

О.В.Тимченко<sup>1)2)</sup>, д.т.н., професор, Фрейхат Ахмад<sup>2)</sup>, Аль-бдур Нашат<sup>2)</sup>, аспірант

## ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТУ ЧОТИРИХВИЛЬОВОГО ЗМІШУВАННЯ В СВІТЛОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ WDM ДЛЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДОВЖИНИ ХВИЛІ

### Вступ

За останні роки вимоги до ширини смуги пропускання зростають дуже швидко через розвиток Інтернету і появу нових мультимедіа додатків і послуг.

Мережі, що використовують оптичне волокно для передачі інформації, приваблює тому, що воно надає ширину смуги пропускання до 25 ТГц (1 ТГц =  $10^{12}$  Гц), має малі втрати - 0,2 Дб/км і дуже мале число помилок порядку  $10^{-13}$  –  $10^{-15}$  на біт [1-2].

У повністю оптичних мережах інформація проходить по оптичному середовищу вздовж всього шляху за винятком крайніх пунктів. Такий шлях називається світловим (*lightpath*). Технологія прийому-передачі всієї смуги пропускання оптичного каналу називається мультиплексуванням по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing - WDM) [2].

На початках в світлопровідних системах використовувалась одна довжина хвилі від джерела до отримувача сигналу (повністю світловий шлях). Проте такий метод як мінімум недостатньо ефективний через можливі конфлікти передачі, що призводить до зменшення пропускну здатності мережі в цілому. Для успішнішої передачі даних і збільшення пропускну здатності систем WDM була розроблена концепція перетворення довжини хвилі, що входить у вузол, в деякий діапазон сусідніх з нею довжин хвиль, що виходять з вузла. Це перетворення довжини хвилі у вузлі прийнято називати конверсією довжини хвилі. Конверсія довжин хвиль може відбуватися у всьому діапазоні вихідних довжин хвиль, тобто існує можливість повної конверсії у вузлі [3].

Завдяки цьому передача даних в системі WDM відбувається по напівсвітлових шляхах (по світлових шляхах лише на обмеженій ділянці мережі), з максимально можливим завантаженням всіх каналів передачі даних незалежно від довжини хвилі джерела. Для цього необхідно виконувати перетворення довжини хвилі в вузлах комутації, де можливе виникнення конфліктів.

---

<sup>1</sup> Akademia Humanistyczno – Ekonomiczna, Łódź, Poland

<sup>2</sup> Національний університет „Львівська політехніка”, Інститут телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, каф. Телекомунікацій, вул.С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Для виконання передачі по напівсвітлових шляхах застосовуються конвертори довжини хвилі, виконані на різних фізичних принципах. Одним з них є нелінійний ефект чотирьохвильового змішування (FWM), дозволяючий перенести інформацію з одної довжини хвилі на інший, тобто виконати конверсію довжини хвилі.

**Методика мультиплексування по довжині хвилі.** Світло з різними довжинами хвиль від декількох лазерів (джерел) передається мультиплексу, а він ущільнює їх для передачі по одному оптоволокну. Технологія мультиплексування по довжині хвилі WDM розбиває оптичний спектр на декілька довжин хвиль.



Рис. 1. Організація потоку даних з використанням WDM

Оптичні підсилювачі, що знаходяться зазвичай на відстані десятків кілометрів один від одного, підсилюють всі хвилі одночасно. Сигнали, що приходять на демультиплексу, розділяються і відправляються одержувачам (рис.1).

Повністю оптичні мережі представляють клас систем, у функціонуванні яких головну роль при комутації, мультиплексуванні і ретрансляції грають не електронні (оптоелектронні), а чисто оптичні технології [3, 4].

Основні пристрої і елементи, що використовуються в повністю оптичних мережах:

а) лазери і світлодіоди, які можуть використовуватися як джерела випромінювання, світлодіоди розраховані на великий діаметр волокна (багатомодові волокна), а лазери краще підходять для передачі сигналу по одномодовому волокну;

б) пасивні оптичні мультиплексу, що збирають декілька простих сигналів різних довжин хвиль з декількох волокон в мультиплексуний сигнал, що розповсюджується по одному волокну;

в) пасивні оптичні демультиплексу, які виконують зворотну функцію і забезпечують виділення каналів в окремі волокна з складного мультиплексного сигналу, представленою множиною каналів, і далі йде по одному волокну;

г) оптичні комутатори, які виконують в повністю оптичних мережах ту

ж функцію, що і звичайні електронні комутатори в традиційних мережах, тобто забезпечують комутацію каналів або комутацію пакетів;

д) фільтри, які призначені для виділення одного потрібного каналу з множини мультиплексованих каналів, що поширюються у волокні (функції фільтру може виконувати оптичний демультіплексор);

е) хвильові конвертери, призначені для перетворення однієї довжини хвилі в іншу.

У мережах з мультиплексуванням по довжині хвилі оптичний спектр ділиться на множину різних довжин хвиль, кожна з яких передається з максимальною швидкістю [3].

У мережах з повною множиною довжин хвиль заявка приймається, якщо на всіх ланках її маршруту є, хоч би одна вільна довжина хвилі для передачі. У мережах без зміни довжин хвиль, заявка приймається на передачу, якщо запрошувана довжина хвилі вільна на всіх ланках маршруту. Це означає, що заявка може бути заблокована, якщо існують вільні довжини хвиль, але не існує запрошуваної для передачі на всіх ланках шляху. Тому повна конверсія довжин хвиль зменшує вірогідність блокування, хоча є достатньо складним технічним завданням.

### Ефект чотирьоххвильового змішування

В результаті ефекту чотирьоххвильового змішування (FWM) три довжини хвиль, що розповсюджуються в тому самому напрямку,  $f_i$ ,  $f_j$  та  $f_k$  генерують четверту з частотою:

$$f_{FWM} = f_i + f_j - f_k, \text{ де } i, j \neq k. \quad (1)$$

Для трьох вхідних сигналів  $f_i$ ,  $f_j$  та  $f_k$  з рівномірною шкалою  $\Delta f = f_j - f_i = f_k - f_j$ , в результаті ефекту FWM виникає дев'ять нових хвиль відповідно до (1). Продукти ефекту FWM можуть з'явитися на заданих частотах.

Кількість продуктів FWM залежить від кількості вхідних сигналів  $N$ :

$$LPP = \frac{1}{2}(N^3 - N^2).$$

Ця величина представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Залежність кількості різних продуктів FWM від кількості вхідних сигналів

$N$	3	4	5	8	10	16	32
$LPP$	9	24	50	224	450	1920	15872

Видно, що ріст числа використовуваних каналів призводить до дуже швидкого росту кількості продуктів FWM, які можуть з'явитись на використовуваних каналах, що, власне, є необхідним для реалізації конверторів довжини хвилі.

### Положення і розподіл продуктів FWM

Розглянемо рівномірний розподіл трьох каналів, що характеризується рівним проміжком між двома сусідніми каналами,  $\Delta f = f_2 - f_1 = f_3 - f_2 = 1$ . В результаті ефекту FWM виникає десять продуктів. Для випадку чотирьох рівномірно розташованих каналів розподіл каналів представлено в табл.2 (проілюстровано на рис.2).

Таблиця 2

Кількість і розподіл продуктів FWM для чотирьох рівномірно розміщених вхідних сигналів

Канал	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Частоти користувача	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
продукти FWM	1	3	6	3	5	5	3	6	3	1



Рис.2. Розподіл продуктів FWM для трьох рівномірно розміщених вхідних сигналів

### Нерівномірний розподіл каналів

У випадку нерівномірного розподілу каналів сусідні канали відстоять на різній відстані між собою. Нехай маємо три вхідні сигнали з частотами  $f_1$ ,  $f_2$  та  $f_4$ , розміщеними в каналах 1, 2 та 4 з нерівномірними відстанями величиною  $\Delta f = f_2 - f_1 = 1$  і  $2\Delta f = f_4 - f_2 = 2$ . При FWM отримуємо десять продуктів, розміщення яких ілюструє рис.3.

Кількість і розподіл продуктів FWM для чотирьох нерівномірно розміщених вхідних сигналів подані в табл.3 та ілюструються рис.4.

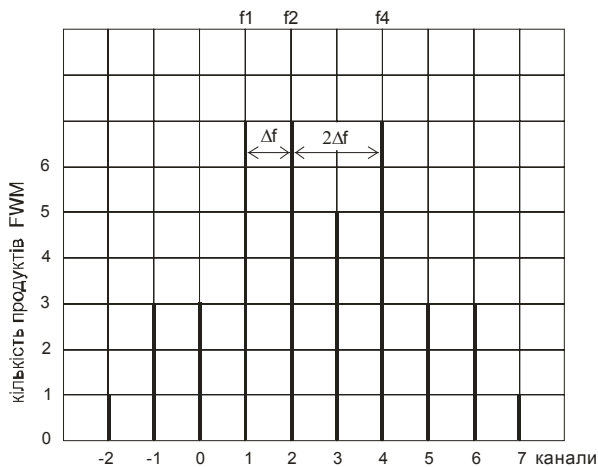


Рис.3. Розподіл продуктів FWM для трьох нерівномірно розміщених вхідних сигналів

Таблиця 3

Кількість і розподіл продуктів FWM для чотирьох нерівномірно розміщених вхідних сигналів

Канал	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Частоти користувача	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
продукти FWM	1	2	1	3	4	2	1	0	3	2	4	3	1	2	2	3	0	1	1



Рис.4. Розподіл продуктів FWM для чотирьох нерівномірно розміщених вхідних сигналів

Як видно з наведених прикладів, у випадку нерівномірно розміщених вхідних сигналів кількість продуктів FWM, що з'являються на каналах користувача, менша, ніж у випадку рівномірного розподілу сигналів при тій самій кількості каналів. Це є результатом не тільки розширення спектра при

тій самій кількості каналів  $N$  і відстані між каналами, а і способом розміщення каналів користувача. У випадку певного розміщення каналів користувача, кількість продуктів FWM зменшується, а в ряді випадків ці продукти не з'являються на каналах користувача.

### Потужність продуктів ефекту FWM

Залежність потужності продуктів FWM  $P_{FWM}$  для частоти  $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$  має вигляд [5]:

$$P_{FWM} = q \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (D_i \chi)^2 \left( \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i(0) P_j(0) P_k(0) e^{-\alpha L}, \quad (3)$$

де  $P_i(0), P_j(0), P_k(0)$  - потужність хвиль з частотами  $f_i, f_j, f_k$ ;

$n$  - груповий коефіцієнт заломлення;

$\lambda$  - довжина хвилі;

$c$  - швидкість світла;

$\alpha$  - постійна затухання;

$L$  - довжина світловоду;

$D_i$  - коефіцієнт генерації:  $D_i = 6$  для  $i \neq j \neq k$ ,  $D_i = 3$  для  $i = j \neq k$ ;

$\chi$  - нелінійність третього порядку;

$A_{eff}$  - поверхня моди;

$L_{eff}$  - ефективна довжина світловоду;

$\eta$  - продуктивність чотирихвильового змішування.

Ефективна довжина світловоду  $L_{eff}$  знаходиться з виразу:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}. \quad (4)$$

Продуктивність чотирихвильового змішування можна обчислити за формулою [5]:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[ 1 + 4e^{-\alpha L} \frac{\sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right], \quad (5)$$

де  $\Delta\beta$  - фазова неузгодженість.

Використовуючи [3], маємо:

$$\Delta\beta = -\beta(f_{FWM}) + \beta(f_i) + \beta(f_j) - \beta(f_k). \quad (6)$$

Розкладаючи постійну розповсюдження  $\beta$  в ряд в околі частоти  $f_0$ , маємо:

$$\beta(f) = \beta(f_0) + (f - f_0) \frac{d\beta}{df}(f_0) + \frac{1}{2} (f - f_0)^2 \frac{d^2\beta}{df^2}(f_0) + \frac{1}{6} (f - f_0)^3 \frac{d^3\beta}{df^3}(f_0). \quad (7)$$

Після перетворення вираз (7) можна записати у вигляді:

$$\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c}(f_i - f_k)(f_j - f_k) \left[ D(f_0) - ((f_i - f_0) + (f_j - f_0)) \frac{\lambda^2}{2c} D'(f_0) \right] \quad (8)$$

Для  $f_0$ , для якого  $D(f_0) = 0$ , отримуємо:

$$\Delta\beta = -(f_i - f_k)(f_j - f_k) \frac{\lambda^4}{2c^2} D'(f_0). \quad (9)$$

Коли  $D'(f_0) = 0$ , остаточно отримуємо:

$$\Delta\beta = -(f_i - f_k)(f_j - f_k) \frac{\lambda^2}{2c} D(f_0). \quad (10)$$

Як слідує з останнього рівняння, величина  $\Delta\beta$  залежить від відстані між каналами та величини дисперсії. Змінюючи ці параметри, можна легко регулювати величиною  $\Delta\beta$ , а значить і продуктивністю чотирихвильового змішування. Ця продуктивність максимальна для  $\Delta\beta = 0$ :

$$\eta = 1.$$

Проте це має місце лише у випадку, коли відстань між каналами дорівнює нулю, або коли дисперсія і її приріст рівні нулю.

#### **Дослідження продуктивності чотирихвильового змішування**

Згідно рекомендацій ІТУ-Т в оптичних лініях застосовуються чотири типи світловодів (G.652-G.655). Проведемо дослідження продуктивності чотирихвильового змішування для наступних типів світловодів:

1. SMF (англ. *Single-mode optical Fibre Cable*) ІТУ-Т G.652 [6];
2. DSF (англ. *Dispersion-Shifted Single mode*) ІТУ-Т G.653 [7];
3. NZDSF (англ. *Non Zero Dispersion-Shifted Single mode Optical fibre cable*) G.655 [8].

Для розрахунку залежності продуктивності чотирихвильового змішування від відстані між каналами для різних типів світловодів і різних довжин використані залежності (5) з такими значеннями параметрів:

- постійна затухання  $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км} \cdot 0,23 = 0,046 \text{ км}^{-1}$ ;
- швидкість світла  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
- дисперсійний коефіцієнт
  - SMF  $D = 17 \text{ пс/нм} \times \text{км}$ ,  $D' = 0 \text{ пс/нм}^2 \times \text{км}$ ;
  - DSF  $D = 0 \text{ пс/нм} \times \text{км}$ ,  $D' = 0,08 \text{ пс/нм}^2 \times \text{км}$ ;
  - NZDSF  $D = 4 \text{ пс/нм} \times \text{км}$ ,  $D' = 0 \text{ пс/нм}^2 \times \text{км}$ .
- крок  $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ ;
- довжина світловоду  $l = 20 \text{ км}$ ,  $l = 100 \text{ км}$ .

При розрахунках прийнято постійне значення дисперсії для всього світловоду. Результати обчислень показані на рис.5-8.

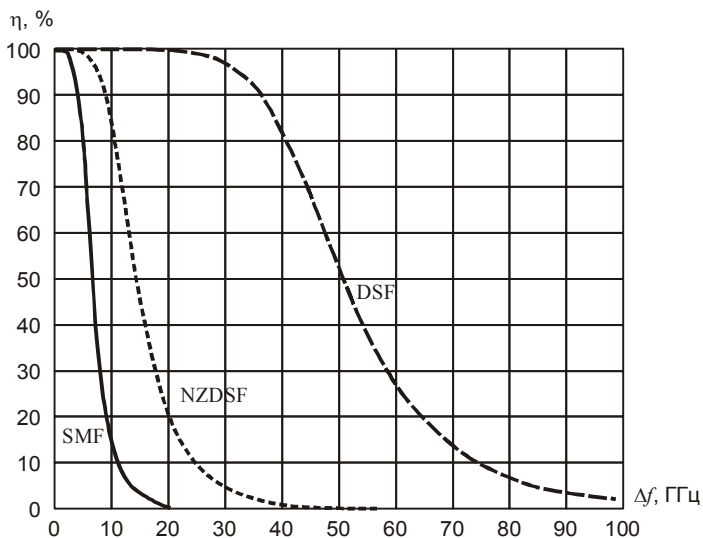


Рис.5. Залежність продуктивності чотиривхвильового змішування  $\eta$  від міжканального інтервалу  $\Delta f$  для трьох типів світловодів SMF, DSF, NZDSF однакової довжини

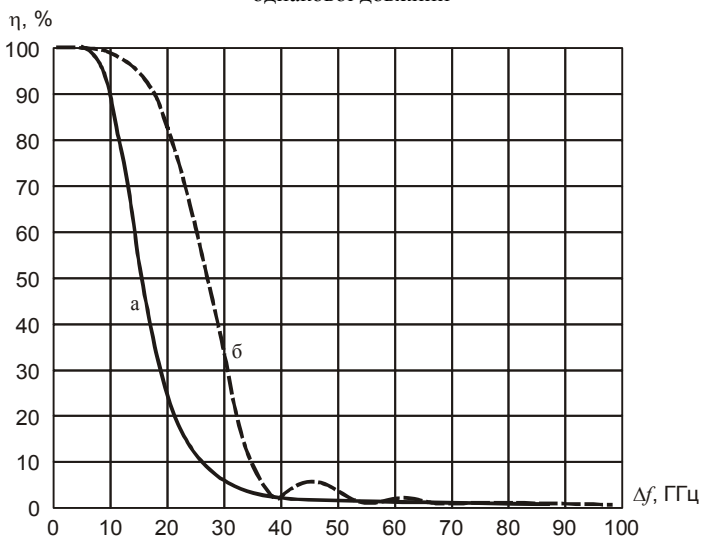


Рис.6. Залежність продуктивності чотиривхвильового змішування  $\eta$  від міжканального інтервалу  $\Delta f$  для світловоду NZDSF для двох різних довжин світловоду а – 100 км, б – 20 км



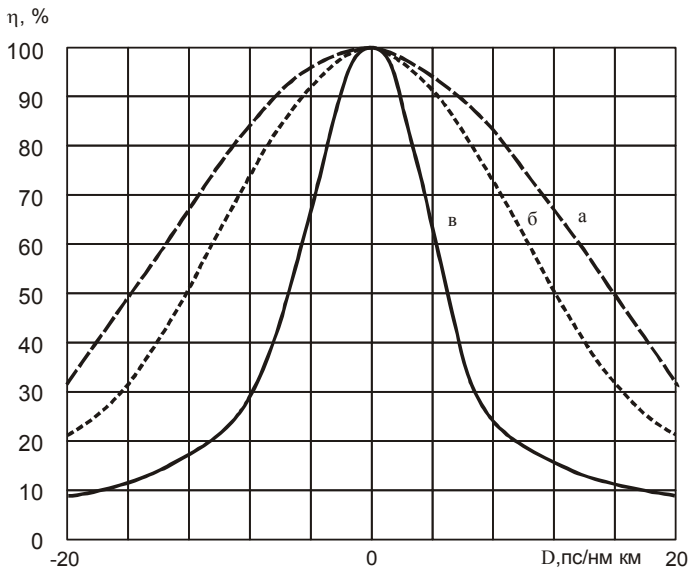


Рис.7. Залежність продуктивності чотирихвильового змішування  $\eta$  від дисперсії  $D$  для світловодів з довжиною а – 40 км, б – 60 км, в 80 км,  $\Delta f = 10$  ГГц

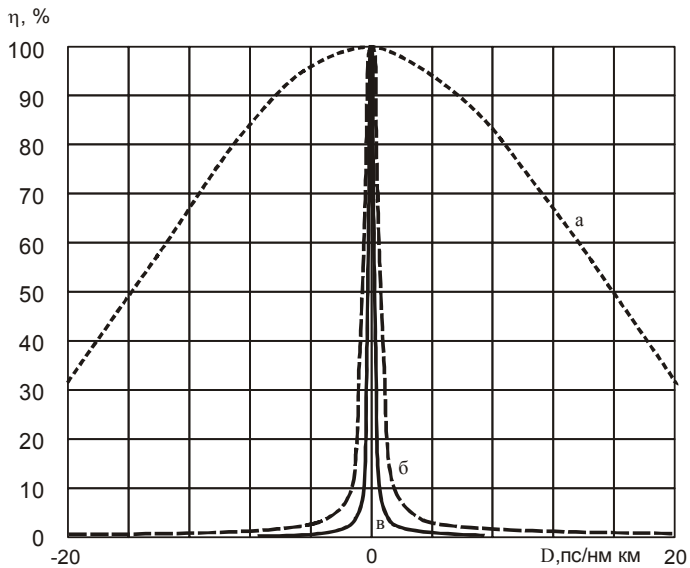


Рис.8. Залежність продуктивності чотирихвильового змішування  $\eta$  від дисперсії  $D$  для світловоду довжиною  $l = 20$  км і міжканального інтервалу  $\Delta f$  а – 10 ГГц, б – 50 ГГц, в – 100 ГГц

З представлених результатів можна визначити сильну залежність продуктивності чотирихвильового змішування від міжканального інтервалу. Для міжканального інтервалу  $\Delta f = 100$  ГГц, а таким є запропонований ІТУ-Т в G.692 [6], маємо значне зменшення ефекту чотирихвильового змішування. Проте зменшення міжканального інтервалу призводить до значного впливу ефекту FWM. Крім того, збільшення ефекту FWM настає при збільшенні величини дисперсії світловоду. В звичайних системах передачі таке збільшення дисперсії обмежує пропускну здатність світловоду, оскільки збільшується можливість спотворень сигналу. Найменш придатними для високопродуктивних перетворювачів довжини хвилі на основі чотирихвильового змішування є світловоди з ненульовою дисперсією NZDSF. Рис. 7 і 8 представляють залежність продуктивності чотирихвильового змішування від дисперсії.

### **Висновки**

В роботі описано застосування ефекту чотирихвильового змішування для конверсії довжини хвилі в системах DVDM. Показано, що продукти змішування можуть з'являтися в необхідних каналах, що дозволяє керувати маршрутизацією повідомлень в таких системах. Потужність результату змішування залежить від великої кількості факторів, таких як спосіб розміщення вхідних каналів, потужності випромінювання, виду світловодів. Чим більший коефіцієнт дисперсії світловоду, більша потужність передачі в одному каналі, або густіше розміщені канали передачі, тим більшу потужність продуктів чотирихвильового змішування можна отримати в даному типі конвертерів.

1. *Иванов А.Б.* Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Syrus Systems, 1999.
2. *Слепов Н.Н.* Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.: ил.
3. *Скляров О.К.* Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: Солон-Р, 2001.
4. *Тимченко О.В., Фрейхат Ахмад, Аль-бдур Науат.* Розв'язок задачі розташування конвертерів довжини хвилі для підвищення ефективності повністю оптичних мереж // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.42. – К.: 2007. – С.170-176.
5. *Nori Shibata, Ralf P. Braun, Robert G. Waarts,* Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through Four-Wave Mixing in a single-mode optical fiber, IEEE Journal of quantum electronics, v.QE-23, N 7, July 1987, pp.1205-1210.
6. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable. Geneva, 1993.
7. ITU-T Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable. Geneva, 1996.
8. ITU-T Recommendation G.655. Characteristics of a non zero dispersion-shifted singlemode optical fibre cable. Geneva, 1996.

*Поступила 26.01.2009 р.*