

ПЕДЯШ Володимир

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0002-4071-357X>e-mail: vpedyash@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З МОДУЛЯЦІЄЮ ПО ІНТЕНСИВНОСТІ

В роботі наведено результати дослідження параметрів якості каналів волоконно-оптичних систем передавання зі спектральним мультиплексуванням та модуляцією по інтенсивності. На прикладі каналів типу OTU1 та OTU2 системи передавання оптичної транспортної ієрархії розраховано чисельні значення Q-фактору сигналу в приймачі за повною та спрощеною формою розрахункового виразу. Виконано порівняння отриманих чисельних даних з результатами імітаційного моделювання. Доведено доцільність врахування всіх складових завад електричного струму в приймачі системи для отримання більш коректної аналітичної моделі.

Ключові слова: волоконно-оптична система передавання, завада, оптичний підсилювач, модуляція.

PEDYASH Volodymyr

State University of Intellectual Technologies and Communications

MATHEMATICAL MODELING OF FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEM WITH INTENSITY MODULATION

Fibre optic transmission systems are widespread in the transport network. Optical Transport Hierarchy (OTH) transmission systems are the basis of the transport network. The principle of wavelength multiplexing of channels is used to increase the technical and economic performance. Technically a simpler type of intensity modulation is used to transmit OTU1 and OTU2 OTH frames. Erbium-doped fibre-based optical amplifiers also generate amplified spontaneous emission noise, which degrades the performance of the transmission system.

The qualitative characteristics of the optical channel of OTH transmission system with intensity modulation are investigated in this paper. In the simulation process, it is possible to neglect the nonlinear signal distortion in the optical fiber at the nominal signal power of the transponder transmitter. Therefore, in the studied transmission system model, an optical oscillation consisting of two components (signal and noise) arrives at the receiver input. In this case, an electrical signal consisting of three summands (signal-signal, signal-noise and noise-noise) will be generated at the output of the photodiode.

A simplified formula for calculating the Q-factor of the optical signal, which affects the error probability in the optical channel, is proposed in most of the specialized literature. Numerical Q-factor values were calculated for OTU1 and OTU2 frames. They were compared with the reference results which were obtained by simulation in Optiwave Optisystem software. The analysis of the obtained data has proved that the simplified formula for the calculation of the Q-factor has a relative error of the order of 39-59%. A more accurate result can be obtained by using an expression that takes into account both components of the noise at the photodiode output.

Keywords: fiber optic transmission system, interference, optical amplifier, modulation

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Волоконно-оптичні системи передачі (ВОСП) сьогодні широко розповсюджені на різних ділянках телекомунікаційної мережі. Основу транспортної мережі складають ВОСП оптичної транспортної ієрархії (ОТН), які використовують спектральне мультиплексування оптичних каналів. Якісні характеристики системи залежать від багатьох їх технічних характеристик, в тому числі і від методу модуляції оптичного сигналу.

Актуальною проблемою на етапі проектування нових та модернізації існуючих транспортних мереж на базі ВОСП з МІ є визначення їх якісних характеристик: відношення сигнал-шум на вході вирішуючого пристрою приймача та вірогідності помилки в цифровому каналі зв'язку. Сьогодні для проведення досліджень часто використовується імітаційне моделювання ВОСП за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Зважаючи на специфіку проблеми, комерційне програмне забезпечення є досить коштовним і потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому актуальним завданням є дослідження більш простих аналітичних моделей, які дозволяють швидко отримати оціночні результати, хоча і мають більшу погрішність внаслідок неможливості повноцінно врахувати особливості розповсюдження сигналу в оптичному волокні.

Аналіз останніх досліджень

Класична схема ВОСП включає в себе блоки передавача, приймача та волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ). В свою чергу, ВОЛТ складається з кількох секцій (ділянок), які містять оптичне волокно (ОВ) та оптичний підсилювач (ОП) для компенсації загасання сигналу. Розповсюдження сигналу в ОВ описується нелінійним рівнянням Шредінгера, яке не має аналітичного вирішення [1]. Згідно з цим рівнянням, в оптичний сигнал вносяться лінійні (загасання та хроматична дисперсія) та нелінійні спотворення. Аналіз впливу потужності сигналу передавача на якість оптичного каналу [2–4] показав, що при потужності оптичного сигналу 1 мВт і нижче, проявом нелінійних спотворень в ОВ можна знехтувати. В сучасних ВОСП дисперсійні спотворення майже повністю усуваються в оптичних компенсаторах дисперсії та цифрових коректорах в складі приймача ВОСП. Тому основним фактором, що впливає на якість

оптичного каналу є шум підсиленого спонтанного випромінювання (ПСВ) оптичних підсилювачів.

Для передавання високошвидкісних інформаційних структур OTU3 (43 Гбіт/с) та OTU4 (112 Гбіт/с) ОТН застосовуються методи модуляції з когерентним прийомом, які мають високу завадозахищеність і досить добре досліджені [5, 6]. Низькошвидкісні інформаційні структури OTU1 (2,7 Гбіт/с) та OTU2 (10,7 Гбіт/с) транспортуються з використанням технічно більш простого методу модуляції по інтенсивності (МІ), який також достатньо досліджено. Але порівняння результатів аналітичних та імітаційних моделей ВОСП з МІ в літературі недостатньо висвітлено.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є аналіз точності результатів аналітичного моделювання ВОСП з модуляцією по інтенсивності, що враховує взаємодію оптичного сигналу та шуму посиленого спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів у приймачі.

Виклад основного матеріалу

Структурна схема моделі каналу ВОСП (рис. 1) включає передавач, ВОЛТ та приймач оптичного сигналу. В свою чергу, передавач містить генератор псевдовипадкової послідовності (ГПВП), оптичний модулятор (ОМ) та лазерний осцилятор (ЛО). Для визначення якісних параметрів каналу ВОСП спочатку розглянемо варіант функціонування системи без модуляції оптичного сигналу. В цьому випадку на виході передавача буде сформовано оптичний сигнал з напруженістю електричного поля:

$$E_{пер}(t) = \sqrt{2P_{пер}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{1}$$

де $P_{пер}$, ω_0 та φ_0 – середня потужність, частота та початкова фаза коливання лазера (в подальшому тексті $\varphi_0 = 0$).

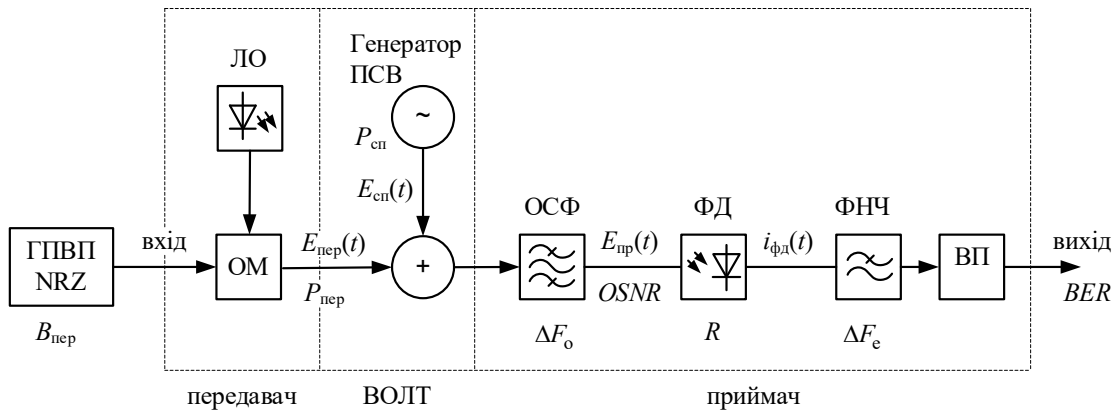


Рис. 1. Структурна схема моделі каналу ВОСП з модуляцією по інтенсивності

У випадку повної компенсації загасання ОБ в ОП, моделювання ВОЛТ зводиться до додавання до оптичного сигналу $E_{пер}(t)$ шуму ПСВ $E_{сп}(t)$ з сумарною потужністю в одній площині поляризації:

$$P_{сп} = PSD_{сп} \Delta F_o = n_{сп} (G - 1) h \nu N_{секц} \Delta F_o, \tag{2}$$

де $PSD_{сп}$ – спектральна щільність потужності завади ПСВ;

$n_{сп}$ – коефіцієнт спонтанного випромінювання ОП;

G – коефіцієнт посилення ОП;

h – постійна Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);

ν – частота монохромного оптичного сигналу (для смугового сигналу співпадає з частотою ЛО

$\nu = \omega_0 / 2\pi$);

ΔF_o – ширина смуги пропускання оптичного смугового фільтра (ОСФ) приймача ВОСП.

В свою чергу, коефіцієнт спонтанного випромінювання підсилювача визначається за його шум-фактором nf [7]:

$$n_{сп} = \frac{10^{0,1nf}}{2}. \tag{3}$$

Приймач ВОСП містить блоки оптичного смугового фільтра (ОСФ), фотодіод (ФД), фільтр нижніх частот (ФНЧ) та вирішуючий пристрій (ВП). Фотодіод є квадратичним детектором, тому сигнал на його виході складається із трьох доданків:

$$i_{фд}(t) = R |E_{пр}(t)|^2 = R |E_{пер}(t) + E_{сп}(t)|^2 = R \left(|E_{пер}(t)|^2 + 2|E_{пер}(t)||E_{сп}(t)| + |E_{сп}(t)|^2 \right) =$$

$$= i_{c-c}(t) + i_{c-сп}(t) + i_{сп-сп}(t), \quad (4)$$

де R – чутливість фотодіоду, А/Вт;

$i_{c-c}(t)$, $i_{c-сп}(t)$ та $i_{сп-сп}(t)$ – биття сигнал-сигнал, сигнал-шум та шум-шум відповідно.

Для визначення вірогідності помилки в оптичному каналі ВОСП слід розрахувати потужності всіх трьох складових електричного струму на вході вирішуючого пристрою приймача. Взаємодія сигналу та шуму в приймачі ВОСП з МІ детально проаналізована в роботі [6], тому в даному дослідженні скористаємося готовими розрахунковими виразами для визначення потужності биття сигнал-шум $P_{c-сп}$ та шум-шум $P_{сп-сп}$:

$$P_{c-сп} = 4R^2 P_{пер} PSD_{сп} \Delta F_c, \quad (5)$$

$$P_{сп-сп} = R^2 PSD_{сп}^2 \Delta F_o (\Delta F_o + 2\Delta F_c), \quad (6)$$

де ΔF_c – ширина смуги пропускання ФНЧ приймача.

Вірогідність помилки біта (BER) на виході каналу ВОСП та Q -фактор сигналу на вході ВП визначаються за виразами [7]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (7)$$

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{P_{c-сп}} + \sqrt{P_{сп-сп}}}, \quad (8)$$

де μ_1 та μ_0 – середнє значення (математичне очікування) відліків символів 1 та 0;

σ_1 та σ_0 – середньоквадратичне відхилення відліків символів 1 та 0.

З врахуванням однакової вірогідності передавання символів 1 та 0 в цифровій послідовності на вході каналу, пікова потужність оптичного сигналу в 2 рази більше середньої, тому вираз (8) після підстановки в нього (5) та (6) прийме наступну форму:

$$Q = \frac{P_{пер}}{\sqrt{P_{пер} PSD_{сп} \Delta F_c + 0,5 PSD_{сп} \sqrt{\Delta F_o (\Delta F_o + 2\Delta F_c)}}}. \quad (9)$$

Знехтувавши другим доданком (потужністю биття шум-шум) в знаменнику виразу (9), отримуємо відому з літератури [7, 8] просту формулу для визначення Q -фактору:

$$Q \approx \sqrt{\frac{P_{пер}}{PSD_{сп} \Delta F_c}} = \sqrt{OSNR \frac{\Delta F_o}{\Delta F_c}}, \quad (10)$$

де $OSNR$ – співвідношення потужностей оптичного сигналу та шуму ($OSNR = P_{пер} / P_{сп}$).

Для оцінки точності розрахунку Q -фактору за наведеними виразами, в демонстраційній версії програми Optiwave Optisystem згідно рис. 1 було розроблено імітаційну модель каналу ВОСП ОТН. За її допомогою визначалося точне значення Q -фактору і розраховувалася відносна помилка розрахунку δ :

$$\delta = \frac{|Q_p - Q_{ow}|}{Q_{ow}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де Q_p – розрахункове значення Q -фактору за виразами (9), (10);

Q_{ow} – визначене в програмі Optiwave Optisystem значення Q -фактору.

Чисельні результати аналітичного та імітаційного моделювання зведено до таблиці 1. Дослідження проводилися для параметрів моделі каналу ВОСП, наведеним в табл. 2. Аналіз відносної помилки розрахунку Q -фактору (табл. 3) показує, що вираз (9) має суттєво меншу відносну погрішність, яка зменшується з ростом протяжності ВОЛТ. Спрощеному виразу (10), що не враховує биття шум-шум, відповідає досить значна відносна помилка розрахунку в межах 39-59%. Також слід відмітити, що зі збільшенням протяжності лінії (кількості секцій $N_{секц}$) похибка розрахунку Q -фактору за даним виразом також збільшується, на відміну від повної форми розрахункового виразу. Це пояснюється ростом ваги другого доданку в знаменнику виразу (9) зі збільшенням спектральної щільності потужності шуму $PSD_{сп}$.

Отримані чисельні результати доводять, що використання спрощеного виразу для розрахунку Q -фактору призводить до суттєвого завищення його значення. Враховуючи нелінійну залежність $BER(Q)$ у виразі (7), це призводить до суттєвої погрішності у визначенні вірогідності помилки в оптичному каналі ВОСП.

Таблиця 1

Значення Q-фактору сигналу приймача ВОСП

Рівень циклу ОТН	Спосіб визначення Q-фактору	$N_{\text{секц}}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OTU1	вираз (9)	119,2	79,3	61,9	51,7	44,8	39,8	36,0	32,9	30,4	28,3
	вираз (10)	140,8	99,6	81,3	70,4	63,0	57,5	53,2	49,8	46,9	44,5
	Optiwave Optisystem	93,0	65,2	52,9	45,6	40,6	36,8	34,0	31,6	29,7	28,1
OTU2	вираз (9)	64,1	43,8	34,8	29,5	25,9	23,3	21,2	19,6	18,2	17,1
	вираз (10)	70,3	49,7	40,6	35,1	31,4	28,7	26,6	24,8	23,4	22,2
	Optiwave Optisystem	50,4	35,4	28,7	24,7	22,0	20,0	18,4	17,1	16,1	15,2

Таблиця 2

Параметри моделі ВОСП

Функціональний блок	Параметр	Значення
Передавач	Швидкість передачі цифрового сигналу $V_{\text{пер}}$	2,666 Гбіт/с (OTU1) 10,709 Гбіт/с (OTU2)
	Середня потужність сигналу $P_{\text{пер}}$	1 мВт
	Коефіцієнт загасання	0,2 дБ/км
Оптичне волокно	Довжина однієї секції	100 км
Оптичний підсилювач	Шум-фактор n_f	6 дБ
Оптичний смуговий фільтр	Ширина смуги ΔF_o	100 ГГц
Фотодіод	Чутливість R	1 А/Вт
ФНЧ приймача	Ширина смуги ΔF_c	0,75 $V_{\text{пер}}$

Таблиця 3

Відносна помилка розрахунку Q-фактору δ , %

Рівень циклу ОТН	Спосіб визначення Q-фактору	$N_{\text{секц}}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OTU1	вираз (9)	28,2	21,5	17,0	13,4	10,6	8,1	6,0	4,1	2,4	0,8
	вираз (10)	51,4	52,6	53,7	54,5	55,3	56,1	56,7	57,4	58,0	58,6
OTU2	вираз (9)	27,4	23,8	21,4	19,5	17,9	16,6	15,4	14,3	13,2	12,3
	вираз (10)	39,6	40,5	41,5	42,3	43,1	43,8	44,5	45,1	45,7	46,2

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В статті досліджена аналітична модель ВОСП з модуляцією по інтенсивності. Для інформаційних структур типу OTU1 та OTU2 визначено Q-фактор сигналу в приймачі каналу ВОСП ОТН за повною та спрощеною формою розрахункових виразів. Співставлення отриманих результатів з імітаційним моделюванням показало, що спрощеному розрахунковому виразу відповідає відносна погрішність близько 40–60%, залежно від швидкості передавання сигналу в оптичному каналі зв'язку. Доведено, що для отримання достовірного результату доцільно використовувати повну форму розрахункового виразу Q-фактору сигналу, що враховує всі складові завади в приймачі ВОСП. Погрішність визначення Q-фактору в такому випадку не перевищуватиме 15%.

Розглянуту аналітичну модель ВОСП з МІ в подальшому слід розширити з метою врахування міжсимвольної інтерференції, що виникає в ФНЧ приймача.

Література

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.
2. Педяш В.В. Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 109-114.
3. Педяш В.В. Влияние нелинейных искажений оптических волокон на качество каналов ВОСП

СРК / В.В. Педяш // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 2. – С. 70-74.

4. Педяш В.В. Оценка влияния нелинейных искажений оптического волокна на качественные показатели когерентной ВОСП / А.Д. Мазур, В.В. Педяш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2016. – № 2. – С. 131-136.

5. Педяш В.В. Моделивання каналу оптичної системи передавання ОТН з квадратурною амплітудною модуляцією / В.В. Педяш // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 61-65.

6. Pedyash V., Mazur A., Rozenvasser D. (2021). Evaluation of Quality Parameters of an Intensity-Modulated Optical Transmission System. In: Vorobiyenko P., Ilchenko M., Strelkovska I. (eds) Current Trends in Communication and Information Technologies. IPF 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 212. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_2

7. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 580 p.

8. Stephen A.B. Optical communication receiver design. London: SPIE Publications, 1997. 337 p.

References

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.

2. Pedjash V.V. Vliyanie fazovoj samomoduljacji opticheskogo signala na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedjash, O.S. Reshetnikova // Naukovi pratsi UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 1. – S. 109-114.

3. Pedjash V.V. Vliyanie nelinejnyh iskazhenij opticheskikh volokon na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedjash // Naukovi pratsi UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 2. – S. 70-74.

4. Pedyash V.V. Otsenka vliyaniya nelineinykh yskazheniy opticheskogo volokna na kachestvennyye pokazately koherentnoi VOSP / A.D. Mazur, V.V. Pedyash // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. – 2016. – № 2. – S. 131-136.

5. Pedyash V.V. Modeliuvannya kanalu optichnoi systemy peredavannya OTN z kvadraturnoiu amplitudnoiu moduljatsiieiu / V.V. Pedyash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 5. – S. 61-65.

6. Pedyash V., Mazur A., Rozenvasser D. (2021). Evaluation of Quality Parameters of an Intensity-Modulated Optical Transmission System. In: Vorobiyenko P., Ilchenko M., Strelkovska I. (eds) Current Trends in Communication and Information Technologies. IPF 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 212. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_2

7. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 580 p.

8. Stephen A.B. Optical communication receiver design. London: SPIE Publications, 1997. 337 p.