

РЕКОРДНАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМ 100G

как маркер перехода к эволюционному развитию ВОСП

В.Конышев, кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник Института истории естествознания и техники им. С.И.Вавилова РАН,

А.Леонов, кандидат физико-математических наук,
заместитель начальника научно-исследовательского отдела компании "Т8",

О.Наний, доктор физико-математических наук,
профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,

В.Трещиков, кандидат физико-математических наук,
генеральный директор компании "Т8",

Р.Убайдуллаев, кандидат физико-математических наук,
инженер-проектировщик компании "Т8"

Производительность ВОСП достигла своего пика несколько лет назад с появлением систем 100G – и дальнейшее развитие систем связи пошло по пути усложнения форматов модуляции, что выгодно для коротких линий. Но основной "рабочей лошадкой" магистральных ВОСП в обозримом будущем останется технология 100G.

Бурное развитие технологий завораживает наблюдателя. Вроде бы еще совсем недавно специалисты на конференциях обсуждали проблемы запуска каналов 10 Гбит/с – а сегодня уже повсеместно внедряются каналы 100 Гбит/с. Названия научных докладов о современных разработках звучат как заявки в Книгу рекордов: "400 Гбит/с в реальном времени" (Alcatel-Lucent, [1]), "800 Гбит/с на 410 км" (Ciena, [2]), "1 Тбит/с на 320 км" (Bell Labs, [3])... Возникает ощущение непрерывного (по мнению оптимистов – экспоненциального) развития, которое подкрепляется общим устойчивым мнением о постоянном техническом прогрессе человечества.

Не хочется огорчать оптимистов. Но историкам техники хорошо известно, что любая технология в своем развитии проходит ряд этапов, и период революционного улучшения технических характеристик рано или поздно сменяется

эволюционным процессом, направленным на рост экономической отдачи. Маркер этого перехода – достижение предельных характеристик по базовым показателям. В авиации, например, период быстрого развития аэродинамических схем закончился в 1970-х годах, после чего отрасль сосредоточилась на бортовой электронике (авионике), увеличении комфорта пассажиров и улучшении экономических показателей, а также решении смежных задач – например, уменьшении заметности для РЛС. Но базовые показатели самолета как летящего объекта тяжелее воздуха – максимальная скорость, дальность полета, удельная нагрузка на крыло, удельная нагрузка на мощность – почти не изменяются уже 40 лет (за консультацию по истории развития авиации авторы благодарят ведущего научного сотрудника ИИЕТ РАН, кандидата физико-математических наук Ю.В.Кузьмина).

Что же является базовым техническим показателем ВОСП? Технически задача системы связи состоит в том, чтобы передать в оптическом волокне максимальный поток данных на максимальное расстояние с минимальным использованием спектрального ресурса (диапазона). Если ввести понятие спектральной эффективности (SE – скорость передачи полезных данных, разделенная на используемый спектральный диапазон), то базовый критерий для оценки степени развития волоконно-оптической системы связи можно выразить как $SE \times L$, где L – дальность передачи. Произведение SE и L известно как производительность системы связи.

Спектральная эффективность SE оборудования связи обычно известна или легко вычисляется. Основную сложность при сравнении производительности различных используемых и перспективных технологий представляет вычисление дальности передачи L , которую может обеспечить та или иная система связи. Под дальностью в магистральных системах подразумевается дальность передачи в многопролетной линии на каскаде усилителей без регенерации сигнала. Чем больше эта дальность, тем реже на магистральной линии нужно ставить приемно-передающее оборудование. Следовательно, ниже и стоимость решения.

Предельная дальность многопролетной линии связи зависит от многих характеристик: длин пролетов; затухания в волокне; шум-фактора усилителей; коэффициента нелинейности, выражающего влияние нелинейных эффектов на распространение сигнала; входных мощностей в каждый пролет; количества и типа передаваемых каналов; используемого частотного плана и защитных интервалов; требуемого эксплуатационного запаса по $OSNR$; пороговой чувствительности транспондера

$OSNR_T$ (минимальное отношение сигнал-шум на входе в приемник, необходимое для приема сигнала с допустимым по действующим стандартам уровнем битовых ошибок (обычно $BER=10^{-12}$) в короткой линии без нелинейных эффектов).

Значения входных мощностей в линии могут выбираться по-разному в зависимости от используемого метода оптимизации линии (минимизация BER , максимизация запаса по $OSNR$ и др.). Методы оптимизации для систем с когерентным приемом сигнала отличаются от методов, принятых в системах с некогерентным приемом [4].

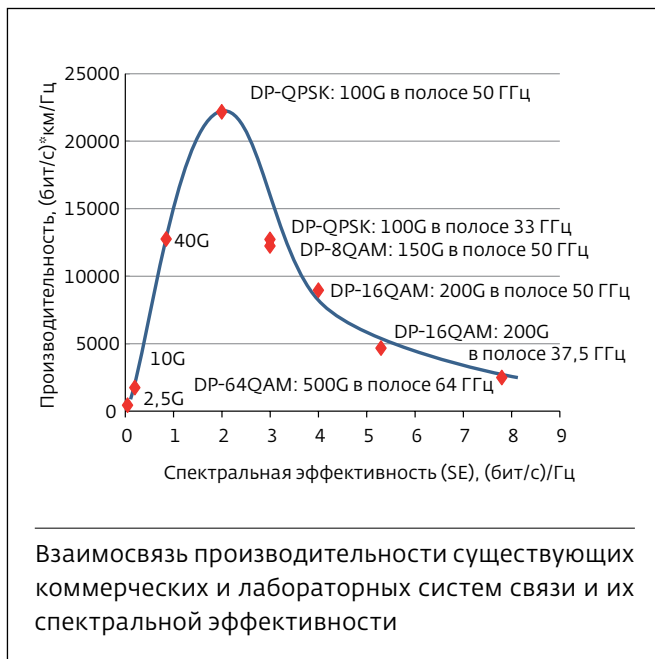
Для сравнения разных технологий необходимо все экспериментальные или расчетные дальности привести к единому набору входных параметров (характеристик линии). В таблице приведен набор параметров, который был использован нами для сравнения различных технологий передачи (длина всех пролетов многопролетной линии предполагалась одинаковой, исследовалась передача одного канала).

При оптимизации некогерентных многопролетных линий использовалось правило Петермана ($\sum P_i \approx 30$ мВт) [5]. При оптимизации когерентных линий использовалась методика минимизации BER , совпадающая с методикой максимизации запаса по $OSNR$ в точке максимально достижимой длины линии [4]. Результаты сравнения технологий приведены на рисунке.

Выполненный анализ показывает, что технология DP-QPSK со скоростью передачи сигнала 100 Гбит/с в полосе 50 ГГц, возможно, стала переломной точкой в развитии магистральных ВОЛС. До ее появления рост скорости в линии связи происходил с сохранением полосы (2,5G, 10G, 40G, 100G – все в сетке 50 ГГц) и с сохранением дальности передачи. Соответственно, росла и производительность систем. Дальность передачи удавалось сохранить

Значения параметров, используемых при сравнении технологий

Описание параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Длина пролета	L	80 км
Затухание в волокне	A	0,22 дБ/км
Шум-фактор усилителя	NF	6 дБ
Коэффициент нелинейности (для систем 40G, 100G и выше с когерентным приемом)	H	2×10^{-4} мВт ⁻²
Эксплуатационный запас	—	0 дБ



за счет различных технических приемов – прежде всего благодаря использованию дополнительных степеней свободы светового излучения и развитию технологий коррекции ошибок. Так, при переходе от 2,5G к 10G дальность передачи была сохранена за счет использования упреждающей коррекции ошибок FEC. При переходе от 10G к 40G – за счет использования фазовой модуляции DPSK и технологии SuperFEC. При переходе от 40G к 100G – за счет когерентного приема, использования двух поляризаций сигнала (формат модуляции DP-QPSK) и технологии упреждающей коррекции ошибок с мягким принятием решений (Soft FEC).

Рост производительности систем связи, таким образом, стал восприниматься операторами как естественный процесс, а основным критерием при принятии решения о переходе к новому поколению систем на реальных сетях стала стоимость реализации одной и той же пропускной способности на разных типах оборудования. Системы 10G стали сменять 2,5G, когда стоимость транспондера 10G стала примерно равна стоимости четырех транспондеров 2,5G (при той же дальности передачи за счет FEC); системы 100G стали массово внедряться операторами, когда стоимость транспондера 100G примерно сравнялась со стоимостью десяти транспондеров 10G (при той же дальности передачи за счет когерентного приема и Soft-FEC). Однако с появлением систем 100G тенденции изменились – и привычка сравнивать лишь пропускную способность систем сегодня может привести

к искаженной оценке характеристик новых высокоскоростных систем.

В системах 100G с когерентным приемом была, по-видимому, достигнута предельная эффективность использования независимых параметров светового излучения (фаза и поляризация). Также к моменту появления систем 100G был достигнут предел символьной скорости передачи, определяемый физическими характеристиками материала. Предельные значения символьной скорости электрического сигнала находятся на уровне 50 Гбод, "комфортные" (с точки зрения реализации на стандартной элементной базе) – на уровне 25 Гбод. Вполне возможно, что бодовая скорость электроники будет медленно повышаться и дальше по мере совершенствования технологий, но о взрывном характере развития здесь говорить уже не приходится.

Дальнейшее развитие волоконно-оптических систем связи, как это видно по тенденциям 2014–2015 годов, вероятнее всего будет основано на использовании более сложных форматов модуляции (DP-16QAM, DP-64QAM и др.). Эти форматы позволяют существенно повысить спектральную эффективность и, соответственно, скорость в привычной для оператора ширине полосы – отсюда и "рекордные" загрузки статей и пресс-релизов. Однако усложнение модуляции неизбежно ведет к существенному падению дальности передачи. При этом производительность, как видно из рисунка, так же заметно падает.

Таким образом, можно предположить, что в развитии оборудования волоконно-оптических систем связи произошел переход от революционного к эволюционному развитию, маркером которого стало достижение предельных значений производительности в системах 100G. Похоже, операторам связи придется теперь пересматривать и привычные экономические критерии сравнения систем связи. Сравнение одной лишь пропускной способности уже не способно дать ответ на вопрос об экономической эффективности внедрения той или иной технологии, поскольку повышение пропускной способности теперь может быть связано с существенным снижением дальности передачи и необходимостью использования дополнительных промежуточных пунктов регенерации сигнала. В частности, даже при условии равной стоимости (за ту же пропускную способность) оператору связи невыгодно использовать сложные форматы модуляции на протяженных линиях связи, поскольку для передачи того же объема данных на то же расстояние для этих форматов потребуется больше пунктов регенерации сигнала, чем для 100G DP-QPSK.

Практически не вызывает сомнений, что основной "рабочей лошадкой" магистральных ВОЛС

в обозримом будущем останется технология 100G как обладающая рекордной производительностью и, соответственно, максимальной экономической эффективностью для протяженных линий. В то же время новые технологии с "высокими" форматами модуляции дают заметный выигрыш для коротких линий, где при той же полосе позволяют достичь намного большей скорости. Рекордная производительность систем 100G на коротких линиях не используется, а потому и не является важным для оператора фактором при выборе решения. Базовым параметром для коротких линий, по сути, является сама спектральная эффективность (SE): чем она больше – тем лучше. Поэтому в городских сетях можно ожидать скорого внедрения систем 200G и 400G, которые на сегодняшний день уже коммерчески доступны у некоторых производителей.

Увеличение скоростей на коротких расстояниях будет продолжаться и дальше в регионах США, Европы, Китая, Японии и других стран с плотным расположением крупных городов, где потребность в увеличении скорости коротких линий очень велика. Несомненно, будут развиваться и системы управления сетями. Например, сегодня активно внедряется концепция FlexGrid – гибкое управление занимаемой спектральной полосой и скоростью передачи путем изменения модуляции сигнала через систему управления. Не исключен и вариант, что стоимость систем с высокими форматами модуляции упадет со временем столь значительно, что их использование даже на протяженных линиях связи станет выгоднее, чем применение "дальнобойных" систем 100G. Для примера, существующая система 100G с $OSNR_T=11$ дБ позволяет передать 100 Гбит/с

полезного сигнала в полосе 50 ГГц (SE=2) без регенерации на 11220 км (при параметрах согласно табл.). Лабораторная система [3] позволяет передать 1 Тбит/с полезного сигнала в полосе 128 ГГц (SE=7,8) без регенерации на расстояние 320 км (при параметрах согласно табл.) – соответственно, для передачи на 11220 км потребуется 35 транспондеров. Выигрыш в скорости с учетом поправки на спектральную полосу – примерно в четыре раза, а выигрыш в количестве транспондеров – в 35 раз. Таким образом, внедрение новой системы на протяженных линиях связи станет выгодным, если стоимость транспондера 500G составит 11,4% от цены транспондера 100G или менее.

Однако, судя по выполненному анализу, именно системы 100G с форматом модуляции DP-QPSK представляют собой вершину развития технологий магистральной волоконно-оптической связи по базовому техническому параметру – производительности. И эта вершина была достигнута несколько лет назад.

Что ж, и "Конкорд" когда-то совершил свой последний полет через Атлантику... Современные пассажирские авиалайнеры не так быстры, как сверхзвуковые рекорсмены прошлого, но оказалось, что это не главное для их пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pagano A. et al. OFC 2014, Tu2B.4.pdf.
2. Zhou Y.R. et al. OFC 2014, Tu2B.3.pdf.
3. Buchali F. et al. OFC 2013, OTh4E.3.pdf.
4. Konyshov V.A. et al. Optics communications. 2015. № 355. P. 279–284.
5. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM-системы (2-е изд.). – М.: Технофера, 2015. С. 296.

Новый анализатор позволит снизить стоимость тестирования компонентов беспроводного оборудования

Компания Keysight Technologies представила в сентябре 2015 года высокопроизводительный многопортовый векторный анализатор цепей в формате PXIe – M9485A VNA, рассчитанный на применение в условиях крупносерийного производства интерфейсных модулей, коммутаторов и фильтров, применяемых в терминалах и базовых станциях сотовой связи. Действительно многопортовая архитектура обеспечивает наивысшую в своем классе скорость измерений – по информации компании, до 30% быстрее, чем у других сравнимых по параметрам приборов, сохраняя при этом широкий динамический диапазон. Диапазон

частот от 1 МГц до 9 ГГц покрывает потребности измерения перспективных компонентов. Заказчики могут сэкономить затраты, выбрав нужное им сегодня число портов, а с ростом потребностей быстро расширить конфигурацию.

В процессе серийного производства важнейшую роль играет скорость тестирования и место, занимаемое измерительным прибором. Прибор объединяет до 24 физических портов, все приемники которых синхронизируются общим источником для одновременного измерения всех S-параметров. При работе с многопортовыми устройствами такая конфигурация существенно сокращает время свипирования

по сравнению с решениями на базе матричных коммутаторов.

Новый анализатор обладает высокой скоростью измерений (5 мс на 201 точку с 2-портовой калибровкой) и широким динамическим диапазоном (до 142 дБ). Кроме того, анализатор имеет малый уровень шумов (0,001 дБ (ср. кв.) в полосе ПЧ 10 ГГц) и высокую стабильность (0,005 дБ/°С). В совокупности с поддерживаемыми в M9485A многопортовыми и многоточечными измерениями такой уровень производительности позволяет снизить стоимость тестирования.

По информации Keysight Technologies