РАЗВИТИЕ СКОРОСТНЫХ DWDM-СИСТЕМ по нескольким поднесущим

УДК 621. 391. 63

А.Леонов, к.ф.-м.н., заместитель начальника научно-исследовательского отдела ООО "Т8",
М.Слепцов, к.т.н., заместитель генерального директора по управлению проектами ООО "Т8",
В.Трещиков, к.ф.-м.н., генеральный директор ООО "Т8"

Производители телекоммуникационного оборудования применяют различные способы повышения спектральной эффективности систем связи и увеличения канальной скорости. В статье рассматриваются тенденции и перспективы использования разных подходов, особое внимание уделено возможностям современного оборудования отечественного производства и его роли в развитии систем связи.

Что в приоритете?

Долгое время в оптических сетях дальней связи удавалось увеличивать пропускную способность при сохранении дальности передачи информации. Важную роль при этом играло развитие технологий упреждающей коррекции ошибок (FEC). За последние 15 лет сменилось три поколения каналообразующего оборудования (от 2,5G – к 10G, 40G, 100G) с обязательным переходом на более развитую технологию FEC (HD FEC, Super FEC, Soft FEC). Магистральные системы 100G с форматом модуляции DP-QPSK, похоже, стали вершиной развития волоконно-оптических систем связи по базовому параметру – производительности (произведение дальности передачи на спектральную эффективность [1]). Однако постоянный рост трафика между крупными городами и в пределах городских агломераций, а также бурное развитие дата-центров диктуют необходимость дальнейшего развития систем передачи, причем необязательно за счет повышения производительности.

Сегодня в развитии DWDM-оборудования для городских и региональных сетей связи на первый план выходят две взаимосвязанные потребности:

- увеличение спектральной эффективности (рост скорости при той же занимаемой спектральной полосе), пусть даже и со снижением максимально достижимой дальности, – для повышения экономической эффективности использования доступного спектра;
- увеличение канальной скорости (в частности, предоставление клиенту интерфейсов 400 Гбит/с, 1 Тбит/с) – в связи с потенциальной стандартизацией и внедрением в будущем клиентских каналов 400G Ethernet и 1T Ethernet.

Увеличение спектральной эффективности достигается главным образом за счет перехода к более сложным форматам модуляции – 8QAM, 16QAM, 64QAM. Неизбежной платой за это становится заметное снижение предельной дальности передачи без регенерации сигнала, что, впрочем, не является существенным недостатком для сетей городского и регионального масштабов.

Другой способ увеличения пропускной способности – повышение символьной

скорости – ограничен физическими возможностями электроники и базовыми принципами связи. В настоящее время в оборудовании используются модуляторы на скорости 30 Гбод, тестируются модуляторы 45 и 60 Гбод, что, видимо, уже близко к предельным возможностям современной электроники. Альтернативой является уплотнение каналов при той же символьной скорости (например, передача 30 Гбод в полосе не 50 ГГц, а 33 ГГц). Но такое уплотнение возможно только если изначально спектральная эффективность не была максимальной. Кроме того, повышение символьной скорости в заданной полосе (или сокращение полосы при той же скорости) также приводит к некоторому снижению дальности.

В настоящее время активно развивается еще один способ увеличения канальной скорости – использование нескольких поднесущих (суперканалов). Он не приводит к росту эффективности использования спектра, но зато позволяет предоставить клиенту любую требуемую канальную скорость.

Три независимых пути увеличения канальной скорости систем связи – повышение символьной скорости, усложнение формата модуляции, использование нескольких поднесущих – показаны на рис.1. Канальная скорость рассчитывается как произведение значений по всем трем осям, при этом необходимо предусмотреть еще некоторый запас для реализации помехоустойчивого кодирования FEC.

Например, в 2013–2014 годах активно развивались и использовались системы 100G: символьная скорость 30 Гбод, символьная эффективность четыре бита на бод (формат QPSK с использованием двух поляризаций), одна несущая в полосе 50 ГГц. В 2015 году мировыми вендорами были представлены системы 400G по двум поднесущим: символьная скорость 30 Гбод, символьная эффективность восемь бит на бод (формат 16QAM с использованием двух поляризаций), две несущих в общей полосе 100 ГГц. На 2016 год анонсированы разработки 400G по одной несущей: например, символьная скорость 60 Гбод, символьная эффективность восемь бит на бод (формат 16QAM с использованием двух поляризаций), одна несущая в полосе 100 ГГц. Используются и другие варианты, некоторые из которых так же показаны на рис.1.

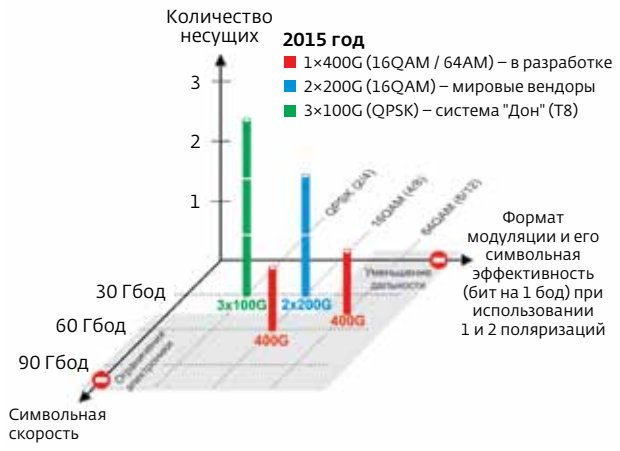

Рис.1. Основные пути увеличения канальной скорости систем связи

Увеличение символьной скорости

Пределы роста символьной скорости передачи данных определяются физическими характеристиками материала. Значение 30 Гбод (т.е. 30 гигасимволов в секунду) достигнуто в настоящее время и успешно используется в коммерческих системах 100G. Скорости 45 и 60 Гбод находятся на этапе тестирования в наиболее современных цифровых процессорах и модуляторах, но их использование ведет к снижению, по сравнению с 30 Гбод, дальности передачи сигнала. Возможно, что символьная скорость электроники будет медленно повышаться и дальше, по мере совершенствования технологий, но вряд ли здесь можно ожидать резких прорывов.

Ширина полосы спектра, которую занимает сигнал, зависит от символьной скорости. Сигнал 30 Гбод в большинстве коммерческих систем передается в полосе 50 ГГц, которая может быть сужена (с потерей дальности) до 37,5 и даже 33 ГГц. Сигнал 45 Гбод точно может быть передан в полосе 66 ГГц; теоретически, занимаемую им полосу можно сократить до 50 ГГц, но возможность и сроки практической реализации такого решения – под вопросом. Сигнал 60 Гбод типично передается в полосе 100 ГГц.

Усложнение формата модуляции

Более сложный формат модуляции позволяет передавать больше бит за один символ за счет использования большего количества различных возможных состояний оптического сигнала. Например, на рис.2 показаны возможные

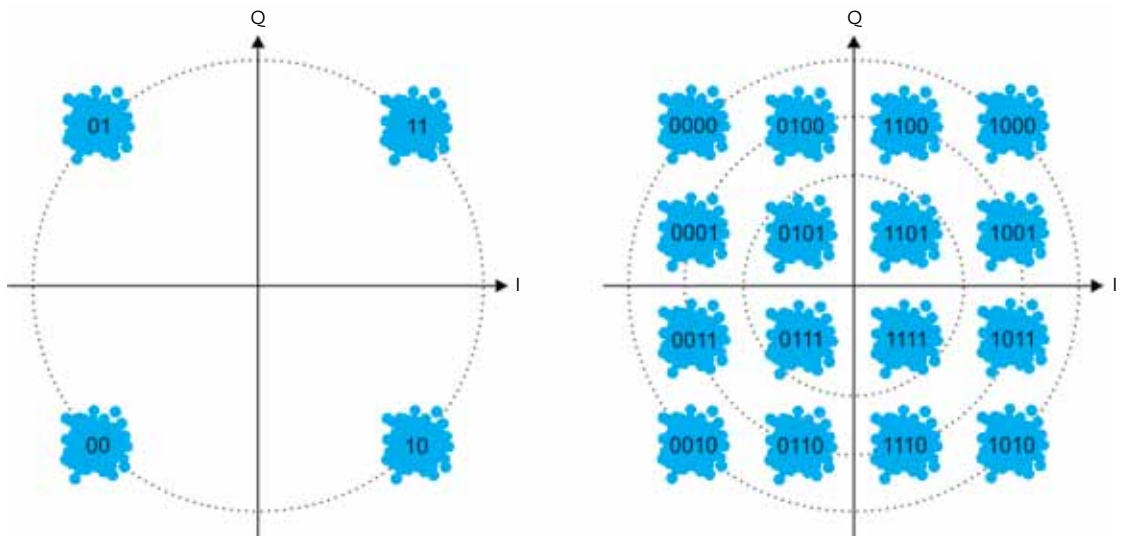

Рис.2. Форматы модуляции QPSK и 16QAM

состояния сигналов QPSK и 16QAM на амплитудно-фазовой диаграмме (I и Q – синфазная и квадратурная компоненты сигнала). Видно, что при той же максимальной амплитуде сигнала усложнение формата модуляции ведет к более плотному расположению состояний сигнала. Чем ближе друг к другу различные состояния, которые должен различить приемник, тем меньше допустимый уровень шума в линии (следовательно, меньше и допустимая дальность передачи).

Таким образом, повышение формата модуляции неизбежно ведет к существенному ограничению дальности. На практике для использования в региональных и городских системах связи рассматриваются форматы DP-16QAM и DP-64QAM. Первый из них в среднесрочной перспективе при выполнении ряда условий (улучшение требуемого OSNR, уменьшение длины пролетов) сможет использоваться и на магистральных сетях.

Разрабатываемые и перспективные системы в стандартной сетке 50/100 ГГц

На рис.1 все оси независимы. В лабораторных системах исследуются разнообразные комбинации этих трех параметров (модуляция, символьная скорость, количество несущих), а для

Таблица 1. Скорость передачи по одной несущей (50/100 ГГц)

	DP-QPSK (2 поляр., 2 бит/бод)	DP-8QAM (2 поляр., 3 бит/бод) Дальность ↓ в 3 раза от QPSK	DP-16QAM (2 поляр., 4 бит/бод) Дальность ↓ в 5 раз от QPSK	DP-64QAM (2 поляр., 6 бит/бод) Дальность ↓ в 8 раз от QPSK
30 Гбод	4 • 30 = 120 100G (50 Гц)	6 • 30 = 180 150G (50 ГГц)	8 • 30 = 240 200G (50 ГГц)	—
45 Гбод Дальность ↓ в 1,5 раза от 30 Гбод	—	—	—	12 • 45 = 540 400G (50 ГГц) (пока нет)
60 Гбод Дальность ↓ в 2 раза от 30 Гбод	4 • 60 = 240 200G (100 ГГц)	—	8 • 60 = 480 400G (100 ГГц) (пока нет)	—

коммерческого применения наиболее активно используются либо разрабатываются лишь некоторые комбинации, как показано в табл.1.

Здесь следует отметить, что, во-первых, оценка снижения дальности дана приблизительно, на основе имеющихся в открытом доступе данных о характеристиках систем зарубежных производителей. Во-вторых, для оценки снижения дальности в системах 200G и 400G по сравнению с системой 100G необходимо перемножить коэффициенты в строке и столбце. Например, у системы 400G с символьной скоростью 45 Гбод и форматом модуляции DP-16QAM дальность передачи будет приблизительно в 1,5×8 = 12 раз меньше, чем у системы 100G. В-третьих, по состоянию на конец 2015 года коммерчески доступных систем 400G по одной несущей нет.

Для передачи 100 Гбит/с по одной длине волны применяется формат передачи DP-QPSK (две поляризации, два бита на символ) и символьная скорость 30 Гбод – итого 120 Гбит/с минус FEC; в сетке 50 ГГц спектральная эффективность 2 бит/с/Гц.

Для передачи 200 Гбит/с по одной длине волны применяется два варианта реализации. Первый – модуляция DP-16QAM (две поляризации, четыре бита на символ) и символьная скорость 30 Гбод. Итого 240 Гбит/с минус FEC; в сетке 50 ГГц спектральная эффективность 4 бит/с/Гц. Это решение используют Acacia, ClariPhy и др. Второй вариант – модуляция DP-QPSK (две поляризации, два бита на символ) и символьная скорость 60 Гбод – итого 240 Гбит/с минус FEC; в сетке 100 ГГц спектральная эффективность 2 бит/с/Гц. Это решение использует Huawei и др.

Однако при переходе от DP-QPSK к DP-16QAM (при символьной скорости 30 Гбод) дальность передачи при той же длине пролета (стандартно 100 км) падает в пять раз, до 300–500 км. Примерно это расстояние и продемонстрировано в статьях конференций OFC-2015 и ECOC-2015, а также в наших расчетах [1].

Для передачи 400 Гбит/с по одной длине волны разрабатываются два варианта реализации. Первый – модуляция DP-16QAM (две поляризации, четыре бита на символ) и символьная скорость 60 Гбод – итого 480 Гбит/с минус FEC; в сетке 100 ГГц спектральная эффективность 4 бит/с/Гц. Второй вариант – модуляция DP-64QAM (две поляризации, шесть битов на символ) и символьная скорость 45 Гбод – итого 540 Гбит/с

СПИК

минус FEC; в сетке 66 ГГц спектральная эффективность 6 бит/с/Гц, в сетке 50 ГГц – 8 бит/с/Гц (но возможность и сроки практической реализации такого решения – под вопросом). Такая система была анонсирована компанией Nokia в начале 2016 года, однако добиться ее работоспособности в полосе 50 ГГц пока не удалось, для передачи требуется полоса на 10–20% больше. Заявленная дальность передачи – 150 км. Ведущие производители оптических блоков – компании Acacia и ClariPhy – анонсируют появление своих систем 400G по одной несущей в начале 2017 года. Однако при переходе от символьной скорости 30 к 60 Гбод (при модуляции DP-16QAM) дальность падает вдвое, до 200–300 км. При использовании модуляции DP-64QAM и символьной скорости 45 Гбод дальность уменьшается еще на 20%, но зато такая система существенно дешевле, чем при использовании сложной электроники 60 Гбод. Вероятно, это вариант реализации 400G будет более популярен.

В любом случае, дальность существующих систем с высокими форматами модуляции на сегодняшний день ограничена расстоянием 300–500 км при передаче 200 Гбит/с по одной длине волны и расстоянием 200–300 км при передаче 400 Гбит/с по одной длине волны (при стандартной длине пролета 100 км). Возможные пути увеличения дальности – сокращение длины пролетов, использование распределенного рамановского усиления.

Повышение числа несущих

После появления систем 100G очередным модным "трендом" DWDM-оборудования стали системы 400G, а в лабораторных экспериментах – 1T. Вероятно, это связано с ожиданиями стандартизации и внедрения очередных уровней протокола Ethernet на клиентских сетях – 400G Ethernet и 1T Ethernet. Соответственно, операторы связи готовятся предоставить клиентам интерфейсы для передачи таких каналов; "внутренняя кухня" (как именно технически передается этот поток по оптическому волокну) при этом для клиента не столь важна.

На практике достичь скорости 400 Гбит/с по одной несущей в коммерческих системах пока не удалось, и в 2015 году на рынке были представлены различные варианты "400G" систем на двух поднесущих. При этом осуществляется передача двух каналов по 200 Гбит/с каждый (варианты реализации см. в табл.1) на двух разных длинах волн со спектральной эффективностью 2–4 бит/с/Гц.

Использование нескольких поднесущих само по себе не позволяет повысить спектральную эффективность системы. Отчасти это маркетинговый ход производителей оборудования в преддверии выпуска настоящих 400G-систем (по одной несущей), а отчасти – отработка технологии суперканалов для предоставления клиенту любой требуемой канальной скорости (под суперканалом понимается набор из нескольких оптических поднесущих, которым можно управлять в оптическом тракте как единым целым). В лабораторных установках исследуются самые разнообразные варианты суперканалов – например, 10×100G в полосе 400 ГГц и т.п.

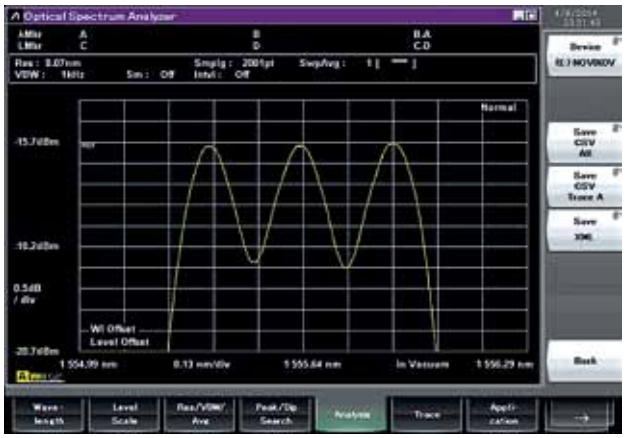

Рис.3. Спектр суперканала 3×100G в сетке 100 ГГц

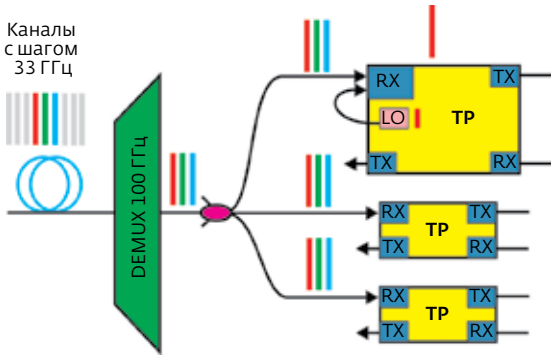

Рис.4. Передача суперканала 3×100G в сетке 100 ГГц и прием отдельных составляющих его каналов 100G когерентными транспондерами

Уплотнение каналов

В коммерческих системах 100G образца 2013–2014 годов канал 100 Гбит/с передается в спектральной полосе 50 ГГц. Тот же канал можно передать и в меньшей полосе (с некоторым снижением дальности), что неоднократно демонстрировалось в лабораторных системах. Однако при внедрении коммерческой системы важен вопрос согласования с установленным оборудованием, которое в подавляющем большинстве наземных DWDM-систем соответствует рекомендациям ITU-T (мультиплексоры 100 и 50 ГГц).

Одно из возможных решений – передача суперканала из трех поднесущих по 100 Гбит/с в полосе 100 ГГц (т.е. по 33 ГГц на поднесущую). В стандартной полосе мультиплексора шириной 100 ГГц передаются три когерентных спектральных канала 100G (спектральная эффективность 3 бит/с/Гц), что обеспечивает возможность передачи до 270 спектральных каналов 100G в C+L диапазонах. Таким образом, общая пропускная способность созданной DWDM-системы может достигать 27 Тбит/с.

Такая система была разработана компанией ООО "Т8" при поддержке Фонда Сколково. Это – система "Дон", обеспечивающая передачу канала 100G в полосе 33 ГГц. Спектр суперканала 3×100G в полосе 100 ГГц показан на рис.3.

Важное преимущество созданной системы – возможность работы на существующей сетевой инфраструктуре (в С-диапазоне емкость системы составляет 12 Тбит/с). При уплотнении спектральных каналов 100G с использованием стандартной сетки 100 ГГц не требуется замена мультиплексоров или усилителей в промежуточных пунктах сети.

Суперканал 300G передается в стандартной сетке 100 ГГц, при приеме разделение каналов осуществляется за счет технологии когерентного приема (рис.4).

Таблица 2. Чувствительность транспондеров "Т8" ($OSNR_T$)

	Режим работы (формат модуляции)		
Решение	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM
"100G"	11,5–13,5 дБ (*)	—	—
"300G"	16,2 дБ (3x100G)	—	—
"400G"	10,2 дБ (2x100G)	14,5–15 дБ (2x150G)	18 дБ (2x200G)

(*) В зависимости от стоимости

Следует отметить, что когерентный приемопередатчик 100 Гбит/с компании "Т8" обладает лучшей в мире пороговой чувствительностью. Минимальное отношение сигнал-шум, при котором приемник способен принять сигнал 100 Гбит/с, составляет всего 11,5 дБ. Это примерно на 4 дБ лучше, чем у ближайших конкурентов. Благодаря этому компания "Т8" регулярно ставит мировые рекорды по скорости и дальности передачи DWDM-сигнала [6–7]. Высокая чувствительность позволяет строить сверхдлинные однопролетные линии связи [8].

DWDM-оборудование отечественного производства

Российский производитель скоростных DWDM-систем – компания "Т8" – предлагает оборудование различных типов со спектральной эффективностью 2–4 бит/с/Гц. На 100G-системах "Волга" (2 бит/с/Гц) к 2015 году было построено более 10 тысяч километров DWDM-сетей [2–4].

В 2015 году создана карта "Дон" для передачи 100G-каналов в уплотненной сетке (три канала в 100 ГГц, 3 бит/с/Гц) [5], в разработке находится карта для передачи 400G на двух поднесущих в полосе 100 ГГц (4 бит/с/Гц).

Сравнительные характеристики чувствительности транспондеров приведены в табл.2.

Новое оборудование отвечает мировым тенденциям усложнения модуляции и повышения количества несущих при снижении предельной дальности передачи. Целевой рынок новых систем – связь дата-центров, городские и региональные сети. Предлагаемое оборудование российского производства может эффективно использоваться для повышения пропускной способности наиболее нагруженных городских и региональных волоконно-оптических линий связи.

Оборудование DWDM "Волга" и программное обеспечение к нему полностью производится в России, комиссией Минпромторга РФ ему присвоен статус оборудования российского происхождения (статус подтверждается ежегодно). DWDM-система "Волга" прошла государственную экспертизу и внесена в реестр инновационной продукции, рекомендованной к закупкам в рамках № 94-ФЗ и № 223-ФЗ.

Рекордные реальные линии

Дальность многопролетных линий без регенерации сигнала на оборудовании "Волга" может составлять несколько тысяч километров. Например, в апреле 2015 года компания "Т8" запустила на собственном DWDM-оборудовании "Волга" 100G-канал Москва – Новосибирск без регенерации сигнала. Каналы 100G переданы двумя путями: через Самару и через Екатеринбург, с резервированием 1+1. Длина двух плеч составляет, соответственно, 4250 и 3400 км. Каналы 100G организованы в рамках действующей многоканальной DWDM-системы, построенной на оборудовании зарубежного производства (Cisco). При работе в такой конфигурации к новым транспондерам предъявляются более жесткие требования, чем к "родному" оборудованию. В частности, необходима подстройка уровня мощности новых 100G-каналов под уровень мощности действующих каналов. Оборудование 100G "Волга" отлично проявило себя в сложной конфигурации, обеспечив при этом значительный запас по отношению сигнал-шум (OSNR). По плечу через Самару запас по OSNR составляет 7 дБ, по плечу через Екатеринбург – 8,5 дБ. Это более чем в два раза превышает требуемый эксплуатационный запас.

Заключение

Оборудование ВОЛС продолжает активно развиваться – повышается его спектральная эффективность, канальная скорость, суммарная емкость систем передачи. Развитие идет по нескольким направлениям: усложнение формата модуляции, повышение символьной скорости, уплотнение каналов, использование нескольких поднесущих (суперканалов). Компания "Т8" оперативно отвечает на потребности заказчиков, предлагая оборудование мирового класса, соответствующее мировым тенденциями развития DWDM-систем.

Литература

1. **Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р.** Рекордная производительность систем 100G как маркер перехода к эволюционному развитию ВОСП // Первая миля. 2015. № 6. С. 40–43.
2. **Гуркин Н.В., Трещиков В.Н., Новиков А.Г., Наний О.Е.** Российское DWDM оборудование с канальной скоростью 100 Гбит/с // Телекоммуникации и транспорт (T-Comm). 2012. № 4. С. 65–67.
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. 39–40, № 2, С. 40–42.
4. **Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р.** Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. № 9, С. 17–19.
5. **Трещиков В.Н., Наний О.Е., Леонов А.В.** Особенности разработки DWDM систем высокой емкости // T-Comm. 2014. № 9. С. 83–88.
6. **Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinih S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nanii O.E.** and **Treshchikov V.N.** Record 500 km unrepeatered 100 Gb s^{-1} transmission // Laser Physics Letters 10 (2013), 075107 (4pp).
7. **Gainov V., Gurkin N.V., Lukinih S.N., Makovejs S., Akopov S.G., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.** and **Sleptsov M.** Record 500 km unrepeatered 1 Tbit/s (10x100G) transmission over an ultra-low loss fiber // Optics Express 22 (2014), 22308–22313.
8. **Гайнов В.В., Слепцов М.Н., Трещиков В.Н.** Однопролетные ВОЛС большой протяженности: как снизить стоимость транспортных сетей // Первая миля. 2015. № 2. С. 72–77.