

УДК 654.165

КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕРМИНАЛА КВАНТОВОЙ СВЯЗИ

Мақұм Сырым Нұрлыбекұлы

syrym1993@mail.ru

магистрант кафедры РЭТ ЕНУ им. Л.Н.Гумилева

Научный руководитель – к.т.н. профессор Кабылбекова У.М.

Квантовая связь становится областью все более широкого технологического интереса. Она превратилась из чисто фундаментальной области исследований в области квантовой физики в прикладную науку с огромным потенциальным экономическим влиянием.

Наиболее многообещающее приложение - квантовая криптография - было продемонстрировано в различных сценариях, и первые системы уже коммерчески доступны.

Увлекательной технологической задачей является создание сети квантовой связи, которая в конечном итоге позволит квантовую коммуникацию в глобальном масштабе. Большинство существующих реализаций схем квантовой связи основаны на передаче и обнаружении одиночных фотонов или запутанных пар фотонов. При существующей технологии расстояние, которое может быть преодолено, ограничено, в основном из-за затухания и шума обнаружения, до нескольких сотен километров как для волоконных систем, так и для передачи в свободном пространстве через атмосферу вдоль поверхности Земли. Эти ограничения можно преодолеть за счет использования космических и спутниковых технологий.

Перенос источника фотонов в космос позволит распространять одиночные фотоны или запутанные пары фотонов в вакууме, тем самым обеспечивая большие расстояния, чем это возможно при наземных сценариях. В вакууме потери сигнала не происходит, поэтому потери при передаче через спутник начинаются, когда фотоны летят через нижние слои атмосферы.

Следует отметить, что китайский спутник (единственный спутник), через который реализовали защищенную **квантовым шифрованием связь**, на основе запутанных фотонов на орбите, является не единственным источником. Квантовыми технологиями занимаются несколько университетов: МГУ, ИТМО (Санкт Петербург), КНИТУ (КАЗАНЬ) и НГТУ (Новосибирск). В частности испытаны линии передачи криптографических ключей, а также Российский квантовый центр при Сколково и т.д.

Квантовыми спутниками обзавелись Сингапур и Япония. Китайские ученые занимаются обновлением аппаратов своего спутника. К тому же китайская Академия планирует запускать целое созвездие квантовых излучателей, способных рассылать сигнал днем.

1. Квантовые основы сигналов. Единичные фотоны

Исследователи из Кембриджского университета разработали новый метод получения единичных фотонов света путем контроля движения отдельных электронов внутри структуры специально разработанного для этих целей светодиода (light-emitting diode, LED). Этот новый метод отличается простотой, тем не менее, он способен поставлять фотоны света со стабильно повторяющимися характеристиками и параметрами, что очень важно с учетом возможности использования такого источника фотонов в областях квантовых вычислений и коммуникаций.

Единственный фотон (элементарная частица света) может выступать в роли квантового бита и нести квантовую информацию на расстояния, исчисляющиеся сотнями километров. Поэтому источник, способный вырабатывать единичные фотоны полностью **контролируемым образом**, является неотъемлемым фундаментальным блоком большинства современных квантовых технологий, в частности использование свойства «обратимости» квантовых вычисления, которые обеспечивают восстановления исходного состояния кубитов, несущих информацию. Кроме того, учитывая, что запутанности пары фотонов в процессе передачи (в распределении ключа), могут перейти в субпозитронную форму (осложнение запутанности), требующие контрольных кубитов, для уточнения а с другой стороны дополнение которых нарушает когерентность и т.д.

В связи с чем современная технология оптических терминалов для реализации ТКС имеет структуру с учетом помимо необходимых критериев, а также учет всех выше указанных проблем, т.е разработана концепция приемопередатчика на основе компромиссных состояний.

2. Концепции приемопередатчика квантовой связи

Приложения квантовой фотонной связи основаны на распределении либо одиночных, либо запутанных состояний фотонов. В настоящее время наиболее известные источники для генерации таких состояний фотонов основаны на спонтанном параметрическом

преобразовании с понижением частоты (СППП). СППП может служить либо парой-источником для запутанных пар фотонов, либо запускаемым источником одиночных фотонов, когда один из фотонов пары используется для индикации присутствия второго фотона. Отдельные фотоны также могут быть реализованы различными способами, например, путем ослабления лазерных импульсов до такой степени, что в среднем один импульс содержит один фотон или меньше. Мы различаем случаи, когда космический терминал способен генерировать и распределять одиночные фотоны или генерировать запутанные фотоны и распределять их либо последовательно (распределение одиночных фотонов), либо одновременно (распределение запутанности) к пространственно разнесенным приемникам.

Общим для всех исследуемых протоколов квантовой связи является необходимость иметь классический канал связи параллельно квантовому каналу. Это требуется для установления временной корреляции между фотонами запутанных пар и между временем испускания и регистрации одиночных фотонов, соответственно. Поскольку мы стремимся использовать современную технологию оптических терминалов для реализации ТКС (терминала квантовой связи), он предлагает реализовать классический канал как оптический канал в свободном пространстве. Мы приходим к трем вариантам конструкции приемопередатчика квантовой связи, допускающей квантовое распределение ключей:

- Источник одиночных фотонов (ИОФ) с классическим оптическим каналом связи.
- Источник запутанных фотонов (ИЗФ) с классическим оптическим каналом связи.
- Источник запутанных фотонов (ИЗФ) без классического оптического канала связи (классическая связь устанавливается по каналу РЧ).

3. Анализ компромиссов космического терминала квантовой связи

Был проведен компромисс между тремя вариантами терминала квантовой связи с учетом следующих критериев:

- Физические характеристики ТКС, эти критерии оценивают массу, объем и потребляемую мощность.

• Производительность ТКС. Были выбраны критерии для определения: выполняются ли требования для выполнения определенного диапазона экспериментов по квантовой связи, обеспечивающие запланированные научные результаты; позволяет ли проводить эксперименты с квантовыми связями, которые имеют потенциал для приложений, представляющих коммерческий интерес, который обеспечивает классическую оптическую связь с землей.

- Оценка риска, при этом учитывались риски различных вариантов, а именно:
 - сложность, оценивающий риск, связанный со сложностью соответствующей конфигурации ТКС,
 - риск внедрения, оценивающий (в дополнение к сложности) риск, связанный с реализацией соответствующей конфигурации ТКС,
 - квалификационный статус - учитывает технологии, для которых потребуется программа квалификации компонентов для поддержки деятельности по развитию полета.

• Программные проблемы, где учитываются затраты на разработку т.е, оценивает деятельность по разработке, которая должна быть выполнена перед запуском программы полета. Кроме того затраты ТКС, которые включают затраты на разработку и производство терминала и на потенциал роста - учитывающую систему, позволяющую проводить другие научные эксперименты, демонстрировать возможные применения технологии или увеличивать пропускную способность канала.

4. Компромисс и выбор дизайна

Терминал ИЗФ больше и тяжелее терминала ИОФ, а также потребляет больше энергии. Следовательно, оценка физических параметров значительно ниже, чем для конфигурации ИОФ. Однако диапазон экспериментов и их научное влияние намного выше при использовании терминала ИЗФ, чем при использовании терминала ИОФ. Что касается оценки риска, исследованные варианты существенно не различаются. Стоимость терминала

ИОФ будет значительно ниже. Общий рейтинг говорит о ТКС, состоящем из источника запутанных фотонов с классическим оптическим каналом связи.

5. Блок-схема и концептуальный дизайн

ТКС можно подразделить на классическую подсистему, которая включает стандартные блоки, известные из классических терминалов оптической связи, и квантовую подсистему, которая включает новые функциональные элементы. Для экспериментов с однофотонной квантовой связью потребуется только одна из классических подсистем. Другой фотон напрямую связан с одним из бортовых детекторов фотонов, также используемых для калибровки перед экспериментами, для выявления степени поглощения, рассеивания и облачности.

При прохождении через атмосферу электромагнитные волны поглощаются и рассеиваются, причиной поглощения и рассеивания являются: озон, водяной пар, углекислый газ, кислород, метан, пыль, дым.

Следует отметить, что рассеивание света на свете тоже создает фотон, при этом система становится менее стабильной из-за потери когерентности, а облачность является помехой при съемке в оптическом диапазоне, а также поглощение, рассеивание и облачность вызывают искажение значений яркости пикселей на снимках. **Для чего** производится **радиометрическая коррекция влияния атмосферы**

Каждая из двух классических подсистем состоит из следующих блоков:

- телескоп (в том числе механизм грубого наведения), чтобы получить опорный лазерный луч от наземной станции для РАТ и передавать опорный лазерный луч ТКС, а также одного пучка фотонов;
- система РАТ, включающая зеркала с точным наведением и наведение вперед, датчик захвата и отслеживания, а также управление наведением вперед,
- маяковый лазер для процесса сбора данных, передаваемый через отдельную апертуру (не показана на блок-схеме);
- эталонный лазер (линейно поляризованный) для РАТ и для установления временного и поляризационного эталона между передающей и приемной станцией;
- волоконный интерфейс и / или интерфейс связи в свободном пространстве с квантовой подсистемой.

Квантовая подсистема включает:

- модуль квантового источника для генерации и подготовки запутанных пар фотонов;
- элемент однофотонного детектирования (обеспечивающий обратную связь для модуля источника);
- блок, контролирующий работу источника и сбор данных.

Лазерный блок состоит из двух маячных лазеров для наведения и захвата, двух опорных лазеров для поляризации и нисходящего классического канала связи, а также модуля квантового источника.

Приемник состоит из двух однофотонных детекторных модулей, выполненных в виде лавинных фотодиодов (ЛФД), работающих в режиме Гейгера. ЛФД должны быть охлаждены до рабочей температуры около -30°C и стабилизированы до $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Поэтому этот блок отделен от лазерного блока.

Каждый из **оптических головных блоков** состоит из оптического стенда и телескопа. В оптическом стенде исходящие лучи от опорного лазера и модуля квантового источника коллимируются и направляются в телескоп после прохождения точечного переднего зеркала и тонкого направленного зеркала. Существует возможность направления фотонов от квантового источника в детектор фотонов для калибровки или при проведении эксперимента, когда только один из двух запутанных фотонов передается на другой терминал, в то время как другой анализируется на месте.

Кроме того, оптический стенд включает в себя датчик сбора и слежения, последний также используется для приема восходящего классического сигнала связи на длине волны 980 нм.

Оптический головной блок основан на Контравес ОПТЕЛЬ-25, который имеет телескоп с внешней апертурой 13,5 см и который подвешен в двух осях таким образом, что он может достигать полной полусферической возможности наведения.

Электронный блок для терминала ИЗФ содержит электронику, необходимую для управления и работы каждого оптического головного блока и классического канала связи, а также электронику для квантового канала. Последний состоит из контроллера запутанного источника фотонов, контроллера поляризации, электроники сбора данных и массовой памяти.

Модуль сбора и хранения данных с объемом памяти 1 Гбайт способен обрабатывать временную информацию об обнаруженных фотонах с разрешением 1 нс в ходе экспериментального прогона. Модуль также необходим для анализа данных. Обмен временной информацией не обязательно должен происходить одновременно с передачей квантового сигнала, т. е. возможна постобработка данных.

Контроллер запутанного источника позволяет контролировать работу лазерного диода в модуле источника путем измерения спектральных и пространственных свойств, имеющих отношение к генерации запутанности.

6. Критические параметры

- Космический ТКС должен иметь расчетный срок службы 3 года; эксплуатационный срок службы должен составлять 1 год.

- Опорный лазер не должен работать на той же длине волны, что и квантовый канал. Он должен быть оптически хорошо изолирован внутри приемного терминала; то есть рассеянный свет и обратное рассеяние в тракте приема сигнала должны быть явно ниже уровня фонового излучения. Мы ожидаем фоновое излучение $10^3 - 10^4$ фотонов/с/нм в ночное время для дифракционного ограниченного приемного телескопа диаметром 1 м.

- Двумя основными требованиями, предъявляемыми к квантовому каналу, являются затухание, которое не должно превышать 60 дБ для достижения $SNR > 6,8$ дБ, и временное разрешение ниже 1 нс для обеспечения частоты следования импульсов в диапазоне 10^6 /с. SNR ниже заявленного значения сделало бы невозможным любой квантовый протокол связи, а более низкие частоты повторения импульсов увеличили бы минимальную продолжительность полезного экспериментального запуска сверх возможного времени соединения линий связи LEO-to-ground.

- Терминал должен быть способен работать в термической среде от -35 °C до $+60$ °C.

- Для обеспечения классической связи, необходимой для проведения экспериментов по квантовой связи, необходимо обеспечить обмен данными порядка 90 Мбайт в течение 5-минутного экспериментального прогона. Это соответствует скорости передачи данных около 2,4 Мбайт/с. Классическая линия связи должна достигать частоты битовых ошибок 10^{-6} .

- Чтобы получить достаточную продолжительность связи, для наземных станций прием данных должен быть возможен, когда линия связи находится выше угла возвышения 5° .

Заключение. Мы представили концепцию космического терминала квантовой связи, который можно реализовать с помощью самых современных технологий. Провели параметрическое исследование космического терминала на основе спецификаций существующего терминала OPTTEL, разработанного компанией Contraves Space, а также изучили несколько экспериментальных сценариев работы терминала с платформы LEO. Наконец, мы определили критические параметры для последующих разработок аппаратного обеспечения.

Список использованных источников

1. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. (ред.) Физика квантовой информации. Квантовая криптография. Квантовая телепортация. Квантовые вычисления. Москва: Постмаркет, 2002. - 376с.

2. Райдер Л. Квантовая теория поля. – М.: Платон, 1998, 315 с.

3. Основы построения и эксплуатации космической системы связи и вещания / Кн. 1. Специальный теоретический курс / под общей ред. Медведева А.А. – М.:ИП Хоружевский А.И.,2005. – 600с., илл.
4. Основы построения и эксплуатации космической системы связи и вещания / Кн. 2. Специальный теоретический курс / под общей ред. Медведева А.А. – М.:ИП Хоружевский А.И.,2005. - 644с., илл.
5. Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.
6. Килин С.Я., Хорошко Д.Б. Квантовая криптография: идеи и практика. Минск: Беларуская наука, 2007. — 391 с. — ISBN: 978-985-08-0899-8
7. R. J. Hughes, J. E. Nordholt, D. Derkacs, and C. G. Peterson, “Practical free-space quantum key distribution over 10 km in daylight and at night,” *New J. Phys.* 4, 43.1–43.14 (2002).
8. M. Aspelmeyer, T. Jennewein, M. Pfennigbauer, W. R. Leeb, and A. Zeilinger, “Long-distance quantum communication with entangled photons using satellites,” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* 9, 1541–1551 (2003).
9. W. T. Buttler, R. J. Hughes, P. G. Kwiat, S. K. Lamoreaux, G. G. Luther, G. L. Morgan, J. E. Nordholt, C. G. Peterson, and C. M. Simmons, “Practical free-space quantum key distribution over 1 km,” *Phys. Rev. Lett.* 81, 3051–3301 (1998).
10. Квантовая связь. Ж- л. Популярная механика. №12.2018г.