

М.І. Олексін, Є.М. Чернихівський
 ЦТЕ ПМ №6 філії «Дирекція первинної мережі» ВАТ «Укртелеком»,
 Національний університет «Львівська політехніка»,
 кафедра телекомунікацій

МОДЕЛЬ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ DWDM

© Олексін М.І., Чернихівський Є.М., 2008

Проведено моделювання оптичної транспортної системи на основі технології спектрального ущільнення каналів. Розроблено концептуальну і блочну модель оптичної транспортної системи, що дає змогу отримати залежність коефіцієнта бітової помилки від хроматичної і поляризаційної модової дисперсії і нелінійних ефектів.

The design of an optical transport system is considered on the basis of wave length division multiplexing technology. The conceptual and sectional model of an optical transport system, that allows to obtain the dependence of coefficient of bit error rate on chromatic and polarization mode dispersion and nonlinear effects, is developed.

Вступ

Поряд із зростанням об'ємів інформації, які необхідно передавати, зростають і вимоги до транспортних систем, які цю передачу здійснюють. Подальше покращання характеристик оптичних транспортних систем (ОТС) (збільшення швидкості передавання, пропускної спроможності і максимальної відстані передавання без регенерації) лежить в площині використання раманівського попереднього підсилення, використання протоколів прямого виправлення помилок FEC (без вимоги повторної передачі), управління нелінійностями і різними методами контролю і зменшення дисперсії. Проведення натурних експериментів на самих транспортних оптичних системах є доволі складним, а інколи взагалі неможливим, тому створення простої моделі ОТС з одночасним збереженням адекватності і функціональної повноти є однією з найважливіших задач.

У роботі проведено моделювання ОТС на основі технології спектрального ущільнення каналів. Метою моделювання є отримання залежностей параметрів якості обслуговування оптичної транспортної системи від дисперсії і нелінійних ефектів. Методикою розв'язання задачі є аналітико-статистичне моделювання. Завданням є отримання залежностей коефіцієнта бітової помилки (BER) від хроматичної і поляризаційної модової дисперсії, а також від нелінійних ефектів (чотирихвильове змішування, стимульоване розсіювання Брілюена тощо).

Потрібно створити машинну модель M_M волоконно-оптичної системи передавання S , яка б уможливила отримати вищезазвані залежності. Найбільш ефективним шляхом досягнення поставленої мети є аналітико-статистичне моделювання через те, що деякі характеристики і параметри системи носять детермінований характер, що добре піддається аналітичному моделюванню, інші ж характеристики носять стохастичний характер, тому їх моделювання – статистичне.

Основну задачу моделювання оптичних транспортних систем можна розбити на декілька підзавдань. Визначення BER можна проводити за допомогою ОКО-діаграми, що уможливорює проводити детальний аналіз цифрового сигналу за параметрами, безпосередньо пов'язаними з формою хвильового фронту: міжсимвольною інтерференцією, джиттером передачі даних і синхронізації, а також інших характеристик, кожен з яких моделюють окремо.

1. Побудова концептуальної моделі

На першому етапі машинного моделювання – побудови концептуальної моделі M_X системи S і її формалізації – формулюється модель і будується її формальна схема, тобто основним призначенням цього етапу є перехід від змістовного опису об'єкта до його математичної моделі, іншими словами – процес формалізації. Моделювання систем на ЕОМ сьогодні – найбільш

універсальний і ефективний метод оцінки характеристик великих систем. Найбільш відповідальними і найменш формалізованими моментами у цій роботі є проведення межі між системою S і зовнішнім середовищем E , спрощення опису системи і побудова спочатку концептуальної, а потім формальної моделі системи. Модель повинна бути адекватною, інакше неможливо отримати позитивні результати моделювання, тобто дослідження процесу функціонування системи на неадекватній моделі взагалі втрачає сенс. Під адекватною моделлю розумітимемо модель, яка з певним ступенем наближення на рівні розуміння модельованої системи S розробником моделі відображає процес її функціонування у зовнішньому середовищі E .

Сукупність елементів модельованої оптичної системи (її концептуальна модель) показано на рис. 1. Кожен з прямокутників є описом деяких підпроцесів досліджуваного процесу функціонування системи S , вплив зовнішнього середовища E тощо.

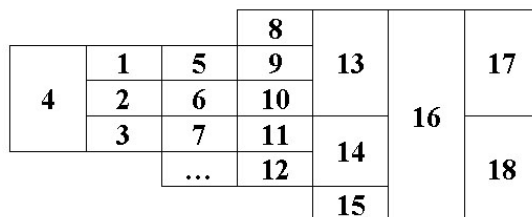


Рис. 1. Концептуальна модель оптичної транспортної системи

Зміст кожного з елементів концептуальної моделі, показаної на рис. 1, є таким: 1 – параметри оптичного передавача; 2 – параметри приймача оптичного випромінювання; 3 – параметри оптичного волокна; 4 – параметри і характеристики системи DWDM; 5 – нелінійний ефект чотирехвильового змішування; 6 – нелінійний ефект стимульованого розсіювання Брілюена; 7 – інші нелінійні ефекти; 8 – втрати потужності в оптичному волокні за рахунок загасання; 9 – втрати в роз’ємних і нероз’ємних з’єднаннях; 10 – втрати за рахунок нелінійних ефектів; 11 – хроматична дисперсія (в кожному спектральному каналі); 12 – поляризаційна модова дисперсія (в кожному спектральному каналі); 13 – сумарні втрати системи; 14 – втрати за рахунок міжсимвольної інтерференції; 15 – джиттер передачі даних і синхронізації; 16 – побудова ОКО-діаграми; 17 – енергетичні параметри якості сервісу (QoS); 18 – часові параметри якості сервісу (QoS).

2. Перехід від концептуальної до блочної моделі

Блоки 1–4 концептуальної моделі об’єднуються у вектор, що містить усі вхідні дані і характеристики волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним ущільненням каналів. Блоки 5–7 моделюють нелінійні ефекти і мають багато спільного, тому вони також об’єднані в один блок (FWM, SBS,...). Хроматична і поляризаційно-модова дисперсії моделюються окремо в двох блоках, оскільки природа цих видів дисперсії має принципову різницю. Сумарні втрати визначаються як сума втрат в оптичному волокні, роз’ємних і нероз’ємних з’єднаннях, а також розсіювання і втрати внаслідок впливу модельованих нелінійних ефектів – їх об’єднано в блок «Втрати». Також цей блок враховує оптичне співвідношення сигнал/шум і його зміну шляхом використання оптичних підсилювачів. Міжсимвольна інтерференція (МІ) виникає внаслідок розмиття фронтів імпульсів і залежить також від характеристик оптичного приймача, обчислюється в блоці a_{ISI} . По суті МІ – це внесення додаткових шумів за рахунок накладання сусідніх імпульсів, і, як наслідок, погіршення якості оптичного сигналу.

Джиттер передачі даних і синхронізації має випадковий характер впливу і моделюється окремим однойменним блоком. Отримані часові і енергетичні параметри використовуються для побудови око-діаграми шляхом багатократного накладання передаваних імпульсів і моделюються у відповідному блоці. Результатом аналізу око-діаграми є вихідний вектор, що містить усі параметри і характеристики якості обслуговування (QoS), отримані шляхом аналітично-статистичного моделювання. Блочна модель волоконно-оптичної системи передавання показана на рис. 2.

Особливістю функціонування оптичних транспортних систем на основі технології спектрального ущільнення є інколи навіть істотна відмінність між параметрами і характеристиками

в різних спектральних каналах, тому одна з основних задач моделювання – зберегти адекватну відмінність у параметрах між різними каналами. Для цього необхідно виділити насамперед залежні від довжини хвилі параметри і характеристики.

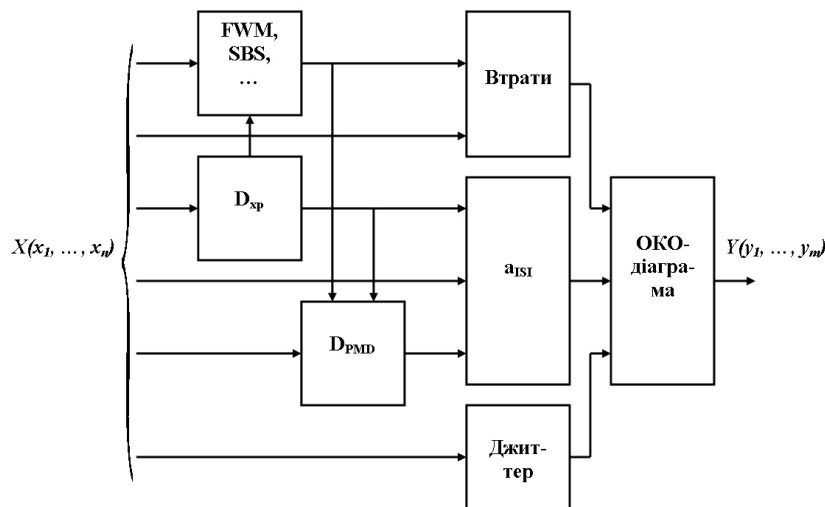


Рис. 2. Блочна модель оптичної системи передавання: FWM, SBS, ... – блок розрахунку впливу нелінійних ефектів; D_{xp} – обчислення хроматичної дисперсії; D_{pMD} – моделювання поляризаційної модової дисперсії. Втрати – обчислення втрат потужності спектральних каналів системи DWDM; a_{ISI} – блок обчислення втрат міжсимвольної інтерференції; Джиттер – моделювання джиттера передачі даних і синхронізації; ОКО – блок побудови око-діаграми; $X(x_1, \dots, x_n)$ – вектор вхідних даних; $Y(y_1, \dots, y_m)$ – вектор вихідних даних (параметрів якості обслуговування), що є результатом моделювання

2.1. Хроматична дисперсія

Моделювання хроматичної дисперсії використовує аналітичні методи обчислення, враховує дисперсійні характеристики оптичного волокна, залежні від довжини хвилі оптичної несучої (для більшості типів оптичних волокон), ширину смуги випромінювання лазера і довжину оптичної лінії зв'язку.

Прогнозоване значення хроматичної дисперсії D_{ch} на кабельній ділянці заданої протяжності L визначається за такою формулою:

$$D_{ch} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L, \text{ с}, \quad (1)$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання джерела в заданому спектральному каналі; D – коефіцієнт хроматичної дисперсії на заданій робочій довжині хвилі λ [2, 3]:

$$D = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \frac{пс}{нм \cdot км}, \quad (2)$$

де S_0 – параметр нахилу спектральної характеристики дисперсії ОВ в точці нульової дисперсії, $\frac{пс}{нм^2 \cdot км}$;

λ_0 – довжина хвилі нульової дисперсії, нм.

Змінюючи довжину хвилі оптичної несучої, отримаємо відповідну залежність хроматичної дисперсії D_{ch} для кожного спектрального каналу системи DWDM.

Хроматична дисперсія впливає на тривалість оптичного імпульсу на вході приймача, для різних спектральних каналів ця тривалість може відрізнятися залежно від оптичного волокна.

Хроматична дисперсія може істотно впливати на рівень нелінійних ефектів, тому обчислене значення D_{ch} і використовується під час їх моделювання.

2.2. Нелінійні ефекти

Оскільки ПМД і хроматична дисперсія залежать від ширини смуги випромінювання лазера, то розглянемо ті з нелінійних ефектів, які ширину цієї смуги змінюють. Інший аспект розгляду нелінійних ефектів – втрати потужності і зміна OSNR (оптичного співвідношення сигнал/шум) в кожному спектральному каналі системи DWDM.

Чотиривильове змішування (FWM).

FWM призводить до появи нових гармонік, частина з яких потрапляє в канали системи DWDM, створюючи завади, що спотворюють основний сигнал. Частота появи паразитної гармоніки визначається так:

$$w_{ijk} = w_i + w_j - w_k, \quad (3)$$

де $i \neq k, j \neq k$.

За наявності m несучих в системі діють дві схеми формування нових гармонік: вироджена ($i=j$) і не вироджена ($i \neq j$). Загальну кількість згенерованих в такий спосіб гармонік N можна оцінити за формулою

$$N = m(m-1)^2. \quad (4)$$

Потужність однієї гармоніки на частоті f_{ijk} обчислюється за формулою

$$P_{ijk} = n_{ijk} \left(\frac{2\pi f_{ijk} k_n d_{ijk} L}{3cS_e} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L}. \quad (5)$$

де n_{ijk} – коефіцієнт ефективності FWM, враховує вплив дисперсійних характеристик волокна і величину частотного інтервалу; α – коефіцієнт загасання волокна; d_{ijk} – коефіцієнт виродження FWM; k_n – коефіцієнт нелінійності показника заломлення.

Отже, для кожного спектрального каналу системи DWDM визначається сумарна потужність паразитних гармонік, що потрапляють у його смугу. Також для кожного спектрального каналу визначається втрата потужності на генерацію паразитних гармонік.

Стимульоване розсіювання Бріллюена (SBS).

Вимушене розсіювання Бріллюена встановлює верхню межу на рівень оптичної потужності, що може бути переданий оптичним волокном. Вираз для граничної потужності SBS записується у вигляді

$$P_{SBS} \approx \frac{2IbA_{ef}}{g_B L_{ef}} \left(1 + \frac{\Delta v_{LS}}{\Delta v_{BW}} \right), \quad (6)$$

де b – числове значення між 1 і 2, що залежить від стану поляризації хвилі; Δv_{LS} – лінійна (спектральна) ширина смуги лазерного джерела; $\Delta v_B \approx 20$ МГц (на 1550 нм) – SBS смуга взаємодії; $g \approx 4,6 \times 10^{-11}$ м/Вт – SBS підсилювальний коефіцієнт (залежить від типу ОВ); L_{ef} – ефективна довжина ОВ, обчислюється як

$$L_{ef} = \frac{4,343}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{e^{0,23\alpha L}} \right). \quad (7)$$

Отже, якщо сумарна потужність, що вводиться в оптичне волокно, не перевищує порогової (P_{SBS}), то впливом SBS можна знехтувати.

Оскільки модель ОТС має блочну структуру, можна вводити додаткові фактори і нелінійні ефекти в процес моделювання, вплив яких може зводитися до послаблення потужності в певному спектральному каналі, розширення смуги і спотворення сигналів інших каналів системи.

2.3. Поляризаційно-модова дисперсія

Прогнозоване значення ПМД на елементарній кабельній ділянці заданої протяжності L [5–7]:

$$D_{PMD} = PMD \cdot \sqrt{L}, \text{ с}, \quad (8)$$

де PMD – параметр ПМД волокна $\frac{nc}{\sqrt{km}}$ (коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії).

Розв'язання задачі моделювання ПМД повинно вирішити такі питання:

- отримати залежність ПМД від довжини хвилі оптичної несучої;
- отримати залежність ПМД від ширини смуги випромінювання лазера, зокрема і спектральної ширини каналу загалом;
- модель повинна відображати стохастичний характер зміни ДГЗ.

Отже, моделювання ПМД є статистичним. ПМД впливає на міжсимвольну інтерференцію і залежить від коефіцієнта ПМД, довжини оптичного волокна, довжини хвилі і ширини смуги лазера. Хроматична дисперсія і нелінійні ефекти також впливають на спектральну ширину каналу, тому цей вплив також враховуватимемо в моделі.

Вплив ПМД моделюватимемо шляхом визначення диференціальної групової затримки (ДГЗ).

Модель оптичного волокна з заданою середньою ДГЗ $\langle \Delta\tau \rangle$ полягає в каскадуванні N двозаломлювальних пластинок різної товщини, кожна з яких вносить випадковий зсув фаз між ортогональними поляризаційними складовими δ_i , з їх випадковою орієнтацією швидкої і повільної осей, що задаються азимутом пластинки θ_i . Кожна з пластинок описується комплексними матрицями Джонса розміром 2×2 :

$$M_i(\delta) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta_i/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta_i/2} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де перша матриця – матриця повороту, яка вводить обертання вектора вхідного випромінювання в систему відліку основних станів поляризації двозаломлювальної пластинки, друга матриця вводить затримку двох ортогональних поляризованих складових.

Результуюча матриця Джонса усього оптичного волокна з N сегментів \mathbf{T} – це добуток матриць Джонса кожної індивідуальної пластинки:

$$\mathbf{T} = \prod_{i=0}^{N-1} M_i(\delta). \quad (10)$$

Запропонований у роботі підхід до визначення часу затримки, що вноситься пластинкою, ґрунтується на визначенні різниці фаз між двома ортогональними складовими, і далі переведення цього значення в часову затримку. Відомо, що двозаломлювальна пластинка, яка характеризується відносним зсувом фаз, може вносити різну затримку між поляризаційними складовими залежно від кута між вхідним вектором Джонса і азимутом осі найбільшої швидкості, ця затримка може лежати в межах від нуля до максимальної затримки пластинки. Один з таких сегментів ОВ показано на рис. 3, а. Позначення, які використовуються на рис. 3 такі: E – електричний вектор вхідного випромінювання; ψ , π – швидка і повільна осі сегмента ОВ відповідно.

Для отримання можливості методом Джонса визначати сумарну ДГЗ оптичне волокно розбивається на сегменти з затримкою, меншою за $2\pi/\omega$, і ДГЗ кожного з цих сегментів визначається окремо (рис. 3, б).

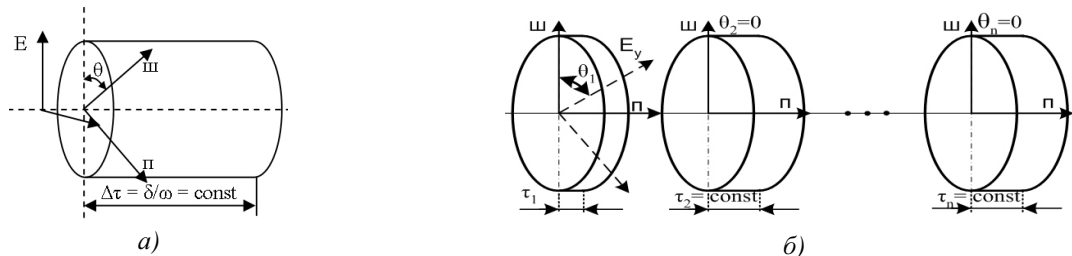


Рис. 3. Модель ПМД оптичного волокна

Матриця Джонса кожного з сегментів, враховуючи азимут і зсув фаз, має такий вигляд:

$$M_i(\omega) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_i + e^{-i\delta_i} \sin^2 \theta_i & (1 - e^{-i\delta_i}) \cos \theta_i \sin \theta_i \\ (1 - e^{-i\delta_i}) \cos \theta_i \sin \theta_i & \sin^2 \theta_i + e^{-i\delta_i} \cos^2 \theta_i \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де $\delta_i = \Delta\tau_i * \omega$, $\Delta\tau_i$ – максимальна часова затримка пластинки; ω – кутова частота випромінювання.

Часова затримка сегмента ОВ – це зсув фаз між ортогональними поляризаційними складовими поділений на кутову частоту. Якщо змінюється довжина хвилі (кутова частота), то змінюватиметься і зсув фаз між основними станами поляризації, оскільки часова затримка є сталою величиною. Такий перехід дає змогу в процес моделювання ввести додатковий параметр – кутову частоту, тобто враховувати довжину хвилі.

Сумарна диференціальна групова затримка сигналу оптичного волокна з N сегментів у такому випадку дорівнює сумі ДГЗ кожного з сегментів, враховуючи знак (тобто часова різниця між вертикальною і горизонтальною поляризаційними складовими):

$$dgd_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N dgd_k. \quad (12)$$

Статистичні експерименти з моделлю ПМД оптичного волокна показали, що $N=50$ сегментів є достатнім для отримання стійкого статистичного результату, з іншого боку, використання такої кількості сегментів істотно економить затрати машинного часу на моделювання.

Новим під час використання цієї моделі є врахування зміни смуги кожного зі спектральних каналів внаслідок впливу хроматичної дисперсії і нелінійних ефектів.

Необхідне значення ПМД для оптичного волокна заданої довжини отримуємо шляхом нормування розподілу ДГЗ, отриманого статистичним моделюванням з подальшим його перемноженням на коефіцієнт, що дорівнює $PMD \cdot \sqrt{L}$.

2.4. Втрати потужності каналів системи DWDM

Сумарні втрати ОВ на елементарній кабельній ділянці ЕКД A_{EKD} складаються з власних втрат ОВ, втрат в нероз'ємних з'єднаннях (з'єднання ОВ будівельних довжин оптичного кабелю в оптичних муфтах), втрат в роз'ємних з'єднаннях (оптичні роз'єми на кінцевих пристроях – оптичні кроси, а також оптичні приймально/передавальні модулі), а також втрат, що виникають внаслідок впливу нелінійних ефектів:

$$A_{EKD} = \alpha \cdot L_{EKD} + a_n \cdot N_n + a_p \cdot N_p + A_{NE}, \text{ дБ}, \quad (13)$$

де α – коефіцієнт загасання ОВ на робочій довжині хвилі λ ; L_{EKD} – задана протяжність ЕКД; a_n – максимальне значення втрат в нероз'ємному з'єднанні на заданій робочій довжині хвилі λ [5, 6]; N_n – кількість нероз'ємних з'єднань; визначається як

$$N_n = \frac{L_{EKD}}{L_{BD}} - 1, \quad (14)$$

де L_{BD} – будівельна довжина оптичного кабелю, як правило, становить 2..6 км; a_p – втрати в роз'ємних з'єднаннях; N_p – кількість роз'ємних з'єднань на ЕКД, як правило, $N_p = 4$ (по 2 роз'єми на прийманні/передачі; 1 – на оптичному кросі і 1 – на приймально-передавальному модулі оптичної системи передачі); A_{NE} – сукупні втрати за рахунок розсіювання, перекачування енергії тощо, що виникають під негативним впливом нелінійних ефектів.

2.5. Втрати міжсимвольної інтерференції

Цей фактор спотворення під час розрахунку оптичних транспортних систем враховується шляхом розрахунку додаткових втрат (приросту рівня завад) через шуми міжсимвольної інтерференції (ISI – Inter-symbol Interference), які включають перехресні завади і шуми синхронізації. Втрати через ISI визначаються з такого виразу [2]:

$$a_{ISI} = 10 \cdot \lg \left\{ \frac{1}{1 - 1,425 \cdot \exp \left[-1,28 \cdot \left(\frac{T_0}{T_L} \right) \right]} \right\}, \text{ дБ}, \quad (15)$$

де T_0 – час наростання фронту оптичного імпульсу на виході джерела оптичного випромінювання від 10 до 90 % від його максимального значення, безпосередньо пов'язане зі швидкістю передачі оптичного сигналу в лінії:

$$T_0 = \frac{0,48}{B_L}, \text{ с}, \quad (16)$$

де B_L – швидкість передачі оптичного сигналу в лінії.

У цій роботі розглядаємо застосування блокового лінійного коду оптичного сигналу MBNB, де M – кількість символів кодової послідовності, а N – кількість імпульсів, необхідна для передачі:

$$B_L = \frac{N}{M} B, \text{ Мбіт/с}; \quad (17)$$

B – швидкість передачі інформації, що відповідає заданому рівню цифрової ієрархії. Для рівнів синхронної цифрової ієрархії (SDH) STM-1 ($B=155$ Мбіт/с) і вище приймемо 10B11B; T_L – час наростання фронту оптичного імпульсу на виході фотоприймача оптичної системи передавання від 10 до 90 % від його максимального значення [2]:

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0,35}{BW_R}\right)^2 + \sigma_{EKD}^2}, \text{ с}; \quad (18)$$

BW_R – смуга пропускання фотоприймача, Гц, вибирається з умови $BW_R > B_L$; σ_{EKD} – прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії на ЕКД:

$$\sigma_{EKD} = \sqrt{D_{ch}^2 + D_{PMD}^2}, \text{ с}; \quad (19)$$

D_{ch} і D_{PMD} – значення хроматичної і поляризаційної модової дисперсії на ЕКД відповідно обчислені в однойменних блоках моделі.

2.6. Джиттер

Під час формування око-діаграми і обчислення параметрів якості обслуговування (коефіцієнта бітової помилки) враховується також вплив джиттера передачі даних і синхронізації. Характер зміни джиттера – випадковий, тому для його моделювання найкраще підходить статистичний метод. У цій роботі не вникатимемо в природу, причини і певні закономірності виникнення джиттера, а зосередимо увагу лише на статистичному моделюванні його впливу. Часове зміщення імпульсів на вході приймача оптичного випромінювання моделюється генератором випадкових чисел базової випадкової величини з подальшим її нормуванням до необхідного масштабу. Цей масштаб визначатиметься на основі статистичних даних моніторингу реальних оптичних транспортних систем.

2.7. Ідентифікація та розрахунок око-діаграми

Око-діаграми застосовуються для оцінки параметрів цифрових сигналів як під час проведення лабораторних (системних) вимірювань, так і експлуатаційних [1].

Око-діаграмою є результат багатократного накладення бітових послідовностей з виходу генератора псевдовипадкової послідовності, що відображається на екрані осцилографа у вигляді діаграми розподілу амплітуди сигналу в часі. Око-діаграму з вказаними основними параметрами показано на рис. 4.

Рівень потужності на виході джерела оптичного випромінювання знаходимо за формулою

$$P_0 = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_0}{10^{-3}}\right), \text{ дБ}, \quad (20)$$

де P_0 – потужність на виході джерела оптичного випромінювання, Вт.

Рівень потужності оптичного сигналу на виході фотоприймача оптичної системи передавання (ОСП) визначається сумарними втратами в ОВ на ЕКД ВОЛЗ, а також сумарним значенням додаткових втрат, обумовлених дисперсією ОВ:

$$P_L = P_0 - A_{EKD} - a_{ISI}, \text{ дБ.} \quad (21)$$

Відповідно потужність оптичного сигналу на виході фотоприймача ОСП:

$$P_L = 10^{0,1 \cdot PL}, \text{ мВт.} \quad (22)$$

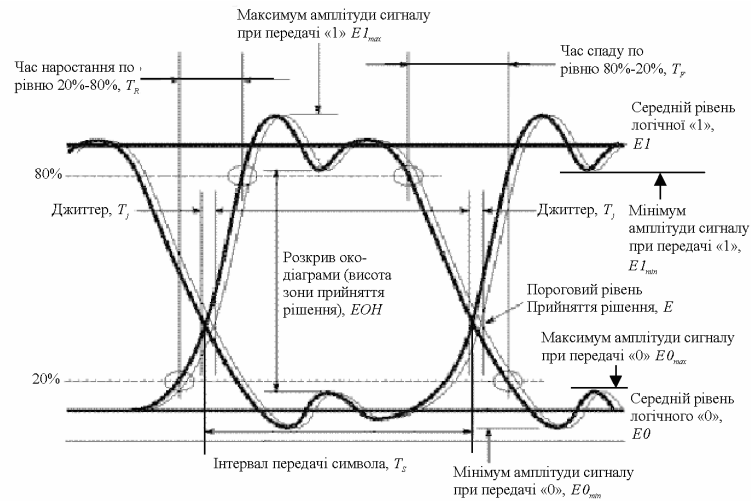


Рис. 4. Ідентифікація око-діаграми

Для розрахунку завадозахищеності каналу цифрової системи передавання необхідно також оцінити потужність шуму фотоприймача P_{noise} . На практиці фотоприймальні пристрої високошвидкісної ОСП проектується так, щоб логарифм відношення смуги пропускання електричного фільтра до смуги пропускання оптичного фільтра становив не менше від 2 дБ [9]. У цьому разі виконується така умова по відношенню сигнал/шум:

$$OSNR = 20 \cdot \lg(Q_{ном}) + 2, \text{ дБ,} \quad (23)$$

де $OSNR$ – оптичне відношення сигнал/шум (Optical Signal-to-Noise Ratio); $Q_{ном}$ – номінальне значення Q-фактора, що відповідає нормованому коефіцієнту помилок $BER_{ном}$.

Згідно з визначенням у [5], рівень чутливості фотоприймача ВОСП – це мінімальне значення рівня потужності оптичного випромінювання в точці нормування оптичного тракту на прийомі, за якого забезпечується необхідна якість передачі цифрового оптичного сигналу. З урахуванням вищесказаного, а також, використовуючи умову (23), максимальний рівень потужності шуму фотоприймача P_{noise} можна оцінити за такою формулою:

$$P_{noise} = P_R - 20 \cdot \lg(Q_{ном}) - 2, \text{ дБ,} \quad (24)$$

де P_R – рівень чутливості фотоприймача, дБ; P_{noise} – рівень шуму фотоприймача, дБ.

Номінальні значення Q-фактора і відповідні їм нормовані коефіцієнти помилок $BER_{ном}$ наведено у таблиці.

Очевидно, чутливість фотоприймача і потужність шуму розраховуються як

$$P_R = 10^{0,1 \cdot P_R}, \text{ мВт;} \quad P_{noise} = 10^{0,1 \cdot P_{noise}}, \text{ мВт.} \quad (25)$$

Номінальні значення Q-фактора

$BER_{ном}$	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
$Q_{ном}$	5,99	6,63	6,71	7,04
Стандарт	E3	STM-1		STM-4

Побудова око-діаграми здійснюється накладанням відгуку системи в припущенні Гауссової форми імпульсу на передачу «ізолюваного» логічного «0» в послідовності логічних «1» (наприклад, комбінація 101 – за 3-символьної послідовності) [2]:

$$P_{out}^{*0*} (t) = P_L \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\} \quad (26)$$

і відгуку системи на передавання «ізолюваною» логічною «1» в послідовності логічних «0» (наприклад, комбінація 010 – за 3-символьної послідовності) [2]:

$$P_{out}^{*1*} (t) = P_L \cdot \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\}, \quad (27)$$

де s_L – середньоквадратчна тривалість Гауссового імпульсу на виході фотоприймача ВОСПІ; ця величина безпосередньо пов'язана з T_L таким співвідношенням:

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}, \text{ с}, \quad (28)$$

де T – інтервал передачі бітової послідовності:

$$T = N_{symb} \cdot \tau_{05}, \text{ с}, \quad (29)$$

де N_{symb} – кількість символів бітової послідовності, у цьому випадку $N_{symb} = 3$; τ_{05} – тривалість імпульсу на рівні 0,5 від максимуму його потужності на виході джерела оптичного випромінювання; обернено пропорційна до швидкості передачі сигналу в лінії:

$$\tau_{05} = \frac{1}{B_L}, \text{ с}. \quad (30)$$

3. Розрахунок показників якості каналу цифрової оптичної системи передачі інформації

Фундаментальним показником якості цифрових систем передавання є коефіцієнт помилок BER. Робота цифрових систем передавання вважається нормальною тільки в тому випадку, якщо BER не перевищує певне допустиме значення, що відповідає використовуваному мережевому стандарту.

Доволі поширена методика оцінки коефіцієнта помилок BER на основі визначення Q-фактора. Q-фактор – це параметр, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрової системи передачі. Існує певна функціональна залежність Q-фактора сигналу і вимірюваного коефіцієнта помилок BER. Q-фактор визначається статистичним обробленням результатів вимірювання амплітуди і фази сигналу на електричному рівні, а саме – безпосередньо по око-діаграмі. При цьому виконується побудова функції розподілу станів «1» і «0», а для цих розподілів, в припущенні їх Гауссової форми, оцінюються математичні очікування станів $E1$ і $E0$ і їх середньоквадратичні відхилення σ_1 і σ_0 .

Попередньо для оцінки параметрів розподілів станів «1» і «0» визначають точку максимального розкриття око-діаграми:

$$\tau_{open} = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp \left(\frac{T^2}{s_L^2} \right)}} \right] \cdot \frac{s_L^2}{T}, \text{ с}. \quad (31)$$

Далі розраховуємо межі розкриття око-діаграми (зони прийняття рішення), відповідні мінімальній зареєстрованій потужності під час передавання логічної «1» $P1_{min}$ і максимальної зареєстрованої потужності під час передавання логічного «0» $P0_{max}$:

$$P1_{min} = P_{out}^{*1*}(\tau_{open}), \text{ мВт}; \quad P0_{max} = P_{out}^{*0*}(\tau_{open}), \text{ мВт}. \quad (32)$$

Враховуючи припущення Гауссового розподілу станів логічної «1» і логічного «0», визначимо характеристики розподілів станів – математичне очікування $E1$ і $E0$:

$$E1 = \begin{cases} P_L, P_L \geq P_R, \text{ мВт} & E0 = P_{noise}, \text{ мВт}, \\ P_R, P_L < P_R \end{cases} \quad (33)$$

і середньоквадратичне відхилення σ_1 і σ_0 , відповідно скориставшись правилом «три сигма»:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{min}}{3}, \text{ мВт}; \text{ мВт}. \quad (34)$$

Q-фактор розраховується за такою формулою [7, 9 – 10]:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (35)$$

При цьому сам коефіцієнт помилок BER визначається за такою формулою [7, 9–10]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (36)$$

де erfc – допоміжна функція інтеграла помилок.

Необхідно відзначити, що наближена формула розрахунку BER справедлива за значень аргументу $\operatorname{erfc}(\cdot)$, більшою за 3 [1].

Висновок

Отже, у роботі запропонований аналітико-статистичний підхід до моделювання оптичних транспортних систем як один із найбільш ефективних під час моделювання складних систем такого класу, сформульовано вимоги до моделі і побудовано блочну модель DWDM оптичної транспортної системи на основі визначення Q-фактора і обчислення коефіцієнта бітової помилки. Наведено аналітичні вирази для обчислення хроматичної дисперсії, втрат потужності і шумів, спричинених нелінійними ефектами, а також описано алгоритми статистичного моделювання поляризаційно-модової дисперсії і джиттера передачі даних і синхронізації. Визначення Q-фактора оптичної системи передавання ґрунтується на побудові і аналізі око-діаграми.

Розроблена модель дає можливість отримати залежність коефіцієнта бітової помилки для кожного з каналів системи зі спектральним ущільненням каналів від сумарних втрат в оптичному волокні, хроматичної, поляризаційно-модової дисперсій і нелінійних ефектів.

Потрібно також відзначити, що моделювання оптичних транспортних систем вимагає постійного контакту дослідника з об'єктом моделювання, що робить процес моделювання ітераційним, а адекватність і функціональна повнота моделі з кожною наступною ітерацією підвищуються.

1. Бурдин В.А., Баскаков В.С., Бурдин А.В., Косова А.Л. Расчет глаз-диаграммы канала связи волоконно-оптической системы передачи. – Самара, 2004. – 24 с. 2. Cunningham D., Nowell M., Hanson D., Kazovsky L. The IEEE 802.3z Worst Case Link Model for Optical Physical Media Dependent Specification // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. – 1998. 3. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швирков Д.В. Оптические волокна для линий связи. – М.: ЛЕСАарт, 2003. – 288 с. 4. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с. 5. ГОСТ 45.190-2001. Системы передачи волоконно-оптические. Стыки оптические. Термины и определения. – М.: Издание официальное, ЦНТИ «Информсвязь», 2002. – 14 с. 6. Нормы приемо-сдаточных измерений элементарных кабельных участков магистральных и внутризоновых подземных волоконно-оптических линий передачи сети общего пользования: Утверждены приказом Госкомсвязи России №97 от 17.12.97. 7. ITU-T Recommendations G.957 (06/99). Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy. 8. М.М. Климаш, С.М. Чернихівський. Модель поляризаційно-модової дисперсії оптичного волокна // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Радіоелектроніка і телекомунікації». – 2005. – №534. – С. 84–86. 9. Убайдуллаев Р.Р. Протяжение ВОЛС на основе EDFA // Lightwave russian edition. – 2003. – №1. – С. 22–28. 10. Стариков Н.С. Q-фактор: новый подход к анализу качества цифровых систем передачи // Метрология и измерительная техника в связи. – 2002. – №5. – С. 17–18.