

09.5;09.7

## **Дополнительный информационный канал передачи частотно-модулированных сигналов в стандартных волоконно-оптических линиях связи на основе амплитудной модуляции**

© В.В. Лебедев<sup>1</sup>, К.М. Ануфриев<sup>2</sup>, Н.В. Тогузов<sup>1</sup>,  
И.В. Ильичев<sup>1</sup>, А.В. Шамрай<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Университет информационных технологий, механики и оптики,

Санкт-Петербург

E-mail: achamrai@mail.ioffe.ru

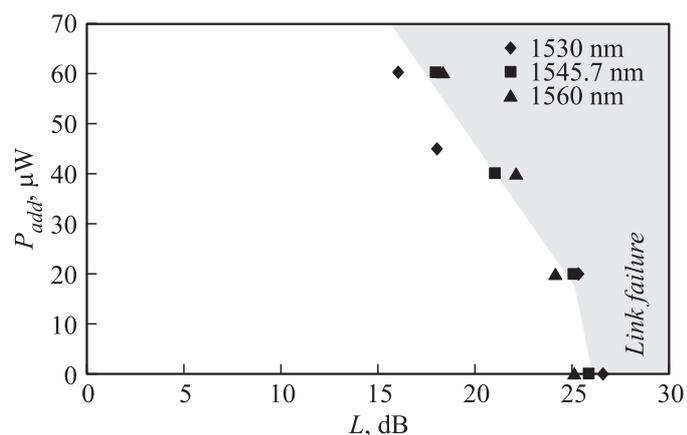
*Поступило в Редакцию 8 мая 2015 г.*

Разработана концепция использования частотной модуляции для формирования дополнительного информационного канала в стандартной волоконно-оптической линии связи без нарушения работы основного канала, использующего амплитудную модуляцию. С использованием предложенных методов экспериментально продемонстрирована передача сигнала интерфейса RS-232 по стандартной внутриобъектовой линии 100 Mbit/s Ethernet на основе одномодового оптического волокна SMF 28.

Для целого ряда направлений развития современных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) существует актуальная проблема создания дополнительных информационных каналов с относительно невысокой пропускной способностью, которые не мешали бы передаче данных в основном информационном потоке большой емкости. Одним из таких направлений является развитие полностью оптических сетей [1], где обработка служебных сигналов должна проводиться на оптическом уровне без преобразования в электронный вид. Эффективным способом реализации данного направления является ортогональная маркировка пакетов [2], использующая два независимых вида оптической модуляции для передачи основных (payload) и служебных (header) данных.

Другим направлением, эффективно использующим особый вид оптической модуляции, является передача сервисных сигналов удаленного управления аппаратурой, не имеющей высокоскоростных оптических сетевых интерфейсов [3]. Кроме того, большой интерес представляет передача аналоговых сигналов от различных датчиков, в том числе от волоконно-оптических датчиков, и построение гибридных систем [4]. Данное направление особенно актуально для сложных автономных оптических сетей на подвижных объектах (самолеты, корабли и др.).

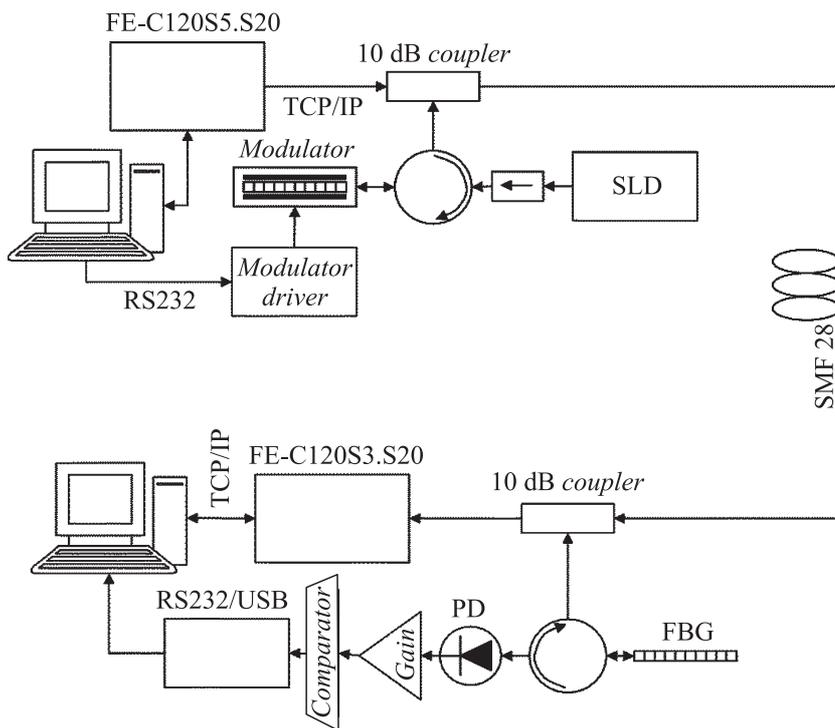
В данной работе было предложено использовать для передачи дополнительных сигналов формат, основанный на оптической частотной модуляции. В качестве физической среды передачи сигналов было выбрано оптическое соединение типа „точка–точка“ на основе одномодовых волоконных световодов (SMF 28), с передачей сигналов в формате 100 Mbit/s Ethernet на длине волны 1550 nm. В качестве передатчика и приемника основного канала были использованы медиа-конвертеры Ruby (FE-C120S5.S20 — передатчик, FE-C120S3.S20 — приемник). Общая оптическая мощность на выходе передатчика составляла  $76 \mu\text{W}$ . Данный вид канала передачи является типичным для систем внутриобъектовой связи, с расстоянием передачи до 15 km, где передача данных ведется по стандарту 100BASE-FX. На первом этапе исследований были проведены эксперименты по определению условий нарушения передачи данных в основном канале. Критерием являлся факт появления потерянных пакетов при передаче данных с использованием стандартного протокола TCP/IP. Было исследовано влияние двух основных факторов: появления дополнительных оптических потерь, что моделировалось перестраиваемым оптическим аттенюатором, и возникновения узкополосного сигнала-помехи, создаваемого с помощью перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазера с модуляцией на частоте 20 kHz и регулируемой выходной мощностью. На основе результатов измерений была построена диаграмма границы нарушения передачи данных по основному каналу (рис. 1). Данная граница определяет диапазон возможных изменений параметров ВОЛС на физическом уровне и задает максимально допустимые требования к параметрам дополнительного канала, обеспечивающие отсутствие нарушений передачи данных в основном канале. Допустимые оптические потери определяются дополнительными потерями при подсоединении к линии передатчика и приемника дополнительного канала. Допустимая мощность сигнала-помехи — это максимальная допустимая мощность



**Рис. 1.** Граница нарушения передачи данных по основному каналу при введении узкополосного сигнала-помехи на трех разных длинах волн: 1530 nm — на коротковолновой границе спектрального диапазона медиаконвертора (ромбы), 1545.7 nm — внутри оптического спектрального диапазона медиаконвертора (квадраты), 1560 nm — на длинноволновой границе спектрального диапазона медиаконвертора (треугольники).

передатчика дополнительного канала. При расширении оптической сети, с использованием пассивных оптических элементов (технология PON) граница допустимых вносимых потерь будет снижаться, что связано с делением оптической мощности между различными точками доступа.

Схема макета-демонстратора передачи дополнительного канала с использованием частотной оптической модуляции представлена на рис. 2. Ввод/вывод дополнительного канала осуществлялся с помощью стандартных 10 dB волоконно-оптических направленных ответвителей, вносящих в основной канал потери порядка 0.5 dB. Ключевым элементом передатчика, обеспечивающим ввод информации в оптический тракт, является интегрально-оптический модулятор на основе управляемой брэгговской решетки (IBG) [5]. IBG вырезал из широкого спектра суперлюминесцентного полупроводникового светодиода (SLD) узкую линию (0.2 nm), положение которой модулировалось в соответствии с передаваемым сигналом ( $1555.8 \pm 0.2$  nm). Девиация частоты при оптической частотной модуляции выбиралась в соответствии с принципом



**Рис. 2.** Схема макета-демонстратора передачи дополнительного канала с использованием частотной оптической модуляции.

минимального частотного сдвига (MSK — minimum shift keying) и была равна ширине спектральной линии выделяемой ИВГ.

В приемнике дополнительного канала использовался частотный дискриминатор на основе коммерчески доступной волоконной брэгговской решетки (FBG) с центральной длиной волны отражения 1556.55 nm и шириной спектральной характеристики 0.8 nm (100 GHz). Коротковолновый склон спектральной характеристики отражения FBG совпадал с центральной длиной волны ИВГ. Дискриминатор производил преобразование частотной модуляции оптического сигнала в амплитудную модуляцию, которая регистрировалась фотодетектором. Дополнительно FBG

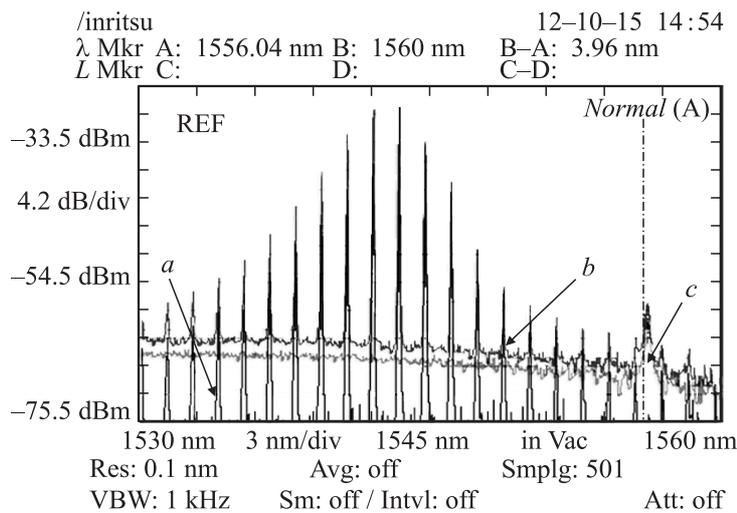
выполняла функцию фильтра, отсекая большую часть оптической мощности широкополосного основного канала, обеспечивая тем самым на выходе фотодетектора необходимый уровень соотношения сигнал/шум, где в качестве шума выступают неотфильтрованные оптические сигналы основного канала. Сигнал с фотодетектора усиливался трансимпедансным усилителем с регулировкой коэффициента усиления и подавался на схему сравнения с регулируемым порогом, где преобразовывался в цифровой вид.

Для демонстрации передачи дополнительного канала использовались сигналы асинхронного формата RS-232 со скоростью до 19200 bit/s. В демонстрационных экспериментах по дополнительному каналу RS-232 проводилась онлайн-передача текстовых символов с использованием кодов ASCII либо оцифрованного звука, в то время как по основному 100 Mbit/s-Ethernet-каналу проводилось онлайн-воспроизведение видеофайлов. Для тестирования макета была разработана специальная программная оболочка, устанавливаемая на приемном и передающем терминалах. Данная оболочка осуществляла мониторинг передачи данных (статистику переданных и полученных пакетов) по основному каналу, использующему стандартный протокол TCP/IP, одновременно с дополнительным каналом с использованием асинхронного интерфейса RS-232. Критерием правильной работы служила индикация отсутствия ошибок при передаче данных по обоим каналам. Настройка дополнительного канала осуществлялась путем регулировки оптической мощности передатчика, а также коэффициента усиления и порога схемы сравнения приемника. Для уменьшения уровня вносимого шума выбиралась минимальная мощность передатчика дополнительного канала, обеспечивающая передачу сигнала без ошибок. Характерная оптическая мощность сигнала дополнительного канала в линии лежала в диапазоне от 1 до  $10 \mu\text{W}$ , что никак не отражалось на работе основного канала.

В качестве количественной меры качества передачи и взаимного влияния основного и дополнительного каналов друг на друга был введен следующий параметр:

$$Q = \left( \frac{P_{main}}{N_{add}} \right) \left( \frac{P_{add}}{N_{main}} \right) \left( \frac{\Delta S_{add}}{\Delta S_{main}} \right) \frac{\Delta S_{add}}{\Delta \lambda}. \quad (1)$$

Первый множитель характеризует отношение сигнал/шум в основном канале, где  $P_{main} = 50 \mu\text{W}$  — мощность сигнала основного канала на входе приемного медиаконвертера при выключенном передатчике



**Рис. 3.** Экспериментальные спектральные характеристики: *a* — оптический спектр на выходе передатчика основного канала; *b* — общий оптический спектр (основной и дополнительный каналы) внутри ВОЛС; *c* — оптический спектр дополнительного канала после дискриминатора.

дополнительного канала, а шумы вносятся за счет перекрестных помех дополнительного канала  $N_{add} = 70 \text{ nW}$ . Вторым множителем — это отношение сигнал/шум в дополнительном канале, где  $P_{add} = 9 \text{ nW}$  — оптическая мощность сигнала дополнительного канала на выходе частотного дискриминатора при выключенном передающем медиаконвертере, а шумы вносятся за счет перекрестных помех основного канала  $N_{add} = 11 \text{ pW}$ . Третий и четвертый множители описывают спектральную эффективность передачи данных по дополнительному каналу, где  $\Delta S_{main} = 5 \text{ nm}$  — ширина оптического спектра сигнала, передаваемого по основному каналу (по уровню 3 dB),  $\Delta S_{add} \approx 0.8 \text{ nm}$  — ширина оптического спектра сигнала дополнительного канала (определяется дискриминатором),  $\Delta \lambda \approx 14 \text{ nm}$  — спектральное расстояние между центральными длинами волн оптических спектров основного и дополнительного каналов соответственно (спектральные характеристики представлены на рис. 3). Значение параметра  $Q$ , полученное на макете-

демонстраторе, составило  $Q \approx 5328$ , при этом система настраивалась на предельно низкую вероятность ошибки  $BER \approx 10^{-15}$ , ошибки в передаваемых данных в экспериментах вообще отсутствовали.

В заключение отметим, что представленная в работе техническая реализация оптической частотной модуляции имеет ряд недостатков [5], таких как высокая амплитуда управляющих сигналов, относительно низкая частота модуляции и низкая энергетическая эффективность (используется лишь узкая полоса из широкого спектра суперлюминесцентного источника). Способ реализации оптической частотной модуляции может быть заменен на любой альтернативный, например на синхронную противофазную модуляцию двух лазерных диодов с разными длинами волн излучения, что потенциально значительно повысит энергоэффективность, а также позволит увеличить скорость передачи до нескольких Gbit в секунду. Увеличение пропускной способности канала позволит вводить дополнительный функционал, например, кодирование для коррекции ошибок или криптографии. Поскольку разработанные методы работают на физическом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем [6], то любое преобразование типа среды передачи основного сигнала (преобразование в электронный вид) приводит к потере дополнительного оптического сигнала. Поэтому важным условием применимости разработанных методов является отсутствие в сигнальном тракте на пути от передатчика до приемника дополнительного канала такого рода преобразований. Наиболее простой системой для применения разработанных методов являются пассивные оптические сети с архитектурой, использующей эфирное вещание [7]. В данной архитектуре используется один спектральный диапазон, и сигнал равномерно распределяется между всеми пользователями путем простого деления мощности; это гарантирует, что введенный в сеть оптический сигнал с передатчика дополнительного канала в конечном счете достигнет приемника, а продемонстрированное высокое значение параметра  $Q$  обеспечит устойчивость к росту оптических потерь при расширении сети.

Используемый в исследованиях экспериментальный образец модулятора был разработан и изготовлен в рамках федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.604.21.0055, RFMEFI60414X0055).

## Список литературы

- [1] *Blumenthal D.J.* // Scientific American. January 2001. P. 82–85.
- [2] *Blumenthal D.J., Olsson B., Rossi G., Dimmick T.E., Rau L.* // J. Lightw. Technol. 2000. V. 18. N 12. P. 2058–2075.
- [3] *Sumesh M.A., Joseph B., Mahapatra D.P.* // Sadhana. 2005. V. 30. Pt 4. P. 601–609.
- [4] *Devgan P., Urick V., McKinney J., Williams K.* // IEEE Fiber-Optics and Photonics Technology Conference. 2007.
- [5] *Шамрай А.В., Ильичев И.В., Козлов А.С., Петров М.П.* // Квант. электрон. 2008. Т. 38. № 3. С. 273–275.
- [6] ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. ВОС. Базовая эталонная модель. Ч. 1. Базовая модель. ОКС: 35.100.70. Действует с 01.01.2000. 62 с.
- [7] *Петренко И.И., Убайдуллаев Р.Р.* // Lightwave Russian Edition. 2004. № 1. С. 22–28.