Системы DWDM нового поколения

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

Анализ сетевого трафика указывает на продолжение его экспоненциального роста практически во всех регионах мира и на сетях всех уровней. По оценкам компаний RHK, McKinsey-JPMorgan, AT&T, MINTS, Arbor к 2020 г. скорость передачи информации на одно соединение в опорных сетях наиболее развитых стран приблизится к 20 Тбит/с.

В России также продолжается быстрый рост трафика, что ставит перед операторами связи всех уровней задачу увеличения пропускной способности их DWDM-систем связи.

Экономически наиболее перспективный путь увеличения емкости самых загруженных участков опорных сетей дальней связи — увеличение канальной скорости и спектральной эффективности DWDM-систем. В 2011 г. началось коммерческое использование в России систем связи с канальной скоростью 40 Гбит/с, в ближайшие годы ожидается внедрение систем связи с канальной скоростью 100 Гбит/с.

Особенно важно, что техническое переоснащение отрасли, связанное с переходом на канальные скорости передачи информации 40 Гбит/с, а в перспективе и 100 Гбит/с, может быть осуществлено с использованием оборудования российского производства.

Вместе с тем потребности сетевых операторов в объеме передаваемой информации на разных участках сети отличаются на много порядков. Поэтому наряду с системами связи с самой большой канальной скоростью (сегодня это 40 и 100 Гбит/с) в течение длительного времени будут широко использоваться системы связи DWDM с меньшими канальными скоростями (10 и 2,5 Гбит/с). В настоящее время потребность российских операторов связи в системах с канальной скоростью 10 Гбит/с многократно превышает потребность в системах связи с канальными скоростями 40 и 100 Гбит/с.

В силу значительно меньшей плотности населения в России существенно более остро, чем в европейских странах и США, стоит задача увеличения протяженности оптических линий связи без использования регенерации. Протяженность линий связи DWDM определяется величиной требуемого отношения сигнал/шум оптического сигнала (требуемого OSNR), обеспечивающего уровень ошибок, не превышающий допустимый. Так увеличение требуемого OSNR на 2 дБ позволяет увеличить на 10 км длину однопролетной линии связи или более чем в полтора раза — многопролетной.

Поэтому ключевым параметром, по которому следует сравнивать экономичность транспондеров разных производителей, является величина требуемого отношения сигнал/шум оптического сигнала (требуемый OSNR), обеспечивающего работу систем связи с заданным качеством.

Мукспондеры с канальной скоростью 40 Гбит/с

Среди множества форматов модуляции с прямым детектированием наиболее перспективными для систем связи с канальной скоростью 40 Гбит/с являются дифференциальные двух- и четырехуровневые фазовые (DPSK и DQPSK).

По величине требуемого OSNR системы, использующие формат NRZ ADPSK, превосходят системы на основе формата DQPSK. Требуемый для обеспечения BER на уровне 10^{-3} OSNR при использовании NRZ ADPSK на 1,5 дБ меньше, чем при использовании DQPSK-формата. Кроме того, реализация DQPSK-формата значительно сложнее, чем формата ADPSK. Отмечена более сильная подверженность этого формата нелинейным искажениям и чувствительность к помехам от соседних каналов при совместной работе с амплитудными 10-гигабитными форматами. Ввиду указанных недостатков, приводящих к более высокой стоимости систем связи на основе формата DQPSK в сравнении с форматом NRZ ADPSK, формат DQPSK в 40-гигабитных системах связи используется редко.

Возможность использования формата NRZ ADPSK в DWDM-системах с межканальным расстоянием 50 ГГц была экспериментально продемонстрирована на модельной линии связи длиной 2000 км. Проведенные исследования показали надежность работы систем связи NRZ ADPSK с канальной скоростью 40 Гбит/с в условиях, близких к условиям работы коммерческих систем с разнородными каналами (со скоростями 40, 10 и 2,5 Гбит/с).

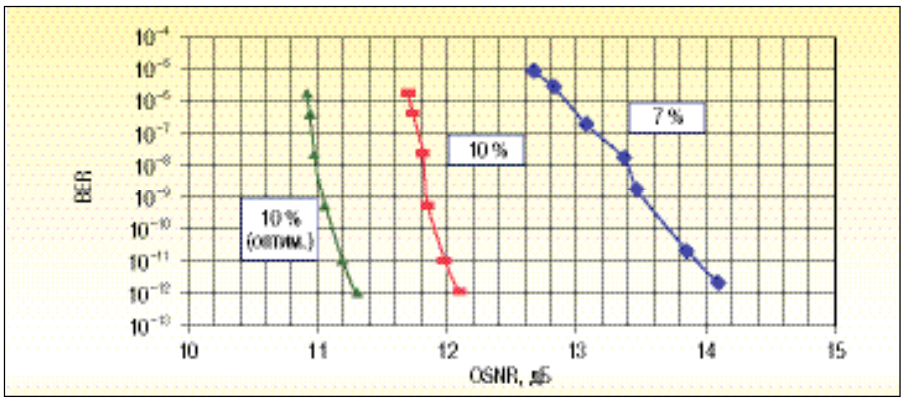

Рис. 1. Зависимости от OSNR коэффициента ошибок BER адаптивного NRZ DPSK агрегирующего транспондера при использовании трех различных кодов, корректирующих ошибки

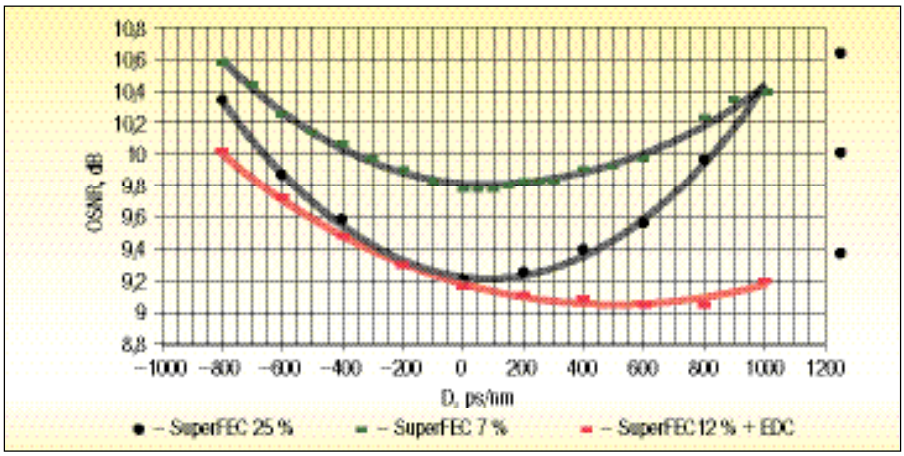

Рис. 2. Зависимости от остаточной дисперсии линии требуемого OSNR сдвоенного транспондера 10 Гбит/с с автоматической компенсацией дисперсии

В течение 2011 г. специалистами Т8 проводились широкие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на улучшение характеристик адаптивного NRZ DPSK агрегирующего транспондера со скоростью 40 Гбит/с.

При оптимизации характеристик транспондера и использовании систем автоматической подстройки параметров приемника по нескольким их видам были достигнуты рекордные для систем связи со скоростью 40 Гбит/с значения: величина требуемого OSNR — 11,5 дБ; низкая чувствительность к нелинейным искажениям — дальность работы до 6000 км (при длине участков 100 км).

Суммарная пропускная способность DWDM-систем связи на основе адаптивного NRZ DPSK 40G агрегирующего транспондера компании “Т8” в расширенном С-диапазоне достигает 3,5 Тбит/с.

Снижение требуемого OSNR

В оптических системах связи с канальной скоростью до 10 Гбит/с включительно используются преимущественно бинарные амплитудные форматы модуляции (ASK) ввиду простоты их реализации и экономичности. Кроме того, из-за нелинейных фазовых искажений технические преимущества фазовых форматов в таких системах проявляются значительно меньше, чем в системах 40 и 100 Гбит/с.

Проведенные в течение последних нескольких лет исследования показали, что для уменьшения требуемого OSNR могут быть использованы пять технологий [1]:

оптимизация порога принятия решений. Позволяет снизить требования к принимаемому сигналу на 0,5 — 2 дБ (по величине OSNR);

применение нового поколения (FEC). Позволяет получить выигрыш в требуемом OSNR до 10 дБ;

оптимизация параметров оптического сигнала. В разных условиях работы позволяет получить выигрыш в величине требуемого OSNR до 3 дБ;

использование автоматической компенсации хроматической дисперсии;

использование приемников с несколькими уровнями сравнения и алгоритмов “мягкой” коррекции ошибок (soft FEC). Ожидаемый выигрыш — до 1,5 дБ.

Реализация четырех первых технологий в новом поколении транспондеров компании “Т8” обеспечила достижение в них рекордного значения требуемого OSNR — 9,0 дБ и возможность работы при достаточно большой величине остаточной хроматической дисперсии (величина допустимой дисперсии при штрафе 1 дБ составляет 1300 пс/нм).

Зачем нужны транспондеры 10 Гбит/с со сверхнизким значением требуемого OSNR и малой чувствительностью к хроматической дисперсии?

Во-первых, их использование обеспечивает повышение надежности, снижение энергопотребления и увеличение срока службы всех систем связи со скоростью 10 Гбит/с за счет уменьшения мощности оптических сигналов.

Во-вторых, разработанными 10 Гбит/с транспондерами можно оснастить старые линии с “плохим” волокном, которые в настоящее время используют системы DWDM 2,5 Гбит/с и в которых традиционные системы связи 10 Гбит/с неприменимы.

В-третьих, при проектировании новых систем связи можно увеличить длину усилительных участков в многопролетных линиях связи до 110 — 120 км.

В-четвертых, длину однопролетных линий связи с использованием транспондеров нового поколения можно увеличить примерно до 350 км без применения промежуточных удаленных усилителей и до 450 — 500 км с рамановскими и эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой.

Линии связи с большими пролетами (300 — 500 км) особенно актуальны для регионов с тяжелыми климатическими условиями и малой плотностью населения.

Выводы

Новое поколение отечественных систем связи DWDM характеризуется рекордно низким значением требуемого OSNR, что позволяет наиболее эффективно осуществлять техническое развитие российских сетей связи на всех уровнях и во всем диапазоне скоростей передачи информации.

В опорных сетях дальней связи на отечественном оборудовании можно осуществлять экономичную модернизацию действующих 40- и 80-канальных DWDM-систем связи. При постепенной замене оборудования с канальной скоростью 10 Гбит/с более скоростным 40-гигабитным оборудованием суммарная пропускная способность одного волоконного соединения может быть доведена до 3,5 Тбит/с при дальности работы систем связи без регенерации до 6000 км.

В труднодоступных районах России, в тяжелых климатических условиях использование транспондеров со скоростью 10 Гбит/с с рекордно малым значением требуемого OSNR (9,2 дБ) позволяет создавать сети связи с необслуживаемыми участками длиной до 450 — 500 км. В действующих сетях связи новое поколение транспондеров 10 Гбит/с дает возможность увеличить дальность безрегенерационной передачи и снизить энергопотребление, а значит и эксплуатационные расходы операторов связи.