

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ: ВПЛИВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-МОДОВОЇ ДИСПЕРСІЇ ТА ЇЇ КОМПЕНСАЦІЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто шляхи підвищення ефективності оптичних транспортних мереж шляхом аналізу впливу поляризаційно-модової дисперсії (ПМД) та впровадження автоматизованих систем компенсації. Обґрунтовано обмеження швидкості передавання даних у присутності ПМД. Запропоновано математичну модель, що дозволяє оцінити граничну продуктивність системи, та подано структурні схеми систем передачі із спектральним ущільненням каналів та компенсацією ПМД.

Ключові слова: ПМД, WDM, автоматизована компенсація, ефективність передачі, спектральне ущільнення.

Abstract

The paper examines methods to improve the efficiency of optical transport networks by analyzing the impact of polarization mode dispersion (PMD) and implementing automated compensation systems. The limitation of data transmission speed in the presence of PMD is justified. A mathematical model for estimating the maximum system throughput is proposed. Block diagrams of transmission systems with spectral channel multiplexing and PMD compensation are presented.

Keywords: PMD, WDM, automated compensation, transmission efficiency, spectral multiplexing.

Вступ

Оптичні транспортні мережі є критичними компонентами сучасної інфраструктури передачі даних. Одним із факторів, що обмежують їхню ефективність, є поляризаційно-модова дисперсія (ПМД). У високошвидкісних мережах ПМД спричиняє погіршення якості сигналу, зниження максимальної довжини регенераційної ділянки та обмеження пропускну здатності.

Теоретичні основи

Поляризаційно-модова дисперсія (ПМД) є одним із фундаментальних фізичних явищ, що істотно впливає на продуктивність та пропускну здатність сучасних волоконно-оптичних систем зв'язку, особливо на високих бітових швидкостях (понад 10 Гбіт/с)[1]. На відміну від хроматичної дисперсії, яка може бути відносно легко компенсована, ПМД має стохастичну природу та залежить від часу, що робить її компенсацію значно складнішою задачею.

ПМД виникає через те, що оптичне волокно не є ідеально симетричним. Будь-які неоднорідності в геометрії волокна (наприклад, еліптичність сердцевини) або внутрішні напруження, що виникають під час виробництва або експлуатації (вигини, кручення, перепади температур), призводять до двоприменезаломлення[2]. Це означає, що показник заломлення для двох взаємно ортогональних поляризацій світла, які розповсюджуються волокном, є різним. Ці поляризації називаються головними станами поляризації (Principal States of Polarization - PSP).

Кожна з цих PSP розповсюджується волокном з різною групою швидкістю, що призводить до затримки між ними. Ця затримка відома як диференційна групова затримка (Differential Group Delay - DGD). Величина DGD не є постійною вздовж волокна і змінюється випадковим чином з часом та довжиною хвилі через температурні коливання, вібрації, зміщення волокна тощо[3].

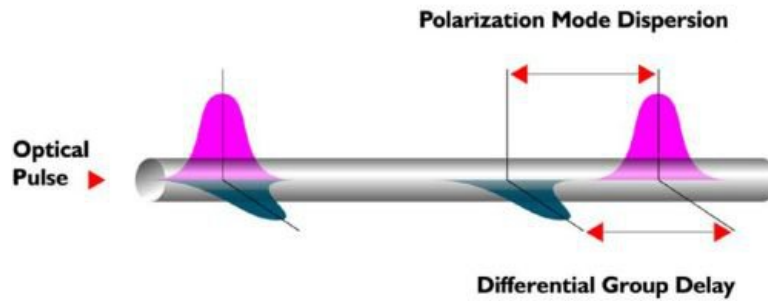


Рис.1 – Схематичне зображення явищ PMD та DGD

Формально ПМД часто характеризується як середньоквадратичне відхилення DGD за велику кількість реалізацій або як середнє значення DGD вздовж лінії передачі. Це відхилення зазвичай зростає пропорційно квадратному кореню з довжини волокна, що є критичним фактором для далеких ліній зв'язку[4]:

$$PMD = D_{pdm} \sqrt{L}$$

де D_{pdm} — коефіцієнт ПМД (пс/ $\sqrt{\text{км}}$), L — довжина лінії передачі (км).

Типові значення коефіцієнта D_{pdm} для сучасних оптичних волокон коливаються від 0.05 до 0.5 пс/км. Однак, для старих волокон, прокладених у 90-х роках, цей коефіцієнт може бути значно вищим (до 1-2 пс/км).

Наявність ПМД призводить до кількох негативних ефектів на оптичний сигнал, що передається:

Розширення імпульсу (Pulse Broadening): Різниця в часі розповсюдження між двома PSP спричиняє розширення кожного переданого бітового імпульсу. Це призводить до міжсимвольної інтерференції (МСІ), що погіршує розрізнення між сусідніми бітами і збільшує ймовірність помилок.

Деполаризація сигналу: Оскільки різні компоненти сигналу поширюються з різними швидкостями, поляризація сигналу на виході волокна стає менш визначеною або частково деполаризованою[5]. Це може впливати на роботу поляризаційно-чутливих компонентів системи, таких як модулятори або фільтри.

Зниження відношення сигнал/шум (SNR): Розширення імпульсу та МСІ ефективно знижують потужність сигналу, що сприймається приймачем, при цьому рівень шуму залишається незмінним, що призводить до зниження SNR.

Збільшення частоти бітових помилок (Bit Error Rate - BER): Сукупність цих ефектів призводить до значного збільшення BER, що є ключовим показником якості передачі. При досягненні певного порогового значення BER (наприклад, 10^{-9} або 10^{-12}) система вважається непрацездатною.

Максимальна бітова швидкість, яку можна передати по оптичній лінії при заданому пороговому BER, є обернено пропорційною значенню ПМД. Емпірично, максимальна бітова швидкість B_{max} при заданому пороговому BER може бути наближено обчислена за формулою:

$$B_{max} = \frac{\varepsilon}{D_{pdm}} L^{-1/2}$$

де $\varepsilon \approx 0.1$ — емпіричний коефіцієнт, що враховує допустиме погіршення якості сигналу[6]. Для типових систем з $BER = 10^{-12}$ значення ε часто приймається близько 0.1. Тобто, якщо PMD досягає 10 пс, максимальна швидкість обмежена 10 Гбіт/с.

Практична реалізація

Для суттєвого покращення роботи системи передачі даних в оптичних мережах, особливо на високих швидкостях, ключовою є інтеграція автоматизованої системи компенсації ПМД (поляризаційно-модової дисперсії). Ця система функціонує в адаптивному режимі, що робить її незамінною для боротьби з динамічною та стохастичною природою ПМД.

Її принцип дії ґрунтується на постійному моніторингу та корекції: система безперервно працює у зворотному каналі (feedback loop), де відбувається оцінка впливу ПМД на сигнал. Це означає, що вона не просто вносить фіксовані зміни, а активно аналізує поточний стан оптичного сигналу, вимірюючи, наскільки він спотворений через поляризаційну дисперсію[7]. На основі цих вимірювань, автоматизована система вносить точні та динамічні коригування в режимі реального часу. Це дозволяє ефективно мінімізувати деградацію сигналу, спричинену ПМД, адаптуючись до змінних умов у волокні, таких як температурні коливання чи механічні впливи, забезпечуючи стабільну та високоякісну передачу даних.

Технологія спектрального ущільнення

Для істотного підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж, однією з фундаментальних та найефективніших технологій є WDM (Wavelength Division Multiplexing), або спектральне ущільнення каналів. Цей метод дозволяє одночасно передавати кілька незалежних потоків даних по одному оптичному волокні, кожен на своїй унікальній довжині хвилі світла[8]. Замість того, щоб мати одне "шосе" для даних, WDM створює багато "смуг руху" на цьому ж шосе, використовуючи різні кольори світла.

wavelength-division multiplexing (WDM)

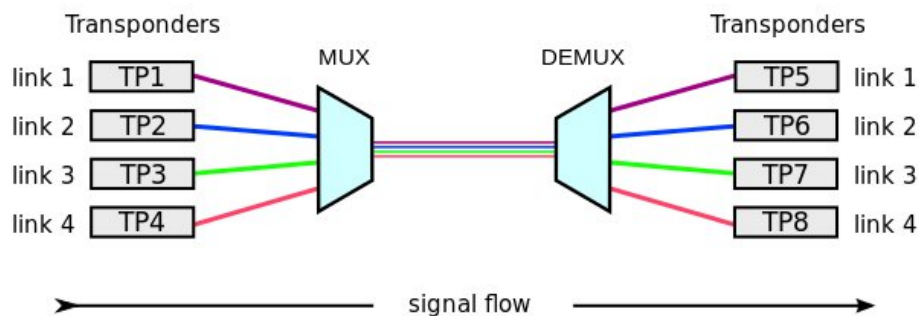


Рис.2 – Спрощена схема WDM

Базова структурна схема системи передачі, що використовує WDM, є досить елегантною. На передавальному кінці, численні оптичні сигнали, кожен модульований на окремій довжині хвилі (наприклад, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$), об'єднуються за допомогою оптичного мультиплексора в єдиний композитний сигнал, який потім надсилається в оптичне волокно[9].

На приймальному кінці, цей композитний сигнал розділяється на окремі довжини хвиль за допомогою оптичного демультимплексора, і кожен сигнал детектується окремо.

Це значно збільшує ефективність використання дорогоцінної інфраструктури оптичного волокна. Важливою особливістю таких високопродуктивних систем є те, що вони передбачають інтегровану компенсацію впливу ПМД (поляризаційно-модової дисперсії). Оскільки WDM дозволяє передавати величезні обсяги даних, ефекти ПМД стають ще більш критичними.

Тому, для забезпечення стабільності та надійності передачі на кожній довжині хвилі, або для всього сукупного WDM сигналу, застосовуються спеціальні механізми компенсації ПМД, що дозволяють підтримувати високу якість сигналу попри його спотворення.

Висновки

Поляризаційно-модова дисперсія (ПМД) є одним із ключових обмежень швидкості передачі даних в оптичних транспортних мережах, оскільки вона призводить до спотворення сигналу та зниження якості зв'язку. Застосування алгоритмічної компенсації ПМД дозволяє ефективно зменшити ці негативні впливи, що, своєю чергою, сприяє збільшенню довжини регенераційної ділянки та підвищенню загальної ефективності мережі. Крім того, використання систем із спектральним ущільненням каналів (WDM) у

поєднанні з ПМД-компенсаторами демонструє високий потенціал масштабованості, що відкриває можливості для побудови більш продуктивних і гнучких оптичних мереж нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Albanese, I. Big File Protocol for OTN and Ethernet Transport Systems / I. Albanese, Y. O. Yazır, S. W. Neville, S. Ganti, T. E. Darcie // Journal of Optical Communications and Networking. – 2015. – Vol. 7, Issue 2. – P. 96-108
2. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління: конспект лекцій. Модуль 5.2 / Педаш В.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017.
3. Телекомунікаційні системи передавання інформації: навч. посіб. / М. М. Климаш, Р. С. Колодій. — Львів: Львівська політехніка, 2018
4. D. Arci, D. Petecchi, G. Maier, A. Pattavina and M. Tornatore, "Availability models for protection techniques in WDM networks", *Proc. Int. Workshop Design Reliable Commun. Netw. (DRCN)*, pp. 158-166, 2003
5. Jinno, M., Miyamoto, Y. & Hibino, Y. Optical-transport networks in 2015. *Nature Photon* 1, 157–159 (2007)
6. Дрючин О. О. Оптичні транспортні мережі. Синхронна цифрова ієрархія: Навчальний посібник. – Вінниця. : ВНТУ, 2017.
7. Le Nguyen Binh Advanced Digital Optical Communications. – European Research Center, Huawei Technologies, Munich, Germany, CRC Press London New York, 2015.
8. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В. М. Кичак, О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В. Стальченко. - Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2016. - 424 с.
9. Войтович І.А., Яковлев В.М., Сірош С.І. Оптичні транспортні мережі. - К.: НТУУ «КПІ», 2014. - 424 с.

Гайдамашко Артем Олексійович — студент групи KIBT-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: artemgajdamasko@gmail.com

Пінаєв Богдан Олегович — Ph.D., ст. викладач каф. IPTC, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com

Haidamashko Artem Oleksiiovych - student of the group KIVT-24m, Departments of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: artemgajdamasko@gmail.com

Pinaev Bogdan Olegovich — Ph.D., Senior Lecturer at the Department of Information Radio Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com