

# СИМВОЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО ВОЛС

## Патент – российский, что дальше?

А.Некучаев,  
У.Юсупалиев

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) сегодня играют важнейшую роль не только в телекоммуникационных отраслях, но и в экономике любого государства, претендующего на право именоваться развитым. В эпоху, когда информационный трафик оказывается дороже трафика нефти, стратегическое значение магистральных линий связи по крайней мере не уступает прочим транспортным артериям – автомобильным, железнодорожным, трубопроводным и т.д. Вот почему столь бурно развиваются во всем мире оптоволоконные технологии – совсем недавно скорость 2,5 Гбит/с в одном волокне казалась выдающимся достижением, а сегодня уже позади терабитный рубеж. И соответственно темпам развития в данную область инвестируются средства – как частные, так и государственные, ибо речь идет не только о громадных прибылях компаний-производителей компонентов и систем для ВОЛС (и соответствующих налоговых отчислениях в казну родных государств), но и о национальной безопасности – экономической и военной.

Увы, Россия – “чужая на этом празднике жизни”. Действительно, зайдите в аппаратную любого российского оператора – вряд ли там найдется хоть что-нибудь отечественного производства. Наша страна фактически превратилась в колонию, куда поставляют высокотехнологичную продукцию действительно развитые страны – на радость своим гражданам. И что обидно, винить тут, кроме самих себя, некого, ибо каждый народ заслуживает... Тем с большим вниманием стоит относиться ко всему новому в высокотехнологичных областях, что все-таки рождается в России.

Мы представляем новую технологию передачи данных по ВОЛС, предложенную отечественными авторами. Она ориентирована на протяженные магистральные участки и высокие (но не предельные) скорости – то, что нужно России, что необходимо для глобального транзита трафика, над чем работают во всем цивилизованном мире.



## В ПОИСКАХ ЗОЛОТОЙ СЕРЕДИНЫ

По оптическому волокну (ОВ) сигнал передают одноволновым и мнoво-волновым способами. В первом случае источником служит непере-страиваемый лазер, трансляция ведется в одном из однополярных линейных кодов посредством амплитудной модуляции несущей (фактически 1 – включено, 0 – выключено). Мнoво-волновые системы появились сравнительно недавно. Речь идет о технологии мультиплек-сирования по длинам волн WDM и ее дальнейшем развитии “плотно-го” WDM – DWDM. В данном случае передача происходит одновре-менно на нескольких несущих (WDM-каналах), как правило – модули-рованных по амплитуде. Очевидно, что скорость у WDM-системы вы-ше, чем у одноволновых. Используя технологию DWDM (55 DWDM-ка-налов, скорость передачи в каждом – 20 Гбит/с), в 1996 году компа-нии AT&T, Fujitsu и NTT преодолели терабитный барьер, достигнув скорости 1,1 Тбит/с.

Однако каждый из способов обладает своими врожденными не-достатками. Так, при одноволновой технологии для достижения со-поставимых с DWDM скоростей передачи необходимо увеличивать тактовую частоту единственной несущей. Но при скоростях свыше 10 Гбит/с становятся ощутимы нелинейные эффекты [1], и для даль-нейшего увеличения скорости необходимы дорогостоящие ОВ и до-полнительное оборудование, особенно при передаче на большие рас-стояния без усиления.

При DWDM-технологии на первый план выходит так называемое четырехволновое смещение (ЧВС) – нелинейный эффект, при кото-ром, например, две несущие ( $\omega_1, \omega_2$ ), интерферируя, порождают гар-моники на несущих  $\omega_3, \omega_4$ , так что  $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2, \omega_4 = 2\omega_2 - \omega_1$  или  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$ . При этом снижается (переходит на порождаемые гармоники) энергия полезного сигнала и возникают помехи для сиг-налов на несущих  $\omega_3$  и  $\omega_4$  или близких к ним. Чем меньше разнос между WDM-каналами, тем сильнее влияние ЧВС. Поэтому для техно-логии DWDM необходимо весьма дорогостоящее ОВ с ненулевой сме-щенной дисперсией (NZDSF).

Кроме того, при одновременном использовании многих источников их выходная суммарная мощность не может превысить допустимого для ОВ порога (19 дБм, согласно G.692), следовательно, мощность сиг-нала на каждой несущей снижается пропорционально числу источни-ков. Поэтому для магистральных линий DWDM точки усиления необхо-димо гораздо чаще (через 40–80 км), чем при одноволновой передаче.

Таким образом, либо далеко (без усиления), но относительно мед-ленно; либо быстро, но недалеко; либо быстро, далеко и очень доро-го. Однако разработанный авторами метод в известном смысле мо-жет явиться золотой серединой – передача с максимально допустимой для одноволновых систем мощностью источника, сниженные тре-бования к ОВ, достаточно высокая скорость передачи. В чем суть но-вой технологии?

## СИМВОЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА ПО ВОЛС

В предлагаемом методе передача данных осуществляется на раз-личных длинах волн, но, в отличие от DWDM, не одновременно, а последовательно.  $N$  волн в передатчике расположены эквидистант-но по частоте. Каждая длина волны выступает как информационный символ, соответствующий  $n$  бит, где  $n$  – целая часть  $\log_2 N$ . Напри-мер, для  $32 = 2^5$  появление несущей  $\lambda_i$  означает передачу 5-битного символа. Фактически речь идет о модуляции сигнала методом мнo-гопозиционной частотной манипуляции. Это позволяет передавать световые импульсы с повышенной амплитудой (в ОВ в любой мо-мент излучает только один источник), избегая отрицательного эф-фекта ЧВС. Выбранный метод модуляции также открывает широкие возможности для защиты данных от ошибок в канале связи.

Рассмотрим схему передачи данных по ВОЛС (рис.1). В пере-датчике используется 34 несущих (соответственно, 34 источника). Одна из них ( $\lambda_{34}$ ) – резервная, на случай выхода из строя какогo-либо источника (до устранения неисправности). Передача данных представляет собой последовательность тайм-слотов, в каждом по два такта. В первом такте передается несущая  $\lambda_i$ , соответствующая  $i$ -му символу из 5 бит – частота-пилот, во втором передается несущая  $\lambda_{i+1}$  – частота-дублер. Символ считается принятым, только ес-ли приемник зарегистрировал появление двух соседних несущих  $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$  в двух последовательных тактах тайм-слота. Это – первая ступень коррекции ошибок (FEC1), принятая в данном методе. Ча-стотный разнос между пилотной и дублирующей несущими должен быть минимальным, чтобы уменьшить разность их скоростей рас-пространения в ОВ. Поэтому несущую  $\lambda_{32}$  нельзя дублировать  $\lambda_1$ , приходится вводить дополнительную несущую  $\lambda_{33}$ . Заметим, что невозможна корректная ситуация, когда одна и та же несущая при-сутствует более чем в двух тактах подряд – это еще больше повы-шает помехозащищенность.

Символы передаются в униполярном линейном коде без возвра-та к нулю NRZ. Однако благодаря тому, что один информационный символ фактически представлен двумя несущими ( $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$ ), сни-мается основной недостаток данного кода – проблема синхрониза-ции при передаче последовательности одинаковых символов.

Вторая ступень защиты (FEC2) – в введении контрольного сим-вола. Для каждых четырех информационных символов поразрядно вычисляется сумма бит (сложение по модулю 2 без переноса), ре-зультат инвертируется – формируется контрольный пятый символ. Он передается так же, как и информационные, – последовательно-стью двух соседних несущих.

В примере на рис.1 показано, как должна быть передана инфор-мационная последовательность 00000 11111 00011 10000. Она со-ответствует несущим  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_7$  и  $\lambda_{32}$ . Поэтому в линию будут по-следовательно выданы пары  $\lambda_1, \lambda_2; \lambda_2, \lambda_3; \lambda_7, \lambda_8; \lambda_{32}, \lambda_{33}$ . Пораз-рядная сумма четырех символов – 01100, после инверсии получа-ем пятый контрольный символ 10011. Ему соответствует несущая  $\lambda_{26}$  и ее дублер  $\lambda_{27}$ . Очевидно, что при потере любого из пяти сим-волов его можно легко восстановить по остальным четырем. (Инверсия признаков четности необходима, чтобы избежать ситуа-ции, когда передаются четыре одинаковых символа 00000 и кон-трольный символ 00000.) Это соответствует последовательности  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_1, \lambda_2$ , что усложняет синхронизацию приемника при мультиплексировании/демультиплексировании четырех входных потоков по 10 Гбит/с.

Механизм коррекции ошибок при их уровне BER (Bit Error Rate)  $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$  на уровне среды передачи обеспечивает для всей систе-мы BER  $\sim 10^{-10}$ . Поясним на примере (рис.2). Передаваемый массив (рис.2а) ошибок не содержит. На некотором расстоянии начинают появляться ошибки – ложные несущие (рис. 2б). Но при уровне BER  $\sim 10^{-2}$  появление ложных пар несущих “пилот-дублей” маловероятно, и такие ошибки отсеиваются на первой ступени кор-рекции. С увеличением расстояния интенсивность ошибок возрастает до  $10^{-1} - 10^{-2}$  (рис. 2в) и возможно появление нескольких пар не-сущих “пилот-дублер” в одном тайм-слоте. Приходится задейство-вать вторую ступень коррекции ошибок – но только если “не читаем” один информационный символ из четырех. Информация восстано-вима, если ложные пары несущих появились и в двух тайм-слотах, однако поразрядные суммы символов из обоих тайм-слотов в воз-можных комбинациях различны. Наконец, при интенсивности оши-бок свыше  $10^{-1}$  (рис.2г), начинают появляться ложные нули, причем более чем в одном тайм-слоте – это уже неустраиваемая ошибка.

Видно, что появление ложных “единиц” гораздо менее опасно, чем ложных “нулей” (неприем посланной несущей). Поэтому, в отличие от традиционных механизмов [2], можно существенно понизить порог принятия решения о детектировании “единицы”, повысив чувствительность приемника – механизм коррекции устранил ложные единицы. По этой же причине уменьшится влияние собственных шумов (аддитивных) оптических усилителей.

Оценим возможную скорость передачи данных в предлагаемом методе. Сегодня наилучшего технологического воплощения достигли оптические усилители для диапазона третьего окна прозрачности – 1530–1565 нм. (Для системы управления со скоростью потока порядка 2 Мбит/с возможно использование оптической несущей из другого окна прозрачности.) В соответствии с рекомендацией ITU-T G.692, в этом диапазоне допускается формирование не более 41 канала с шагом (частотным планом) 100 ГГц (или 81 – для шага 50 ГГц). При символьной передаче интервал между несущими желательнее выбирать как можно меньшим (сегодня – до 25 ГГц), однако узкая полоса может ограничить скорость передачи. Поэтому остановимся на 100-ГГц частотном плане, при котором тактовая частота для стандартного DWDM-оборудования (например, компании Alcatel) – 20 Гбит/с. В нашем случае с учетом линейного кода NRZ это соответствует 20 Гтактов/с или 10 Гсимволов/с. Поскольку каждый пятый символ (или каждый пятый бит) избыточен, скорость информационного потока составит  $(5-1 \text{ бит/символ}) \times 10 \text{ Гсимволов/с} = 40 \text{ Гбит/с}$  – и это при самых “жестких” допущениях и алфавите в 33 несущие. Очевидно, что подобная скорость – далеко не предел. Таким образом, используя стандартное каналобразующее оборудование (в нестандартном режиме), метод символьной передачи позволяет передавать по крайней мере четыре потока STM-64 или один STM-256. Как далеко?

Оценим бюджет линии. Согласно рекомендации G.691 [1] в одноволновых системах с оптическими усилителями (наш случай) максимальная мощность сигнала на входе в ОВ – +20 дБм. На выходе ОВ сигнал попадает на оптический усилитель. Наиболее рас-

пространены сегодня оптические усилители на основе ОВ, легированного эрбием (EDFA), для которых минимально допустимый уровень входного сигнала – -50 дБм, а усиление – порядка 30 дБ. Усиленный EDFA, сигнал поступает на демультиплексор (например, японской компании NEL), потери в котором не более 10 дБ. В итоге уровень демультиплексированного сигнала оказывается не ниже -30 дБм, что соответствует чувствительности приемника на лавинных диодах для скорости 20 Гбит/с при BER от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  ([3], стр. 120). Следовательно, бюджет линии составит 70 дБ (максимально допустимый уровень минус порог чувствительности EFDA). Применение рамановского усилителя, который в несколько раз дороже обычного EDFA, позволит увеличить бюджет еще на 8–10 дБ. Принимая коэффициент затухания в ОВ  $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км}$ , для бюджета 70 дБ получим максимальную дальность передачи  $70/0,2=350 \text{ км}$ . **Итак, 40 Гбит/с на 350 км по одному ОВ без промежуточного усиления при BER < 10<sup>-10</sup>.**

Очень важен тип волокна, на котором работает данная технология. Весьма интересно, что волокно со смещенной нулевой дисперсией DSF, отвергнутое для DWDM из-за наиболее сильно проявляемого в нем ЧВС, идеально подходит для этого метода, так как волны разной длины распространяются в нем с очень близкими скоростями. По стоимости DSF дороже стандартного SF, но дешевле NZDSF. Чем больше эффективная площадь поперечного сечения ОВ, тем лучше.

При использовании наиболее распространенного SF на больших скоростях (свыше 1 Гбит/с) потребуются специальные методы коррекции – патчкорды разной длины между демультиплексором и фотодиодами, а также пассивные компоненты – компенсаторы дисперсии.

Конечно, для описанной технологии подойдет и волокно NZDSF (например, типа Truewave и Leaf) с малой дисперсией, плавной кривой зависимости дисперсии от длины волны (угол наклона кривой – менее 0,045 пс/нм<sup>2</sup> км) и большой эффективной площадью поперечного сечения [1].

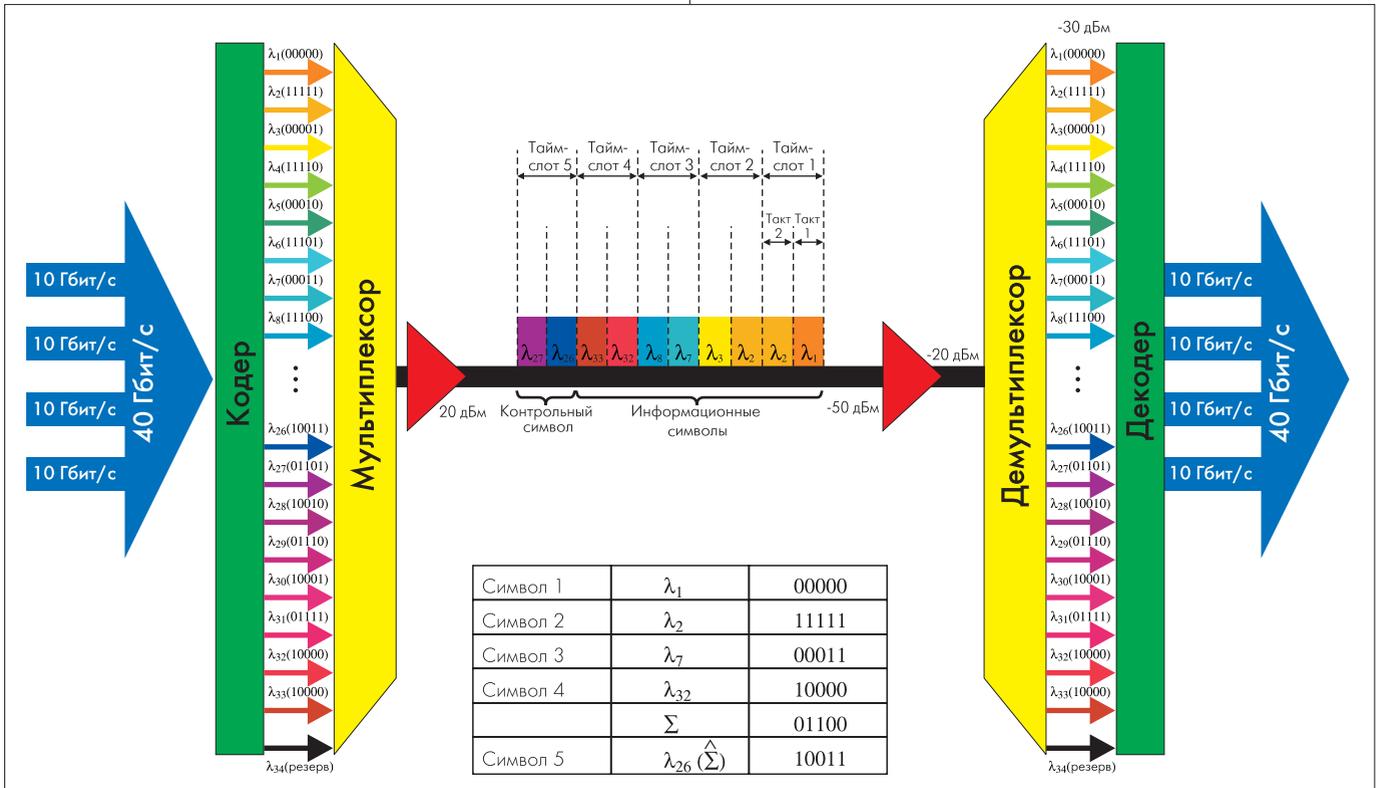
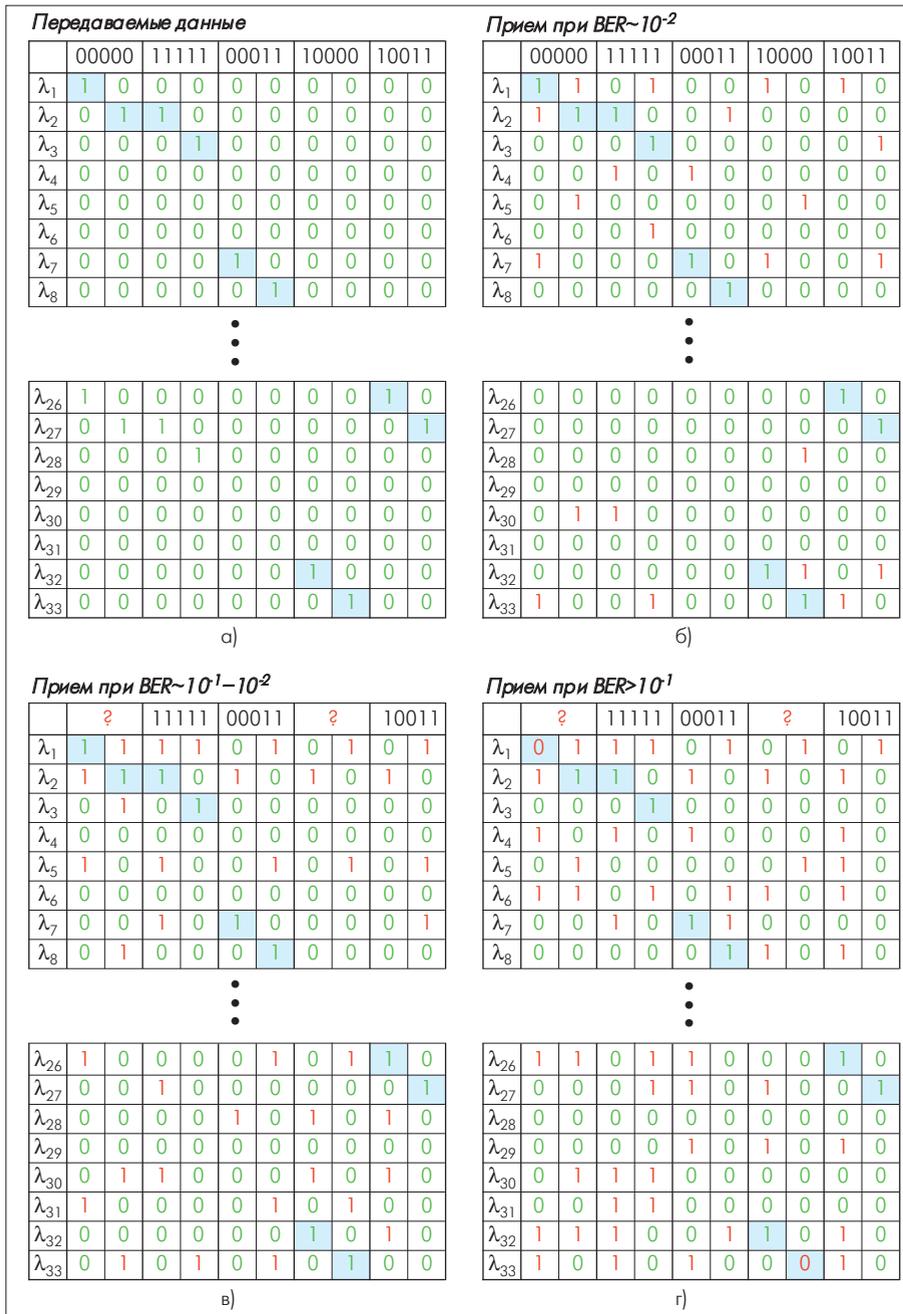


Рис. 1. Схема символьной передачи по ВОЛС



**Рис. 2. Искажение передаваемой информации**

Метод последовательной символьной передачи потребует специфической электронной элементной базы. Приемник должен детектировать поступающую информацию со скоростью в диапазоне  $(1-2) \times 33$  бит/символ  $\times 10$  Гсимвол/с = 330–660 Гбит/с, записать ее в буфер и скорректировать ошибки (множитель 1–2 указывает, как много ячеек-дублеров процессору “пришлось” записать в память). Разумеется, в условиях ограничения временной задержки для систем SDH это можно сделать, только распараллеливая обработку поступающего цифрового потока.

Заметим, что каналобразующее оборудование для технологии символьной передачи конструктивно практически не отличается от существующей аппаратуры для DWDM-систем, что существенно экономит средства на разработку и построение ВОЛС на ее основе.

### ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Мы показали, что предложенный метод на базе практически стандартного DWDM-оборудования позволяет без дополнительного

усиления передавать потоки данных со скоростями до 40 Гбит/с на расстояния порядка 350 км с интенсивностью ошибок не выше  $10^{-10}$ , причем по ОБ типа SF и DSF. Он обеспечивает бюджет ВОЛС не меньше, чем в одноволновых системах, при скоростях, по крайней мере в 3–8 раз выше.

Конечно, предлагаемая технология уступает по скорости многоволновым системам в десятки раз. Но всем ли сегодня нужны терабитные технологии? В развитых странах – кризис многих Интернет-проектов, во всех прочих – отсутствие потребителей делают невостребованными ВОЛС с терабитами в секунду в каждом ОБ. Такой трафик попросту некому продавать. Поэтому для реального трафика менее скоростная технология, но обеспечивающая в несколько раз большие расстояния между пунктами энергоснабжения, может оказаться экономически выгоднее как одноволновых, так и многоволновых систем.

Немаловажен и аспект защиты информации. Работая против предложенной технологии, взломщик должен преодолеть три барьера: записать информацию без обнаружения факта вторжения в ВОЛС системой управления, причем придется регистрировать появление различных несущих, а не амплитудно-модулированные биты; установить таблицу соответствия символов несущим (вариантов – факториал от числа несущих); и наконец, данные могут быть, как обычно, защищены на двоичном уровне.

Области применения новой технологии могут быть различны. Это и подводные океанические системы, где для особо важного трафика необходимы ОБ DSF без дистанционного питания – следовательно, обладающие повышенной надежностью. Это и страны, где прокладка ВОЛС ведется по дну вдоль береговой линии с пунктами усиления на суше. И разумеется, это государства с географически протяженными территориями,

прежде всего – Россия, где очень важно увеличить расстояния между пунктами энергоснабжения сухопутных ВОЛС.

Отметим, что ВОЛС на основе предложенной технологии достаточно легко модернизируются. Так, при увеличении алфавита источника несколько выше 256 (что технически вполне возможно при одновременной работе в диапазонах 1530–1565 и 1580–1610 нм) скорость возрастет на 60%. Однако это потребует самых надежных лазеров и скоростных процессоров, например полностью оптических [4]. Удорожание же системы будет оправдано приростом скорости на сверхдлинных ВОЛС.

Кроме того, ВОЛС с последовательной символьной передачей при необходимости превращается в высокоскоростную DWDM-систему путем установки промежуточных усилителей через 40–80 км (как обычно для DWDM-систем) и при минимальных изменениях в аппаратуре и программном обеспечении. Конечно, это возможно только для ОБ типа SF и NZDSF. В результате переход на DWDM может происходить в два этапа, по мере роста потребностей рынка.

Широкие перспективы сулит и появление коммерческих перестраиваемых лазеров со временем переключения не более 1 нс – пока эта скорость встречается только в научных статьях [5] – и стоимостью порядка 10 тыс. долл. Два таких лазера (один излучает, другой в это время перестраивается, поскольку скорость перестройки по спектру ограничена) избавляют от мультиплексора в передатчике, а это тысяча долларов на оптический порт – удешевление очевидно. Причем из-за близости пилотной и дублирующей несущих их излучать способен один лазер. Уже сейчас можно использовать перестраиваемые лазеры (например, компании Altitun) для системы управления со скоростями порядка 1–10 Мбит/с.

Описанная технология запатентована [6] физическим факультетом МГУ им. М. В. Ломоносова. Действующий макет системы может быть создан за 1–2 года. На это потребуется ориентировочно 2 млн. долл. – сумма для новой технологии оптической передачи совершенно естественная. Изыщется ли она?

*Разумеется, статья не может ответить на множество естественно возникающих вопросов. Для этого нужен эксперимент. Авторы надеются на взаимовыгодное сотрудничество с организациями, заинтересованными в создании новой отечественной техники. Адрес для связи: an@tt.ru и unirus@phys.msu.su.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заркевич Е.А., Скляров О.К., Устинов С.А. DWDM для высокоскоростных систем связи. – Технология и средства связи, 2000, №3.
2. Дж. Гауэр. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1989.
3. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 1990.
4. Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: Солон-Р, 2001.
5. Beck Mason, Greg A. Fish, Steven P. Den Baars and Larry A. Coldren. Widely Tunable Sampled Grating DBR Laser with Integrated Electroabsorption Modulator. – IEEE Photonics Technology Letters, 1999, vol. 11, № 6.

6. Пат. 2161374 РФ. Способ символьной передачи данных по волоконно-оптической линии связи/А.О. Некучаев, У.Юсупалиев. Приоритет от 04.07.2000.

#### КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА

Расширение пропускной способности современных ВОЛС с DWDM путем увеличения числа уплотняемых спектральных каналов вызывает ряд проблем экономического и технического характера. Так, число каналов увеличивают, уменьшая частотный интервал между каналами в сетке частот, регламентированных G.692 (ITU-T). В то же время для увеличения пропускной способности системы повышают скорость передачи в каждом спектральном канале до 10 Гбит/с, а в последнее время – до 40 Гбит/с.

Все это требует значительного увеличения стабильности оптической частоты каждого излучателя, число которых равно числу спектральных каналов. Что в свою очередь приводит к проблемам в части контроля и управления всеми каналами. Значительно дорожает как оборудование системы, так и ее эксплуатация. Возникают и проблемы метрологического характера. Поэтому в последнее время наметилась тенденция к увеличению канальной скорости передачи методами OTDM (оптическое мультиплексирование с разделением времени) при оптимальном числе спектральных каналов, уплотняемых по длинам волн.

Предлагаемый авторами способ повышения скорости передачи можно считать альтернативным методу OTDM. Поскольку в новом методе в каждый момент времени передается только одна длина волны, то существенно снижаются требования к стабильности оптической частоты, уменьшается уровень перекрестных межсимвольных помех и снижаются требования к техническим параметрам оптического волокна. В частности, метод позволяет применять волокно G.653, неприемлемое для DWDM. Следует отметить, что кроме всего прочего предложенный метод заметно повышает защищенность информации от несанкционированного доступа, что весьма актуально.

Начальник группы ЦНИИС, к.т.н. О.К.Скляров  
Тел. (095) 368-9547

### Микропроцессорный форум в Сан-Хосе: Intel Forever?

Микропроцессорный форум – это своего рода ежегодный отчет разработчиков микропроцессоров: универсальных, DSP, встраиваемых, процессорных ядер. Здесь подводят итоги и делятся планами на будущее. Немудрено, что с 15 по 19 октября внимание всего компьютерного мира было приковано к Сан-Хосе – месту проведения Форума. Что же ждет нас в области наиболее высокопроизводительных (high-end) процессоров?

Intel, до недавних пор – монополист в области универсальных 32-разрядных процессоров, хочет утвердиться в этом качестве и в high-end-секторе рынка. С появлением в этом году серийного 64-разрядного процессора Itanium позиции компании чрезвычайно упрочились. В 2002 году ожидаются 64-разрядные McKinley (в 1,7 раза более производительные, чем Itanium), на очереди – Deerfield, “простой 64-разрядный процессор для одно- и двухпроцессорных серверов (своего рода Celeron семейства IA-64), и 0,13-мкм Madison, с 6-Мбайт кэш третьего уровня на кристалле. Это – очень серьезная заявка на монополию.

Но конкуренты не сдаются. Компания Sun Microsystems представила новый UltraSPARC 3i (Jalapeno) с увеличенной кэш-памятью первого и второго (1 Мбайт) уровня (задержки обмена между ними менее 100 нс) и потреблением 60 Вт при тактовой

частоте свыше 1 ГГц. Ставка Sun – на невысокую стоимость их серверов с новыми процессорами. Производить Jalapeno по 0,13-мкм технологии с медными проводниками будет Texas Instruments.

Hewlett-Packard (HP) продолжает линию 64-разрядных процессоров PA-RISC. Фирма представила процессор Mako – 0,13-мкм систему на кристалле с двумя процессорными ядрами PA-RISC 8700 и 32-Мбайт кэш второго уровня.

Близки к серии и 64-разрядные процессоры Hammer компании AMD. Напомним, их особенность – работа как с 32-разрядными (x86-совместимыми), так и с 64-разрядными приложениями, что чрезвычайно удобно для внедрения серверов на их основе, поскольку возможна постепенная замена ПО. В архитектуре процессора заложена высокомасштабируемая универсальная системная шина HyperTransport, в 48 раз увеличивающая скорость обмена между подключенными к ней устройствами.

Составит ли AMD реальную конкуренцию Intel, которая перекупила у Compaq команду разработчиков процессоров Alpha, а у HP – группу разработки серверных чипсетов. И что будет с архитектурой Alpha – ее считали идеологическим конкурентом EPIC-архитектуре IA-64?