

МОДЕЛИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПОДХОДИ ЗА МИНИМИЗИРАНЕ НА ИЗКРИВЯВАНИЯТА В ОПТИЧНИ WDM СИСТЕМИ

Емануил Кипреос

*Технически университет – Габрово, ул. Х. Димитър 4, Габрово, България
кореспондиращ автор: kypreos@yahoo.gr*

MODELING, RESEARCH AND ANALYSIS OF APPROACHES TO MINIMIZING DISTORTION IN OPTICAL WDM SYSTEMS

Emanuil Kipreos

*Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria
Corresponding author: kypreos@yahoo.gr*

Abstract

The performance of wavelength division multiplexing (WDM) systems in optical communication networks is susceptible to distortion due to amplified spontaneous emission noise (ASE), chromatic dispersion (CD), polarization mode dispersion (PMD), self-phase modulation (SPM), cross phase modulation (XPM), Four wave mixing (FWM), etc. linear and nonlinear effects of optical signal degradation. This paper aims to model, study and compare different approaches for compensation of optical signal distortions. Simulation models of single-channel and 8-channel WDM optical systems using the Return-to-Zero (RZ-DB) Duobinary modulation method, with a data rate of 100 Gb/s, a channel spacing of 100 GHz and a transmission distance of 360 km, are developed and investigated. Bit Error Rate (BER), eye diagram, and Quality factor (Q-factor) were used to evaluate performance.

Keywords: wavelength division multiplexing; Return-to-Zero Duobinary modulation; optical signal degradation, distortions.

ВЪВЕДЕНИЕ

Мултиплексирането с разделяне по дължината на вълната (WDM – wavelength division multiplexing) значително подобрява капацитета на оптичните мрежи [1]. Съществен момент е дължините на вълните да се разделят по подходящ начин между каналите, за да се избегне междусимволна интерференция (ISI) [2]. С увеличаване на разстоянието за комуникация, грешките се причиняват от прослушването между последователните времеви слотове при високи битови скорости, поради индуцираното от дисперсията разширяване на по-

късите оптични импулси, преминаващи през влакното. Усилвателите, легирани с ербий (EDFA – Erbium-doped Fiber Amplifier) разширяват обхвата на оптичните мрежи, като минимизират ограниченията от загубите във влакната [3].

Влошаването на сигнала в WDM системите се причинява от линейни и нелинейни смущения от ефекти, които са свързани съответно с процеси, независими от интензитета и зависими от интензитета на светлината. Затихването, хроматичната дисперсия (CD – chromatic dispersion), поляризационно-модовата дисперсия (PMD – polarization mode

dispersion) и усиленият шум от спонтанни емисии (ASE – amplified spontaneous emission) са индикации за линейни нарушения. Четиривънновото смесване (FWM – four-wave mixing), кръстосаната фазова модулация (XPM – cross-phase modulation) и фазовата самомодулация (SPM – self-phase modulation) са проявления на нелинейни явления в оптичните влакна [4,5].

Най-основните подходи за минимизиране, използвани за намаляване на общите смущения в каналите, са: избор на подходящи модулационни формати, поляризационно преплитане и оптично фазово съгласуване (OPC – optical phase conjugation) [6-9]. Различни параметри като нелинейните въздействия върху влакната, толеранса на дисперсията от груповата скорост и спектралната ефективност трябва да се вземат предвид при избора на модулационна схема [6,7]. Подходите за компенсация, базирани на оптично фазово съгласуване, са интересни, тъй като осигуряват прозрачност на модулационния формат и функционират в реално време [10]. В този доклад са разработени и тествани модели на едноканална и 8-канална 100 Gbps WDM мрежа, използваща оптична дуобинарна модулация (ODB – Optical Duobinary modulation). Разглеждат се и се сравняват подходите с оптично фазово съгласуване (OPC) и с използване на дисперсионно компенсиращо влакно (DCF – Dispersion Compensating Fiber) за минимизиране на смущенията в каналите.

ИЗЛОЖЕНИЕ

А) Синтез на имитационен модел

Подходът на оптично фазово съгласуване (OPC), наричан още процес на спектрална инверсия, се използва за компенсиране както на нелинейностите на Кер (SPM), междуканалните въздействия, хроматичната дисперсия и премахване на фазовия шум. Оптичното фазово съгласуване (OPC) успешно компенсира хроматичната дисперсия в предавателните линии, елиминирайки необходи-

мостта от модули за оптично компенсиране на дисперсията (DCF) и свързаните с тях допълнителни загуби [7,9,11].

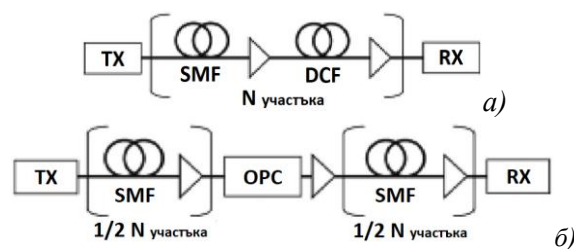
На фиг. 1 е показан принципа на OPC [12]. Сигналът с честота ω се комбинира с напompващия сигнал с честота ω и се подава в OPC модула.



Фиг. 1. Концепция за оптично фазово съгласуване

На изхода на OPC модула се получава спрегнат сигнал с различна дължина на вълната ω_{conj} . След това оптичен лентов филтър разделя спрегнатата дължина на вълната от напompващия и оригиналния сигнал. FWM процесът във силно нелинейно влакно (HNLF) се използва за реализиране на компенсация на нелинейността, базирана на симетрично OPC [12,13].

За създаване на модела е използван софтуерния продукт OptiSystem. Разработените модели с прилагане на двата подхода (с DCF и с OPC) са представени в блоков вид на фиг. 2.



Фиг. 2. Схема на оптична WDM система с:
а) конвенционална DCF компенсация и с б) OPC компенсация

Предложената едноканална и 8-канална WDM система с DCF и OPC се състои от предавател, оптичен канал и оптичен приемник, с централна честота на първия канал от 193,1 THz. Таблица 1 представя всички параметри на разработения модел.

Таблица 1. Параметри на симулацията

Параметър	Стойност
Скорост на данните	100 Gbps
Продължителност на поредицата	128 bits
WDM канално отстояние	100 GHz
Централната честота на първия канал	193,1 THz
WDM капацитет	8 канала×100 Gbps
Разстояние	60 km × 6 усилвателни участъка = 360 km

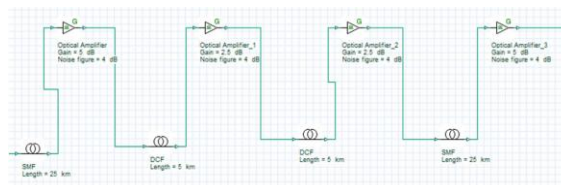
В отделните канални оптични предаватели се използва RZ-дуобинарен модулатор със скорост на предаване на данни 100 Gbps, който се състои главно от лазер с непрекъсната вълна (CW), генератор на псевдослучайни битови последователности (PRBS), филтри и Мах-Зендер оптични модулатори. PRBS генераторът създава псевдослучайни битови последователности със скорост 100 Gbps, използвайки $2^7 - 1$ бита.

За да се получи дуобинарен сигнал, първо се използва лазерен източник (CW) с тясна ширина на лъча от 1 MHz. CW сигналят, генериран от лазерния източник, се използва като носещ сигнал в модулатора за модифициране на електрическия поток от данни. След това оптичният сигнал се предава към модулатора, който модулира електрическия сигнал, използвайки оптичния носещ сигнал, генериран от CW лазера.

В WDM системата, оптичният мултиплексор приема модулираните канални оптични сигнали и ги подава към своите осем входни порта.

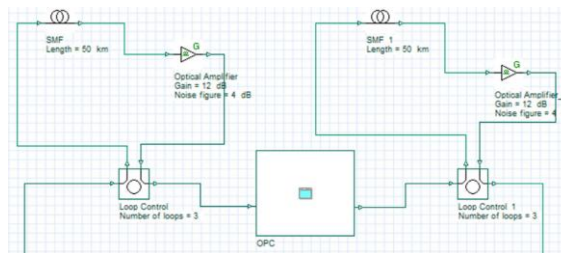
В едноканалните и 8-каналните системи, конвенционалната линия за връзка се състои от два участъка с едномодово оптично влакно (SMF) с дължина 25 km, коефициент на затихване 0,2 dB/km, коефициент на дисперсия 17 (ps/km-nm) и коефициент на наклона на дисперсията 0,075 (ps/km-nm²). Между двата SMF участъка са разположени два участъка с DCF влакно с дължина 5 km. То има коефициент на затихване 0,5 dB/km, коефициент на дисперсия – 85 (ps/km-nm) и

коефициент на наклона на дисперсията – 0,3 (ps/km-nm²), както е показано на фиг. 3.



Фиг. 3. Конвенционална оптична линия за връзка със симетрична DCF компенсация

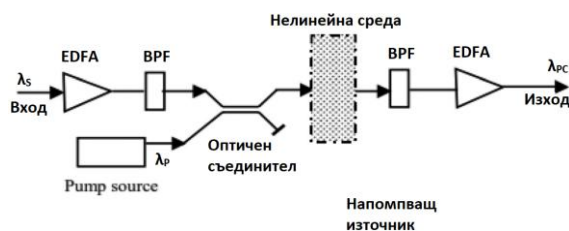
В схема на симетрична OPC компенсация не се използват DCF участъци в линията за връзка. Оптичната линия е разделена на две части, като всяка половина се състои от 3 участъка. Всяка част от предавателната линия (преди и след OPC модула) се състои от SMF-влакно със същите параметри, както в конвенционалната схема и дължина 60 km, последвана от EDFA с коефициент на усиление 12dB, както е показано на фиг. 4.



Фиг. 4. Оптична линия за връзка със симетрична OPC компенсация

На фиг. 5 е представена блоковата схема на OPC модул за симетрична компенсация. След сигналния вход на OPC модулът е разположен EDFA усилвател за усиление на входната мощност. Входния сигнал и сигналят от напompващия CW лазер се подават към оптичен съединител, лентов филтър (BPF) и нелинеен елемент. Сигналят от изхода на нелинейния елемент се подава на втори BPF, оригиналният сигнал и напompващия сигнал се елиминират, оставяйки само необходимия фазово-съгласуван импулс. Преди да премине към втората част на оптичния канал, изходният сигнал се усилюва, комбинирайки входния оптичен

сигнал ($\lambda_S = 1550,12 \text{ nm}$) със напмпващия сигнал ($\lambda_P = 1552,52 \text{ nm}$).



Фиг. 5. Блокова схема на OPC модула

В таблица 2 са представени параметрите на симулацията на OPC модула.

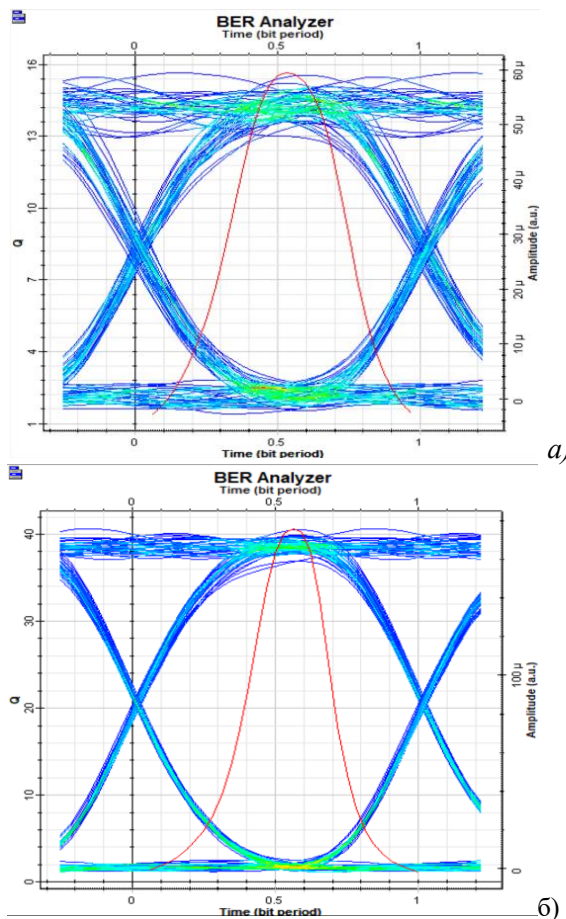
Таблица 2. Параметри на OPC модула

Параметър	Стойност
Напмпващ източник	10 dBm
Дължина на нелинейното влакно	1000 m
Коефициент на затихване на нелинейното влакно	0.97 dB/km
Коефициент на нелинейност	$11.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$
Хроматична дисперсия	0 ps/km-nm

В края на оптичната линия сигналът се доставя до оптичния демултиплексор (при многоканални линии), който разделя мултиплексирания сигнал на отделни оптични дължини на вълната по оптични канали, всеки от които завършва с оптичен приемник. В оптичния приемник сигналът се приема и преобразува в електрически сигнал. В етапа на детекция се използва подход за директно детектиране.

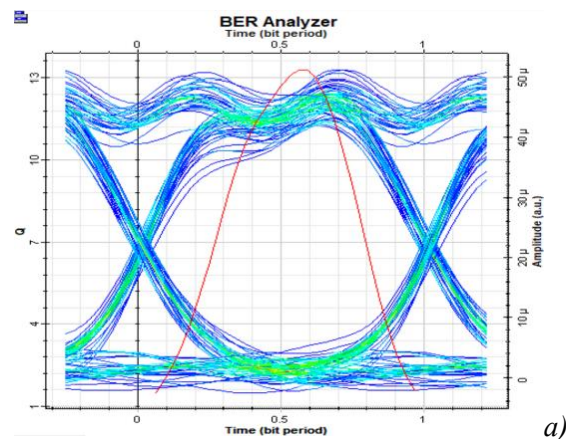
Б) Резултати

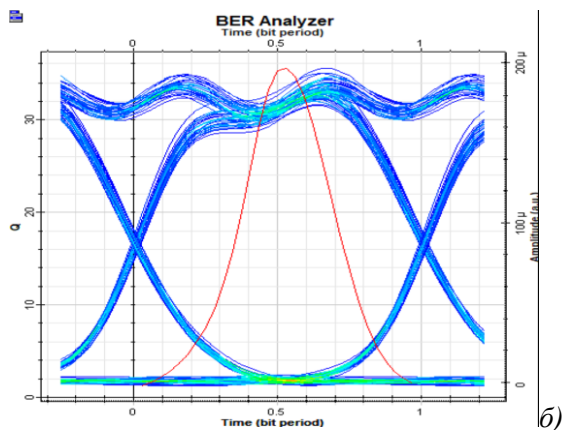
Извършено е сравнение на двата подхода за минимизиране на смущенията, като критерий за оценка се явяват параметрите на око-диаграмата, Q-фактора и BER. Резултатните око-диаграми при симетрични DCF и OPC компенсации за един канал и за 8 канала е показан съответно на фиг. 6 и фиг. 7.



Фиг. 6. Око-диаграми за един канал при 0 dBm входна мощност за: а) конвенционална връзка с DCF компенсация, б) OPC компенсация

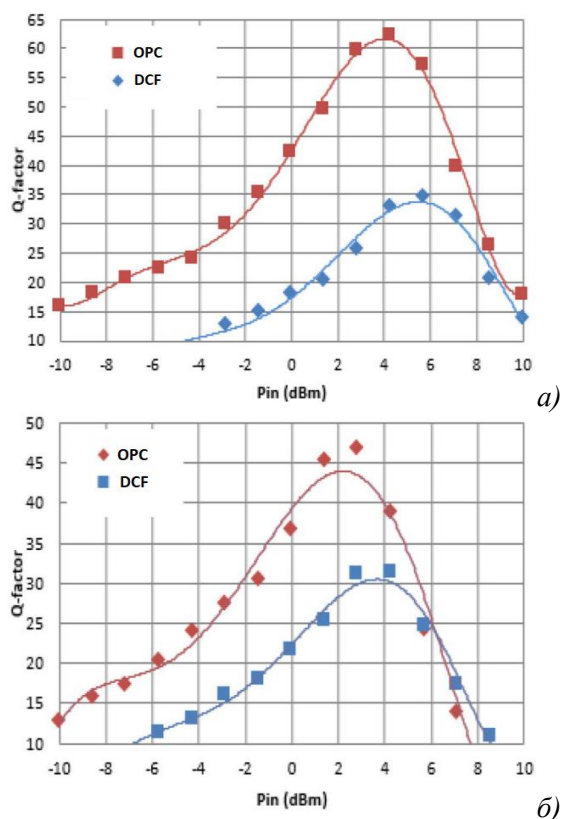
Око-диаграмата при OPC е много по-широка и с по-малко изкривяване в сравнение със симетричния DCF. OPC компенсира дисперсията чрез обръщане на посоката на разпространение и промяна на фазата на оптичния лъч.





Фиг. 7. Око-диаграми за WDM система с 8 канала $\times$ 100 Gbps, канал № 4 при 0 dBm входна мощност за: а) конвенционална връзка с DCF компенсация, б) OPC компенсация

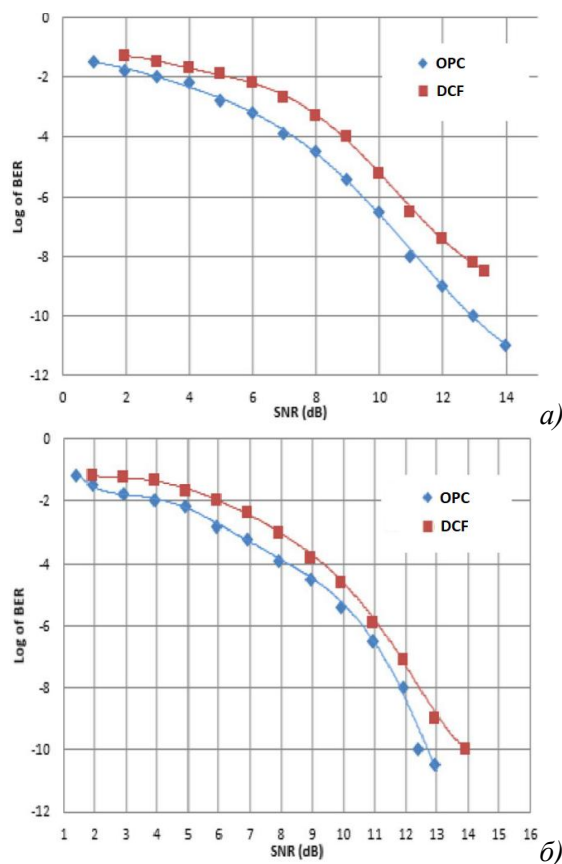
На фиг. 8 е показано изменението на Q-фактора във функция от оптичната входна мощност за един канал и за канал № 4 в WDM система с битрейт 100 Gbps.



Фиг. 8. Q-фактор във функция от входната мощност за: а) единичен канал, б) канал № 4 в WDM система

На фиг. 9 е представен BER във функция от съотношението сигнал/шум

(SNR) за един канал и за канал №4 в WDM система.



Фиг. 9. BER във функция от SNR за: (а) единичен канал, б) канал № 4 в WDM система

Резултатите при схема на компенсация с OPC показват, че пиковият Q фактор е приблизително 63 за един канал и 47 за канал № 4 в многоканална мрежа при 3 до 4 dBm входна мощност на сигнала, логаритмична стойност на BER от -2,2 и -2 съответно за един канал и за многоканална система. Резултатите показват, че при OPC схема смущенията в сигнала значително се минимизират в сравнение с конвенционалните DCF схема на компенсация, като подобрението на Q-фактора е с 29 при за един канал и с 15 за 8-канална WDM система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тази доклад представя резултатите от сравнителен анализ и оценка за едноканална и 8-канална WDM система със скорост на предаване 100 Gbps, при използване на симетрична компенсация на

дисперсията (DCF подход) и оптично фазово съгласуване (OPC подход) за компенсиране на хроматичната дисперсия и нелинейните ефекти, използвайки RZ-DB формат на модулация. Въпреки че DCF е ефективен метод за компенсиране на дисперсията, съществуващите му недостатъци като слаба отрицателна дисперсия, значително затихване, ограничена входна мощност, остатъчна дисперсия и високи допълнителни загуби и т.н., OPC е по-подходящ и надежден за минимизиране на нелинейните изкривявания от ефекта на Кер, като фазовата самомодулация, нелинейните ефекти в рамките на канала, елиминиране на нелинейния фазов шум и компенсиране на хроматичната дисперсия. OPC постига най-висок Q-фактор и най-нисък BER, което доказва, че е оптималният метод за компенсиране на нелинейните ефекти и хроматичната дисперсия, чрез разполагане на OPC модулите по протежение на оптичните участъци, за да се увеличи ефективността на преносната мрежа в оптични канали на дълги разстояния.

Благодарности: този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Съвременни методи и AI решения за защитено предаване на данни в широко-лентови комуникационни мрежи“, догвор НИП 2025-14/2025 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Khanaa, K. Mohanta, T. Saravanan, Performance Analysis of a Two Channel Optical WDM System using Binary and Duo Binary Modulation Formats. Indian J Sci Technol. 6(6S), (2013), pp. 4726–4732.
- [2] T. Sabapathi, R. Poovitha, Combating the Effect of Nonlinearities in DWDM System. in 2017 4th International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS) IEEE, (2017), pp. 38–42.
- [3] P. Neheeda, M. Pradeep, P.J. Shaija, Analysis of WDM System with Dispersion Compensation Schemes, in Procedia Computer Science, Elsevier B.V. (2016) pp. 647–654.
- [4] R.S. Ali, A.Y. Fattah, M.D. Hassib, The effects of optical fiber impairments on communication systems. Indonesian J. Electr. Eng. Comput. Sci. 28(1) (2022) pp. 241–253.
- [5] S.P. Singh, N. Singh, Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications. Progress Electromagnet. Res. 73, 249–275 (2007)
- [6] Sadinov S., Angelov K., Kogias P., Modeling and Performance Analysis of DWDM Passive Optical Network, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1032 (1), art. no 012003, 2021, pp 1-8. ISSN 17578981.
- [7] Angelov K., S. Sadinov, P. Kogias, Computer Modelling and Analysis of Dispersion Compensation Schemes in Optical Communication Lines, International Scientific Conference UNITECH 2018, 16-17 November 2018, Gabrovo, ISSN 1313-230X, Vol. 2, pp. II-33-37.
- [8] Sadinov S., K. Angelov K., P. Kogias, Influence of the efficiency of optical conversion modules on the performance in passive optical networks, AIP Conference Proceedings, Vol. 2570, art. no. 020017, pp. 1-5, 18 August 2022. ISSN 0094243X
- [9] A. Alam, A. S. Tomar, A. Sethi, D. Pruthi and Parashuram, "Manifestation and Suppression of Nonlinearity Using Optical Phase Conjugation in Long Haul Optical Communication," 2024 First International Conference on Electronics, Communication and Signal Processing (ICECSP), New Delhi, India, 2024, pp. 1-5.
- [10] E. Ip, J.M. Khan, Digital equalization of chromatic dispersion and polarization mode dispersion. J. Lightwave Technol., vol. 25(8), (2007) pp.2033–2043.
- [11] G. Keiser, Fiber Optic Communications, Newton Center, MA, USA: Springer Singapore, ch3. (2021).
- [12] S.L. Jansen et al., Applications of optical phase conjugation in robust optical transmission systems, Optical Transmission, Switching, and Subsystems V, SPIE, 67830. (2007).
- [13] A. Hayder, A. Kareem, I. Murdas, I.A. Murdas, Investigation of Fiber impairment mitigation based on optical phase conjugation technique. Int. J. Microw. Opt. Technol. 18(2), 184–194 (2023)