

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ПОМИЛКИ В DWDM-СИСТЕМІ

В даній статті розглянуто загальний алгоритм розрахунку ймовірності помилок у DWDM системі. Враховано втрати нелінійних ефектів, зокрема чотирьоххвильового змішування та підсиленого спонтанного випромінювання. Сама модель спирається на визначення нормованого значення BER, яка в свою чергу заснована на визначенні Q-фактора.

Ключові слова: Q-фактор, розсіювання Бріллюена, чотирьоххвильове змішування, BER

V.I. LUZHANSKIY, Y.O. BABIY, V.I. SOLODKYI
Khmelnytskyi National University, Ukraine

ESTIMATION OF ERROR PROBABILITY IN THE DWDM SYSTEM

Abstract – in this article the general algorithm for calculating the probability of errors in DWDM system. Considered loss nonlinear effects such as four-wave mixing and amplified spontaneous emission. The very model relies on the definition of normalized values of BER, which in turn is based on determining the Q-factor.

Keywords: Q-factor, stimulated Brillouin scattering, four-wave mixing, BER

Вступ

Розвиток волоконно-оптичних систем зв'язку відіграє велику роль у сучасних телекомунікаційних технологіях. Інженерів турбує питання збільшення пропускної спроможності лінії не перебудовуючи її. Однак сьогодні існує технологія мультиплексування з розподіленням по довжині хвилі WDM (Wavelength Division Multiplexing) та її наступник щільного мультиплексування з розподіленням по довжині хвилі (Dense Wavelength Division Multiplexing) DWDM. Дана система дозволяє модернізацію лінії шляхом заміни кінцевого обладнання, що надасть можливість збільшити швидкість передачі в сотні разів.

Для системи DWDM характерна наявність важливих факторів, які впливають на якість передачі сигналу. Однією важливою особливістю є те, що при збільшенні швидкості передачі виникає поляризаційна модова дисперсія та фазове тремтіння цифрового сигналу. Також під впливом різних факторів в оптичному волокні виникає затримка сигналу, як наслідок поляризаційної модової дисперсії. Оцінка якості передачі сигналу проводиться за допомогою розрахунку коефіцієнта бітових помилок (Bit Error Rate) BER. Сама методика заснована на визначенні Q-фактора, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрової системи передачі і визначається шляхом статистичної обробки результатів вимірювання амплітуди і фази сигналу на електричному рівні [1].

Постановка наукової задачі

Наявна мережа синхронної цифрової ієрархії дійшла до швидкості передавання 10 Гбіт/с і зіткнулася з проблемами хроматичної та поляризаційної дисперсії моди, які при збільшенні швидкості починають суттєво впливати на якість передачі. Для вирішення цієї проблеми створили системи WDM та DWDM.

Технологія DWDM була запропонована Дж. П. Лауде у 1980р. і спочатку вона використовувалась на міжміській системі зв'язку. Суть зводилась до того, щоб потоки передавались світловими хвилями різної довжини, а несучі генерувались окремими джерелами, модулювалися певними цифровими сигналами і передавались на мультиплексор, де об'єднувались у багато-частотний сигнал.

Метою даної роботи є удосконалення розробленої комплексної методики для оцінювання показників якості передачі сигналу при дії нелінійних спотворень та інших чинників. Необхідно також визначити характеристики оптичного волокна та граничні значення параметрів, які потрібні для отримання належної якості передачі.

Алгоритм розрахунку повинен бути реалізований з урахуванням ймовірнісних та енергетичних характеристик оптичних каналів. Ймовірнісні – це Q-фактор та коефіцієнт бітових помилок BER, а енергетичні включають: потужність шуму та сигналу, захищеність оптичного сигналу.

На розповсюдження сигналу в оптичному волокні впливають такі фактори:

- чотирьоххвильове змішування (Four-Wave Mixing) FWM;
- перехресна фазова модуляція (Cross-Phase Modulation) CPM;
- фазова самомодуляція (Self-Phase Modulation) SPM;
- вимушене розсіювання Рамана (Stimulated Raman Scattering) SRS та вимушене розсіювання Бріллюена (Stimulated Brillouin Scattering) SBS;
- квантовий шум та нелінійні ефекти.

В цілому дані фактори призводять до зменшення потужності та спотворення корисного сигналу в оптичному волокні і при цьому потрібно враховувати втрати на з'єднаннях [1,4].

У роботі Агравала Г. [2] описана залежність розповсюдження хвиль від питомої хроматичної дисперсії. Визначення паразитних несучих та величини FWM описані у працях Ліствіна А.В. [4]. Розрахунок параметрів якості транспортних систем запропонований у роботі Краська О.В. [3]. В даній роботі пропонується наступний алгоритм розрахунку:

- розрахунок втрат від ефектів FWM,SBS,SPM,SRS;
- розрахунок потужності шумів;
- розрахунок потужності сигналу;
- розрахунок відношення сигнал-шум;
- розрахунок Q-фактора;
- розрахунок ймовірності помилки.

Чотириохвильове змішування (FWM) приводить до появи гармонік, деякі з яких попадають в канали системи DWDM, що призводить до спотворення сигналу. При цьому, як тільки гармоніки потрапляють у канал зв'язку, з'являється параметрична інтерференція, що призводить до збільшення, або зменшення амплітуди імпульсів. FWM з'являється тоді, коли потужність сигналу досягає критичного рівня. Коли по волокну поширюється світлові сигнали з частотами f_a, f_b, f_i (які мають відповідні кутові частоти $\omega_a, \omega_b, \omega_i$) виникає четверта хвиля на частоті $f_a \pm f_b \pm f_i$ [5].

Щоб розрахувати втрати в оптичному каналі застосовується формула:

$$P_{FWM} = \sqrt{m_{HB} P_{HBabi}^2 + m_B P_{Babi}^2}, \text{ мВт}, \quad (1)$$

де P_{FWM} – втрати в оптичному каналі за рахунок чотириохвильового змішування;

m_{HB} та m_B – кількість паразитних гармонік при не виродженому FWM;

P_{HBabi} і P_{Babi} – потужності заважаючих сигналів FWM.

Розсіювання Брілюена (SBS) – це розсіювання світла, яке виникає у нелінійному середовищі внаслідок збудження когерентних акустичних коливань молекул речовини. При чому поширення хвиль відбувається у протилежному напрямку до поширення сигналу. Дане розсіювання встановлює верхню межу на рівень потужності оптичного сигналу[1]. Вираз для граничної потужності записується наступним чином:

$$P_{SBS} \approx \frac{21bA_{eff}}{g_e L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_{LS}}{\Delta\nu_{BW}} \right), \quad (2)$$

де P_{SBS} – гранична потужність розсіювання Брілюена;

b – числове значення між 1 і 2, що залежить від стану поляризації хвилі;

A_{eff} – ефективна площа оптичного волокна (ОВ);

$\Delta\nu_{LS}$ – лінійна (спектральна) ширина смуги лазерного джерела;

$\Delta\nu_{BW} \approx 20$ МГц ($\lambda = 1550$ нм) – SBS смуга взаємодії;

$g_e \approx 4,6 \times 10^{-11}$ м/Вт – SBS підсилювальний коефіцієнт (залежить від типу ОВ).

L_{eff} – ефективна довжина взаємодії електромагнітних хвиль (км), яка розраховується за формулою:

$$L_{eff} = \frac{4,343}{a} \left(1 - \frac{1}{e^{0,23aL}} \right), \text{ км}, \quad (3)$$

де a – довжина хвилі;

L – довжина лінії, км.

Ефективна довжина оптичного волокна:

$$A_{eff} \approx \pi(MFD/2)^2, \quad (4)$$

де MFD – діаметр модового поля.

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

Поріг потужності для стимульованого розсіювання Рамана можна обчислити за формулою:

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

де $g_R = 10^{-13}$ підсилювальний коефіцієнт SRS;

L_{eff} та A_{eff} - розраховуються за формулами (3,4).

Фазова самомодуляція SPM – це зміна в часі фази імпульсів цифрового сигналу, що виникає під час зміни показника заломлення матеріалу оптичного волокна від інтенсивності електромагнітного поля[5].

Фазова зміна визначається:

$$\Delta\Phi = [2\pi(\Delta n)L] / \lambda, \quad (6)$$

де Δn - варіація показника заломлення;

L - довжина оптичного волокна;

λ - довжина електромагнітної хвилі.

Далі перейдемо до оцінювання потужності шуму у каналі передачі DWDM - системи. Взагалом потужність шуму в DWDM системі залежить від потужності шуму спонтанного оптичного випромінювання та від міжканальних завад чотириохвильового змішування.

Для визначення шуму спонтанного оптичного випромінювання використаємо формулу:

$$P_{шCOB} = 2n_{СП}(K_{ОП} - 1)hf_m\Delta f_0, \text{ мВт}, \quad (7)$$

де $n_{СП}$ – коефіцієнт спонтанної емісії підсилювання;

h – постійна Планка ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж×с);

f_m – центральна частота оптичного каналу з номером m ;

Δf_0 – ширина смуги пропускання оптичного фільтра демультимплексора DWDM;

$K_{ОП}$ – коефіцієнт оптичного підсилювання, який визначається за формулою:

$$K_{ОП} = \frac{P_{свх}}{P_{свх}} = \frac{1}{e^{-aL}}, \quad (8)$$

де $P_{свх}$ та $P_{свх}$ - потужність сигналів на вході та виході ОВ;

a – коефіцієнт затухання ОВ;

L – довжина ОВ.

Шум чотириохвильового змішування обчислюються за формулою [6]

$$P_{ijk}(f_i, f_j, f_k) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-aL} \left\{ \frac{(1 - e^{-aL})^2}{a^2} \right\}, \quad (9)$$

де P_i, P_j, P_k – потужності вхідних каналних сигналів на відповідних частотах f_i, f_j, f_k ;

D – коефіцієнт вродженості ($D=3$ при $i=j$ і $D=6$ при $i \neq j$) [1].

Особливості використання для розрахунку сумарного шуму викладані та описані у роботі [7]

Розрахунок потужності сигналу на виході фотоприймача проведемо за допомогою формули

$$P_l = P_0 - A_{EKD} - a_{ISI}, \text{ дБ}, \quad (10)$$

де P_0 – рівень потужності на виході джерела випромінювання;

A_{EKD} – сумарні втрати на елементарній кабельній ділянці;

a_{ISI} – втрати за рахунок міжсимвольної інтерференції в результаті дисперсії.

На виході фотоприймача рівень потужності оптичного сигналу визначається:

$$P_l = 10^{0,1pL}, \text{ мВт}, \quad (11)$$

виходячи з перетворення потужності випромінювання до відповідних одиниць за формулою:

$$P_0 = 10 \lg \left(\frac{P_0}{10^{-3}} \right), \text{ дБ}, \quad (12)$$

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

Для визначення захищеності каналу від завад потрібно оцінити потужність шуму фотоприймача [6]:

$$P_{шум} = P_r - 201g(Q) - 2, \text{ дБ}, \quad (13)$$

де P_r – рівень чутливості фотоприймача, дБ;

Q – номінальне значення якості прийому фотоприймача.

Для розрахунку P_r використаємо формулу

$$P_r = 101g \left(\frac{\bar{n}_0 hfB_0}{10^{-3}} \right), \text{ дБ}, \quad (14)$$

де \bar{n}_0 – чутливість фотодіодів (середня кількість фотонів на біт);

h – постійна Планка ($6,62 \times 10^{-34}$ Дж/с);

f – значення несучої частоти в оптичному каналі, Гц;

B_0 – швидкість передачі в каналі оптичного волокна (біт/с).

Потужність шуму розраховують за відповідною формулою переведення одиниць:

$$P_{noise} = 10^{0,1noise}, \text{ мВт.} \quad (15)$$

Чутливість фотоприймача визначається за формулою:

$$P_r = 10^{0,1P_r}, \text{ мВт.} \quad (16)$$

Визначимо відгук системи Гаусівської форми при передачі ізолизованого «0» та ізолизованого «1»:

$$P_{out}^0 = P_L \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{S_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{S_L \sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (17)$$

$$P_{out}^1 = P_L \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{S_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{S_L \sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (18)$$

де T – інтервал передачі бітової послідовності, що визначається за формулою:

$$T = N_{symb} \cdot \tau_{0,5}, \text{ с,} \quad (19)$$

S_L – середньоквадратична тривалість Гаусівського імпульсу на виході фотоприймача, яка зв'язана з T_L наступним співвідношенням:

$$S_L = \frac{T_L}{2,563}, \text{ с.} \quad (20)$$

$\tau_{0,5}$ тривалість імпульсу на рівні 0,5 від максимуму його потужності на виході джерела оптичного випромінювання. В свою чергу $\tau_{0,5}$ оберненопропорційна швидкості передачі сигналу в лінії:

$$\tau_{0,5} = \frac{1}{B_0}, \text{ с.} \quad (21)$$

Основним показником якості передачі помилок є коефіцієнт бітових помилок BER. Робота системи вважається нормальною, якщо кількість помилок не перевищує певне допустиме значення. Спочатку будується функція розподілу станів «1» та «0» для цих розподілів за допомогою ОКО-діаграми. ОКО-діаграма – це результат багаторазового накладення бітових послідовностей з виходу генератора випадкової послідовності, що відображається на екрані осцилографа. Перед цим визначають точку розриву око-діаграми [4, с.115]:

$$\tau_{open} = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{S_L^2}\right)}} \right] \cdot \frac{S_L^2}{T}, \text{ с.} \quad (22)$$

Тепер визначимо межі розриву ОКО-діаграми, які відповідають мінімальній зареєстрованій потужності при передачі логічної «1»:

$$P_{1min} = P_{out}^1 \times \tau_{open}, \text{ мВт.} \quad (23)$$

При зареєстрованій максимальній потужності під час передачі логічного «0»:

$$P_{0max} = P_{out}^0 \times \tau_{open}, \text{ мВт.} \quad (24)$$

Визначимо характеристики розподілів станів логічної «1» та «0» математичне очікування $E1$ та $E0$:

$$E1 = \left\{ \begin{array}{l} P_L, P_L \geq P_r \\ P_r, P_L < P_r \end{array} \right\}, \text{ мВт} \quad E0 = P_{noise}, \text{ мВт.} \quad (25)$$

Скориставшись правилом «три сигма» отримаємо середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P_{1min}}{3}, \text{ мВт.} \quad (26)$$

Q - фактор розраховується за формулою:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (27)$$

При цьому сам коефіцієнт помилок BER визначається за такою формулою:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right), \quad (28)$$

де erfc – допоміжна функція інтеграла помилок.

При чому формула справедлива коли виконується умова $\frac{Q}{\sqrt{2}} > 3$.

Висновок

У статті визначено основні пункти розрахунку ймовірності помилок у DWDM – системі з урахуванням основних показників, які впливають на якість передачі. Наведено основні вирази для обчислення втрат шумів та потужності, які спричиненні нелінійними ефектами. Також потрібно зазначити, що для DWDM – системи потрібно враховувати характеристики оптичного волокна стандарту ITU.G655, однак на швидкостях до 10 Гбіт/с краще використовувати ITU.G652, тому що ймовірність помилки буде меншою. При швидкості більше 40 Гбіт/с використання стандарту ITU.G652 не прийнято. Щоб забезпечити зменшення впливу FWM потрібно збільшувати частотний інтервал між каналами. Для збільшення порогу появи ефекту SBS потрібно використовувати фазову модуляцію замість амплітудної, а також збільшувати спектральну ширину лазера з розмитотою частотою випромінювання. Розсіювання Рамана можна зменшити шляхом зниження вхідної потужності сигналу і також якістю волокна, здійснюючи контроль його виробництва. Зазначимо, що запропонована аналітична модель розрахунку потужностей втрат в оптичному волокні в результаті дії чотирьоххвильового змішування дозволить підвищити достовірність отриманих результатів.

Також потрібно зазначити що розвиток DWDM – систем призведе до створення фотонних мереж, які з економічної сторони дадуть можливість транспортувати величезні об'єми інформації.

Література

1. Романов О.І. Оцінка ймовірності помилки в DWDM системі / О.І. Романов, С.С. Кутир, М.М. Нестеренко. – 2011. – С. 101–111.
2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал., П.В. Мамышева ; пер. с англ. – М. : Мир, 1996. – 323 с.
3. Красько О.В. **Розрахунок параметрів** якості транспортних мереж / О.В. Красько, О.В. Корецький. – 2011. – № 705. – С. 184–189.
4. Олексін М.І. Модель оптичної транспортної системи на основі технології DWDM / М.І. Олексін, Є.М. Черняхівський // *Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Л. : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – С. 107–117.
5. Нікіфоренко К.Б. Дослідження взаємних впливів в оптичних каналах DWDM систем / К.Б. Нікіфоренко, Ю.М. Панченко // *Наукові записки УНДІЗ*. – 2011. – № 1 (17). С. – 64–68.
6. Педяш В.В. Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. – 2010. – № 1. – С. 109–114.
7. Листвин А.В. Оптические волокна для линий связи / А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков. – М. : ЛЕСАРарт, 2003. – 288 с.

References

1. Romanov O.I., Kutyr S.S., Nesterenko M.M., "Evaluation of error probability in DWDM – system," *Scientific Papers VITI "KPI"*, No. 2, 2011 pp.101-111.
2. Agrawal G. and Mamysheva P.V., *Nonlinear fiber optics*. Tran. from English. Moscow, Mir, 1996, 323 p.
3. Kras'ko O.V. and Korets'ky O.V., "Quality parameters of transport networks," *Bulletin / National University "L'viv Polytechnic"*, No.705, 2011 pp. 184–189.
4. Oleksin M.I. and Chernyivskyy E.M., "Model optical transport system based on technology DWDM," *Radioelectronics and Telecommunications*, 2008, pp. 107–117.
5. Nikiforenko K.B. and Panchenko Y., "Study of reciprocal effects in optical channel DWDM systems," *Scientific notes UNDIIZ*, No. 1, 2011 pp. 64-68.
6. Pedyash V.V. and Reshetnikov D.C., "Influence of optical signal self-phase modulation on a channels quality of DWDM system," *Proceedings ONAZ Popov*, No. 1, 2010 pp. 109–114.
7. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V., *Optical fiber for communication lines*. Moscow, LESARart, 2003, 288 p.

Рецензія/Peer review : 11.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.4.2013 р.
Рецензент: к.т.н. Мартинюк В.В.