

РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ПРИМЕНЕНИЕ DWDM ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ

М.Н.Климаш, Е.М.Чернихивський

Проведен расчет нагрузки и пропускной способности одномодовых оптических волокон для транспортной сети; дан сравнительный анализ дисперсионных характеристик волокон со смещенной ненулевой дисперсией и определена длина регенерационного участка для DWDM сетей.

An one mode optical fibres loading and carrying capacity computation for transport network was carried out. A comparative analysis of dispersion fibres characteristics with displaced nonzero dispersion and length regenerate zone definition for DWDM networks are given.

ВСТУПЛЕНИЕ

Одной из наиболее сложных задач, которые решаются при построении сетей связи, является прогнозирование трафика. Правильное прогнозирование дает возможность с самого начала выбрать оптимальную пропускную способность и структуру транспортной сети, так как любая модернизация принципиально связана с дополнительными расходами. Известные методы прогнозирования трафика [1], которые базируются на тех или иных методах экстраполяции функций, дают удовлетворительную точность только при условии, что в будущем сохраняются те же самые или близкие к ним условия развития, которые и в предшествующем, довольно продолжительном временном интервале. Поскольку эти требования никогда не выполняются в полной мере, разработчиками сетей связи предлагаются разнообразные методы многократного увеличения пропускной способности сети без существенных затрат на модернизацию довольно дорогих линейно-кабельных сооружений.

1. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ТЕНДЕНЦИИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ

С точки зрения динамического увеличения пропускной способности легко заметить преимущества именно оптической среды передачи. Современные одномодовые волокна при временном разделении сигналов разрешают увеличить скорость передачи с 155 Мбит/с (STM-1) до 10 (STM-64) и даже до 40 Гбит/с (STM-256), то есть более, чем на два порядка. В данное время наиболее распространенным методом последовательного увеличения пропускной способности волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) является комбинированный метод, при котором, на первом этапе используется временное разделение сигналов, а на втором - спектральное уплотнение. При этом оптимальной средой передачи становится оптическое волокно (ОВ) с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS-Non Zero Dispersion Shift),

что отвечает требованиям Рекомендации G.655 [2]. Прежде всего, это оптическое волокно TrueWave® фирмы Lucent Technologies [3], но не менее эффективным есть использование ОВ семейства (TrueWave RS), а также семейства LEAF® CPC i SMF-LS™ фирмы Corning®.

Усовершенствование ВОСП сначала шло путем улучшения свойств среды передачи. Первый шаг от ОВ G.652 (со ступенчатым профилем показателя преломления) к ОВ G.653 (со смещенной дисперсией) [4] характеризовался тем, что точка нулевой дисперсии была сдвинута из длины волны 1,3 мкм в область рабочей длины волны 1,55 мкм. Но при нулевой дисперсии ярко проявляются нелинейные эффекты - четырехволновое смешивание и фазовая самомодуляция [5], резко ограничивая длину элементарного кабельного участка (ЭКУ).

Следующим шагом от ОВ G.653 к G.654 [6] было создание волокна с меньшим затуханием, чем ОВ G.652 i G.653. Но очень быстро уменьшение коэффициента затухания на 5-10% утратило актуальность, так как были разработаны эффективные оптические усилители. Следующий этап развития характеризовался активным внедрением методов спектрального уплотнения (WDM i DWDM), для чего нужны были волокна, которые не порождают нелинейных эффектов. Требования к ним изложены в Рекомендации МСЕ-Т G.655 [2]. Основное отличие этих волокон - коэффициент дисперсии в третьем окне прозрачности больше $1 \text{ пс}^2 / (\text{нм} \cdot \text{км})$, но меньше $6 \text{ пс}^2 / (\text{нм} \cdot \text{км})$.

Таким образом, на магистральной части волоконно-оптической сети появились оптические волокна двух типов: стандартные, что отвечают Рекомендации G.652, и с ненулевой смещенной дисперсией, которые отвечают требованиям Рекомендации G.655. Последний тип волокна несколько дороже, но благодаря большей потенциальной пропускной способности обеспечивает меньшую стоимость передачи одного бита информации.

2. ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С НЕНУЛЕВОЙ СМЕЩЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА DWDM СЕТЕЙ

Последнее поколение ОВ [3] - это одномодовые оптические волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF). Их разработка производится для избежания эффекта четырехволнового смешивания. Этот эффект означает, что на выходе ОВ, в которое введено оптическое излучение на двух длинах волн λ_1 и λ_2 регистрируются оптические излучения на четырех длинах волн: λ_1 и λ_2 ,

$\lambda_3 = 1/(2/\lambda_1 + 1/\lambda_2)$ и $\lambda_4 = 1/(2/\lambda_2 + 1/\lambda_1)$; $\lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4$. Четырехволновое смешивание имеет место для любой пары длин волн, которые одновременно передаются. Из-за этого энергия излучения перекачивается на паразитные "боковые" длины волн, затухание сигнала увеличивается, а интерференция полезного сигнала с паразитным излучением при равноотстоящих исходных длинах волн снижает правильность передачи. Четырехволновое смешивание имеет весомую интенсивность при нулевой дисперсии. Условия передачи будут оптимальными, если во всем окне прозрачности дисперсия мала, но не равняется нулю.

Особенности волокна TrueWave i LEAF со смещенной ненулевой дисперсией иллюстрирует рис. 1. Как видно из рис.1, номинальная дисперсионная характеристика NZDSF типа TrueWave+ проходит выше нежелательной области значений, где имеет место нелинейный эффект FWM (четырёхволновое смешивание); номинальная дисперсионная характеристика NZDSF типа TrueWave- проходит ниже области FWM; область ненулевой дисперсии отвечает стандартному диапазону C-band (1530...1565 нм) оптических усилителей [8]; совместное использование волокон TrueWave с положительной и отрицательной дисперсией позволяет уменьшить результирующую дисперсию элементарного кабельного участка. На основе этой технологии базируется изготовление ОВ TrueWave Balanced, которое разрешает без использования внешних компенсаторов дисперсии передавать DWDM сигналы.

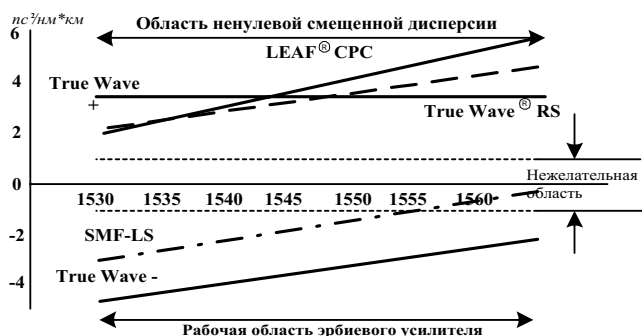


Рисунок 1 - Дисперсия основных видов NZDSF

Кроме указанной технологии, с целью компенсации дисперсии был разработан специальный тип ОВ - DCF - волокно, компенсирующее дисперсию, которое может быть вставлено в виде бухты определенной длины в стойку с аппаратурой SDH или WDM, но это приводит к существенному затуханию сигнала.

Преимущества ОВ G.655 в особенности ярко проявляются при DWDM, так как число паразитных волн за счет FWM резко возрастает при увеличении числа каналов (табл. 1).

Таблица 1 - Число паразитных волн в ОВ с частотными каналами

Число каналов	2	4	6	10	20	30	40
Число паразитных волн $2 * C_2^n = n * (n - 1)$	2	12	30	90	380	870	1560

Важную роль играет низкое значение модовой

поляризационной дисперсии ОВ G.655. В табл. 2 приведены результаты расчета максимальной длины регенерационного участка (РУ) за PMD (поляризационная модовая дисперсия), что рассчитывается за формулой:

$$L = 10000 / [(k_{PMD})B]^2, \quad (1)$$

где k_{PMD} - коэффициент PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$; B - скорость передачи, Гбит/с.

Использование ОВ типа G.655 разрешает создать оптическую систему передачи со следующими параметрами: длина усилительного участка - больше 100 км, длина регенерационного участка - 600 км, количество каналов - 40, скорость передачи - 10 Гбит/с (в перспективе - 40 Гбит/с), пропускная способность - 400 Гбит/с.

Таблица 2 - Зависимость длины регенерационного участка от скорости и коэффициента PMD

Коэффициент PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	Длина РУ, км, при скорости, Гбит/с		
	2,5	10	40
4	100	6,25	0,391
2	400	25	1,561
1	1600	100	6,25
0,5	6400	400	25
0,2	40000	2500	156,25

Идеи, которые лежат в основе разработки ОВ TrueWave, получили дальнейшее развитие в конструкции TrueWave® RS [9]. Дисперсия этого волокна имеет меньший наклон и оптимальная не только в третьем, но и в четвертом (L-band) окне прозрачности (1565...1620 нм). Благодаря этим характеристикам расширяется диапазон волн, которые передаются, увеличивается длина ЭКУ, облегчается процедура компенсации дисперсии, а суммарная пропускная способность ОВ возрастает до 1200 Гбит/с [8].

3. РАСЧЕТ НАГРУЗКИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ УКРАИНЫ

Пропускная способность транспортной сети может быть определена при следующих исходных данных:

- виды служб: телефония (интерактивная речь, аудиоконференции); Интернет (видеотелефон, видеоконференции, телемедицина, телеобразование, игры, работа на расстоянии, электронная коммерция, трансляция теле- и радиопрограмм, общая работа локальных сетей, виртуальные корпоративные сети, электронная почта); передача данных (факс, передача файлов);
- глубина прогноза - 5 лет (2005 г. - последний год прогнозируемого периода);
- население (N) и телефонная плотность (T) в 2005 г. приведены в табл. 3;
- междугородная и международная нагрузка (E) в час наибольшей нагрузки (ЧНН) от одного телефонного аппарата составляет 0,01 Ерл;
- коэффициент увеличения общего количества телефонов за счет мобильных телефонов равняется 1,1;

- эквивалентная скорость передачи ($V_{\text{тлф}}$) речевого сообщения - 16кбит/с (МСЕ-Т Рек. G.728, линейное предсказание с кодовым возбуждением и низкой задержкой);

- количество персональных компьютеров (ПК) в Украине в 2005г. - 3,6млн.; количество ПК с модемами или цифровыми соединительными линиями DSL (количество пользователей Интернет) - 1,9 млн. [7];

- доля обычных (модемных) пользователей сети Интернет при нагрузке 0,04 Ерл в ЧНН и скорости 56кбит/с - 80% (1,52 млн.);

- доля DSL пользователей сети Интернет при нагрузке 0,3 Ерл в ЧНН и скорости приема/передачи 2 Мбит/с - 20% (0,38млн.);

- количество узлов физического уровня транспортной сети равняется количеству узлов автоматической коммутации. Узлы транспортной сети строятся на основе ATM-технологии и соединяются по принципу "каждый с каждым", ребра соединительных линий выполнены на ОВ NZDSF.

Таблица 3 - Население и телефонная плотность регионов Украины

Регион	Население, млн. чел.	Телефонная плотность (на 1 жителя)
Киев	2,6	0,6
Харьков	1,6	0,5
Днепропетровск	1,2	0,5
Донецк	1,1	0,5
Одесса	1,1	0,5
Запорожье	0,88	0,5
Львов	0,87	0,5
Винница	0,86	0,5
Украина (кроме указанных регионов)	39,09	0,4

Нагрузка (в единицах измерения скорости передачи) рассчитывается по формуле:

$$P = V * E * N, \quad (2)$$

где V - скорость передачи, E - удельная нагрузка в ЧНН, N - количество пользователей. В результате расчета получим:

нагрузка междугородных и международных телефонных разговоров

$$P_1 = 1,1 * 16 * 10^3 * 0,01 * (0,6 * 2,6 * 10^6 + 0,5 * 7,61 * 10^6 + 0,4 * 39,09 * 10^6) = 3696176000 \text{бит/с} = 3,4423 \text{Гбит/с};$$

нагрузка обычных пользователей Интернет

$$P_{IO} = 56 * 10^3 * 0,04 * 1,52 * 10^6 = 3404800000 \text{бит/с} = 3,1710 \text{Гбит/с};$$

нагрузка DSL - пользователей Интернет

$$P_{I \text{ DSL}} = 2 * 10^6 * 0,3 * 0,38 * 10^6 = 2,28 * 10^{11} \text{бит/с} = 212,3415 \text{Гбит/с};$$

нагрузка служб передачи данных (составляет, как известно, не больше 5% телефонной нагрузки):

$$P_{\text{ПД}} = 3,4423 * 0,05 = 0,1721 \text{Гбит/с}.$$

Таким образом, уже в 2005 г. нагрузка в транспортной сети связи будет определяться потоками Интернета. Поскольку основные базы данных сети Интернет находятся в США, Европе, России, Японии и Азии, то эти потоки пойдут в двух направлениях: в западном и восточном. Поэтому магистральные соединительные линии должны иметь пропускную способность 100...250 Гбит/с с возможностью ее поэтапного наращивания, которое и обуславливает применение технологии DWDM на транспортной сети.

Исходя из тенденций увеличения потоков информации, которая передается, можно предположить, что за период времени, соизмеримый со сроком службы оптического кабеля, необходимая пропускная способность ВОЛС возрастет на один-два порядка и будет составлять 20 Тбит/с. Такая величина может обеспечиваться только спектральным уплотнением. При этом в кабеле с 40 ОВ необходимо обеспечить организацию по каждому волокну до 100 каналов со скоростью передачи 10 Гбит/с.

ВЫВОДЫ

1. Оптимальная среда передачи перспективной транспортной сети должна иметь высокую потенциальную пропускную способность и разрешать несколько раз за срок службы увеличивать объем информации, которая передается, без существенных затрат на модернизацию линейно-кабельных сооружений.

2. Нагрузка на транспортную сеть Украины со стороны пользователей Интернет постоянно увеличивается, и уже в ближайшем будущем необходимая пропускная способность ВОЛС возрастет до 100...250 Гбит/с.

3. Экономический эффект от использования ОВ типа G.655 обусловленный его оптимальными дисперсионными свойствами. Отсутствие нулевого значения дисперсии в рабочей полосе длин волн разрешает избежать нелинейных эффектов, а низкий наклон кривой, которая характеризует зависимость дисперсии от длины волны, и наличие волокна с положительной и отрицательной дисперсией дают возможность исключить из ЭКУ довольно дорогой компенсатор дисперсии (с оптическими потерями 7 дБ) и увеличить его длину с 50 до 80 км.

4. ОВ типа G.655 целесообразно использовать на сетях, где пропускная способность ребра не меньше 10 Гбит/с, а длина элементарных кабельных участков - большее 50 км.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Бесслер Р., Дойч А. Проектирование сетей связи: Пер. с немецкого Б.Н. Абрамова, А.В. Панкина/ Под ред. Г.Б. Давыдова. - М.: Радио и связь, 1988. - 268 с.
2. Рекомендация G.655 МСЭ-Т. Одномодовые оптические волокна с ненулевой смещенной дисперсией.
3. Котенко Михаил. Полностью оптические сети // Телеком. Телекоммуникации и сети. - 2000, №1-2, ст. 51-58.
4. Рекомендация G.653 МСЭ-Т. Одномодовые оптические волокна со смещенной дисперсией.
5. Оптическое волокно TrueWave®. Одномодовое оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией. Коммуникационные технологии начала следующего тысячелетия / Lucent Technologies. Bell Labs Innovation. - Сборник статей и технических материалов, 1999.
6. Рекомендация G.654 МСЭ-Т. Одномодовое оптическое волокно со смещенной длиной волны отсечки.
7. Балох Виталий. Украинский сегмент сети Интернет сегодня. // Сети и телекоммуникации. - 1999, №2(8), ст. 10-20.
8. Hecht Jeff. Long-haul DWDM systems go the distance. // Laser Focus World, October 2000, P. 125-132.
9. TrueWave® RS. NonZero Dispersion Optical Fibre. Проспект лаборатории Bell Labs Innovations фирмы Lucent Technologies, 1999.