

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСІЇ ТА НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Проведено дослідження впливу дисперсії та нелінійних ефектів на пропускну здатність волоконно-оптичних систем передачі інформації, а також огляд існуючих методів зменшення впливу нелінійних ефектів, міжмодової дисперсії та джиттера на пропускну здатність і довжину регенераційної ділянки волоконно-оптичних систем передавання. Запропоновано метод, який найкращим чином забезпечить підвищення пропускну здатності транспортної мережі шляхом зменшення впливу поляризаційно-модової дисперсії оптичних світловодів волоконно-оптичних систем передавання інформації.

Ключові слова: дисперсія, оптичне волокно, джиттер, нелінійні ефекти.

V.I. LUZHANSKYI, L.V. KARPOVA, S.O. STEPANOV

Khmelnytsky National University

STUDY OF THE INFLUENCE OF DISPERSION AND NONLINEAR EFFECTS ON THE BANDWIDTH OF FIBRE OPTIC SYSTEMS

The research influence of dispersion and nonlinear effects on the capacity of fibre optic data transmission systems, and review of existing methods of reducing the influence of nonlinear effects of polarization dispersion and jitter on the bandwidth and the length of the regeneration areas of fibre optic transmission systems. The method that best secure higher bandwidth transport network by reducing the influence of polarization Mode Dispersion optical light guide fibre optic systems transmit information with spectral multiplexing.

Keywords: dispersion, optical fibre, jitter, nonlinear effects.

Вступ

На сучасному етапі розвитку оптичних інформаційних технологій спостерігається стрімке зростання об'ємів трафіку, що передається лініями зв'язку, при цьому потреба у збільшенні пропускну здатності мереж зв'язку щорічно приблизно подвоюється. Вирішення цієї проблеми здійснюється шляхом модернізації існуючих волоконно-оптичних систем передавання (ВОСП) із застосуванням нових технологій, що дозволяють максимально використовувати ємність вже прокладених оптичних кабелів та потребують менших термінів реалізації і пов'язаних з цим витрат порівняно з будівництвом нових волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) з більш високими швидкостями передавання даних.

Якісними показниками оптоволоконних ліній зв'язку ВОЛЗ є швидкість передачі та завадостійкість сигналів. Зі збільшенням швидкостей у системах ущільнення оптичних каналів за довжинами хвиль WDM (Wavelength Division Multiplexing) виникають негативні явища, які впливають на якість сигналу, одним з яких є поляризаційна модова дисперсія (ПМД) та джиттер. Оптичні волокна ОВ транспортних мереж є анізотропним середовищем під впливом статичних і динамічних факторів (механічних спотворень), що призводить до різних швидкостей поширення поляризаційних складових і виникнення диференціальної групової затримки (ДГЗ), і як наслідок, поляризаційної модової дисперсії. Для боротьби з поляризаційною модовою дисперсією та джиттером використаємо метод підвищення пропускну здатності оптичної транспортної мережі за рахунок поканальної компенсації поляризаційної модової дисперсії оптичного волокна та зменшення впливу джиттера шляхом усунення впливу його детермінованої складової [1].

Постановка наукової задачі. Сучасна мережа синхронної цифрової ієрархії SDH (Synchronous Digital Hierarchy) побудована на базі мультиплексування з часовим розподілом каналів TDM (Time Division Multiplexing), дійшовши до швидкості передавання 10 Гбіт/с, зіткнувся з проблемами хроматичної та поляризаційної модової дисперсії, котрі на швидкості вищій від 10 Гбіт/с, починають суттєво впливати на якість передачі інформації. Таким чином, розширення пропускну здатності за допомогою TDM виявляється досить проблематичним. Ця проблема послужила поштовхом до створення систем ущільнення оптичних каналів за довжиною хвиль WDM [1].

Явища хроматичної та поляризаційної модової дисперсії в оптичному волокні ставлять обмеження на швидкість і дальність передачі сигналу. Для компенсації їх негативного впливу використовують різні методи: попереднє чіпування лазерного джерела, інверсію спектра в середині ділянки, волоконні бреггівські решітки з постійною лінійною складовою, що змінюється, волокно з компенсацією дисперсії і пристрої компенсації дисперсії [2].

На відміну від однохвильових систем передачі, в системах WDM актуальною стає компенсація дисперсії не на одній довжині хвилі, а в робочому діапазоні довжин хвиль, так звана компенсація нахилу дисперсії.

Оптичні волокна транспортних мереж є анізотропним середовищем під впливом статичних і динамічних факторів (механічних спотворень), що призводить до різних швидкостей поширення поляризаційних складових і виникнення диференціальної групової затримки, і, як наслідок, поляризаційної модової дисперсії. Основним завданням при створенні підсистеми моделювання оптичного волокна з двозаломленням було збереження адекватної залежності диференціальної групової затримки від довжини

хвилі оптичної несучої, тому для опису поширення світла через такі структури було вибрано багатосегментну структуру волокна і модифікований метод Джонса, що полягає у визначенні матриць для кожного із сегментів, що характеризується азимутом θ_i і затримкою $\delta_i = \omega \cdot \Delta\tau_i$:

$$M_i(\omega) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_i + e^{-i\delta_i} \sin^2 \theta_i & (1 - e^{-i\delta_i}) \cos \theta_i \sin \theta_i \\ (1 - e^{-i\delta_i}) \cos \theta_i \sin \theta_i & \sin^2 \theta_i + e^{-i\delta_i} \cos^2 \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

де δ_i – випадковий зсув фаз між ортогонально-поляризованими складовими;

θ_i – азимут пластинки;

$\Delta\tau_i$ – максимальна часова затримка пластинки;

Формульне вираження результуючої матриці Джонса усього оптичного волокна: з N сегментів, \mathbf{T} – це добуток матриць Джонса кожного сегмента:

$$\mathbf{T} = \prod_{i=0}^{N-1} M_i(\delta), \quad (2)$$

де N – кількість сегментів оптичного волокна;

$M_i(d)$ – комплексна матриця Джонса;

\mathbf{T} – добуток матриць Джонса кожного сегмента.

Як сума затримок кожного з сегментів визначається результуючий час затримки між швидким та повільним станами:

$$dgd_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N dgd_k, \quad (3)$$

де dgd_k – диференціальна групова затримка сигналу оптичного волокна.

Створена підсистема моделювання оптичного волокна з двозаломленням використовує також методи статистичного моделювання і дозволяє досліджувати залежність диференціальної групової затримки від еліпса поляризації вхідного сигналу, довжини хвилі оптичної несучої і ширини смуги випромінювання оптичного джерела, а кількість сегментів і їх параметри безпосередньо пов'язати з коефіцієнтом ПМД і довжиною оптичного волокна [3].

Нелінійні ефекти виникають через нелінійну залежність індексу рефракції матеріалу оптичного волокна від потужності сигналу, що ним передається і можуть викликати шуми і спотворення оптичних імпульсів, що накладає обмеження на максимальну швидкість передавання і пропускну здатність ОВ, а також на довжину регенераційної ділянки. Для визначення впливу нелінійних ефектів використовується ряд аналітичних виразів, так як ці ефекти носять більше детермінований, ніж випадковий характер.

Тому, для визначення порогової потужності стимульованого розсіювання Брілюена (SBS) використовуємо вираз [5]:

$$P_{th}(SBS) \approx 21A_{eff} / g_B L_{eff}, \quad (4)$$

де $g_B = 5 \cdot 10^{-11}$ – типовий приріст SBS;

$L_{eff} = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L})$ – ефективна довжина ОВ;

$A_{eff} \approx \pi(MFD/2)^2$ – ефективна область, може знаходитися в діаметрі модового поля (MFD);

α – затухання в оптичному волокні.

Обчислюємо поріг потужності для стимульованого розсіювання Рамана (SRS) [5]:

$$P_{th}(SRS) = 16A_{eff} / g_R L_{eff}, \quad (5)$$

де $g_R = 10^{-13}$ – підсилювальний коефіцієнт SRS, м/Вт, при 1550 нм.

Явища SBS і SRS полягають в тому, що оптичний сигнал розсіюється і зміщується в область довших хвиль. У випадку, якщо сумарна потужність сигналу в ОВ не перевищує допустимих значень, то впливом даних ефектів можна знехтувати.

Фазова самомодуляція починає проявлятися за потужності вхідного випромінювання $\sim 8 \dots 10$ мВт. Зміна фази викликає зсув частоти, що призводить до розширення спектру сигналу.

Зміна фази сигналу обчислюється за формулою [4]:

$$\Phi(SPM) = \gamma P_{in} L_{eff}. \quad (6)$$

де $\gamma = 2\pi n / \lambda A_{eff}$ – нелінійний коефіцієнт поширення;

P_{in} – вхідна потужність сигналу, Вт.

$n \approx 3.2 \cdot 10^{-20}$ – нелінійний коефіцієнт індексу рефракції, м²/Вт.

Виникнення перехресної фазової самомодуляції (ХРМ) відбувається тоді, коли потужність однієї хвилі викликає зміну показника заломлення середовища поширення і призводить до самомодуляції фази іншої хвилі. Зміну фази імпульсу під впливом ХРМ можна визначити за формулою [4]:

$$\Phi_1(XPM) = \gamma L_{eff} (P_1 + 2P_2 + \dots + 2P_n), \quad (7)$$

де $P_1, P_2 \dots P_n$ – потужність хвиль в оптичному волокні, (дБ).

Перехресна фазова самомодуляція є первинним обмеженням вхідної потужності для систем передавання зі спектральним ущільненням.

Чотирихвильове змішування виникає в системах передавання зі спектральним ущільненням каналів і полягає у виникненні паразитних хвиль, що призводить до втрати потужності сигналу і виникнення паразитних впливів в інших каналах системи. Основний параметр в рівнянні для ефективності FWM є $\Delta\beta$ – розузгодження фази FWM через дисперсії ортогональних хвиль:

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk} = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right) \left(\frac{dD}{d\lambda}\right) \left(\frac{\lambda_i + \lambda_j}{2} - \lambda_0\right) (\lambda_i - \lambda_j) (\lambda_j - \lambda_k), \quad (8)$$

де $\beta_i, \beta_j, \beta_k, \beta_{ijk}$ – постійна розповсюдження;

$dD/d\lambda$ – нахил дисперсійної характеристики (відомий як S_0), $(\lambda_i \lambda_j \lambda_k)$;

$\lambda_i \lambda_j \lambda_k$ – три оригінальні довжини хвилі, (нм);

λ_0 – нульова дисперсійна довжина хвилі, (нм);

λ – довжина хвилі передавання у вакуумі (1550 нм).

Визначення ефективності FWM проводимо за формулою [4]:

$$\eta = \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2}\right) \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2}\right) \left(\frac{\sin(N_A \Delta\beta L / 2)}{\sin(\Delta\beta L / 2)}\right), \quad (9)$$

де L – довжина ОВ, (м).

Наступним кроком є визначення потужності згенерованої довжини хвилі:

$$P_{ijk} = \left(\frac{D_{ijk}}{3} \gamma L_e\right) P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta, \quad (10)$$

де $D_{ijk} = 3 \div 6$ – дегенеруючий чинник, залежний від міжканальної відстані і хроматичної дисперсії використовуваного оптичного волокна.

Для реалізації адекватної моделі оптичної транспортної системи необхідно виміряти її характеристики і параметри, для чого були вибрані методики і розроблені схеми експериментів з вимірювання диференціальної групової затримки в широкому спектральному діапазоні і джиттера (фазового тремтіння), що є актуальним в системах такого класу, а також були проведені вимірювання коефіцієнта бітової помилки. Результати вимірювань лягли в основу реалізації відповідних підсистем моделювання оптичної транспортної системи (ОТС), а також були використані для перевірки адекватності розробленої моделі.

Око-діаграма є одним із найефективніших методів аналізу параметрів цифрової системи передавання, тому саме цей метод і ліг в основу створення моделі ОТС. Даний метод дозволяє аналізувати як часові, так і енергетичні параметри цифрового сигналу.

При багатократному накладанні бітових послідовностей, що відображаються на екрані осцилографа у вигляді діаграми розподілу амплітуди сигналу в часі ми отримуємо око-діаграму.

Основним показником якості цифрових систем передачі є коефіцієнт помилок BER. Як правило, робота цифрових систем передачі вважається нормальною тільки в тому випадку, якщо BER не перевищує певне допустиме значення, що відповідає використовуваному мережевому стандарту.

Досить поширена методика оцінки коефіцієнта помилок BER на основі визначення Q-фактора. Q-фактор є параметром, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрової системи передачі. Існує певна функціональна залежність Q-фактора сигналу і вимірюваного коефіцієнта помилок BER. Q-фактор визначається шляхом статистичної обробки результатів вимірювання амплітуди і фази сигналу на електричному рівні, а саме безпосередньо за око-діаграмою. При цьому виконується побудова функції розподілу станів «1» і «0», а для цих розподілів, в припущенні їх гаусової форми, оцінюються математичні очікування станів $E1$ і $E0$ і їх середньоквадратичні відхилення σ_1 і σ_0 (рис. 1 а).

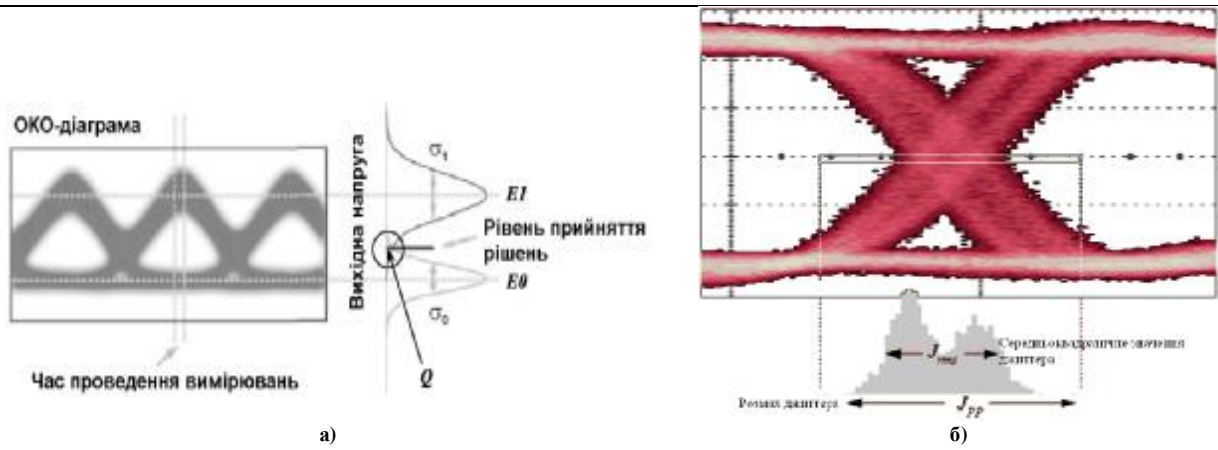


Рис. 1. Ідентифікація око-діаграми: а) оцінка Q-фактора; б) оцінка джиттера

Q-фактор розраховується за формулою:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \tag{11}$$

Для визначення коефіцієнта помилок BER використовуємо:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right) \tag{12}$$

Для оцінки розподілу джиттера, що призводить до часового зсуву оптичних імпульсів, визначають точку синхронізації і зміщення імпульсів, що передавалися через послідовність пристроїв і оптичних волокон відносно цієї точки. В результаті отримуємо такі параметри джиттера, як його середньоквадратичне значення і максимальний розмах (рис. 1 б). Шляхом детальнішого аналізу отриманих значень можна встановити деякі закономірності виникнення джиттера, що дозволить реалізувати схему зменшення його негативного впливу.

В основу розробленого методу компенсації ПМД покладено той факт, що диференціальна групова затримка (ДГЗ) залежить від еліпса поляризації світлового випромінювання, що подається в оптичне волокно. Схему волоконно-оптичної системи передавання інформації зі спектральним ущільненням каналів і схемою компенсації поляризаційної модової дисперсії на основі модулятора вхідного світлового випромінювання, аналізатора ДГЗ і зворотного каналу для вибору найкращого еліпса поляризації вхідного випромінювання показано на (рис. 2).

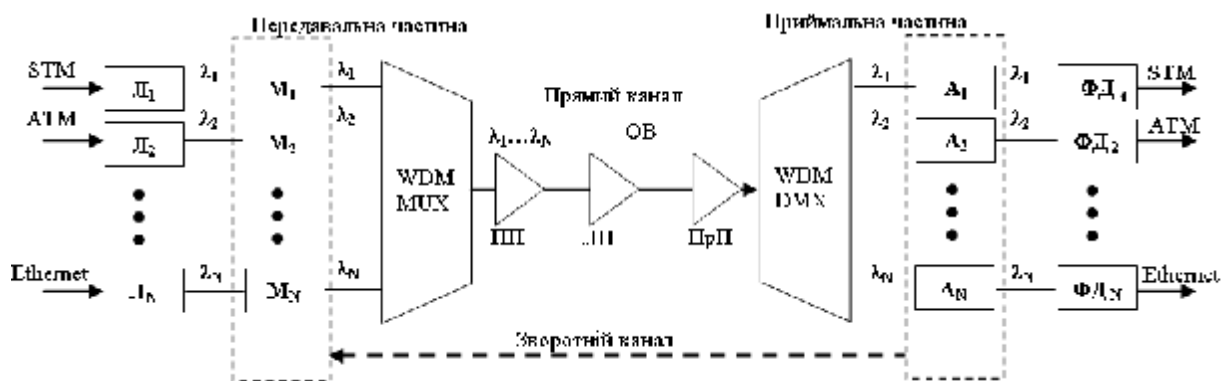


Рис. 2. Схема DWDM-системи передавання з поканальною компенсацією поляризаційно-модової дисперсії

Компоненти, що входять в схему (рис. 2): Л – одномодовий лазер; ПП – підсилювач потужності; ЛП – лінійний підсилювач (як правило EDFA); ПрП – попередній підсилювач потужності; ФД – фотодетектор; ОБ – оптичне волокно; WDM MUX – мультиплексор спектрального ущільнення; WDM DMX – демультіплексор спектрального ущільнення; STM, ATM, Ethernet – можливі види трафіка; М – модулятор – пристрій для зміни еліпса поляризації вхідного випромінювання; А – аналізатор – пристрій для визначення ДГЗ і для керування модулятором через зворотній канал.

Лазер Л випромінює лінійно-поляризоване світло, причому може використовуватися як лазер з внутрішньою модуляцією інтенсивності, так і передавальний оптичний модуль з зовнішнім модулятором. Випромінювання подається на модулятор М, далі сигнали всіх спектральних каналів подаються на оптичний WDM-мультиплексор, після якого груповий сигнал N спектральних каналів передається в оптичне волокно через ширококутний підсилювач потужності.

Схема компенсації ПМД, що показана штриховою лінією на рис. 2, дозволяє оперативно реагувати

на зміну ДГЗ. В якості модулятора використовується електрооптичний кристал. Під дією керуючої напруги кристал змінює двозаломлення, причому різниця показників заломлення швидкої і повільної осей залежить від величини прикладеної напруги. Для схеми компенсації ПМД потрібно, щоб модулятор дозволяв реалізувати різницю часу поширення швидкої і повільної складових в межах від 0 до $2\pi/\omega$, де ω – кутова частота оптичного сигналу. Зрозуміло, що для різної довжини хвилі оптичної несучої буде і різне значення прикладеної напруги для отримання однакової різниці ходу.

Аналізатор на виході ОВ вимірює значення ДГЗ в даний момент. Якщо значення ДГЗ перевищує максимально допустиме, то зворотним каналом передається сигнал на зміну вхідного еліпса поляризації. На модулятор в покроковому режимі подаються фіксовані значення напруги, а на виході аналізатора визначається ДГЗ сигналу. Передача даних ведеться неперервно на кожному еліпсі поляризації вхідного сигналу. Після проходження одного циклу вимірювань (зміна відносного зсуву фаз кристала від 0 до 2π з заданою кількістю кроків) на модуляторі встановлюється таке значення напруги, за якого ДГЗ на виході волокна приймало мінімальне значення, і цей вхідний стан поляризації зберігається до того моменту, поки значення ДГЗ знову не перевищить допустимого. Такий алгоритм компенсації використовується для кожного спектрального каналу окремо, незалежно один від одного [4].

Показником ефективності функціонування оптичних транспортних систем є пропускна здатність мережі, яка суттєво залежить від бітової швидкості передавання інформації, тому одним з основних питань, над яким працюють дослідники, є методи збільшення цієї швидкості. Звичайно, зі збільшенням швидкості передавання зростає і коефіцієнт бітової помилки під впливом обмежуючих факторів, основними з яких є дисперсія, джиттер і нелінійні ефекти.

Нагадаємо, що джиттер складається як з детермінованої, так і з випадкової складових. Детермінована складова залежить, в першу чергу, від фазових зсувів, що є постійними для заданої конфігурації ОТС (нелінійні ефекти, зсуви синхронізації тощо). Випадкова складова джиттера зумовлена шумом електронних компонент.

Ідея зменшення впливу джиттера є наступною – потрібно визначити величину детермінованої (систематичної) складової джиттера і зсунути точку синхронізації (детектування) сигналу на цю величину.

На рис. 3 показано залежність коефіцієнта бітової помилки (виражену Q-фактором) від вибору точки максимального розкриття око-діаграми.

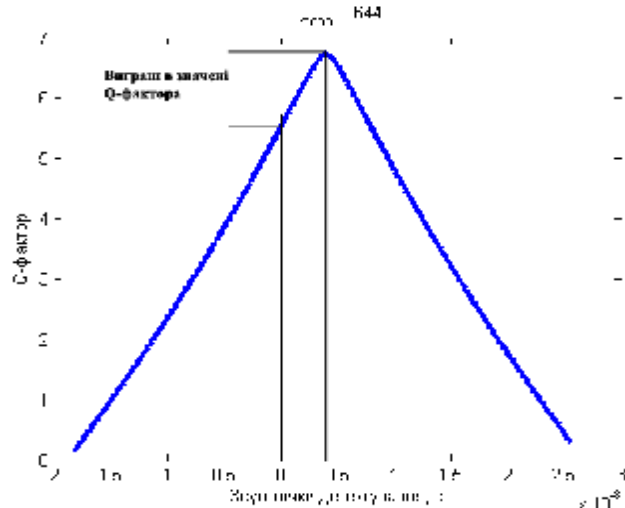


Рис. 3. Залежність Q-фактора від визначення точки максимального розкриття око-діаграми

Як видно з рисунка, максимальне значення Q-фактора отримуємо саме в точці математичного очікування величини джиттера, тобто його детермінованої складової. Це суттєво спрощує реалізацію схеми зменшення джиттера, так як статистичне значення залишається постійним, незалежно від коливань випадкової складової.

На рис. 4 (а, б) зображено око-діаграму сигналів, яку ми отримуємо на приймальному кінці без використання схеми та з її використанням.

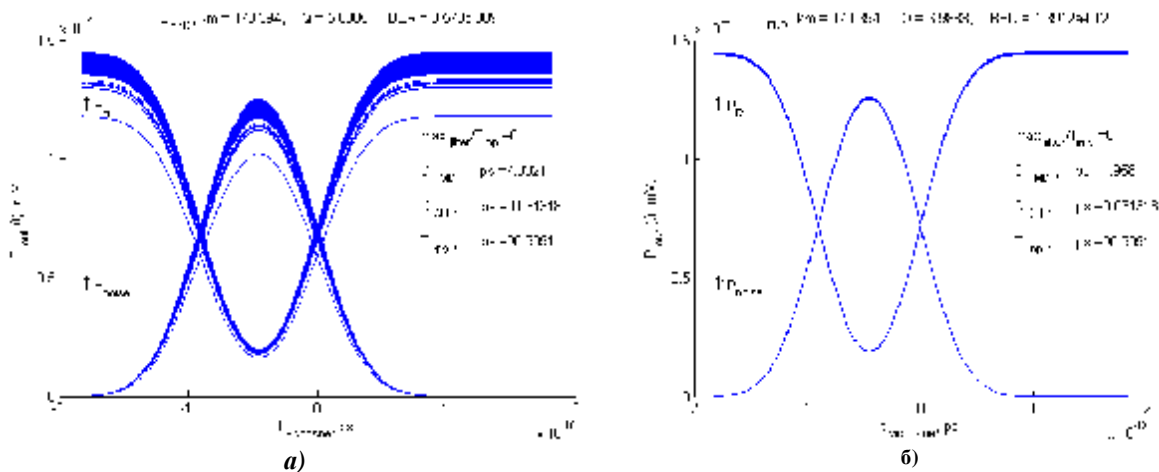


Рис. 4. Око-діаграма під час передачі імпульсів: а) без використання схеми компенсації ПМД; б) з використанням схеми компенсації ПМД

З отриманих результатів видно, що під час зменшення ПМД за допомогою схеми компенсації дозволяє на два порядки зменшити коефіцієнт бітової помилки.

Висновки

Запропоновано метод підвищення пропускної здатності оптичної транспортної мережі шляхом поканальної компенсації ПМД оптичного волокна та зменшення впливу джиттера, що дозволяє зменшити коефіцієнт BER і, відповідно, збільшити бітову швидкість передавання інформації системи зі спектральним ущільненням каналів. Встановлено, що ефективність використання запропонованих рішень зростає зі збільшенням бітової швидкості. Наприклад, при $BER=10^{-12}$ для швидкості 10 Гбіт/с майже немає виграшу у довжині регенераційної ділянки, а для швидкості 40 Гбіт/с з використанням запропонованих схем довжина регенераційної ділянки зростає приблизно в 2 рази.

Література

1. Нікіфоренко К.Б. Дослідження взаємних впливів в оптичних каналах DWDM систем / К.Б. Нікіфоренко, Ю.М. Панченко // Наукові записки УНДІЗ. – 2011. – № 1(17). – 5 с.
2. Поляризаційна модова дисперсія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.fiberman.ru/articles/fiber-optical/polarization-mod-dispersion/>. – (Дата звернення 28.05.2015).
3. Олексін М.І. Модель оптичної транспортної системи на основі технології DWDM / М.І. Олексін, Є.М. Чернихівський // Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2008. – № 618. – 10 с.
4. Олексін М.І. Вплив дисперсії і нелінійних ефектів оптичного волокна на параметри транспортних систем : автореферат. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.12.02 / Олексін М.І. / Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. – Одеса, 2009. – 23 с.
5. Песков С.Н. Нелинейные искажения в волоконно-оптических кабелях [Електронний ресурс] / С.Н. Песков, А.И. Барг, И.А. Колпаков // Теле-Спутник. – Октябрь 2005. – № 10(120). – Режим доступу : <http://www.telesputnik.ru/archive/120/article/62.html>. – (Дата звернення 07.06.2015).

References

1. Nikiforenko K.B., Panchenko Yu.M. Doslidzhennya vzaemnih vpliviv v optichnih kanalah DWDM sistem. Naukovi zapiski UNDIZ. 2011. № 1(17). 5 s.
2. Poliarizatsionnaya modovaya dyspersiya. URL: <http://www.fiberman.ru/articles/fiber-optical/polarization-mod-dispersion/>. – (data zvernennya 28.05.2015).
3. Oleksin M.I., Chernihivskiy E.M. Model optichnoyi transportnoyi sistemi na osnovi tehnologiyi DWDM. Visnyk Nats. un-tu "Lviv. politehnika". Lviv 2008. № 618. 10 s.
4. Oleksin M.I. Vpliv dispersiyi i neliniynih efektiv optichnogo volokna na parametri transportnih sistem: avtoreferat dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk / Odes. nats. akad. zviazku im. O.S. Popova. Odessa 2009. 23s.
5. Peskov S.N., Barh A.Y., Kolpakov Y.A. Nelyneinye yskazheniya v volokonno-optycheskykh kabeliakh. Tele-Sputnyk. 2005. № 10(120). URL: <http://www.telesputnik.ru/archive/120/article/62.html>. – (data zvernennya 07.06.2015).

Рецензія/Peer review : 12.5.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.5.2015 р.

Рецензент: д.т.н., професор Мартинок В.І.