

М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, Р.П. ПАЛАМАРЧУК
Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ЗА КРИТЕРІЄМ КОЕФІЦІЄНТА ПОМИЛОК

Переважає кількість існуючих волоконно-оптичних телекомунікаційних мереж доступу використовує двійковий (бінарний) код та амплітудну модуляцію із двома рівнями напруги. Однією із основних характеристик, за якою можна встановлювати якість зв'язку, є бітовий коефіцієнт помилок. Даний параметр визначається як відношення помилково декодованих біт до загальної кількості переданих інформаційних бітів. Досліджено залежність бітового коефіцієнта помилок від характеристик оптичного приймача. Розглянуто залежність чутливості оптичного приймача від заданого значення бітового коефіцієнта помилок, частоти та струмової чутливості. Визначено формулу, що описує залежність зміни бітового коефіцієнта помилок від значення сигнал/шум на вході оптичного приймача.

Ключові слова: волоконно-оптична система передачі; бітовий коефіцієнт помилок; інформаційна безпека.

M.V. VASYLKYVSKYI, R.P. PALAMARCHUK
Vinnytsia National Technical University

EVALUATION OF ENERGY PARAMETERS OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES UNDER THE BIT ERROR RATE CRITERIA

In the article analyses the dependence of the energy characteristics of fiber-optic communication systems. According to the obtained data, graphs of dependence of energy parameters are constructed. The vast majority of existing fiber-optic telecommunications access networks uses binary code and amplitude modulation with two voltage levels. One of the main characteristics by which you can set the quality of communication is the bit error rate. This value is defined as the ratio of false decoded symbols to the total number of symbols transmitted. Bit error rate directly depends on the input characteristics of the optical receiver. Another characteristic is the power of the optical signal at the output/input of the transmitter and the receiver. Knowing these parameters, you can keep statistics, predict the loss in signal propagation through the communication lines and establish the presence of unauthorized connections to the network. The dependence of the sensitivity of the optical receiver on the given value of bit error rate, frequency and transmitter current sensitivity is considered. The dependence of the change of the bit error rate on the signal/noise value at the input of the optical receiver is presented. Was defined a formula that describes the dependence of the change of the bit error rate on the signal / noise value at the input of the optical receiver. These dependencies need to be taken into account when constructing fiber-optic transmission systems to ensure the normal functioning and prediction of a change in the bit error rate.

Keywords: fiber-optic communication system; bit error rate; information security.

Вступ

В якості оптичних приймачів у волоконно-оптичних мережах застосовуються оптичні модулі, що використовують приймачі з $p-i-n$ фотодіодом. Основними характеристиками волоконно-оптичних мереж (ВОМ) є потужність оптичного сигналу на виході передавача та вході приймача відповідно і бітовий коефіцієнт помилок BER (Bit Error Rate). Його величина визначається як відношення декодованих з помилками бітів до загального числа переданих біт [1, 2]. За вказаними характеристиками можна вести статистику, прогнозувати втрати при поширенні сигналу лініями зв'язку (ЛЗ), встановлювати наявність несанкціонованого доступу (НД) до мережі. Значення потужності сигналу у волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) безпосередньо впливає на якість переданої інформації [3]. Під критерієм якості розуміють відношення прийнятої інформації до переданої (BER). Даний вплив визначається бітовим коефіцієнтом помилок (БКП).

Причиною появи помилок є вплив власних шумів цифрового лінійного тракту (ЦЛТ). Для нормальної роботи цифрової системи передачі (ЦСП) необхідно, щоб рівень шумів не перевищував деякого порогового значення. Значення БКП буде зменшуватись при збільшенні амплітуди інформаційного сигналу. Мінімальне значення середньої потужності оптичного сигналу, яке необхідно для передачі сигналів із заданим БКП характеризує чутливість оптичного приймача.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування ВОЛЗ за рахунок оцінювання енергетичних характеристик ВОЛЗ і коефіцієнта помилок BER на виході волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) та встановлення чинників, які впливають на зміну чутливості оптичного приймача. Дані характеристики необхідно враховувати при побудові ВОСП для забезпечення ефективного функціонування та прогнозування зміни БКП.

Основна частина

Для забезпечення заданого значення BER на виході оптичного приймача необхідно щоб вхідна потужність оптичного сигналу на його вході була більша за мінімальну оптичну потужність, тобто чутливість приймача. В рекомендаціях МСЕ-Т G.691, G.692, G.659.1, вказано, що розрахункова норма бітового коефіцієнта помилок (БКП) для ділянки оптичного підсилення складає не більше 10^{-12} . Даний коефіцієнт залежить від Q -фактору та розраховується за формулою:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (1)$$

де додаткова функція помилок визначається так:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (2)$$

БКП $BER = 10^{-12}$ відповідає значення $Q \approx 7$. В роботі [4] було наведено формулу (3), яка пов'язує порогове значення Q_{np} із мінімальною (пороговою) потужністю P_{np} на вході оптичного приймача, при якій можна забезпечити необхідний БКП:

$$P_{np} = (Q_{np} / S_i) \cdot (4kT \cdot F_y \cdot f_e / R_{33}), \quad (3)$$

де S_i – струмова (монохроматична) чутливість оптоелектронного перетворювача (фотодіода);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (Дж/град) – стала Больцмана;

T – абсолютна температура, К;

F_y – коефіцієнт шуму підсилювача;

$f_e = f_m$ – тактова частота сигналу;

$R_{33} \approx (2\pi \cdot f_e \cdot C_{33})^{-1}$ – опір резистора в колі зворотного зв'язку.

З виразу (3) видно, що БКП напряму пов'язаний із чутливістю приймача через параметр Q -фактору. Таким чином зміна вхідної потужності призводить до зміни Q -фактору та навпаки, що в свою чергу змінює БКП. Для знаходження порогового значення Q -фактору, тобто необхідного значення сигнал/шум використовується вираз [4]:

$$20 \lg Q_{np} = 4,63 + 11,42 \lg \left[\lg (BER^{-1}) \right], \quad (4)$$

де $20 \lg Q_{np}$ – значення сигнал/шум, дБ.

Вираз (4) не враховує запас заводо захищеності 1...4 (дБ). У подальшому позначення $20 \lg Q_{np}$ замінимо на S/N . Оскільки, БКП є вихідною характеристикою приймача, а відношення S/N вхідною та вихідною характеристикою ВОЛЗ, то для оцінки зміни БКП необхідно отримати відповідний вираз, який пов'яже зміну вихідного параметру відповідно до зміни вхідного:

$$BER = \frac{1}{10^{10 \frac{S/N - 4,63}{11,42}}}. \quad (5)$$

Представивши $10^{\frac{S/N - 4,63}{11,42}}$ як A , можна вираз (5) записати у такому вигляді:

$$BER = \frac{1}{10^A}.$$

У роботі [5] запропоновано алгоритм контролю інформаційної захищеності ВОЛЗ шляхом циклічного вимірювання БКП. Такий аналіз можна проводити на основі отриманого виразу. Побудуємо графік залежності БКП від значення сигнал/шум на вході оптичного приймача з урахуванням (5) та графік залежності БКП від Q -фактору.

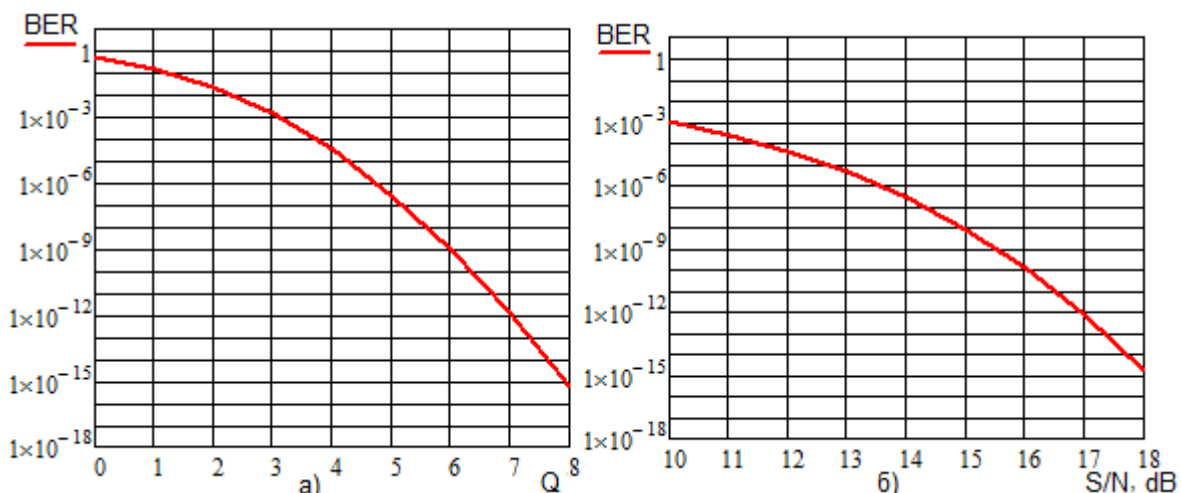


Рис. 1. Залежність БКП: а) від Q -фактору; б) від відношення S/N

З виразу (3) бачимо, що порогова чутливість приймача залежить від заданого БКП, струмової чутливості приймача, власних шумів підсилювача та частоти. Порівнюючи графіки на рис. 1, можна зробити висновок про те, що запропонована формула коректно відображає залежність зміни БКП від зміни відношення сигнал/шум на вході оптичного приймача. Тому за отриманими графіками можна визначити динамічний діапазон потужності сигналів у волоконно-оптичному лінійному тракті (ВОЛТ).

Експериментальна частина

Для проведення оцінки зміни енергетичних параметрів приймача приймемо, що власні шуми підсилювача відсутні та використовується *p-i-n* фотодіод із значенням $S_i = 0,85$ [6].

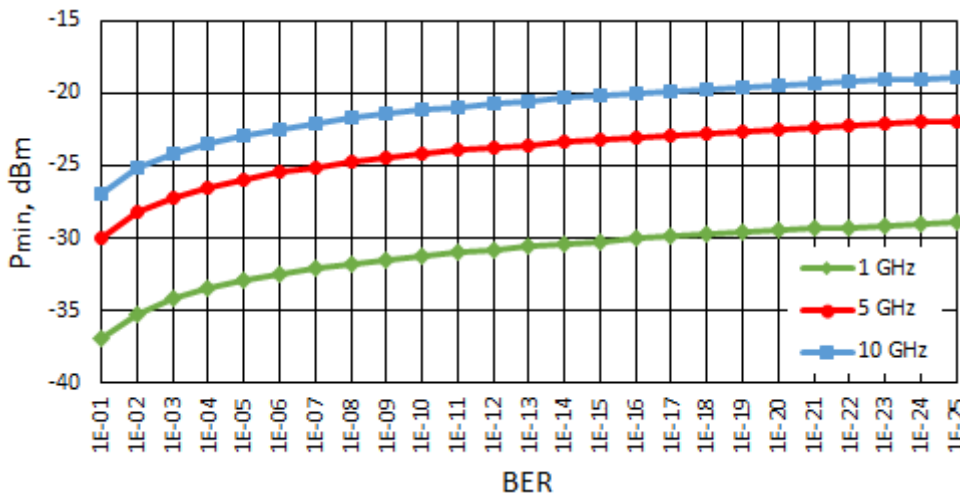


Рис. 2. Залежність мінімальної потужності приймача від БКП за різних частот

В інфокомунікаційних протоколах SONET/SDH необхідно, щоб при використанні довгої псевдовипадкової послідовності двійкових символів (біт) кількість помилок була не більше 1×10^{-10} біт. В протоколах передачі цифрових даних типу Ethernet при використанні коротких пакетів біт *BER* повинен становити більше 10^{-12} .

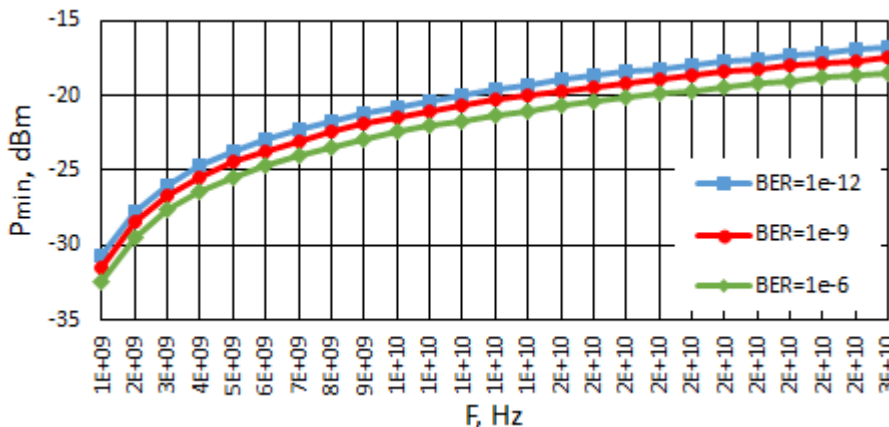


Рис. 3. Залежність мінімальної потужності приймача від частоти при різних значеннях БКП

Таблиця 1

Необхідна тривалість безпомилкового тестування системи зв'язку

<i>BER</i>	100 Гбіт/с	40 Гбіт/с	10 Гбіт/с	2,5 Гбіт/с
10^{-10}	0,5 с	1 с	3 с	12 с
10^{-12}	1 хв	1,3 хв	5 хв	20 хв
10^{-14}	1,1 год	2,1 год	8,4 год	1,4 дні

Швидкість передачі інформації пов'язана із смугою частот (Δf), тому в реальних умовах функціонування ЦСП потрібно визначити необхідний час тестування системи, що працює безпомилково. Статистичними методами доведено, що для досягнення рівня достовірності тестування в 95% потрібно формувати послідовність символів, що в три рази буде перевищувати зворотну величину *BER*, тобто $1/BER^n$.

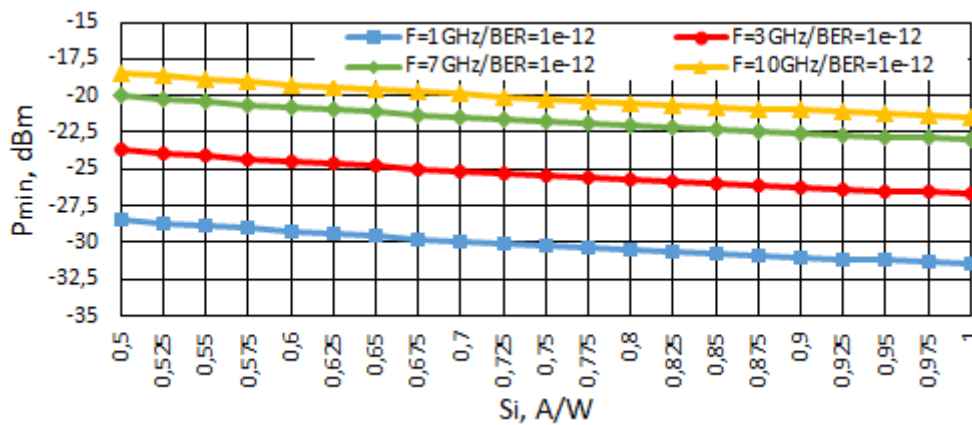


Рис. 4. Залежність мінімальної потужності приймача від струмової чутливості при різних частотах при БКП=10⁻¹²

Висновки

Висока ефективність засобів оцінювання БКП базується на низці таких принципів побудови: функціональність, інтегрованість у систему, нарощуваність функціональної складності, системний підхід та оптимізація. Системний підхід та оптимізація є основними принципами побудови засобів оцінювання БКП. При цьому системний підхід передбачає побудову пристрою на вищому рівні структурної ієрархії з урахуванням результатів побудови на нижчих рівнях. Оптимальний синтез пристрою оцінювання БКП полягає у розробленні схем, що забезпечують максимальний динамічний діапазон та роздільну здатність, а також високу стійкість оцінок БКП у заданій смузі частот.

Наведено результати експериментального дослідження засобів оцінювання БКП у телекомунікаційних системах, які підтвердили коректність отриманих виразів для визначення енергетичних характеристик ВОЛЗ.

Література

1. Бортник Г.Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, В.Ф. Яблонський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с.
2. Бортник Г.Г. Метод оцінювання детермінованих складових фазового дрижання у цифрових системах передавання / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 3. – С. 45–48.
3. Бортник Г.Г. Аналіз методів оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, М.Л. Мінов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1. – С. 169–175.
4. Бортник Г.Г. Системи передавання в електрозв'язку : навчальний посібник / Г.Г. Бортник, О.А. Семенюк, О.В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 138 с.
5. Васильківський М.В. Захист інформації у волоконно-оптичних лініях зв'язку / М. В. Васильківський, Р. П. Паламарчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції (8–13 червня 2018 р., м. Одеса) ; Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. – Одеса, 2018. – С. 209–211.
6. Зингеренко Ю.А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иєрархии : учебное пособие / Ю. А. Зингеренко. – СПб : НИУ ИТМО, 2013. – 393 с.

References

1. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby otsiniuvannya parametriv abonentskykh liniy zviazku / H.H. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 139 s.
2. Bortnyk H.H. Metod otsiniuvannya determinovanykh skladovykh fazovoho dryzhannia u tsyfrovyykh systemakh peredavannya / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.H. Bortnyk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2012. – № 3. – S. 45–48.
3. Bortnyk H.H. Analiz metodiv otsiniuvannya dzhyteru v telekomunikatsiinykh systemakh / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, M.L. Minov // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2007. – № 1. – S. 169–175.
4. Bortnyk H.H. Systemy peredavannya v elektrozv'iazku : navchalnyi posibnyk / H.H. Bortnyk, O.A. Semeniuk, O.V. Stalchenko. – Vinnytsia : VNTU, 2006. – 138 s.
5. Vasylykivskiy M.V. Zakhyst informatsii u volokonno-optychnykh liniyakh zviazku / M. V. Vasylykivskiy, R. P. Palamarchuk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : materialy XVII mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii (8–13 chervnia 2018 r., m. Odesa) ; Odes. nats. akad. zviazku im. O. S. Popova. – Odesa, 2018. – S. 209–211.
6. Zingerenko Ju.A. Opticheskie cifrovye telekommunikatsionnye sistemy i seti sinhronnoj cifrovoy ierarhii : uchebnoe posobie / Ju. A. Zingerenko. – Spb : NIU ITMO, 2013. – 393 s.

Рецензія/Peer review : 21.1.2019 р.

Надрукована/Printed : 15.2.2019 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Бортник Г.Г.