Через тернии 100G к вершинам емкости сетей

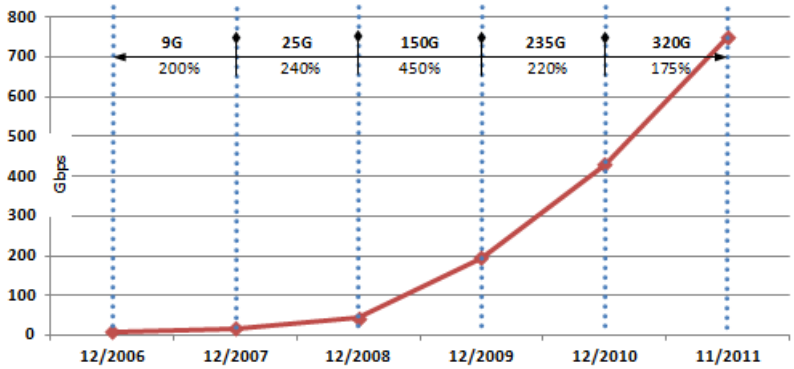
Сегодня сложно представить далекий 1995 год. Тогда в Рунете емкость международных каналов в сумме не превышала 2 Мбит/с, а среди операторов «новой» волны наиболее крупными были EUnet/Relcom и Radio-MSU, где на каждого приходилось по 512 Кбит/с иностранного. Спустя 16 лет емкостью каналов российские компании меряются уже в Тбит/с, а 512 Кбит/с уже даже в регионах (правда, еще не везде) не всякого взыскательного пользователя обрадуют, и это хорошо, если еще как за тот «рубль», сразу «в морду не дадут». Нельзя отрицать, что интернет никогда не стал бы таким, какой он есть сегодня, если бы за последнее десятилетие, или два, пропускная способность сетей не выросла в десятки, сотни и даже тысячи раз.

То было время, когда каждые три-четыре года скорость передачи увеличивалась в несколько, а то и в десять раз. В 1995 году для первой в России точки обмена трафиком (M9-IX) использовался коммутатор Cisco Catalyst 1200 с восемью портами Ethernet 10Base-T. Всего через пять лет, когда M9-IX начала превращаться в MSK-IX, распределяя свою топологию на несколько разнесенных узлов, в магистральной сети уже применялся иной стандарт Ethernet, его версия, утвержденная двумя годами ранее, где данные передавались на скорости один Гбит/с - в 100 раз больше, чем мог позволить себе Ethernet 10Base-T. Еще через четыре года, в 2002 году была утверждена редакция Ethernet на 10 Гбит/с. Сети SDH (Synchronous Digital Hierarchy) где-то даже ранее Ethernet одолели по шкале скоростей путь не менее длинный, пройдя от STM-1 до STM-64, от 155 Мбит/с до 10 Гбит/с.

На другой стороне прогресса, идя вслед за постоянно возрастающими требованиями к полосе, стали системы волнового уплотнения (WDM, Wavelength Division Multiplexing), позволяя передавать в одном оптическом волокне несколько сигналов с разными длинами волн. В современных транспортных сетях, в основе которых лежит DWDM (Dense WDM), многие операторы для эффективного расходования канального ресурса, используют сетку с шириной 50 ГГц (с шагом 0.4 нм). В диапазоне окна прозрачности «C» (1530-1565 нм) это позволяет организовать до 80 оптических каналов. Если на каждой длине волны в такой системе передача ведется на скорости 10 Гбит/с (STM-64 или 10G Ethernet), то общая емкость в потенциале составляет сумасшедшие, как когда-то казалось, 800 Гбит/с.

Строго говоря, согласно рекомендациям ITU сетка стандарта, привязанная к опорной частоте 193.1 ТГц (1552.52 нм), поддерживает различные расстояния между соседними каналами, от 12.5 ГГц (0.1 нм) до 100 ГГц (0.8 нм) и более, кратно 100 ГГц.

Повсеместное внедрение DWDM дало операторам неоспоримое преимущество, позволив расширять емкость сети как повышая скорость передачи, так и увеличивая количество каналов. В ответ на рост требований и запросов к пропускной способности сети, по мере необходимости оператор «засвечивал» новые лямбды и быстро вводил в эксплуатацию дополнительные канальные ресурсы. Однако со временем то, что еще вчера казалось очень много, сегодня стало уже мало. Изрядно способствовали этому быстрая эволюция сервисов, а также значительный рост абонентской базы в сетях широкополосного доступа. По отношению к России, если взглянуть на статистику трафика MSK-IX за 2006-2011 годов, хорошо заметно как по экспоненте увеличивались объемы. Примерно что-то подобное за это время не миновали и другие российские, и не только, операторы.



Статистика трафика на MSK-IX с 2006 по 2011 год

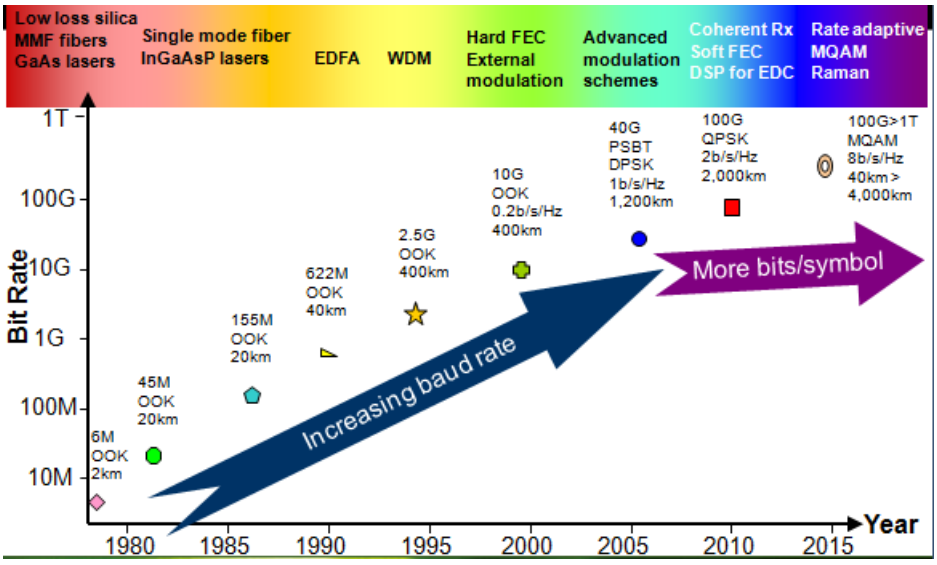
В общем, требования к пропускной способности в сетях росли, растут и, нет сомнения, будут расти и далее. Несмотря на снижение в последнее время темпов роста, тем не менее, дельта в объеме между тем, что было «тогда» и стало «сейчас», увеличивается год от года. Если за 2009 год утилизируемая в пике полоса на MSK-IX выросла на 450% и соответственно на 150 Гбит/с, то в 2010 году рост «всего» в 220% дал увеличение полосы на 235 Гбит/с. Перенеся тенденцию роста требования к полосе пропускания по экспоненте на транспортные сети, это означает, что их ресурсы «съедаются» все быстрее, а значит день, когда емкость сети будет выбрана - с каждым мигом приближается все скорее. Возникла потребность, а лучше сказать возможность, чтобы уверенно глядеть в будущее, перейти к следующей итерации, еще раз кратно увеличить емкость сети, выведя скорость передачи в лямбде на новый уровень, как это бывало в прошлом.

До недавнего времени на оптических системах связи наиболее часто применялся простой метод модуляции по интенсивности, аналогичный амплитудной манипуляции в радиосвязи. Главным было наличие сигнала или его отсутствие (on-off keying, OOK). В частности широко распространился формат кодирования «без возврата к нулю» (non return to zero, NRZ), где свет лазера переключается между двумя состояниями (включен/выключен), что представляется как логические «1» и «0». Для увеличения скорости передачи достаточно было уменьшить длительность оптического импульса. К примеру, в SDH ширина тактового интервала сообразна иерархии и кратна четырем: 1600 пс (STM-4), 400 пс (STM-16m), 100 пс (STM-64), 25 пс (STM-256).

По мере того, как ширина оптического импульса уменьшается, его относительное расширение, вносимое обеими дисперсиями, хроматической и поляризационно-модовой, проявляется сильнее. Особенно когда передача ведется на длинные расстояния. Сигнал «размывается» и извлечь из него «0» или «1» не представляется возможным. С ростом битовой скорости допустимые значения к хроматической дисперсии снижаются квадратично, а к поляризационно-модовой линейно. Для примера, переход с 10G на 40G при сохранении кодирования NRZ делает допуски более жесткими - требования к соотношению сигнал/шум (OSNR) возрастают на 6 дБ, к хроматической дисперсии в 16 раз, а поляризационно-модовой в четыре. В общем, уже при разработке систем передачи на 40 Гбит/с стало ясно, что от традиционного подхода увеличить скорость передачи, сократив тактовый интервал, за пределами 10 Гбит/с придется отказаться.

Пойти другим путем и увеличить емкость системы, добавив новые каналы тоже не так просто. Если снизить шаг расстояния между ними, то тогда для DWDM, как системы волнового уплотнения, необходимый защитный интервал между соседними каналами должен быть не меньше, чем двойная верхняя частота модуляции канала. Что собственно, аналогично частотному уплотнению радиоканалов. К примеру, согласно РД 45. 286-2002 при передаче потоков STM-64 ширина спектра на уровне -20 дБ при расстояниях между каналами в 50 ГГц составляет не более 30 ГГц, а отклонение центральной частоты допускается в пределах ±5 ГГц. Иначе нарушаются защитные интервалы между каналами. Увеличить диапазон спектра и добавить новые каналы также не всегда, а лучше сказать, редко когда возможно. Полоса спектра в DWDM часто ограничена как минимум типом применяемого усиления.

В оптической связи, стремясь увеличить отдачу от сетей, вводили усиление романовского рассеивания, регулировали дисперсионные искажения, внедряли предварительную коррекцию ошибок (FEC), применяли улучшенные методы кодирования (RZ, CRZ, CSRZ) для модуляции по интенсивности, - все это вносило свои корректировки в решение проблемы, но не решало ее в целом. Кардинально перестраивать кабельную инфраструктуру, чтобы всего лишь в несколько раз кратно увеличить емкость сети, удовольствия мало. Надо было найти другое решение, которое позволило бы как увеличить пропускную способность сети, так и сохранить ранее сделанные в нее инвестиции, в том числе и в существующую в DWDM сетку оптических каналов с шагом в 50 ГГЦ.



Optical Transport Historical Perspective, DWDM Technology Evolution

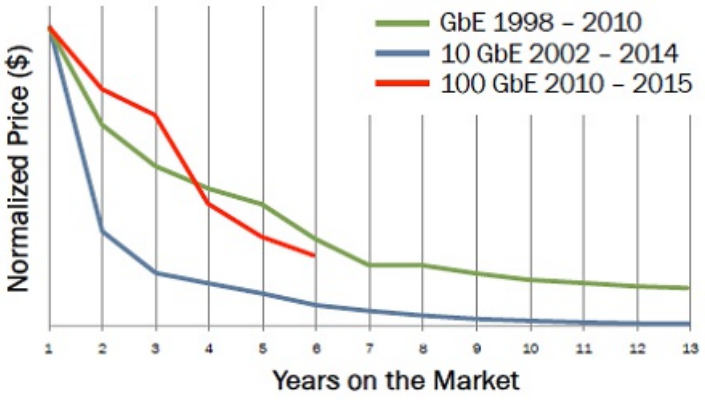
В общем, на пути к 100G возникла потребность в эволюционном шаге. И он был сделан в сочетании с когерентным детектированием. Для определения фазы принимаемого сигнала его смешивают с когерентным и стабильным сигналом - эталоном. В результате совмещения обеих сигналов возникают всплески, которые указывают на интенсивность и фазу сигнала. Вкупе с цифровой обработкой и более сложной модуляцией, когерентное детектирование позволило сделать прорыв в повышении пропускной способности сетей. Вместо включения и выключения лазера, теперь на каждой длине волны для передачи сигналов модулируется фаза и поляризация света, а цифровая обработка сигнала компенсирует большую часть искажений.

При когерентном сложении амплитуда полезного сигнала возрастает соразмерно числу накоплений, так как сигналы совпадают по фазе. Шумы же, по случайности своей природы, складываются энергетически, то есть их амплитуда нарастает в зависимости от числа накоплений в степени 0,5. Данный эффект получил в свое время большое распространение в радиолокации, чтобы при уменьшении мощности излучения сохранить дальность обнаружения цели.

В 100-гигабитных системах DWDM с когерентным детектированием на сегодня реализована квадратичная фазовая манипуляция (quadruple phase shifted keying, QPSK) с двойной поляризацией (dual polarization, DP). При двойной поляризации передается сразу два сигнала на одной частоте, но они поляризованы под углом 90 градусов, в вертикальной и горизонтальной проекции, поэтому друг другу не мешают. В модуляции QPSK за один тактовый интервал передается сразу два символа, то есть два бита, так как используется четыре значения фазы (00, 11, 01, 10). Сочетание двойной поляризации, где один частотный канал несет в два раза больше данных, с модуляцией QPSK, где за один тактовый интервал передается в два раза больше битов, кардинально увеличивает спектральную эффективность до 2 бит/с/Гц.

Впрочем, DP-QPSK (иначе PM-QPSK, polarization-multiplexed) при когерентном детектировании и 100 Гбит/с – это только первый шаг к новым вершинам емкости сетей. Ведь манипуляцию QPSK можно представить как частный случай одного из вариантов в созвездии M-QAM (quadrature amplitude modulation, квадратурная амплитудная манипуляция), где передаваемые символы определяются амплитудой синуса и косинуса колебания. Для QPSK вместо M в QAM будет соответствовать значение 4, за которым затем следуют (минуя 8) привычные для связи цифры 16, 32, 64, 128, 256 …. Здесь каждый следующий уровень значения повышает спектральную эффективность алгоритма. Так что куда стремиться, как минимум на первое время есть, ибо сети связи на пределе 100G вряд ли остановятся.

Правда, сегодня когерентный 100G в сетях связи зачастую пока не оправдано дорог. Для примера, тот же Ростелеком несмотря на то, что недавно объявил совместно с Huawei об успешном испытании когерентного 100G на участке магистральной сети «Москва-Самара», для модернизации транзита Европа – Азия, до недавнего времени все еще решал, пойти ли ему новой тропой 1x100G, или привычной, где 100G получаются сложением 10x10G. Или та же Tata Communications для модернизации своего атлантического маршрута Лондон - Нью-Йорк выбрала решение на 40G. Однако время, безусловно, работает на когерентный 100G, - решения на его основе по мере падения стоимости будут появляться в сетях операторов дальней связи все чаще и чаще. Уже сегодня решения когерентного 100G развернуто в сети ESNet и Interne2 на маршруте от восточного побережья Северной Америки до западного. Или в сети Hibernia Atlantic на трансатлантическом направлении от Голифакса, Новая Шотландия в Канаде, до Саутпорта, Англия.



Ethernet average selling price (ASP) trends, 100 GBE and Beyond (Greg Hankins, Brocade), NANOG52