

Инновации в системах передачи информации

А. ГОЛЫШКО, канд. техн. наук, г. Москва

"Нет ничего более вечного, чем то, что обмотано синей изолентой".

(из докторской диссертации по системам передачи)

Переброска "порций" информации до мест, где производится её персонализированная раздача, — основная цель работы систем передачи. Их история сродни истории телекоммуникаций — от узкоспециализированных проводных и кабельных, преимущественно телефонных, до мультисервисных оптических или эфирных. И в этом историческом процессе не только совершенствовались системы передачи, но и непрерывно снижалась стоимость передачи одного бита информации. Спрос на скоростные телекоммуникационные технологии стал особенно очевидным в последние годы, когда по всему миру начали размещать чрезвычайно много "тяжёлого" видеоконтента. Да и сети мобильной связи с шестью миллиардами пользователей — серьёзный объект для систем передачи. В частности, согласно данным компании Inforga Telecoms and Media, к 2016 г. потребление мобильных данных по всему миру вырастет более чем десятикратно — до 39,75 трлн мегабайт против 3,89 трлн мегабайт в 2011 г. В результате сегодня телекоммуникационный мир работает с сетями передачи на скорости 100G (100 Гбит/с).

На страницах журнала уже рассказывалось о развитии технологий передачи информации по современным волоконно-оптическим кабелям. Однако прогресс не стоит на месте, и сегодня регулярно появляются сообщения о новых технологиях и достигнутых скоростях передачи информации на телекоммуникационных магистральных. И особенно приятно, что там встречаются и отечественные успехи. С них и начнём.

Рекордная российская система DWDM

До 2006 г. большая часть систем DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) строилась по прозрачной схеме, когда каждому клиентскому каналу выделялась отдельная длина волны. С появлением электрических устройств передачи информации нескольких каналов по одной паре волокон (мультиплексов) стало возможно осуществлять электрическое объединение 4—8 клиентских сигналов и передавать их со скоростью 10 Гбит/с. Это экономически эффективно, так как позволяет уменьшить число каналов в DWDM-системе и

использовать меньше дорогих стабилизированных лазеров. С тех пор по меркам телекоммуникационного мира прошло много лет, в производстве оптических систем передачи работают крупнейшие компании-производители мира, и вот уже российская компания Т8 разработала первый в России 100 Гбит/с транспондер DWDM. Т8 ведёт активные разработки DWDM-систем совместно с НТО "ИРЭ-Полус".

Максимальная скорость разработанной 80-канальной DWDM-системы составляет 8 Тбит/с. Сегодня системы такого класса широко востребованы крупнейшими операторами связи. Для демонстрации возможностей DWDM-системы была осуществлена передача на скорости 40 и 100 Гбит/с на 2000 км через каскад усилителей. Оборудование обладает запасом по дальности передачи до 5...6 тыс. км. Излишне напоминать, что в России особенно актуальна передача информационных потоков на большие расстояния без промежуточных усилительных пунктов.

В последнее время начали использоваться параметрические усилители с удалённой оптической накачкой (ROPA — Remote Optically Pumped Amplifier), в которых в оптоволоконном кабеле устанавливается ещё и активное эрбиевое волокно, накачиваемое посредством специализированных лазеров. Соответственно компания Т8 продемонстрировала передачу со скоростью 100 Гбит/с на 400 км без промежуточных усилителей, с использованием технологии ROPA.

При разработке использовались самые современные технологии: формат модуляции 100G DP-QPSK, поляризация мультиплексирование сигнала, коррекция ошибок SoftFEC, обработка сигнала для автоматической коррекции хроматической дисперсии до 50 000 пс/нм. В результате, как сообщает компания, транспондер имеет наилучшие параметры качества сигнала в мире: требуемое отношение сигнал/шум для оптического сигнала OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) — 12,5 дБ. Благодаря отличным оптическим характеристикам транспондер Т8 может быть использован на линиях, построенных для скоростей передачи 10 Гбит/с, вообще без их модернизации.

Нельзя не упомянуть, что компания Т8 создана выпускниками МФТИ и имеет 100 % российского капитала. Основу

компании составляют специалисты — выпускники МФТИ, МГУ, МГУ, МИФИ и МТУСИ, в том числе два доктора и десять кандидатов наук.

На супер-каналах

В конце прошлого года компании Infinera и TeliaSonera International Carrier объявили об успешном завершении первого в мире терабитного оптического соединения, основанного на "супер-каналах" 500 Гбит/с. Эксперимент охватил 1105 км волокна между Лос-Анджелесом и Сан-Хосе (Калифорния) и продемонстрировал начало нового периода в области оптических сетей. Супер-каналом участники эксперимента назвали "большой блок оптической мощности, созданный путём объединения нескольких оптических носителей в единый управляемый объект так, чтобы было возможно масштабировать пропускную способность оптических сетей без дополнительных эксплуатационных затрат и других сложностей". Вкратце супер-каналы на основе фотонных интегральных схем (PICs) позволяют операторам предоставлять канал в 500 Гбит/с "лёгким движением человеческого пальца".

400G и более

Компания Huawei не использует в своей лексике понятия "супер", а просто создаёт новое поколение оптических систем передачи на 400 Гбит/с и более. Как известно, вся современная линейка оборудования оптических систем передачи строится по простой схеме 10G—40G—100G—400G—1T—... Сегодня во всём мире идут работы по реализации того, что будет "после 100G" для создания ультраширокополосных сетей. Весной Huawei объявила о создании первой в мире системы магистральной передачи 400G DWDM с самой большой в отрасли пропускной способностью (до 20 Тбит/с) по одному волокну (в C-диапазоне: 1530...1565 нм) на расстоянии до 1000 км без промежуточной электрической регенерации. Пока это прототип 400G DWDM, в котором, как заявляют в компании, используется уникальный метод когерентного приёма, новые алгоритмы и высокопроизводительные оптические модули. Продемонстрированы подключение услуг 400GE (Gigabit Ethernet) и 4x100GE, а также поддержка платформ WDM/OTM Huawei, что позволит плавно модернизировать существующие сети 40G и 100G до 400G.

В мае Huawei представила прототип системы DWDM с самой высокой эффективностью использования спектра среди существующих решений, поскольку поддерживает различные интервалы между каналами с минимальным шагом 12,5 ГГц. Все современные DWDM-системы имеют интервал между каналами 50 или 25 ГГц, и такая эффективность использования спектра уже недостаточна для сетей 400G или сетей передачи 1T с поддержкой множества несущих. В свою очередь, продукт Huawei поддерживает одновременную передачу 40 G, 100 G, 400 G и 1 T и совместим со всеми традиционными

системами. Технология эффективного использования спектра является одной из основных технологий оптических сетей следующего поколения с регулируемой полосой пропускания. Сигналы таких сетей обеспечивают автоматическую подстройку режима модуляции и скорости передачи в зависимости от протяжённости линии и ёмкости услуги, а также постоянное изменение диапазона используемого спектра. Шаг 12,5 ГГц обеспечивает более гибкую настройку полосы пропускания, дальности передачи и частотного диапазона, что освобождает частотные ресурсы для передачи данных.

Суперчип

Учёные корпорации IBM сообщили о создании прототипа оптического чипсета (функционального набора микросхем), получившего название Holey Optochip, который является первым параллельным оптическим приёмопередающим модулем, способным передавать 1 Тбит/с (эквивалентно одновременной загрузке 500 фильмов в формате HD). Чистая скорость (raw speed) одного приёмопередатчика, построенного на революционном опточипе, эквивалентна пропускной способности канала, который используют 100 тыс. пользователей с обычным на сегодняшний день высокоскоростным интернет-доступом в 10 Мбит/с (передача всего web-архива Библиотеки Конгресса США займёт не более часа).

Инженеры-новаторы из лаборатории IBM создали Holey Optochip, проделав 48 отверстий в стандартном 90-нм КМОП-чипе (CMOS chip). Отверстия обеспечивают "оптический доступ" (прохождение световых импульсов) через заднюю (тыльную) часть чипа к 24 приёмным и 24 передающим каналам. Такая технология позволила создать сверхкомпактный, высокопроизводительный и энергетически эффективный оптический приёмопередающий модуль, способный обеспечивать рекордные скорости передачи данных. К тому же разработчики построили Holey Optochip из коммерчески доступных сегодня компонентов, что открывает потенциальную возможность его удешевления при крупномасштабном производстве.

Отвечая экологическим требованиям в рамках модной сегодня концепции "зелёных вычислений" (green computing), Holey Optochip достигает рекордной скорости передачи данных при показателе энергетической эффективности (характеризующем количество энергии, необходимой для передачи бита информации), который является одним из лучших среди когда-либо зарегистрированных аналогичных результатов, сообщают в IBM. Суперчип потребляет менее 5 Вт энергии, т. е. мощность, потребляемая 100-ваттной электрической лампочкой, может обеспечить питание 20-ти таких устройств. По мнению корпорации, такой прогресс в реализации энергосберегающих межсоединений очень важен для компаний, использующих высокопроизводительные вычислительные системы, поскольку

ку позволяет управлять энергетической нагрузкой при выполнении энергоёмких приложений, таких как аналитика, моделирование данных и прогнозирование.

Математика на свету

В конце 2011 г. в научном журнале Nature Photonics рассказывалось о том, что инженеры создали новую технологию сверхбыстрой передачи информации, позволяющую передавать с помощью всего одного лазерного луча до 26 Тбит/с (с подобной скоростью для упомянутой выше библиотеки в оцифрованном виде понадобилось бы 10 с). В основе лежит технология на основе быстрых преобразований Фурье, позволяющая упаковать в один световой луч более 300 различных оттенков, каждый из которых представляет собственный поток информации.

Ранее оптические технологии также позволяли передавать данные на приличных скоростях, но для того, чтобы как-то поднять скорость передачи информации, разработчики просто добавляли ещё один или несколько лучей. Одной из основных технологий, реализованных в новинке, является "ортогональное частотное разделение с мультиплексированием" (разделяемое, кстати, в радиодиапазоне в технологиях мобильной связи WiMAX и LTE), т. е. разделение луча на несколько подпотоков, каждый из которых отвечает за свои данные, хотя сам луч при этом не дробится на несколько лучей. Правда, для того, чтобы работать с таким замысловатым лучом, требуются передатчики и приёмники довольно сложной конструкции, которые должны быть в состоянии одновременно создавать и считывать до 300 световых потоков.

В лабораторных условиях была опробована даже технология передачи данных со скоростью до 100 Тбит/с, и у этой новой технологии есть ещё одно серьёзное преимущество — энергоэффективность, поскольку есть разница между передачей трёхсот отдельных лазерных лучей и передачей одного луча с тремястами составляющими.

Разработчики говорят, что им пришлось создать так называемую "частотную ловушку", чтобы приёмник не потерял ни один из световых потоков. Созданные на сегодня ловушки способны работать с 350 световыми потоками в одном луче. Быстрое преобразование Фурье используется для идентификации световых потоков по каким-либо параметрам, например по времени. То есть приёмник должен заранее знать, когда до него дойдёт та или иная часть светового спектра. Наиболее удивительным даже для разработчиков оказалось то, что новая технология работала на базе уже существующих технологий кремниевой фотоники, и никаких новых материалов не создавалось.

Стотерабитная конкуренция

А тем временем две независимые группы разработчиков представили свои экспериментальные технологии передачи данных на скорости более 100 Тбит/с по одному оптическому кабелю.

По словам представителя компании Telegeography Research, используемые на сегодняшний день самые быстрые магистральные каналы связи имеют пропускную способность всего в несколько Тбит/с. Существующие оптические кабели используют несколько методов для расширения пропускной способности. Как и радиоволна, оптический спектр можно "нарезать" частями и передавать по разным каналам одновременно с разной частотой. Лазерный луч здесь несёт информацию на разных частотах, амплитудах, фазах, и каждая из них имеет свои биты информации. Основная идея, как было показано выше, состоит в том, чтобы так упаковать всё это в один физический канал, чтобы приёмник верно интерпретировал данные.

В компании NEC, показавшей аналогичную разработку, говорят, что им удалось так "упаковать" лучи, что скорость передачи данных достигла 101,7 Тбит/с на расстоянии 165 км. Сделать это удалось совместной работой 370 лазерных лучей. Каждый луч работал в инфракрасном спектре и различался по частоте, поляризации, фазе и т. д.

Оптоволоконный полупроводниковый узел

В феврале 2012 г. исследователи из Государственного университета Пенсильвании создали оптическое волокно со встроенными в него интегральными электронными компонентами. В статье, опубликованной в журнале Nature Photonics, указывается, что разработчики использовали химическую процедуру, позволившую слой за слоем уложить полупроводниковый материал в крошечные поры, расположенные по длине участка оптоволокна. Такой процесс называется "химическим осаждением паров при высоком давлении". К сожалению, учёным не удалось построить чип, способный, к примеру, преобразовывать изображения непосредственно в электрические импульсы, которые можно потом обработать где угодно. Однако созданный полупроводниковый узел, имеющий размеры от 5 до 10 мкм в ширину и несколько сантиметров в длину, может работать на частоте порядка 3 ГГц в стандартной оптоволоконной линии.

Первая квантовая

В апреле 2012 г. учёные из Института квантовой оптики Макса Планка изготовили первую работающую квантовую сеть. И хотя она весьма примитивна и состоит из двух связанных атомов, взаимодействующих между собой, используя один фотон, это очень большой шаг в компьютерной технике. Для достижения "полного контроля" над всеми компонентами системы исследователям пришлось решить ряд сложнейших проблем. Пока работа квантовой сети вряд ли может показаться впечатляющей: две лаборатории соединены между собой оптическим кабелем длиной 60 м.

Развивая традиционные кремниевые вычислительные устройства, мы всё ближе подходим к их физическому пределу, после которого дальнейшее совершенствование будет невозможно.

Это большая проблема для науки и для промышленности, работа которой основывается на потребительском спросе более быстрых и мощных систем. Решение этой проблемы многие учёные видят в квантовых сетях, которые по сравнению с классической технологией имеют ряд преимуществ, особенно в скорости передачи данных. Те же свойства атомов, которые дают квантовым компьютерам невероятную производительность и сетям обещают мощный прирост ускорения передачи данных.

Графен против "стекла"

В прошлом году учёные из Манчестерского и Кембриджского университетов обнаружили способ передачи света, который намного эффективнее нынешних волоконно-оптических технологий. В основе изобретения лежит графен в соединении с миниатюрными металлическими структурами, известными как плазменные наноструктуры. Оказывается, такая комбинация способна ускорить передачу информации в десятки и сотни раз.

Порой можно прочитать, что графен впервые получен в 2004 г., однако "в действительности иногда бывает не так, как на самом деле". Как известно, в 2010 г. сотрудникам Манчестерского университета Андрею Гейму и Константину Новосёлову была присуждена Нобелевская премия в области физики "за новаторские эксперименты с двумерным материалом графеном". Сегодня, по мнению многих "светил" отраслевого производства, эта тончайшая одноатомная плёнка углерода, свойства которой описываются с приставкой "супер", может перевернуть мир терминального оборудования мобильной связи (а теперь и систем передачи). Ну а отечественным телезрителям, вероятно, запомнился наш отечественный мульти-изобретатель В. Петрик, который в прямом ТВ эфире программы "Максимум" на НТВ съел полученный тут же поджиганием какой-то чёрной кучи графен, приговаривая, что это он его изобрёл, что это помогает здоровью и что у него увели "Нобеля". И после запил водичкой, любезно предоставленной ведущим. Вряд ли 50 лет назад братья Стругацкие могли ожидать в XXI веке вместо полёта в "страну багровых туч" подобной иллюстрации к их "Понедельнику...", но зато телезрители лучше запомнили графен. А ещё запомнился комментарий через пару дней А. Гейма о том, что "Нобеля" ему дали за исследования свойств графена, а не за сам графен, который, оказывается, известен науке ещё с 1918 г. Такие дела.

Итак, графен представляет собой одноатомный слой кристаллического углерода. Это самый тонкий и прочный кристаллический материал, известный на сегодняшний день. Он дешевле в производстве, как и кремний. К его свойствам относятся "растяжимость" наподобие резины, прочность, в сто раз большая, чем у стали, высокая проводимость тепла и электричества. До сих пор основной проблемой использования графена ставилась плохая возможность светопередачи — лишь 3 % падающего на графеновую пластину света проходили дальше. Но благодаря новому открытию эффек-

тивность светопередачи существенно повысилась. В мае 2011 г. учёные из Калифорнийского университета в Беркли продемонстрировали фотонный переключатель на основе графена, который коммутирует свет много быстрее, нежели существующие сетевые модуляторы.

T-лучевая передача информации

T-лучами называют электромагнитные волны, частотный диапазон которых составляет приблизительно от 0,3 до 3 ТГц. Они являются промежуточными между инфракрасным и СВЧ излучениями. На сегодняшний день этот диапазон практически не используется в отрасли связи, что связано с отсутствием до недавнего времени простых, дешёвых и эффективных генераторов. Для твердотельных инфракрасных лазеров T-лучи имеют слишком длинную, а для классических полупроводниковых устройств слишком короткую длину волны.

В недавнем журнале Electronics Letters приведена работа исследователей из Токийского технологического института, описывающая эксперимент с установлением рекорда скорости передачи информации с использованием радиоизлучения терагерцового диапазона. Учёным удалось реализовать передачу информации со скоростью 3 ГГц/с на частоте 542 ГГц. Для генерации излучения авторы использовали резонансно-туннельные диоды (RTD) размером около 1 мкм, работа которых основана на эффекте квантового туннелирования электронов между разными энергетическими состояниями. Для модуляции сигналов использовали АМ. Достигнутая скорость расценивается разработчиками как весьма высокая, поскольку в десятки раз превышает скорости в сетях Wi-Fi.

В ноябре 2011 г. японская компания ROHM представила миниатюрные генераторы терагерцового диапазона, которые потенциально могут быть использованы в коммуникационных приборах. При массовом производстве их стоимость, по словам изготовителя, не должна превысить 5 долл. за штуку.

В настоящий момент T-лучи используют в двух направлениях: для проведения медицинских обследований и досмотра пассажиров в целях обеспечения безопасности на транспорте. Оба применения основаны на свойстве T-лучей проникать сквозь непрозрачные материалы — пластик, бумагу, ткань и так далее. В то же время они достаточно сильно поглощаются металлами и водой. Это свойство, наряду с необходимостью обеспечения прямой видимости между приёмником и передатчиком, сильно ограничивает дальность и составляет примерно 10 м (далее всё портит интерференция). Тем не менее для медиатрансляций со смартфона или планшета на телевизор этого вполне достаточно. Опять же терагерцевый диапазон радиочастот является нелицензируемым и разрешения каких-либо регуляторов не требует (что особенно ценится в мире телекоммуникаций).

Фотонная телепортация

Перспективные технологии для систем передачи информации, казалось бы,

не знают границ и превосходят самые дерзкие фантазии. Как было написано в Technology Review, весной 2012 г. китайским учёным удалось с помощью лазера за 4 ч телепортировать 1100 фотонов на расстояние почти 100 км. Известно, что эксперименты по телепортации фотонов проводятся уже с 1997 г., но только сейчас физики смогли переместить их на такое большое расстояние (предыдущий рекорд телепортации одного фотона не превышал 16 км). Ну а в 2004 г. учёные из Австрии (Института экспериментальной физики Венского университета и Университета Инсбрука) и США (Национального института стандартов и технологии) независимо друг от друга осуществили квантовую телепортацию одиночных атомов на небольшие расстояния. На современном научном жаргоне термин "квантовая телепортация" означает перенос состояния одного квантового объекта на другой. Очень важно, что такой перенос происходит без каких-либо физических посредников и поэтому ничем не напоминает, скажем, ксерокопирование документов. То есть речь идёт о мгновенном переносе не физического объекта, а информации о нём. При телепортации фотоны переходят из одной точки в другую, не перемещаясь через промежуточные точки в пространстве. Как ветер, который движется впереди поезда, так называемые "оптические предшественники" "бегут" впереди фотонов.

Все без исключения эксперименты по квантовой телепортации основаны на использовании частиц, находящихся в так называемых "спутанных" состояниях (entangled states). Так обозначают квантовые объекты, поведение которых настолько коррелировано, что изменения, происходящие с одной частью системы, немедленно сказываются на состоянии другой её части, даже если она находится в совсем иной области пространства. Другими словами, "спутанные" частицы связаны несильным взаимодействием, скорость которого не имеет верхнего предела. Причём это парадоксальное свойство квантовомеханических систем ни в малейшей степени не противоречит фундаментальному положению специальной теории относительности, согласно которому скорость передачи любых сигналов не может превышать скорости света.

Ну а в целом уже сегодня понятно, что достижение китайских учёных может пригодиться в так называемой квантовой криптографии — способе передачи данных с абсолютной степенью секретности. По словам физиков, в будущем возможно появление спутниковой квантовой криптографии — сверхбезопасной связи, действующей на огромных расстояниях. Интересно, какой номер присвоит этому поколению мобильной связи.

На самом деле физики лишь открыли "чёрный ящик" с квантовой телепортацией, и мы ещё не знаем, на что способен, например, человеческое тело с точки зрения хотя бы телепортации фотонов. Кто знает, понадобятся ли нам современные сети связи лет этак через 50, если, к примеру, информационный обмен со скоростью 1 Тбит/с можно будет организовать движением мысли, а не пальца. А вдруг?...