

ОСОБЕННОСТИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРЕЖЕННЫХ СИСТЕМ WDM (CWDM)

Развитие систем WDM, поддержанное с самого начала желанием увеличить доставляемую пользователям ширину полосы канала связи, шло, как известно, по интенсивному пути развития, то есть за счет уменьшения шага между оптическими несущими [1]. Это объяснялось тем, что рабочая полоса систем WDM была ограничена шириной полосы активного усиления оптических усилителей EDFA, которая составляла 30 нм (1530–1560 нм). Развитие таких систем шло по линии перехода от WDM к DWDM и HDWDM, что вело не только к увеличению числа несущих (а значит и к уменьшению шага между ними), но и к существенному удорожанию плотных (шаг 0,8–0,4 нм) и сверхплотных (шаг 0,2–0,1 нм) систем WDM. Такой малый шаг стал тормозить процесс их внедрения. Выход из этой ситуации стал возможен в последнее время в результате резкого расширения рабочей полосы пропускания оптического волокна (с 30 до 340 нм), в которой затухание менялось плавно и в относительно небольших пределах ($\pm 0,3$ дБ). Это позволило значительно (в 10–50 раз) увеличить шаг несущих и, тем самым, существенно упростить фильтрацию несущих на приемной стороне, исключив дорогостоящие элементы систем WDM. Все это привело к появлению нового класса систем – разреженных систем WDM, или CWDM, которые используют очень большой шаг между несущими (20 нм) и дешевые средства их выделения – многослойные тонкопленочные оптические фильтры. Эти системы быстро завоевали признание, стали широко использоваться в городских сетях (сетях метрополий – MAN) и получили название систем WDM класса “метро”. Особенности, проблемам и перспективам систем CWDM и посвящена эта статья.

Н.Слепов
nslepov@online.ru

ВВЕДЕНИЕ

Разреженные системы WDM, или CWDM, используют грубую сетку частот, а именно 20 нм [1]. Они рассматриваются как дешевая замена более дорогих систем DWDM в случаях, когда требуется не более 8–16 каналов WDM.

Использование такого класса систем WDM стало возможным после того, как удалось ликвидировать пик поглощения на кривой затухания ОВ в районе длины волны 1383 нм. В соответствии с рекомендацией МСЭ G.694.2 [2] следует использовать не более 18 несущих с шагом 20 нм: 1270, 1290, 1310 ... 1570, 1590, 1610, т.е. если общая требуемая ширина диапазона длин волн не превышает 340 нм. Естественно, что затухание на краях такого широкого диапазона достаточно велико, особенно на его левом крае в области коротких волн. Поэтому, если ориентироваться, например, на стандартное OM волокно (SSF), то можно сказать, что число несущих следует ограничить 8 длинами волн, лежащими в диапазоне 1470–1610 нм и занимающими диапазон шириной в 140 нм.

Если требуется использовать больше несущих, то, оставаясь в рамках систем CWDM, мы имеем, согласно [2], еще 200 нм полосы, или 10 дополнительных каналов с шагом 20 нм. Альтернативой является возврат к системам DWDM, что дорого и ведет к потере уже вложенных в систему CWDM средств. Другая альтернатива – использовать гибридную модель частотного плана, позволяющую объединить частотные планы CWDM и DWDM, а значит и преимущества обеих систем: дешевизну первой и масштабируемость (возможность роста) второй [3].

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ЧАСТОТНОГО ПЛАНА

Для простоты рассмотрения данной модели ограничимся частотным планом DWDM с шагом 100 ГГц, а для CWDM ограничимся рассмотрением основных восьми каналов в диапазоне 1470–1610 нм.

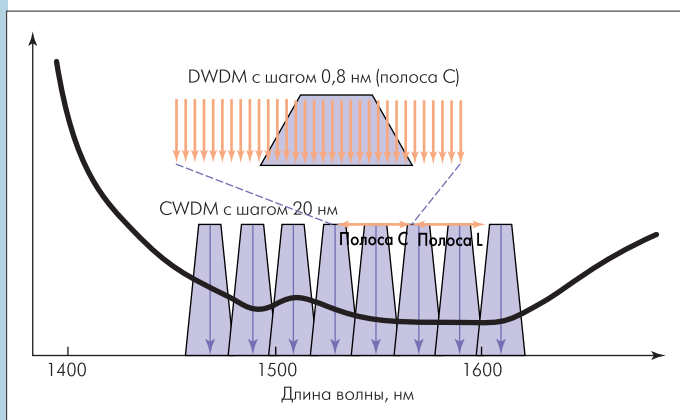


Рис. 1. Волновые планы CWDM и DWDM



На рис.1 приведены оба частотных плана с указанием пересекающейся области. В верхней части рисунка показан план DWDM с шагом 0,8 нм (полоса С) и пересекающаяся область, в нижней – план CWDM с шагом 20 нм, а на нем позиции полос С и L частотного плана DWDM. Известно, что в каждой из этих полос можно разместить по 41 каналу с шагом 100 ГГц [1].

Как известно (G.692 [4]), полоса С включает длины волн в диапазоне 1528,77–1560,61 нм, а полоса L – в диапазоне 1566,31–1612,65. В эти полосы попадают следующие несущие волнового плана CWDM: 1530, 1550, 1570, 1590 и 1610. С другой стороны, как видно из рис.1, в полосе пропускания фильтра одной из несущих CWDM может разместиться восемь несущих DWDM полосы С. Отсюда напрашивается, казалось бы, простой метод формирования гибридного частотного плана и *первой стратегии расширения числа несущих*.

- использовать волновой план CWDM для восьми основных каналов (1470–1610 нм);
- при необходимости расширения числа каналов один из восьми каналов CWDM заменить на восемь каналов DWDM.

Однако эта стратегия имеет определенные недостатки. Во-первых, не все несущие DWDM попадают в полосу пропускания фильтров системы CWDM, часть (примерно 50%) приходится на переходную полосу фильтров. Во-вторых, часть полос пропускания фильтров CWDM перекрывается полосами С и L не полностью. По этой причине несущую 1610 нм (CWDM) не используют для замены наряду с несущими 1470, 1490 и 1510 нм, а из оставшихся четырех: 1530, 1550, 1570 и 1590 – полоса пропускания фильтра используется частично, учитывая, что полоса С начинается с длины волны 1528,77 нм.

Учитывая все это, в первой стратегии используются четыре незаменимых длины волны CWDM и четыре заменяемых (на возможные наборы длин волн DWDM). Наилучшей в последнем случае является несимметричная схема (рис.2). В этой схеме незаменимая полоса А состоит из трех расположенных слева каналов (несущие: 1470, 1490 и 1510 нм) и 1 канала справа (несущая 1610 нм), а заменяемая полоса В расположена внутри общей полосы А+В. Согласно подсчету [3], максимально возможное число каналов составит 32 (4 CWDM+28 DWDM). Это, конечно, не так плохо, учитывая рост общего числа каналов в четыре раза: с 8 до 32.

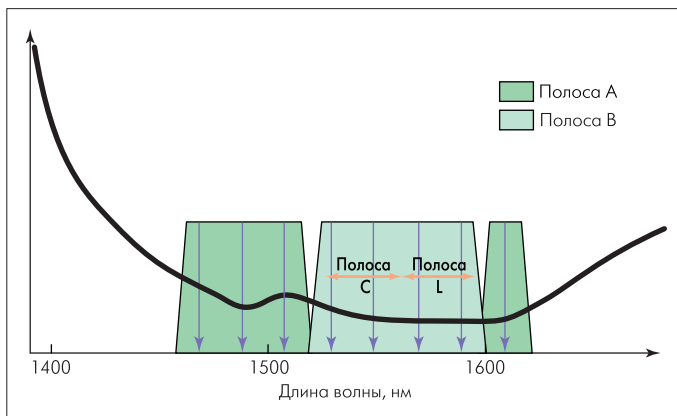


Рис.2. Схема гибридного несимметричного частотного плана

Существует и *вторая стратегия расширения числа несущих*. Она оставляет ту же исходную расстановку: 4 незаменимых + 4 заменяемых, но не использует формирующие фильтры заменяемых несущих, а только освобождаемую ими полосу, т.е. полностью меняются карты в оборудовании для этих каналов и применяются не только канальные, но и полосовые фильтры DWDM. В результате

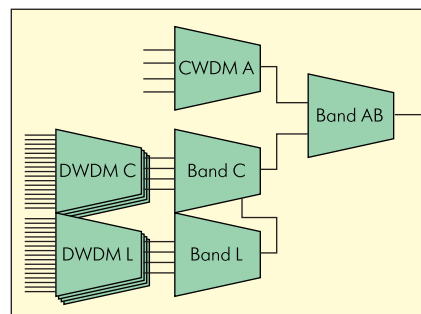


Рис.3. Схема мультиплексирования каналов CWDM и DWDM

оказывается возможным в полосе четырех заменяемых каналов сформировать 32 канала в полосе С и 32 канала в полосе L, т.е. общее число каналов может составлять 68 (4 CWDM+64 DWDM) [3]. При этом схема мультиплексирования каналов может быть такой, как показано на рис.3, а именно: 4 (CDMA-A)+32 (DWDM-C)+32 (DWDM-L).

В результате *гибридный альтернативный частотный план* выглядит так: 1470, 1490, 1510 + 32 несущих полосы С + 32 несущих полосы L + 1610 нм.

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CWDM И DWDM

Альтернатива полного использования систем CWDM. Полная ширина спектра 340 нм, занимаемая область 1270–1610 нм, включает 18 стандартных каналов [2] с шагом 20 нм. Будучи наложенной на характеристику затухания стандартного волокна, например SMF-28e компании Corning, эта область включает сглаженный максимум затухания в области 1383 нм. Приблизительные значения затухания в характерных точках данной области приведены в табл.1.

Таблица 1. Затухание стандартного волокна SMF-28e (Corning) в характерных точках

Характерные точки, нм	1270	1300	1310	1383	1550	1625
Затухание, дБ/км	0,36–0,38	0,35–0,36	0,33–0,35	0,31–0,35	0,19–0,20	0,20–0,23

Хотя вероятность увеличения максимального затухания в районе 1383 нм мала, нужно иметь в виду, что три стандартных канала CWDM: 1370, 1390 и 1410 нм расположены около этого пика. Они могут быть причиной определенных трудностей (вызванных необходимостью индивидуальной подстройки коэффициентов усиления этих каналов в тракте ВОСП) в реализации полного (18 каналов) использования полосы CWDM. Если исключить эти три канала, то мы ограничиваем свои возможности расширения семью каналами и максимальное общее число рабочих каналов составит 15, что может удовлетворить многих пользователей.

Альтернатива возврата к системам DWDM. С точки зрения использования большего числа каналов данная альтернатива была описана выше и в целом ясна. Что касается потери вложенных средств, то при локальном или корпоративном использовании и наличии свободного ОВ, на котором можно развернуть DWDM, таких потерь можно избежать. Однако при отсутствии свободного ОВ или при использовании ВОСП в рамках глобальной сети, учитывая наложение спектров CWDM и DWDM, пользователь может потерять вложенные в CWDM средства. При этом нужно помнить, что обоснованием этой альтернативы была необходимость использования большего, чем 15, числа каналов WDM.

Альтернатива использования гибридной модели частотного плана. Как показано выше, эта альтернатива при использовании второй

стратегии дает возможность сначала наращивать число каналов (блоками по 4) в рамках частотного плана CWDM, а затем наращивать число каналов блоками по 32 в рамках частотного плана DWDM, используя каналы как в полосе C, так и в полосе L.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ WDM ДЛЯ ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ

Системы WDM используются для организации городских или корпоративных сетей в рамках большого города (метрополи). Характерными особенностями таких систем являются:

- относительно небольшая длина пролетов (в среднем 15–20 км и не больше 50–70 км; или не больше 100–200 км по периметру замкнутой кольцевой сети);
- компактная структура, использующая кольцевую, радиально-кольцевую и ячеистую топологии;
- относительно небольшое число каналов (не больше 32) на одно ОВ, что позволяет использовать как частотные планы DWDM, так и CWDM;
- широкий набор интерфейсов для доступа в сеть WDM наиболее известных технологий: PDH, SDH, ATM, FDDI, IP, Fast Ethernet (100BASE-F), Gigabit Ethernet (GE) и 10 Gigabit Ethernet (10GE);
- новые сервисы, стандартные для полностью оптических сетей (AON): ввод-вывод оптических несущих, маршрутизация по длинам волн, *многопротокольная коммутация по длинам волн (MP-S)*.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WDM

Здесь, в работе [1] и выше рассмотрены только общие контуры новой технологии, которая развивается очень быстрыми темпами. Ее прогресс поддерживается, с одной стороны, новыми усовершенствованиями в области создания стабильных (фиксированных и быстродействующих перестраиваемых) лазерных источников излучения, оптических фильтров (как широкополосных – для CWDM, так и узкополосных – для DWDM и HDWDM) и новых типов ОУ, с другой – разработкой широкой гаммы интерфейсных карт, упростивших использование транспортных возможностей технологии WDM (в частности, для транспортировки Ethernet и IP-трафика).

Перспективы

Перспективы развития WDM связаны с тремя факторами: *технологическим, сетевым и экономическим*.

Первый фактор определяется усовершенствованиями элементов систем WDM, что позволит:

- перейти на более плотную сетку частотного плана (25 и далее 12,5 ГГц), подготовив миграцию систем DWDM в сторону систем HDWDM;
- увеличить максимальное число каналов в широко используемых диапазонах C, L и S [5];
- использовать для этих диапазонов как оптические усилители EDFA, так и рамановские усилители;
- использовать оборудование SDH с увеличенной скоростью передачи на одной несущей: 40–160 Гбит/с;
- использовать солитонную технологию с возможностью увеличения дальности передачи и уменьшения чувствительности систем с увеличенной скоростью к PMD.

Второй фактор определяется развитостью структуры сетей WDM. В настоящее время нет единой сети WDM не только в России, но и в США, и в Европе (если не считать фрагментов таких сетей, например сети SDH-WDM компании Hermes Europe Railtel). Это значит, что нельзя в полной мере воспользоваться одним из самых главных преимуществ систем WDM – возможностью маршрутиза-

ции потокового трафика по длине волны [6], не говоря уже о другой, еще не реализованной, возможности маршрутизации оптического пакетного трафика. То же можно сказать и о невозможности пока использовать технологию мультипротокольной коммутации по длине волны – MPIS.

Третий фактор определяется высокой стоимостью систем WDM даже для топологии точка-точка. Так, по оценкам одной из компаний-производителей оборудования WDM, секция системы (на основе STM-16) на 16 длин волн протяженностью 450 км с тремя промежуточными мультиплексорами, не обладающими возможностью оптического ввода-вывода, стоит примерно 2–2,5 млн. долларов. Эта стоимость может оцениваться как в абсолютной мере (цена за устройство или систему), так и в относительной (цена за бит переданной информации в расчете на километр). Если стоимость в относительной мере снижается довольно успешно как за счет увеличения числа бит (увеличение скорости передачи на одну несущую), так и за счет увеличения длины пролета/секции, то снижение стоимости в абсолютной мере происходит пока за счет ухода от систем DWDM к системам CWDM, учитывая возможность использования дешевых систем мультиплексирования/демультиплексирования на основе дешевых пассивных фильтров и комбайнеров/разветвителей.

Проблемы

Проблемы реализации систем WDM связаны, главным образом, с преодолением воздействия трех факторов: влияния ЧВС, воздействия помех от соседних каналов и ограничения суммарной мощности светового сигнала, вводимого в волокно.

Влияние первого фактора достаточно успешно снижается за счет использования волокна NZDSF, за счет неравномерного распределения частот несущих (см. подробнее в работе [4]), а также за счет использования схем интерливинга.

Влияние второго фактора (который имеет разную природу на передающем и приемном концах) может быть снижено, во-первых, увеличением шага несущих (действует на обоих концах), во-вторых, использованием внешнего модулятора (уменьшающего уширение несущей), технологии солитонов или техники модуляции с подавлением одной боковой полосы – ОБП (все три метода действуют на передающем конце), в-третьих, с помощью процедуры интерливинга (перемежения каналов), при котором плотный набор из *n* несущих длин волн (с шагом *s*) разделяется на приемном конце на два или четыре (каскадно 2x2) набора по *n/2* (с шагом *2s*) или *n/4* (с шагом *4s*) несущих (см., например, [7]).

Влияние третьего фактора сводится к тому, что максимальная мощность каждого оптического канала *P_{ch. max}* (в дБм) зависит от полной оптической мощности, подаваемой с выхода транспондера на вход волокна *P_{total}* (оптическая мощность, дБм, на выходе агрегатного канала WDM) и числа мультиплексированных длин волн *n*. Согласно стандарту [4],

$$P_{ch. max} = P_{total} - 10 \lg n.$$

Учитывая, что *P_{total}* ограничена либо классом безопасного уровня излучения лазера, либо допустимым уровнем суммарных нелинейных искажений в сердцевине волокна и составляет для разных производителей оборудования WDM величину от 17 до 30 дБм, можно (по табл. 2) приблизительно оценить, как меняется эта мощ-

Таблица 2. Уровень максимальной мощности в каждом канале WDM при ее равномерном распределении

Число каналов, <i>n</i>	2	4	8	16	32	64	128	256
<i>P_{total}</i> = 17 дБм	14	11	8	5	2	-1	-4	-7
<i>P_{total}</i> = 30 дБм	27	24	21	18	15	12	9	6



ность в расчете на 1 канал для разного числа каналов, используемых в системе WDM.

Из табл. 2 видно, что при большом числе каналов падение мощности может составить (против исходного уровня 2 канала) 21 дБ, в результате не исключается возникновение проблемы обеспечения нужного уровня BER в оптическом канале. Единственный способ борьбы с этим – увеличение эффективной площади сечения волокна, т.е. использование специально разработанных волокон, например, LEAF, Sielog, брэгговских волокон или волокон на основе фотонных кристаллов [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Слепов Н.Н.** Особенности современной технологии WDM. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №6, с.68.
2. ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid (6.02).
3. **H.Hinderthur, L.Friedric.** WDM hybrid transmission based on CWDM plus DWDM. – Lightwave Europe, July 2003, p.9–12.
4. ITU-T G.692. Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifiers (10.98, Corr. 1, 2 – 6.02).
5. **Jun-Ichi-Kani et al.** Triple-wavelength-band WDM transmission technologies. – OFC-2002, Anaheim, Paper TuR5, p.122–123.
6. **Andrea Borella, Giovanni Cancellieri, Franco Chiaraluce.** Wavelength Division Multiple Access Optical Networks. – Artech House. Boston-London. 1998. – 322 p.
7. **Jerry Bautista, Bob Shine.** Untangling the wavelength Web: Separating DWDM Channels with Interleavers. – Photonics Spectra, February 2001, p.90–92.
8. **Слепов Н.Н.** Фотонно-кристаллическое волокно – уже реальность. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №5, с.80–84.