

неефективно. Це є критично для схеми доступу на рис. 2, б, коли одному користувачу доступна швидкість до 128 Кбіт/с і він постійно під час сеансу роботи в Internet займає одну лінію. Відповідно N користувачів займають N ліній.

2. Схема з використанням серверу доступу підвищує ефективність використання лінії зв'язку, особливо при організації цифрового комутованого з'єднання між сервером доступу та вузлом Internet. При цьому, якість роботи в мережі добра.

3. Схема доступу з використанням виділених ліній не вносить до ТМЗК додаткового навантаження, але такі лінії є достатньо дорогими, тому кінцевими користувачами майже не використовуються. Задовільну якість роботи в мережі Internet можна досягти, задавшись гарантованою швидкістю на одного кінцевого користувача та використовуючи сучасні системи ущільнення аналогових ліній.

4. З порівняння різних схем доступу слідує: місцева ТМЗК використовується найбільш ефективно коли по ЗЛ проходить трафік від групи Internet-користувачів, (схема з розподіленими по території серверами доступу). Система доступу з виділеними лініями є економічно не вигідною і масове використання її проблематичне.

1. Балюк В. Украинский сегмент сети INTERNET сегодня. // Сети и телекоммуникации, 1999, – №2(8), С. 10–20. 2. Балюк В. Необходимо ли регулирование INTERNET // Сети и теле-коммуникации, 1999, – №(9), С. 11–13. 3. Айзман М. И., Гольшко А. В. INTERNET и телеко-ммуникации // Вестник связи. 1998. – № 4. С. 75–79.

УДК 621.396.2; 621.315.21: 611.7.068

Михайло Климаш, Євген Чернихівський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАФІКА ТА ПОТЕНЦІЙНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

© Климаш Михайло, Чернихівський Євген, 2001

Обчислено навантаження та пропускну здатність одномодових оптичних волокон для транспортної мережі; дано порівняльний аналіз дисперсійних характеристик волокон зі зміщеною ненульовою дисперсією і визначено довжину регенераційної ділянки для DWDM мереж.

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.

Аналіз пропускну здатності оптичних волокон. Однією з найбільш складних задач, яку розв'язують при побудові мереж зв'язку, є прогнозування трафіка. Правильне прогнозування дозволяє із самого початку вибрати оптимальну пропускну здатність і структуру транспортної мережі, оскільки будь-яка перебудова принципово пов'язана з додатковими витратами. Відомі методи передбачення трафіка [1], що базуються на тих чи інших методах екстраполяції функцій, дають задовільну точність тільки за умови, що в майбутньому

зберігаються ті ж самі чи близькі до них умови розвитку, що і в попередньому, досить тривалому часовому інтервалі. Оскільки ці вимоги ніколи не виконуються повною мірою, розробниками мереж зв'язку пропонуються різноманітні методи багатократного збільшення пропускної здатності мережі без суттєвих затрат на модернізацію досить дорогих лінійно-кабельних споруд.

З погляду динамічного збільшення пропускної здатності легко помітити переваги саме оптичного середовища передачі. Сучасні одномодові волокна при часовому розділенні сигналів дозволяють збільшити швидкість передачі з 155 Мбіт/с (STM-1) до 10 (STM-64) і навіть до 40 Гбіт/с (STM-256), тобто більше ніж на два порядки. На теперішній час найбільш поширеним методом послідовного збільшення пропускної здатності ВОЛЗ є комбінований метод, при якому на першому етапі використовується часове розділення сигналів, а на другому – спектральне ущільнення ОБ. При цьому оптимальним середовищем передачі є ОБ з ненульовою зміщеною дисперсією (NZDS-Non Zero Dispersion Shift), що відповідає вимогам Рекомендації G.655 [2]. Насамперед, це оптичне волокно TrueWave[®] фірми Lucent Technologies [3], але не менш ефективним є використання ОБ сімейства (TrueWave RS), а також сімейства LEAF[®] CPC і SMF-LS[™] фірми Corning[®].

Очевидно, що чим більша довжина підсилювальних і регенераційних ділянок, тим вища економічна ефективність ВОСП. Ці довжини визначаються як властивостями середовища передачі, так і характеристиками оптичних інтерфейсів.

Удосконалення ВОСП спочатку відбувалося покращенням властивостей середовища передачі. Перший крок від ОБ G.652 (із ступінчастим профілем показника заломлення) до ОБ G.653 (із зміщеною дисперсією) [4] характеризувався тим, що точка нульової дисперсії була зсунута з довжини хвилі 1,3 мкм в область робочої довжини хвилі 1,55 мкм. Пізніше вияснилося, що при нульовій дисперсії яскраво проявляються нелінійні ефекти – чотирихвильове змішування і фазова самомодуляція [5, 6], різко обмежуючи довжину елементарної кабельної ділянки (ЕКД).

Наступним кроком від ОБ G.653 до G.654 [7] було створення волокна з меншим затуhanням, ніж ОБ G.652 і G.653. Але дуже швидко зменшення коефіцієнта затуhanня на 5–10 % втратило актуальність, оскільки були розроблені ефективні оптичні підсилювачі. Наступний етап розвитку характеризувався активним впровадженням методів спектрального ущільнення (WDM і DWDM), для чого потрібні були волокна, що не породжують нелінійних ефектів. Вимоги до них викладені в Рекомендації MCE-T G.655 [2]. Основна відмінність цих волокон – коефіцієнт дисперсії в третьому вікні прозорості більший 1, але менший $6 \text{ пс}^2/(\text{нм} \cdot \text{км})$.

Отже, на магістральній частині волоконно-оптичної мережі з'явилися оптичні волокна двох типів: стандартизовані, що відповідають Рекомендації G.652, і з ненульовою зміщеною дисперсією, що відповідають вимогам Рекомендації G.655. Останні дещо дорожчі, але завдяки більшій потенційній пропускній здатності забезпечують меншу вартість передачі одного біта інформації.

Розрахунок навантаження та пропускної здатності транспортної мережі. Пропускна здатність транспортної мережі можна визначити при таких вихідних даних:

- види служб: телефонія (інтерактивна мова, аудіоконференції); Інтернет (відеотелефон, відеоконференції, телемедицина, телеосвіта, ігри, робота на відстані, електронна комерція, підготовка програм для теле- і радіомовлення, спільна робота локальних мереж, віртуальні корпоративні мережі, електронна пошта); передача даних (факс, передача файлів);
- глибина прогнозу – 5 років (2005 р. – останній рік прогнозованого періоду);

- населення (N) і телефонна густина (T) в 2005 р. наведені в табл. 1;
- міжміське і міжнародне навантаження (E) в годину найбільшого навантаження (ГНН) від одного телефонного апарата становить 0,01 Ерл;
- коефіцієнт збільшення загальної кількості телефонів за рахунок мобільних телефонів дорівнює 1,1;
- еквівалентна швидкість передачі ($V_{\text{тлф}}$) мовного повідомлення – 16 кбіт/с (МСЕ-Т Рек. G.728, лінійне передбачення з кодовим збудженням і низькою затримкою);
- кількість персональних комп'ютерів (ПК) в Україні в 2005 р. – 3,6 млн.; кількість ПК з модемами чи цифровими з'єднувальними лініями DSL (кількість користувачів Інтернет) – 1,9 млн. [8];
- частка звичайних (модемних) користувачів мережі Інтернет при навантаженні 0,04 Ерл в ГНН і швидкості 56 кбіт/с – 80 % (1,52 млн.);
- частка DSL користувачів мережі Інтернет при навантаженні 0,3 Ерл в ГНН і швидкості прийому/передачі 2 Мбіт/с – 20 % (0,38 млн.);
- кількість вузлів фізичного рівня транспортної мережі дорівнює кількості вузлів автоматичної комутації (ВАК). Вузли транспортної мережі будуються на основі АТМ-технології і з'єднуються за принципом “кожен з кожним”, ребра з'єднувальних ліній виконані на ОВ NZDSF;
- навантаження (в одиницях вимірювання швидкості передачі) розраховується за формулою

$$P=V*E*N,$$

де V – швидкість передачі; E – питома навантаження в ГНН; N – кількість користувачів.

Внаслідок розрахунку отримаємо:

навантаження міжміських і міжнародних телефонних розмов

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

навантаження звичайних користувачів Інтернет

$$P_{\text{ІЗ}}=56*10^3*0,04*1,52*10^6 = 3404800000 \text{ біт/с} = 3,1710 \text{ Гбіт/с};$$

навантаження DSL – користувачів Інтернет

$$P_{\text{ІDSL}} = 2*10^6*0,3*0,38*10^6 = 2,28*10^{11} \text{ біт/с} = 212,3415 \text{ Гбіт/с};$$

навантаження служб передачі даних (становить, як відомо не більше 5 % телефонного навантаження). $P_{\text{ІД}}=3,4423*0,05=0,172 \text{ Гбіт/с}$.

Таблиця 1

Населення і телефонна густина регіонів України

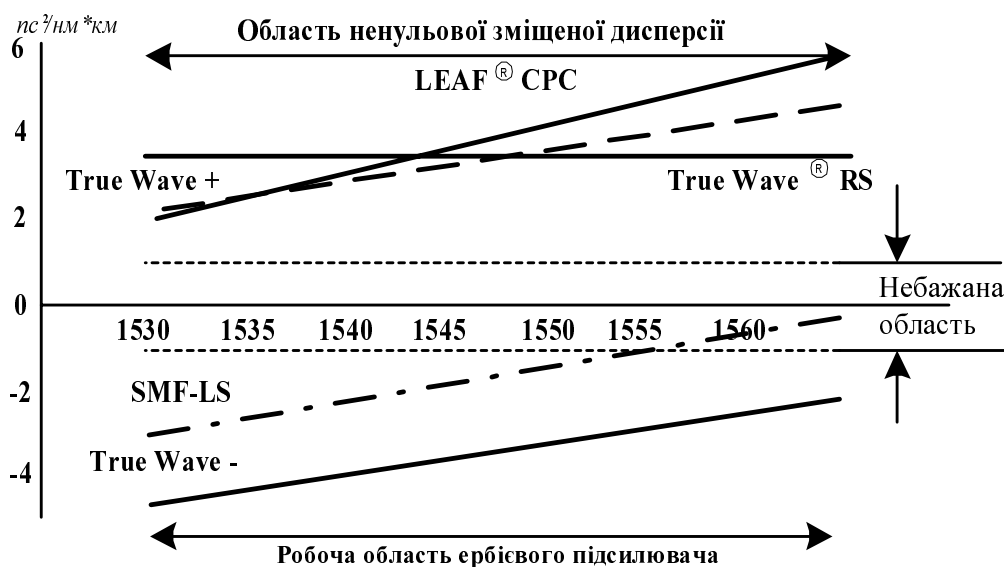
Регіон	Населення, млн. чол.	Телефонна густина (на 1 жителя)
Київ	2,6	0,6
Харків	1,6	0,5
Дніпропетровськ	1,2	0,5
Донецьк	1,1	0,5
Одеса	1,1	0,5
Запоріжжя	0,88	0,5
Львів	0,87	0,5
Вінниця	0,86	0,5
Україна (крім вказаних регіонів)	39,09	0,4

Отже, вже в 2005 р. навантаження на транспортній мережі зв'язку буде визначатися потоками Інтернету. Оскільки основні бази даних мережі Інтернет знаходяться в США, Європі, Росії, Японії і Азії, то ці потоки підуть в двох напрямках: на захід і на схід. Тому магістральні з'єднувальні лінії повинні мати пропускну здатність 100...200 Гбіт/с.

Зважаючи на тенденції до збільшення потоків інформації, що передається, можна припустити, що за період часу, співвимірний із строком служби оптичного кабелю [9], необхідна пропускна здатність ВОЛЗ зросте на один, два порядки і становитиме 20 Тбіт/с. Таке значення забезпечуватиметься тільки спектральним ущільненням. При цьому в кабелі з 40 ОВ необхідно забезпечити організацію по кожному волокну до 100 каналів зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с.

Оптичні волокна з ненульовою зміщеною дисперсією і розрахунок довжини регенераційної ділянки DWDM мереж. Останнє покоління ОВ [3] – це одномодові оптичні волокна з ненульовою зміщеною дисперсією NZDS. Їх розробка проводиться для того, щоб уникнути ефекту чотиреххвильового змішування. Цей термін означає, що на виході ОВ, в яке введені оптичні випромінювання на двох довжинах хвиль λ_1 і λ_2 реєструються оптичні випромінювання на чотирьох довжинах хвиль: λ_1 і λ_2 , $\lambda_3=1/(2/\lambda_1+1/\lambda_2)$ і $\lambda_4=1/(2/\lambda_2+1/\lambda_1)$; $\lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4$. Чотиреххвильове змішування існує для будь-якої пари довжин хвиль, що одночасно передаються. Через це енергія випромінювання перекачується на паразитні “бокові” хвилі, затухання сигналу збільшується, а інтерференція корисного сигналу з паразитним випромінюванням при рівновіддалених вихідних довжинах хвиль знижує правильність передачі. Чотири-хвильове змішування має вагому інтенсивність при нульовій дисперсії. Умови передачі є оптимальними, коли у всьому вікні прозорості дисперсія мала, але не дорівнює нулю.

Особливості волокна TrueWave і LEAF зі зміщеною ненульовою дисперсією ілюструє рисунок.



Дисперсія основних видів NZDF

Як видно з рисунка, номінальна дисперсійна характеристика NZDF типу TrueWave+ проходить вище небажаної області значень, де має місце нелінійний ефект FWM (чотирихвильове змішування); номінальна дисперсійна NZDF типу TrueWave- проходить нижче області FWM; область ненульової дисперсії відповідає стандартизованому діапазону C-band

(1530...1565 нм) оптичних підсилювачів [10]; сумісне використання волокон TrueWave з додатною і від'ємною дисперсією дозволяє зменшити результуючу дисперсію ЕКД.

Переваги ОВ G.655 особливо яскраво проявляються при DWDM, оскільки кількість паразитних хвиль за рахунок FWM різко зростає при збільшенні кількості каналів (табл. 2).

Таблиця 2

Кількість паразитних хвиль в ОВ з N частотними каналами

Кількість каналів	2	4	6	10	20	30	40
Кількість паразитних хвиль $2 * C_2^N = N * (N - 1)$	2	12	30	90	380	870	1560

Важливе значення має низьке значення модової поляризаційної дисперсії ОВ G.655. У табл. 3 наведено результати розрахунку максимальної довжини регенераційної ділянки (РД) за PMD, що розраховується за формулою

$$L=10\ 000/[(k_{PMD})V]^2,$$

де k_{PMD} – коефіцієнт PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$; V – швидкість передачі, Гбіт/с.

Використання ОВ типу G.655 дозволяє створити оптичну систему передачі з такими параметрами: довжина підсилювальної ділянки – більше 100 км, довжина регенераційної ділянки – 600 км, кількість каналів – 40, швидкість передачі – 10 Гбіт/с (в перспективі – 40 Гбіт/с), пропускна здатність – 400 Гбіт/с (5 млн. основних цифрових каналів – ОЦК).

Ідеї, що лежать в основі розробки ОВ TrueWave, отримали подальший розвиток в конструкції TrueWave[®] RS [11]. Дисперсія цього волокна має менший нахил і оптимальна не тільки в третьому, але і в четвертому (L-band) вікні прозорості (1565...1620 нм). Завдяки цим характеристикам розширюється діапазон хвиль, що передаються, збільшується довжина ЕКД, полегшується процедура компенсації дисперсії, а сумарна пропускна здатність ОВ зростає до 1200 Гбіт/с [10].

Таблиця 3

Залежність довжини РД від швидкості і коефіцієнта PMD

Коефіцієнт PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	Довжина РД, км, при швидкості, Гбіт/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

Висновки. 1. Оптимальне середовище передачі перспективної транспортної мережі повинно мати високу потенційну пропускну здатність і дозволяти декілька разів за термін служби збільшувати обсяг інформації, що передається, без суттєвих витрат на модернізацію лінійно-кабельних споруд.

2. Навантаження на транспортну мережу України з боку користувачів Інтернет постійно збільшується, і вже в найближчому майбутньому необхідна пропускна здатність ВОЛЗ зросте до 100...200 Гбіт/с.

3. Економічний ефект від використання ОВ типу G.655 зумовлений його оптимальними дисперсійними властивостями. Відсутність нульового значення дисперсії в робочій смузі довжин хвиль дозволяє уникнути нелінійних ефектів, а низький нахил кривої, що характеризує залежність дисперсії від довжини хвилі, та наявність волокна з додатною і відємною дисперсією дають можливість виключити із ЕКД досить дорогий компенсатор дисперсії (з оптичними втратами 7 дБ) і збільшити його довжину (при аналогічних оптичних інтерфейсах) з 50 до 80 км.

4. ОВ типу G.655 доцільно використовувати на мережах, де пропускна здатність ребер повинна бути не менше 10 Гбіт/с, а довжина елементарних кабельних ділянок – більше 50 км.

1. Бесслер Р., Дойч А. Проектирование сетей связи / Пер. с немецкого Абрамова Б.Н., Панкина А.В.; 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 М. Полностью оптические сети // Телеком. Телекоммуникации и сети. – 2000, № 1–2, С. 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: – Сб. статей и технических материалов. 1999. 6. Перспективы и инновации транспортных сетей связи. Часть 1. Линейно-кабельные сооружения. – М.: МАС, 1999. 7. Рекомендация G.654 МСЭ-Т. Одномодовое оптическое волокно со смещенной длиной волны отсечки. 8. Балюк Виталий. Украинский сегмент сети Интернет сегодня. // Сети и телекоммуникации. – 1999, №2(8), С. 10-20. 9. Синев С.Г., Корольков А.В. Перспективы развития волоконно-оптических сетей связи // Электросвязь. – 1997, №12, С. 25–28. 10. Hecht Jeff. Long-haul DWDM systems go the distance // Laser Focus World, October 2000, P. 125-132. 11. TrueWave[®] RS. NonZero Dispersion Optical Fibre / Проспект лаборатории Bell Labs Innovations фирмы Lucent Technologies, 1999.