



Это оборудование объединяет 10 каналов по 10 Гбит/с и передает их в одном 100 Гбит/с DWDM-канале.
Фото предоставлено Т8

КАКОЙ ЖЕ РУССКИЙ НЕ ЛЮБИТ БЫСТРОГО ДОСТУПА К ИНТЕРНЕТУ

Небольшая российская компания ООО «Т8» уже второй год подряд ставит мировые рекорды в передаче данных по оптоволокну. В мае компания стала одним из победителей на конференции Startup Village в «Сколково». Генеральный директор «Т8» Владимир Трещиков полагает, что достигнутые скорости — не предел, и он знает, зачем они нужны.

Мы создаем магистральные системы передачи данных, которые связывают города, страны. Допустим, в Москве с доступом в Интернет особых проблем нет. Но попробуйте отъехать на 20 км, в областной город или тем более в дачный поселок — и все, Интернет, в привычном понимании, закончился. То есть скорости такие, что они уже не удовлетворяют совершенно. В других

крупных городах ситуация аналогичная. А люди сегодня стремятся за город, и не только отдыхать, но и жить хотя бы часть времени, потому что это — уровень жизни, экология, здоровье. Значит, спрос на дальнейший охват территорий скоростной связью есть, и это тенденция глобальная, на многие годы вперед. Второй тренд глобальный — это беспроводные сети, LTE.

Дома вы фильм за пять минут скачиваете — а в сквере на скамеечке? В кафе? В метро? Спрос есть, люди сегодня хотят быть всегда на связи: не просто по телефону, а на скоростной связи с Интернетом, как им уже привычно дома или в офисе, следовательно, будут активно развиваться сети скоростной беспроводной связи, и это тоже глобальная тенденция. Кроме того, даже в больших городах, несмотря на уже достигнутые высокие скорости, их все равно продолжают повышать, модернизируют линии доступа. В Москве, например, прокладывают волокно в каждую квартиру (PON), предлагают физическим лицам безлимитные каналы 100 Мбит/с. Значит, есть свой потребитель и на эту услугу.

А чем больше охват скоростным доступом, чем выше скорости — тем сильнее загрузка магистральных каналов. Типичный магистральный канал на сегодняшний день имеет скорость 10 Гбит/с — но этого уже не хватает. У ведущих российских операторов связи магистральные каналы уже к 2012 г. были загружены более чем на 90%. Приходится переходить на 100 Гбит/с в канале, менять каналообразующее оборудование, и этот процесс уже идет, например, в ОАО «Ростелеком», и достаточно активно.

В целом по миру ожидается рост трафика в 12 раз в ближайшие 10 лет, причем это достаточно консервативный прогноз от Bell Labs¹. В России ситуация более динамичная, например ОАО «Транстелеком» прогнозирует 10-кратный рост трафика на своих магистральных сетях уже через пять лет². А максимальная, предельная емкость существующих коммерческих DWDM-систем составляет 8-9,6 Тбит/с (80-96 каналов по 100 Гбит/с). Поэтому все то, что мы делаем — прежде всего перспективные системы 25, 40, 100 Тбит/с, — абсолютно актуально, востребованно, и не только в России, но и на мировом рынке.

В магистральной линии связи данные передаются по оптическому волокну. Грубо говоря, это такая длинная стеклянная ниточка, по которой распространяется свет. Лазер светит в волокно, сигнал лазера определенным образом модулируется — и несет информацию. А на другой стороне приемник этот свет принимает, расшифро-

вывает, исправляет накопленные ошибки — и таким образом получает переданные данные.

Скорость передачи зависит от частоты модуляции несущего сигнала. Казалось бы, хочешь увеличить скорость — повышай частоту модуляции. Но тут, к сожалению, уже достигнут некоторый предел, связанный с физическими свойствами волокна. Максимальная скорость работы скоростных оптоэлектронных устройств, в том числе модуляторов, так же как максимальная скорость передачи данных на печатной плате, ограничена частотой 50 ГГц. Это предел на сегодняшний день, и как за него выйти, пока не придумали.

В ближайшие 10 лет в мире ожидается рост трафика в 12 раз, причем это достаточно консервативный прогноз от Bell Labs. В России ситуация более динамичная, например, ОАО «Транстелеком» прогнозирует 10-кратный рост трафика на своих магистральных сетях уже через 5 лет

В реальности работают не на пределе, а на уровне примерно 30 ГГц. Если за один такт модуляции передавать один бит информации, можно получить скорость 25 Гбит/с (с учетом того, что какая-то часть пропускной способности требуется для избыточного кодирования, чтобы потом на приеме исправлять ошибки, накопленные при передаче). Если использовать две поляризации в волокне (на одной и той же частоте лазера), можно вдвое скорость увеличить, а если еще дополнительно сделать более сложную форму сигнала и передавать два бита за такт — то в четыре. Так, собственно, и устроен канал 100 Гбит/с в современных системах.

Как можно дальше увеличить скорость? Тут есть два пути: либо дальше увеличивать сложность сигнала и количество бит, передаваемых за один такт модуляции, либо передавать несколько каналов по одному волокну одновременно на разных частотах.

¹ Steven K. Korotky, *Traffic Trends: Drivers and Measures of Cost-Effective and Energy-Efficient Technologies and Architectures for Backbone Optical Networks*. Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, 2012.

² По материалам конференции Transnet 2013.

Вот эта идея, с несколькими каналами, уже давным-давно была придумана. Это и есть WDM (wavelength division multiplexing — волновое мультиплексирование): когда в одном волокне передаются данные одновременно на разных длинах волн.

Ведь лазер светит на строго определенной длине волны — это не лампочка накаливания, которая излучает во всем видимом диапазоне (да еще и в инфракрасном греет). Поэтому можно взять несколько лазеров с разными длинами волн и ввести излучение от этих лазеров в одно волокно. Если все грамотно сделать, то свет от разных лазеров друг другу сильно мешать не будет, потоки данных будут передаваться практически независимо. Таких лазеров можно поставить несколько десятков, современный уровень коммерческих систем — порядка сотни каналов. А перспективные разработки есть и по 200, и по 400 каналов.

Несколько лет назад в оптике случился очередной прорыв: оказалось, что можно создавать системы связи на новом принципе, с когерентным приемом оптического сигнала — более скоростные, более дальнобойные, с массой других преимуществ

Когда такие системы только начали разрабатывать, умели передавать одновременно всего несколько каналов, расстояние между ними составляло 200 ГГц и более. Такие системы получили название CWDM (coarse WDM — грубое волновое мультиплексирование). Они и сейчас успешно используются в своей рыночной нише. Потом научились десятки каналов передавать, с расстоянием между ними 100 ГГц, 50 ГГц и даже меньше. Такие системы называются DWDM (dense WDM — плотное волновое мультиплексирование).

В оптике очередной прорыв случился несколько лет назад — это когерентные системы. Тут несколько факторов сыграло роль: это и разработка стабильных узкополосных источников излучения, и появление производительных цифровых процессоров,

которые позволили цифровым образом сигнал эффективно и быстро обрабатывать, и другие технологические новации. А все вместе привело к революции: оказалось, что можно создавать системы связи на новом принципе, с когерентным приемом оптического сигнала — более скоростные, более дальнобойные, с массой других преимуществ. Весь мир двинулся в этом направлении, и мы здесь заняли очень хорошие позиции, передовые.

Тут залог успеха, как в любой инновации, которую коммерциализируют и выводят на рынок, — это, во-первых, глубокое понимание технологий и научных основ этой инновации, а во-вторых, хорошее понимание рынка, позиция на рынке. У «Т8» есть и то и другое. У нас в компании работают два профессора из МФТИ и МГУ, одни из лучших специалистов в стране по волоконной оптике, более десяти кандидатов наук, коллектив разработчиков очень сильный. На рынке мы более десяти лет, прекрасно знаем и российскую специфику, и на международном уровне поддерживаем обширные контакты с передовыми разработчиками, производителями комплектующих. Вот в сумме это, наверное, и дало такой эффект: в разработке новых когерентных систем мы оказались сразу на мировом уровне, а где-то даже с рекордными результатами. Важно сейчас не растерять это преимущество, наращивать темп.

Но в нашей области далеко не все зависит от самой компании. Только один пример. Китайская Huawei Technologies получила кредит 30 млрд долл. от китайского правительства для поддержки экспорта своей продукции, в том числе и на российский рынок. И у нас в России сегодня, например, 60% магистральных сетей ОАО «Ростелеком» построено на оборудовании Huawei. А в США Huawei на магистральные сети вообще не пускают. В недавнем интервью Майкла Хайдена, бывшего главы ЦРУ и АНБ, об этом вполне говорится³. Тут нет свободного рынка, как в учебниках учат, — это стратегические системы передачи данных, вопрос национальной безопасности.

У нас в «Т8» создано оборудование мирового класса. Но чтобы создать компанию

³ Christopher Joye. Transcript: Interview with former CIA, NSA chief Michael Hayden. Australian Financial Review. Jul 19, 2013.



Владимир Трещиков: «Самое главное достижение в том, что успехи Т8 основаны на наших собственных научных и технических разработках»

мирового класса, нужен рынок сбыта — а для нас это прежде всего российские операторы связи. Ни в Америке, ни в Китае нас с нашим оборудованием не ждут — они защищают своих производителей и свою

национальную безопасность. И помогают своим производителям, по мере сил, завоевывать чужие рынки — например, кредитами.

У нас любят брать на вооружение передовой западный опыт — так вот, здесь как раз тот случай, когда я обеими руками «за». Конечно, победа нашего проекта в «Сколково» — это уже большое подспорье. Но главное, повторю, — рынки сбыта, как для любой коммерческой компании. А конкурентоспособный продукт мы сделали.

В «Сколково» мы пришли с проектом системы 25 Тбит/с. Конкретно, это разработка магистральной DWDM-системы с максимальной емкостью 250 каналов по 100 Гбит/с. Это, как уже говорилось, первый шаг от существующих коммерческих систем 8-9,6 Тбит/с к будущим системам 100 Тбит/с.

Здесь есть целый ряд вопросов технологических, неочевидных, которые требуют и научного исследования, и разработки достаточно тонкой, и экспериментов. Количество каналов в системе можно по-разному повысить. Можно их плотнее друг к другу прижать (например, вместо 50 ГГц, как сейчас, сделать шаг в 25 ГГц). А можно используемый спектральный диапазон расширить. В обоих случаях возникают сложности. Когда вы каналы плотнее ставите, возрастает их влияние друг на друга, усиливаются помехи, падает дальность связи. Если диапазон расширять — нужно делать усилители нестандартные, для широкого диапазона, сейчас такие комплектующие не производятся серийно.

В реальности в нашей системе будет реализована какая-то комбинация факторов, комплексное решение, максимально эффективное и по экономическим параметрам, и по техническим. Мы четко знаем, что нужно делать, у нас есть очень конкретный план технический, одобренный экспертами «Сколково», и прототип системы мы уже в следующем году будем готовы показать.

Что дальше? Как перейти к скоростям 40, 100 Тбит/с? Это более далекая перспектива, но наработки у нас уже есть, и есть общее понимание направления, в котором нужно двигаться. Из двух имеющихся способов повысить скорость в линии — либо больше каналов передавать в одном волокне (DWDM), либо больше бит передавать за один такт модуляции, усложняя форму сигнала, — мы пока идем по

первому пути, ведь его возможности еще далеко не исчерпаны. Но уже в близком будущем придется и второй способ использовать. На техническом языке это называется «переход к форматам модуляции высокого порядка».

Сейчас в линиях 100 Гбит/с используется модуляция DP-QPSK: сигнал в каждом канале идет по двум поляризациям, и в каждой поляризации используется четыре состояния (фазы) сигнала. Четырьмя состояниями можно закодировать два бита информации (00, 01, 10, 11). Таким образом, в двух поляризациях одновременно передается 4 бита.

Перспектива дальнейшего развития DWDM-систем — в использовании более сложных форматов модуляции, которые позволяют передать больше бит за один «символ» (такт модуляции). Например, есть модуляция DP-16QAM (8 бит на символ) — сразу в два раза увеличивает скорость в канале, по сравнению с DP-QPSK. Но при этом сигнал становится сложнее принимать, возрастают требования к линии связи: приходится либо уменьшать дальность линии (чаще выполнять регенерацию сигнала), либо увеличивать мощность передатчика, либо совершенствовать технологию приема.

Это все непростые задачи, но весь мир сейчас ими занимается, все ведущие лаборатории. Это следующий шаг в развитии DWDM, после увеличения количества каналов. И мы этой тематикой тоже активно занимаемся — как в нашем научном отделе, так и в нашей лаборатории в Московском физико-техническом институте (Научный центр волоконной оптики при факультете радиотехники и кибернетики).

Абстрактно рассуждая, можно было бы просто использовать больше волокон. Но проложить магистральное волокно — дорогостоящее удовольствие. Это десятки тысяч километров линий, с промежуточными пунктами, усилителями, каналообразующим оборудованием. Тут требуются инвестиции совсем другого порядка, чем простая замена приемно-передающего оборудования с сохранением уже проложенного волокна. Поэтому, конечно, операторов

связи сегодня интересуют прежде всего такие технологии, которые позволяют из существующего волокна выжать максимум, не меняя всю эту кабельную и сопутствующую инфраструктуру.

При этом, конечно, ведется масса исследований и экспериментов с нестандартными волокнами. Есть, например, многосердцевинные волокна (MCF- multicore fiber). Очень активно развивается сейчас эта тема, публикуются научные статьи. В 2012 г. японцы поставили рекорд — 1 Пбит/с (1000 Тбит/с) по 12-сердцевинному волокну. Правда, всего на 50 км. Такие системы уже сейчас имеют свою нишу, безусловно, например в странах с близко расположенными крупными городами, между которыми идет интенсивный трафик (Япония, Китай, США, страны Западной и Центральной Европы). Но для российских магистралей, когда несколько волокон идут на несколько тысяч километров через всю страну, конечно, приоритет в обозримом будущем останется за наращиванием емкости по имеющемуся волокну. Тем более что техника пока позволяет.

Один из рекордов «Т8», установленных в России: осуществлена передача сигнала со скоростью 100 Гбит/с на 4000 км в 80-канальной DWDM-системе без компенсации дисперсии. Главное в этом достижении — дальность и отсутствие компенсаторов дисперсии. Канальная скорость и число каналов — это более-менее стандартные вещи, основная борьба идет за дальность (для магистральных линий).

Дальность передачи ограничивается несколькими факторами: прежде всего, это OSNR (отношение сигнал — шум). Полезный сигнал при распространении по волокну постепенно затухает, а шум растет — соответственно, отношение уровня сигнала и уровня шума (OSNR — optical signal-to-noise ratio) постепенно падает. Важнейшая характеристика линии связи — при каком OSNR приемник еще способен принять сигнал.

У нас по этому параметру система имеет исключительные характеристики, рекордные — для уверенного приема требуется

OSNR всего 12,5 дБ. Тут мы примерно на 3 дБ опережаем ближайших конкурентов. По дальности этого хватит и на 8000 км.

Но при таких расстояниях уже другие факторы начинают дальность ограничивать: прежде всего хроматическая дисперсия. Это когда у вас на одной длине волны свет быстрее распространяется, чем на другой. Набегает задержка, которую надо время от времени компенсировать, возвращать сигнал DWDM к исходной форме, чтобы приемник мог его потом расшифровать. В некогерентных линиях связи для этого используются компенсаторы дисперсии: катушки специального волокна, где дисперсия имеет обратный знак. Это, во-первых, удорожает линию связи (специальное волокно дороже обычного), во-вторых, удлиняет ее на 10-20%.

Проложить магистральное волокно — дорогое удовольствие. Это десятки тысяч километров линий, с промежуточными пунктами, усилителями, каналообразующим оборудованием. Требуются инвестиции совсем другого порядка, чем простая замена приемопередающего оборудования с сохранением уже проложенного волокна

В нашей системе компенсация дисперсии производится не в линии, а на приеме сигнала, при его цифровой обработке мощным процессором. В прошлом году мы научились компенсировать дисперсию до 70 000 пс, что соответствует 4000 км. А уже в этом году планируем поставить эксперимент с линией 6000 км.

Ну, а самое главное достижение, конечно, — это то, что все это сделано в России, на базе наших собственных научных и технических разработок.

