

РАЗРАБОТКА DWDM-СИСТЕМЫ ЁМКОСТЬЮ 25 ТБИТ/С



ТРЕЩИКОВ В.Н.
Генеральный директор
ООО «Т8», к.ф.-м.н.

Приведено описание разрабатываемой компанией «Т8» DWDM-системы с ёмкостью (суммарной скоростью) 25 Тбит/с. Система основана на передаче в спектральных C+L диапазонах 250 каналов скоростью 100 Гбит/с и плотностью расположения каналов 33 ГГц. Используемый четырёхуровневый фазовый формат модуляции с поляризационным мультиплексированием (формат DP-QPSK) обеспечивает сочетание высокой спектральной и энергетической эффективности. Тем самым обеспечивается максимальная производительность системы связи (произведение дальности на суммарную скорость передачи информации).

Для обеспечения скорости 25 Тбит/с шаг DWDM сетки следует уменьшить до 37,5 ГГц или 33,3 ГГц.

ВВЕДЕНИЕ

Экономически наиболее перспективно постепенное увеличение канальных скоростей в действующих DWDM-системах связи. Компанией «Т8» разработана линейка транспондеров (см. рис. 1) [1] со скоростями 2,5/10/40 и 100 Гбит/с, позволяющая решить задачу увеличения скорости передачи действующих систем связи в C-диапазоне с 0,22 Тбит/с до 8,8 Тбит/с.

Разработка такого оборудования ведётся компанией «Т8». Ключевыми компонентами проектируемого оборудования являются транспондер TS-100E и агрегирующий транспондер MS-100E-T10 (оба на скорость в линии 100 Гбит/с), серийно производимые компанией [1].

Благодаря использованию формата DP-QPSK и коррекции ошибок на основе алгоритмов мягкого принятия решений SoftFEC с избыточностью 20 % достигнуто рекордно низкое значение требуемого OSNR в транспондерах 100 Гбит/с, равное 12,5 дБ. Максимальное значение накопленной дисперсии составляет 70000 пс/нм.



Рис. 1. Линейка разработанных транспондеров

Максимальная ёмкость 88-канальной DWDM системы на основе транспондера TS-100E составляет 8,8 Тбит/с (C-диапазон с полосой 4,4 ТГц), спектральная эффективность 2 бит/с/Гц) [2, 3].

С использованием разработанного оборудования установлены 2 мировых рекорда дальности передачи информации:

1. осуществлена передача 100G на 4000 км в 80-канальной DWDM системе в многопролётной линии виази. Запас по OSNR составил 8 дБ, что позволяет увеличить линию до 8000 км [4, 5];

2. осуществлена передача сигнала с канальной скоростью 100 Гбит/с на 500 км в однопролётной линии [6, 7].

Параметры разработанных транспондеров 100G позволяют обеспечить скорость передачи 8,8 Тбит/с в C-диапазоне при использовании стандартной сетки 50 ГГц. При использовании C+L — диапазона скорость передачи в сетке 50 ГГц может быть увеличена до 18 Тбит/с. Для доведения ёмкости до 25 Тбит/с необходимо уменьшить сетку примерно в 1,5 раза.

В статье приведена архитектура и требования к компонентам разрабатываемой компанией «Т8» DWDM-системы ёмкостью 25 Тбит/с.

АРХИТЕКТУРА РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ DWDM СИСТЕМЫ ЁМКОСТЬЮ 25 ТБИТ/С

Архитектура разрабатываемой системы с ёмкостью 25 Тбит/с на одно волоконное соединение приведена на рис. 2. Техническое решение основано на использовании 250 информационных каналов со скоростью 100 Гбит/с каждый в формате DP-QPSK [8]. Для облегчения управляемости системой каждые десять каналов объединены в суперканалы, скорость передачи информации по каждому суперканалу составляет 1 Тбит/с. Всего используется 25 суперканалов.

Возможны два варианта реализации системы, отличающиеся расстоянием между DWDM каналами (сеткой частот):

- расстояние между каналами 50 ГГц (0,4 нм), используются гибридные EDFA усилители в C и L+UL диапазонах с расширением полосы рамановскими усилителями; полная ширина спектра усиления — более 100 нм;
- расстояние между каналами 33 ГГц (0,26 нм), полная ширина спектра усиления — более 70 нм, предполагается использование C и L EDFA и/или гибридных EDFA –рамановских усилителей.

Каждое из решений имеет определённые преимущества и недостатки.

Первое решение основано на использовании стандартизированной DWDM сетки с шагом 50 ГГц. Для такой сетки промышленно выпускаются и коммерчески доступны пассивные оптические компоненты: мультиплексоры, демультимплексоры, полосовые фильтры, мультиплексоры ввода/вывода, в том числе перестраиваемые.

Однако в настоящее время не выпускаются активные компоненты транспондеров — передатчики и приёмники, предназна-

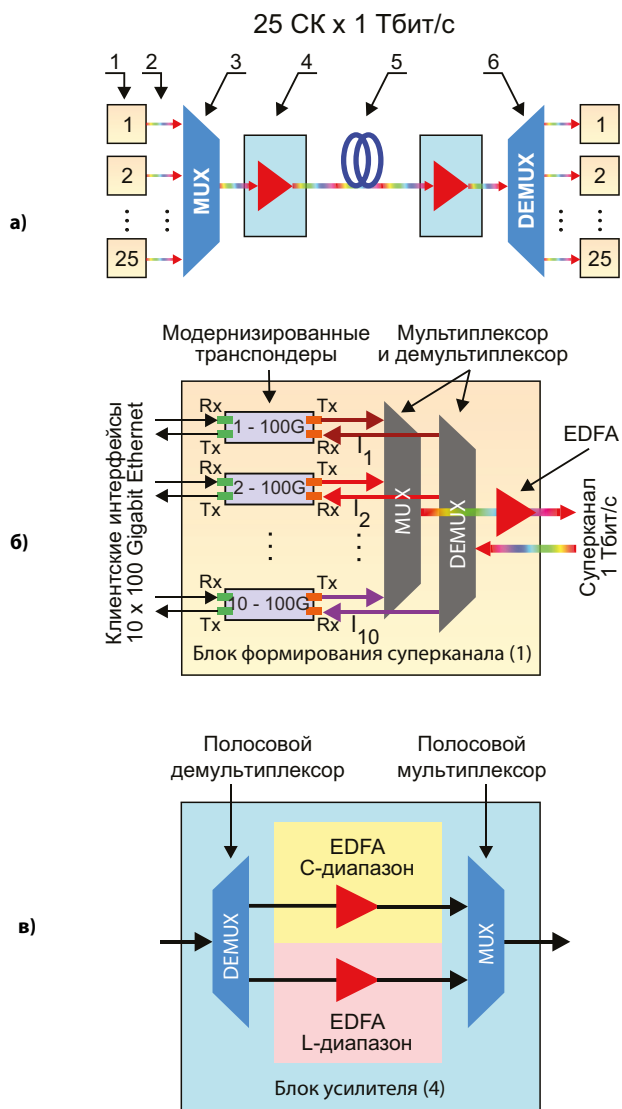


Рис. 2.
а) Архитектура системы связи 25 Тбит/с (показано только одно направление):
 1 — блоки формирования суперканала,
 2 — суперканалы 1 Тбит/с,
 3 — мультиплексор,
 4 — блок усилителя,
 5 — волокно,
 6 — демультиплексор;
б) Блок формирования суперканала;
в) Блок усилителя (показано только одно направление).

ченные для работы в L-диапазоне спектра. Также не выпускаются усилители с полосой более 100 нм (C+L+UL диапазон). Такие усилители необходимы для одновременного усиления 250 передаваемых по линии связи DWDM-каналов. Создание усилителя с полосой усиления более 100 нм — трудная задача, требующая проведения научных исследований для выбора оптимального технического решения и проверки выбранного решения на прототипе.

Для реализации второго решения требуются усилители с полосой 70 нм. Хотя такие усилители тоже не выпускаются промышленно, их создание — существенно более простая задача, чем усилителей с полосой 100 нм.

Однако для реализации второго решения необходима разработка специализированного активного и пассивного оборудования. Требуемое оборудование должно быть способно работать с нестандартной DWDM-сеткой 33 ГГц. Кроме того, необходима разработка методов управления спектральными характеристиками оптических сигналов в каждом канале. Для уменьшения пере-

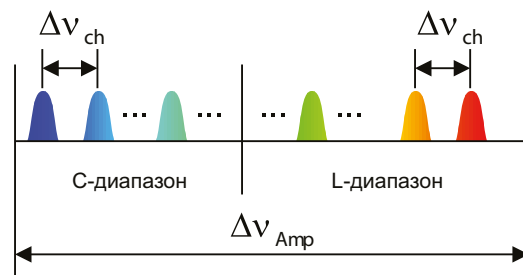


Рис. 3. Расстояние между каналами и требуемая полоса усиления усилителей. При расстоянии = 33 ГГц (0,26 нм) и числе каналов 250 необходимо использовать C и L диапазоны эрбиевого усилителя EDFA (полоса более 70 нм)

крёстных помех спектр каждого канала должен быть близок к прямоугольному.

Рис. 3. показывает взаимосвязь между расстоянием между каналами и требуемой полосой усиления усилителей.

Для реализации проекта выбрано второе из обозначенных выше решений. Его реализация потребует создания следующих ключевых компонентов:

- транспондеры (мультиплексоры) для передачи 100 Гбит/с в DWDM канале на базе формата DP-QPSK с возможностью перестройки лазера с шагом 33 ГГц и возможностью работы в C и L диапазонах, в т.ч. разработка оптического модуля для работы в L диапазоне;
- технология формирования оптических сигналов с близким к прямоугольному спектром излучения для сверхплотного расположения DWDM каналов (технология Найквист WDM);
- гибридные оптические усилители с шириной спектра до 70 нм и оптические усилители с поддержкой C+L диапазона с шириной спектра более 100 нм.

ТРАНСПОНДЕР 100 ГБИТ/С DP-QPSK С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПЕРЕСТРОЙКИ ЛАЗЕРА С ШАГОМ 33 ГГц И ВОЗМОЖНОСТЬЮ РАБОТЫ В C И L ДИАПАЗОНАХ

Транспондер принимает со стороны клиента информационный поток в формате 100 Gigabit Ethernet (100 GE) в виде 10 согласованных оптических или электрических потоков по 10 Гбит/с. С помощью клиентских приёмо-передатчиков CFP сигналы декодируются, восстанавливаются и в виде 10 потоков по 10 Гбит/с подаются на DSP Framer, который осуществляет цифровую обработку, включающую в себя преобразование (изменение) формата представления сигнала, создание пакетов в формате OTN, в некоторых вариантах вносит необходимую для кодирования с исправлением ошибок дополнительную информацию.

Информационный поток в формате OTN, состоящий из 10 согласованных потоков электрических сигналов по 10 Гбит/с, поступает на микросхему цифровой обработки и преобразования сигнала (DSP-LSI). В DSP-LSI производится преобразование 10x10 Гбит/с сигналов в 4 согласованных потока по 25 Гбит/с, затем осуществляется избыточное кодирование, предназначенное для последующего исправления ошибок на стороне приёмника). В результате кодирования скорость каждого из 4 согласованных потоков увеличивается до 32 Гбит/с. После этого в микросхеме DSP-LSI производится кодирование для реализации формата DP-QPSK. Затем четыре сигнала по 32 Гбит/с микросхемой MUX преобразуются в 4 высокочастотных аналоговых сигнала (полоса более 30 ГГц), которые поступают на входы высокоскоростных усилителей (RF Driver), где сигнал усиливается до требуемой амплитуды и подаётся на модулятор DP-QPSK интегрированного когерентного оптического передатчика (ICT).

Сигнал с выхода передатчика DP-QPSK после мультиплексирования и усиления и вводится в волоконно-оптическую линию связи. Структура оптического сигнала в формате DP-QPSK приведена на рис. 4.

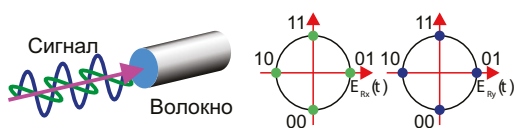


Рис. 4. Структура оптического сигнала в формате DP-QPSK

Сигнал, прошедший через волоконно-оптическую линию связи, поступает на приёмник DP-QPSK. В интегрированном оптическом приёмнике ICR входной сигнал делится поляризационным делителем PBS, и компоненты с ортогональными поляризациями подаются на два смесителя со сдвигом фазы 90 градусов (90-deg hybrid). На эти же смесители подаётся опорное излучение от лазера. На смесителях 90-deg hybrid происходит оптическое смешение поляризованных компонент сигнала с опорным излучением. Причём каждая из поляризованных компонент делится на две части. Одна компонента смешивается с опорным излучением без сдвига фазы, а вторая часть — смешивается с опорным излучением, сдвинутым по фазе на 90 градусов. Каждый из четырёх смешанных сигналов детектируется дифференциальным приёмником и подаётся на трансимпедансный усилитель. С выхода трансимпедансных усилителей LCR четыре высокочастотных аналоговых электрических сигнала (полоса более 30 ГГц) поступают на микросхему цифровой обработки и преобразования сигнала (DSP-LSI).

В микросхеме DSP-LSI входящие 4 аналоговых сигнала оцифровываются с использованием 8-битовых АЦП с тактовой частотой 60 гигабайт в секунду. Затем сформированные 4 потока выравниваются в цифровом процессоре (DSP) в режиме реального времени. DSP осуществляет синхронизацию, компенсацию хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии и исправление ошибок с применением исправляющего кода SoftFEC с избыточностью 15% (LDPC код). Используемый в разрабатываемом устройстве алгоритм обработки обеспечивает электронную компенсацию хроматической дисперсии до 70000 пс/нм. После компенсации искажений и LDPC-обработки сигнала формируется 4 потока по 25 Гбит/с, которые преобразуются в 10 по 10 Гбит/с потоков OTN.

Далее сигналы (10x10 Гбит/с) попадают на DSP Framer, где из OTN контейнера извлекается клиентский сигнал. С использованием информации о скорости клиентского сигнала она восстанавливается. В результате формируется клиентский поток, который передаётся клиенту через CFP.

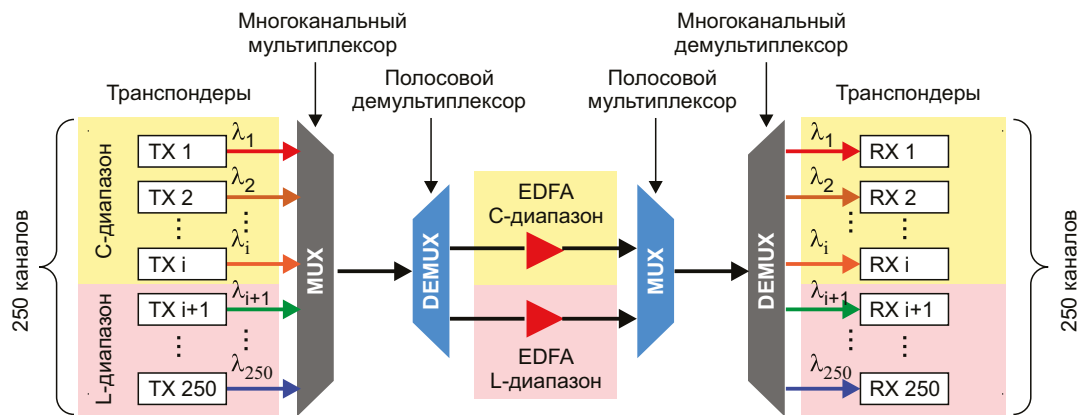


Рис. 5. Структура DWDM системы связи с емкостью 25 Тбит/с

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ 100G DP-QPSK С ШАГОМ 33 ГГц И ВОЗМОЖНОСТИ РАБОТЫ В С-ДИАПОЗОНЕ

С точки зрения технической реализуемости и экономичности наиболее перспективным вариантом создания систем связи со скоростью 20–30 Тбит/с является DWDM система связи, использующая 250 каналов в С и L диапазонах, формат модуляции DP-QPSK с канальной скоростью 100 Гбит/с и плотностью расположения каналов 33 ГГц.

Для реализации такой DWDM системы связи со скоростью 25 Тбит/с требуется разработка активных компонентов, работающих в L-диапазоне (см. рис. 5). Для реализации заложенных в проекте решений требуется разработка оптического модуля, обладающего рядом необходимых функций и технических характеристик, которых в полном объёме нет в разработанных другими компаниями оптических модулях. В частности, к таким функциональным возможностям относятся следующие:

- возможность работы в L-диапазоне;
- поддержка DWDM сетки 33 ГГц;
- электронное управление спектром излучения каналов.

В разрабатываемом оптическом модуле нами предусмотрено использование задающих и опорных лазеров, длина волны излучения которых перестраивается с шагом 33 ГГц как в С, так и в L-диапазонах. Для создания усилителей с полосой усиления более 70 нм предусмотрено использование двухканальных усилителей с полосовым демультиплексором и мультиплексором, схема которого показана в центральной части рис. 5.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ СПЕКТРА DP-QPSK СИГНАЛА С КАНАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ 100 ГБИТ/С

Для уменьшения перекрёстных помех от соседних каналов при сверхплотном расположении каналов необходимо сформировать спектр сигналов, близкий к прямоугольному. Для этого предполагается использование двух технологий:

- 1) жёсткая оптическая фильтрация с применением фильтров, имеющих прямоугольный спектр пропускания и
- 2) использование электронных методов управления спектром сигнала.

Наибольший эффект должно дать сочетание обоих методов. Механизм действия жёсткой фильтрации довольно прост: если сигнал с широким спектром от передающего устройства проходит через фильтр с прямоугольным спектром, то спектр выходного сигнала будет иметь крутые боковые границы. Однако центральная часть спектра при фильтрации обычных сигналов оказывается неравномерной. Исправить ситуацию может использование специальных согласованных со спектром передатчика фильтров. Идея согласованного фильтра состоит в том, что исправить неравномерность спектра в центральной части позволяет использование фильтра с увеличенными потерями в центральной части полосы пропускания и максимальным пропусканием вблизи краев полосы пропускания.

УПРАВЛЕНИЕ СЕТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРАБИТНЫХ СУПЕРКАНАЛОВ

В системе связи с суммарной ёмкостью 25 Тбит/с при использовании формата 100 Гбит/с DP QPSK необходимо одновременно передавать 250 DWDM каналов. Однако возрастание числа DWDM каналов до нескольких сот существенно усложняют управление сетью.

Оптимальным решением, позволяющим сохранить дальность передачи и увеличить эффективность управлению сетью является использование множества несущих в одном объединённом канале, который принято называть суперканалом. Несущие частоты, относящиеся к одному каналу, принято называть поднесущими частотами, рис. 6. Поскольку наибольшей производительностью обладают системы связи на основе формата DP-QPSK, то именно его целесообразно использовать в сочетании с одной из технологий передачи информации на многих поднесущих: OFDM, OWDM или Nyquist WDM.

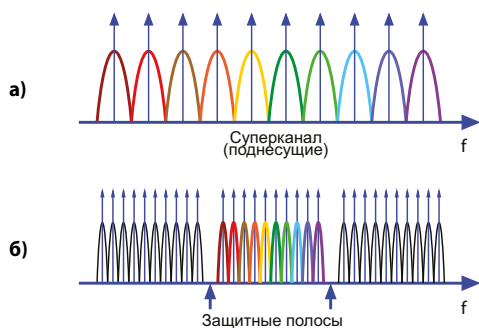


Рис. 6. Спектр DWDM сигнала, состоящего из терабитных суперканалов, содержащих по 10 поднесущих в формате DP-QPSK: (а) — спектр одного суперканала, (б) — спектр DWDM сигнала в рабочем диапазоне спектра. Суперканалы разделены некоторой неиспользуемой (защитной) спектральной полосой, необходимой при работе с оптическими маршрутизаторами ROADM и WSS, которые маршрутизируют и переключают их как единое целое

Суперканал — это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов, несущие частоты которых обычно называют оптическими поднесущими. Предполагается, что суперканал при прохождении по оптической сети будет управляться оптическими маршрутизаторами и коммутаторами как единое целое и его суммарная скорость передачи информации будет в терабитном диапазоне. Например, терабитный суперканал может быть образован 10 поднесущими, каждая из которых передает сигнал со скоростью 100 Гбит/с в формате DP-QPSK. Таким образом, эта технология будет способна поддерживать будущий стандарт Terabit Ethernet.

В работе [9] исследованы характеристики передачи терабитного суперканала, образованного 10 поднесущими (10x100 Гбит/с) DP-QPSK. При расстоянии по частоте между поднесущими 27,5 ГГц ($SE = 3,6$) дальность передачи по стандартному волокну составила 2226 км, а при расстоянии 30 ГГц — 2600 км ($SE = 3,3$).

Увеличение канальной скорости при сохранении одной несущей наталкивается на проблему резкого уменьшения дальности передачи без регенерации. Необходимость строительства дополнительных усилительных пунктов приводит к удорожанию систем связи.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ФОРМАТОВ МОДУЛЯЦИИ

Увеличение ёмкости систем связи удовлетворяется за счёт роста канальной скорости передачи информации и спектральной эффективности использования рабочих спектральных областей. Скорость передачи символов ограничивается физическими факторами на уровне около 50 Гбод. Поэтому для увеличения канальной скорости передачи информации

Формат модуляции	DP-DPSK	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-32QAM	DP-64QAM
бит/символ	2x1	2x2	2x3	2x4	2x5	2x6
Сигнальное созвездие						
Штраф по OSNR, дБ	0	0	2	4	6	8,5

Таблица 1. Уменьшение энергетической эффективности (штраф по OSNR) многоуровневых форматов модуляции относительно формата DP-DPSK. Штраф равен 0 только для формата DP-QPSK

до 100 Гбит/с, а тем более до 400 Гбит/с, надо использовать многоуровневые форматы модуляции с информационной ёмкостью более 2 бит/символ.

Когерентные системы связи позволяют реализовывать любые многоуровневые форматы модуляции, обеспечивая увеличение скорости передачи информации в несколько раз в зависимости от ёмкости формата.

В частности, формат DP-QPSK, обладающая ёмкостью 4 бит/символ, обеспечивает спектральную эффективность 2 бит/Гц при расстоянии между соседними каналами 50 ГГц и канальной скорости 100 Гбит/с. В лабораторных экспериментах спектральная эффективность формата DP-QPSK доведена до 3–4 [10, 11]. Это теоретически позволяет увеличить общую ёмкость системы до 25 Тбит/с на одно волокно при использовании полосы 8,4–6,25 ТГц (50–66,4 нм) соответственно.

Альтернативным решением увеличения производительности DWDM-системы является использование многоуровневой nQAM модуляции и соответствующее увеличение канальной скорости (200 и 400 Гбит/с). Однако главный недостаток многоуровневой nQAM модуляции — уменьшение дальности передачи из-за энергетического штрафа (см. табл. 1), уменьшение расстояния между регенераторами и усилителями и необходимость замены кабельной инфраструктуры оптических сетей операторов связи. Как показано в работах [12, 13] даже при строительстве абсолютно новых сетей связи решение на основе формата DP-QPSK является более экономически эффективным, чем технические решения на основе nQAM модуляции.

Из табл. 1 видно, что с увеличением числа символов расстояние между ними в евклидовом пространстве быстро сокращается. К сожалению, это приводит к значительному ухудшению энергетической эффективности формата, т.е. возрастает чувствительность к шумам и требуемый OSNR (табл. 2).

Рис. 3 наглядно иллюстрирует резкое снижение дальности передачи в си-

стемах связи на основе многоуровневых форматов модуляции при n больше 4. На этом рисунке показана зависимость максимальной дальности (достигнутой экспериментально) от спектральной эффективности при использовании различных форматов модуляции: DP-QPSK, 16QAM и 32QAM. Закрашенные и пустые символы соответствуют каналам с одной несущей и со многими несущими. Несмотря на использование волокна с малыми потерями с низкой нелинейностью дальность передачи сигналов со спектральной эффективностью больше 4 бит/с/Гц оказалась очень малой из-за высокой подверженности линейным и нелинейным искажениям форматов модуляции nQAM при n больше 4. Среднее значение произведения спектральной эффективности на дальность (назовем её производительностью PR) примерно равно 5000 км·бит/с/Гц для DP-nQAM форматов и PR примерно равно 27000 км·бит/с/Гц для DP-QPSK. Это неоспоримо свидетельствует о том, что производительность систем на основе DP-QPSK более чем в 5 раз выше, чем производительность систем на основе DP-nQAM. Поэтому использование 100 Гбит/с DP-QPSK с плотной спектральной сеткой (33,3 или 25 ГГц) является лучшим выбором для создания систем связи с суммарной скоростью 25 Тбит/с. Поскольку при использовании сетки 33,3 ГГц не требуется применение сложных алгоритмов многосимвольной обработки (MAP или MLSE), то DWDM системы связи с форматом модуляции 100 Гбит/с DP-QPSK, имеющие суммарную ёмкость порядка 12–15 Тбит/с, могут быть реализованы на основе коммерчески доступных компонентов с использованием только C-диапазона.

Как следует из рис. 7, дальность безрегенерационной передачи информации с использованием форматов модуляции nQAM с n большим 4 ограничена величиной порядка 500 км. Использо-

Формат модуляции	DP-QPSK	DP-QPSK	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-32QAM	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-32QAM
Скорость передачи, Гбит/с	100	100	200				400			
Бит/символ	4	4	4	6	8	10	4	6	8	10
Межканальный интервал, ГГц	50	33,7	100	50	50	50	200	150	100	100
SE, бит/с/Гц	2	3	2	4	4	4	2	2,7	4	4
Количество каналов в C-диапазоне (в C+L диапазоне)	88	130 (250)	44	88	88	88	22	30	44	44
Полная емкость, Тбит/с	8,8	13 (25)	8,8	17,6	17,6	17,6	8,8	12,0	17,6	17,6
Требуемый OSNR, дБ	12,2	14,2-15,2	15,2	17,2	19,2	21,2	18,2	20,2	22,2	24,2
Штраф по отношению к 100G	0	2-3	3	5	7	9	6	8	10	12

Таблица 2. Обзор вариантов увеличения пропускной способности DWDM-систем на основе различных форматов модуляции [10, 14]

ние же регенерационных пунктов экономически нецелесообразно. Таким образом, наиболее целесообразна разработка систем с форматом модуляции DP-QPSK. Спектральная эффективность систем связи на основе DP-QPSK может быть доведена до 3 бит/с/Гц и более. При такой спектральной эффективности можно создать систему связи с суммарной скоростью 25 Тбит/с, работающую в диапазоне 1540–1610 нм (C+L диапазоны).

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ

Помимо увеличения канальной скорости и числа каналов в волокне ещё одним направлением увеличения пропускной способности DWDM систем является использование многосерцевидных волокон (технология пространственного мультиплексирования). Технические возможности производства твёрдотельных и дырчатых многосерцевидных волокон (МСФ) были продемонстрированы в нескольких работах [15, 16], однако производство МСФ в коммерческих масштабах отсутствует.

Главный недостаток пространственного мультиплексирования — отсутствие коммерчески доступных пассивных компонентов, оптических кабелей и усилителей.

Следует подчеркнуть, что данная технология может работать совместно с разрабатываемой «Т8» технологией. Использование многосерцевидных волокон

позволиткратно увеличить скорость передачи информации в DWDM системе без необходимости доработки оборудования, которое будет разработано в ходе проекта. Например, при использовании 8-серцевидных волокон скорость передачи на оборудовании DWDM системы, разработанной «Т8», составит $25 \times 8 = 200$ Тбит/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемая компанией «Т8» DWDM-система на основе модифицированного транспондера TS-100E и модифицированного агрегирующего транспондера MS-100E-T10 является оптимальным техническим решением для достижения ёмкости систем связи 25 Тбит/с. Решение, основанное на использовании формата DP-QPSK, обеспечивает максимальную дальность передачи при достижимой спектральной эффективности 3–4 бит/с/Гц. Столь высокая эффективность обеспечивает возможность расположения 250 каналов по 100 Гбит/с в C+L диапазоне с суммарной спектральной шириной 70 нм. Для повышения эффективности управления каналами предполагается объединить их в 25 терабитных суперканалов. Каждый суперканал состоит из 10 плотно расположенных каналов 100 Гбит/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. DWDM системы, каталог компании Т8, 2013, с.31.
2. Трещиков В. Н. Развитие отечественных DWDM систем: от 10 и 40 Гбит/с к 100 Гбит/с. Доклад на конференции Инфоком 2012, Гипросвязь, 27.02.2012.
3. Гуркин Н. В., Наний О. Е., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с. Вестник связи. 2013. № 1, с.39., № 2, с.40.
4. Гуркин Н. В., Наний О. Е., Новиков А. Г., Трещиков В. Н. Передача DWDM-сигнала. Вестник связи. 2012. № 8, с.25.
5. Гуркин Н. В., Наний О. Е., Новиков А. Г., Плак-

6. син С. О., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Нелинейный интерференционный шум в 100 Гбит/с DP-QPSK системах связи. Квантовая электроника. 2013. В печати.
7. T8 and Corning Demonstrated a 100G Unrepeated Transmission over 500 km Using Corning's Ultra-Low-Loss Optical Fiber (with ROPA). Corning, News Releases,
8. http://www.corning.com/opticalfiber/news_and_events/news_releases/2012/2012091701.aspx
9. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Record 500 km unrepeated 100 Gb/s transmission. Laser Phys. Lett, 2013. В печати.
10. Новиков А. Г., Трещиков В. Н., Плаксин С. О., Плоцкий А. Ю., Наний О. Е. Перспективные DWDM системы связи со скоростью 20 Тбит/с на соединение. Фотон-Экспресс, № 3 (99), апрель, с.34, (2012).
11. Gavioli G., et al. Investigation of the Impact of Ultra-Narrow Carrier Spacing on the Transmission of a 10-Carrier 1Tb/s Superchannel. Proc. of OFC, paper OThD3 (2010).
12. Renaudier J., et al, Nonlinear Tolerance of Ultra-Densely spaced 100Gb/s Coherent PDM-QPSK channels Proc. of ECOC, paper Mo2C3 (2010)
13. Cai J.— X., et al, 20 Tbit/s Capacity Transmission Over 6,860 km Proc. of OFC, paper PDPB4 (2011).
14. Гуркин Н. В., Наний О. Е., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с. Вестник связи. 2013. № 1, с.39., № 2, с.40.
15. Winzer P.J., Energy-efficient optical transport capacity scaling through spatial multiplexing. Photon. Technol. Lett., vol.23, p.851, (2011).
16. Lach E., Idler W. Modulation formats for 100G and beyond // Optical Fiber Technology 17 p.377, (2011).
17. Koshiba M. et al., Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle. IEICE, vol. 6, no.2, p.98 (2009).
18. Imamura K. et al., Multi-core holey fibers for the long-distance (>100 km) ultra large capacity transmission. OFC2009, OTuC3 (2009).

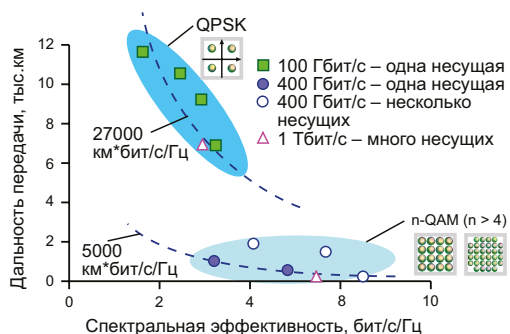


Рис. 7. Зависимости дальности передачи от спектральной эффективности для систем связи на основе формата DP-QPSK и на основе DP-nQAM [13]