После реализации предлагаемого метода ограничения нагрузки в аппаратно-программных средствах ЦОВ будет собираться статистика, которая позволит оценить его эффективность с практической точки зрения. Не исключено, что потребуется введение каких-либо коррекций в алгоритм ограничения нагрузки, а также в формулировки речевых сообщений, передаваемых абонентам.

Литература

1. Linstone H.A. The Delphi Method. Techniques and Application – New Jersey Institute of Technology, 2002.
2. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. – СПб.: Питер, 2008.
3. Харкевич А.А. О ценности информации//Проблемы кибернетики, 1960. Выпуск 4.
4. Кабанов М.В., Соколов Н.А. Основные задачи перехода к "Системе-112"//Вестник связи. 2008. № 10. С. 73 – 74.

Передача DWDM-сигнала

Н.В. ГУРКИН, инженер компании "Т8", кандидат технических наук, О.Е. НАНИЙ, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук, А.Г. НОВИКОВ, инженер компании "Т8", кандидат технических наук, В.Н. ТРЕЩИКОВ, директор, кандидат физико-математических наук

В данной статье продемонстрирована передача DWDM-сигнала с канальной скоростью 100 Гбит/с в сетке 50 ГГц на расстояние 4000 км без оптической компенсации дисперсии. Накопленная в линии из стандартного SSMF-волокна дисперсия, равная 70000 пс/нм, компенсировалась встроенным в приемник электронным компенсатором дисперсии. В эксперименте использовался DP QPSK формат модуляции, когерентное детектирование с цифровой обработкой сигналов и коррекцией ошибок в режиме реального времени. Запас по величине отношения сигнал-шум в конце линии ($osnr_{MRG}$) составил 5,4 дБ.

Быстрый рост потребностей в пропускной способности опорных DWDM-сетей дальней связи ведет к необходимости увеличения канальной скорости передачи данных. Ее увеличение с 10 до 40 Гбит/с сопровождалось переходом от амплитудных форматов модуляции (ASK) к дифференциальным фазовым форматам модуляции (DPSK) и DQPSK [1 — 6].

Для увеличения канальной скорости до 100 Гбит/с потребовался переход к использованию когерентного приема и поляризационного мультиплексирования. Формат DP QPSK, сочетающий использование двух поляризаций (DP) с четырехуровневой фазовой модуляцией (QPSK) и когерентным приемом, признан наиболее подходящим для практического использования в опорных DWDM-сетях дальней связи [6 — 9].

Использование когерентного приема и цифровой обработки сигналов (DSP) в реальном времени позволяет отказаться от применения оптических компенсаторов дисперсии. В настоящей работе осуществлена передача DWDM-сигнала с канальной скоростью 100 Гбит/с в сетке 50 ГГц на рекордное расстояние 4000 км без оптической компенсации дисперсии.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования были проведены на лабораторной модели линии связи длиной 4000 км. Модель линии содержала чередующиеся участки длиной 100 и 50 км волокна SSMF. Между участками устанавливались эрбиевые волоконные усилители (EDFA), полностью компенсирующие потери в волокне. Для выравнивания каналов при прохождении каскада EDFA после 1500 и 3000 км устанавливались оптические фильтры. Всего линия связи содержала 27 участков по 100 км и 26 участков по 50 км. В эксперименте использовалось одномодовое оптическое волокно G.652, предоставленное компанией OFS.

В отличие от традиционных линий связи, в которых используются приемники с прямым детектированием, в тестируемой линии с когерентным приемом отсутствуют оптические компенсаторы дисперсии. В наших транспондерах осуществляется электронная компенсация дисперсии в блоке цифровой обработки сигналов приемника. Максимальная величина суммарной дисперсии, которая может быть скомпенсирована в приемнике, определяется применяемыми алгоритмами, быстродействием и величиной оперативной памяти цифровых микросхем и обычно не превышает 50000 пс/нм при работе в режиме реального времени (online). Достигнутая нами величина электронной компенсации дисперсии составила 70000 пс/нм — рекордное на момент проведения эксперимента значение.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. На тестируемый клиентский вход транспондера подается случайная последовательность двоичных символов, формируемая измерителем коэффициента ошибок (BER-тестером). Скорость следования формируемых символов равна 10 Гбит/с. На вход остальных 9 клиентских каналов сигнал не подается, а встроенный генератор формирует 9 псевдослучайных последовательностей символов (PRBS). В транспондере входной сигнал 10 Гбит/с от BER-анализатора объединяется с 9 PRBS-сигналами в один сигнал, к которому добавляются 15 % избыточных символов SOFT FEC и заголовки OTN. В результате формируется выходной электрический сигнал со скоростью около 120 Гбит/с.

Оптический передатчик на основе DFB-лазера и квадратурного модулятора Маха-Цандера преобразует выходной электрический сигнал в оптический формата DP NRZ QPSK.

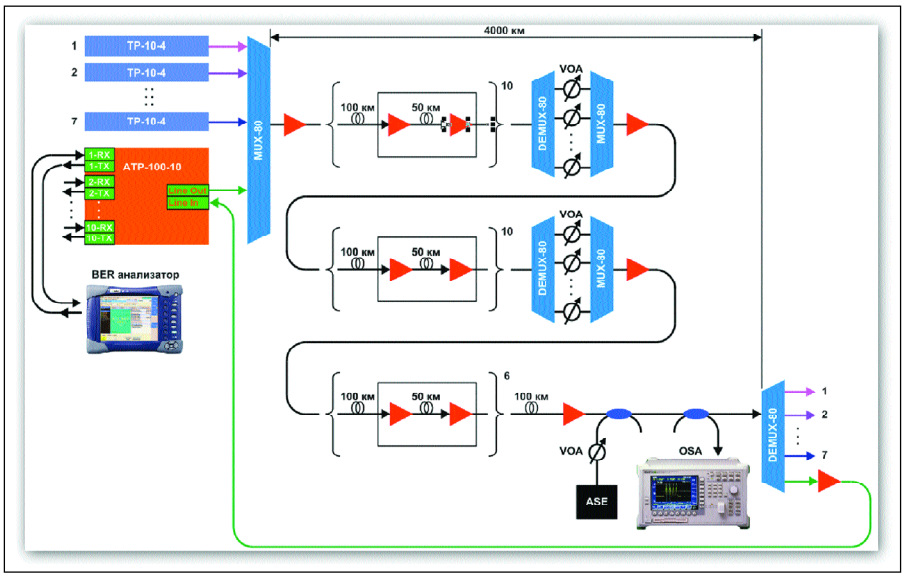

Рис. 1. Схема экспериментального макета DWDM-линии связи длиной 4000 км с канальной скоростью 100 Гбит/с в сетке 50 ГГц

Символьная эффективность формата 4 бит/символ, поэтому скорость передачи символов равна 30 Гбод.

Сформированный в транспондере выходной электрический сигнал со скоростью 120 Гбит/с через входной мультиплексор (MUX-80) поступает на вход тестируемой линии связи длиной 4000 км. В конце линии к передаваемому сигналу добавляется шум от источника усиленного спонтанного излучения (ASE). Это позволяет изменять мощность шума усиленного спонтанного излучения p_{ASE} на приемнике и следовательно величину отношения сигнал-шум (osnr), измеряемую оптическим анализатором спектра (OSA).

В эксперименте использовались транспондеры производства компании T8, которые продемонстрировали рекордно малое значение критического отношения сигнал-шум (OSNR), необходимого для поддержания безошибочной работы (коэффициент ошибок BER менее 10^{-12}) в короткой линии, т. е. в так называемой схеме back-to-back: $osnr_{TOL,\ btb}$ < 12,5 дБ. Важность этого параметра определяется тем, что уменьшение $osnr_{TOL,\ btb}$ позволяет увеличить дальность передачи информации в многопролетной линии и/или увеличить длину пролетов.

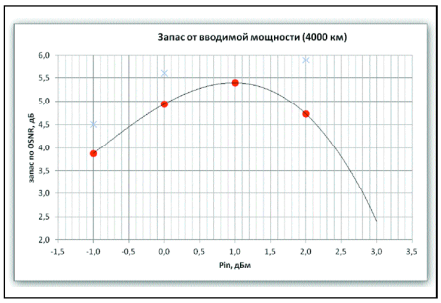

Рис. 2. Зависимость запаса по OSNR от мощности сигнала, вводимого в линию

В эксперименте при измерении $osnr_{TOL,\ btb}$ сигнал с выхода первого мультиплексора (MUX-80, рис. 1) подается, минуя линию связи, непосредственно на разветвитель, к которому подключается источник шума (ASE). Изменяя мощность шума можно менять отношение сигнал-шум osnr, которое измеряется оптическим анализатором спектра (OSA). Затем сигнал с контролируемым значением OSNR попадает на последний демультиплексор (DEMUX-80) и после усиления в предусилителе — на приемник транспондера. В транспондере осуществляется исправление ошибок с использованием алгоритма SOFT FEC и демультиплексирование сигнала на 10 клиентских каналов. Сигнал первого клиентского канала поступает на BER-анализатор. Выходной сигнал с BER-анализатора сравнивается с поступающим на него сигналом, подсчитывается количество ошибочных битов и вычисляется коэффициент ошибок BER.

Подбираем уровень мощности дополнительного шума, подаваемого от источника шума (ASE), который обеспечивает критическое значение коэффициента ошибок BER=10^{-10}. Измеренное анализатором спектра значение osnr полагаем равным $osnr_{TOL,\ btb}$.

Результаты тестирования экспериментальной линии связи

При оптимизации мощности, вводимой в линию связи, была достигнута безошибочная непрерывная работа тестируемой линии в течение более чем трех суток (78 ч). Следует подчеркнуть, что 4000 км — это рекордная дальность передачи сигнала 100 Гбит/с DP QPSK по линии связи на основе стандартного волокна SSMF без оптической компенсации дисперсии.

Показателем надежности работы системы связи является запас по OSNR ($OSNR_{margin}$ — $osnr_{MRG}$), который равен разности между отношением сигнал-шум на выходе линии связи $osnr_{Lin}$ и требуемым для условно безошибочной работы значением отношения сигнал-шум $osnr_{TOL}$ на выходе линии (все значения в дБ):

$$osnr_{MRG} = osnr_{Lin} - osnr_{TOL}.$$

При оптимальной мощности сигнала p_{optim} = 1 дБм, вводимого в тестируемую линию связи длиной 4000 км, запас по OSNR $osnr_{MRG}$ = 5,4 дБ.

В эксперименте (рис. 1) величина $osnr_{Lin}$ измеряется спектроанализатором (OSA) при отключении источника дополнительного шума (ASE). Экспериментально измеренная зависимость $osnr_{Lin}$ от мощности сигнала, как и следует из теоретических оценок, линейно растет с увеличением мощности сигнала, вводимого в линию.

Величина требуемого для условно безошибочной работы значения отношения сигнал-шум $osnr_{TOL}$ на выходе линии измеряется следующим образом. Сигнал с выхода первого мультиплексора (MUX-80, рис. 1) подается через тестируемую линию связи на разветвитель, к которому подключается источник шума (ASE). Изменяя мощность шума можно изменять отношение сигнал-шум $osnr_{ASE}$, которое измеряется оптическим анализатором спектра (OSA). Затем сигнал с контролируемым значением OSNR попадает на последний демультиплексор (DEMUX-80). Входной сигнал, подаваемый на вход первого мультиплексора (MUX-80), формируется измерителем ошибок (BER-анализатор), и на него же подается сигнал с последнего мультиплексора. Выходной сигнал с BER-

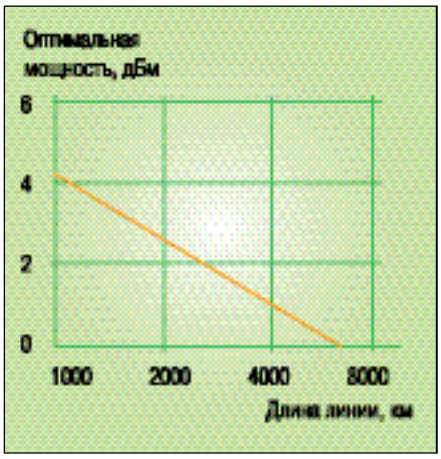

Рис. 3. Зависимость оптимальной мощности сигнала p_{optim} от длины линии

анализатора сравнивается с поступающим на него сигналом, подсчитывается количество ошибочных битов и вычисляется коэффициент ошибок BER. Подбирается уровень мощности дополнительного шума, подаваемого от источника шума (ASE), который обеспечивает критическое значение коэффициента ошибок BER = 10^{-10}. Измеренное анализатором спектра значение $osnr_{ASE}$ полагаем равным $osnr_{TOL}$.

Зависимость величины запаса $osnr_{MRG} = osnr_{Lin} - osnr_{TOL}$ от мощности сигнала, вводимого в линию связи, приведена на рис. 2. Как из него видно, зависимость запаса $osnr_{MRG}$ от мощности растет при малых значениях мощности, достигает максимального значения при некотором оптимальном значении мощности p_{optim} и при дальнейшем увеличении вводимой в линию мощности начинает быстро уменьшаться. В тестируемой линии длиной 4000 км при оптимальной мощности p_{optim} = 1 дБм величина запаса $osnr_{MRG}$ = 5,4 дБ.

Зависимость запаса OSNR от длины линии и максимальная дальность передачи

С увеличением длины линии связи растет мощность как линейного шума — шума усиленного спонтанного излучения, так и нелинейного. Даже при оптимальной мощности сигнала, вводимого в линию связи, запас $osnr_{MRG}$ уменьшается до нуля при увеличении длины линии связи до некоторого значения. Это значение и есть максимальная дальность передачи.

Зависимость оптимальной мощности сигнала p_{optim} от длины линии приведена на рис. 3. Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются следующим выражением: $p_{optim} = p_{opt1} - 5\log_{10}(L/100)$, где для исследованной конфигурации линии связи p_{opt1} = 9 дБм, а длина линии L выражена в км. Это означает, что при увеличении длины линии связи в 2 раза p_{optim} уменьшается на 1,5 дБ.

Зависимость запаса $osnr_{MRG}$ от длины линии при оптимальной мощности сигнала p optim приведена на рис. 4. В логарифмическом по длине масштабе запас $osnr_{MRG}$ в дБ аппроксимируется линейной зависимостью. При увеличении длины в 2 раза $osnr_{MRG}$ убывает на 4,5 дБ. Поскольку при длине тестируемой линии связи 4000 км запас $osnr_{MRG}$ составил 5,4 дБ, то максимальная дальность передачи оценивается величиной примерно 9000 км. В линии связи длиной 9000 км без оптической компенсации дисперсии величина накопленной хроматической дисперсии составляет примерно 150000 пс/нм. Теоретически, даже столь большое значение дисперсии может быть скомпенсировано электронными методами в когерентных приемниках с цифровой обработкой сигналов. Однако максимальная величина накопленной дисперсии, которую удалось компенсировать в настоящее время, равна 70000 пс/нм. Увеличить дальность передачи до 9000 км можно либо при разработке электронных компенсаторов дисперсии с рабочим диапазоном до 150000 пс/нм, либо при сочетании электронных и оптических методов компенсации дисперсии.

Выводы

Экспериментально установлено, что системы связи со скоростью передачи информации 100 Гбит/с, использующие формат DP QPSK с символьной скоростью 28 Гбод, можно использовать в DWDM-сетях с межканальным расстоянием 50 ГГц. Суммарная скорость передачи информации в С-диапазоне при использовании 80 каналов составляет 8 Тбит/с.

Продемонстрирована работоспособность DWDM-линий связи на основе стандартного SSMF-волокна рекордной длиной 4000 км без использования оптических компенсаторов дисперсии. Накопленная в линии из стандартного SSMF-волокна дисперсия, равная 70000 пс/нм, компенсировалась встроенным в приемник электронным компенсатором. Запас по величине отношения сигнал-шум составил 5,4 дБ, что позволяет увеличить дальность передачи до 9000 км при разработке электронных компенсаторов дисперсии с рабочим диапазоном до 150000 пс/нм.

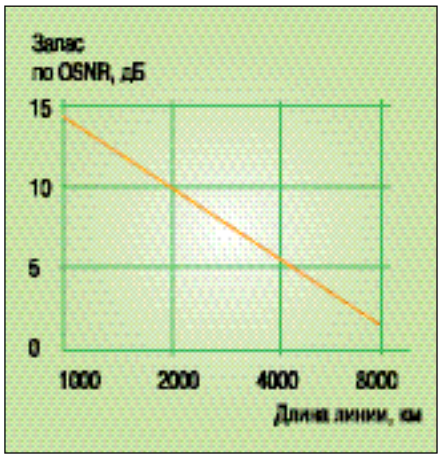

Рис. 4. Зависимость запаса по OSNR ($osnr_{MRG}$) от длины линии при оптимальной мощности сигнала p_{optim}

Литература:

1. Редюк А.А. и др. Математическое моделирование экспериментального прототипа высокоскоростной линии связи на основе дифференциального фазового формата модуляции без возвращения к нулю // Квант. Электроника. – 2011. – т. 41, – № (10) – С. 929 – 933 (2011).
2. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с // Вестник связи. – 2012. – № 1. – С. 35 – 38.
3. Гуркин Н.В., Капин Ю.А., Павлов В.Н., Плаксин С.О., Трещиков В.Н. Характеристики однопролетной системы DWDM с каналами 40 Гбит/с DPSK в сетке 50 ГГц// Электросвязь. – 2012. – № 1. – С. 56 – 58.
4. Наний О.Е., Новиков А.Г., Плоцкий А.Ю., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Характеристики многопролетной системы DWDM с каналами 40 Гбит/с DPSK в сетке 50 ГГц// Электросвязь. – 2012. – № 6. – С. 40 – 43.
5. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н. Системы DWDM нового поколения // Вестник связи. – 2012. – № 5. – С. 39 – 40.
6. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Российское оборудование DWDM с канальной скоростью 40 G и 100 G // Вестник связи. – 2011. – № 4. – С. 52 – 53.