

DWDM: МНОГО СВЕТА В ОДНОМ "ОКОШКЕ"

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

*"Если сделать правильно с первого раза,
мало кто поймет, как это было сложно".*

(автор неизвестен)

Оптическая связь — истоки

DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) — это современная технология передачи и уплотнения в одном оптоволокне (а точнее, оптическом световоде) нескольких оптических сигналов с различными длинами волн, которая применяется, прежде всего, на магистральных линиях связи. Интересно, что основные принципы ее работы были разработаны еще 60 лет назад, фактически до появления волоконно-оптических кабелей. А если быть точнее, то по возрасту оптические технологии мало чем уступают телефону, поскольку первая попытка передавать телефонный разговор с помощью света была реализована Александром Беллом еще в 1880 г. Благодаря гибко закрепленному зеркалу его **фотофон** преобразовывал звуковую волну в модулированный солнечный луч, который передавался получателю непосредственно по открытому пространству. Разумеется, действие фотофона было подвержено помехам, а поэтому он обладал небольшой дальностью — в пределах прямой видимости. Однако провести свет по защищенному от внешних световых помех каналу, созданному с помощью оптоволокна, удалось весьма нескоро.

Собственно, оптоволокно — это помещенная в защитную оболочку тонкая и весьма гибкая стеклянная нить, которая проводит свет за счет явления полного внутреннего отражения. То есть идущий вдоль волокна световой луч при подходе к границе раздела "стекло—воздух" не может выйти наружу, отражаясь обратно в оптоволокно. Еще в начале XX века были совершены попытки использовать этот эффект на благо связи, но на практике стекло оказалось не таким уж и прозрачным материалом. Даже в самых чистых стеклах, которые изготавливались в первой половине XX века, коэффициент затухания составлял порядка 1000 дБ/км (т.е. буквально каких-то 10 м — и все). Зато в медицине (например, при гастроскопии) и этого было достаточно, что позволило как-то использовать оптоволокно, но для какой-либо пригодности с точки зрения телекоммуникаций его коэффициент затухания нужно было уменьшить хотя бы на два порядка. И это надолго стало своеобразным технологическим тупиком. Поэтому следует понимать, что материал современного оптического волновода — это уникальная разработка.

Тема проводника оптических колебаний с новой силой "вспыхнула" лишь в 60-х годах прошлого века с появлением лазеров и активной борьбой с примеся-

ми в оптоволокне, что позволило добиться серьезных успехов в борьбе с затуханием. Вначале "традиционные" технологии телекоммуникаций позволяли по одному оптическому волокну передать только один сигнал, но прошло почти 20 лет, прежде чем были созданы первые компоненты более эффективных систем передачи информации, которые передавали сразу несколько сигналов с разной длиной волны. Первоначально они создавались для лабораторных исследований, и лишь в 1980 г. технология спектрального уплотнения WDM (Wavelength Division Multiplexing) была предложена к услугам связистов. А еще через пять лет в исследовательском центре компании AT&T Bell Lab's была реализована "более плотная" технология DWDM, когда удалось в одном оптическом волокне создать 10 каналов по 2 Гбит/с. В этот момент магистральные линии связи на базе медных проводников стали неактуальными для дальнейшего развития отрасли связи, оставив себе нишу сетей доступа, приходящих непосредственно к абоненту.

При использовании в сети доступа как у оптоволокна, так и у меди существуют свои достоинства и недостатки. Оптоволокно обеспечивает высокую пропускную способность, прекрасную гибкость и масштабируемость на обозримое будущее. Однако оптоволокно требует значительных финансовых вложений и немалого времени на развертывание — как и 100 лет назад в случае с телефонными линиями вся инфраструктура должна быть развернута практически "с нуля". К тому же такие технологически несложные в "медной среде" операции, как сращивание кабелей (что когда-то делал монтер, вооруженный пассатижами), в случае с оптоволокном потребовали серьезного повышения квалификации персонала и технологической оснастки, поскольку после всех манипуляций световод не должен ухудшить своих свойств. В течение довольно длительного времени создание оптоволоконных линий было относительно дорогим мероприятием, но неимоверно возрастающее в конце XX века объемы производства приводят к его значительному удешевлению. В результате сегодня оптоволокно может быть использовано там, где ранее его присутствие было принципиально экономически нецелесообразным, а также в тех областях человеческой деятельности, где никто раньше о возможности оптоволоконных технологий даже не задумывался. Кстати, Нобелевская премия по физике за 2009 г. была присуждена китайцу Чарльзу Као и американцам Уилларду Бойлу и

Джорджу Смиту за исследования в области информационных технологий. В 60-е годы XX века именно Као стоял у истоков оптоволоконной технологии передачи данных.

Помимо телекоммуникаций, оптоволокно может быть использовано для освещения помещений (как естественным светом, так и передавая световой поток из специально оборудованных комнат), может заменить всю медную проводку в автомобилях, стать частью модных или функциональных тканей с высокой степенью отражения (модельеры уже работают), превратиться в надежный инструмент лазерной сварки в промышленности, помочь ученым и врачам. Но обо всем вкратце и по порядку.

Среда передачи

Оптический световод состоит из сердечника и защитного внешнего слоя (оболочки). Оболочка служит в качестве отражающего слоя, с помощью которого световой сигнал удерживается внутри сердечника. Оптический кабель может состоять только из одного оптического световода, но на практике он содержит множество оптических волокон. Волокна уложены в мягкий защитный материал (буфер), а он, в свою очередь, защищен жестким покрытием. Как и во всей отрасли телекоммуникаций, ключевой проблемой техники оптической связи были потери из-за поглощения и рассеяния света, создаваемого лучом передающего лазера. Атомы любого материального объекта, в том числе и световода, избирательно реагируют на длину волны излучения. Это зависит от структуры вещества, и от открытого Максом Планком соотношения между энергией и частотой (в одном из современных изложений оно звучит так: осцилляторы могут находиться только в некоторых избранных состояниях, в которых их энергия является целым кратным наименьшего количества энергии). Поэтому даже самый "прозрачный" и очищенный от примесей исходный материал световода является более-менее прозрачным и не имеет значительных потерь только в определенном интервале частот. На других длинах волн возникает явление резонанса, при этом световая энергия рассеивается (т.е. поглощается и превращается в тепловую энергию). Кроме затухания в передаче сигналов через оптоволокно существуют и другие проблемы, например, дисперсия света в стекле, из-за которой профиль светового импульса искажается до неузнаваемости. Собственно, посмотрите в торце оконного стекла и сами все поймете.

В 1960-е годы Чарльз Као, молодой инженер китайского происхождения, только что защитивший диссертацию в Лондонском университете, решил разобрататься, почему все же не удается добиться требуемой прозрачности стекла. Вместе с молодым теоретиком Г. А. Хокэмом он внимательно изучил разнообразные оптические процессы в стекле и пришел к выводу, что главный вклад в затухание света вносят именно примеси. Као предсказал, что если бы удалось эти примеси устранить, то

можно было бы добиться коэффициента затухания в несколько дБ/км. Изготовление высококачественного кварцевого стекла оказалось непростой задачей из-за его очень высокой температуры плавления. В 1970 г. выход был найден группой исследователей из компании Corning Glass Works Робертом Маурером, Дональдом Кеком и Питером Шульцем, которые научились выращивать кварцевые волокна с помощью технологии химического осаждения из газовой фазы. Именно тогда они добились уровня затухания 16 дБ/км, а через два года — уже 4 дБ/км. В 1977 г. AT&T установила первый оптоволоконный канал в Чикаго. Потом первые коммерческие оптоволоконные каналы появились в Великобритании и Японии, а затем в 1988 г. был проложен первый трансатлантический оптоволоконный кабель. Технология на этом не остановила свое развитие, и сейчас коэффициент поглощения в образцах с рекордной прозрачностью составляет менее 0,2 дБ/км, что превосходит оценки, которые когда-то получил Као в своих теоретических работах.

На практике кварцевое оптическое волокно с низким показателем потерь имеет три так называемых "окна прозрачности" на длинах волн 0,8, 1,3 и 1,55 мкм (при самом низком значении потерь менее 0,25 дБ/км в области 1,55 мкм). Оказалось, что потери на рассеяние меньше всего не в оптической, а в инфракрасной области спектра. С уменьшением длины волны коэффициент затухания резко возрастает из-за рассеяния света на неоднородностях показателя преломления среды (рэлеевское рассеяние). С другой стороны, в области длин волн выше 1 мкм начинают проявляться сильные линии поглощения гидроксильной группы OH, от которых не удается избавиться в оптоволокне. Кстати, именно из-за рэлеевского рассеяния небо выглядит голубым, а закат красным: чем более "красный" (т. е. длинноволновый) свет, тем дальше он проходит и тем меньше рассеивается в атмосфере. Так что можно считать, что инфракрасный диапазон (ИК) был выбран для оптоволоконной связи по той же причине, по которой закат окрашивает небо в багровый цвет.

Использование "окон прозрачности" позволило осуществить передачу световых сигналов на расстояния свыше нескольких десятков километров. Дальнейшее увеличение дальности передачи стало возможным за счет использования регенераторов, осуществляющих преобразование светового сигнала в электрический с последующим обратным преобразованием и передачей сформированного сигнала по следующему участку волоконно-оптической линии связи.

Оптическое волокно обычно бывает двух типов: одномодовое, в котором распространяется только одна мода (тип распределения передаваемого электромагнитного поля), и многомодовое — с передачей множества (около сотни) мод. Конструктивно эти типы волокон различаются только диаметром сердечника — световедущей части, внутри которой коэффициент прелом-

ления чуть выше, чем в оболочке, что, собственно, и не дает световой волне "метнуться" куда-нибудь вбок и "гонит" ее вперед и вперед по волокну. Первые были разработаны многомодовые волокна, которые имеют большой (примерно 50...85 мкм) диаметр сердечника, что облегчает их соединение с другом. Но поскольку групповая скорость света для каждой моды различна, то при передаче узкого светового импульса происходит его расширение (увеличение дисперсии), что соответствует увеличению затухания. По сравнению с многомодовыми одномодовых волокон преимуществами и недостатками являются дисперсия уменьшается, но малый (5...10 мкм) диаметр сердечника значительно затрудняет соединение волокон этого типа и введение в них светового сигнала. Правда, за последние 20 лет развития сопутствующих технологий с указанными недостатками научились бороться, поэтому одномодовые оптические волокна нашли свое место в линиях связи, требующих высокой скорости передачи информации.

Первоначально дальность связи определялась преимущественно потерями волокна. Для увеличения интервалов между регенераторами стали использовать системы с длиной волны 1,55 мкм, которая, по сравнению с окном 1,3 мкм, обеспечивает меньшие потери. Однако на этом этапе выявился отрицательный фактор, тормозящий дальнейшее развитие систем — хроматическая дисперсия, которая стала ограничивать дальнейшее увеличение битовой скорости. Хроматическая дисперсия связана с тем, что в одномодовом волокне различные составляющие частотного спектра импульса распространяются с различной скоростью, что также приводит к размыванию импульса на выходе волокна. Оказывается, что кварцевое оптическое волокно практически не имеет хроматической дисперсии в диапазоне 1,3 мкм, а в диапазоне 1,55 мкм ее влияние становится преобладающим.

Высокая хроматическая дисперсия при 1,55 мкм вызвала необходимость разработки волокна со смещенной дисперсией, которое специально разработано исходя из условия обеспечения нулевого значения хроматической дисперсии в окне длин волн 1,55 мкм. Однако к этому времени связисты всего мира успели проложить массу одномодовых кабелей, и их замена была бы накладной. К счастью, был найден другой способ преодоления хроматической дисперсии. Использовавшиеся в оптических системах передачи лазеры излучали в достаточно широком спектре, составляющем несколько нм (что эквивалентно сотням ГГц). И тут оказалось, что если уменьшить ширину спектра передаваемого импульса до значения, близкого к частоте модуляции (например, приблизительно 2,5 ГГц для потока данных 2,5 Гбит/с), то влияние хроматической дисперсии существенно уменьшится. Это привело к появлению лазеров с распределенной обратной связью (DFB), имеющих узкую ширину спектра, что позволило получить скорость передачи информации свыше 1 Гбит/с.

Дальнейшая эволюция оптоволоконных систем передачи связана с появлением в конце 80-х — начале 90-х годов оптических усилителей (EDFA), приведших, в свою очередь, к разработке нового поколения систем, существенно снизив их цену за счет замены регенераторов на EDFA. Ведь регенераторы были "слабым звеном" из-за двойного преобразования оптического сигнала в электрический и обратно. Кроме того, оптические усилители имеют еще одну очень важную особенность, а именно: будучи прозрачными по отношению к битовой скорости и видам модуляции, они позволяют проводить эффективное усовершенствование системы с позиций битовой скорости путем замены только оконечного оборудования. Другим преимуществом EDFA является то, что они способны одновременно усиливать сигналы различных длин волн, что обеспечивает возможность увеличения емкости и скорости передачи системы за счет мультиплексирования по длине волны (WDM), т. е. использования более одной длины волны. Очевидно, что увеличение числа длин волн является более экономичным, чем увеличение количества кабелей и регенераторов или усилителей, которые необходимо устанавливать для каждого волокна кабеля. В чем здесь основная идея?

Собственно WDM

Подобно тому, как видимый человеческим глазом свет состоит из различных цветов, на которые можно его разложить, а затем опять собрать, так и передаваемый по технологии WDM/DWDM световой поток состоит из волн различной длины (λ). То есть по одному волокну можно передавать множество стандартных каналов. Принципиальная схема такой системы передачи достаточно проста (проблемы, как обычно, кроются в самой технологии). Для того чтобы организовать в одном волокне несколько оптических каналов, поступающих на вход оптические сигналы "окрашивают", т. е. меняют оптическую длину волны для каждого такого сигнала. "Окрашенные" сигналы смешиваются с помощью оптического мультиплексора и передаются в оптическую линию. В конечном пункте происходит обратная операция — каждый "окрашенный" сигнал выделяется из группового сигнала и передается потребителю. Вот, собственно, и все. А остальные различия систем WDM — в деталях, точностях и количествах передаваемых волн.

Как правило, сегодня термин WDM используется для систем от 2 до 16 длин волн (каналов или ламбд), а DWDM — от нескольких десятков до нескольких сотен длин волн на одно оптоволокно (теоретически более 3300, технология стандартизована в ITU-T G.692.). Существует также промежуточная относительно недорогая технология CWDM (Coarse Dense Wavelength Division Multiplexing или грубое/разреженное мультиплексирование по длине волны), используется очень большой интервал между соседними частотами (не менее 200 ГГц). Эта технология занимает промежуточное место между WDM и DWDM,

как правило, от 4 до 18 длин волн (стандартизована в ITU-T G.694.2). Особенностью CWDM систем является наличие возможности в любой точке оптической линии выводить сигнал на нужной длине волны. Для этого используются мультиплексоры ввода/вывода, называемые OADM-модулями (Optical Add Drop Multiplexor). OADM-модуль, являясь "проходным" устройством CWDM системы, извлекает из оптической линии сигнал на заданной длине волны, а все остальное излучение пропускает без изменений. Модули OADM, как и CWDM-мультиплексоры, являются пассивными элементами. В целом любая система WDM позволяет существенно увеличить пропускную способность канала, причем она позволяет использовать уже проложенные волоконно-оптические линии. Благодаря ей удается организовать двустороннюю многоканальную передачу трафика по одному волокну (в обычных линиях используется пара волокон — для передачи в прямом и обратном направлениях).

Одно из основных достоинств технологии DWDM — быстрая окупаемость вложенных операторами в ее внедрение средств и получение прибыли. Более того, операторам нет необходимости прокладывать новые линии, что также связано с дополнительными расходами и проблемами. Ключевое преимущество DWDM в том, что протокол и скорость для каждого канала независимы. Сети на базе DWDM могут передавать данные IP, ATM, SONET/SDH и Ethernet с различными скоростями, в том числе и по одному оптическому каналу. Благодаря "дальнобойности" и "скорости" основная область применения DWDM — это магистральные оптические сети. Разумеется, что для того чтобы передавать по одному волокну множество волновых потоков, технология DWDM должна быть обеспечена оборудованием особой точности. В частности, погрешность длины волны, которую обеспечивает стандартный лазер, применяемый в других телекоммуникационных системах, примерно в 100 раз больше, чем требуется в системе DWDM. К примеру, современные оптические усилители позволяют передавать сигналы на расстоянии до 4000 км, тогда как в системах SDH (синхронная цифровая иерархия) это расстояние не превышает 200 км.

Следует отметить, что помимо семейства технологий WDM на оптических сетях использовалась и более традиционная для связистов XX века технология мультиплексирования по времени TDM (Time Division Multiplexing), где импульсам каждого передаваемого сигнала отводился определенный промежуток времени. В конце XX века технология TDM приблизилась к скоростям до 10 Гбит/с, что, впрочем, не является пределом. Основным тормозящим фактором, влияющим на развитие систем, использующих TDM-мультиплексирование, является хроматическая дисперсия и начинающие сказываться нелинейные эффекты в волокне. Кроме того, неравномерность усиления EDFA в рабочем диапазоне длин волн и явления, связанные с поляризацией, также препятст-

вуют дальнейшему увеличению объема передачи. Так системы WDM вышли в лидеры. В конце 90-х годов были введены в эксплуатацию высокоемкостные WDM-системы на 8—32 длины волн, каждая из которых переносит трафик со скоростью 2,5 Гбит/с, а в лабораторных условиях достигают рекордные скорости, до 2 Тбит/с.

Прогресс технологии

В XXI веке крупнейшие производители оборудования для оптических сетей пустились в гонку за достижение рекордных значений пропускной способности. Это соревнование пока не выявило единоличного лидера, зато регулярно позволяет демонстрировать все новые возможности передачи данных по одному волокну. К примеру, в марте 2001 г. японская компания NEC показала 10,9 Тбит/с. Конечно, рекорды и коммерческие сети — это не совсем одно и то же. Но согласно оценкам сотрудников Bell Laboratories, пропускная способность волоконно-оптических линий связи увеличивается в 100 раз каждые десять лет. Столь стремительный рост сопровождается удешевлением услуг, связанных с транспортировкой трафика по оптическим сетям. Возможно, уже через несколько лет скорость передачи данных по одному оптическому волокну начнет выражаться в петабайтах в секунду (1 Пбит = 1000 Тбит). И тогда же будет достигнут предел увеличения пропускной способности оптического волокна. Существование такого предела вытекает из законов теории информации и нелинейной оптики. Максимальная ширина окна, соответствующая приемлемым потерям в оптическом волокне, составляет около 400 нм, что эквивалентно 50 ТГц. По теореме Шеннона, для типичного отношения сигнал/шум, равного 100, это дает верхнюю оценку для пропускной способности одиночного волокна на уровне 350 Тбит/с. Похожий результат получается и при расчете пропускной способности через так называемую спектральную эффективность (количество бит в секунду, приходящихся на 1 Гц частотного диапазона).

В действительности приведенная выше "планка" в 350 Тбит/с вряд ли будет "взята", поскольку с ростом мощности передаваемого сигнала заметно увеличивается негативное влияние различных нелинейных эффектов: фазовой авто- и перекрестной модуляции, хроматической и поляризационной дисперсий, различных типов рассеяния и пр. Результаты моделирования этих явлений, проведенных сотрудниками Bell Laboratories, показывают, что при сохранении современных технологических процессов предел пропускной способности одиночного оптического волокна составит около 100 Тбит/с. Сегодня никто не решится сказать, удастся ли на практике приблизиться даже к этой величине, ведь "втиснуть" 2500 различных длин волн (по 40 Гбит/с на каждую) в 400-нанометровое окно не так-то просто, а увеличение полосы пропускания отдельных оптических каналов ведет к резкому возрастанию нелинейных эффектов.

А что же дальше? Например, вернуться к разработкам оптических волокон с большим размером "окон прозрачности". Так, компания Alcatel-Lucent (в которую входит исследовательское подразделение Bell Laboratories) утверждает, что ее оптоволоконный AllWave способен "воспринять" до 15 тыс. близко расположенных длин волн. Возможно, что в недалеком будущем удастся отойти от принципа "один лазер — одна длина волны". Разработки в области широкополосных перестраиваемых лазеров выглядят в этой связи весьма многообещающими.

В начале июня 2010 г. компания Alcatel-Lucent представила коммерческое решение для передачи информации со скоростью 100 Гбит/с на одной несущей с помощью так называемой когерентной технологии нового поколения (Next-Generation Coherent). Когерентная технология позволяет добиться устойчивости сетей к ослаблению оптического сигнала и поддерживает скорость до 100 Гбит/с на каждой длине волны, обеспечивая, например, передачу более 100000 файлов mp3 за 60 с или одновременную потоковую передачу более 15000 телевизионных каналов высокой четкости (HDTV). В новом оборудовании используется специальная технология подавления дисперсии. Кроме того, технология обеспечивает совместимость между сетями 100 Гбит/с и более низкоскоростными транспортными инфраструктурами (10 Гбит/с и 40 Гбит/с). 100-гигабитная технология поддерживается в коммутаторе "1830 Photonic Service Switch", являющемся флагманом в линейке DWDM-оборудования компании.

В апреле 2010 г. российский оператор "Ростелеком" начал опытную эксплуатацию волоконно-оптических линий связи, построенных на DWDM-оборудовании отечественного производителя НТО "ИРЭ-Полус" (Фрязино, Московская область). Опытная зона включает два участка магистральной сети "Ростелекома": "Жуковский — Гель" (Московская область) и "Пенза — Мокшан" (Пензенская область) протяженностью 77 км каждый. Пропускная способность каждого из участков составляет 10 Гбит/с, а их полная расчетная пропускная способность — 400 Гбит/с. Как отмечается, это оборудование отвечает мировым стандартам и включает в себя устройства с использованием "рамановских" преусилителей и динамической компенсации дисперсии. Разумеется, учитывается и российская специфика — работать можно на расстояниях свыше 1000 км с поддержкой более 100 ламбд. Проект создания опытной зоны с использованием оборудования отечественного производителя реализован по решению комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики РФ при Президенте страны. По замыслу Минкомсвязи России, к 2015 г. 50 % российских магистралей должны быть переведены на отечественное оборудование DWDM. Господдержка при этом будет заключаться не в выдаче денег, а в гарантированном рынке сбыта.