

Оптический передающий модуль ближнего ИК-диапазона для атмосферного канала квантовых коммуникаций

К.Р. Разживина, А.А. Кундиус, Д.С. Ширяев, И.С. Полухин

Университет ИТМО

Аннотация: в данной работе представлен разработанный оптический передающий модуль ближнего ИК-диапазона для атмосферного канала квантовых коммуникаций, проведено измерение глазковых диаграмм, из чего было определено оптимальное расстояние для передачи данных. Также были найдены оптимальные параметры модуляции сигнала по амплитуде вектора ошибки, а также сам тип модуляции сигнала. Была проведена оценка битовой скорости передачи данных в атмосферном оптическом канале связи.

Ключевые слова: атмосферный канал связи, квантовая коммуникация, модуляция сигнала, беспроводная оптическая связь, беспроводная передача данных.

1. Введение

Оптическая связь в настоящее время с развитием технологий производства систем и средств коммуникации находит широкое применение в различных областях, например, в системах передачи информации на большие расстояния, в компьютерах, бортовых космических, самолетных и корабельных системах, и порождает большое количество исследований. Появление и развитие полупроводниковых лазеров позволило повысить эффективность оптической связи за счет высокого соотношения сигнал-шум, а затем развитие волоконной оптики позволило добиться ещё большей эффективности передачи данных, например затухания вплоть до 0.2 дБ/км [1].

Одними из перспективных оптических каналов связи являются атмосферные каналы, обладающие многими преимуществами, например, высокой помехозащищенностью, так как излучение оптического диапазона практически не подвержено влиянию радиопомех. Кроме того, атмосферные оптические линии связи позволяют разгрузить радиочастотный диапазон, тем самым решая проблемный вопрос экономии радиочастотного ресурса [2]. Атмосферные оптические каналы связи разделяют на каналы связи с прямой видимостью и без прямой видимости. Под вторыми подразумевается, что приемник принимает только рассеянное атмосферой излучение передатчика [3].

Также одним из важных преимуществ атмосферных оптических линий связи является безопасность передачи данных, поскольку считывание сигнала невозможно осуществить незаметно [4]. Поэтому такие линии связи используются для решения специфических задач, в которых нерентабельно использование волоконно-оптических линий связи, в области квантовых коммуникаций [5].

Квантовая коммуникация — это технология, позволяющая кодировать и передавать данные в квантовых состояниях фотонов. Для передачи этих квантовых состояний используется несколько видов сетей — оптоволоконные сети и сети свободного пространства, преимуществом которых является возможность поддержки более высоких скоростей передачи данных. В данной работе использовалась комбинация этих сетей, так как квантовый канал строится на основе боковых частот модулированного оптического излучения в одномодовом волокне, а дальнейшая передача данных осуществляется по атмосферному каналу [6]. Кроме квантового

канала, в системах квантовых коммуникаций используется служебный канал, через который передается управляющая информация, а также результат обнаружения подслушивания [7].

Целью данной работы является разработка оптического передающего модуля, работающего в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, для организации беспроводного служебного канала в атмосферном оптическом квантовом канале связи.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать электрическую схему модулятора, совместимого с передающим модулем квантового распределения ключей (КРК);
2. Организовать оптический беспроводной канал связи для измерения характеристик информационного тракта;
3. Оценить качество полученного канала связи и определить оптимальные параметры модулируемого сигнала.

2. Конструкция передающего и приемного модулей

На рисунке 1 представлена функциональная схема разработанного передающего модуля.



Рисунок 1. Функциональная схема оптического передающего модуля ближнего ИК-диапазона для атмосферного канала квантовых коммуникаций

Для совместимости драйвера лазера с модулем КРК использовался дифференциальный конвертер интерфейсов NB4L16M, преобразующий большинство логических интерфейсов в CML интерфейс, который по дифференциальной паре поступает на драйвер лазера ONET1151L. Драйвер лазера в свою очередь осуществляет токовую модуляцию полупроводникового лазера с распределенной обратной связью, затем излучение лазера передает информационный сигнал по оптическому каналу связи. Для конфигурации драйвера лазера используется микроконтроллер, передающий конфигурационные настройки по последовательному интерфейсу I²C.

В основе приёмного модуля лежат кремниевые фотодиоды FDS100 от компании Thorlabs. Для повышения чувствительности приёмного модуля в электрической схеме используется трансимпедансный усилитель, при помощи которого усиливается выходной информационный сигнал. Для повышения плотности мощности излучения, приходящего на фотодиоды, используются собирающие линзы LA1576 от фирмы Thorlabs. Оценить рабочую полосу частот фотодиодов можно исходя из следующей формулы:

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi R_L C_j} \quad (1)$$

где, R_L – сопротивление нагрузки, равное 50 Ом; C_j – емкость фотодиода, равная 24 пФ. После вычислений значение рабочей полосы частот фотодиодов составляет порядка 130 МГц.

3. Схема проведения измерений

На рисунке 2 представлена схема проведения измерений.

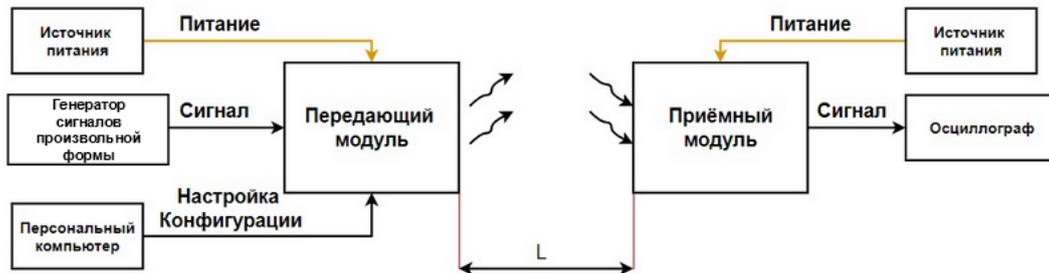


Рисунок 2. Экспериментальная схема проведения измерений

Информационный сигнал с заданной модуляцией и псевдослучайным набором данных (PRBS) поступает по дифференциальной шине на передающий модуль от генератора сигнала произвольной формы Keysight M8195. Настройки конфигурации передаются на микроконтроллер передающего модуля с персонального компьютера. Сигнал передается по атмосферному каналу на приёмный модуль, откуда поступает на осциллограф Keysight UXR0204A. Питание передающего и приёмного модулей осуществляется от источника постоянного напряжения. На передающий модуль подается напряжение питания +3,3 В, а на приёмный модуль – +12 В. Измерения глазковых диаграмм проводились на расстоянии в 7, 45 и 85,5 см от источника. Измерение значений EVM проводилось при расстоянии в 45 см между источником и приёмником.

4. Результаты

На рисунке 3 представлены полученные результаты измерения степени открытия глазковой диаграммы в зависимости от полосы частот сигнала при различных расстояниях между источником и приёмником. В качестве передающего сигнала использовался NRZ-сигнал с различной символьной скоростью.

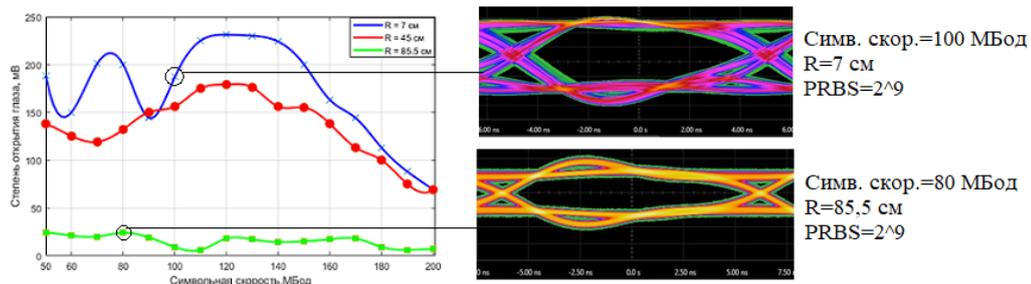


Рисунок 3. Зависимость степени открытия глаза от символьной скорости сигнала при различных расстояниях и глазковые диаграммы при определенных значениях символьной скорости

Из приведенного на рисунке 3 графика видно, что наименьшая степень открытия глазковой диаграммы наблюдается при максимальной символьной скорости в 200 МБод. Уменьшение степени открытия глазковой диаграммы вызвано

ограничением полосы пропускания информационного канала. Наилучшее открытие глаза наблюдается при символьной скорости в 120 МБод. При расстоянии между источником и приемником в 7 см, в области от 50 до 90 МБод происходят резкие изменения в значениях степени открытия глазковой диаграммы, которые могут быть вызваны внешними помехами, воздействующими на приёмный модуль.

На рисунке 4 представлены полученные результаты зависимости амплитуды вектора ошибки (EVM) от занимаемой сигналом полосы частот (символьной скорости) для различных видов модуляций, а также сигнальные созвездия для каждой модуляции при различных несущих частотах.

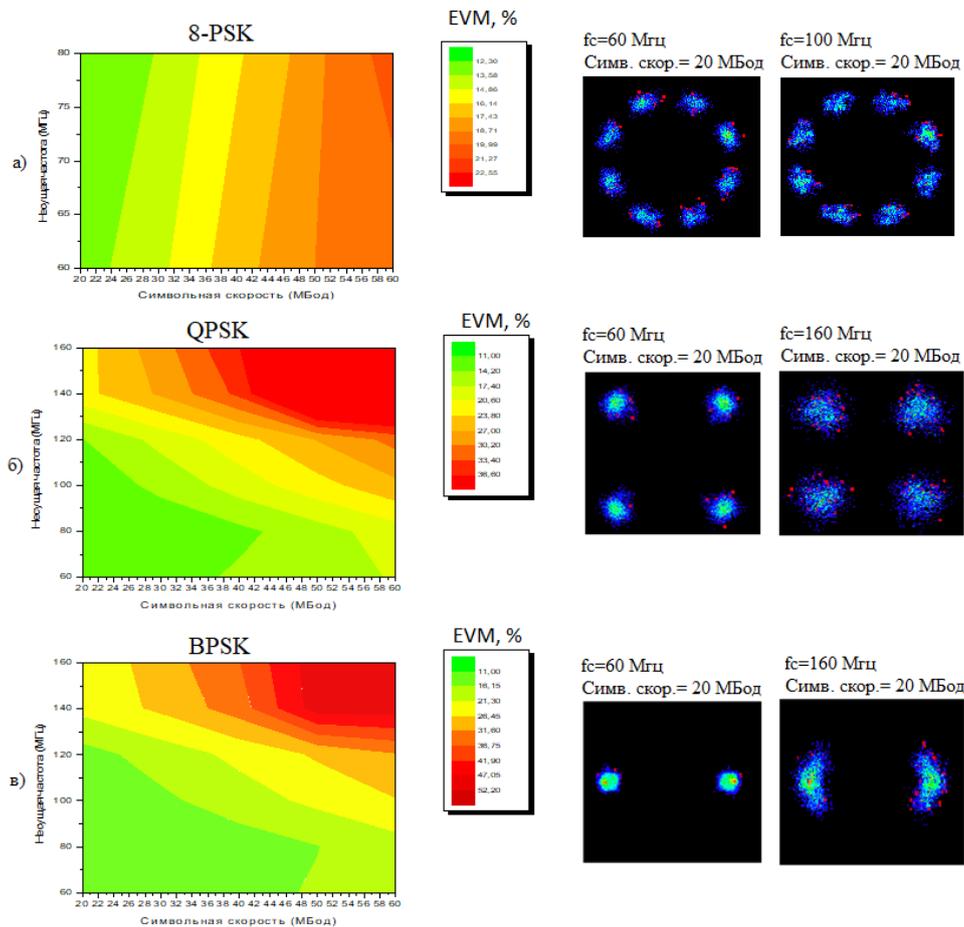


Рисунок 4. Зависимости EVM от полосы сигнала и несущей частоты сигнала для разных модуляций (слева) и сигнальные созвездия при различных несущих частотах (справа): а) 8-PSK модуляция, б) QPSK, в) BPSK

Полученные результаты демонстрируют, что при увеличении символьной скорости и несущей частоты значения EVM увеличиваются, что ведет к ухудшению качества сигнала. Значительное увеличение EVM в области высоких несущих частот может быть обусловлено тем, что информационный канал ограничен по полосе пропускания на частоте около 120 МГц. По аналогии с радиочастотным каналом, количество ошибок при передаче данных растет с приближением частоты несущей к пределу полосы пропускания информационного тракта. Однако из графиков можно определить оптимальные «зеленые» зоны с минимальным количеством ошибок в канале, которые возможно реализовать с применением разработанных передающего и приемного модулей. Таким образом, сигнал с QPSK-модуляцией с частотой несущей и символьной скоростью 40 МБод позволяет передавать информацию с битовой скоростью 160 Мбит/с. Полученная битовая скорость является достаточной для

организации служебного канала в системе квантовых коммуникаций, однако для увеличения расстояния передачи необходимо использовать фотодиод в приемном модуле с большей чувствительностью.

5. Заключение

В работе был представлен оптический передающий модуль ближнего ИК-диапазона для атмосферного канала квантовых коммуникаций. Были проведены исследования зависимости степени открытия глазковой диаграммы от символьной скорости сигнала при различных расстояниях между источником и приёмником. Было определено, что оптимальным расстоянием для передачи данных является ~45 см со средним значением открытия глазковой диаграммы порядка 140 мВ. Также были получены зависимости значений амплитуды вектора ошибки от полосы сигнала и несущей частоты сигнала для 8-PSK, QPSK и BPSK модуляций. Было определено, что оптимальными параметрами модуляции сигнала являются QPSK-модуляция с несущей частотой сигнала 80 МГц и символьной скоростью 40 МБод с амплитудой вектора ошибки около 11%, что в совокупности позволяет получить битовую скорость порядка 160 Мбит/с.

Таким образом, разработанный передающий модуль является достаточным для организации атмосферной линии передачи данных со скоростями, сопоставимыми со скоростями в классическом канале связи. Для повышения расстояния передачи данных между приемным и передающим модулем необходимо использовать фотодиод с большей чувствительностью, что и планируется в дальнейших исследованиях. Также планируется исследовать атмосферный канал связи с использованием приемного модуля на основе лавинного фотодиода, что может повысить не только расстояние передачи, но и быстродействие приемного модуля.

Список литературы

1. Elayoubi K. Study of communications channels for optical links through the atmosphere : дис. – Toulouse, ISAE, 2019.
2. Полянский С. В., Игнатов А. Н. Определение дистанции атмосферного канала связи с заданным коэффициентом готовности для г. Новосибирска //Вестник СибГУТИ. – 2009. – №. 4. – С. 73-82.
3. Скляр Д. Ф. Принципы построения защищенных высокоскоростных атмосферных оптических каналов связи //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 4. – №. 2. – С. 64-68.
4. Сербин Е. М. Всепогодная атмосферная оптическая линия связи //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 2. – С. 189-190.
5. Латыпов И. З. и др. АТМОСФЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ " ПОСЛЕДНЕЙ МИЛИ" В КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЯХ //XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2019). – 2019. – С. 72-74.
6. Глейм А. В. Оптико-электронная система квантовой передачи информации на боковых частотах модулированного излучения с компенсацией неконтролируемого изменения поляризации и оптической синхронизацией: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.07 / Глейм Артур Викторович; [Место защиты: С.-Петербург. нац. исслед. ун-т информ. технологий, механики и оптики]. - Санкт-Петербург, 2015. - 108 с.: ил.
7. Z. Sun, R. Qi, Z. Lin, L. Yin, G. Long and J. Lu, "Design and Implementation of a Practical Quantum Secure Direct Communication System," 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018, pp. 1-6.