

УДК 621.373.826

БЕСПРОВОДНОЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ СО СКОРОСТЬЮ 40 ГБИТ/С

А. А. Боев, зам. главного конструктора ЗАО «Мостком»; info@mостком.ru

М. Ю. Керносов, старший научный сотрудник ЗАО «Мостком»; info@mостком.ru

С. Н. Кузнецов, директор по ИТ ЗАО «Мостком»; ksn@mостком.ru

Б. И. Огнев, аспирант РГРТУ, директор по развитию ЗАО «Мостком»; develop@mостком.ru

А. А. Паршин, инженер программист 1-ой категории ЗАО «Мостком»; info@mостком.ru

Главным драйвером развития АОЛС остается наращивание пропускной способности беспроводного канала. В оптическом диапазоне этого можно достичь сравнительно простыми способами, используя широко применяемую в ВОЛС технологию волнового мультиплексирования (WDM). Эффективности указанного решения способствует и то, что практически все компоненты для узкополосных передатчиков и оптических фильтров присутствуют на рынке для оптоволоконных приложений. Задача состоит в том, чтобы интегрировать эти компоненты в беспроводный оптический канал.

Цель работы – проверка возможности использования WDM технологии в атмосферном канале, который характеризуется высоким уровнем турбулентности. Атмосферная турбулентность приводит к существенной нестационарности условий приема сигнала в отличие от ВОЛС [1]. В данной статье приведены результаты исследований решения по передаче 4-х потоков Ethernet 10 Гбит/с через атмосферный канал на различных дистанциях. Оборудование для проведения исследований было построено на базе серийно выпускаемой модели Artolink M1-10GE, в исходной конфигурации обеспечивающей скорость передачи 10 Гбит/с на одной длине волны.

Ключевые слова: беспроводная оптическая связь, Free Space Optics, 40 Гбит/с, WDM в атмосферном канале, лазерная связь, защищенный канал связи.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48

Введение

Тенденция развития коммуникаций последнее время состоит в неуклонном росте объема передаваемого в мире трафика. С точки зрения технологий основными игроками рынка, безусловно, являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и цифровое радио. Однако для ряда приложений остается актуальной задача по беспроводной передаче больших объемов информации на сравнительно небольшие расстояния. Еще одной особенностью некоторых приложений являются требования безопасности, защищенности и скрытности передачи. В таких сферах решения на основе беспроводной оптики (FSO, АОЛС) остаются привлекательными даже на фоне того, что в микроволновом диапазоне (70/80 ГГц) уже появились предложения по каналам со скоростями 10 Гбит/с.

Постановка задачи

Задача настоящей работы состояла в исследовании возможности создания коммерческого оборудования беспроводной оптической связи со

скоростью передачи 40 Гбит/с. Данное оборудование должно обеспечивать работу беспроводного канала связи в атмосфере в условиях турбулентности.

Базовое оборудование для исследований представляло собой два терминала, каждый из которых состоит из блока интерфейсов (БИ) со стыками для подключения пользовательского оборудования на скорости 10 Гбит/с (10GE), оптического блока – приемопередатчика (ОБ) [имеющего в своем составе оптический усилитель (ОУ) и оптоволоконный дуплексер (ОВД)] и соединительного интерфейсного кабеля (ИК) между ними.

Схема прохождения оптического информационного сигнала в линии, построенной на оборудовании M1-10GE, приведена на рисунке 1.

К особенностям оборудования можно отнести моноапертурную оптическую систему, построенную с использованием оптоволоконного дуплексера, позволяющего объединить в одной апертуре вывод одномодового излучения оптического усилителя на длине 1550 нм в атмосферу

и прием сигнала на той же длине волны от удаленного ОБ. Кроме того, в состав ОБ входит система автоматического наведения, совмещающая ось диаграммы направленности (ОДН) приемопередатчика с направлением на противоположный терминал и работающая на другой длине волны (800 нм). На этой же длине волны организован служебный канал, позволяющий получать данные о состоянии противоположного терминала и передавать на него команды управления. Данное решение позволило встроить в оборудование систему автоматической регулировки мощности излучения передатчика. Уровень выходной мощности каждого терминала автоматически регулируется системой управления таким образом, чтобы на противоположном терминале получить достаточный уровень приемного сигнала (точка стабилизации приемника).

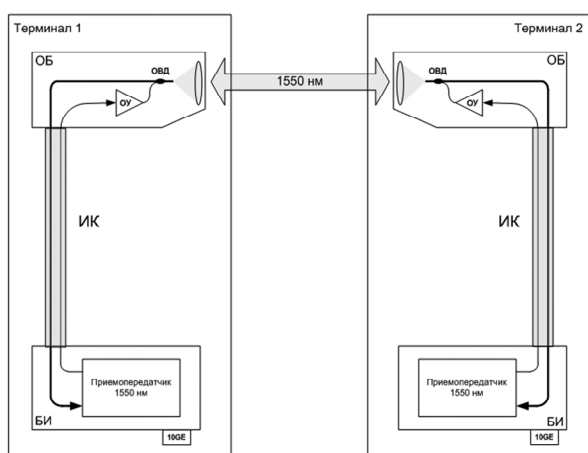


Рисунок 1 – Схема прохождения оптического информационного сигнала в линии М1-10GE

Таким образом, как видно из приведенной схемы прохождения оптических сигналов, оборудование не накладывает ограничений на использование спектра в диапазоне 1550 нм, и скорость передачи в канале можно увеличить за счет использования WDM мультиплексирования по длинам волн. Данное решение может быть реализовано путем каскадного подключения узкополосных тонкопленочных (TFF) фильтров.

Одна из задач согласования WDM сигналов с каналом передачи заключается в выравнивании условий прохождения всех спектральных составляющих. В ВОЛС для этого используются выравнивающие фильтры с последующим усилением многоволнового сигнала для компенсации вносимых дополнительных потерь [2]. Такой подход оправдан при желании полностью использовать С диапазон. В нашем случае мы ограничились 4 длинами волн. Компенсацию неравенства дополнительных потерь, вносимых каскадным включением TFF фильтров, можно

выполнить за счет нелинейности передаточной функции усилителя.

Для реализации проекта были выбраны длины волн 1549.32, 1550.92, 1552.52 и 1554.13 нм, соответствующие 35, 33, 31 и 29 каналам 100 ГГц DWDM сетке ITU [3].

На рисунке 2 показано спектральное распределение мощности излучения передатчиков, работающих на выбранных длинах волн на фоне кривой ненасыщенного усиления ОУ (все кривые нормированы на максимум).

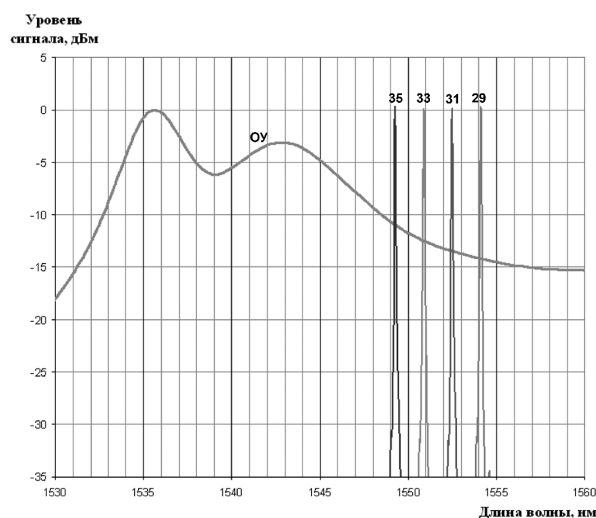


Рисунок 2 – Спектры передатчиков на фоне ненасыщенного усиления ОУ

Такое решение обеспечивает лучшую энергетическую эффективность, что важно для беспроводных оптических каналов с большим, чем в ВОЛС, уровнем потерь.

В связи с этим, для увеличения скорости использовалась модификация БИ, в которые были введены четыре приемопередатчика, работающих на выбранных длинах волн. Для коммутации каналов приема/передачи использовались приемо-передающие мультиплексоры, выполненные на основе TFF фильтров. Каждый из таких фильтров имеет один общий порт (Com), пропускающий все длины волн, селективный порт (Pass), пропускающий определенную длину волны, и порт, через который проходят все длины волн, кроме селективной (Ref). Порты фильтров работают в любом направлении, поэтому их можно использовать как для сложения, так и для разделения сигналов. Следует отметить, что на передаче были использованы одномодовые (SM), а на приеме – многомодовые (MM) фильтры. При этом решении в оборудовании появляются четыре параллельно и независимо работающих канала 10 Гбит/с и соответственно 4 стыка 10GE для подключения пользовательского оборудования с каждой стороны линии. Схема

коммутации в модифицированном БИ приведена на рисунке 3.

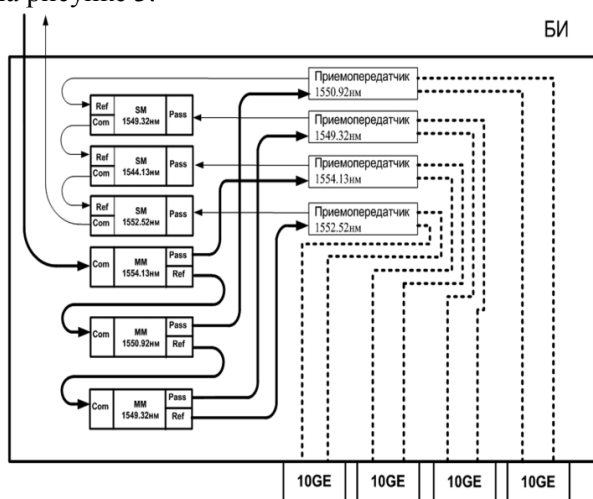


Рисунок 3 – Схема коммутации приемопередатчиков и TFF фильтров в модифицированном БИ

В качестве дополнительных средств для выравнивания спектра были использованы последовательность соединения фильтров, хроматическая aberrация объектива ОБ и подбор номинальной мощности передатчиков. Важная особенность работы линии состоит в том, что оптический усилитель работает с переменным усилением для стабилизации уровня приема и компенсации потерь в атмосферном канале. Поскольку при изменении усиления ОУ меняется форма его передаточной характеристики, полную компенсацию во всех режимах работы системы получить выбранным методом не удалось. Результат выравнивания приемного сигнала по каналам передачи в зависимости от уровня усиления ОУ показан на рисунке 4. На рисунке 4 представлена зависимость уровня приемных сигналов по каналам от времени. В процессе измерений изменялся коэффициент усиления ОУ таким образом, что его выходная мощность РОУ принимала значения 10, 20, 35 и 60 мВт с периодом установки каждого уровня мощности 10 минут.

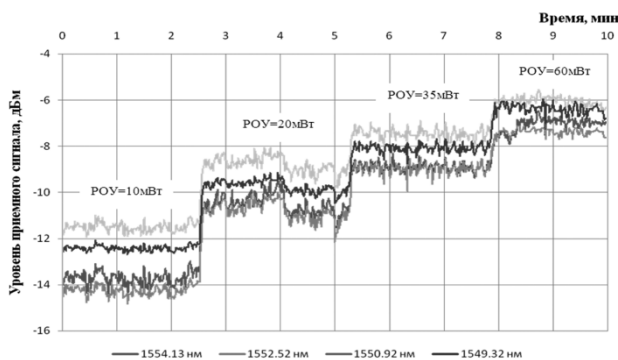


Рисунок 4 – Уровень приемных сигналов по каналам при различных значениях выходной мощности ОУ

Как видно из рисунка 4, использованием всех перечисленных мер удалось получить разницу в бюджете в пределах от 2,5 дБ для слабого усиления и до 1,3 дБ для большого сигнала.

Анализ запаса бюджета линии по усилению показал следующее. Для одноканальной линии бюджет линии составляет 35 дБ, который складывается из +20 дБм передатчика и -15 дБм чувствительности приемника (с учетом потерь в оптической части). После введения еще трех длин волн в состав оборудования, измеренный средний бюджет по каждому каналу составил около 26 дБ, что незначительно отличается от расчетной величины 28 дБ (с учетом потерь на разделение каналов и фильтрацию).

Надо отметить, что использованный метод выравнивания спектра требует достаточно много кропотливой работы по настройке оборудования, включая подбор фокальной плоскости с учетом хроматической aberrации объектива и выбор схемы коммутации каналов. Кроме того, такой метод выравнивания является параметрическим, поскольку стабильность спектра обеспечивается не обратной связью, а определяется только температурной стабильностью компонентов схемы. Такой же эффект наблюдается и в ВОЛС, но там изменения температуры эксплуатации значительно меньше.

С другой стороны, поскольку предложенный метод позволяет обеспечить минимальные потери энергетического бюджета (без учета геометрических потерь), его можно признать достаточно эффективным.

Экспериментальные исследования

Для проверки эксплуатационных характеристик собранного образца линии 40 Гбит/с с DWDM сигналами в реальных условиях были проведены полевые испытания. Испытания проводились на трех трассах с длинами 0,6, 1,5 и 2,7 км. Испытания проводились в разные дни и, строго говоря, при разном состоянии атмосферного канала в части уровня турбулентности атмосферы, но надо отметить, что в целом экспериментальные условия были схожими: метеорологическая дальность видимости (МДВ) была более 20 км, температура +20-25 град, солнечный день.

Один терминал был стационарным с установкой ОБ на крыше 6-ти этажного капитального здания, второй терминал был мобильным – ОБ устанавливался на треноге с питанием терминала от бортовой сети автомобиля. Для иллюстрации на рисунке 5 приведены фотографии мобильного терминала на линии в 1,5 км и вид на место его расположения со стороны стационарного терминала.



Рисунок 5 – Фото экспериментальных условий на линии 1,5 км

Формирование канала связи при тестировании его параметров было организовано по последовательной схеме таким образом, чтобы на пути между двумя тестерами тестовые пакеты проходили все 4 канала линии. Для этого ко всем четырем портам 10GE обоих БИ были подключены коммутаторы. К двум портам одного коммутатора были подключены два тестера. Для обеспечения последовательной схемы соединений в канале были использованы VPN (Virtual Private Network) настройки портов коммутаторов. Полученная в результате схема коммутации приведена на рисунке 6, где обозначены каналы различных длин волн, сплошными черными линиями электрические соединения, а пунктирными черными линиями – логические соединения каналов в коммутаторах и тестере.

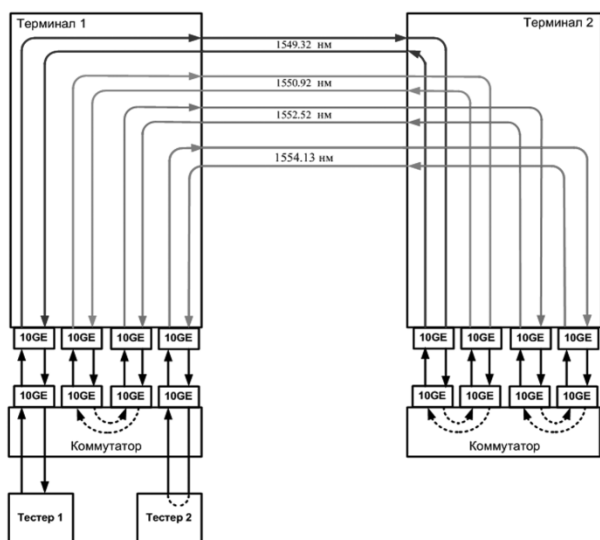


Рисунок 6 – Схема коммутации каналов при проведении испытаний

При таком соединении каждый тестовый пакет данных, отправленный тестером 1, проходил атмосферный канал 8 раз – по 2 раза на каждой из 4-х длин волн. Измеренная задержка распространения сигнала от тестера 1 до тестера 2 составила 20.2, 43.5 и 75.5 мкс для трасс распространения излучения длиной 0.6, 1.5 и 2.7 км соответственно.

Результаты измерения уровня битовых ошибок (BER) в канале в зависимости от длины трассы приведены на рисунке 7.

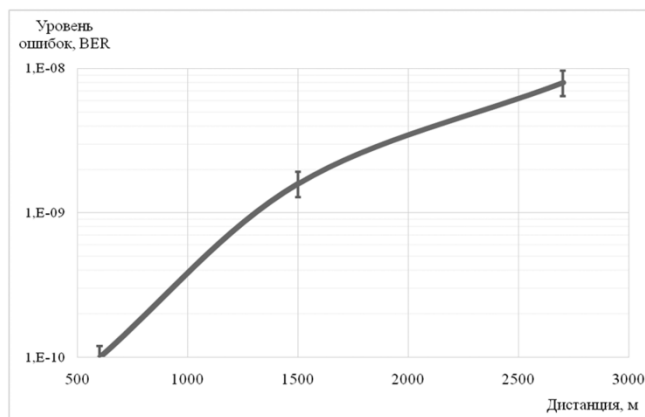


Рисунок 7 – Зависимость измеренного BER от дистанции

Как видно из рисунка 7, при увеличении дальности увеличивался уровень ошибок в канале. Это ожидаемый результат, т.к. при увеличении дальности возрастает влияние турбулентности канала [1].

Полученные результаты в целом хорошо коррелируют с проведенными ранее измерениями для одноволнового канала со скоростью передачи 10 Гбит/с [5]. Основной вклад в ошибки в открытом канале дает нестационарность среды распространения света.

Видно, что для линий связи короче 1,5 км уровень ошибок BER составляет величину порядка 10^{-9} , что приемлемо для применения оборудования в большинстве приложений.

Заключение

Результаты данной работы показали, что в открытом атмосферном канале можно использовать мультиплексированные по длине волны сигналы. Отмечено, что уровень цифровых ошибок даже при последовательной схеме передачи сигналов хорошо коррелирует с одноканальными системами. При этом основной эффект, ограничивающий достоверность передачи (уровень цифровых ошибок), состоит во влиянии нестационарности среды распространения света (турбулентности атмосферы). Как было показано в работе [4], это приводит к паразитной модуляции уровня средней мощности на приеме и выходе ее мгновенного значения за пределы динамического диапазона. Это особенно актуально для высокочастотных фотоприемников. Однако, использованный в данной работе способ расширения спектра сигнала не приводит к увеличению этого влияния, что открывает путь к увеличению скорости передачи информации в беспроводных приложениях.

Примененный в настоящей работе метод выравнивания спектра продемонстрировал свою работоспособность и высокую энергетическую

эффективность. Однако он достаточно трудоемок, требует тщательного подбора всех элементов схемы и точной настройки оптики. Использование такого метода ограничено областью, в которой сочетание нелинейности кривой усиления, абберационных свойств оптики, соотношения потерь в каскадном включении фильтров мультиплексора и разброса мощности оптических передатчиков позволяет выровнять среднюю мощность спектральных составляющих. К тому же стабилизация бюджетов по каждому спектральному каналу идет параметрическим методом, что накладывает определенные технологические и эксплуатационные ограничения на массовый выпуск таких изделий.

Более прогрессивным представляется введение элементов стабилизации уровня мощности каждого спектрального канала по данным об уровне принимаемой мощности на удаленном конце линии. Это вполне реализуемо в силу того, что в оборудовании имеется независимый служебный канал, посредством которого можно получать указанные данные. С использованием

этой информации в качестве сигналов обратной связи можно осуществить индивидуальную подстройку мощности передатчиков. Такой подход позволит в перспективе как расширить спектр передаваемых сигналов на всю область усиления С-диапазона, так и получить надежную стабилизацию спектра в широком диапазоне температур.

Библиографический список

1. Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277с.
2. Листвин В. Н., Трещиков В. Н. DWDM системы. – М.: Издательский Дом «Наука», 2013. 300с.
3. Recommendation ITU-T G.694.1
4. Kuznetsov S., Ognev B., Polyakov S., Yurko S. Wireless communications at 10Gb/s. SPIE Newsroom. 2014. DOI: 10.1117/2.1201405.005486
5. Кузнецов С. Н., Поляков С. Ю., Dr. AlAli O., Hashem B. Беспроводный канал 10 Гбит/с: ключевые особенности и результаты тестирования. Инновации в науке, производстве и образовании: сб. тр. науч.-практ. конф./отв. Ред. К. Н. Гаврилов, В. А. Степанов; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. Рязань, 2013. С. 83-91.

UDC 621.373.826

WIRELESS COMMUNICATION CHANNEL WITH 40 Gbps DATA RATE

A. A. Boev, deputy chief designer, Mostcom CJSC; ksn@mocckom.ru

M. Y. Kernosov, Senior Researcher, Mostcom CJSC; ksn@mocckom.ru

S. N. Kuznetsov, IT director, Mostcom CJSC; ksn@mocckom.ru

B. I. Ognev, post-graduate student, RSREU, development director Mostcom CJSC; develop@mocckom.ru

A. A. Parshin, engineer programmer of 1st category, Mostcom CJSC; ksn@mocckom.ru

The main driver for the development of wireless optical communications is to increase the bandwidth of wireless channel. In the optical range this can be achieved by relatively simple means, using widely used in fiber-optic technology wavelength division multiplexing (WDM). The efficiency of the specified decision is promoted also by the fact that practically all components for narrow-band transmitters and optical filters are present at the market for fiber optic applications. The challenge is how to integrate these components in a wireless optical channel.

The aim of this work was to verify the possibility of using WDM technology in the atmospheric channel, which is characterized by a high level of turbulence. Atmospheric turbulence leads to significant signal reception instability unlike fiber-optic communication line. In this article the research results of solutions for the transmission of 4 Ethernet 10 Gbps streams via the atmospheric channel at different distances are given. Equipment for research was built on the basis of serially produced Artolink MI-10GE model which provides 10 Gbps data rate on a single wavelength in the initial configuration.

Key words: *Wireless Optical Communication, 40 Gbps wireless, Free Space Optics, optical communication terminal, MANET, wavelength division multiplexing (WDM), high-speed secure communication channel.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48

References

1. Gurvich A. S., Kon A. I., Mironov V. L., Hmelyevcov S. S. Lazernoe izluchenie v turbulentnoy atmosfere. Nauka. 1976. 277 p. (in Russian).
2. Listvin V. N., Treschikov V. N. DWDM sistemy. Izdatelsky dom Nauka. 2013. 300 p. (in Russian).
3. Recommendation ITU-T G.694.1
4. Kuznetsov S., Ognev B., Polyakov S., Yurko S.

Wireless communications at 10Gb/s. SPIE Newsroom. 2014. DOI: 10.1117/2.1201405.005486

5. Kuznetsov S., Polyakov S., Dr. AlAli O., Hashem B. Besprovodniy kanal svyazi 10 Gbps: kluchevie osobennosti i rezultaty testirovaniy. Innovacii v nauke, proizvodstve i obrazovanii. Ryazan State University named for S.Yesenin. Ryazan, 2013. pp. 83-91. (in Russian).