ПЕРСПЕКТИВНЫЕ DWDM СИСТЕМЫ СВЯЗИ СО СКОРОСТЬЮ 20 ТБИТ/С НА СОЕДИНЕНИЕ

А. Г. НОВИКОВ, *инженер ООО «Т8»*

В. Н. ТРЕЩИКОВ, *генеральный директор ООО «Т8»*

С. О. ПЛАКСИН, *инженер ООО «Т8»*

А. Ю. ПЛОЦКИЙ, *инженер ООО «Т8»*

О. Е. НАНИЙ, *консультант компании ООО «Т8»*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ сетевого трафика в течение последних двух десятилетий указывает на продолжение его экспоненциального роста практически во всех регионах мира и на сетях всех уровней. Рост сетевого трафика вызывает постоянное увеличение спроса на пропускную способность DWDM систем дальней связи. По оценкам компаний RHK, McKinsey-JPMorgan, AT&T, MINTS и Arbor к 2020 году скорость передачи информации на одно соединение в опорных сетях наиболее развитых стран приблизится к 20 Тбит/с [1].

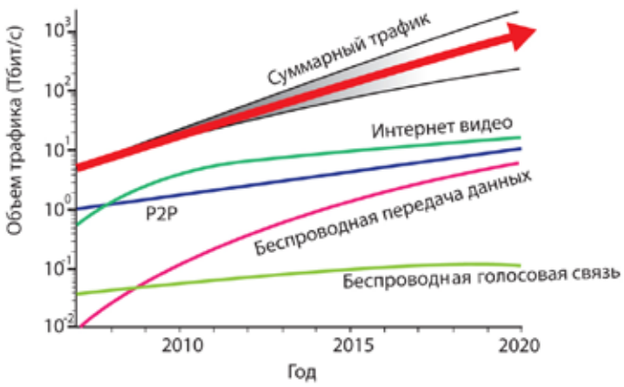

Рис. 1. Прогноз роста суммарного трафика в опорных сетях дальней связи США. По данным компаний RHK, McKinsey-JPMorgan, AT&T, MINTS, Arbor

Увеличение ёмкости систем связи удовлетворяется за счёт роста канальной скорости передачи информации и спектральной эффективности использования рабочих спектральных областей [2–10]. Скорость передачи символов ограничивается физическими факторами на уровне около 50 Гбод. Поэтому для увеличения канальной скорости передачи информации 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, обладая ёмкостью 4 бит/символ, обеспечивает спектральную эффективность 2 бит/Гц при расстоянии между соседними каналами 50 ГГц и канальной скорости 100 Гбит/с. Такое решение рассматривается в настоящее время как наиболее привлекательное для развития существующих сетей: оно позволяет десятикратно увеличить как канальную скорость (с 10 до 100 Гбит/с), так и общую ёмкость системы (с 0,8 до 8 Тбит/с). В лабораторных экспериментах спектральная эффективность формата DP-QPSK доведена до 3–4, что позволяет увеличить общую ёмкость системы до 20 Тбит/с.

Чтобы обеспечить дальнейший рост трафика и сохранить управляемость сетью, необходимо увеличение канальной скорости. Увеличить спектральную эффективность и канальную скорость когерентных систем связи с поляризационным мультиплексированием позволяет использование в них многоуровневых (М-уровневых) квадратурных форматов модуляции (QAM). Однако применение QAM форматов модуляции существенно уменьшает дальность передачи без регенерации [16,17]. Преодолеть ограничения QAM форматов в дальности передачи и ограничения электроники в символьной скорости передачи информации позволяет использование обобщённых каналов с множественными несущими частотами, реализовать которые можно с использованием различных технологий: ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) или ортогонального волнового мультиплексирования (OWDM).

В данной работе проведён анализ технологий, обеспечивающих достижение суммарной скорости 20 Тбит/с по одному волокну. На основе проведённого анализа сделан вывод о том, что наиболее экономически эффективный путь достижения скоростей порядка 10–20 Тбит/с на одно соединение в системах дальней связи — использовать 100–200 каналов со скоростью 100 Гбит/с в формате DP-QPSK. Для эффективного управления сетью на оптическом уровне каналы целесообразно объединять в 10–20 суперканалов ёмкостью 1 Тбит/с.

АНАЛИЗ ДОСТИЖИМОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЁМКОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ 100 ГБИТ/С DP-QPSK

Когерентное детектирование и формат DP-QPSK предоставили исключительно надёжную технологическую платформу для создания DWDM систем связи с канальной скоростью 100 Гбит/с полностью совместимых с современной 50 ГГц сеткой частот [1,2,5–11]. В этом формате каждая из двух ортогональных поляризаций (DP) используется для передачи независимых потоков информации. В каждом из этих двух потоков информация передаётся с использованием 4-уровневой фазовой модуляции (QPSK). В результате в каждом потоке передается по 2 бита на символ, всего 4 бит/символ (см. рис. 2).

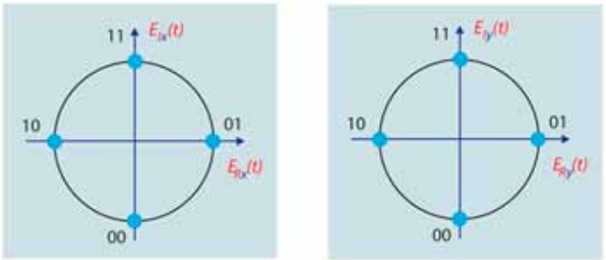

Рис. 2. Комплексная фазовая диаграмма сигнала в формате DP-QPSK. В каждом из двух ортогонально поляризованных потоков информация передаётся с использованием 4-уровневой фазовой модуляции (QPSK). В результате в каждом потоке передаётся по 2 бита на символ, всего 4 бит/символ

Прорыв в улучшении характеристик когерентных систем связи на основе DP-QPSK обеспечило использование цифровой обработки сигналов в когерентном приёмнике. Цифровая обработка сигналов выполняет функции синхронизации, фазовой диверсификации, а также декодирования цифровой информации и позволяет компенсировать линейные искажения, вызванные хроматической дисперсией, поляризационной модовой дисперсией (PMD) и оптической фильтрацией. Структура когерентного приёмника показана на рис. 3.

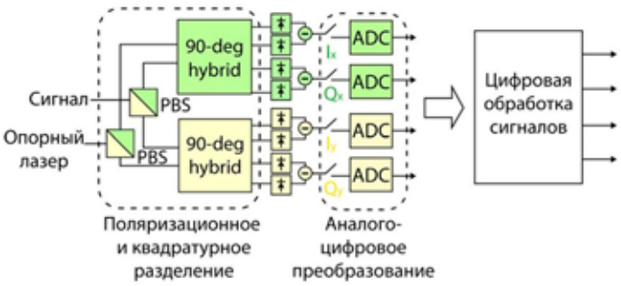

Рис. 3. Структура когерентного приёмника с поляризационной диверсификацией

Недавно в уникальных лабораторных экспериментах была продемонстрирована возможность передачи информации с суммарной скоростью порядка 10 Тбит/с на трансокеанские расстояния [8–11]. В работе [8] была осуществлена передача 96 каналов по 100 Гбит/с в формате DP-QPSK на расстояние 11680 км. Суммарная ёмкость системы составила 9,6 Тбит/с, а производительность системы, равная произведению ёмкости на дальность, равна 112 (Пбит/с) км. Разумеется, в этих уникальных экспериментах использовались самые современные волокна с ультранизким затуханием (0,17 дБ/км) и малым нелинейным коэффициентом. Однако и при использовании стандартного волокна G.952 дальность передачи превысила 4000 км.

Наибольшая дальность передачи достигнута при использовании стандартной (ITU) сетки с расстоянием 50 ГГц между каналами, спектральная эффективность в этом случае равна 2 бит/с/Гц. Значительные успехи достигнуты также в увеличении спектральной эффективности передачи сигналов 100 Гбит/с в формате DP QPSK. Спектральная эффективность 3 бит/с/Гц достигается при использовании частотной сетки с расстоянием 33,3 ГГц между каналами.

На рис. 4 показаны результаты эксперимента по передаче сигналов 100 Гбит/с в формате DP QPSK на расстояние 2400 км по стандартному волокну со спектральной эффективностью 2 и 3 бит/с/Гц, что соответствует спектральным расстояниям сетки 50 и 33 ГГц соответственно [6].

Эти результаты показывают, что при увеличении спектральной эффективности с 2 до 3 бит/с/Гц штраф в величине Q-фактора незначителен (примерно 1 дБ) для системы связи 100 Гбит/с в формате DP QPSK.

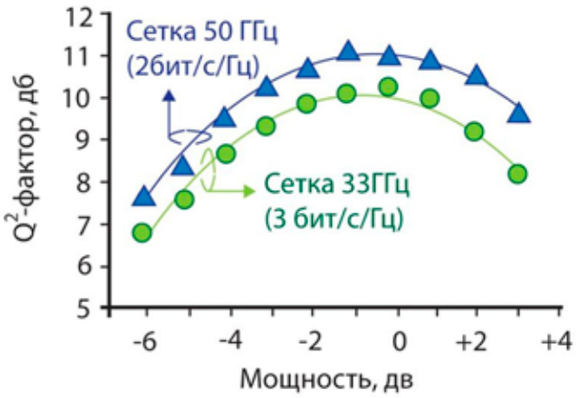

Рис. 4. Зависимость Q-фактора от мощности сигнала на выходе линии на основе стандартного волокна длиной 2400 км

Спектральная эффективность 3 бит/с/Гц не предельная для систем с канальной скоростью 100 Гбит/с на основе формата DP QPSK. В работе [10] осуществлена передача на расстояние почти 10 000 км со спектральной эффективностью 3,5 бит/с/Гц (при использовании специального волокна с малым затуханием и большой площадью моды). Максимальная спектральная эффективность 4 бит/с/Гц была достигнута в работе [7] при передаче 198 каналов формата DP QPSK по 100 Гбит/с в полосе 40 нм и межканальном расстоянии 25 ГГц. Суммарная скорость передачи информации составила 19,8 Тбит/с. В этом эксперименте использовался стандартный 7 % HD-FEC и специальные методы цифровой обработки сигнала MLHSE и MAP, для реализации которых пришлось использовать of lain режим. Результаты эксперимента иллюстрирует рис. 5.

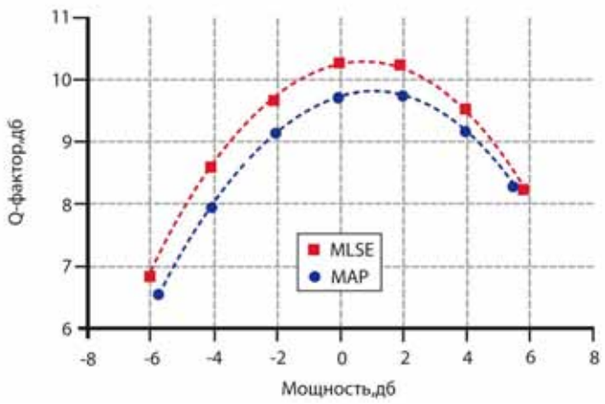

Рис. 5. Зависимости от входной мощности сигнала измеренного Q-фактора на выходе линии длиной 6850 км при передаче 198 каналов формата DP QPSK по 100 Гбит/с в полосе 40 нм и межканальном расстоянии 25 ГГц. Полная ёмкость линии 19,8 Тбит/с, спектральная эффективность SE 4 бит/с/Гц. Используется стандартный 7 % HD-FEC и специальные методы цифровой обработки сигнала MLHSE и MAP [7]

В таблице 1 приведены результаты экспериментов по передаче сигналов 100 Гбит/с DP QPSK с высокой спектральной эффективностью и большой суммарной скоростью.

Таблица 1.

Формат	Ско-сть, Гбит/с	SE, бит/с/Гц	Дальность, км	Суммарная скорость, Тбит/с	Частотный план, ГГц	Ссылка
DP QPSK	100	2,7	11680	9,6	37,5	8
DP QPSK	100	3	10608	9,6	33,3	10
DP QPSK	100	3,6	9360	9,6	28	11
DP QPSK	100	4	6850	19,8	25	7

В работе [8] получено рекордное значение произведения скорости передачи на дальность: 112 Пбит/с км с использованием только эрбиевых усилителей С-диапазона и без использования сложных алгоритмов обработки (MAP или MLSE). Ранее такую же производительность удавалось получить лишь при использовании С и L-диапазонов и рамановских усилителей.

В работе [8] улучшение характеристик достигнуто за счёт управления формой сигнальных импульсов. Для оптимизации сигнала использовалось формирование почти прямоугольного спектра каждого канала.

НАДО ЛИ УВЕЛИЧИВАТЬ КАНАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ?

Для увеличения канальной скорости более 100 Гбит/с и спектральной эффективности SE более 4 необходимо использовать многоуровневые (М-уровневые, М > 4) форматы модуляции совместно с поляризационным мультиплексированием и когерентным приёмом [5,12,13]. Однако использование форматов DP 16QAM, DP 32QAM и DP 64QAM уменьшает дальность передачи информации из-за увеличения чувствительности к шумам усиленного спонтанного излучения. В недавних экспериментах максимальная дальность передачи информации в формате DP 16QAM составила 1022 км [12], в то время как дальность передачи со скоростью 100 Гбит/с в формате DP-QPSK в аналогичных условиях превышает 4000 км.

Рис. 6 наглядно иллюстрирует резкое снижение дальности передачи в системах связи на основе многоуровневых форматов модуляции при М больше 4. На этом рисунке показана зависимость максимальной дальности (достигнутой экспериментально) от спектральной эффективности при использовании различных форматов модуляции: DP QPSK, QAM16 и QAM32. 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 n-QAM при n больше 4. Среднее значение произведения спектральной эффективности на дальность (назовем её производительностью PR) примерно равно 5000 км·бит/с/Гц для DP n-QAM 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 n-QAM. 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 10–20 Тбит/с. Поскольку при использовании сетки 33,3 ГГц не требуется применение сложных алгоритмов многосимвольной обработки (MAP или MLSE), то DWDM системы связи со 100 Гбит/с DP QPSK форматом модуляции и скоростью передачи информации порядка 12–15 Тбит/с могут быть реализованы на основе коммерчески доступных компонент с использованием только С-диапазона.

Для увеличения суммарной скорости передачи информации до 20 Тбит/с возможно несколько технических решений:

1. использование 100 Гбит/с DP QPSK со спектральной сеткой 33,3 ГГц и двух спектральных диапазонов (наиболее перспективно использование С и L диапазонов). Наиболее экономичное и быстро реализуемое решение, т. к. все компоненты для создания систем на его основе коммерчески доступны;
2. использование 100 Гбит/с DP QPSK со спектральной сеткой 25 ГГц и алгоритмов многосимвольной обработки. В настоящее время алгоритмы многосимвольной обработки для скорости 100 Гбит/с работают только в off line режиме. После появления экономичных модулей обработки (MAP или MLSE) по экономичности может конкурировать с первым решением;
3. использование 100 Гбит/с DP QPSK со стандартной сеткой 50 ГГц и пространственного мультиплексирования. Не реализуемо на существующей кабельной инфраструктуре (если нет свободных волокон). Разработки в области многосердцевинных волокон находятся пока в начальной стадии. Экономические оценки рискованы;
4. использование 100 Гбит/с DP n-QAM (n больше 4). Приводит к существенному сокращению дальности безрегенерационной передачи и затрат энергии на единицу передаваемой информации [14]. Кроме того, приёмники n-QAM тестировались пока в off line режиме. В конечном счёте такое решение оказывается заметно менее экономичным, чем первое или второе решение.

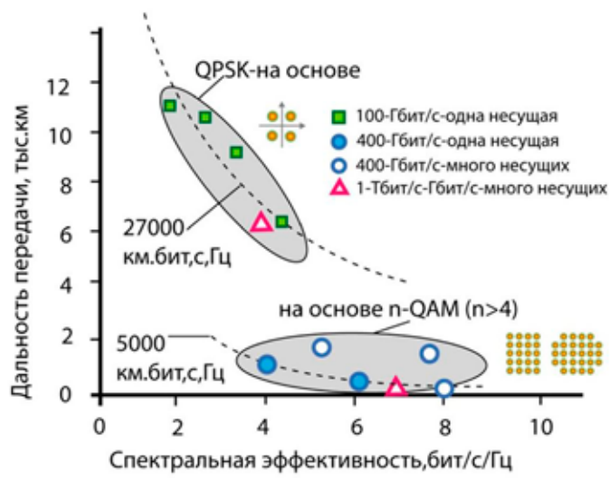

Рис. 6. Зависимости дальности передачи от спектральной эффективности для систем связи на основе формата DP QPSK и на основе DP n-QAM

КОНЦЕПЦИЯ ТЕРАБИТНЫХ СУПЕРКАНАЛОВ

Использование когерентного формата 100 Гбит/с DP QPSK со сверхплотным расположением каналов позволяет увеличить пропускную способность одного волоконного соединения до 12–16 Тбит/с при использовании стандартного С-диапазона. Использование расширенного С-диапазона или одновременное использование С и L диапазонов позволяют довести суммарную ёмкость до 20–30 Тбит/с.

Однако возрастание числа WDM каналов до нескольких сотен существенно усложняют управление сетью. Увеличение канальной скорости позволит уменьшить число каналов. Кроме того, канальные скорости 400 Гбит/с и даже 1 Тбит/с могут потребоваться в сетях с новым поколением Ethernet. Увеличение канальной скорости при сохранении одной несущей наталкивается на пробле-

му резкого уменьшения дальности передачи без регенерации. Необходимость строительства дополнительных усилительных пунктов приводит к удорожанию систем связи.

Оптимальным решением, позволяющим сохранить дальность передачи и увеличить канальную скорость, на наш взгляд, является использование множества несущих в одном объединённом канале, который принято называть суперканалом. Несущие частоты, относящиеся к одному каналу, принято называть поднесущими частотами. 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.

Суперканал — это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов, которые 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 передаёт сигнал со скоростью 100G 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) PM-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).

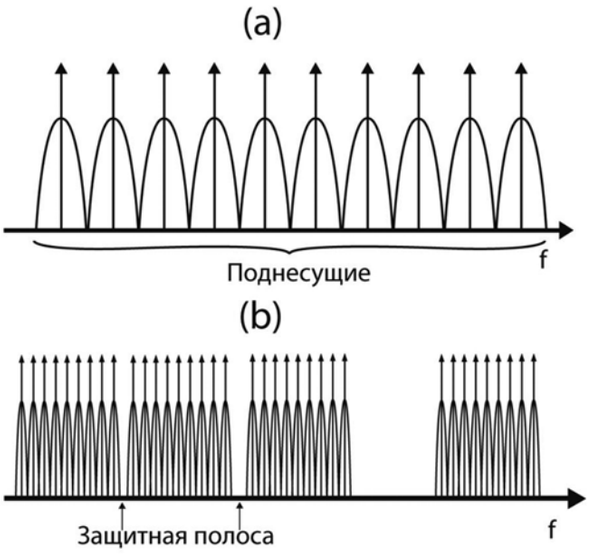

Рис. 7. Спектр DWDM сигнала, состоящего из терабитных суперканалов, содержащих по 10 поднесущих в формате DP QPSK: (a) — спектр одного суперканала, (b) — спектр DWDM сигнала в рабочем диапазоне спектра. Суперканалы разделены некоторой неиспользуемой (защитной) спектральной полосой, необходимой при работе с оптическими маршрутизаторами OADM и WSS, которые маршрутизируют и переключают их как единое целое

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшей готовностью для систем дальней связи со скоростью 20 Тбит/с обладает техническое решение, основанное на использовании 200 каналов со скоростью 100 Гбит/с в формате DP-QPSK в C+L диапазонах.

Для реализации данной системы могут быть использованы существующие технологии:

- транспондеры для передачи 100 Гбит/с в DWDM канале на базе формата DP-QPSK;
- оптические усилители с поддержкой C+Lдиапазона с суммарным спектральным диапазоном 80 нм;
- оптические мультиплексоры с шагом 33 ГГц (0,26 нм), применяемые для подводных линий связи.

Также может быть использована сетка 50 ГГц и расширенный диапазон C+L усилителей.

Использование многоуровневых форматов DP-16QAM, DP-32QAM и DP-64QAM увеличивает канальную скорость и спектральную эффективность передачи, что позволяет создать DWDM-систему связи с суммарной скоростью 20 Тбит/с в С-диапазоне. Однако такое решение уменьшает дальность передачи информации без регенерации из-за увеличения чувствительности к шумам усиленного спонтанного излучения.

Технология пространственного мультиплексирования с использованием многосердцевинных и многомодовых волокон может оказаться перспективной в будущем, но для её практической реализации необходимо преодолеть много технических проблем. Эту технологию целесообразно использовать в сочетании с транспондерами 100 Гбит/с DP-QPSK.

Терабитные суперканалы обеспечивают повышение эффективности управления сетями связи со скоростью 20 Тбит/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. White A., Hamaide J.-P. High-speed Optical Networks: Recent innovations and future challenges//Доклад на совместном семинаре МФТИ-Bell Labs, МФТИ, 25.05.2011.
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. Наний О. Е., Трещиков В. Н. Российское оборудование DWDM с канальной скоростью 40 G и 100 G.//Вестник связи. 2011. № 4, с. 52.
4. Наний О. Е., Трещиков В. Н. Анализ форматов модуляции для DWDM систем связи со скоростью 40 Гбит/с//Вестник связи. 2012, в печати.
5. Наний О. Е. Когерентные системы связи.//Lightwave Russian Edition. 2008. № 4, с. 23.
6. Renaudier J., et al, Nonlinear Tolerance of Ultra-Densely spaced 100Gb/s Coherent PDM-QPSK channels//Proc. of ECOC, paper Mo2C3 (2010)
7. Cai J.-X., et al, 20 Tbit/s Capacity Transmission Over 6,860 km//Proc. of OFC, paper PDPB4 (2011).
8. Salsi M., et al. Transmission of 96×100Gb/s with 23 % Super-FEC Overhead over 11,680km, using Optical Spectral Engineering//Proc. of OFC'11, paper OMR2 (2011).
9. 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).
10. Cai J.-X., et al. Transmission of 96x100G pre-filtered PDM-RZ-QPSK channels with 300 % spectral efficiency over 10,608km and 400 % spectral efficiency over 4,368km//Proc. of OFC, paper PDPB10 (2010).
11. Cai J.-X. et al. 112x112 Gb/s Transmission over 9,360 km with Channel Spacing Set to the Baud Rate (360 % Spectral Efficiency)//Proc. of ECOC, paper PD2.1 (2010).
12. Winzer P. J., Gnauck A. H., Doerr C. R., Magarini M., Buhl L. L. Spectrally Efficient Long-Haul Optical Networking Using 112-Gb/s Polarization-Multiplexed 16-QAM//J. Lightw. Technol., vol. 28, pp. 547–556, Feb. 4, 2010.
13. Bosco G., Curri V., Carena A., Poggiolini P., Forghieri F. On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers.//J. Lightw. Technol., vol. 29, pp. 53–61, 2011.
14. Winzer P. J. Energy-efficient optical transport capacity scaling through spatial multiplexing.//Photon. Technol. Lett., vol.23, pp. 851–853, 2011.

Ф