

УДК 621.396

Є.М. Чернихівський, М.М. Климаш

Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра "Телекомунікації"

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ МОДОВОЇ ДИСПЕРСІЇ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН МАГІСТРАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

© Чернихівський Є.М., Климаш М.М., 2002

Проаналізовано причини, що приводять до виникнення поляризаційної модової дисперсії в оптичних волокнах, розраховано її вплив на швидкість передачі у волоконно-оптичних системах передачі інформації.

This article gives analysis of PMD optical fiber causes, calculate influence PMD effects on passing speed information transmission optical system.

### 1. Причини і фактори, що зумовлюють виникнення поляризаційної модової дисперсії (PMD).

Зростання інформаційних потоків у волоконно-оптичних системах передачі (ВОСП), впровадження устаткування SDH з інтерфейсами STM-16/64 (2.4 і 10 Гбіт/с), лабораторне тестування систем STM-256 (40 Гбіт/с) роблять актуальним вивчення такого явища, як поляризаційна модова дисперсія PMD (polarization mode dispersion), що стає одним з головних обмежуючих факторів швидкості передачі.

Ефект PMD став критичним у міру досягнення високих швидкостей в оптичному каналі зв'язку. Крім цього, внаслідок накопичувального характеру поляризаційної модової дисперсії її негативний вплив посилюється із зростанням довжини лінії.

Головна фізична причина появи PMD – нециркулярність (анізотропія профілю) серцевини одномодового волокна. Електричне поле світлової хвилі завжди можна подати у вигляді суперпозиції двох ортогональних векторів чи станів поляризації SOP (State of Polarization), причому зробити це можна різними способами (наприклад, дві лінійні поляризації з ортогональними векторами поляризації чи дві кругові поляризації з протилежними напрямками обертання). В ідеальному ізотропному волокні при будь-якому поділі обидві компоненти поширюються з однаковою швидкістю, і внаслідок проходження такого середовища тривалість вихідного імпульсу залишається такою ж, як і на вході у волокно. У волокні з анізотропним профілем з'являються два різні ефективні показники заломлення для SOP, що відповідають двом визначеним перпендикулярним лінійним поляризаціям. Це приводить до різних групових швидкостей поширення сигналів чи мод з такими поляризаціями і появи затримки сигналів на приймальній стороні  $\delta t$ , яку прийнято називати диференціальною груповою затримкою DGD (Differential Group Delay). Стани поляризації, що задають найшвидше і найповільніше поширення сигналу, називаються швидким і повільним головними станами поляризації PSP (Principal State of Polarization). Оскільки в традиційних ВОСП фотоприймач не оснащується поляризатором – це нерационально через втрату потужності, а також через ускладнення і подорожчання системи зв'язку – і приймає сигнал одночасно від обох SOP, то диференціальна групова затримка призводить

до розширення результтивного сигналу. Осі лінійної поляризації швидкого і повільного PSP називаються “швидкою” і “повільною” осями анізотропного середовища (рис. 1).

У волоконній оптиці знайшли спеціалізоване застосування так звані волокна із сильно вираженим двопронезаломленням HiBi (Hi Birefringence), тобто волокна, що підтримують стан поляризації РМ (Polarization Maintaining) волокна. У таких волокнах моди PSP значно відрізняються одна від одної за швидкістю поширення і слабо зв'язані між собою. Слабкий зв'язок мод зменшує биття, викликані перекачуванням енергії з моди в моду. Критерієм зв'язку мод у межах окремого сегмента волокна може бути довжина биттів – якщо  $h \gg L$  ( $h, L$  - відповідно довжина биттів мод і довжина неперервного сегмента волокна), то зв'язок мод слабкий, якщо  $h \ll L$ , то зв'язок мод сильний.

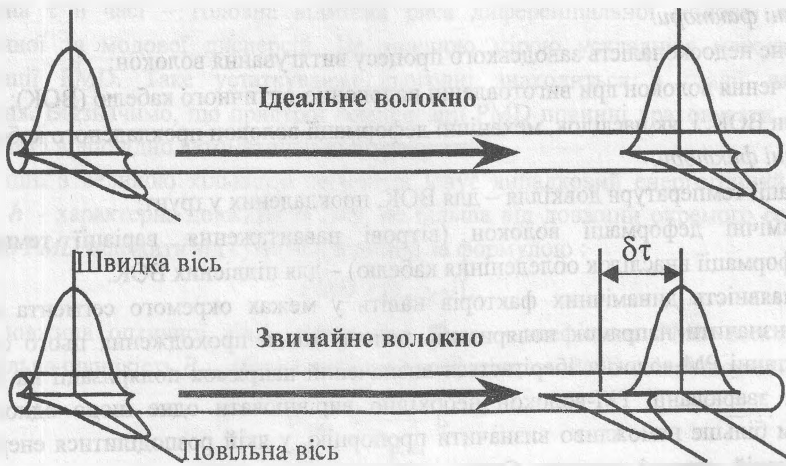


Рис. 1. Поява диференціальної групової затримки між модами двох станів поляризації

Якщо у волокно вводять випромінювання, представлене в обох PSP, то імпульс буде розширюватись. Середньоквадратичну ширину імпульсу  $\sigma^2$  на виході з волокна можна визначити за співвідношенням (1)

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + r(1-r) \cdot \sigma\tau^2, \quad (1)$$

де  $\sigma_0^2$  – середньоквадратична ширина імпульсу на вході сигналу у волокно. Тут  $r$  і  $(1-r)$  – частки потужності випромінювання в різних PSP, а  $\delta\tau$  – затримка між імпульсами на виході з волокна (рис. 1). Максимальне розширення імпульсу виникає при  $r=1/2$ . Тільки в цьому випадку випромінювання, що вводиться у волокно, поляризовано вздовж однієї осі ( $r=0, r=1$ ), волокно буде підтримувати цю поляризацію на виході, і не буде відбуватися розширення імпульсу. У більшості додатків лінійно поляризоване світло вирівнюють з однією з осей PSP волокна РМ, як правило, світло вводять лінійно поляризованим вздовж повільної осі.

У стандартних комерційних волокнах, застосовуваних у ВОСП, зв'язок між модами різних PSP більший, ніж у РМ-волокнах. Контролювати напрямок поляризації на виході волокна практично не видається можливим. Однак до сегмента стандартного волокна можна також застосовувати формулу (1).

У загальному випадку пасивна частина ВОСП являє собою складну систему, що

складається із сегментів волокон, з'єднаних послідовно у визначених точках зварювання чи "сухими" стиками. У кожній з таких точок відбувається неконтрольований і стрибкоподібний кутовий поворот осей  $PSP_{1,2}$ , що веде до перерозподілу енергії між  $PSP$  на початку кожного наступного сегмента волокна. Внаслідок цього в протяжній лінії зв'язку відбувається багаторазовий перерозподіл енергії між модами швидкого і повільного  $PSP$ , навіть при повному нехтуванні взаємодією мод у межах окремого сегмента волокна. Це явище називається зв'язуванням мод.

На відміну від  $PM$ -волокон, стандартні волокна, що застосовуються у ВОСП, намагаються виготовляти з якомога меншою нециркулярністю. Однак домогтися ідеального профілю волокна неможливо. Є статичні та динамічні фактори росту анізотропії профілю волокна:

*статичні фактори:*

- власне недосконалість заводського процесу витягування волокон;
- скручення волокон при виготовленні волоконно-оптичного кабелю (ВОК);
- згини ВОК, і, як наслідок, механічні деформації волокон прокладеного кабелю;

*динамічні фактори:*

- варіації температури довкілля – для ВОК, прокладених у ґрунт;
- динамічні деформації волокон (вітрові навантаження, варіації температури довкілля, деформації внаслідок обледеніння кабелю) – для підвісних ВОК.

Через наявність динамічних факторів навіть у межах окремого сегмента волокна неможливо визначити напрямок поляризації сигналу після проходження цього сегмента (при використанні  $PM$ -волокна зберігається визначений напрямок поляризації на виході з волокна; при зварюванні  $PM$ -волокон необхідно вирівнювати одне щодо одного  $PSP$ -волокна). Тим більше неможливо визначити пропорцію, у якій розподілиться енергія між  $PSP$  на наступній ділянці волокна. Отже, диференціальна групова затримка  $\tau$  не стала величиною, а змінюється з часом, причому випадково. Детальний аналіз динамічної поведінки  $\tau$  показує, що ця випадкова величина найкраще підпадає під розподіл Максвелла, а середньоквадратичне відхилення  $\langle \delta\tau^2 \rangle$  зв'язано із середнім значенням диференціальної затримки співвідношенням (2)

$$\langle \delta\tau^2 \rangle = \frac{3\pi}{8} \langle \delta\tau \rangle_{\text{Max}}^2, \quad (2)$$

де  $Max$  – усереднення по функції розподілу Максвелла.

## 2. Вплив PMD на швидкість передачі інформації в оптичному волокні.

Поляризаційною модовою дисперсією  $PMD$  називають середньоквадратичне значення диференціальної групової затримки, яке визначається за формулою (3)

$$PMD = \sqrt{\langle \delta\tau^2 \rangle}, \quad (3)$$

Усереднення виконують, обчислюючи  $\delta\tau$  у різні вибіркові моменти часу  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$  у межах часу  $\Delta t$  з наступним визначенням середньоквадратичного значення. Якщо окремі параметри ВОСП повільно змінюються в часі, масштаб якого  $\Delta T$  значно більший за  $\Delta t$ , то можна говорити про залежність  $PMD$  від часу в цьому більшому масштабі.

Внесок у  $PMD$  можуть давати різні компоненти ВОСП. Параметр  $PDL$  (Polarization

Dependent Losses) показує максимальне розходження в затуханні сигналу для двох ортогональних станів SOP. З розвитком технології щільного хвильового мультиплексування DWDM вимірювання параметра PDL стає також важливим, щоб гарантувати високі характеристики і вчасно виявляти критичні ділянки і вузли ВОСП [1,2].

Незважаючи на те, що джерелом PMD можуть бути й інші активні та пасивні компоненти ВОСП, волокно (протяжних сегментів ВОК) вносить вирішальний вклад у PMD. Якщо лінія складається з  $N$  сегментів ВОК, дисперсія кожного з яких дорівнює  $PMD_i$ , то результувна поляризаційна модова дисперсія визначається за формулою:

$$PMD^2 = PMD_1^2 + PMD_2^2 + \dots + PMD_N^2 \quad (4)$$

відповідно до закону суми незалежних випадкових величин.

Зміна  $\tau$  в часі – головна відмінна риса диференціальної модової затримки від хроматичної та модової дисперсій. Це значною мірою ускладнює методи і пристрої компенсації PMD. Таке устаткування сьогодні знаходиться в стадії лабораторного тестування. Відзначимо, що пристрої компенсації PMD повинні враховувати дрейф станів поляризації і відповідно автоматично підстроюватися.

У лінії з великою кількістю сегментів існує випадковий енергетичний зв'язок мод ( $h \ll L$ ,  $h$  - характерна довжина зв'язку, не більша від довжини окремого сегмента). Для такої лінії PMD залежить від сумарної відстані за формулою :

$$PMD = D_{pmd} \sqrt{L}, \quad (5)$$

де  $L$  - довжина оптичної лінії зв'язку, км,  $D_{PMD}$  - коефіцієнт PMD волокна, пс/км<sup>1/2</sup>. Максимальна швидкість  $B_{max}$  (біт/с) зв'язана з коефіцієнтом PMD співвідношенням:

$$B_{max} = \frac{\epsilon}{D_{pmd}} L^{-1/2}, \quad (6)$$

де параметр  $\epsilon$  (частка бітового інтервалу) вибирається залежно від того, який коефіцієнт помилок BER (без залучення методів корекції помилок) є прийнятним. Так, теоретичний аналіз з урахуванням тимчасових флуктуацій  $\delta\tau$  дає  $\epsilon=0.1$  при  $BER = 10^{-12}$  (5).

Значення коефіцієнта  $D_{PMD}$  для типових волокон знаходиться в межах від 0,05 до 1,5 пс/км<sup>1/2</sup>. У сучасних ВОСП, що використовує волокна нових стандартів, значення коефіцієнта  $D_{PMD}$  знаходиться в межах від 0,05 до 0,1 пс/км<sup>1/2</sup> [3].

На основі (6) було проаналізовано залежність максимальної швидкості передачі інформації і довжини регенераційної ділянки від дисперсії PMD (при її індивідуальному впливі).

### 3. Висновки.

Поляризаційна модова дисперсія є основним обмежуючим фактором швидкості передачі у високошвидкісних телекомунікаційних мережах, таких, як SDH і ATM, тому обчислення і вимірювання PMD є досить актуальними, причому вимірювання потрібно проводити і після розводки кабелів та інсталяції, оскільки механічні згини і деформації можуть викликати подвійне променезаломлення, і, як наслідок, – збільшення PMD. З використанням EDFA волоконні будівельні довжини збільшуються, і всі види дисперсії, включаючи PMD, повинні зводитися до мінімуму, тому що в протилежному випадку ефект від підсилення буде значно зменшений обмеженням частоти модуляції.

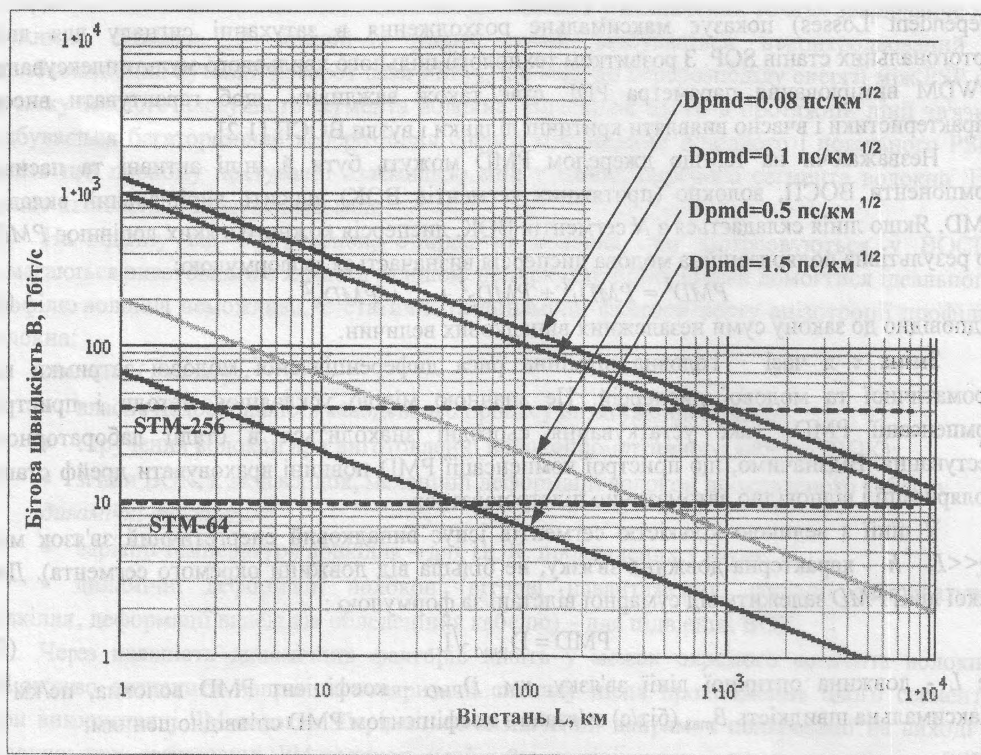


Рис. 2. Вплив поляризаційної модової дисперсії (PMD) на максимальну швидкість передачі (якщо  $BER = 10^{-12}$ ).

1. Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку. К, 1999. 2. Убайдулаєв Р.Р. Волоконно-оптические сети. М, 2000. 3. TIA/EIA FOTP-124. Polarization-mode dispersion measurement for single-mode optical fibers by interferometric method. Washington, DC: Telecommunications Industry Association. 1996.