

С. В. Молчанов, С. О. Калекина

**ПРИМЕНЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО
ВРЕМЕННО-ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

Рассмотрена возможность применения при построении атмосферно-оптических линий связи когерентного временно-частотного мультиплексирования, позволяющего увеличить эффективную дальность связи и пропускную способность канала для сети абонентского доступа.

31

The possibility of application coherent time-frequency multiplexing is considered at construction of free space optical communication lines, which allows to increase the effective communication range and channel capacity for the subscriber access network.

Ключевые слова: атмосферно-оптические линии связи, атмосферная турбулентность, когерентное мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов.

Keywords: free-space optics, atmospheric turbulence, coherent orthogonal frequency division multiplexing.

Современные тенденции в развитии телекоммуникационных систем передачи информации направлены на увеличение объема передаваемой информации, скорости передачи данных и эффективной длины систем связи. Это особенно актуально при построении телекоммуникационных систем «последней мили». На данный момент наиболее эффективным городским решением являются беспроводные сети связи, которые позволяют оперативно увеличить пропускную способность каналов связи на участках последней мили без затрат на прокладку дополнительных кабелей в условиях сверхплотной городской застройки и аренды кабельных канализаций, которые уже перегружены. Одной из перспективных технологий при построении высокопроизводительных беспроводных линий связи является использование атмосферно-оптических линий связи (АОЛС).

АОЛС представляет собой технологию прямой видимости, которая посредством инфракрасного излучения лазеров позволяет организовать передачу информации между пользователями через атмосферу, обеспечивая оптическое соединение без использования оптоволоконного кабеля.

К основным преимуществам технологии АОЛС относят:

- использование нелицензируемых частот порядка 400 ТГц;
- высокий уровень защищенности каналов связи, поскольку данные передаются с помощью узконаправленного луча в оптическом диапазоне;



- невосприимчивость к электромагнитным помехам;
- небольшое время развертывания сети (порядка нескольких часов) и простота установки оборудования АОЛС;
- высокие скорости передачи информации.

Однако чтобы полностью использовать потенциал терабитной емкости системы АОЛС, необходимо преодолеть различные проблемы, связанные с неоднородной природой атмосферного канала. Основным сдерживающим фактором атмосферных оптических систем передачи является зависимость от атмосферных и погодных явлений – таких, как атмосферная турбулентность, туман, снегопад, – которые способствуют уменьшению дальности связи и ухудшению качества передачи.

32

Распространение лазерного излучения в атмосфере сопровождается явлениями рассеяния и турбулентности. Ослабления сигнала в основном выступает результатом рассеяния излучения на частицах, взвешенных в атмосфере (аэрозолях), а искажение вызвано турбулентностью. При прохождении сигналов через атмосферу часть распространяющихся фотонов поглощается молекулярными составляющими воздуха. Поглощение зависит от длины волны, поэтому при расчете оптических атмосферных линий связи влиянием резонансного молекулярного поглощения можно пренебречь, если правильно выбрана длина волны, так как оптико-электронные приборы работают в «окнах прозрачности» атмосферы. Большинство АОЛС-систем работают на длинах волн 850 и 1550 нм, и в результате исследований было установлено, что оборудование АОЛС, работающее на длине волны 1550 нм, обладает меньшим коэффициентом затухания и позволяет обеспечить более высокую надежность и дальность связи [1]. Для расчета потерь излучения на частицах (аэрозолях) на практике пользуются понятием метеорологической дальности видимости (МДВ). МДВ представляет собой расстояние, на котором в дневное время видны крупные темные объекты.

Атмосферная турбулентность, в свою очередь, выражается случайным изменением температуры воздуха, направления ветра и показателя преломления воздуха из-за неравномерного нагревания (охлаждения) воздушных потоков. Она оказывает влияние на распространение оптического луча, изменяя или отклоняя его, а также расширяя оптический пучок, что затрудняет фокусировку оптического излучения на большом расстоянии. Атмосферная турбулентность зависит от погодных условий и особенностей местности и наиболее сильно проявляется в ясную жаркую погоду. В основном атмосферная турбулентность характеризуется параметром структурной постоянной показателя преломления (C_n^2), который представляет собой силу турбулентности. Типичные значения для C_n^2 варьируются от $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ для слабого турбулентного режима до $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$ для сильного [2].

Изменяющиеся атмосферные условия уменьшают производительность систем АОЛС. В настоящее время для преодоления негативных последствий влияния атмосферных условий на канал связи в беспроводных радиосистемах, которые имеют схожие условия распространения сигналов, предложены различные методы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.



Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих обеспечить высокое качество сигнала, является когерентный прием, обладающий повышенной чувствительностью по отношению к некогерентному, что позволяет тем самым увеличить отношение сигнал / шум.

Второй метод, обеспечивающим высокую спектральную эффективность, — применение при передаче сигнала технологии OFDM, представляющей собой метод передачи с несколькими несущими, спектры которых частично перекрываются.

В настоящей работе предложен новый подход к компенсации вредного влияния турбулентных явлений в атмосферном канале — использование когерентного мультиплексирования с ортогонально-частотным разделением каналов (CO-OFDM), сочетающее в себе преимущества «когерентного обнаружения» и «модуляции OFDM». Несмотря на то, что метод CO-OFDM довольно широко изучался в радиочастотной области и является одним из наиболее популярных методов широкополосной беспроводной связи, рассматривать для применения в оптической беспроводной связи его стали относительно недавно.

Базовое оборудование для построения АОЛС состоит из двух терминалов: приемопередающего модуля (ППМ), в состав которого входят оптический усилитель, оптическая система передатчика / приемника, лазер, модулятор / демодулятор, и блока интерфейсов (БИ), обеспечивающего стык с внешними контрольными устройствами и подключение пользовательского оборудования. Между собой ППМ и БИ соединяются кабелем внутреннего интерфейса. Из особенностей оборудования для АОЛС можно выделить моноапертурную оптическую систему, построенную с использованием оптоволоконного дуплексера, который позволяет объединить в одной апертуре вывод излучения в атмосферу и прием сигнала на той же длине волны от удаленного ППМ, и наличие служебного канала на длине волны 800 нм, который позволяет получать данные о состоянии противоположного терминала и передавать на него команды управления, регулировать мощность излучения [3]. Таким образом, оборудование не накладывает ограничений на использование спектра в диапазоне рабочей длины волны, и производительность канала АОЛС можно увеличить за счет использования технологии CO-OFDM.

При расчете энергетического бюджета канала АОЛС определяется оптимальное значение протяженности атмосферной линии связи с учетом климатических особенностей местности и суммарных потерь.

Общие энергетические потери складываются из геометрических потерь, обусловленных расходимостью лазерного луча в месте расположения приемного оборудования ($P_{расх}$) (рис. 1), и потерь в связи с поглощением и рассеиванием сигнала при распространении через атмосферу ($P_{атм}$) [4]:

$$P_{общ} = P_{расх} + P_{атм}, \text{ дБ.}$$

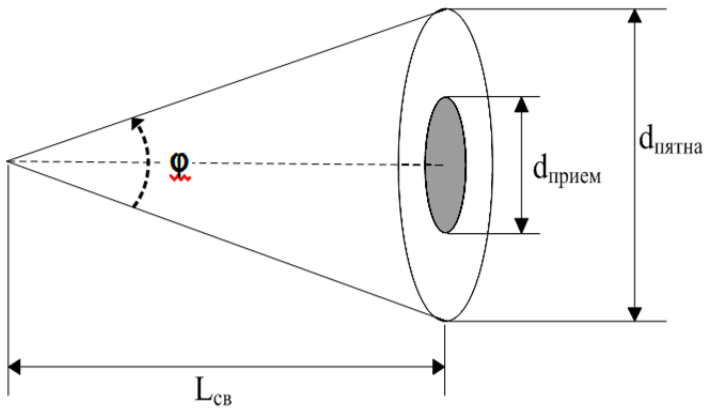


Рис. 1. Расходимость лазерного луча в системе АОЛС:

φ – угол расходимости лазерного луча, мрад; $L_{св}$ – расстояние связи между передатчиком и приемником, км; $d_{прием}$ – диаметр линзы приемного устройства, м; $d_{пятна}$ – диаметр пятна излучения в месте расположения приемного устройства, м

Из рисунка 1 потери оптической мощности за счет расходимости определяются из следующего соотношения:

$$P_{расх} = 10 \lg \left(\frac{S_{пятна}}{S_{прием}} \right), \text{дБ},$$

где $S_{пятна} = \pi * R_{пятна}^2 = \frac{\pi * d_{пятна}^2}{4}$ – площадь пятна излучения в месте рас-

положения приемного устройства, м²; $S_{прием} = \pi * R_{прием}^2 = \frac{\pi * d_{прием}^2}{4}$ – площадь линзы приемного устройства, м²; $d_{прием}$ – диаметр линзы приемного устройства (указывается в техническом паспорте оборудования).

Диаметр оптического пятна определяется следующим соотношением:

$$d_{пятна} = L_{св} * \varphi, \text{м}.$$

С учетом приведенных выражений потери оптической мощности за счет расходимости определяется по формуле

$$P_{расх} = 20 \lg \left(\frac{L_{св} * \varphi}{d_{прием}} \right), \text{дБ}.$$

Расчет величины потерь из-за поглощения и рассеивания сигнала в атмосфере осуществляется по следующей формуле:

$$P_{атм} = \alpha * L_{св}, \text{дБ},$$

где α – величина километрического затухания, величина переменная, дБ/км. Значение данной величины рассчитывается с использованием статистических данных МДВ для региона, где планируется создание системы АОЛС.



Условием доступности системы АОЛС является следующее соотношение:

$$P_{\text{общ}} < A,$$

где $A = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}$ – энергетический потенциал оборудования АОЛС, дБ; $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика и $P_{\text{пр}}$ – чувствительность приемника (являются данными технического паспорта оборудования).

Таким образом, с учетом приведенных выше выражений условие доступности принимает вид

$$\left[20 \lg \left(\frac{L_{\text{св}} * \varphi}{d_{\text{прием}}} \right) + (\alpha * L_{\text{св}}) \right] < [P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}].$$

35

С учетом параметров оборудования АОЛС ($P_{\text{пер}} = 33$ дБм; $P_{\text{пр}} = -30$ дБм; $d_{\text{прием}} = 0,08$ м; $\varphi = 0,15$ мрад) энергетический бюджет линии связи при коэффициенте затухания 2 дБ/км и расстоянии связи в 3500 м принимает значение

$$23,34 \text{ дБ} < 63 \text{ дБ},$$

запас по мощности – 39,66 дБ.

При расстоянии связи 2000 м энергетический бюджет составляет

$$15,48 \text{ дБ} < 63 \text{ дБ},$$

запас по мощности – 47,52 дБ.

Результаты расчетов показывают, что с уменьшением расстояния передачи сигнала запас по мощности увеличивается, а энергетические потери уменьшаются.

Однако при расчете бюджета канала связи принимают во внимание только параметры приемопередающего оборудования АОЛС и влияние затухания сигнала при распространении в атмосфере. Такой фактор, как атмосферная турбулентность, оказывающий значимое влияние, не учитывают, поэтому для получения комплексной оценки результатов применения технологии CO-OFDM было произведено моделирование на платформе *Optisystem* от *Optiwave Systems*.

Общая схема смоделированной системы представлена пятью основными блоками (рис. 2).

Входные данные для модулятора OFDM имеют формат модуляции QAM, поскольку в модуляции QAM больше точек созвездия, что обеспечивает лучшую производительность всей системы [5]. В блоке – передатчике OFDM происходят модуляция и мультиплексирование в цифровом виде с использованием алгоритма обратного быстрого преобразования Фурье, на выходе получается радиочастотный сигнал. Далее в блоке-преобразователе данный сигнал преобразуется в оптический и через вывод оптического усилителя излучается в атмосферу.

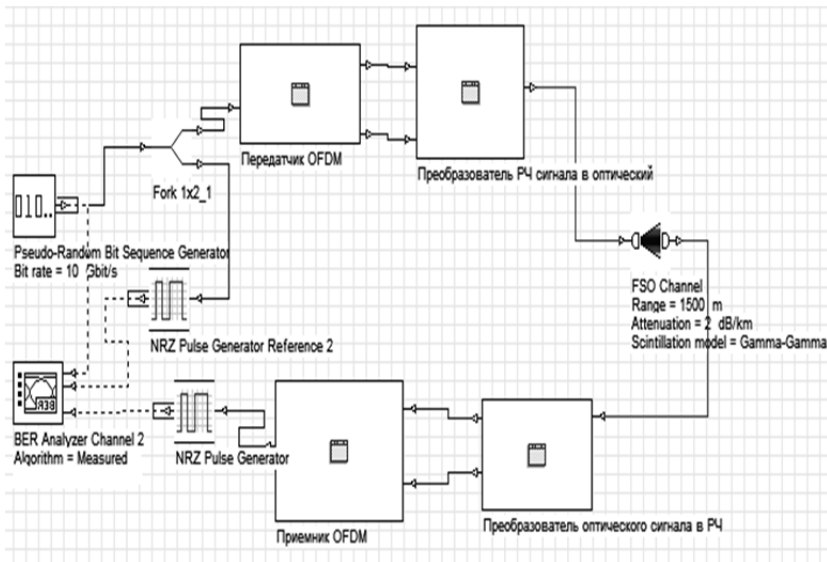


Рис. 2. Структурная схема АОЛС с технологией CO-OFDM

Затем сигнал распространяется через атмосферный канал и деградирует из-за влияния атмосферной турбулентности и затухания. Для оценки характеристик системы и учета структурной постоянной показателя преломления (силы турбулентности) используется модель канала связи гамма-гамма, которая является универсальной и применяется даже в условиях сильной турбулентности и на больших расстояниях. С изменением значения силы турбулентности производится моделирование режима слабой и сильной турбулентности для оценки характеристик предложенной системы.

На приемной стороне после прохождения оптического атмосферного канала сигнал принимается системой когерентного обнаружения для преобразования из оптического в радиочастотный. Наконец, в OFDM-приемнике сигнал демодулируется и декодируется.

В данной статье оценена эффективная дальность связи АОЛС с применением CO-OFDM и проведено сравнение пропускной способности прямой линии FSO и системы с CO-OFDM.

Параметры передатчика и приемника выбраны в соответствии со значениями реально выпускаемых приемопередающих модулей компании *Artolink* модели M1-10GE. При моделировании передатчик излучает сигнал на длине волны 1550 нм. Мощность передатчика составляет 33 дБм, чувствительность приемника – 30 дБм, скорость передачи информации – 10 Гбит/с.

Основными из показателей для измерения качества передачи являются коэффициент ошибок BER (Bit Error Ratio) и Q-фактор. В приемном устройстве возникают битовые ошибки при преобразовании оптических сигналов в электрические, так как волновые формы оптических сигналов, поступающих на приемник, искажаются вследствие таких факторов, как шум, нелинейные эффекты и дисперсия.



Значения коэффициента BER и Q-фактора связаны: меньшее значение BER указывает на большее значение Q и лучшую производительность линии связи.

Для современных высокоскоростных атмосферных систем передачи сигналов, работающих практически без ошибок, $BER < 10^{-10}$, Q-фактор = 6,63 [6]. Для анализа качества передачи сигнала при моделировании используется BER-анализатор, осуществляющий вычисление Q-фактора.

В работе проведено сравнение зависимости значения Q-фактора от расстояния связи при различных режимах турбулентности для определения эффективной дальности связи АОЛС-системы с CO-OFDM и АОЛС-системы без применения мультиплексирования. Измерения проводились при коэффициенте затухания 2 дБ/км (слабый дождь), результаты представлены на рисунке 3. Под эффективной дальностью связи принимается дистанция передачи сигнала, при которой коэффициент ошибок $BER < 10^{-10}$, то есть осуществляется безошибочная передача сигнала.

37

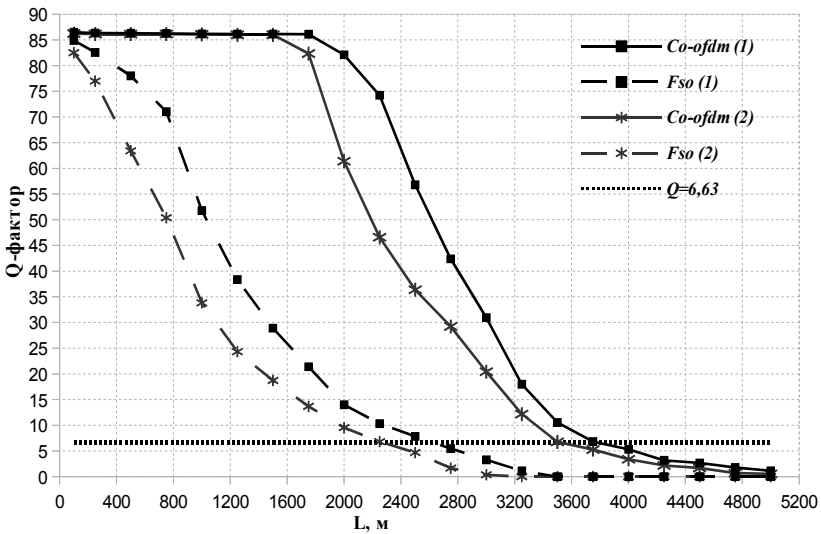


Рис. 3. Зависимость Q-фактора от дальности связи:
 1 – Co-ofdm (1) и Fso (1) при режиме слабой турбулентности $C_n^2 = 10^{-15}$;
 2 – Co-ofdm (2) и Fso (2) при режиме сильной турбулентности $C_n^2 = 10^{-12}$

Результаты измерения эффективной дальности связи по графику представлены в таблице.

Значения эффективной дальности связи для систем АОЛС и АОЛС с CO-OFDM при различных режимах турбулентности

Режим атмосферной турбулентности	Эффективная дальность связи (Q = 6,63), м	
	FSD	CO-OFDM
Слабая ($C_n^2 = 10^{-15}$)	2500	3750
Сильная ($C_n^2 = 10^{-12}$)	2350	3500



Из графика и сводной таблицы видно, что с применением технологии мультиплексирования CO-OFDM дальность связи увеличивается в 1,5 раза в режиме как слабой, так и сильной турбулентности.

Атмосферная турбулентность не оказывает влияния на систему АОЛС с технологией CO-OFDM на дистанциях передачи сигналов до 1500 м, значения Q-фактора практически не меняются.

Далее было проведено исследование для оценки скоростных характеристик системы АОЛС при заданном значении Q-фактора 6,63 в зависимости от дистанции связи и коэффициента затухания в диапазоне от 2 дБ/км до 12 дБ/км, что соответствует изменению параметра от слабого дождя до несильного тумана.

Результаты исследования представлены на рисунке 4.

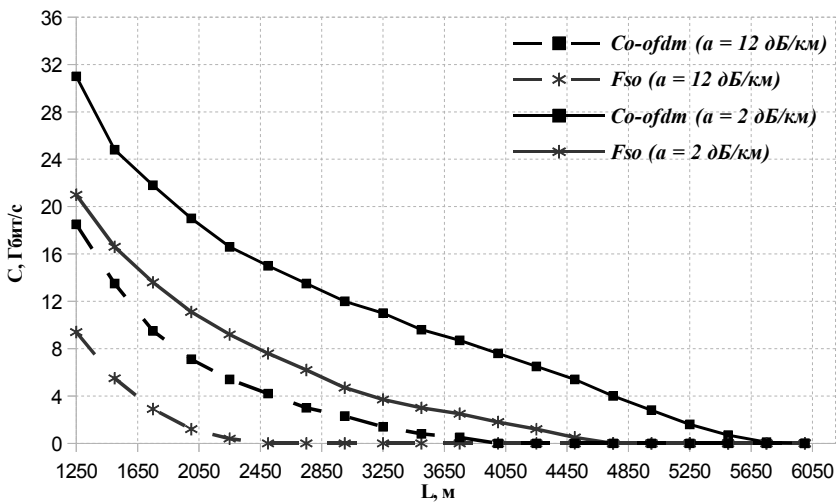


Рис. 4. Зависимость пропускной способности от дальности связи

Результаты моделирования в этом случае показали, что система АОЛС с CO-OFDM обеспечивает более эффективную защиту от воздействия погодных условий на пропускную способность системы, поскольку при несильном тумане на дистанции 3250 м скорость передачи системы с CO-OFDM составляет около 2 Гбит/с, тогда как АОЛС без мультиплексирования на таком расстоянии становится неработоспособной. Также система АОЛС с CO-OFDM позволяет почти в 2,5 раза увеличить скорость передачи данных на расстояниях связи до 4000 м при несильном дожде.

Таким образом, подход, предложенный в работе, заключается в применении технологии когерентного ортогонально-частотного мультиплексирования при построении атмосферных оптических систем, что позволяет уменьшить влияние атмосферной турбулентности при распространении сигналов в атмосфере. Исследование проводилось с применением моделирования, которое учитывает дополнительные мешающие факторы канала связи АОЛС. Это дало возможность уточнить статические расчеты энергетического бюджета.



По результатам моделирования были оценены качественные и скоростные характеристики системы связи, позволяющие получить лучшие результаты по сравнению с традиционной системой, а именно: увеличение пропускной способности почти в 2,5 раза и эффективной дальности связи в 1,5 раза. Это делает возможным расширение свойств сетей абонентского доступа.

Список литературы

1. *Gagliardi R. M., Karp S.* Optical Communications. N.Y., 1995.
2. *Andrews L. C., Phillips R. L., Hopen C. Y.* Laser Beam Scintillation with Applications. Bellingham ; Washington, 2001.
3. Боев А. А., Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н. и др. Беспроводной канал передачи информации со скоростью 40 Гбит/с // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 62. С. 44–48.
4. Милютин Е. Р. Энергетический бюджет атмосферной оптической линии связи // Вестник связи. 2010. №2. С. 12–13.
5. *Subhalekshmi K. R., Sreelekshmi K. R., Thomas J.* OFDM in FSO communication system // Int. J. Innov. Res. Comp. Commun. Eng. 2015. Vol. 3, iss. 8. P. 934–937.
6. Ткалич О. П., Дятлов А. А., Мамаев Р. А., Нечай Д. Ю. Применение глазковых диаграмм для исследования цифровых сигналов // Электроника та системи управління. 2009. № 2. С. 32–41.

Об авторах

Сергей Васильевич Молчанов – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SMolshanov@kantiana.ru

Светлана Олеговна Калекина – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: Kalekina-SO@yandex.ru

The authors

Dr Sergey V. Molchanov, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Svetlana O. Kalekina, Master's Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: Kalekina-SO@yandex.ru