

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, М.В. МАРИНІН
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ

Тенденція розвитку волоконно-оптичних технологій призводить до її детального дослідження для покращення якості зв'язку. В статті проаналізовано поширення оптичних хвиль з різною довжиною у оптичному волокні з певними сплавами матеріалу серцевини і оболонки. Проведено дослідження щодо залежності оптичної ширини смуги багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини. Проведені розрахунки: відношення сигнал/шум, обмежене тепловим та дробовим шумом, при зміні оптичної потужності та ширини смуги пропускання приймача; відношення сигнал/шум, обмежене тепловим шумом, при зміні температури навколишнього середовища та ширини смуги пропускання приймача. Визначені значення оптичної потужності приймача за певної ширини смуги пропускання для заданих ймовірностей помилок і зміні температури навколишнього середовища. Розраховано число фотонів, що надходить на приймач при різних швидкостях передачі та заданих ймовірностях помилок.

Ключові слова: оптичне волокно, показник заломлення оптичного волокна, нормована частота, оптична ширина смуги, дисперсія сигналу, дробовий шум, тепловий шум, співвідношення сигнал/шум, швидкість передачі інформації, ймовірність бітових помилок.

V.I. LUZHANSKIY, D.A. MAKARYSHKIN, M.V. MARININ
Khmelnitsky National University

RESEARCH OF ENERGY PARAMETERS OF FIBER-OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS FOR PROVIDING THE FOLLOWED QUALITY OF CONNECTION

The trend in the development of fiber-optic technologies leads to its detailed study to improve the quality of communication. Today, transport networks in most countries of the world are mainly built on fiber-optic communication lines. More and more are being introduced into communication systems of the technology of processing and communication of the optical wavelength range, the process of transition from cable communication networks to fully optical networks is gradually taking place. The pace of optical technology at all stages of the network requires their research to improve their energy performance. The article analyzes the distribution of optical waves of different lengths in an optical fiber with certain alloys of core material and shell. The research on the dependence of the optical bandwidth of the multimode gradient optical fiber on its length is carried out. Calculations are made: the signal / noise ratio, limited by thermal and fractional noise, when changing the optical power and the width of the receiver bandwidth; the signal / noise ratio, limited by thermal noise, when the ambient temperature changes and the receiver bandwidth is exceeded. The values of the optical power of the receiver are determined at a certain bandwidth for given error probabilities and the change in ambient temperature. The number of photons that arrives at the receiver at different transmission rates and the specified error probabilities is calculated.

Keywords: Optical fiber, refractive index of optical fiber, normalized frequency, optical bandwidth, signal variance, fractional noise, thermal noise, signal/noise ratio, bit rate, bit error probability.

Вступ

Лінійним трактом волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) називають комплекс технічних засобів волоконно-оптичної системи передачі, який забезпечує передачу цифрової інформації в заданій смузі частот з відповідною швидкістю.

Під *компонентом* волоконно-оптичної системи передачі будемо розуміти виріб оптики або оптоелектроніки, призначений для виконання одної або декількох функцій щодо формування, передавання, розподілу, перетворення та оброблення оптичного сигналу. Насамперед компоненти за принципом дії можна поділити на активні та пасивні. Активні компоненти (модулі) потребують для своєї роботи зовнішнього джерела енергії (живлення), а пасивні – ні.

Волоконно-оптичні системи передачі складаються з активних та пасивних компонентів і пристроїв (модулів), за допомогою яких здійснюється передача інформації. Остання має вид електричного групового (багатоканального) сигналу у цифрових або аналогових системах передачі. Цим електричним сигналом модулюється один з параметрів (амплітуда, частота, фаза, поляризація, інтенсивність) оптичного несучого коливання, що здатне поширюватися у оптичному волокні з малими згасанням і спотворенням форми.

Формування мети. Метою роботи є дослідження енергетичних параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення заданої якості зв'язку.

Результати дослідження. Каналом передачі є середовище між передавачем і приймачем. У волоконно-оптичних системах зв'язку канал передачі це волокно зі скла або прозорої пластмаси. Один із параметрів оптичного волокна (ОВ) є показники заломлення серцевини та оболонки. За значенням показників заломлення можна судити про щільність східчастих та градієнтних оптичних волокон. Так, різні значення показника заломлення серцевини оптичного волокна і його оболонки говорять про різні щільності цих матеріалів. Це забезпечує основну умову поширення сигналу через оптичне волокно - ефект повного внутрішнього відбиття. У свою чергу, підвищена щільність серцевини оптичного волокна обумовлена додаванням домішок в її склад на етапі виробництва. Проведемо дослідження щодо значень показників заломлення градієнтного оптичного волокна який є ключовими параметрами для волоконної оптики. Вони показують, у скільки разів швидкість поширення світла в оптичному волокні менша, ніж швидкість поширення світла у вакуумі. Показник заломлення кварцового скла може бути розрахований за допомогою апроксимаційної формули Селлмейєра [1]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - L_i^2), \quad (1)$$

де A_i і L_i (мкм) – параметри, значення яких залежать від складу скла (коефіцієнти розкладення Селлмейєра); λ – довжина електромагнітної хвилі (EMX), мкм. Відносна різницю показників заломлення визначаємо за формулою:

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1, \quad (2)$$

де n_1 – показник заломлення серцевини; n_2 – показник заломлення оболонки.

Іншим важливим параметром, що характеризує волокно і світло, яке поширюється по ньому, є нормована частота V , що визначається як:

$$V = (\pi 2a / \lambda) n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (3)$$

де a – радіус серцевини ОВ. Зі значень нормованої частоти ми можемо дізнаємося про режим роботи оптичного волокна.

Оптичні волокна забезпечують передачу оптичного випромінювання на різних довжинах хвиль, мають різні характеристики та виконують різні задачі. Всі оптичні волокна поділяються на дві основні групи: багатомодові MMF (multi mode fiber) і одномодові SMF (single mode fiber).

Багатомодові волокна поділяються на східчасті (step index multi mode fiber) і градієнтні (graded index multi mode fiber). Одномодові волокна поділяються на східчасті одномодові волокна (step index single mode fiber), або стандартне волокно SF (standard fiber), на волокна з зміщеною дисперсією DSF (dispersion-shifter single mode fiber), і на волокна з не нулевою зміщеною дисперсією NZDSF (non-zero dispersion-shifted single mode fiber). Якщо по волокну може поширюватися тільки одна мода, то це одномодовий режим, тоді як багато мод – це багатомодовий режим. Багатомодовий або одномодовий характер світла, яке поширюється вздовж волокна, докорінно впливає на дисперсію, а отже, і на пропускну спроможність волокна. З цієї причини одномодові волокна звичайно мають значення параметра $V < 2.405$ [2]. Значень V , близьких до 2.405, уникають, щоб мінімізувати можливість поширення більш як однієї моди.

Таблиця 1

Номенклатура мод низьких порядків

Нормована частота, V	0-2.405	2.405-3.832	3.832-5.136	5.136-5.52	5.52-6.38	6.38-7.02	7.02-7.59	7.59-8.42
Число мод, N_m	1	4	7	9	12	14	17	19

Проведемо розрахунки нормованої частоти для скляних заготовок (преформ) серцевини - $13,5\% \text{GeO}_2, 86,5\% \text{SiO}_2$; $4,1\% \text{GeO}_2, 95,9\% \text{SiO}_2$; $13,5\% \text{B}_2\text{O}_3, 86,5\% \text{SiO}_2$; $7,9\% \text{GeO}_2, 92,1\% \text{SiO}_2$; $9,1\% \text{P}_2\text{O}_5, 90,9\% \text{SiO}_2$; $16,9\% \text{Na}_2\text{O}, 32,5\% \text{B}_2\text{O}_3, 50,6\% \text{SiO}_2$; під час розробки градієнтного оптичного волокна типу кварц/кварц з різними сплавами і діаметром серцевин та оболонкою ($100\% \text{SiO}_2$). Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Визначення значень нормованої частоти в залежності від складу скляних заготовок серцевини, її діаметра та довжини електромагнітної хвилі

λ	$2a$, мкм	$13,5\% \text{GeO}_2, 86,5\% \text{SiO}_2$	$4,1\% \text{GeO}_2, 95,9\% \text{SiO}_2$	$13,5\% \text{B}_2\text{O}_3, 86,5\% \text{SiO}_2$	$7,9\% \text{GeO}_2, 92,1\% \text{SiO}_2$	$9,1\% \text{P}_2\text{O}_5, 90,9\% \text{SiO}_2$	$16,9\% \text{Na}_2\text{O}, 32,5\% \text{B}_2\text{O}_3, 50,6\% \text{SiO}_2$
		Значення нормованої частоти					
0,85 мкм	8	-185.35	4.02	4.3	4.28	4.77	39.44
	50	-1158.49	25.12	26.89	26.8	29.85	246.54
	62,5	-1448.11	31.40	33.62	33.51	37.31	308.11
	85	-1969.44	42.71	45.72	45.57	50.74	419.13
	100	-2316.98	50.25	53.79	53.61	59.70	439.09
1,3 мкм	8	54.51	2.60	-1.27	3.65	4.05	8.5
	50	370.74	16.29	-7.92	22.82	25.32	53.18
	62,5	425.93	20.36	-9.95	28.53	31.65	66.47
	85	579.27	27.70	-13.54	38.80	43.04	90.4
	100	681.49	32.59	-15.93	45.65	50.64	106.36
1,55 мкм	8	10.46	2.18	1.18	3.05	3.38	7.10
	50	65.41	13.68	7.41	19.11	21.14	44.41
	62,5	81.76	17.1	9.26	23.89	26.42	55.51
	85	111.2	23.26	12.6	32.49	35.94	75.49
	100	130.82	27.36	14.83	38.22	42.28	88.82

Але недостатньо знати режим роботи ОВ, якщо невідомий час поширення хвиль по ньому. Взагалі час поширення залежить від частоти світла і від відстані, пройдені світлом. Звичайно, сигнал передається по волокну за допомогою групи оптичних частот, що випромінюються джерелом. Потужність світла переноситься окремими променями, які йдуть по різним траєкторіям, що призводить до спотворення передавального сигналу.

У цифровій системі це спотворення виглядає як розширення і змінювання форми імпульсів. Розширення наростає зі збільшенням відстані поширення. Зрештою, розширення стає настільки великим, що суміжні імпульси починають накладатися один на одного, і окремі інформаційні біти перестають відрізнитися, що призводить до виникнення помилок. Щоб запобігти цьому, імпульси мають передаватися з меншою частотою слідування, що обмежує швидкість передачі імпульсів. Залежність швидкості поширення хвилі від частоти світла і від шляху поширення призводить до обмеження швидкості передачі інформації [3].

Вважається, що розширення імпульсу відбувається лінійно з довжиною оптичного волокна. Разом з тим, експерименти з багатомодовими волокнами показали, що це вірно лише для коротких довжин (L) оптичних волокон ($L \leq 1$ км). Для більш довгих волокон ($L > 1$ км) розширення імпульсу зростає не так швидко. Замість лінійної залежності тут існує залежність, що пропорційна кореню квадратному довжини оптичного волокна (рисунок 1 пояснює цю відмінність). Залежність розширення імпульсу пропорційна кореню квадратному від довжини ОВ, яка виникає внаслідок *перемішування мод*. На короткій ділянці оптичного волокна ($L \leq 1$ км) обмін потужністю між модами ще не є закінчений. Після поширення оптичного променя на велику відстань досягається рівноважний розподіл потужності між модами. Перемішування продовжується, але потужність у будь-якій моді залишається тією самою. У цьому стані розширення оптичного імпульсу $\approx \sqrt{L}$. Довжина, за якої досягається рівновага, називається *довжиною рівноважного стану* L_p . Значення L_p залежить від конкретного волокна. На рисунку 1 значення рівноважного стану дорівнює 1 км. У загальному випадку можна записати вираз для модового розширення імпульсу:

$$\Delta\tau = L\Delta(\tau/L) \text{ для } L \leq L_p, \tag{4}$$

$$\Delta\tau = \sqrt{LL_p}\Delta(\tau/L) \text{ для } L > L_p, \tag{5}$$

де $\Delta\tau$ – модове розширення імпульсу; L – довжина ОВ; $\Delta(\tau/L)$ – розширення імпульсу на одиницю довжини в лінійній області; L_p – довжина *рівноважного стану*.

Якісне волокно має слабкий ефект перемішування мод, так що рівноважний стан встановлюється тільки після поширення імпульсу на досить велику відстань. Волокно без ефекту змішування мод мало б нескінченно велике значення й розширення імпульсу збільшувалося б лінійно з його довжиною. У маломодових волокнах змішується мала кількість мод (внаслідок розсіювання, мікронеоднорідностей і неоднорідностей). Для цього волокна значення L_p є відносно невеликим. Хоча маломодове волокно є більш ширококутовим, його згасання буде вище, ніж у багатомодових волокон. Як приклад припустимо, що модові спотворення настільки великі, що дисперсією можна знехтувати. При використанні формул (4 і 5), а потім виразу $f_{-3\text{дБ}} = (2\Delta\tau)^{-1}$ отримуємо, що оптична ширина смуги:

$$f_{-3\text{дБ}} = 1/2L\Delta(\tau/L) \text{ для } L \leq L_p, \tag{6}$$

$$f_{-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{LL_p}\Delta(\tau/L)] \text{ для } L > L_p. \tag{7}$$

Хотілося би зауважити, що більшість виробників у специфікації оптичного волокна здебільшого вказують параметр "добуток частоти на довжину", ніж "розширення імпульсу на одиницю довжини".

Розрахуємо і побудуємо залежність ширини смуги за рівнем -3 дБ від довжини для багатомодового східчастого ОВ із лінійним розширенням імпульсу на одиницю довжини 15 нс/км, 20 нс/км і 50 нс/км, довжиною рівноважного стану 1 км, і довжиною оптичного волокна 10 км. Тоді підставляємо наші значення в формулу (7) і отримуємо значення оптичної ширини смуги;

$$f_{1-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{1 \cdot 10} \cdot 15] = 10,54 \text{ МГц}; f_{2-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{1 \cdot 10} \cdot 20] = 7,91 \text{ МГц};$$

$$f_{3-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{1 \cdot 10} \cdot 50] = 3,16 \text{ МГц}.$$

Для того, щоб побудувати цю залежність, нам потрібно знати, що для довжин менших 1 км використовується рівняння (6), де L підставляють у км, а для довжин понад 1 км рівняння (7). Результати проведених розрахунків надані в таблиці 3 та побудований графік залежності оптичної ширини смуги за рівнем -3 дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини з $L_p = 1$ км.

Розглянемо основні джерела шуму при прийманні оптичних сигналів. Існує дві фундаментальні причини зниження якості сигналу в процесі його приймання за рахунок наявності дробового шуму в самому оптичному сигналі і теплового (або дробового) шуму у приймальному пристрої.



Рис. 1. Залежність розширення імпульсу від довжини багатомодового оптичного волокна[1]

Залежність оптичної ширини смуги за рівнем -3 дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини з $L_{\delta} = 1 \text{ км}$

Розширення імпульсу, нс/км	Довжина оптичного волокна, км									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8	10
	Оптично ширина смуги, МГц									
15	166,66	83,33	55,55	41,66	33	23,57	16,66	13,6	11,78	10,54
20	125	62,5	41,66	31,25	25	17,7	12,5	10,2	8,83	7,91
50	50	25	16,66	12,5	10	7,07	5	4,08	3,53	3,16

Тепловий шум виникає в резисторі навантаження R_H фотоприймача. Електрони в будь-якому резисторі (провіднику) при температурі, відмінній від температури абсолютного нуля, ніколи не залишаються стаціонарними. Внаслідок постачання їм теплової енергії вони безупинно рухаються навіть без прикладання зовнішньої напруги.

Напрямки руху електронів довільні, як і результуючий заряд у кожного з електронів у довільний момент часу. Отже, у резисторі існує струм, сила якого випадково змінюється і його називають *струмом теплового шуму* $i_{\text{ШТ}}$.

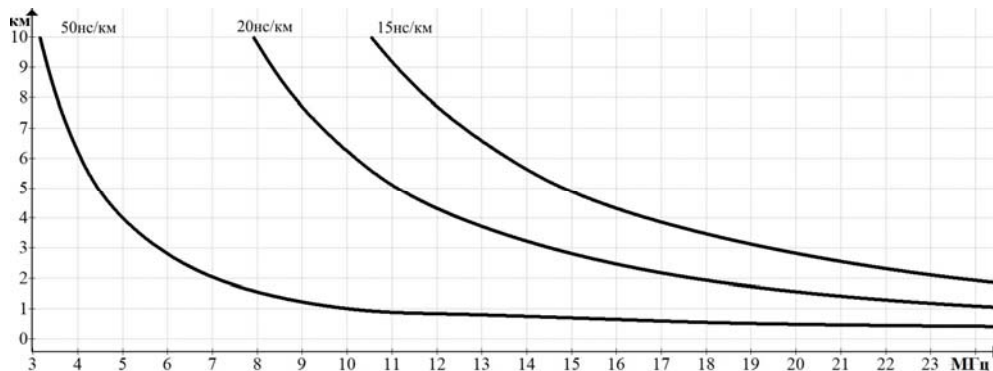


Рис. 2. Залежність оптичної ширини смуги за рівнем -3 дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини з $L_p = 1 \text{ км}$

Середнє значення струму дорівнює нулю, а середня потужність шуму, створеного резистором дорівнює:

$$R_H i_{\text{ШТ}}^2, \quad (8)$$

де $i_{\text{ШТ}}^2$ – середньоквадратичне значення струму теплового шуму; R_H опір навантаження. Шумовий струм внаслідок R_H додається до струму сигналу, що створюється фотоприймачем. Шум може бути врахований еквівалентним джерелом струму із середньоквадратичним значенням:

$$i_{\text{ШТ}}^2 = 4kT\Delta f / R_H, \quad (9)$$

де k – стала Больцмана; T – абсолютна температура, К; Δf – електрична ширина смуги пропускання приймального пристрою, Гц. Звичайно, ширину смуги пропускання приймального пристрою обмежують, щоб мінімізувати шум.

Малощумні приймальні пристрої мають ширину смуги пропускання трохи більшу, ніж ширина смуги інформаційного повідомлення. Іноді потрібне більше значення ширини смуги пропускання приймального пристрою, щоб з'ясувати, що обмежує ширину смуги повідомлення – передавальний пристрій або оптичне волокно.

Дискретна природа потоку електронів породжує флуктуації сигналу, це так званий *дробовий шум*. Відхилення миттєвого значення струму від постійного (ідеального) рівня, що викликані генерацією дискретних носіїв заряду у випадкові моменти часу, називаються *дробовим шумом*. Середньоквадратичне значення струму дробового шуму визначається як:

$$i_{\text{ШД}}^2 = 2qI\Delta f, \quad (10)$$

де q – заряд електрона; I – середнє значення фотоструму; Δf – ширина смуги пропускання приймального пристрою. Середня електрична потужність дробового шуму в навантаженні можна визначити за формулою:

$$P_{\text{ШД}} = 2qI_c\Delta fR_H, \quad (11)$$

де I_c – фотострум сигналу. Потужність теплового шуму в навантаженні при використанні рівняння (10) можна подати у вигляді:

$$P_{\text{шт}} = 4kT\Delta f \tag{12}$$

Обмежене квантовим шумом відношення сигнал/шум можна визначити за формулою:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{i_c}{2q\Delta f} \tag{13}$$

де $\frac{C}{\text{Ш}}$ – відношення сигнал/шум.

Якщо потужність світла мала, то звичайно тепловий шум домінує над дробовим шумом, тоді відношення сигнал/шум визначаємо як:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{R_H(\eta qP / h\nu)^2}{4kT\Delta f} \tag{14}$$

де η – це квантова ефективність, що дорівнює одиниці; P - оптична потужність що надходить; h – стала Планка; ν – частота випромінювання.

Розглянемо волоконно-оптичну систему передачі, яка складається зі світлодіоду, що випромінює потужність 10 мВт на довжинах хвиль 0,85 мкм, 1,3 мкм, і 1.55 мкм, і $p-i-n$ – фотодіоду зі струмовим відгуком 0,5 А/Вт. Опір навантаження 50 Ом, ширина смуги пропускання приймального пристрою 10 МГц, 30 МГц, 50 МГц, 70 МГц, 100 МГц, при температурі навколишнього середовища 288 К (15°C), 293 К (20°C), 298 К (25°C), 303К (30°C). Втрати в системі, крім згасання у волокні, дорівнюють 40 дБ, 41 дБ, 42 дБ, 43 дБ, 44 дБ.

Розрахуємо оптичну потужність, яка досягає приймача: $P_{n1} = 40\text{дБ} = 1\text{мкВт}$; $P_{n2} = 41\text{дБ} = 0,8\text{ мкВт}$; $P_{n3} = 42\text{дБ} = 0,6\text{ мкВт}$; $P_{n4} = 43\text{дБ} = 0,5\text{ мкВт}$; $P_{n5} = 44\text{дБ} = 0,4\text{ мкВт}$. У цій системі потужність теплового шуму майже на чотири порядки більше, ніж дробового. Параметри системи обмежує тепловий шум, тобто справедлива формула (14). У таблиці 4 наведені відношення сигнал/шум при різній оптичній потужності і ширини смуги пропускання приймача.

Для порівняння обчислимо значення відношення сигнал/шум, обмежене квантовим шумом з рівняння (13) і запишемо ці дані в таблицю 5.

А тепер проаналізуємо, як впливає температура навколишнього середовища на значення сигнал/шум обмеженим тепловим шумом і запишемо отримані дані в таблицю 6.

Шум може призвести до помилок у процесі прийняття рішення, який із двійкових символів (0 або 1) передався. Коефіцієнт помилок по бітах (bit-error rate - BER) є критерієм якості цифрових систем. Так, якщо одна помилка виникає на кожні 100 рішень, то BER = 0,01. З цього випливає, що ймовірність помилки протягом будь-якого тактового інтервалу тільки приблизно дорівнює BER. Отже, якщо BER = 0,01, то ймовірність помилки $p_{\text{пом}}$ приблизно дорівнює 0,01. Два терміни – коефіцієнт помилок за бітами і ймовірність помилки – є взаємозамінними.

Таблиця 4

Відношення сигнал/шум обмежене тепловим шумом при зміні оптичної потужності та ширини смуги пропускання приймача (T=293К)

$P_n, \text{мкВт}$	$\Delta f = 10 \text{ МГц}$	$\Delta f = 30 \text{ МГц}$	$\Delta f = 50 \text{ МГц}$	$\Delta f = 70 \text{ МГц}$	$\Delta f = 100 \text{ МГц}$
1	77,63(18,9 дБ)	25,77(14,1 дБ)	15,47(11,9 дБ)	11,06(10,4 дБ)	7,76(8,9 дБ)
0,8	49,68(16,9 дБ)	16,49(12,1 дБ)	9,9(9,9 дБ)	7,06(8,4 дБ)	4,96(6,9 дБ)
0,6	27,95(14,4 дБ)	9,27(9,6 дБ)	5,56(7,4 дБ)	3,97(5,9 дБ)	2,79(4,4 дБ)
0,5	19,32(12,8 дБ)	6,44(8 дБ)	3,86(5,8 дБ)	2,76(4,4 дБ)	1,93(2,8 дБ)
0,4	12,42 (10,9 дБ)	4,12(6,1 дБ)	2,47(3,9 дБ)	1,76(2,4 дБ)	1,24(0,9 дБ)

Таблиця 5

Відношення сигнал/шум обмежене дробовим шумом при зміні оптичної потужності та ширини смуги пропускання приймача (T=293К)

$P_n, \text{мкВт}$	$\Delta f = 10 \text{ МГц}$	$\Delta f = 30 \text{ МГц}$	$\Delta f = 50 \text{ МГц}$	$\Delta f = 70 \text{ МГц}$	$\Delta f = 100 \text{ МГц}$
1	156250(51,9 дБ)	52083(47,1 дБ)	31250(44,9 дБ)	22321(43,4 дБ)	15625(41,9 дБ)
0,8	125000(50,9 дБ)	41666(46,1 дБ)	25000(43,9 дБ)	17857(42,5 дБ)	12500(40,9 дБ)
0,6	93750(49,7 дБ)	31250(44,9 дБ)	18750(42,7 дБ)	13392(41,2 дБ)	9375(39,7 дБ)
0,5	78125(48,9 дБ)	26041(44,1 дБ)	15625(41,9 дБ)	11160(40,4 дБ)	7812(38,9 дБ)
0,4	62500 (47,9 дБ)	20833(43,1 дБ)	12500(40,9 дБ)	8928(39,5 дБ)	6250(37,9 дБ)

Можна навести й інше пояснення поняття коефіцієнта помилок по бітах. Неможливо дробити індивідуальний біт, або індивідуальну помилку. Проте, можна розглядати ймовірність помилки $p_{\text{пом}}$ як число помилок, що припадають на один біт. Для швидкості передачі даних R (біт/с) число помилок за секунду дорівнює $p_{\text{пом}}$ (добуток числа бітів за секунду на кількість помилок на біт). Наприклад, якщо

$p_{\text{пом}} = 0,01$ і $R = 1$ Мбіт/с, тоді виникає 10000 помилок протягом кожної секунди. Таке значення може бути неприпустимо великим на практиці. Зменшення $p_{\text{пом}}$ до 10^{-9} знизить швидкість появи помилки до 0,001 помилки на секунду, тобто одна помилка буде виникати протягом кожних 1000 с (16,7 хвилини). Коефіцієнт помилок 10^{-9} забезпечує високу якість цифрових систем передачі.

Таблиця 6

Відношення сигнал/шум обмежене тепловим шумом при зміні температури навколишнього середовища та ширини смуги пропускання приймача при $P_{\text{п}} = 1$ мкВт

T, K	$\Delta f = 10 \text{ МГц}$	$\Delta f = 30 \text{ МГц}$	$\Delta f = 50 \text{ МГц}$	$\Delta f = 70 \text{ МГц}$	$\Delta f = 100 \text{ МГц}$
288K	79,11 (18,98 дБ)	26,26 (14,19 дБ)	15,74 (11,97 дБ)	11,26 (10,51 дБ)	7,91 (8,98 дБ)
293K	77,63 (18,9 дБ)	25,77 (14,11 дБ)	15,47 (11,89 дБ)	11,06 (10,43 дБ)	7,76 (8,89 дБ)
298K	76,21 (18,82 дБ)	25,35 (14,03 дБ)	15,16 (11,8 дБ)	10,86 (10,35 дБ)	7,62 (8,81 дБ)
303K	75,3 (18,76 дБ)	24,95 (13,97 дБ)	14,95 (11,74 дБ)	10,68 (10,28 дБ)	7,48 (8,73 дБ)

У реальному приймальному пристрої струм шуму випадково може підсумовуватися з корисним струмом, що призводить до того, що миттєве значення результуючого струму (у деякі моменти часу) стане нижче порогового рівня. При цьому також виникає помилка. Зрозуміло, що поріг не може бути занадто близьким до нуля; це збільшило б число помилок при виявленні нулів. Він також не може бути занадто близьким до ідеального рівня i_c , оскільки зростуть помилки виявлення одиниць. Як і слід було очікувати, пороговий рівень, що забезпечує найменшу кількість помилок, дорівнює половині значення струму, що виникає при надходженні одиниці.

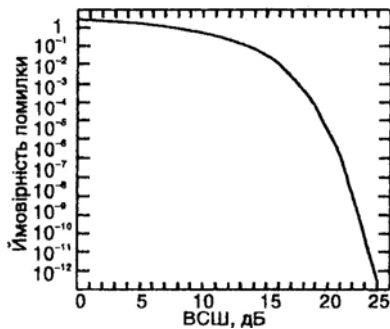


Рис. 3. Залежність ймовірності помилки від значення відношення сигнал/шум для системи, обмеженої тепловим шумом

Значення порогового струму приймають рівним $0,5i_c$. Це оптимальне значення порогового рівня справедливе для рівноймовірної появи нулів і одиниць на сусідніх тактових інтервалах, що виконується для більшості передаваних повідомлень. Якщо рівень потужності, що приймається, наприклад зменшується внаслідок старіння джерела світла та оптичного волокна, то і поріг рішення також має знижуватися.

Розглянемо цифрову лінію передачі, що працює зі швидкостями $R_1 = 1$ Мбіт/с, $R_2 = 10$ Мбіт/с, $R_3 = 50$ Мбіт/с, $R_4 = 100$ Мбіт/с, використовуючи опір навантаження приймача 100 Ом при температурі 293К. Довжина хвилі дорівнює 0,82 мкм, при коефіцієнтах помилок 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-6} ; 10^{-7} . Використовується p - i - n фотодіод із квантовою ефективністю, що дорівнює одиниці.

Із рисунка 3 знаходимо ймовірність помилок при заданому відношенні сигнал/шум.

Тоді отримуємо для $BER = 10^{-4}$ потрібно $\frac{C}{\text{Ш}} = 17,5$; $BER = 10^{-5}$ потрібно $\frac{C}{\text{Ш}} = 19$; $BER = 10^{-6}$ потрібно $\frac{C}{\text{Ш}} = 20,5$; $BER = 10^{-7}$ потрібно $\frac{C}{\text{Ш}} = 21,5$.

Рішення рівняння (14), відносно оптичної потужності, що надходить, дає нове рівняння:

$$P = \frac{h\nu}{\eta q} \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_n}} \sqrt{\frac{C}{\text{Ш}}}, \quad (15)$$

де оптична частота $\nu = c / \lambda = 3.66 \cdot 10^{14}$ Гц і тривалість імпульсу $\tau = 10^{-6}$ с. При цьому розрахуємо оптичну потужність і для різного значення температури навколишнього середовища і запишемо це у таблицю 7.

Таблиця 7

Оптична потужність приймального пристрою при ширині смуги пропускання 1МГц при заданих ймовірностях помилок і зміні температури навколишнього середовища

T, K	$BER = 10^{-4}$	$BER = 10^{-5}$	$BER = 10^{-6}$	$BER = 10^{-7}$
288	$1.43 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.7 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.02 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.27 \cdot 10^{-7}$ Вт
293	$1.44 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.71 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.04 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.29 \cdot 10^{-7}$ Вт
298	$1.45 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.73 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.05 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.3 \cdot 10^{-7}$ Вт
303	$1.47 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.74 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.07 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.32 \cdot 10^{-7}$ Вт

Число фотонів, що надходять на приймач за одну секунду, дорівнює $P / h\nu$. Отже, число фотонів, що

надходять за проміжок часу, який дорівнює одному тактовому інтервалу τ становить:

$$n_{\phi} = (P / hv)\tau. \quad (16)$$

Підставляючи числа у формулу (16), дістаємо, яка потрібна кількість фотонів в системі, обмеженій тепловим шумом для певного BER і запишемо отримані значення в таблицю 8.

Таблиця 8

Число фотонів, які надходять на приймач за проміжок часу 1с при різних швидкостях передачі та заданих ймовірностях помилок при $T = 293K$

Швидкість передачі, Мбіт/с	$BER = 10^{-4}$	$BER = 10^{-5}$	$BER = 10^{-6}$	$BER = 10^{-7}$
1	$5,93 \cdot 10^5$	$7,04 \cdot 10^5$	$8,4 \cdot 10^5$	$9,43 \cdot 10^5$
10	$1,88 \cdot 10^6$	$2,23 \cdot 10^6$	$2,65 \cdot 10^6$	$2,98 \cdot 10^6$
50	$4,2 \cdot 10^6$	$4,98 \cdot 10^6$	$5,93 \cdot 10^6$	$6,63 \cdot 10^6$
100	$5,93 \cdot 10^6$	$7,04 \cdot 10^6$	$8,4 \cdot 10^6$	$9,43 \cdot 10^6$

Висновки

1. На довжині електромагнітної хвилі $\lambda = 0,85\mu\text{м}$ немає оптичних волокон, які б працювали в одномодовому режимі.

2. В одномодовому режимі може працювати тільки два оптичних волокна, серцевини яких складаються з $4,1\%GeO_2, 95,9\%SiO_2$ ($V = 2,18$); $13,5\%B_2O_3, 86,5\%SiO_2$ ($V = 1,18$); на довжині електромагнітної хвилі, $\lambda = 1.55\mu\text{м}$.

3. Оптичні волокна зі складом серцевини $13,5\%GeO_2, 86,5\%SiO_2$ на довжині $\lambda = 0,85\mu\text{м}$; $13,5\%B_2O_3, 86,5\%SiO_2$ на довжині $\lambda = 1,3\mu\text{м}$; не зможуть передавати електромагнітну хвилю тому, що неможливо поширювати світло в оптичному волокну, так як не буде повного внутрішнього відбиття (нормована частота приймає від'ємні значення).

4. З рисунку 2 видно, що при використанні оптичних волокон з довжиною більшою, ніж довжина рівноважного стану ($L_p = 1\text{км}$), внесок модового розширення імпульсу збільшується, як корінь квадратний від довжини оптичного волокна, а внесок дисперсії в розширення імпульсу збільшується пропорційно довжині оптичного волокна. Розширення імпульсу в 20нс/км при збільшенні довжини оптичного волокна в 5 раз (наприклад з 2 км до 10 км) оптична ширина смуги за рівнем -3дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна зменшиться з 17.7МГц до 7.91МГц (на $44,7\%$).

5. Відношення сигнал/шум обмежений тепловим шумом (при $T=293\text{К}$) не повинен бути меншим порогового значення 6дБ (3.98 раз). При оптичній потужності приймача $0,4\text{мкВт}$, $0,5\text{мкВт}$ максимальна смуга його пропускання може складати не більше 30МГц ; для $0,6\text{мкВт}$ – не більше 50МГц ; для $0,8\text{мкВт}$ і 1мкВт – не більше 100МГц .

6. При швидкості передачі інформації 1Мбіт/с для зменшення ймовірності помилок з $BER = 10^{-4}$ до $BER = 10^{-7}$ необхідно збільшити число фотонів на 59% . При збільшенні швидкості передачі з 1Мбіт/с до 100Мбіт/с необхідно збільшити кількість фотонів в 10 разів для забезпечення заданої ймовірності помилок $BER = 10^{-7}$.

Література

1. Корнійчук В. І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / [В. І. Корнійчук., П. Д. Мосорін]. – ОДЕСА : Друк, 2001. – 362 с.
2. Каток В. Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку / В. Б. Каток. – Київ, 1999. – 483 с.
3. Склярів О. К. Волоконно-оптичні мережі та системи зв'язку / Склярів О. К. – Москва : САЛОН-Пресс, 2004. – 261 с. – (Серія «Бібліотека інженера»).
4. Горященко К.Л. Впровадження стандарту IEEE 1901 передачі інформації по провідних лініях / К.Л. Горященко, В.П. Нездоровін, В.С. Коваль // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 242-245.

References

1. Korniiichuk V. I. Volokonno-optychni komponenty, systemy peredachi ta merezhi / [V. I. Korniiichuk., P. D. Mosorin]. – ODESA : Druk, 2001. – 362 s.
2. Katok V. B. Volokonno-optychni systemy zviazku / V. B. Katok. – Kyiv, 1999. – 483 s.
3. Sklyarov O. K. Volokonno-opticheskie seti i systemy svyazi / Sklyarov O. K. – Moskva : SALON-Press, 2004. – 261 s. – (Seriya «Biblioteka inzhenera»).
4. Horyaschenko K.L. V.P. Nezdorovin, V.S. Koval. Implementation of IEEE 1901 for data transfer over powerlines. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2017. Issue 3. P. 242-245

Рецензія/Peer review : 2.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк