привести к ошибкам при детектировании квантовых состояний. Погодные условия, такие как дождь, снег и туман, вызывают дополнительное затухание сигнала и могут прервать связь. Разработка точной модели атмосферного канала является ключевым шагом для проектирования и оптимизации систем КРК в открытом пространстве, позволяя предсказывать их производительность в различных полевых условиях и обеспечивать надежную и безопасную передачу квантовой информации.

Разработка эффективных методов компенсации атмосферных искажений и адаптации параметров системы к изменяющимся условиям является ключевой задачей для практической реализации квантовых коммуникаций в свободном пространстве. Дальнейшие исследования в области теории рассеяния квантового света и разработка новых методов детектирования и коррекции квантовых состояний позволят расширить область применения технологий КРК и обеспечить надежную и безопасную передачу квантовой информации в различных условиях окружающей среды.

Многочисленные исследования и эксперименты показывают, что, несмотря на случайные флуктуации среды, наличие дополнительных шумов и сложных погодных условий, распределенный ключ может оставаться надежным. Используя достижения адаптивной оптики, новые методы модуляции и коррекции ошибок, можно преодолеть эти препятствия [110]. Адаптивная оптика, например, позволяет компенсировать искажения волнового фронта, вызванные атмосферной турбулентностью, и восстановить качество сигнала.

Используемые методы модуляции, такие как гауссовская модуляция когерентных состояний, позволяют эффективно кодировать информацию в квантовых состояниях света и обеспечить высокую скорость передачи данных. Выбор протокола с гауссовской или дискретной модуляцией зависит от конкретных требований к системе, включая скорость генерации ключа, дальность передачи, сложность реализации и устойчивость к шумам.

Продолжающиеся исследования в области КРКНП, включая изучение нетривиальных квантовых состояний и разработку новых методов борьбы с шумами, открывают перспективы для создания более эффективных и надежных систем квантового распределения ключей. Последние годы особое внимание уделено состояниям с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [57, 78, 63, 111, 112]. Вихревые пучки представляют интерес с точки зрения потенциального увеличения пропускной способности канала за счет бесконечного числа степеней свободы и использования мультиплексирования [113, 114].

Альтернативой активной модуляции является пассивное приготовление состояний с помощью теплового источника, которое может сыграть ключевую роль в развитии практических и доступных систем квантового распределения ключей, способствуя широкому внедрению квантовой криптографии.

Технология КРКНП позволяет создавать быстро разворачиваемые, масштабируемые, интегрируемые вместе с телекоммуникационными инфраструктурами, отвечающие всем требованиям безопасной связи. Применение такой технологии обширно: начиная со спутниковых систем в сложных условиях эксплуатации, заканчивая коммуникациями в городской среде с помощью мобильных беспилотных объектов. Развитие мобильного КРК открывает новые горизонты для создания многоуровневых гибридных квантовых сетей, способных удовлетворить потребностям современного мира. Преодоление технических ограничений позволяет реализовать потенциал мобильных квантовых технологий в глобальном масштабе и обеспечить безопасность информации в условиях динамично меняющейся среды.

Однако, несмотря на значительные успехи, достигнутые в области КРК в атмосферных каналах связи, необходимо больше теоретических и экспериментальных работ в области НП. В частности, требуется дальнейшее развитие теории распространения квантового света в атмосфере, разработка новых методов модуляции и детектирования квантовых состояний, а также создание более эффективных алгоритмов коррекции ошибок. Важной задачей является также миниатюризация и снижение энергопотребления оборудования КРКНП, что позволит расширить область его применения и сделать его доступным для широкого круга пользователей.

В этой работе были проанализированы основные проблемы и достижения в области КРКНП в открытом пространстве. Были рассмотрены как внешние эффекты, влияющие на работу системы КРК, такие как атмосферная турбулентность, шумы, погодные условия, так и особенности самих протоколов в условиях распределения ключей по атмосферному каналу. Был продемонстрирован потенциал, присущий таким системам. Развитие КРКНП в открытом пространстве является ключевым шагом на пути к созданию глобальной квантовой коммуникационной инфраструктуры, обеспечивающей высокий уровень криптографической стойкости при масштабировании. Дальнейшие исследования и разработки в этой области позволят реализовать больше возможностей КРКНП и обеспечить его широкое применение в различных сферах деятельности.

### *Благодарности*

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 24–29–00786).

### *References*

- [1] Lupo C. Towards practical security of continuous-variable quantum key distribution. *Physical Review A*. 2020;102:022623. doi:10.1103/PhysRevA.102.022623.
- [2] Zhang Y, Bian Y, Li Z, Yu S, Guo H. Continuous-variable quantum key distribution system: Past, present, and future. *Applied Physics Reviews*. 2024;11(1):011317. doi: 10.1063/5.0179566
- [3] Diamanti E, Leverrier A. Distributing secret keys with quantum continuous variables: Principle, security and implementations. *Entropy*. 2015;17(8):6072–6092. doi: 10.3390/e17096072
- [4] Liao S-K, Cai W-Q, Handsteiner J, Liu B, Yin J, Zhang L, Rauch D, Fink M, Ren J-G, Liu W-Y, Li Y, Shen Q, Cao Y, Li F-Z, Wang J-F, Huang Y-M, Deng L, Xi T, Ma L, Hu T, Li L, Liu N-L, Koidl F, Wang P, Chen Y-A, Wang X-B, Steindorfer M, Kirchner G, Lu C-Y, Shu R, Ursin R, Scheidl T, Peng C-Z, Wang J-Y, Zeilinger A, Pan J-W. Satellite-relayed intercontinental quantum network. *Physical Review Letters*. 2018;120:030501. doi:10.1103/PhysRevLett.120.030501.
- [5] Azuma K. Networking quantum networks with minimum cost aggregation. In: *Quantum Computing, Communication, and Simulation IV*. SPIE; 2024: PC129111G. doi:10.1117/12.3000727.
- [6] Pirandola S, Braunstein SL. Physics: Unite to build a quantum internet. *Nature*. 2016;532(7598):169–171. doi:10.1038/532169a.
- [7] Zhang Y, Chen Z, Pirandola S, Wang X, Zhou C, Chu B, Zhao Y, Xu B, Yu S, Guo H. Long-distance continuous-variable quantum key distribution over 202.81 km of fiber. *Physical Review Letters*. 2020; 125:010502. doi:10.1103/PhysRevLett.125.010502.
- [8] Chen Y-A, Zhang Q, Chen T-Y, Cai W-Q, Liao S-K, Zhang J, Chen K, Yin J, Ren J-G, Chen Z, Han S-L, Yu Q, Liang K, Zhou F, Yuan X, Zhao M-S, Wang T-Y, Jiang X, Zhang L, Liu W-Y, Li Y, Shen Q, Cao Y, Lu C-Y, Shu R, Wang J-Y, Li L, Liu N-L, Xu F, Wang X-B, Peng C-Z, Pan J-W. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres. *Nature*. 2021;589(7841):214–219. doi:10.1038/s41586-020-03093-8.
- [9] Lu C-Y, Cao Y, Peng C-Z, Pan J-W. Micius quantum experiments in space. *Reviews of Modern Physics*. 2022;94(3):035001. doi:10.1103/RevModPhys.94.035001.
- [10] Pirandola S. Satellite quantum communications: Fundamental bounds and practical security. *Physical Review Research*. 2021;3:023130. doi:10.1103/PhysRevResearch.3.023130.
- [11] Pan Z, Djordjevic IB. Security of satellite-based CV-QKD under realistic assumptions. In: *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE; 2020:1–4. doi: 10.1109/ICTON51198.2020.9203397
- [12] Liao SK, Cai WQ, Liu WY, Zhang L, Li Y, Ren JG, Yin J, Shen Q, Cao Y, Li ZP, Li FZ, Chen XW, Sun LH, Jia JJ, Wu JC, Jiang XJ, Wang JF, Huang YM, Wang Q, Zhou YL, Deng L, Xi T, Ma L, Hu T, Zhang Q, Chen Y-A, Liu N-L, Wang X-B, Zhu Z-C, Lu C-Y, Shu R, Peng C-Z, Wang J-Y, Pan J-W. Satellite-to-ground quantum key distribution. *Nature*. 2017;549(7670):43–47. doi:10.1038/nature23655
- [13] Yin J, Li Y-H, Liao S-K, Yang M, Cao Y, Zhang L, Ren J-G, Cai W-Q, Liu W-Y, Li S-L, Shu R, Huang Y-M, Deng L, Li L, Zhang Q, Liu N-L, Chen Y-A, Lu C-Y, Wang X-B, Xu F, Wang J-Y, Peng C-Z, Ekert AK, Pan J-W. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres. *Nature*. 2020;582(7813):501–505. doi:10.1038/s41586-020-2401-y

- [14] Bedington R, Arrazola JM, Ling A. Progress in satellite quantum key distribution. *npj Quantum Information*. 2017;3(1):30. doi:10.1038/s41534-017-0031-5
- [15] Perdigues Armengol JM, Furch B, de Matos CJ, Minster O, Cacciapuoti L, Pfennigbauer M, Aspelmeyer M, Jennewein T, Ursin R, Schmitt-Manderbach T, et al. Quantum communications at ESA: Towards a space experiment on the ISS. *Acta Astronautica*. 2008;63(1-4):165-178. doi: 10.1016/j.actaastro.2007.12.039
- [16] Nauerth S, Moll F, Rau M, Fuchs C, Horwath J, Frick S, Weinfurter H. Air-to-ground quantum communication. *Nature Photonics*. 2013;7(5):382-386. doi:10.1038/nphoton.2013.46
- [17] Pugh CJ, Kaiser S, Bourgoin J-P, Jin J, Sultana N, Agne S, Anisimova E, Makarov V, Choi E, Higgins BL, et al. Airborne demonstration of a quantum key distribution receiver payload. *Quantum Science and Technology*. 2017;2(2):024009. doi:10.1088/2058-9565/aa701f
- [18] Bourgoin J-P, Higgins BL, Gigov N, Holloway C, Pugh CJ, Kaiser S, Cranmer M, Jennewein T. Free-space quantum key distribution to a moving receiver. *Optics Express*. 2015;23(26):33437-33447. doi:10.1364/OE.23.033437
- [19] Tian X-H, Yang R, Zhang J-N, Yu H, Zhang Y, Fan P, Chen M, Gu C, Ni X, Hu M, et al. Drone-based quantum key distribution. arXiv preprint arXiv:2302.14012. 2023.
- [20] Liu H-Y, Tian X-H, Gu C, Fan P, Ni X, Yang R, Zhang J-N, Hu M, Guo J, Cao X, et al. Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes. *Physical Review Letters*. 2021;126(2):020503. doi:10.1103/PhysRevLett.126.020503
- [21] Vallone G, Bacco D, Dequal D, Gaiarin S, Luceri V, Bianco G, Villoresi P. Experimental satellite quantum communications. *Physical Review Letters*. 2015;115(4):040502. doi:10.1103/PhysRevLett.115.040502
- [22] Wang JY, Yang B, Liao SK, Zhang L, Shen Q, Hu XF, Wu JC, Yang SJ, Jiang H, Tang YL, Zhong B, Liang H, Liu WY, Hu YH, Huang YM, Qi B, Ren JG, Pan GS, Yin J, Jia JJ, Chen Y-A, Chen K, Peng C-Z, Pan J-W. Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution. *Nature Photonics*. 2013;7(5):387-393. doi:10.1038/nphoton.2013.89
- [23] G, Freiwang P, Luhn J, Vogl T, Rau M, Knips L, Rosenfeld W, Weinfurter H. Quantum key distribution with a hand-held sender unit. *Physical Review Applied*. 2022;18(2):024067. doi:10.1103/PhysRevApplied.18.024067
- [24] Bourgoin JP, Meyer-Scott E, Higgins BL, Helou B, Erven C, Huebel H, Kumar B, Hudson D, D'Souza I, Girard R, et al. A comprehensive design and performance analysis of low Earth orbit satellite quantum communication. *New Journal of Physics*. 2013;15(2):023006. doi:10.1088/1367-2630/15/2/023006
- [25] Laudenbach F, Pacher C, Fung CHF, Poppe A, Peev M, Schrenk B, Hentschel M, Walther P, Hübel H. Continuous-variable quantum key distribution with Gaussian modulation—the theory of practical implementations. *Advanced Quantum Technologies*. 2018;1(1):1800011. doi:10.1002/qute.201800011
- [26] Grosshans F, Grangier P. Continuous variable quantum cryptography using coherent states. *Physical Review Letters*. 2002;88(5):057902. doi:10.1103/PhysRevLett.88.057902
- [27] Grosshans F, Van Assche G, Wenger J, Brouri R, Cerf NJ, Grangier P. Quantum key distribution using Gaussian-modulated coherent states. *Nature*. 2003;421(6920):238-241. doi:10.1038/nature01289
- [28] Goncharov R, Vorontsova I, Kirichenko D, Filipov I, Adam I, Chistiakov V, Smirnov S, Nasedkin B, Pervushin B, Kargina D, Samsonov E, Egorov V. The rationale for the optimal continuous-variable quantum key distribution protocol. *Optics*. 2022;3(4):338-351. doi:10.3390/opt3040030
- [29] Grosshans F, Cerf NJ, Wenger J, Tualle-Brouri R, Grangier P. Virtual entanglement and reconciliation protocols for quantum cryptography with continuous variables. arXiv preprint quant-ph/0306141. 2003.
- [30] Hosseini-dehaj N, Babar Z, Malaney R, Ng SX, Hanzo L. Satellite-based continuous-variable quantum communications: State-of-the-art and a predictive outlook. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019;21(1):881-919. doi:10.1109/COMST.2018.2864557
- [31] Liao SK, Yong HL, Liu C, Shentu GL, Li DD, Lin J, Dai H, Zhao SQ, Li B, Guan JY, et al. Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication. *Nature Photonics*. 2017;11(8):509-513. doi:10.1038/nphoton.2017.116
- [32] Krzić A, Sharma S, Spiess C, Chandrashekar U, Töpfer S, Sauer G, González-Martín del Campo LJ, Kopf T, Petschornig S, Grafenauer T, et al. Towards metropolitan free-space quantum networks. *npj Quantum Information*. 2023;9(1):95. doi:10.1038/s41534-023-00763-z
- [33] Zhang G, Haw JY, Cai H, Xu F, Assad SM, Fitzsimons JF, Zhou X, Zhang Y, Yu S, Wu J, et al. An integrated silicon photonic chip platform for continuous-variable quantum key distribution. *Nature Photonics*. 2019;13(12):839-842. doi:10.1038/s41566-019-0504-5
- [34] Qi B, Gunther H, Evans PG, Williams BP, Camacho RM, Peters NA. Experimental passive-state preparation for continuous-variable quantum communications. *Physical Review Applied*. 2020;13(5):054065. doi:10.1103/PhysRevApplied.13.054065
- [35] Andersen UL, Neergaard-Nielsen JS, Van Loock P, Furusawa A. Hybrid discrete- and continuous-variable quantum information. *Nature Physics*. 2015;11(9):713-719. doi:10.1038/nphys3410
- [36] Kiesel T, Vogel W, Hage B, Schnabel R. Nonclassicality quasiprobability of single-photon-added thermal states. *Physical Review A*. 2011;83(3):032116. doi:10.1103/PhysRevA.83.032116
- [37] Qi B, Evans PG, Grice WP. Passive state preparation in the Gaussian-modulated coherent-states quantum key distribution. *Physical Review A*. 2018;97(1):012317. doi:10.1103/PhysRevA.97.012317
- [38] Weedbrook C, Lance AM, Bowen WP, Symul T, Ralph TC, Lam PK. Quantum cryptography without switching. *Physical Review Letters*. 2004;93(17):170504. doi:10.1103/PhysRevLett.93.170504
- [39] Devetak I, Winter A. Distillation of secret key and entanglement from quantum states. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2005;461(2053):207-235. doi:10.1098/rspa.2004.1372
- [40] Holevo AS. Bounds for the quantity of information transmitted by a quantum communication channel. *Problems of Information Transmission*. 1973;9(3):177-183.

- [41] Leverrier A, Grosshans F, Grangier P. Finite-size analysis of a continuous-variable quantum key distribution. *Physical Review A*. 2010;81(6):062343. doi:10.1103/PhysRevA.81.062343
- [42] Pirandola S. Limits and security of free-space quantum communications. *Physical Review Research*. 2021;3(1):013279. doi:10.1103/PhysRevResearch.3.013279
- [43] Semenov AA, Töppel F, Vasylyev DY, Gomonay HV, Vogel W. Homodyne detection for atmosphere channels. *Physical Review A*. 2012;85(1):013826. doi:10.1103/PhysRevA.85.013826
- [44] Croal C, Peuntinger C, Heim B, Khan I, Marquardt C, Leuchs G, Wallden P, Andersson E, Korolkova N. Free-space quantum signatures using heterodyne measurements. *Physical Review Letters*. 2016;117(10):100503. doi:10.1103/PhysRevLett.117.100503
- [45] Geng C, Huang P, Cao Z, Zeng G. Suppressing excess noise for atmospheric continuous-variable quantum key distribution via adaptive optics approach. *New Journal of Physics*. 2020;22(10):103009. doi: 10.1088/1367-2630/abb47c
- [46] Zheng D, Li Y, Li B, Li W, Chen E, Wu J. Free space to few-mode fiber coupling efficiency improvement with adaptive optics under atmospheric turbulence. In: *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group; 2017: Th3C-2. doi:10.1364/OFC.2017.Th3C.2
- [47] Tatarskii VI. *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; 1971.
- [48] Wang S, Huang P, Wang T, Zeng G. Atmospheric effects on continuous-variable quantum key distribution. *New Journal of Physics*. 2018;20(8):083037. doi: 10.1088/1367-2630/aad9c4
- [49] Andrews LC, Phillips RL. *Laser Beam Propagation Through Random Media*. 2nd ed. SPIE Press; 2005.
- [50] Qu Z, Djordjevic IB. 500 Gb/s free-space optical transmission over strong atmospheric turbulence channels. *Optics Letters*. 2016;41(14):3285-3288. doi:10.1364/OL.41.003285
- [51] Ruppert L, Peuntinger C, Heim B, Günthner K, Usenko VC, Elser D, Leuchs G, Filip R, Marquardt C. Fading channel estimation for free-space continuous-variable secure quantum communication. *New Journal of Physics*. 2019;21(12):123036. doi: 10.1088/1367-2630/ab5dd3
- [52] Ruppert L, Usenko VC, Filip R. Long-distance continuous-variable quantum key distribution with efficient channel estimation. *Physical Review A*. 2014;90(6):062310. doi:10.1103/PhysRevA.90.062310
- [53] Vasylyev D, Semenov AA, Vogel W, Günthner K, Thurn A, Bayraktar Ö, Marquardt C. Free-space quantum links under diverse weather conditions. *Physical Review A*. 2017;96(4):043856. doi:10.1103/PhysRevA.96.043856
- [54] Fadhil HA, Amphawan A, Shamsuddin HAB, Abd TH, Al-Khafaji HMR, Aljunid SA, Ahmed N. Optimization of free space optics parameters: An optimum solution for bad weather conditions. *Optik*. 2013;124(19):3969-3973. doi:10.1016/j.ijleo.2012.11.059
- [55] Wang S, Huang P, Wang T, Zeng G. Feasibility of all-day quantum communication with coherent detection. *Physical Review Applied*. 2019;12(2):024041. doi:10.1103/PhysRevApplied.12.024041
- [56] Ahmed A, Gupta S, Luthra Y, Gupta K, Kaur S. Analysing the effect of scintillation on free space optics using different scintillation models. In: *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. IEEE; 2019: 799-804. doi: 10.1109/SPIN.2019.8711574
- [57] Liu Y, Zhang K, Chen Z, Pu J. Scintillation index of double vortex beams in turbulent atmosphere. *Optik*. 2019;181:571-574. doi: 10.1016/j.ijleo.2018.12.046
- [58] Dios F, Rubio JA, Rodríguez A, Comerón A. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. *Applied Optics*. 2004;43(19):3866-3873. doi:10.1364/AO.43.003866
- [59] Bekhrad P, Leitgeb A. Different models of the refractive index structure constant calculation. In: *2020 3rd West Asian Symposium on Optical and Millimeter-wave Wireless Communication (WASOWC)*. IEEE; 2020: 1-4. doi: 10.1109/WASOWC49739.2020.9409977
- [60] Kovadlo PG, Shihovtsev AY. The study of turbulence and optical instability in stably stratified earth's atmosphere. In: Romanovskii OA, editor. *21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Vol 9680. SPIE; 2015: 968074. doi: 10.1117/12.2205997
- [61] Ghalaii M, Pirandola S. Quantum communications in a moderate-to-strong turbulent space. *Communications Physics*. 2022;5(1):38. doi:10.1038/s42005-022-00812-7
- [62] Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Parani VD. Transmission and detection of informationally loaded beams of wavelength 1530 nm in a random fluctuating medium. *Computer Optics*. 2019;43(3):368-375. doi:10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375
- [63] Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Khonina SN. High-speed format 1000BASE-SX/LX transmission through the atmosphere by vortex beams near IR range with help modified SFP-transmitters DEM-310GT. *Computer Optics*. 2020;44(4):578-581. doi:10.18287/2412-6179-CO-772
- [64] Chai G, Cao Z, Liu W, Wang S, Huang P, Zeng G. Parameter estimation of atmospheric continuous-variable quantum key distribution. *Physical Review A*. 2019;99(3):032326. doi:10.1103/PhysRevA.99.032326
- [65] Carrasco-Casado A, Denisenko N, Fernandez V. Correction of beam wander for a free-space quantum key distribution system operating in urban environment. *Optical Engineering*. 2014;53(8):084112. doi:10.1117/1.OE.53.8.084112
- [66] Usenko VC, Peuntinger C, Heim B, Günthner K, Derkach I, Elser D, Marquardt C, Filip R, Leuchs G. Stabilization of transmittance fluctuations caused by beam wandering in continuous-variable quantum communication over free-space atmospheric channels. *Optics Express*. 2018;26(24):31106-31123. doi:10.1364/OE.26.031106
- [67] Vasylyev D, Semenov AA, Vogel W. Atmospheric quantum channels with weak and strong turbulence. *Physical Review Letters*. 2016;117(9):090501. doi:10.1103/PhysRevLett.117.090501
- [68] García-Patrón R, Cerf NJ. Continuous-variable quantum key distribution protocols over noisy channels. *Physical Review Letters*. 2009;102(13):130501. doi:10.1103/PhysRevLett.102.130501

- [69] Liorni C, Kampermann H, Bruß D. Satellite-based links for quantum key distribution: beam effects and weather dependence. *New Journal of Physics*. 2019;21(9):093055. doi: 10.1088/1367-2630/ab41a2
- [70] Er-Long M, Zheng-fu H, Shun-sheng G, Tao Z, Da-Sheng D, Guang-Can G. Background noise of satellite-to-ground quantum key distribution. *New Journal of Physics*. 2005;7(1):215. doi:10.1088/1367-2630/7/1/215
- [71] Avesani M, Calderaro L, Schiavon M, Stanco A, Agnesi C, Santamato A, Zahidy M, Scriminich A, Foletto G, Contestabile G, et al. Full daylight quantum-key-distribution at 1550 nm enabled by integrated silicon photonics. *npj Quantum Information*. 2021;7(1):93. doi:10.1038/s41534-021-00426-x
- [72] Peloso MP, Gerhardt I, Ho C, Lamas-Linares A, Kurtsiefer C. Daylight operation of a free space, entanglement-based quantum key distribution system. *New Journal of Physics*. 2009;11(4):045007. doi:10.1088/1367-2630/11/4/045007
- [73] Scriminich A, Foletto G, Picciariello F, Stanco A, Vallone G, Villoresi P, Vedovato F. Optimal design and performance evaluation of free-space quantum key distribution systems. *Quantum Science and Technology*. 2021;6(4):045003. doi: 10.1088/2058-9565/ac8760
- [74] Takesue H, Nam SW, Zhang Q, Hadfield RH, Honjo T, Tamaki K, Yamamoto Y. Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors. *Nature Photonics*. 2007;1(6):343-348. doi:10.1038/nphoton.2007.75
- [75] Joffe M, Gardelein A, Anzolin G, Amaya W, Capmany J, Ursin R, Peñate L, Lopez D, San Juan JL, Carrasco JA, et al. Fast optical source for quantum key distribution based on semiconductor optical amplifiers. *Optics Express*. 2011;19(5):3825-3834. doi:10.1364/OE.19.003825
- [76] Heim B, Peuntinger C, Killoran N, Khan I, Wittmann C, Marquardt C, Leuchs G. Atmospheric continuous-variable quantum communication. *New Journal of Physics*. 2014;16(11):113018. doi:10.1088/1367-2630/16/11/113018
- [77] Heine F, Kämpfner H, Greulich P, Seel S. Coherent detection of low light level pulses. In: 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). IEEE; 2011: 286-289. doi:10.1109/ICSOS.2011.5783676
- [78] Adam IA, Ivanova AE, Kolyadin MV, Kopenkin SS, Leokhov KS, Putilin AN, Semenov AA. Comparison of Gaussian and vortex beams in free-space QKD with phase encoding in turbulent atmosphere. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2022;13(4):392-403. doi:10.17586/2220-8054-2022-13-4-392-403
- [79] Goncharov RK, Kiselev AD, Samsonov EO, Egorov VI. Subcarrier wave continuousvariable quantum key distribution with Gaussian modulation: composable security analysis. *Computer Optics* 2023; 47(3): 374-380. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1225
- [80] Samsonov E, Goncharov R, Egorov V, Kargina D, Pervushin B, Nasedkin B, Smirnov S, Chistyakov V, Filipov I, Kirichenko D, Vorontsova I. Coherent detection schemes for subcarrier wave continuous variable quantum key distribution. *Journal of the Optical Society of America B*. 2021;38(7):2215-2222. doi:10.1364/JOSAB.423776
- [81] Cerf NJ, Lévy M, Van Assche G. Quantum distribution of Gaussian keys using squeezed states. *Physical Review A*. 2001;63(5):052311. doi:10.1103/PhysRevA.63.052311
- [82] Grosshans F, Van Assche G, Wenger J, Brouri R, Cerf NJ, Grangier P. Quantum key distribution using Gaussian-modulated coherent states. *Nature*. 2003;421(6920):238-241. doi:10.1038/nature01289
- [83] Shen SY, Dai MW, Zheng XT, Sun QY, Guo GC, Han ZF. Free-space continuous-variable quantum key distribution of unidimensional Gaussian modulation using polarized coherent states in an urban environment. *Physical Review A*. 2019;100(1):012308. doi:10.1103/PhysRevA.100.012308
- [84] Zhang M, Huang P, Wang P, Wei S, Zeng G. Experimental free-space continuous-variable quantum key distribution with thermal source. *Optics Letters*. 2023;48(5):1184-1187. doi: 10.1364/OL.485166
- [85] Peuntinger C, Heim B, Müller CR, Gabriel C, Marquardt C, Leuchs G. Distribution of squeezed states through an atmospheric channel. *Physical Review Letters*. 2014;113(6):060502. doi:10.1103/PhysRevLett.113.060502
- [86] Derkach I, Usenko VC, Filip R. Squeezing-enhanced quantum key distribution over atmospheric channels. *New Journal of Physics*. 2020;22(5):053006. doi: 10.1088/1367-2630/ab7ff8
- [87] Ghorai S, Grangier P, Diamanti E, Leverrier A. Asymptotic security of continuous-variable quantum key distribution with a discrete modulation. *Physical Review X*. 2019;9(2):021059. doi: 10.1103/PhysRevX.9.021059
- [88] Hirano T, Ichikawa T, Matsubara T, Ono M, Oguri Y, Namiki R, Kasai K, Matsumoto R, Tsurumaru T. Implementation of continuous-variable quantum key distribution with discrete modulation. *Quantum Science and Technology*. 2017;2(2):024010. doi: 10.1088/2058-9565/aa7230
- [89] Li S-G, Li C-L, Liu W-B, Yin H-L, Chen Z-B. Discrete-modulated continuous-variable quantum key distribution in satellite-to-ground communication. *Advanced Quantum Technologies*. 2024;2400140. doi:10.1002/qute.202400140
- [90] Chai G, Liang K, Liu W, Huang P, Cao Z, Zeng G. Analysis of atmospheric continuous-variable quantum key distribution with diverse modulations. *International Journal of Theoretical Physics*. 2019;58(11):3746-3764. doi: 10.1007/s10773-019-04245-x
- [91] Semenov AA, Vogel W. Quantum light in the turbulent atmosphere. *Physical Review A*. 2009;80(2):021802. doi:10.1103/PhysRevA.80.021802
- [92] Bohmann M, Kruse R, Sperling J, Silberhorn C, Vogel W. Higher-order nonclassical effects in fluctuating-loss channels. *Physical Review A*. 2017;95(1):012324. doi:10.1103/PhysRevA.95.012324
- [93] Qi B, Evans PG, Grice WP. Passive state preparation in the Gaussian-modulated coherent-states quantum key distribution. *Physical Review A*. 2018;97(1):012317. doi:10.1103/PhysRevA.97.012317
- [94] Huang P, Wang T, Chen R, Wang P, Zhou Y, Zeng G. Experimental continuous-variable quantum key distribution using a thermal source. *New Journal of Physics*. 2021;23(11):113028. doi: 10.1088/1367-2630/ac3684
- [95] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017;19(1):57-96. doi: 10.1109/COMST.2016.2603518
- [96] Singh H, Chechi DP. Performance evaluation of free space optical (FSO) communication link: effects of rain, snow and fog. In: 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). IEEE; 2019: 387-390. doi: 10.1109/SPIN.2019.8711672
- [97] Kim II, McArthur B, Korevaar EJ. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. In: *Optical Wireless Communications III*. Vol 4214. SPIE; 2001: 26-37. doi:10.1117/12.417512

- [98] Flecker B, Gebhart M, Leitgeb E, Sheikh Muhammad S, Chlestil C. Results of attenuation measurements for optical wireless channels under dense fog conditions regarding different wavelengths. In: Hammel SM, Kohnle A, editors. Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation II. Vol 6303. SPIE; 2006: 63030P. doi: 10.1117/12.680456
- [99] Wang S, Huang P, Wang T, Zeng G. Feasibility of continuous-variable quantum key distribution through fog. Optics Letters. 2021;46(23):5858–5861. doi: 10.1364/OL.439932
- [100] Al Naboulsi MC, Sizun H, de Fornel F. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. Optical Engineering. 2004;43(2):319–329. doi:10.1117/1.1637611
- [101] Guo Y, Xie C, Huang P, Li J, Zhang L, Huang D, Zeng G. Channel-parameter estimation for satellite-to-submarine continuous-variable quantum key distribution. Physical Review A. 2018;97(5):052326. doi:10.1103/PhysRevA.97.052326
- [102] Hu H, Zhong H, Ye W, Guo Y. Simultaneous two-way classical communication and measurement-device-independent quantum key distribution on oceanic quantum channels. Communications in Theoretical Physics. 2022;74(12):125102. doi: 10.1088/1572-9494/ac8b6a
- [103] Al Naboulsi M, Sizun H, de Fornel F. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. Optical Engineering. 2004;43(2):319–329. doi:10.1117/1.1637611
- [104] Tian X-H, Yang R, Liu H-Y, Fan P, Zhang J-N, Gu C, Chen M, Hu M, Lu F-Y, Zhu C, Yin Z-Q, Yin Z-J, Yuan M, Wang S, Chen W, Gong Y-X, Zhu S-N, Xie Z. Experimental demonstration of drone-based quantum key distribution. Physical Review Letters. 2024;133(20):200801. doi:10.1103/PhysRevLett.133.200801
- [105] Acosta VM, Restelli A, Bienfang JC, Clark CW, Magaña-Loaiza OS. Analysis of satellite-to-ground quantum key distribution with adaptive optics. New Journal of Physics. 2024;26(2):023039. doi: 10.1088/1367-2630/ad231c
- [106] Liu H-Y, Tian X-H, Gu C, Fan P, Ni X, Yang R, Zhang J-N, Hu M, Guo J, Cao X, et al. Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks. National Science Review. 2020;7(5):921–928. doi: 10.1093/nsr/nwz227
- [107] Alshaer N, Moawad A, Ismail T. Reliability and security analysis of an entanglement-based QKD protocol in a dynamic ground-to-UAV FSO communications system. IEEE Access. 2021;9:168052–168067. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137357
- [108] Xue Y, Chen W, Wang S, Yin Z, Shi L, Han Z. Airborne quantum key distribution: a review. Chinese Optics Letters. 2021;19(12):122702. doi:10.3788/COL202119.122702
- [109] Alshaer N, Ismail T. Performance evaluation and security analysis of UAV-based FSO/CV-QKD system employing DP-QPSK/CD. IEEE Photonics Journal. 2022;14(3):1–11. doi: 10.1109/JPHOT.2022.3164355
- [110] Chai G, Cao Z, Liu W, Wang S, Huang P, Zeng G. Parameter estimation of atmospheric continuous-variable quantum key distribution. Physical Review A. 2019;99(3):032326. Chai G, Cao Z, Liu W, Wang S, Huang P, Zeng G. Parameter estimation of atmospheric continuous-variable quantum key distribution. Physical Review A. 2019; 99(3):032326. doi:10.1103/PhysRevA.99.032326
- [111] Willner AE, Huang H, Yan Y, Ren Y, Ahmed N, Xie G, Bao C, Li L, Cao Y, Zhao Z, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams. Advances in Optics and Photonics. 2015;7(1):66–106. doi:10.1364/AOP.7.000066
- [112] Willner AE, Liu C. Perspective on using multiple orbital-angular-momentum beams for enhanced capacity in free-space optical communication links. Nanophotonics. 2020;10(1):225–233. doi: 10.1515/nanoph-2020-0435
- [113] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza OS, O'Sullivan MN, Rodenburg B, Malik M, Lavery MPJ, Padgett MJ, Gauthier DJ, Boyd RW. High-dimensional quantum cryptography with twisted light. New Journal of Physics. 2015;17(3):033033. doi:10.1088/1367-2630/17/3/033033
- [114] Qu Z, Djordjevic IB. High-speed free-space optical continuous-variable quantum key distribution enabled by three-dimensional multiplexing. Optics Express. 2017;25(7):7919–7928. doi:10.1364/OE.25.007919

### Сведения об авторах

**Каргина Дарья Андреевна**, 2003 года рождения, обучается в Университете ИТМО на физическом факультете по специальности 16.03.01 «Техническая физика». В настоящий момент работает в Лаборатории квантовой информатики в НОЦ Фотоники и Оптикоинформатики в Университете ИТМО. Область научных интересов: квантовая оптика, квантовое распределение ключей, атмосферные квантовые каналы. E-mail: [daria.kargina@metalab.ifmo.ru](mailto:daria.kargina@metalab.ifmo.ru)

**Гончаров Роман Константинович**, 2000 года рождения, учился в Университете ИТМО в научно-образовательном центре фотоники и оптикоинформатики по специальности 12.03.03 «Фотоника и оптикоинформатика». В настоящий момент является научным сотрудником в лаборатории квантовых коммуникаций и лаборатории квантовой информатики в Университете ИТМО, а также научным сотрудником в ООО «СМАРТС-Кванттелеком». Область научных интересов: квантовая оптика, квантовое распределение ключей, квантовые повторители. E-mail: [rkgoncharov@itmo.ru](mailto:rkgoncharov@itmo.ru)

**Дашков Михаил Викторович**, 1978 года рождения, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой линий связи и измерения в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Область научных интересов: волоконно-оптические линии связи, оптические сенсоры, квантовые коммуникации. E-mail: [m.dashkov@psuti.ru](mailto:m.dashkov@psuti.ru)

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 14 февраля 2025 г. Окончательный вариант – 12 мая 2025 г.

---

# Overview of free-space continuous-variable quantum key distribution technology

D.A. Kargina<sup>1</sup>, R.K. Goncharov<sup>1,2</sup>, M.V. Dashkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ITMO University, Laboratory for Quantum Communications,  
197101, Russia, Saint Petersburg, Kadetskaya St. 3;

<sup>2</sup> SMARTS-Quanttelecom LLC,

199178, Russia, Saint Petersburg, 6th Line V.O. 59, Bldg. 1, Letter B;

<sup>3</sup> Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI),  
443010, Russia, Samara, Moskovskoe Shosse St. 77

## Abstract

Free-space quantum key distribution (QKD) presents significant opportunities for advancing quantum communication systems by enabling the deployment of quantum networks across geographically challenging or inaccessible regions and expansive terrains without reliance on optical fiber infrastructure. This methodology addresses the constraints of traditional cabling and establishes a more adaptable framework for transmitting quantum information. When combined with continuous-variable QKD (CV-QKD) protocols, this approach facilitates the establishment of secure communication channels through scalable systems optimized to mitigate environmental disturbances.

In this paper, we examine recent advancements and technical considerations in implementing CV-QKD within atmospheric channels, with a focus on addressing atmospheric phenomena such as turbulence, scattering, and beam wandering. We review the current state of practical free-space CV-QKD systems, including successful experimental demonstrations and prototype designs. Furthermore, we discuss prospects for enhancing this technology, particularly its integration with conventional telecommunications infrastructure and potential applications in future quantum networks.

**Keywords:** quantum key distribution, atmospheric quantum channels, turbulence, continuous variables.

**Citation:** Kargina DA, Goncharov RK, Dashkov MV. Overview of free-space continuous-variable quantum key distribution technology. *Computer Optics* 2026; 50(1): 1684. DOI: 10.18287/COJ1684.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-29-00786).

---

## Author's information

**Daria Andreevna Kargina** (b. 2003), studies at ITMO University, Physics faculty, specialty 16.03.01 Technical Physics. Currently works at the Laboratory of Quantum Informatics the Research and Educational Center for Photonics and Optoinformatics at ITMO University. Research interests: quantum optics, quantum key distribution, atmospheric quantum channels. E-mail: [daria.kargina@metalab.ifmo.ru](mailto:daria.kargina@metalab.ifmo.ru)

**Roman Konstantinovich Goncharov** (b. 2000), studied at ITMO University in the Research and Educational Center for Photonics and Optoinformatics, specializing in 12.03.03 Photonics and Optoinformatics. Currently, he is a research fellow in the Laboratory for Quantum Communications and the Laboratory of Quantum Informatics at ITMO University, as well as a research fellow at SMARTS-Quanttelecom LLC. Research interests: quantum optics, quantum key distribution, quantum repeaters. E-mail: [rkgoncharov@itmo.ru](mailto:rkgoncharov@itmo.ru)

**Michael Victorovich Dashkov** (b. 1978) PhD, Associate Professor, Head of the Department of Communication Lines and Measurements in Telecommunications. Research interests: fiber optic communication lines, optical sensors, quantum communications. Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics. E-mail: [m.dashkov@psuti.ru](mailto:m.dashkov@psuti.ru)

---

Received February 14, 2025. The final version – May 12, 2025.

---