

Близится кризис в оптических сетях

Можно образно сказать, что сегодня практически каждый телефонный звонок, каждое посылаемое sms-сообщение, каждый загружаемый на youtube видеоролик в какой-то момент преобразовывается в элементарные частицы света (фотоны) и несется с бешеной скоростью (более 200 тысяч км/с) может быть даже по дну океана по сверхтонким стеклянным нитям. Таких нитей на сегодняшний день задействовано более двух миллиардов километров, они могут обернуть земной шар более чем 50000 раз.

Теперь если говорить про оптические сети более серьезным языком, то можно отметить следующее. До недавнего времени потенциал стандартных одномодовых волокон превышал необходимый для решения проблемы роста трафика задел по пропускной способности оптических сетей. В сравнении с попытками разработать принципиально новую волоконную платформу, долгое время существовали гораздо более экономически эффективные способы повышения пропускной способности. Эти способы долгое время шли нога в ногу с общемировыми темпами роста трафика и реализовывались, например, через простое обновление терминального оборудования с целью более эффективного использования доступной полосы пропускания. Однако времена меняются и сегодняшние лабораторные эксперименты, связанные с передачей данных через стандартные одномодовые волокна, все ближе к фундаментальным пределам пропускной способности одномодовых волокон. В соответствии с теорией информации, этот предел для текущих волокон оценивается примерно в 100-200 Тбит/с. Данный факт вызывает обеспокоенность в связи с невозможностью в будущем планомерного повышения в разы пропускной способности сетей и был назван "кризисом емкости" оптических сетей. Для обсуждения возникшей ситуации уже устраивают различные симпозиумы, стараются найти пути решения. Попробуем далее объяснить суть данного факта. Для более лучшего понимания, сначала рассмотрим, как хронологию темпов роста скоростей передачи данных на земном шаре вместе с эволюцией скоростей линейных интерфейсов.

Особенности эволюции скоростей систем связи и линейных интерфейсов

На графике ниже отражены значения показателей, характеризующих емкость телекоммуникационных систем за последние 500 лет. В общем случае система связи может быть количественно оценена значением символьной скорости и количеством информации, приходящимся на 1 символ (число бит на символ). Зеленые маркеры на рис. 1 показывают значение скорости системы связи в бит/с в тот или иной момент времени.

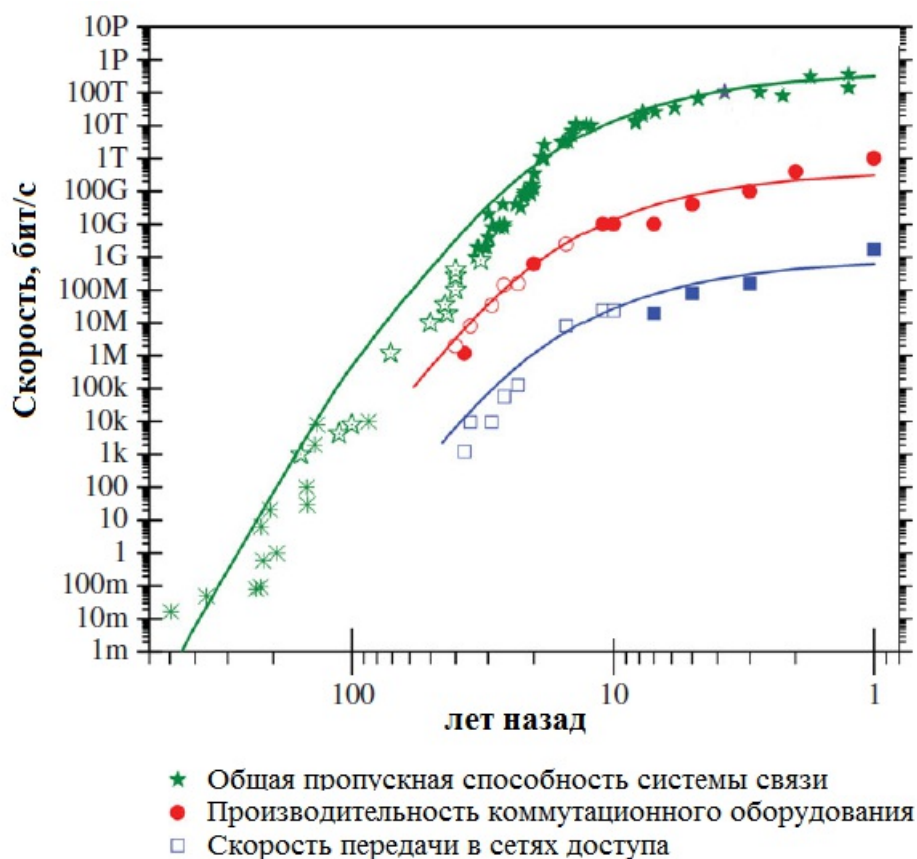


Рис. 1

Данные результаты отражают историческое развитие способностей систем передачи информации, начиная с ранних систем связи, таких как набор ретрансляционных вышек, в которых для передачи сообщений от станции к станции использовались сигналы в виде зажженных огней. Как известно, в подобных первых системах связи передача сообщений проходила медленно, и они обычно служили для передачи сигнала тревоги. Для передачи более сложных сообщений необходимо было значительно повысить производительность путем увеличения информационного содержания каждого сигнала.

Крестики на рисунке характеризуют скорости беспроводных систем связи, включая такие допотопные, как оптический телеграф Мюррея и семафор братьев Шапп. Как видно из рисунка, в тот ранний период наблюдался экспоненциальный рост скорости передачи, хотя среднегодовой темп роста составлял ниже 10%.

В XIX в. для передачи сообщений стали использовать электрические сигналы, появился телеграф. Темпы роста производительности систем связи возросли примерно до 20% в год. Использование электрических сигналов позволило значительно снизить затраты по эксплуатации линий связи за счет внедрения взамен управляемых людьми ретрансляционных вышек электронных усилителей. В последующие 50 лет уже были сконструированы трансатлантические кабели и вскоре линии связи охватили весь земной шар, достигнув в 1872 году города Аделаида в Австралии.

В течение всего следующего столетия медножильные кабели связи позволили наращивать емкости сетей, появились коаксиальные кабели. В системах связи стали появляться различные схемы мультимплексирования, модуляции и т.д. Однако предел емкости для таких линий связи составлял около 1 Гбит/с. К тому же сочетание большого коэффициента затухания и сильно ограниченной полосы канала стало жестко ограничивать развертывание систем повышенной пропускной способности. Потребовалась новая технология передачи данных – появились ВОЛС. Дальнейшее развитие сетей, думаю можно не описывать. Если кто не знаком с историей развития ВОЛС, но хочет узнать, можно почитать об этом, например, [здесь](#).

В школьных учебниках истории можно было бы отметить, что скорости коммерческих линейных интерфейсов в оптических транспортных системах, начиная с середины 80-х годов, неуклонно увеличивались примерно на 20% в год. Вследствие этих темпов объем передачи данных по одному волокну в середине 90-х годов составлял уже порядка десятков гигабит, что потребовало разработки новых технологий, повышающих общую пропускную способность сетей. Решением проблемы стали системы WDM. В настоящее время сетевой трафик также растет [стремительными темпами](#), ежегодно он увеличивается в пределах от 30% до 90% в зависимости от вида трафика.

Можно отметить следующие интересные моменты. В течение последних десятилетий рост производительности маршрутизаторов (вследствие эволюции микропроцессоров и других вычислительных устройств в соответствии с законом Мура) совпадал с темпами увеличения трафика (см. рис 2). В то же время темпы роста скорости высокоскоростных оптических интерфейсов составил лишь 20%. Таким образом, можно отметить следующий факт: темп роста производительности маршрутизаторов оказался более быстрым в сравнении с темпом роста их интерфейсных скоростей приблизительно на 40-60%.

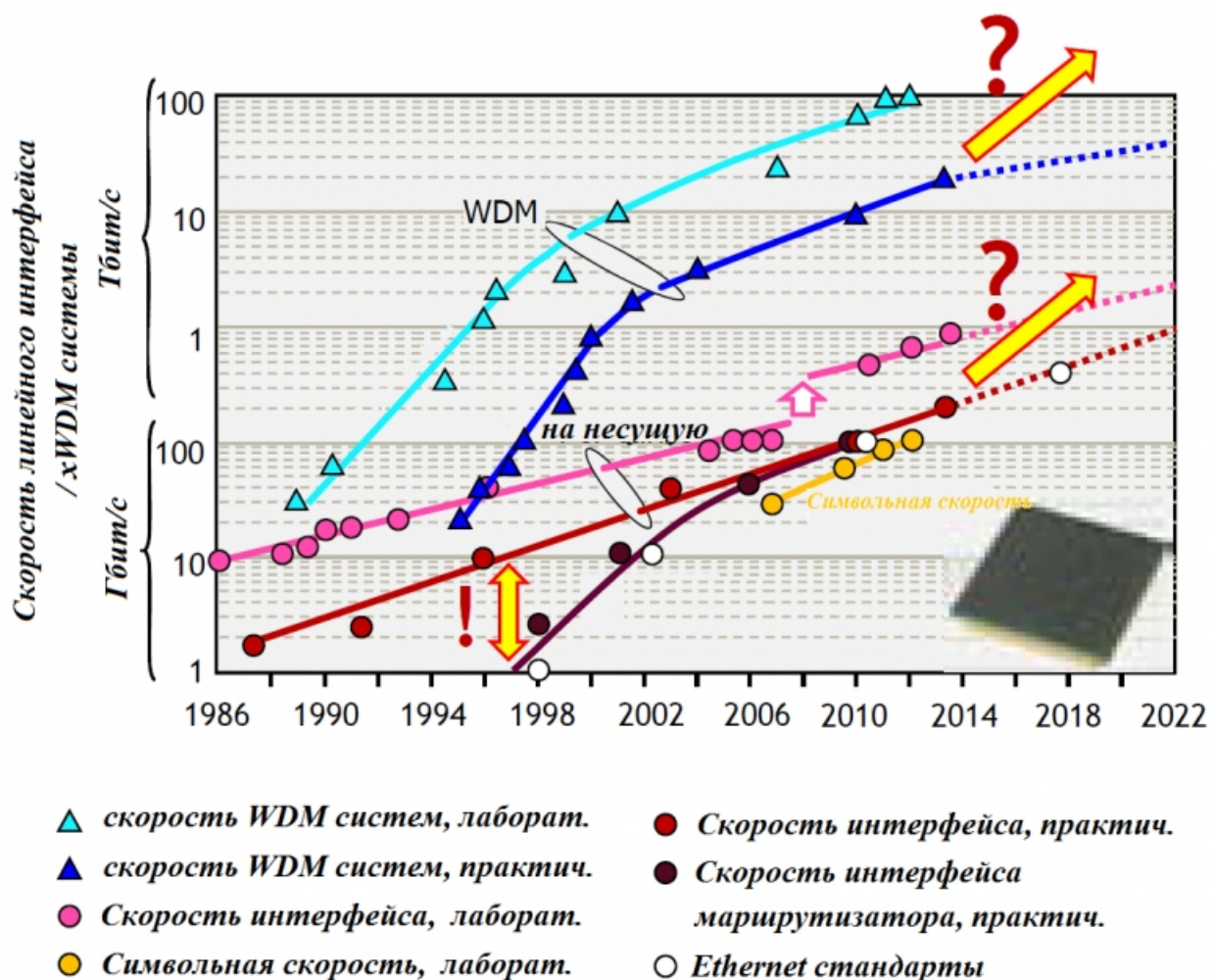


Рис. 2 – Сравнение скоростей оптических систем и скорости линейных интерфейсов

Как видно из рисунка 2, примерно в 2005 году возможности оптических линейных интерфейсов стали ограничивать рост скорости интерфейсов маршрутизаторов. Стандартизация интерфейса 100G Ethernet и транспортного модуля OTN на 100 Гбит/с была осуществлена только в 2010 году, а стандартизация интерфейса 400G Ethernet только в 2017 году. Можно выделить еще одно следствие, которое вытекает из диспропорционального роста электрических и оптических интерфейсов – снижение в будущем уровня агрегации Ethernet потоков в один оптический канал. То есть, если ранее один оптический канал 100G включал десять компонентных потоков 10GE, то со стандартизацией интерфейса 100G Ethernet такого уровня агрегации уже не будет.

Сегодня темпы роста пропускной способности WDM систем передачи замедлились со 100% ежегодного роста в 1990-х годах до всего лишь 20% в год. В 2010 году коммерческие сети с системами WDM могли поддерживать приблизительно 100 оптических каналов со скоростью 100 Гбит/с каждый. Таким образом, пропускная способность одного волокна доходила до 10 Тбит/с. При ежегодном темпе роста трафика в 40% следует ожидать, что коммерческие системы должны будут поддерживать в 2024 году емкость около 1 Пбит/с. Это отнюдь не означает, что к тому времени такие системы будут задействованы на все 100%, чего и не было в случае систем 2010 года, однако коммерческая необходимость в начале установки таких систем, скорее всего, будет существовать.

Что следует из всех представленных фактов? Представьте, что в детстве в 6 лет вы могли наесться одним яблоком и небольшой тарелкой каши. В 10 лет нам было нужно уже в два раза больше: два яблока плюс порция каши выросла в 2 раза. В 14 лет мы уже едим яблоки, тарелку каши, тарелку супа плюс нам еще нужен компот. Аппетит со временем у нас растет в геометрической прогрессии, и в 20 лет мы едим как сумоист, а в 32 года, как Робин Бобин Барабек (как в стихотворении Маршака). Таким образом, если в самом начале наш аппетит был совершенно традиционным и реальным для обычного человека, то в дальнейшем многократные темпы роста привели нас к немыслимым объемам, труднореализуемым на практике. Такая же ситуация происходит и в современных оптических сетях.

Постоянное повышение значения спектральной эффективности в существующих сетях не может продолжаться бесконечно – существуют ограничения в виде фундаментальных пределов пропускной способности канала. Ограничения обусловлены как технологическими несовершенствами передатчиков, приемных модулей, мультиплексоров и оптических усилителей (внутренний шум оптических усилителей), так и свойствами самого волокна (нелинейные эффекты). Все это приводит

к различным искажениям сигнала и соответственно к практическим ограничениям скорости передачи. Напомним, что фундаментальное ограничение максимальной скорости передачи в канале называется пределом Шеннона – физическое ограничение, лежащее в основе самого "кризиса емкости".

Сегодня понятия кризис емкости оптических сетей и предел Шеннона широко используются в научном сообществе как обоснование необходимости срочной разработки инновационных решений. Однако следует отметить, что данный термин можно воспринимать и толковать по-разному. Например, в отрасли по разведке и добычи нефти, фраза "кризис емкости" или "кризис способностей" появилась намного раньше и подразумевала приближающееся истощение имеющихся ресурсов. Распространенное толкование этой фразы означает ограниченную, но все же непрерывно продолжающуюся поставку конечного объема ресурсов. В таком же контексте можно относиться к "кризису емкости" применительно к оптическим сетям. То есть в будущем кризис способностей будет означать постоянное существование сетей оптической связи, поддерживающих большую часть современного общества, с экономической, административной и социальной точек зрения, но с ограничениями на доступность к услугам сети.

Можно предположить, что "кризис емкости" может привести к изменениям порядка расчета у провайдеров за сетевые услуги. Например, потребители услуг будут платить операторам за фактическую используемую ширину полосы частот. Также можно предположить, что через столетия после создания сетей с более высокой пропускной способностью, ресурсы сетей, наконец, будут соответствовать нашим конечным желаниям, и темпы роста трафика выше 10% будут отмечены в истории просто как особенность периода конца XX в. - первой половины XXI. Однако, судя по появлению все новых и новых информационных приложений, достаточных доказательств того, что спрос начинает насыщаться, нет. Сейчас в основном преобладает подход "построй это, и оно придет", т.е. сначала создаются новые технологии, а потом они уже становятся востребованными у людей. Существуют и другие сторонники, придерживающиеся подхода "необходимо разрабатывать новое по мере необходимости". Последние считают, что только при таком мышлении человечество будет развиваться полноценно и не загонит себя, в конечном счете, в тупик. По какому подходу должно развиваться общество, а вместе с ним и телекоммуникационные сети вопрос спорный, дискуссии по этому вопросу уже немалоды.