ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи компенсації дисперсії оптичного волокна»
на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Арсеній ГОЛОВАТЮК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав: здобувач вищої освіти
студент гр. ТСМД-61
Арсеній ГОЛОВАТЮК
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Сергій МАРКОВ
к.т.н., доцент *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Рецензент:
_____ _____
(науковий ступінь, вчене звання) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Головатюку Арсенію В'ячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Методи компенсації дисперсії оптичного волокна
керівник кваліфікаційної роботи Сергій МАРКОВ, к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « 30 » жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1) стандарти одномодових оптичних волокон;
   2) стандарти високошвидкісних мереж з хвильовим мультиплексуванням;
   3) матеріали по компенсації дисперсії оптичними методами;
   4) матеріали по електронної компенсації дисперсії;
   5) матеріали по сучасним оптичним волокнам з малою дисперсією.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
   1) вступ;
   2) оптичні волокна та їх характеристики;
   3) дисперсія в оптичних волокнах, її види та характеристики;
   4) компенсація дисперсії оптичними методами;
   5) електронная компенсація дисперсії;
   6) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: ___презентація на 12 слайдах_____

6. Дата видачі завдання «_01_» _жовтня_ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	05.10.2025	Виконано
2	Оптичні волокна та їх характеристики	10.10.2025	Виконано
3	Дисперсія в оптичних волокнах та її види	15.10.2025	Виконано
4	Розрахунок дисперсійних характеристик	30.10.2025	Виконано
5	Компенсація дисперсії оптичними методами	15.11.2025	Виконано
6	Електронна компенсація дисперсії	10.12.2025	Виконано
7	Висновки та оформлення роботи	25.12.2025	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Арсеній ГОЛОВАТЮК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 71 стор., 30 рис., 5 табл., 31 джерел.

Мета роботи – дослідження явища дисперсії та методів її компенсації, розрахунок основних дисперсійних характеристик.

Об’єкт дослідження – оптичні волокна та пристрої і методи компенсації дисперсії в них.

Предмет дослідження – явище дисперсії та методи компенсації дисперсії.

Короткий зміст роботи: у роботі проведений аналіз методів компенсації дисперсії, розглянуто оптичні та електронні методи компенсації; з використанням CAD OptiSystem спроектовано дві системи компенсації дисперсії (граткою Брегга та волокном з від’ємною дисперсією); для кожної системи досягнена прийнятна якість передачі сигналу; показано, що для досягнення найкращої результату необхідно коригувати параметри модуля компенсації, визначивши значення дисперсії в волокні конкретної довжини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ДИСПЕРСІЯ, КОМПЕНСАЦІЯ ДИСПЕРСІЇ, СИНХРОННА ЦИФРОВА ІЄРАРХІЯ, ХВИЛЬОВЕ УЩІЛЬНЕННЯ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work:
71 pages, 30 pictures, 5 table, 31 sources.

The purpose of the work is to study the phenomenon of dispersion and methods for its compensation, to calculate the main dispersion characteristics.

The object of the research is optical fibers and devices and methods for compensating dispersion in them.

The subject of the research is the phenomenon of dispersion and methods for compensating dispersion.

Summary of the work: the paper analyzes dispersion compensation methods, considers optical and electronic compensation methods; using CAD OptiSystem, two dispersion compensation systems (Bragg grating and negative dispersion fiber) are designed; acceptable signal transmission quality is achieved for each system; it is shown that to achieve the best result, it is necessary to adjust the parameters of the compensation module by determining the dispersion value in a fiber of a specific length.

KEYWORDS: OPTICAL FIBER, DISPERSION, DISPERSION COMPENSATION, SYNCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY, WAVE-COMPRESSION.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Головатюк А.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: « Методи компенсації дисперсії оптичного волокна».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Головатюк А.В. під час написання роботи проявив себе як вдумливий та допитливий фахівець, показав гарну теоретичну підготовку. За короткий час їм було опрацьовано значну кількість літератури з проблем компенсації дисперсії в оптичних волоках та проведені необхідні розрахунки. Працюючи над завданнями, які доручалися керівником роботи, студент проявив ініціативу творчість і спроможність до інженерної праці.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Головатюка А.В. на оцінку « відмінно » та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Головатюк А.В. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього рівня магістра

здобувача вищої освіти Головатюка Арсенія В'ячеславовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Методи компенсації дисперсії оптичного волокна»

Актуальність.
у зв'язку із збільшенням кількості інформації, яка передається по сучасним транспортним мережам зв'язку, виникає проблема збільшення швидкості передачі та подальшого хвилевого ущільнення оптичного волокна. Вирішенню проблеми заважає явище дисперсії, яке значно проявляється при великих швидкостях передачі. Таким чином, дослідження технологій, які зменшують дисперсію є актуальною задачею.

Позитивні сторони.
Вирішені всі задачі, що поставлені в завданні на розробку, а саме: проведений аналіз стандартів технологій оптичного доступу, показані переваги технології GPON для мереж доступу, проведений аналіз пасивних оптичних мереж доступу. Розроблений проект офісної комп'ютерної мережі, проведена економічна оцінка проекту. Всі розділи роботи виконані на високому рівні. Пояснювальна записка написана чітко і зрозуміло, графічна частина оформлена з використанням комп'ютера, основні розрахунки виконані також за допомогою засобів обчислювальної техніки.

Недоліки.
1. Аналізу перспективних форматів модуляції приділена недостатня увага.
2. Відсутнє посилання на експериментальні дані.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи.

Висновок: *кваліфікаційна магістерська робота заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Головатюк А.В. заслуговує присвоєння кваліфікації: Магістр з електронний комунікацій та радіотехніки.*

Рецензент: _____ _____

_____ *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

(науковий ступінь, вчене звання)

ЗМІСТ

ЗМІСТ 8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 10
ВСТУП 11
1 ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО ЯК СЕРЕДОВИЩЕ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ 12
1.1 Загальні характеристики оптичного волокна 12
1.2 Загасання світла в оптичному волокні 14
1.3 Дисперсія світла в оптичному волокні 18
2 МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ В ОПТИЧНИХ ВОЛОКНАХ 23
2.1 Огляд методів компенсації дисперсії 23
2.2 Оптичні методи компенсації дисперсії 24
2.2.1 Компенсація волокнами з від'ємною хроматичною дисперсією 24
2.2.2 Компенсація дисперсії за допомогою волоконних брегівських ґрат 27
2.3 Електронні методи компенсації дисперсії 31
2.4 Стійкі до дисперсійних перекручень формати модуляції 35
2.4.1 Огляд форматів модуляції 35
2.4.2 Амплітудні формати модуляції 37
2.4.3 Фазові та частотні формати модуляції 41
3 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ДИСПЕРСІЇ 45
3.1 Вибір програмного забезпечення для моделювання 45
3.2 Порядок роботи у САПР OptiSystem 49
3.3 Критерії оцінки якості роботи системи передачі 52
3.4 Компенсація решіткою Брегга 56
3.4.1 Структурна схема та її склад 56
3.4.2 Складання схеми та конфігурація компонентів 58

3.4.3 Моделювання та аналіз результату 60
3.5 Компенсація дисперсії лінійного волокна волокном компенсації 62
3.5.1 Структурна схема та її склад 62
3.5.2 Складання схеми та конфігурація компонентів 64
3.5.3 Моделювання та аналіз результату 65
ВИСНОВКИ 68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 69
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення	Повне формулювання
ВОСП	Волоконно-оптична система передачі
ОВ	Оптичне волокно
ХД	Хроматична дисперсія
ПМД	Поляризаційна модова дисперсія
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
MMF	Multi Mode Fiber
SMF	Single Mode Fiber
DSF	Dispersion-Shifted single mode Fiber
NZDSF	Non-Zero Dispersion-Shifted single mode Fiber
RZ	Return to Zero
NRZ	None Return to Zero
TDM	Time Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ASK	Amplitude Shift Keying
PSK	Phase Shift Keying
CRZ	Chirped RZ
CSRZ	Carrier Suppressed RZ
APRZ	Alternate Phase RZ
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DCM	Dispersion Compensation Module
DCF	Dispersion Compensation Fiber
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer

ВСТУП

Наразі існують технології передачі оптичних сигналів, що дозволяють зробити значний стрибок в збільшенні пропускної здатності лінії. Серед них найвідоміша WDM – технологія спектрального ущільнення смуги пропускання оптичного волокна [1]. Її поява підвищила вимоги до оптичних параметрів волокна. Найбільш вагомим параметром при збільшенні швидкості передачі виявляється дисперсія [2, 3]. Для багатомодових оптичних волокон основною складовою дисперсії є міжмодова дисперсія, яка обумовлена наявністю великої кількості мод. Для одномодових волокон визначальним чинником, що обмежує довжину зв'язку, є хроматична дисперсія.

При будівництві нових ділянок оптичних мереж доцільне використання нових спеціально розроблених видів оптичних волокон із зміщеною та ненульовою зміщеною дисперсією [4, 5]. Модернізацію вже побудованих ділянок, які на 80% складаються з стандартного оптичного волокна, доцільно проводити з використанням методів компенсації дисперсії.

Методи компенсації дисперсії можна поділити на оптичні та електронні [6]. Оптичні методи використовують вставки в оптичну лінію спеціального волокна з дисперсією протилежною за знаком до дисперсії основного волокна [7], або вставки спеціальних пристроїв [7, 8], що вводяться в лінійний тракт і компенсують дисперсію.

Перспективними вважаються електронні методи компенсації дисперсії [8]: використання форматів модуляції, які є стійкими до впливу дисперсії; використання попереднього викривлення сигналу; використання зворотного зв'язку для корекції сигналу, що прийнятий.

Компенсація дисперсії в існуючих лініях та в тих, що проектуються, значно покращить якість зв'язку та підвищить його швидкість, тому дослідження методів компенсації дисперсії є актуальною задачею.

1 ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО ЯК СЕРЕДОВИЩЕ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Загальні характеристики оптичного волокна

Оптичне волокно являє собою шарувату структуру, круглу в поперечному перетині [9] (рис.1.1).



Рис. 1.1 Конструкція оптичного волокна

Серцевина – елемент оптичного волокна по якому розповсюджується світлова хвиля. Серцевина виготовляється з кварцового скла, модифікованого різними хімічними елементами. Серцевина має коефіцієнт заломлення n_1.

Оболонка – елемент призначений для створення умов повного внутрішнього відбиття та зниження випромінювання енергії в зовнішнє середовище. Оболонка формується з того ж матеріалу, що і серцевина шляхом додання домішок з тих чи інших хімічних елементів, призначених для створення необхідного коефіцієнту заломлення n_2 і витримання умови $n_1 > n_2$.

Зовнішня оболонка – виготовляється з пластику. Вона призначена для захисту волокна від зовнішніх впливів, що пошкоджують, та для підвищення первинної міцності всієї конструкції.

Розмір оптичних волокон визначається зовнішніми діаметрами складових частин його конструкції. Наприклад: 50/125/250 – характеристика волокна з діаметром серцевини 50 мкм, діаметром оболонки 125 мкм та діаметром зовнішнього покриття 250 мкм.

Випромінювання зовнішнього джерела, яке падає на вхідний торець оптичного волокна збуджує в ньому декілька типів хвиль, які називаються модами.

На рис.1.2 показано поширення світлової хвилі по волокну при припущенні, що

коефіцієнт заломлення матеріалу серцевини є незмінним по її діаметру. Для спрощення зовнішня оболонка не розглядається.



Рис. 1.2 Поширення світла в оптичному волокні

Світлові промені 1 та 2, які падають на торець волокна в межах кута Φ_0, повністю відбиваються від межі розділу серцевини і оболонки і забезпечують передавання інформації по світловоду. Ці хвилі утворюють моди, які мають назву спрямовані, а кут Φ_0, в межах якого відбувається повне відбиття променю на межі серцевини і оболонки, має назву апертурного кута. До найважливіших параметрів оптичних волокон відносяться: загасання та дисперсія.

Передача сигналів по оптичному волокну заснована на явищі відбиття-заломлення оптичної хвилі на межі розділу двох середовищ з різними показниками коефіцієнтами заломлення [2, 3, 6, 9].

Промінь світла, що падає на межу розподілу середовищ, з коефіцієнтами заломлення n_1 та n_2 під кутом φ, частково відбивається від цієї межі та частково проходить крізь неї, створюючи заломлений і відбитий промені. Якщо світлова хвиля виходить з середовища з більшою оптичною густиною і попадає в середовище з меншою оптичною густиною, тобто $n_1 > n_2$, то на межі розподілу цих середовищ падаючий промінь частково відбивається від межі розподілу, а частково потрапляє в середу з меншою оптичною густиною, заломлюючись при цьому, тобто змінюючи кут розповсюдження ($\varphi < \varphi_{зл}$) (рис. 1.3, а). Якщо кут падіння φ збільшується, настає мить, коли заломлений промінь прямуватиме вздовж межі розподілу середовищ, тобто

$\varphi_{зл} = 90°$, у цьому разі кут падіння називають критичним (рис. 1.3, б). Якщо кут падіння φ більший за критичний, падаючий промінь повністю відбивається у своє ж середовище, заломлений промінь відсутній, світло за межу розподілу середовищ не проникає (рис. 1.3, в).

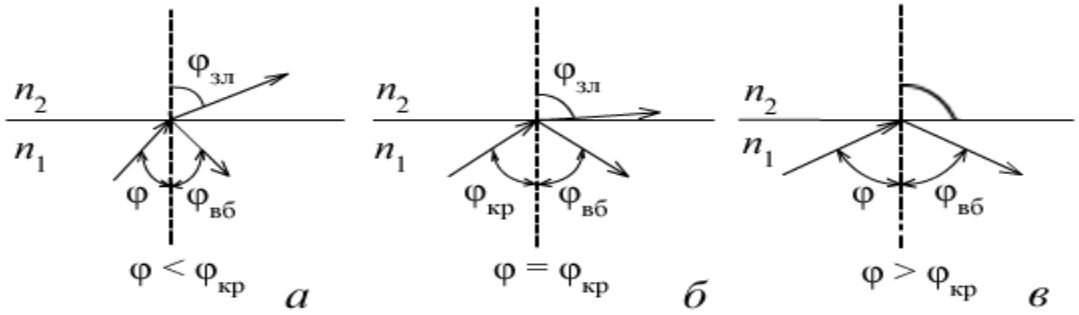


Рис. 1.3 Повне внутрішнє відбиття

а) наявні заломлений та відбитий промені; б) наявні відбитий промінь та заломлений уздовж межі розділу середовищ; в) наявний тільки відбитий промінь

Кути падіння, заломлення та відбиття пов'язані співвідношеннями:

$$\varphi = \varphi_{вб};\ n_1 \sin\varphi = n_2 \sin\varphi_{зл} \tag{1.1}$$

Для критичного кута падіння маємо:

$$\varphi_{зл} = 90°;\ \sin\varphi_{кр} = \frac{n_2}{n_1} \tag{1.2}$$

Для всіх кутів падіння, які перевищують граничний кут повного внутрішнього відбиття буде мати місце тільки відбиття світлового променю (рис.1.3,в). Це явище носить назву повного внутрішнього відбиття.

1.2 Загасання світла в оптичному волокні

В процесі поширення по волокну світлова хвиля зазнає загасання, яке обумовлює зменшення потужності світлової хвилі на кінці волокна по відношенню до її потужності на вході [2].

Мірою загасання є рівень потужності на виході оптичного волокна відносно потужності на його вході, тобто:

$$p = 10lg\frac{P_2}{P_1} \quad (1.3)$$

p – загасання. позначення загасання як правило співпадає з позначенням відносного рівня потужності;

P_2 – потужність на виході;

P_1 – потужність на вході.

Якщо $p > 0$, то має місце підсилення потужності при передачі, тобто $P_2 > P_1$, якщо $p < 0$ – має місце загасання (втрата) потужності, тобто $P_2 < P_1$. В випадку $p = 0$ – передача здійснюється без втрат потужності, тобто $P_2 = P_1$.

Мірою рівнів потужності є децибел потужності, скорочено дБп, на відміну від рівнів напруги або току, які вимірюються в децибелах (дБ).

Типовий спектр втрат в оптичному волокні зі своїми складовими компонентами, що вносять внесок в повну величину втрат на певній довжині хвилі показаний на рис. 1.4 [6, 7].

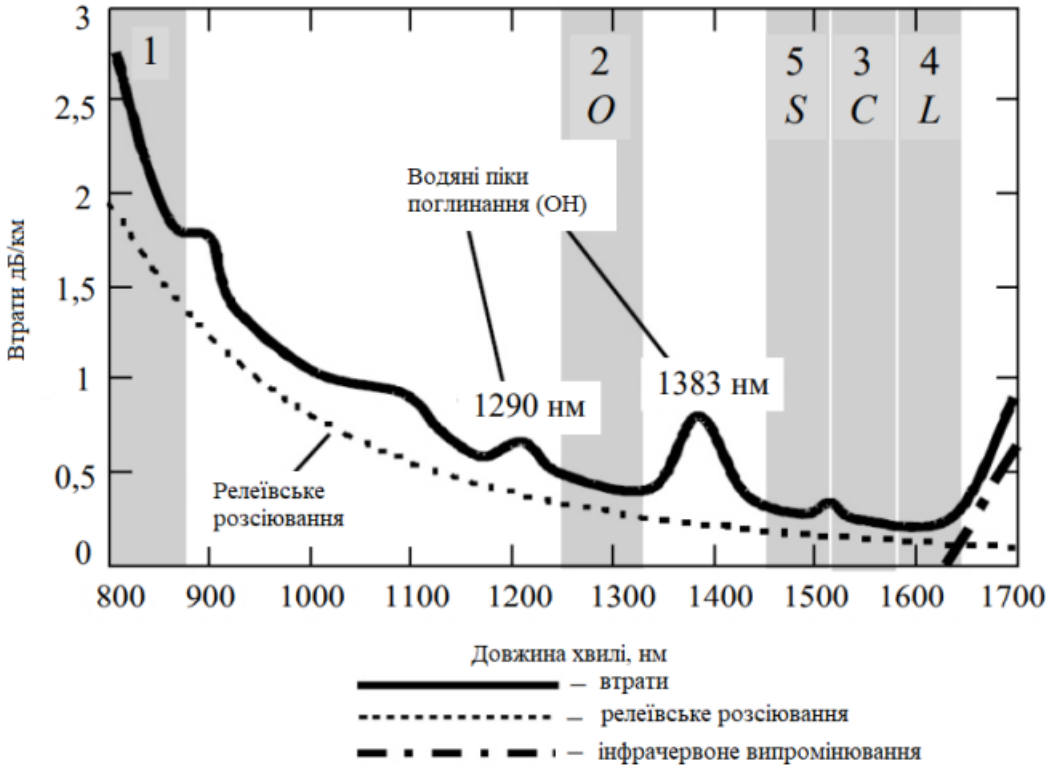


Рис. 1.4 Залежність загасання від довжини хвилі

Реальна спектральна залежність коефіцієнту загасання викликана багатьма чинниками, практично не піддається аналітичному опису і складається на базі експериментальних даних.

З графіків, наведених на рис. 1.4 випливає, що область використання оптичних волокон із кварцового скла обмежена діапазоном видимого світла та інфрачервоним діапазоном хвиль. Крім того робота оптичних волокон ефективна не на всіх довжинах світлових хвиль, а тільки у повних ділянках спектру, в яких наявні мінімуми втрат. Ці ділянки називаються вікнами прозорості і виділені на графіку, що наведений на рис. 1.4. Точні межі вікон прозорості визначені рекомендаціями Міжнародної спілки електрозв'язку і наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Вікна прозорості

Позначення	Діапазон, нм	Назва
O	1260 - 1360	Основний
E	1360 - 1460	Розширений
S	1460 - 1530	Короткохвильовий
C	1530 - 1565	Стандартний
L	1565 - 1625	Довгохвильовий
U	1625 - 1675	Ультра-довгохвильовий

Характеристики випромінювачів світла та фотоприймачів, які застосовуються в ВОЛЗ, оптимізуються саме для цих вікон прозорості.

При розповсюдженні світла по оптичним волокнам, так як і в будь-якому іншому середовищі, сигнал зазнає втрат. Принципово джерела втрат в волоконних світловодах можуть бути розділені на дві групи: поглинальні та випромінювальні.

Втрати на поглинання можна поділити на власні та зовнішні. Власні втрати можуть бути викликані взаємодією світлової хвилі, що поширюється, з єдиною чи великою кількістю компонентів матеріалу волокна (кварцу без врахування домішок).

В діапазоні довжин хвиль, що є цікавими для оптичного зв'язку (0,8-0,9 мкм та 1,2-1,5 мкм), ці втрати не виявляють серйозного впливу. Для сьогоднішніх ліній та

ліній зв’язку наступного покоління в ІЧ-діапазоні виявляється деякий вплив при довжині хвилі більшій ніж 1,5 мкм. На цієї довжині хвилі внесок ІЧ-поглинення менш ніж 0,05 дБ/км.

Зовнішні втрати це втрати на поглинання в склі, що обумовлені присутністю слідів різних металів та іона OH^- в якості домішок. Встановлене, що зовнішні поглинення викликані навіть невеликим слідом (мільйонною часткою в одиниці обсягу) домішок металевих іонів, наприклад міді, марганцю, заліза, ванадію та інших, а також наявністю води (в формі іону OH^-), розчинених в склі.

Рівень технології виробництва волокон з низькими втратами, заснований на реакціях з фазою випаровування. Це процес, що очищає основні матеріали, він створює волокно, в якому практичне відсутні ці домішки, за винятком води. Піки поглинення на іонах ОН можуть з'явитися приблизно на довжинах хвиль 0,72; 0,95; 1,38 мкм. Крім того, один чи більше піків комбінаційного поглинення можуть також зустрічатися на довжинах хвиль 0,88; 1,13; 1,24 мкм. Ці піки поглинення OH^- достатньо вузькі (в порівнянні з лініями поглинення в ІЧ - діапазоні), що забезпечує дуже низькі втрати в діапазонах довжин хвиль 1,3 мкм, 1,55 мкм, які викликають сьогодні особливу зацікавленість.

Втрати на випромінення. Якщо частина чи вся енергія, що направляється, виходить з волокна, то кажуть, що спостерігаються випромінювальні втрати. Найбільше джерело власних випромінювальних втрат в волокні викликано розсіянням Релея і породжується флуктуаціями густини і складу, малого масштабу (малого у порівнянні з довжиною хвилі світла, що поширюється). Ці флуктуації вморожені в кристалічну решітку скла при температурі плавлення скла під час плавлення і наступного охолодження. Неупорядності, які при цьому з’являються, призводять до поглинання, що змінюється при зміні довжини хвилі як довжина хвилі в мінус четвертому ступені. Таким чином, шляхом роботи системи на більш довгих хвилях, можна мінімізувати внесок розсіяння Релея в оптичному волокні. Теорія передбачає втрати розсіяння Релея порядку 0,15 дБ/км в плавленому SiO_2 (на довжині хвилі 1,55

мкм) - величину, яка легко може бути збільшена, якщо в SiO_2 внести домішки, що змінюють показник зломлення (GeO_2, P_2O_5, B_2O_5). Випромінювальні втрати можуть також викликатися власними та зовнішніми недосконалостями (деформаціями) волокна, як, наприклад, нерегулярностями на кордоні серцевина-оболонка, флуктуаціями діаметру, згинами волокна та інш.

Додаткові втрати потужності викликані багатьма причинами, серед яких найбільший вплив мають кабельні втрати, які виникають через місцеві локальні деформації оптичних волокон, що викликані накладанням захисних оболонок, механічними навантаженнями елементів оптичного кабелю при виробництві та експлуатації, тощо. При додержанні всіх вимог і правил при виробництві та прокладанні кабелю, кабельні втрати складають не більше ніж 20% від загального загасання. Додаткові кабельні втрати можуть з’явитися, якщо радіус вигину кабелю буде становити менше мінімально-допустимого. Мінімально допустимий радіус вигину вказується в специфікації на кожний тип оптичного кабелю.

1.3 Дисперсія світла в оптичному волокні

В оптичних волокнах досить великого діаметру (50 мкм) зі східчастою зміною показника заломлення (рис.1.2) діаметр волокна на порядок більший ніж довжина хвилі світлового променю. Через це у світловоді поширюється декілька світлових променів – мод у всіх трьох вікнах прозорості. В результаті цього світлові промені проходять зі входу на вихід різними шляхами, втрачаючи на це різний час. Одні промені, які ідуть по короткому шляху, приходять раніше, інші, які ідуть по довшому шляху, – пізніше. Це призводить до того, що прямокутний імпульс світла, яким передається інформація в цифрових системах (рис.1.5, а), розмивається і розширюється (рис.1.5, б). Це явище носить назву дисперсії.

Дисперсія визначається як квадратична різниця тривалості імпульсів на виході та вході оптичного волокна [2, 7, 10], яке має довжину L:

$$\varepsilon(L) = \sqrt{t_{\text{вих}}^2 - t_{\text{вх}}^2} \qquad (1.4)$$



а) б)

Рис. 1.5 Розширення прямокутного імпульсу, що викликане дисперсією
а) прямокутний імпульсна вході, б) спотворений імпульс на виході

Дисперсія звичайно нормується в розрахунку на 1 км довжини і вимірюється в пс/км.

Поява дисперсії викликана значною кількістю чинників. Класифікація видів дисперсії показана на рис 1.6.

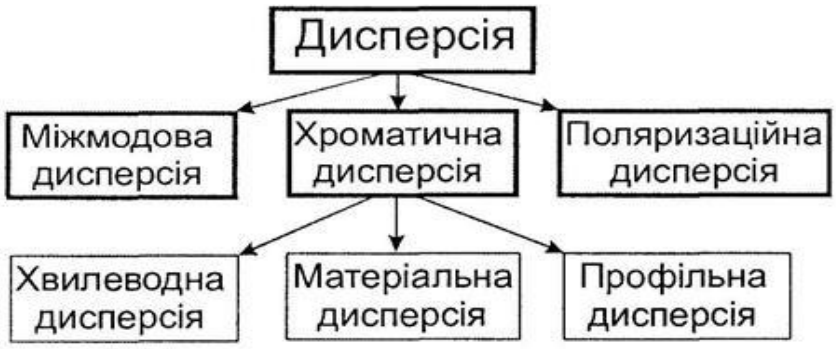


Рис. 1.6 Класифікація дисперсії в оптичному волокні

Міжмодова дисперсія виникає лише в оптичному волокні, в якому поширюється декілька мод (променів) (багатомодове волокно). Вона виникає через різницю шляхів, які проходять різні моди через оптичне волокно.

Для оптичного волокна із східчастим профілем показника заломлення міжмодову дисперсію $\varepsilon_{\text{мм}}$ можна визначити за наступною формулою

$$\varepsilon_{\text{мм}} = \frac{n_1 \Delta}{c} L, (\text{при } L < L_y) \qquad (1.5)$$

n_1 – коефіцієнт заломлення серцевини ОВ;

Δ – відносний коефіцієнт заломлення ОВ;

c – швидкість світла;

L – протяжність лінії;

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.6)$$

n_2 – коефіцієнт заломлення оболонки.

Формула (1.5) справедлива лише для ідеального оптичного волокна, в якому відсутній обмін енергією між модами. В реальних оптичних волокнах наявність неоднорідностей приводить до переходу енергії від одних мод до інших. Однак після визначеної довжини проходження світла в волокні наступає усталений зв'язок мод. Довжина шляху, після проходження якого наступає усталений режим зв'язку мод, носить назву довжини усталеного зв'язку мод L_y. При довжинах більших ніж L_y міжмодову дисперсію необхідно визначити за формулою:

$$\varepsilon_{\text{мм}} \times L = \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{L \times L_y}, (\text{при } L < L_y) \quad (1.7)$$

Хроматична (частотна) дисперсія складається з хвилеводної і матеріальної. Хроматична дисперсія присутня як в багатомодовому, так і в одномодовому волокнах, однак найбільш вона проявляється в одномодовому через відсутність в ньому міжмодової дисперсії.

Матеріальна дисперсія обумовлена спектральною залежністю коефіцієнта заломлення і визначається формулою:

$$\varepsilon_{\text{мат}} = \Delta\lambda \times L \times \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \times L \times M(\lambda) \quad (1.8)$$

$\Delta\lambda$ - розширення довжини хвилі через некогерентність джерела випромінювання;

$M(\lambda)$ - питома матеріальна дисперсія.

Хвилеводна дисперсія обумовлена спектральною залежністю коефіцієнту розповсюдження:

$$\varepsilon_{\text{х}} = \frac{\Delta\lambda L 2 n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda L N(\lambda) \quad (1.9)$$

$N(\lambda)$ - питома хвилеводна дисперсія.

Результуюче значення питомої хроматичної дисперсії $D(\lambda)$ визначається як сума питомих складових.

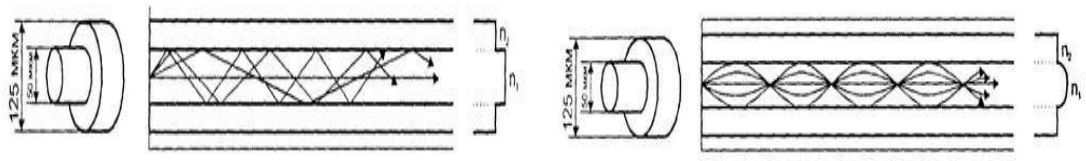
$$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda) \quad (1.10)$$

Питома дисперсія має розмірність пс/(нм×км).

Хвилеводна дисперсія завжди більше 0. Матеріальна дисперсія може бути як більше, так і менше 0. Підбираючи особливим чином профіль показника заломлення можна повністю, або частково компенсувати хвилеводну дисперсію за рахунок матеріалу і зробити хроматичну дисперсію або рівною, або близькою до нуля хоча б в якійсь смузі частот.

Поляризаційна дисперсія виникає в наслідок затримки ортогональне поляризованих світлових хвиль [12]. Поляризаційна дисперсія проявляє себе виключно в одномодових волокнах з нециркулярною серцевиною і за деяких умов може стати спільномірною з хроматичною дисперсією, але в більшості випадків вона має мале значення і в розрахунках часто не використовується.

Викривлення імпульсу через дисперсію приводить до зменшення його амплітуди та збільшення тривалості і може привести до викривлення інформації, збою синхронізації. А також приводить до зменшення пропускної здатності через зменшення полоси пропускання оптичного волокна. Історично, на перших порах, коли по ВОЛЗ передавалися порівняно невеликі потоки інформації, обмеження, які накладаються дисперсією, не брались до уваги і багатомодове волокно знаходило широке використання завдяки більшій простоті виготовлення та меншій вартості. Для зменшення дисперсії багатомодове волокно згодом стали виготовляти градієнтним, тобто зі змінним показником заломлення по радіусу. Стандартне багатомодове градієнтне волокно має діаметр серцевини 50 мкм і 62,5 мкм (50/125 мкм, або 62,5/125 мкм) і параболічний закон зміни коефіцієнта заломлення по радіусу. Поширення світлових променів по багатомодовому волокну зі східчастою і параболічною зміною показників заломлення ілюструється рис.1.7.



а) б)

Рис. 1.7 Розповсюдження світла в багатомодових оптичних волокнах
Східчаста (а) та параболічна (б) зміна показника заломлення

Градієнтне волокно має меншу дисперсію у порівнянні із східчастим. Стандартні багатомодові градієнтні волокна в наш час знаходять застосування в структурованих кабельних системах.

Якщо зменшувати діаметр серцевини, то коли діаметр буде приблизно дорівнювати довжині хвилі, то по оптичному волокну буде розповсюджуватись тільки один промінь (мода). Таке волокно має назву одномодове [13]. Діаметр серцевини одномодового волокна має розмір 8-10 мкм. Дисперсія одномодового оптичного волокна значно менше дисперсії багатомодового.

2 МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ В ОПТИЧНИХ ВОЛОКНАХ

2.1 Огляд методів компенсації дисперсії

Сучасні оптичні волокна мають достатньо мале загасання, завдяки чому є можливості передачі оптичного сигналу на великі відстані. Наявність дисперсії обмежує дальність або швидкість передачі, тому будь-які спроби зменшити, або компенсувати дисперсію є актуальними. Методи компенсації дисперсії можна поділити на дві групи: оптичні та електронні.

Оптичні методи в свою чергу складаються з наступних [6]:

- метод додавання компонентів з постійною від'ємною хроматичною дисперсією;
- метод компенсації дисперсії, заснований на властивостях волоконних брегівських ґрат;
- метод компенсації дисперсії за допомогою фазового фільтру.

Перше покоління оптичних методів компенсації дисперсії очолює класичний підхід компенсації хроматичної дисперсії. Він полягає в наступному: в систему передачі додають компоненти з постійною хроматичною дисперсією, так щоб компенсувати або навіть звести до нуля накопичену хроматичну дисперсію лінії передачі. Ця технологія дозволяє значно збільшити довжину лінії передачі зі швидкостями до 10 Гбіт/с. Але успіх методу статичної компенсації залежить від того, наскільки добре постійна дисперсія волокна, яке компенсує, або інші компоненти узгоджуються з дисперсією лінії передачі.

Брегівські ґратки та фазові фільтри також достатньо широко впроваджені в системи волоконно-оптичного зв'язку, хоча вони мають діапазонні характеристики, тому їх застосування має певні обмеження.

Логічним розвитком методів компенсації стало застосування електронних методів компенсації викривлень, що обумовлені дисперсією. Застосування компонентів, дисперсія яких може налаштовуватися як за величиною, так і за

довжиною хвилі, допускає можливість динамічної компенсації дисперсії. Налаштування дисперсії та її динамічна компенсація мають різні значення. Для динамічної компенсації необхідний зворотній зв’язок, в якому виміряне значення дисперсії використовується при створенні управляючого сигналу для пристрою компенсації дисперсії. Переналагодження дисперсії може здійснюватися і без оберненого зв’язку або вручну на місці, або дистанційно із центру управління.

Наразі дуже перспективними є застосування форматів модуляції, які є стійкими до дисперсійних викривлень. Це формати, які суттєво використовують модуляцію частоти оптичного випромінювання.

Наразі в оптичних системах передачі почало застосовуватися попереднє викривлення сигналу, таке, яке є зворотним до викривлення завдяки дисперсії.

2.2 Оптичні методи компенсації дисперсії

2.2.1 Компенсація волокнами з від’ємною хроматичною дисперсією

Волокно для компенсації дисперсії є основним компонентом при статичному пригніченні хроматичної дисперсії. Його негативна хроматична дисперсія в кілька разів перевищує позитивну хроматичну дисперсію одномодового волокна. В цьому методі використовується волокно типу DCF, що має від’ємну дисперсію на довжині хвилі 1550 нм. DCF являє собою відрізок оптичного волокна зі складним профілем показника заломлення. Вірний вибір профілю дозволяє отримати потрібні дисперсійні властивості та якомога менше загасання. Волокно DCF в порівнянні з іншими видами компенсаторів дисперсії має наступні переваги:

- легке поєднання з волокном лінійного тракту;
- просту конструкцію;
- високу надійність;
- достатню стійкість до кліматичних впливів;
- велику ширину робочої смуги довжин хвиль.

Остання перевага дозволяє використовувати DCF у системах з WDM. Але в цьому випадку необхідний контроль нелінійних явищ, що можуть виникати в DCF за рахунок високої щільності потужності. Нелінійні явища виникають у DCF внаслідок малого діаметру серцевини волокна, що компенсує дисперсію, та високої світлової потужності, спричиненої мультиплексуванням окремих незалежних оптичних потоків в загальний потік.

Оскільки хроматична дисперсія систематично накопичується зі збільшенням довжини волокна з коефіцієнтом пропорційності $D(\lambda_s)$, де λ_s – центральна довжина хвилі джерела випромінювання, то її можна компенсувати приєднанням сегменту волокна, що компенсує дисперсію і має питому хроматичну дисперсію $D_{\text{DSF}}(\lambda_s)$ [пс/(нм·км)], протилежну за знаком до величини $D(\lambda_s)$ в SF-волокні. Дисперсія DCF, яка компенсує, складає величину:

$$\sigma_{кд}(\lambda_s) = D_{\text{DCF}}(\lambda_s) \cdot L_{\text{DCF}}, \text{ пс/нм.} \qquad (2.1)$$

Середньоквадратичне розширення імпульсу після проходження ним довжини L SF-волокна та довжини L_{DSF} волокна, яке компенсує дисперсію, ($L_{\text{DSF}} << L$) має значення

$$\sigma_{кд}(\lambda_s) = \sigma_s(L \cdot D(\lambda_s) + \sigma_{кд}(\lambda_s)), \text{ пс.} \qquad (2.2)$$

При поширенні по SF-волокну мультиплексного WDM сигналу у вікні прозорості 1,55 мкм підбирається профіль показника заломлення DCF в поперечному перерізі волокна, матеріал серцевини і оболонки та радіус серцевини таким чином, щоб забезпечити рівномірну компенсацію накопиченої SF-волокном дисперсії в усьому діапазоні довжин хвиль 1530 нм$< \lambda <$1560 нм. При цьому величина D_{DCF} та кут нахилу кривої $D_{\text{DCF}}(\lambda)$ не є довільними, а задовольняють певному співвідношенню у вікні прозорості 1,55 мкм. На рис. 2.1 показано спектральну залежність питомої хроматичної дисперсії для SF-волокна (крива 1) та волокон, що компенсують дисперсію при роботі SF-волокна відповідно з одним каналом передачі (крива 2) та з

WDM-сигналом (крива 3). Для DCF вказані відповідні профілі показника заломлення (згідно розробкам фірми Sumitomo).

Для систем передачі з хвильовим мультиплексуванням необхідно також компенсувати і різні нахили дисперсійних характеристик для різних довжин хвиль передачі. Нахили в основному волокні і волокні, що компенсує, не збігаються точно, тому і не відбувається ідеальної компенсації дисперсії. Це показане на рис. 2.2. У підсумку, накопичена дисперсія системи передачі змінюється з довжиною хвилі.

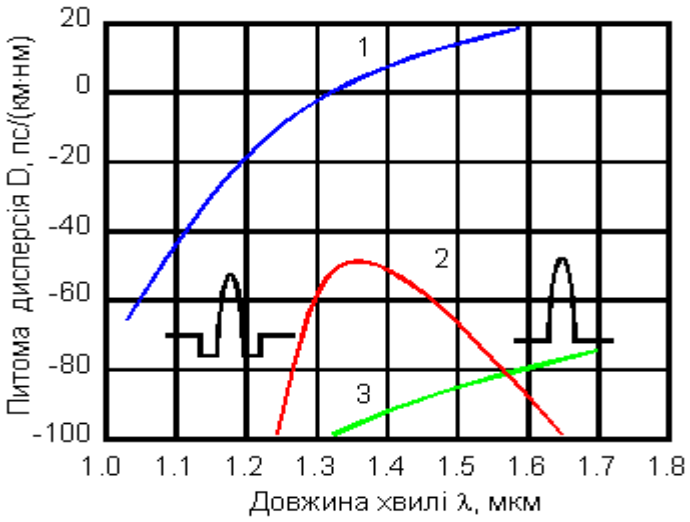


Рис. 2.1 Залежність хроматичної дисперсії від довжини хвилі: стандартне одномодове волокна (1); DCF волокна та профілі їх показника заломлення (2, 3)

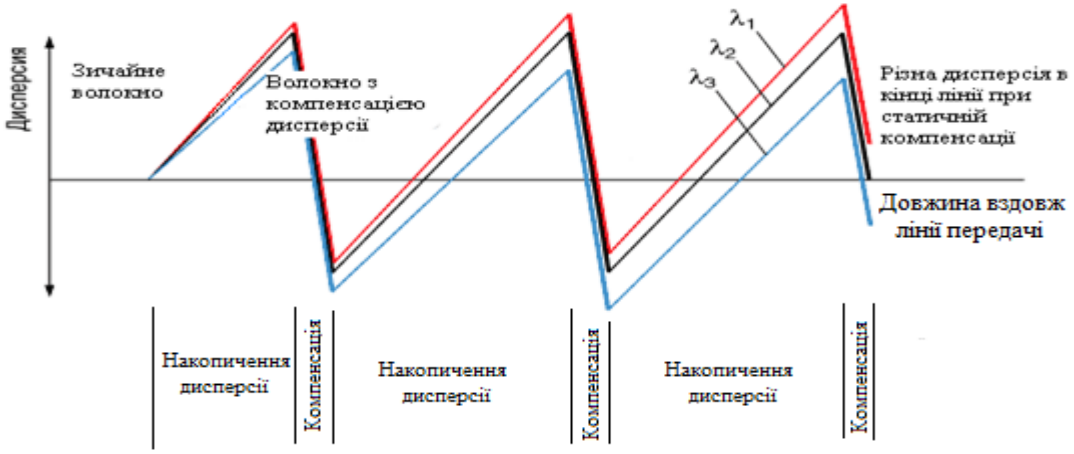


Рис. 2.2 Накопичення та компенсація хроматичної дисперсії в різних хвилевих каналах при статичної компенсації

Головним у використанні даного методу компенсації дисперсії є підбір певних домішок до серцевини та оболонки DCF волокна, яке оптимально компенсує дисперсію лінійного волокна.

2.2.2 Компенсація дисперсії за допомогою волоконних брегівських ґрат

Одна з найбільш розвинутих методик компенсації дисперсії з можливістю пере налаштування, заснована на властивостях волоконних брегівських ґрат [6, 7], які були розроблені раніше для статичної компенсації дисперсії.

В самому звичайному випадку брегівська ґрата утворюється шляхом періодичної зміни показника заломлення в серцевині одномодового оптичного волокна (рис. 2.3). Цей тип однорідних волоконних ґраток, де фазові фронти перпендикулярні повздовжній осі волокна і площини ґраток мають постійний період, вважаються основними будівельними блоками при побудові більшості Брегівських ґратчастих структур.

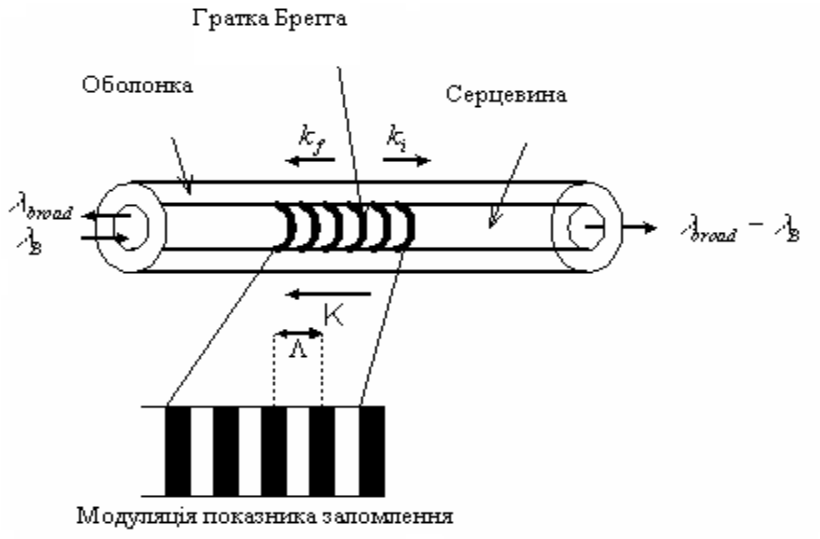


Рис. 2.3 Однорідна брегівська ґрата з постійними періодом і амплітудою зміни показника заломлення

Світло, що пропускається через серцевину оптичного волокна, розсіюється кожною площиною ґратки. Якщо умови Брегга не задовольняються, то послідовно

відбите від площин світло виходить з фази і, в кінці кінців, нейтралізується (гаситься). До того ж світло, що не погоджується з умовою резонансу, зазнає дуже слабке відбиття на кожної з площин ґратки через невідповідність показника заломлення – це відбиття накопичується по всій довжині ґратки. Наприклад, ґрата довжиною 1 мм на довжині хвилі 1,5 мкм з зміною показника заломлення $\Delta n=10^{-3}$ відбиває приблизне 0,05 % від нерезонансного падаючого світла. Там, де умови Брегга задовольняються, вклади відбитого світла від кожної площини ґратки складаються в оберненому напрямку і формують відбитий максимум з центральною довжиною хвилі, що визначається параметрами ґратки. Це аналогічно об'ємної голограмі або кристалічної ґрати, на якої здійснюється дифракція рентгенівських променів.

Умова Брегга для ґратки – це вимога збереження енергії та імпульсу. Закон збереження енергії ($\hbar\omega_f = \hbar\omega_2$) потребує, щоб частота падаючого світла дорівнювала частоті відбитого. Закон збереження імпульсу потребує, щоб падаючий хвильовий вектор, k_i в сумі з хвилеводним вектором ґрати, *K*, давав хвилевий вектор розсіяного випромінювання k_j. Це формулюється виразом:

$$k_i + K = k_j \tag{2.3}$$

де хвилеводний вектор ґратки *K* має напрямок, який є перпендикулярним до площини грати і має значення $2\pi/\Lambda$ (Λ – це період ґратки, зображений на рис. 2.3).

Хвилевий вектор хвилі, яка зазнала дифракцію, рівний за величиною, але протилежний за напрямком до падаючого вектору. Отже, закон збереження імпульсу приймає вигляд:

$$2(\frac{\pi n_{eff}}{\lambda_B}) = \frac{2\pi}{\Lambda}\ , \tag{2.4}$$

що спрощує умову Брегга першого порядку:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda\,, \tag{2.5}$$

де брегівська довжина хвилі ґратки (λ_B) є центральною довжиною хвилі світла, відбитого назад від ґратки Брегга, а n_{eff} - ефективний показник заломлення серцевини

волокна для центральної довжини хвилі.

Поряд з розробкою нових типів оптичних волокон удосконалюються методи компенсації дисперсії. Волоконна ґрата Брегга є універсальним пристроєм, що може бути використаний для компенсації дисперсії. Такий пристрій показано на рис. 2.4.

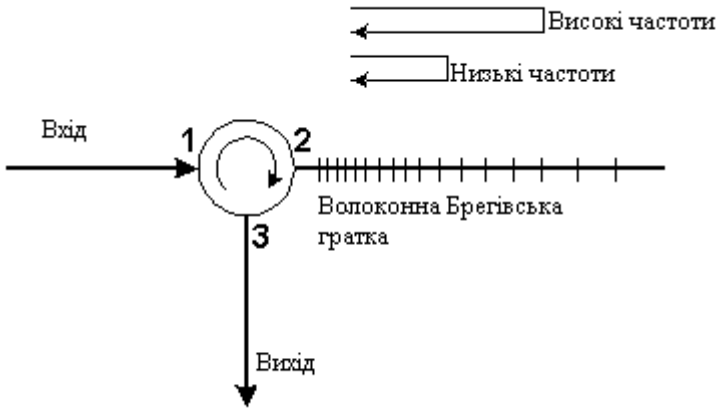


Рис. 2.4 Брегівська ґрата, що призначена для компенсації дисперсії

Ця ґратка є ґраткою із сталою, що лінійно змінюється. Це дозволяє їй відбивати різні довжини (або частоти) хвиль в різних точках. Така ґрата вносить різні затримки для різних довжин хвиль. Фазовий зсув в компенсаторах на волоконних ґратах залежить від модуляції інтервалів між зонами з підвищеним показником заломлення в ґратах. Якщо ці інтервали зростають вздовж волоконних ґрат, то довгохвильова частина сигналу проникне глибше в ґрати, перш ніж цілком відіб'ється. Це призводить до затримки довгохвильових складових відносно коротких. Якщо відстань між короткохвильовою і довгохвильовою частинами ґрат складає 1 мм, то довгі довжини хвиль будуть затримані приблизно на 10 пс.

Фазовий зсув, що викликається волоконною ґраткою, можна налаштовувати змінюючи інтервали між зонами з підвищеним показником заломлення, змінюючи показник заломлення самого волокна і впливаючи на обидва ці фактори одночасно. Діючи окремо, чи одночасно, ми змінюємо положення точки відбиття для певної

довжини хвилі у волокні. Необхідні зміни можна отримати як нагріванням, так і механічним розтягненням волокна.

Додаткова складність полягає в тому, що лінійний вплив уздовж грати не забезпечує різноманітний фазовий зсув, необхідний для корекції хроматичної дисперсії. Цей вплив має бути нелінійним за довжиною решітки. Необхідну неоднорідність (не лінійність) можна отримати або одразу використовуючи волоконну ґратку з нелінійними інтервалами, або додаючи до неї неоднорідні напруги. Звичайно механічні напруги однорідні вздовж волокна в силу його повздовжньої геометричної однорідності. Однак можна створити необхідний температурний профіль вздовж ґратки, регулюючи температуру джерел тепла.

В звичайної ґратці хроматична дисперсія вносить великі затримки для низькочастотних компонент імпульсу. Для того, щоб компенсувати цей ефект, можна сконструювати ґратку, яка буде виконувати протилежні дії, вносити більші затримки для високочастотних компонент, стискати імпульси.

В ідеалі бажано отримати ґратку, яка вносить велику дисперсію для широкого діапазону довжин хвиль, щоб вона могла компенсувати дисперсію волокна великої довжини або у широкому діапазоні хвиль. Практично, загальна довжина ґратки обмежується розміром фазової маски (сьогодні це близько 10 см). Таким чином, максимальна затримка, що може бути отримана за допомогою ґратки, складає 1 нс. Ця дисперсія відповідає додатку дисперсії, що вноситься ґраткою і довжиною хвилі, на якій вона виникає. Таким чином можна отримати ґратки, котрі вносять велику дисперсію для малих діапазонів хвиль, 1000 пс/нм в діапазоні 1 нм, або малу дисперсію в великих довжинах хвиль, наприклад, 100 пс/нм в діапазоні 10 нм. Відмітимо, що 100 км стандартного волокна вносять велику дисперсію 1700 пс/нм. Тому на практиці для того щоб використовувати ґратки із сталою, що лінійно змінюється, для волокна довжиною декілька сотень кілометрів, вони повинні бути дуже вузько діапазонними; іншими словами, потрібно використовувати різні ґратки для різних довжин хвиль, як зображено на рис. 2.5.

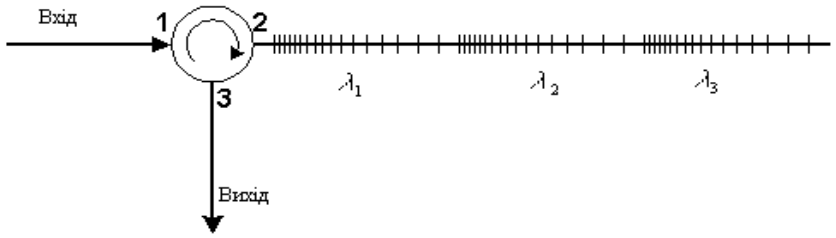


Рис. 2.5 Ґрата для компенсації дисперсії на 3-х довжинах хвиль в WDM системах

Тому ґратки із сталою, що змінюється лінійно, підходять для компенсації окремих довжин хвиль. В той час як волокно, що компенсує дисперсію, краще підходить для компенсації широкого діапазону довжин хвиль.

Всі волоконні ґратки мають однин недолік, що важко усунути – область їх впливу обмежена вузьким діапазоном довжин хвиль. В даний час цей діапазон охоплює від 1 до 8 оптичних каналів DWDM. Можливість налаштування окремих каналів дозволяє отримати кращу корекцію, але значне збільшує кількість компонентів і вартість системи передачі.

2.3 Електронні методи компенсації дисперсії

Електронною компенсацією дисперсії (EDC) називається технологія, призначена для збільшення дальності передачі в оптичних мережах порівняно з передачею без компенсації за рахунок обробки сигналу електронними методами [8, 15]. Принципи роботи систем EDC показані на рис. 2.6. Це корекція дисперсії в передавачі (Tx-based EDC) і в приймачі (Rx-based EDC). Корекція дисперсії в приймачі заснована на використанні сучасних методів обробки сигналу на рівні приймального пристрою для успішного декодування перекручених дисперсією сигналів. Три найбільш поширених методи корекції дисперсії в приймачі - це компенсація з вирішуючим зворотним зв'язком (decision feedback equalisation, DFE), компенсацією з прямою залежністю (feed forward equalisation, FFE) і з оцінкою послідовності по максимальній правдоподібності (maximum likelihood sequence

estimation, MLSE). Дослідження, проведені компанією Corning, показали, що корекція дисперсії в приймачі з використанням методу MLSE здатна збільшити дальність передачі до 60% при традиційній модуляції без повернення до нуля (NRZ) і додатково на 10-15% завдяки дуобінарній модуляції [16].

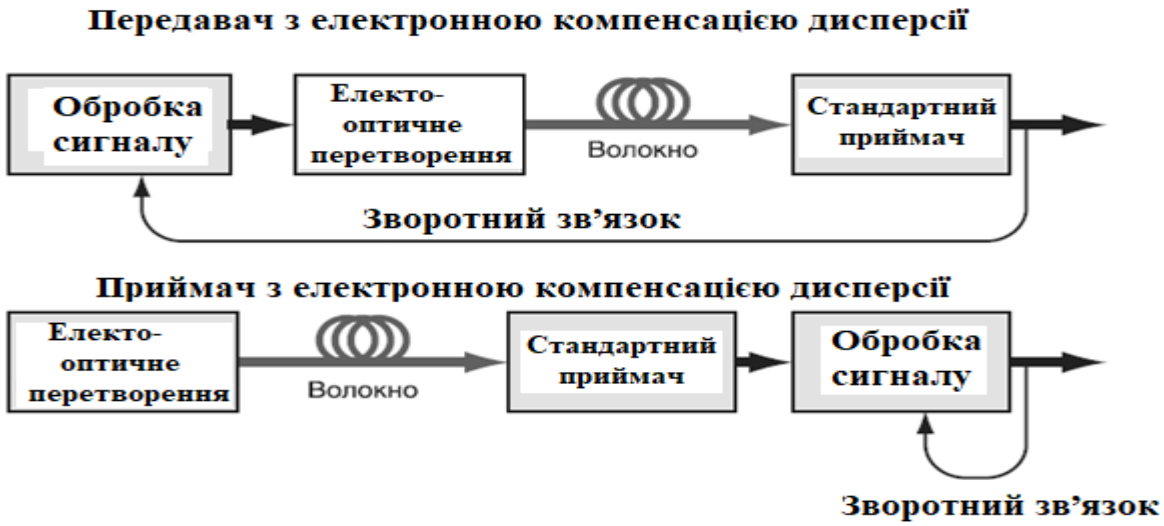


Рис. 2.6 Порівняння схем компенсації дисперсії в передавачі та приймачі

Існує два основних електронних способів боротьби з дисперсією на стороні передавача:

– використання форматів модуляції, стійких до впливу дисперсії [17]. Це дозволяє збільшити протяжність лінії зв'язку без додаткових компенсаторів дисперсії. Для порівняння на рис. 2.7,а показані енергетичні штрафи для двох ВОЛЗ: в одній з них застосовується звичайний NRZ-формат (пунктирна крива), в іншій - формат, стійкий до дії дисперсії (суцільна крива);

– штучне попереднє викривлення форми переданого сигналу таким чином, щоб на стороні приймача внесені попередні викривлення і дисперсія волокна взаємно компенсувалися [8]. На рис. 2.7,б суцільна лінія описує енергетичний штраф у ВОЛЗ з попереднім викривленням сигналу на передавачі. На виході трансмітера цей штраф такий, яким він був би на приймачі в відсутності

попереднього викривлення, зате на приймачі він дорівнює нулю. Пунктирна лінія показує енергетичний штраф в лінії без попеднього викривлення сигналу.

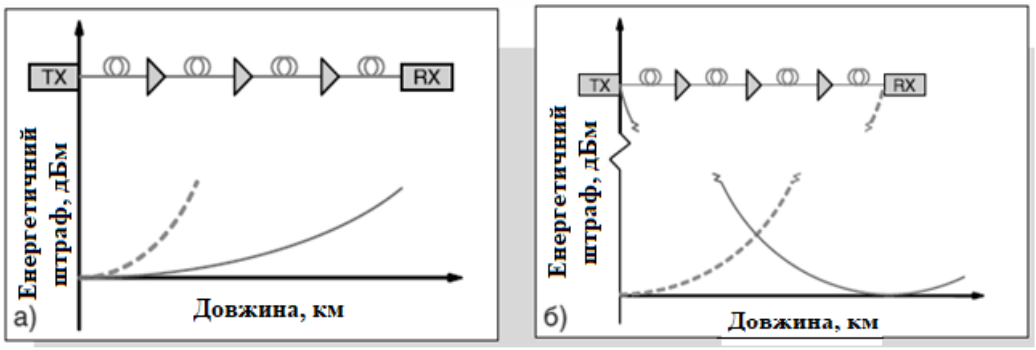


Рис. 2.7 Електронні способи боротьби з дисперсією на стороні передавача

Попередні компенсації шляхом штучного спотворення форми сигналу. Штучне попереднє викривлення форми сигналу широко застосовується в радіо і супутниковому зв'язку для компенсації детермінованих канальних спотворень, у тому числі нелінійних. Уявімо собі, що відразу за стандартним передавачем, але перед лінією зв'язку розташували послідовно всі компенсуючі хроматичну дисперсію модулі, які в стандартній системі зв'язку рівномірно розподілені вздовж лінії. Нещодавно такий метод став застосовуватися і в ВОЛЗ. Якщо лінія довга (1000 або більше км), то кожен бітовий імпульс стане настільки широким, що перекриває кілька своїх сусідів. В такому випадку цілком однозначно може бути розрахований спотворений сигнал. Після проходження компенсаторів хроматичної дисперсії в лінії зв'язку дисперсія буде компенсована, і на приймальній стороні формується послідовність вірних (неспотворених) світлових імпульсів. Аналогічний спотворений сигнал можна відразу сформувати на модуляторі передавача.

Схема попередньої компенсації працює наступним чином. Процесор перетворює сигнал на виході передавача в дві числові послідовності, що представляють реальну і уявну частини попередніх викривлень сигналу. Далі кожна з послідовностей надходить у відповідний цифро-аналоговий перетворювач (D/A), який формує керуючий модулятором аналоговий електричний сигнал потрібної форми.

Електронна після компенсація дисперсії полягає в наступному [18]: оптичний сигнал перетворюється в електричний на фотодетекторі і підсилюється так само, як при звичайному прийомі. Але між пристроєм прийняття рішень електричний сигнал піддається деякої обробці, яка покращує роботу системи.

Така обробка може здійснюватися аналоговими або цифровими пристроями. До цифрових пристроїв відноситься адаптивний фільтр, що включається в лінію після приймача (або є частиною приймача). В якості такого фільтра найчастіше використовуються випереджаючі еквалайзери (FFE - Feed Forward Equalizer) або/та еквалайзери з вирішальною зворотним зв'язком (DFE - Decision Feedback Equalizer), що складаються з декількох ліній затримки (чим їх більше, тим краще компенсація) з різними коефіцієнтами розгалуження [19].

FFE звичайно являє собою КІХ-фільтр, а DFE - НІХ-фільтр. FFE-фільтри більш стабільні, але DFE-фільтри здатні відновити більш спотворені сигнали. КІХ-фільтр – це фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою, а НІХ-фільтр – фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою.

Для компенсації дисперсії коефіцієнти прямого і зворотного зв'язку контролюються за допомогою спеціальних адаптивних алгоритмів, які є похідними від алгоритму мінімальної середньоквадратичної помилки (MSE - Mean Square Error). Він полягає в мінімізації MSE між отриманим y_n і початковим a_n сигналами:

$$MSE = E\{(y_n - a_n)^2\} \tag{2.6}$$

Оптимальним приймачем, що здатний адаптивне компенсувати дисперсію і нелінійні ефекти, може служити приймач з процесором, що працює за принципом Вітербі обчислення максимально наближеної послідовності (MLSE - Maximum Likelihood System Estimation). При передачі N біт MLSE-процесор серед 2N послідовностей шукає ту, яка має мінімальну MSE [15].

2.4 Стійкі до дисперсійних перекручень формати модуляції

2.4.1 Огляд форматів модуляції

У оптичному зв'язку формат модуляції — це метод кодування цифрової інформації (0 і 1) шляхом маніпулювання параметрами світла, такими як його амплітуда або фаза. Найпоширеніші формати це ASK (зміна амплітуди) та PSK/QAM (зміна фази/квадратурна модуляція), що дозволяє передавати величезні обсяги даних на високих швидкостях.

Формат модуляції може істотно впливати на стійкість потоку до спотворень, викликаними нелінійними властивостями системи передачі та хроматичною дисперсією [17]. Традиційні системи кодування даних в оптичних мережах, такі як код без повернення до нуля (NRZ) і код з поверненням до нуля (RZ) використовують сигнал з двома рівнями амплітуди, які відповідають логічним одиниці та нулю. Розроблені два нових формати, названі дуобінарною модуляцією і модуляцією з змінною інверсією блоків (ABI), які відрізняються високим ступенем стійкості до дисперсійних спотворень імпульсів в порівнянні з традиційними схемами модуляції типу NRZ. За рахунок введення альтернативних фазових станів в якості третього рівня при кодуванні сигналу дуобінарна модуляція і ABI знижують міжсимвольні завади і забезпечують підвищення стійкості до дії дисперсії.

Дуобінарна модуляція - більш зріла технологія в порівнянні з ABI, а випущені серійно ретранслятори з дуобінарною модуляцією без компенсації забезпечують для оптичних волокон стандарту G.652 типове значення дальності передачі 80 км на довжині хвилі 1550 нм, причому дальність може бути збільшена майже до 200 км для швидкості передачі 10 Гбіт/с [16, 17].

Дослідження в області нових форматів модуляції стимулюються пошуком шляхів збільшення швидкості і зниження вартості одиниці переданої інформації. Економічність DWDM-систем зв'язку з великою сумарною швидкістю передачі даних B_{Σ} в значній мірі залежить від ефективності використання робочого спектра для передачі інформації - спектральної ефективності γ. При використанні NRZ-кодування

максимальне практично досяжне значення γ не перевищує 0,4 [20], тому вагома причина для дослідження альтернативних форматів модуляції - збільшення спектральної ефективності DWDM-систем зв'язку.

Збільшити спектральну ефективність можна двома шляхами: зменшити відстань між каналами або збільшити канальну швидкість B. Другий шлях економічно більш перспективний, оскільки збільшення B призводить до зниження вартості одиниці переданої інформації. За оцінками збільшення канальної швидкості в чотири рази забезпечує зниження вартості одиниці переданої інформації приблизно в 2,5 рази, так як при фіксованому значенні γ збільшує відстань між каналами, зменшує вимоги до стабільності довжини хвилі випромінювання лазерів і спектральних характеристик мультиплексорів.

Однак поряд із зазначеними перевагами збільшення швидкості передачі інформації супроводжується зростанням спотворень цифрових сигналів в лінії зв'язку. Спотворення, що викликані хроматичної дисперсією, зростають пропорційно квадрату канальної бітової швидкості (B^2), спотворення викликані впливом поляризаційної модової дисперсії (ПМД) в першому наближенні пропорційні першому ступеню канальної бітової швидкості (B). Потужність шумів також пропорційна бітової швидкості. Тому в міру збільшення швидкості передачі зростає інтерес до форматів, менш чутливих до дисперсії і нелінійних спотворень.

Таким чином, можна визначити два головних завдання, які передбачається вирішити з використанням нових форматів:

забезпечити більш ефективне використання спектральних каналів у системах щільного хвильового мультиплексування (DWDM);

знизити чутливість інформаційних сигналів до спотворень, що викликані дисперсією або нелінійністю [20-26].

Практичне застосування знайшли формати, в яких для кодування інформації застосовується амплітудна модуляція (ASK, Amplitude Shift Keying), і формати, що використовують для цієї мети фазову модуляцію (PSK, Phase Shift Keying). Ряд

форматів, які використовують амплітудну модуляцію, містить деяку фазову модуляцію, яка не несе ніякої інформації. Аналогічно оптичні сигнали в форматах, які застосовують фазову модуляцію, мають також і амплітудну модуляцію, що не несе самостійної інформації.

Наразі розроблені багаторівневі формати, в яких інформація кодується як амплітудою (інтенсивністю), так і фазою світлової хвилі. Модуляція, що використовується в форматах такого типу, іноді називається квадратурної модуляцією, а для позначення самих форматів використовується абревіатура ASK-PSK. Розпочато також дослідження форматів, в яких інформація кодується модуляцією частоти (FSK, Frequency Shift Keying).

Серед амплітудних форматів найбільш відомими є бінарні формати, які мають два інформаційних значення потужності, які відповідають станам включення і виключення передавача. По-цьому такі формати часто позначають абревіатурою OOK (On / Off Keying).

В оптичних системах зв'язку все фазові формати модуляції використовують диференціальні фазові методи, так як в оптичному діапазоні практично недоцільно виділяти абсолютне значення фази несучої світлової хвилі прийнятого сигналу. Тому інформація закладається в відносний зсув фази несучих двох послідовних імпульсів. Цей фазовий зсув повинен бути перетворений в амплітудну модуляцію з використанням оптичних ліній затримки і інтерференції. Тому правильне позначення для цих форматів - DPSK (Differential Phase Shift Keying). Перша буква в абревіатурі DPSK іноді опускається. Теоретично волоконно-оптичні системи можна розглядати як смугові системи, до яких застосовна розроблена для радіозв'язку теорія модуляції.

2.4.2 Амплітудні формати модуляції

При амплітудної модуляції в системах оптичного зв'язку здійснюється зміна потужності оптичного випромінювання передавача. Бінарний амплітудний формат - першій формат, що використовувався в оптичному зв'язку, так як його можна

отримати шляхом прямої модуляції струмом накачування. Завдяки простоті і економічності технічної реалізації бінарний ASK є найпоширенішим форматом і в даний час. Пряма модуляція можлива в передавачах як на основі світло випромінюючих діодів, так і на основі напівпровідникових лазерів будь-якого типу.

Формати NRZ, RZ і покращений RZ. Найбільш популярним з амплітудних форматів залишається формат без повернення до нуля (NRZ, Non Return to Zero, рис. 2.8). У цьому форматі сигнал, що відповідає логічній одиниці, формується оптичним імпульсом, тривалість якого τ дорівнює періоду проходження символів $\tau = T = 1/B$ (B - швидкість передачі). Нулю відповідає відсутність оптичного сигналу або сигнал меншого рівня.



Рис. 2.8 Часові залежності потужності і фази, оптичний спектр, око-діаграма та схема формування NRZ-сигналу

У форматі з “поверненням до нуля” (RZ, Return to Zero, рис. 2.9) будь-який символ “1” являє собою імпульс, тривалість якого T може варіюватися, але завжди $\tau < T$ (наприклад, $\tau = T/2$). Щоб його сформувати, зазвичай з імпульсу NRZ за допомогою модулятора Маха - Цандера вирізається деяка його частина.



Рис. 2.9 Часові залежності потужності і фази, оптичний спектр, око-діаграма та схема формування RZ-сигналу

У 10 Гбіт/с мережах формат RZ набув широкого поширення через його більш високої стійкості до нелінійності волокна. Цю особливість можна пояснити тим фактом, що, коли імпульс ізольований (на відміну від NRZ), кожен символ “1” не залежить від своїх сусідів. У NRZ, послідовності символів “1” породжують безперервні пакети світлових сигналів, нестабільних при нелінійному поширенні. Крім “стійкості” до нелінійних спотворень при поширенні, у сигналів RZ є додаткова перевага - вони більш стійкі до ПМД, ніж NRZ-сигнали.

Формати CSRZ та APRZ. Чірпованний (містить частотну модуляцію) RZ (CRZ, Chirped RZ) є одним з найуспішніших форматів. Він формується при проходженні RZ-сигналу через фазовий модулятор, на який подається періодичний сигнал на частоті проходження інформаційних сигналів B [26].

Сигнал у форматі CRZ має спектр ширшій, ніж у RZ-сигналу, що обмежує максимально досяжну спектральну ефективність і, таким чином, пропускну здатність. Однак цей формат набув поширення в 10 Гбіт/с підводних системах, тому що він значно стійкіший до нелінійних ефектів.

Формат RZ з пригніченою несучої (CSRZ, Carrier Suppressed RZ) використовувався в континентальних лініях зв'язку зі швидкістю 40 Гбіт/с по одному каналу [27]. У цьому форматі додатковий зсув фази на π розділяє послідовні бітові такти шляхом додаткової фазової модуляції на частоті, яка дорівнює половині частоти проходження імпульсів. Однак формат CSRZ не дуже ефективний проти внутрішньо канальних нелінійних ефектів.

VSB-фільтрування. У ряді форматів, які використовуються в WDM-системах, застосовується усічення оптичного спектру каналу шляхом дуже вузько смугової фільтрації. Використання фільтрів дає можливість отримати сигнали з однією бічною смугою (SSB, Single Side Band) або частково пригніченою бічною смугою (VSB, Vestigial Side Band). Спектральна ефективність форматів SSB і VSB підвищується за рахунок усунення надлишкової інформації, притаманної NRZ і RZ-форматам.

Сигнал з частково пригніченою бічною смугою, отриманий вузьким оптичним фільтруванням поза центром спектра, виявився ефективним для WDM-систем [27]. Однак максимально досяжна відстань передачі обмежується тим, що пригнічена частина спектра каналу має тенденцію відновлюватися через вплив нелінійності, особливо в системах із швидкістю передачі 10 Гбіт/с. Це передбачає використання VSB-фільтрування тільки на стороні приймача.

Багаторівневе амплітудне кодування (M-ary ASK, рис. 2.10) [28]. У цьому форматі *N* біт сигналу перетворюються в багаторівневий сигнал (символ) з кількістю рівнів M, що відрізняються амплітудою, причому $M = 2^N$, а повний сигнал складається з цих символів і перетворюється в слово, що записане бінарним кодом. Кожен символ несе в собі $N = log_2 M$ біт інформації.

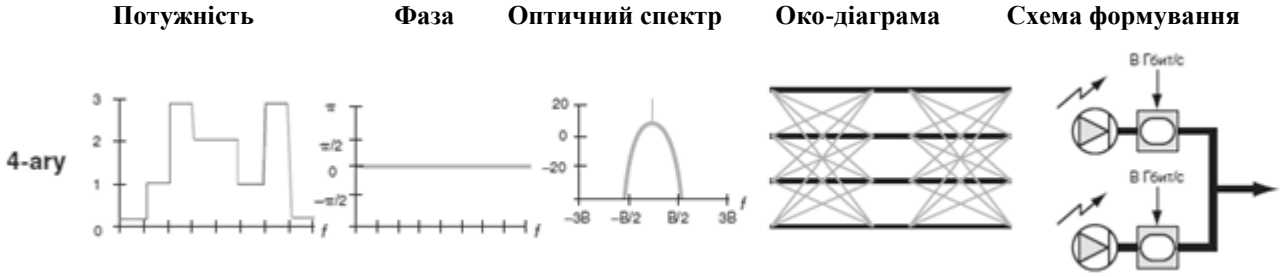


Рис. 2.10 Часові залежності потужності і фази, оптичний спектр, око-діаграма та схема формування 4-ary сигналу

Таким чином, замість передачі оптичних сигналів одиничної амплітуди з періодом *T=1/B* (характерно для бінарних форматів) можна передавати сигнали, які приймають M значень, з інтервалом $T_N = N/B = (log_2 M)/B$, зберігаючи швидкість передачі інформації.

Так як тривалість імпульсу збільшилася від $T = 1/B$ до $T_N = N/B$, спектр (точніше, відстань між першими нулями в спектрі) переданого (прямокутного) імпульсу зменшився від $2B$ до $2B/N = 2D/log_2 M$. У таблиці 4.1 проілюстровані ці зміни. Випадок $M = 2$ відповідає бінарним NRZ-формату, ширина смуги якого становить $2B$.

Таблиця 2.1

Ширина смуги пропускання M-ary ASK

Кількість рівнів (M)	Спектральна ширина сигналу
2	2 B
4	B
8	2/3 B
16	1/2 B
32	2/5 B
64	1/3 B

Формування багаторівневих сигналів здійснюється за допомогою лінійних схем, що містять атенюатори і змішувачі. Чотирьох рівневий сигнал дозволить в 2 рази збільшити спектральну ефективність γ. При цьому або збільшити в 2 рази швидкість передачі, зберігши незмінною ширину спектра сигналу, або зменшити в 2 рази цей спектр, зберігши швидкість передачі. У першому випадку в DWDM-системі можна зберегти кількість каналів, збільшивши швидкість передачі по кожному з них, у другому випадку, зберігши B незмінною, можна збільшити кількість каналів і дальність передачі без використання компенсації хроматичної дисперсії.

2.4.3 Фазові та частотні формати модуляції

DPSK-формати. Модуляція абсолютного значення фази в оптичних системах виявилася скрутної, тому практичний інтерес представляють формати на основі диференціальної фазової модуляції (DPSK). В DPSK інформація міститься в різниці фаз між двома послідовними імпульсами, при цьому потужність випромінювання інформації не несе. Схема формування сигналу за допомогою фазового модулятора використовує модулятор Маха - Цандера, який налаштований таким чином, що рівні інтенсивності символів «1» і «0» ідентичні.

Оскільки інформація міститься в зміні фази від символу до символу, то сигнал, що керує фазовим модулятором, необхідно спочатку перетворити, використовуючи диференціальне кодування.

Експериментальні дослідження показали, що при швидкості передачі 40 Гбіт/с DPSK-сигнали вдавалося передати на великі відстані з меншими втратами, ніж сигнали в інших форматах. Однак у цьому випадку необхідні дорогі термінали, тому досі не відомо, чи будуть системи зв'язку з DPSK-форматами вигідніше систем, що використовують ASK-формати. Щоб отримати позитивну відповідь на це питання, необхідно подальше дослідження і поліпшення DPSK-формату.

Подвійний фазо-модульований бінарний формат. Подвійна бінарна передача (DBT - DuoBinary Transmission) - передача сигналів з використанням трьох рівневої схеми кодування [29]. Одна з її різновидів - подвійна фазо-модульована передача (PSBT - Phase Shaped Binary Transmission) - особливо цікава для DWDM-систем. Формат PSBT розроблений з метою зменшення ширини спектру сигналу.

Формат в 3 рази більш стійкий до хроматичної дисперсії, ніж NRZ або чистий подвійний бінарний. Зсув фази на π в PSBT також допомагає знижувати шкідливий вплив внутріканальних нелінійних ефектів на швидкості 40 Гбіт/с. Використання цього формату забезпечує поліпшення чутливості фотоприймача і водночас не веде до зниження різниці рівнів сигналів, що детектуються. Крім того, для детектування PSBT-формату використовуються стандартні бінарні фотоприймачі.

Змішані амплітудно-фазові формати. Застосування популярних ASK-форматів при постійному зростанні кількості інформації, яка передається, перешкоджає подальшому збільшенню пропускної спроможності ліній передачі, тому що частота модуляції електричного сигналу обмежена величиною 40 Гбіт/с. Крім того, високошвидкісна бінарна модуляція характеризується низькою спектральної ефективністю і меншою стійкістю до дисперсії.

В якійсь мірі ці проблеми вирішує багаторівневе кодування сигналів, наприклад, чотирьох рівневі формати ASK і PSK (або QPSK - Quaternary Phase Shift Keying). Однак реалізація чотирьох рівневої схеми дуже складна. Збільшення кількості рівнів значень призводить до того, що ці рівні гірше розпізнаються приймачем через погане розкриття око-діаграми.

Найбільш дієвим способом збільшення спектральної ефективності γ є використання багаторівневої амплітудно-фазової модуляції, при якій інформація кодується як амплітудою, так і фазою сигналу. Іноді для позначення амплітудно-фазової модуляції використовується термін “квадратурна модуляція”.

ASK-QPSK. В роботі [24] запропоновано новий 8-символьний змішаний формат ASK-QPSK. Запропонований формат є поєднанням бінарного амплітудного ASK і 4-символьного фазового QPSK-форматів.

На межах біта RZ-ASK-QPSK потужність падає до нульового значення, і тому цей формат більш стійкий до хроматичної дисперсії, ніж NRZ-ASK-QPSK, що підтверджується результатами проведених експериментальних досліджень. Стійкість до хроматичної дисперсії формату RZ-ASK-QPSK на швидкості передачі 30 Гбіт/с порівняна з аналогічною стійкістю формату RZ-ASK на швидкості передачі 10 Гбіт/с.

Формати, в яких параметром модуляції є частота світлової хвилі, називаються частотними форматами модуляції або FSK-форматами. Такий підхід, коли використовується пряма модуляція лазера з розподіленим зворотним зв'язком (DFB - Distributed FeedBack), вважається потенційно дешевим при використанні диференціального детектування FSK (як і DPSK), який має кращі властивості по збільшенню відношення сигнал/шум порівняно з NRZ. Крім того, у FSK найнижча сприйнятливість до нелінійних ефектів в волокні в порівнянні з DPSK-, NRZ- і RZ-форматами модуляції.

Проте в даний час FSK-формати в комерційних мережах не використовуються. Це пояснюється відсутністю для промислових мереж зв'язку недорогих лазерів, які можуть бути швидко пере налаштовані. Ще один формат, в якому для кодування використовується частота (довжина хвилі), був названий авторами “символьної модуляцією”. Він теоретично має деякі технічні переваги в системах далекого зв'язку, але через складність реалізації немає даних про його експериментальні дослідження.

Незважаючи на зростання кількості інформації, що передається по волокну, основним форматом модуляції залишається бінарне амплітудне кодування (ASK).

Популярність ASK-форматів не падає завдяки простоті їх реалізації та малої вартості приймально-передаючої апаратури. Але використання амплітудної модуляції перешкоджає підвищенню спектральної ефективності γ, а для майбутніх мереж зв'язку збільшення γ стане єдиним способом підвищити сумарну швидкість передачі.

В даний час активно розробляються фазові формати модуляції, але через складність і високу вартість передавальних і приймаючих пристроїв вони фактично не використовуються в комерційних лініях зв'язку. Частотні формати знаходяться в самому початку досліджень. Вони мають деякі переваги в порівнянні з NRZ-, RZ- і DPSK-форматами, обіцяють бути більш дешевими, але вимагають значного поліпшення пере налаштування лазерів-передавачів. Теоретичні оцінки показали перспективність застосування подвійного фазо-модульованого формату в DWDM-мережах через малу ширину спектру сигналу.

Більшість властивостей нових форматів отримано експериментально або в результаті чисельного моделювання. Часто моделі не враховують вплив деяких нелінійних ефектів, які мають місце при поширенні сигналу, а експериментальні дані не можуть пояснити деякі явища. Тому необхідні подальші дослідження впливу нелінійних ефектів, різних видів дисперсії і шумів на якість роботи систем зв'язку, що використовують різні формати модуляції.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ДИСПЕРСІЇ

3.1 Вибір програмного забезпечення для моделювання

Наразі в світі розроблено декілька потужних програмних продуктів для рішення задач оптичної телекомунікації та взагалі оптичного дизайну [30]. Їх можна розглядати як системи автоматичного проектування (САПР), який суттєво використовують методи проектування **CAD** (Computer-Aided Design — проектування за допомогою комп'ютеру) для автоматизації процесу проектування та створення точної документації. Розглянемо деякі популярні програмні продукти та виберемо такий, що найбільш підходить до рішення задачі компенсації дисперсії в оптичному волокні.

Photon Design - середовище дизайну пасивних компонентів

Компанія Photon Design впровадила багато інновацій в моделювання фотонікі. Вона пропонує кращі в світі інструменти для моделювання в основному пасивних компонентів і схем фотоніки:

набор инструментов для расчета мод волноводов, и оптических волокон включая решения конечно-разностных и конечных элементов;

набор для проектирования фотонных кристаллов, гибкий редактор компоновки для 2D и 3D фотонно-кристаллических решеток;

векторный двунаправленный инструмент оптического распространения, основанный на Eigen Mode Expansion (EME), что идеально для проектирования кремниевой фотоники;

инструмент для моделирования и оптимизации приложений мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM/DWDM).

VPI photonics Design Suite - середовище фотонного проектування (PDE)

Це середовище пропонує:

• зручний настроюваний графічний інтерфейс користувача (GUI) з безшовною інтеграцією всіх інструментів VPIphotonics Design Suite;

• можливість визначення довільних проектів як взаємопов'язані блоки (модулі);

• багату вбудовану бібліотеку модулів та демонстрацій програм;

• можливість вказати параметри модулів як значення або вирази;

• графічний спосіб представлення повторюваних та умовних блоків;

• автоматичне багатовимірне переміщення параметрів, оптимізація та оцінка виходу, інтерактивне налаштування параметрів;

• керування завданнями моделювання;

• можливості експорту/імпорту, що підтримують спільну роботу.

На рис. 3.1 показаний приклад використання інтерфейсу VPIphotonics Design Suite для симуляції електричних компонентів в оптичної телекомунікаційної системі. Показане з'єднання на відстань 800 км з швидкістю передачі 10 Гбіт/с з використанням приймача прямого підсилення та трансімпедансного підсилювача.

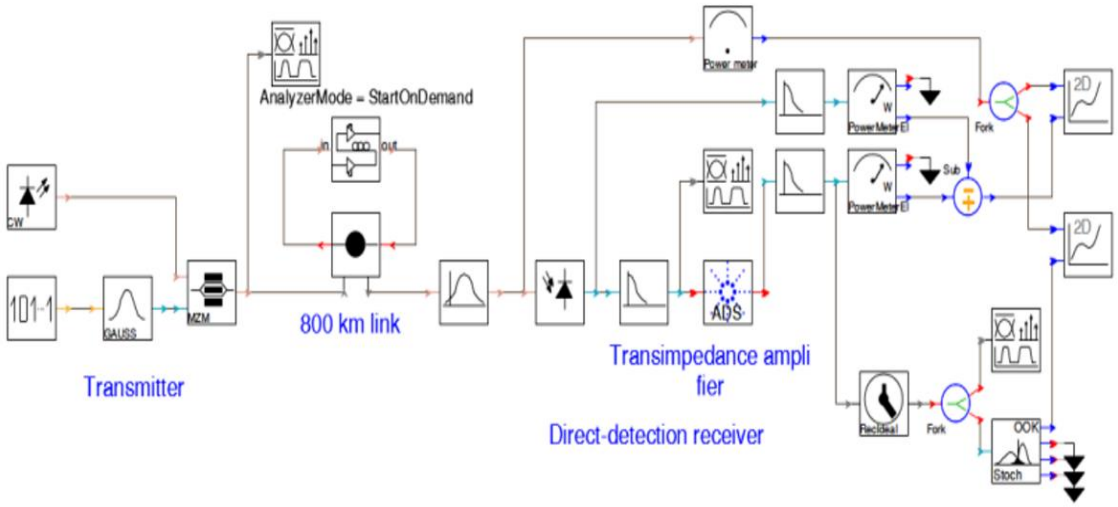


Рис. 3.1 Приклад використання інтерфейсу VPIphotonics Design Suite

Synopsys RSoft Photonic Device Tools – інструменти для фотонних пристроїв

Цей набор інструментів пропонує широкий набор:

- симуляторів та оптимізаторів для пасивних та активних фотонних та оптоелектронних пристроїв, включаючи лазери VCSEL; ці інструменти інтегровані з інструментами Synopsys для оптичного та напівпровідникового проектування для

оптимізованої багатодоменної сумісної симуляції;

- продуктів Synopsys CODE V та LightTools для ретельного моделювання нанотекстурованих оптичних структур та дифракційного аналізу;
- продукти Synopsys Sentaurus TCAD для моделювання складних оптоелектронних пристроїв.

Ключові характеристики пакету:

- високоточні алгоритми, що дозволяють швидко створювати віртуальні прототипи, зменшуючи потребу в дорогому та тривалому фізичному моделюванні, підвищуючи продуктивність та скорочуючи час виходу на ринок;
- допомога створення нових продуктів, за сценарієм "що, якщо" для продукту;
- алгоритмічні механізми мають спільний інтерфейс CAD, тому програмне забезпечення може використовувати кілька пакетів RSoft без необхідності імпортувати проекти з одного програмного забезпечення до іншого;
- сценарії можна створювати будь-якою мовою програмування;
- включені інструменти RSoft: для фотонних пристроїв, для пасивних пристроїв, для проектування та моделювання інтегрованих та волоконно-оптичних хвилеводних пристроїв та схем, а також багато іншого.

OptiSystem (OptiWave) – система автоматизованого проектування

Система автоматизованого проектування (САПР) OptiSystem [31] — перспективний пакет моделювання оптичних систем зв'язку, що дозволяє вирішувати завдання розробки, тестування та віртуальної оптимізації різних видів оптичних ліній на фізичному рівні широкого спектру оптичних мереж, від телевізійних мов до магістральних ліній. Розвинений графічний інтерфейс контролює розміщення оптичних компонентів і таблицю зв'язків, моделі компонентів і представлення графіків. Велика бібліотека активних та пасивних компонентів включає реалістичні, частотно-залежні параметри, динамічна зміна яких дозволяє досліджувати вплив

технічних характеристик компонентів на роботу системи. САПР орієнтована потреби досліджень вчених, інженерів оптичних телекомунікацій, студентів та інших зацікавлених користувачів.

Переваги САПР OptiSystem:

- швидке, дешеве створення прототипу;

– широке розуміння процесів у системі, що розробляється;

- прямий доступ до численних налаштувань даних, що визначають характеристики системи;

– автоматичне сканування та оптимізація параметра;

- візуальне представлення опцій розробки та сценаріїв для пропозиції її передбачуваним споживачам.

До складу OptiSystem входять програми:

- розробка оптичних систем зв'язку від компонентів до системного рівня на фізичному рівні;

– розробка мереж абонентського телебачення, мультиплексної передачі з часовим чи частотним поділом каналів;

– пасивні оптичні мережі та просторові оптичні системи;

– розробка кільцевих синхронних оптичних мереж та мереж із синхронною цифровою ієрархією;

– розробка передавачів, каналів, підсилювачів та приймачів;

- розробка дисперсійних карт;

- оцінка частоти помилок по бітах (BER) і системних помилок при різних моделях приймачів та розрахунки BER підсилювальних систем.

Порівняння середовищ для проектування оптичних систем

Кожне з описаних проектних середовищ є потужним засобом проектування оптичних систем, у всіх них інструменти інтегровані з інструментами інших середовищ, кожне з них дозволяє аналізувати спектральну та часову дисперсію, є й

інші подібні функції. Порівняння цих середовищ за деякими важливими показниками (особливостями CAD) наведене в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння середовищ для проектування оптоволоконних мереж

Особливості CAD	Середовища для проектування оптичних мереж			
	Photon Design	VPIphotonics Design Suite	RSoft (Synopsys)	OptiSystem (OptiWave)
Типи компонентів для моделювання	Пасивні (оптичні хвилеводи, фотонні кристали, …	Активні та пасивні (широка бібліотека компонентів)	Активні та пасивні (різноманітні моделі та елементи)	Велика кількість готових моделей
Моделювання помилок та деградації	-	+	+	+
Симуляція DWDM систем	-	-	+	+

Порівнюючи розглянуті середовища аналізу та проектування обираємо для вирішення нашої задачі середовище OptiSystem, тому що воно має велику кількість готових моделей та дозволяє використовувати для моделювання необхідні для телекомунікаційних задач компоненти, окрім того це середовище достатньо широко описане в телекомунікаційних мережах.

3.2 Порядок роботи у САПР OptiSystem

Розглянемо порядок роботи у середовищі OptiSystem з прикладу моделі лазерного джерела із прямою модуляцією.

Необхідне відкрити вікно топології проекту, в нього з вікна бібліотеки елементів переносяться необхідні блоки системи, що розробляється: генератор псевдовипадкової послідовності бітів, імпульсний генератор (з кодуванням NRZ), лазерний випромінювач (VCSEL лазер) (рис. 3.2). Елементи у схемі розміщуються послідовно зліва направо. При перенесенні елемента програма пропонує з'єднання портів з прилеглим відповідним елементом схеми. Після розміщення всіх елементів та перевірки порядку їх з'єднання проводиться налаштування елементів, що входять у

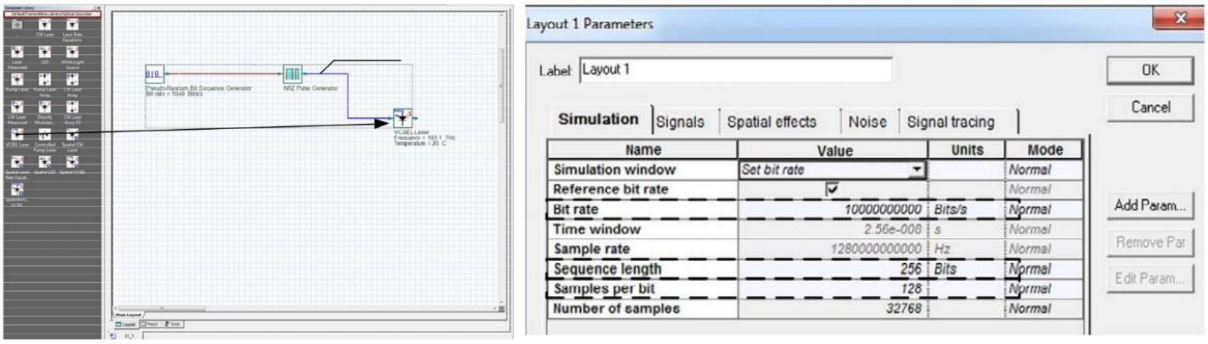
схему, після подвійного кліку на кожному з них. Для реалізації проекту необхідно задати параметри елементів:

– швидкість передачі у біт/с (Bit rate);

- довжина послідовності бітів (Sequence length);

- кількість вибірок на біт (Samples per bit).

Ці параметри використовуються для визначення часового вікна (time window), частоти дискретизації (sample rate) та кількості вибірок (number of samples).



а) вікно топології проекту, б) вікно вихідних параметрів проекту

Рис. 3.2 Перенос елементів моделі, що розробляється

В прикладі на рис. 3.2 завдані значення: Bit rate=10^{10}, Sequence length=256 и Samples per bit=128. Це задається у вікні параметрів проекту (рис. 3.2).

Тоді одержимо:

$$Time\ \ window = \frac{Sequnce\ length}{Bit\ rate} = \frac{256}{10^{10}} = 25{,}6\ (\text{нс}),$$

$$Number\ of\ samples = Sequnce\ length\ \cdot samples\ per\ bit,$$

$$Sample\ rate = \frac{Number\ of\ samples}{Time\ \ window} = 1{,}28\ \text{ТГц}.$$

Частота дискретизації розраховується у програмі автоматично у вікні параметрів налаштування («script»).

Програма використовує параметр "Time window" для всіх компонентів однаковим, тоді як параметри "sample rate" та "number of samples" можуть бути пере налаштовуються. При зміні розмірності заданої величини у вікні параметрів

перерахунок проводиться автоматично.

Щоб задати для конкретного пристрою глобальні параметри проекту, необхідно зайти в його налаштування та перевірити доступність - у вкладці Simulation наявність галочки в рядку Enabled. Після з'єднання вузлів пристрою та завданні їх параметрів необхідно ввести пристрої візуалізації (рис. 3.3):

- осцилограф (Oscilloscope visualization);

- модуль візуалізації оптичного сигналу у часовій області (Optical time domain visualizer);

- аналізатор спектру оптичного сигналу (Optical spectrum analyzer);

- аналізатор BER (BER analyzer).

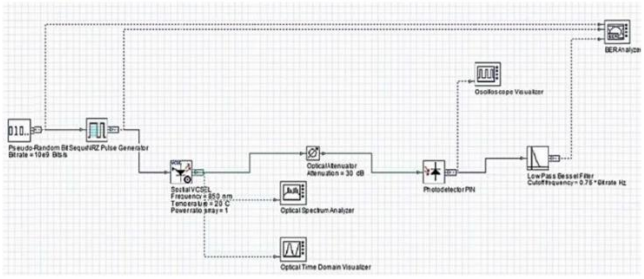


Рис. 3.3 Структура моделі з модулями візуалізації

Для завдання параметрів елемента схеми необхідно клацнути його правою кнопкою миші та вибрати у спливаючому меню опцію «Component Properties». Після завершення налаштувань у верхньому меню програми необхідно натиснути кнопку «calculate» при цьому відкривається вікно, в якому є кнопка запуску розрахунків.

Після завершення обчислень подвійним натисканням модулів візуалізації можна перейти до аналізу отриманих результатів моделювання (рис. 3.4).

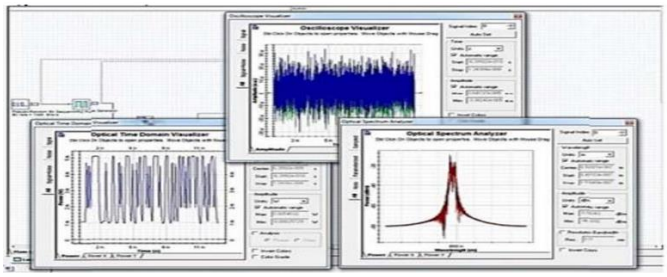


Рис. 3.4 Результати моделювання системи передачі даних

В програмі передбачене маркування за кольорами з’єднувальних ліній в залежності від особливості сигналу, що передається (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Маркування з’єднувальних ліній

Сигнал	Колір з’єднувальної лінії
Двійковий (Binary)	Червоний
Багаторівневий (M-Ary)	Темно червоний
Електричний (Electrical)	Блакитний
Оптичний (Optical)	Зелений
Довільний (Any Type)	Темно зелений

У програмі передбачена можливість введення джерела шуму, що вводиться в дискретизований сигнал, або може існувати окреме шумове заповнення. За замовчуванням у параметрах моделей пристроїв шуми вимкнено.

3.3 Критерії оцінки якості роботи системи передачі

Оцінка якості передачі інформації по оптичним лініям (ВОЛЗ) ґрунтується на вимірюванні ключових фізичних параметрів та показників продуктивності, які визначають надійність та ефективність системи зв'язку [6, 7, 10]. При перевірки впливу дисперсії на якість передачі та перевірки якості при компенсації дисперсії необхідно порівняти характеристики якості на лінії без компенсації дисперсії та лінії з компенсацією.

Основними критеріями якості при передачі бітових потоків є:

- бітовий коефіцієнт помилок (BER) - ключовий показник для цифрових систем, який визначає відношення кількості помилково декодованих бітів до загальної кількості переданих бітів інформації; якість вважається задовільною, якщо BER нижчий за певний пороговий стандарт для заданого класу ліній;
- пропускна здатність - максимальна кількість даних, яку можна передати за одиницю часу (наприклад, Гбіт/с).

В цієї роботі вважаємо, що швидкість потоку даних завдана, а контролювати

якість будемо за коефіцієнтом помилок.

BER (Bit Error Rate) - це кількість бітів, які передаються або отримуються неправильно в системі передачі даних, виміряна у відсотках або у відношенні до загальної кількості переданих бітів. BER є показником якості передачі сигналу через канал зв'язку, і низьке значення BER свідчить про високу надійність системи.

На практиці, BER визначається порівнянням бітів, які були передані відправником, і бітів, які були отримані приймачем. Якщо система працює ефективно, BER буде низьким. Оцінка BER важлива при проектуванні і вдосконаленні комунікаційних систем, оскільки вона дозволяє оцінити точність передачі даних та виявляти можливі проблеми в системі передачі.

Q-фактор — це параметр, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрової системи передачі і визначається шляхом статистичної обробки результатів вимірювань амплітуди та фази сигналу на електричному рівні. При цьому виконується побудова функції розподілу станів "1" та "0", а для цих розподілів, припускаючи їх гаусівську форму, оцінюються математичні очікування станів E_1 та E_0 і їх середньоквадратичні відхилення σ_1 та σ_0.

Існує певна функціональна залежність між Q-фактором сигналу та вимірюваним коефіцієнтом помилок BER. Q-фактор визначається шляхом статистичної обробки результатів вимірювань амплітуди та фази сигналу на електричному рівні. Q-фактор пов'язаний з BER наступним чином:

$$BER = \frac{1}{2} \cdot erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{exp\left(-\frac{Q}{4}\right)}{\sqrt{2\pi Q}} \quad (3.1)$$

Значення Q > 6 відповідає коефіцієнту помилок BER < 10^{-9}. Співвідношення значень Q-фактору та BER подані в таблиці.

Таблиця 3.3

Співвідношення значень Q-фактору та BER

BER	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
Q	5,99	6,63	6,71	7,04

Іншим важливим критерієм є метод око-діаграми (або "окулярної діаграми"). Це потужний графічний метод оцінки якості цифрового сигналу і широко використовується в високошвидкісних системах зв'язку, включаючи магістральні оптичні мережі.

Цей метод дозволяє візуально оцінити комбінований вплив усіх факторів погіршення сигналу, таких як шум, дисперсія, джитер (тремтіння фронтів) та між символьна інтерференція (ISI), на якість передачі.

Для одержання око-діаграми необхідним є широкосмуговий осцилограф, підключений до виходу фотоприймача (після перетворення оптичного сигналу в електричний). Розгортка осцилографа синхронізується з тактовою частотою (швидкістю передачі даних) сигналу.

Протягом певного часу осцилограф накладає (накопичує) велику кількість послідовних бітових інтервалів (періодів) сигналу один на одного. У результаті на екрані формується зображення, схоже на людське око (або серію очей між двома "рейками" логічних рівнів), звідки і походить назва.

На рис. 3.5 показане формування око-діаграми на прикладі 3-бітового сигналу, що представлений в 8 комбінаціях 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. На рисунку справа представлений вид сигналу 1 та 0. Якщо ці послідовності форм сигналу накласти одна на одну, то й буде одержана картинка, що наведена на рисунку.

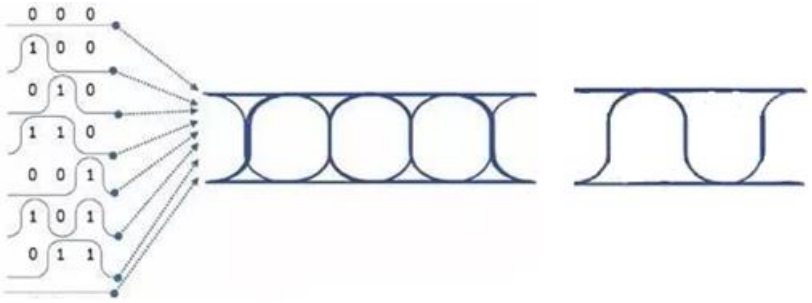


Рис. 3.5 Схема одержання око-діаграми

Якщо сигнал є набором прямокутних імпульсів, то око-діаграма буде ідеальною у вигляді прямокутників, тобто з повністю відкритим оком.

За формою "ока" можна кількісно та якісно оцінити параметри якості:

широке та повністю відкрите око свідчить про високу якість сигналу, низький рівень шуму та малий вплив між символьної інтерференції;

вузьке або закрите око вказує на значні викривлення сигналу, високий рівень помилок та проблеми з цілісністю сигналу;

висота "ока" (вертикальний розмір) показує амплітуду сигналу та стійкість до шуму (співвідношення сигнал/шум - SNR);

ширина "ока" (горизонтальний розмір) показує часовий запас та наявність джитеру (тремтіння) сигналу, чим ширше око, тим менший джитер і стабільніша синхронізація;

товщина ліній перетину визначає рівень шуму та випадкових змін сигналу, тонкі лінії свідчать про низький рівень шуму;

положення точки перетину ("зіниці"), якщо ідеально розташована по центру по горизонталі, то це вказує на симетрію імпульсів, зміщення вказує на спотворення робочого циклу (duty cycle distortion).

Око-діаграма реального сигналу наведена на рис. 3.6, чорний шестикутник на ньому – маска, яка визначає допуск рівнів послідовного сигналу 1 та 0, а також допуск часу нарощування та спаду рівня.

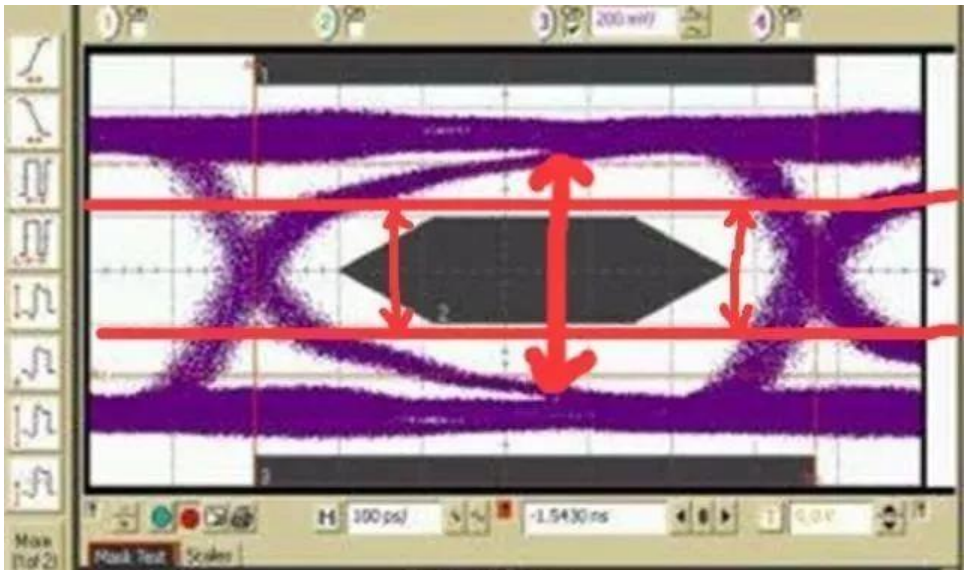


Рис. 3.6 Реальна око-діаграма сигналу

Метод ОКО-діаграми є інтуїтивним комплексним інструментом для швидкої діагностики проблем та оптимізації характеристик приймача, фільтрів та еквалайзерів для досягнення мінімального коефіцієнта бітових помилок (BER). В поєднанні з іншими вимірюваннями, такими як оцінка бітових помилок, око-діаграма може допомогти дизайнерові передбачити продуктивність та виявити можливі джерела проблем.

3.4 Компенсація решіткою Брегга

3.4.1 Структурна схема та її склад

Перед початком моделювання складається структурна схема моделі. Це - важливий етап в розробці будь-яких систем та пристроїв. Схема допомагає уявити загальну структуру системи, визначити компоненти та їх взаємозв'язки, і створити основу для подальшого проектування та розробки. Структурна схема моделювання показана на рис. 3.7.

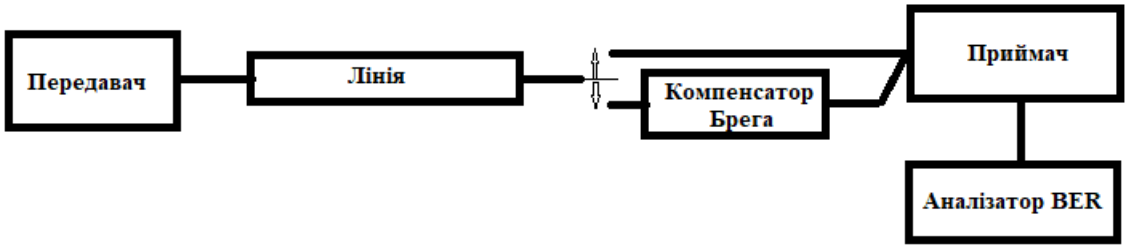


Рис. 3.7 Структурна схема модельного експерименту

Для детального складання схеми потрібно обрати компоненти, з яких складається схема: передавач, модуль компенсації дисперсії, приймач, аналізатор BER, інструмент переключення шлейфів та лінія з підсилювачем.

Передавач складається з:

генератора псевдовипадкової послідовності бітів - Pseudo-Random Bit Sequence Generator (PRBS), якій використовується для генерації послідовності бітів, що емулює реальний сигнал і дозволяє виконати тестування системи на різних вхідних даних;

генератора імпульсів NRZ Pulse Generator, який створює цифрові імпульси, що представляють дані у форматі Non-Return-to-Zero (NRZ), де рівень напруги залишається постійним (не повертається до нуля) протягом усього біту, використовуються лише два рівні: логічний "0" і логічний "1", що є основою для передачі даних у телекомунікаціях та комп'ютерних мережах;

високо стабільного лазера безперервної дії (CW Laser) для генерації постійного оптичного сигналу, який буде модульований перед передачею по оптичному волокну;

модулятора Маха-Цендера (*MZ Modulator Anlytical)*, що використовується для модуляції сигналу перед передачею, дозволяючи введення інформації в оптичний сигнал.

Модуль компенсації дисперсії складається з:

оптичного підсилювача (Optical Amplifier), який використовується для підсилення оптичного сигналу, з метою компенсації втрат сигналу під час передачі по оптичному волокну;

ідеального фільтру компенсації дисперсії (Ideal Dispersion Compensation Filter - FBG), який призначений для компенсації дисперсії та оснований на застосуванні решітки Брегга, для зменшення розширення сигналу в часі.

Приймач складається з:

фотодіоду (PIN Photodiode), що використовується для перетворення оптичного сигналу у електричний, який вже подається на обробку;

фільтру низьких частот Бесселя (Low Pass Bessel Filter) — головна його особливість – лінійна фазова характеристика, яка мінімізує спотворення фази і зберігає форму (цілісність) вхідного сигналу;

регенератора (3R Regenerator), що має 3 функції (відновлення форми сигналу, відновлення його рівень та відновлення синхронізації) для забезпечення оптимального прийому сигналу.

Іншіми компонентами схеми є:

обладнання для переключення шлейфів (Loop Control), яке дозволяє будувати

системи з використанням петлевих структур;

оптичний спектр аналізатор (Optical Spectrum Analyzer), який використовується для аналізу спектру оптичного сигналу, що дозволяє визначити ширину смуги частот сигналу, наявність спектральних витоків та інші параметри; це важливо для забезпечення правильності передачі сигналу в різних частотних діапазонах;

аналізатор помилок (BER Analyzer), який вимірює BER для оцінки якості передачі сигналу через оптичне волокно, що важливо для визначення ефективності системи передачі даних.

3.4.2 Складання схеми та конфігурація компонентів

На основі обраних компонентів, які відповідають вимогам до компенсації дисперсії в оптичному волокні, розроблена схема в CAD-середовищі. Схема включає вхідний блок для оптичних сигналів, оптичні компенсатори, які реалізують процес компенсації дисперсії, та блок аналізаторів для визначення ефективності системи. Вихідні сигнали з системи піддаються аналізу для визначення рівня компенсації дисперсії та інших параметрів, необхідних для оптимізації. Також передбачено можливість оптимізації та настроювання параметрів системи для досягнення кращої ефективності. Схема представлена на рис. 3.8.

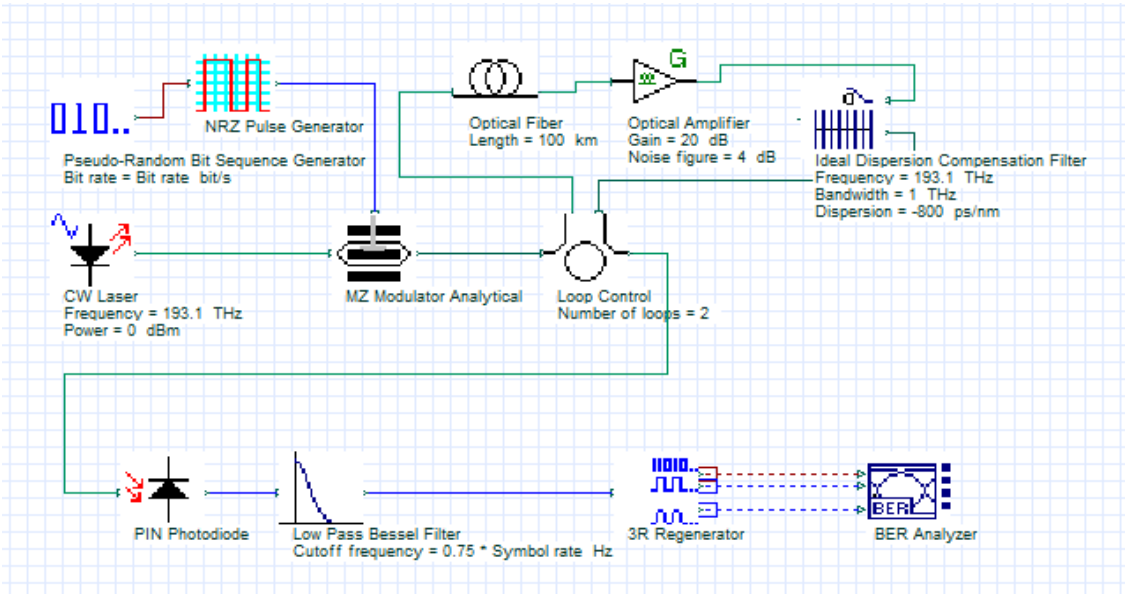


Рис 3.8 Схема для перевірки роботи системи компенсації дисперсії

Більшість обраних компонентів має набір параметрів за замовчуванням. Однак в ході виконання симуляції зміна конфігурації системи за замовчуванням може бути необхідною з наступних причин:

значення параметрів за замовчуванням можуть бути загальними або базовими налаштуваннями, які не завжди відповідають специфічним вимогам кожної конкретної системи, тому їх зміна дозволяє точніше адаптувати систему під потреби конкретної задачі;

результати симуляції можуть вказати на потребу корекції певних параметрів для покращення ефективності системи; змінюючи конфігурацію, можна покращити або виправити недоліки, що виявлені під час аналізу.

Встановлюємо наступні значення початкових параметрів симуляції.

Параметри передавача:

швидкість передачі даних генератора PRBS (Bit Rate) - B = 10 Гбіт/с,

частота випромінювання лазера (CW Laser) - $f_л$ = 193,1 ТГц,

потужність випромінювання лазера (CW Laser) - P = 0 дБм.

Параметри каналу:

кількість петель пристрою (Loop Control) - n = 0,

довжина оптичного волокна (Optical Fiber) - L = 100 км,

підсилення оптичного підсилювача (Optical Amplifier) - A = 20 дБ,

коефіцієнт шуму підсилювача - N = 4 дБ.

Параметри модуля компенсації дисперсії (Ideal Dispersion FBG):

частота $f_{комп}$ = 193,1 ТГц,

пропускна здатність $\Delta f_{комп}$ = 1THz,

дисперсія σ = -800 пс/нм.

Параметри приймача:

Частота зрізу фільтру (Low pass bessel filter) = 0.75*(Bit Rate) Гц.

Інші параметри:

довжина послідовності бітів = 128 біт,

зразків на біт (Sample per bit) = 64,

кількість зразків (Number of samples) = 8192.

3.4.3 Моделювання та аналіз результату

Для оцінки вихідних параметрів та виявлення характеристик оптоволоконної системи в базових умовах проводиться запуск симуляції без використання модуля компенсації. Для запуску необхідно натиснути кнопку *Calculate (Розрахунок)*, та переконатися, що обрано варіант *Calculate the whole project* (*Розрахунок усього проекту*) та активовано опцію *Display Messages* (*Показ повідомлень*). Це дозволить побачити звіт про помилки, якщо такі виникнуть. Щоб отримати Eye Diagram в середовищі розробки, потрібно активувати опцію *Show Eye Diagram* (Демонстрація око-діаграми). При такому настроюванні сигнал від передавача прийде безпосередньо на фотодіод приймача.

В результаті отримуємо показники аналізаторів, які містять величини та графіки параметрів. На рис. 3.9 показані результати розрахунку значення BER та око-діаграма. Розраховані значення Q та BER:

$$Q \approx 9{,}5; \qquad BER < 1{,}2\ 10^{-18}.$$

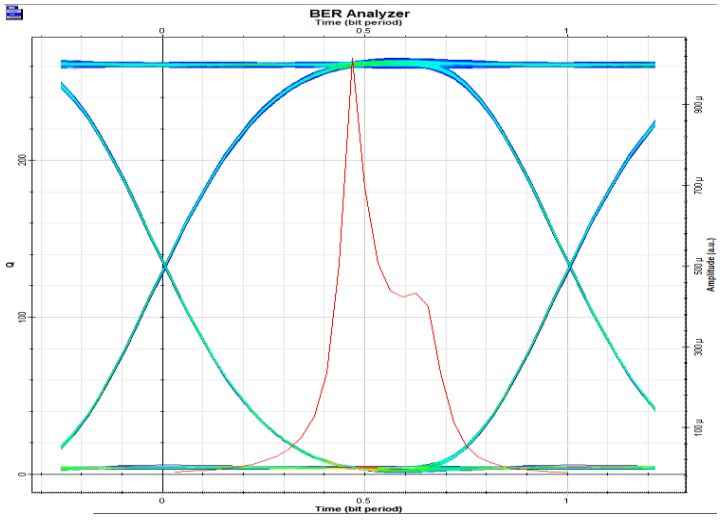


Рис. 3.9 BER та око-діаграма в системі без волокна та компенсатора дисперсії

Такі високі результати пояснюються тим, що система запускалася в тестовому

режимі, де вихід передавача підключений безпосередньо до приймача без використання довгого волокна та системи компенсації.

Для підключення модуля компенсації дисперсії необхідно змінити параметри компонента *Loop Control*, а саме, змінити кількість петель з 0 на 1 та знов запустити симуляцію. Результат представлений на рис. 3.10. При підключенні модуля компенсації значення Q та BER наступні:

$$Q \approx 6{,}2; \qquad BER \approx 9{,}2\ 10^{-11}.$$

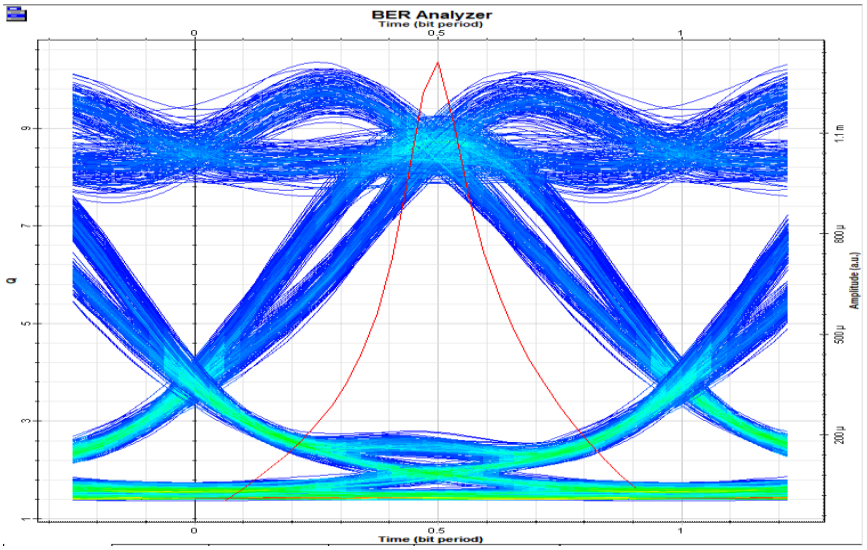


Рис. 3.10 BER та око-діаграма в системі з волокном та компенсатором дисперсії

Наразі отримані значення, близькі до значень в реальних оптоволоконних системах передачі. Якість сигналу в отриманій системі можна покращити, регулюючи параметри решітки Брегга, і тим самим зменшуючи вплив дисперсії на сигнал.

За замовчуванням в волокні, що взяте з бази даних середовища, значення дисперсії на кілометр волокна задане довільне. Візьмемо значення погонної дисперсії реального волокна. Це значення дорівнює 16,75 пс/нм/км, звідси загальна дисперсія на усю довжину волокна може бути розрахована за наступною формулою

$$D_{заг} = D_{пог} \cdot \Delta\lambda_{лазера} \cdot L_{вол}$$

де: $D_{заг}$ - загальна дисперсія,

$D_{пог}$ - дисперсія на один кілометр оптичного волокна і один нм смуги лазера,

$\Delta\lambda_{лазера}$ - смуга випромінювання лазера, для лазерів, що застосовуються в волоконно-оптичному зв'язку смуга лазера складає приблизно 0,5 - 1 нм,

$L_{вол}$ - довжина оптичного волокна в кілометрах.

У результаті розрахунку одержимо $D_{заг}$ = 1675 пс/км. Встановлюємо нове значення параметру дисперсії в модулі компенсації, знов запускаємо симуляцію та одержуємо наступний результат (рис. 3.11):

$$Q \approx 7{,}3; \qquad BER \approx 5{,}7\ 10^{-13}.$$

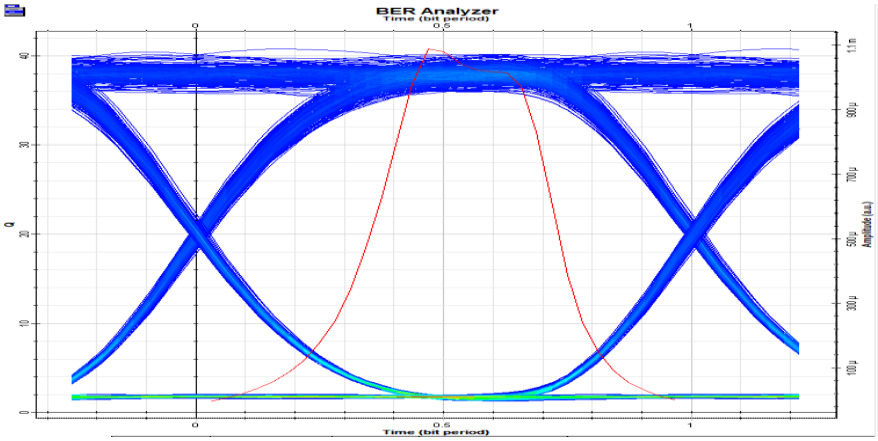


Рис. 3.11 BER та око-діаграма в системі з налаштованим компенсатором дисперсії

Таким чином, при знаходженні загального значення дисперсії та коригуванні конфігурації решітки на основі цього значення досягається допустимі значення показників BER та Q-чинника, тобто викривлення сигналу на вході приймача несуттєві.

3.5 Компенсація дисперсії лінійного волокна волокном компенсації

3.5.1 Структурна схема та її склад

Структурна схема цієї моделі подібна до структурної схеми попередньої моделі, вона показана на рис. 3.12.

Для детального складання схеми потрібно обрати компоненти, з яких складається схема: передавач, лінійне волокно, волокно для компенсації дисперсії, приймач, аналізатор BER.

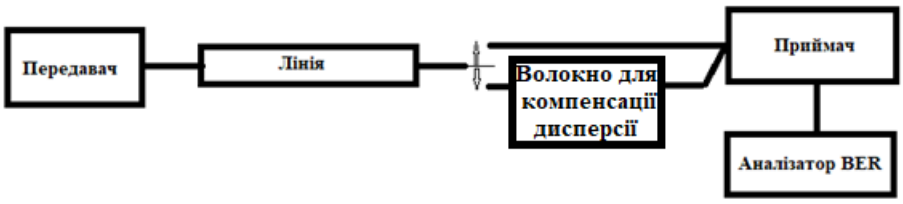


Рис. 3.12 Структурна схема модельного експерименту

Передавач складається з:

генератора псевдовипадкової послідовності бітів - (PRBS), для генерації послідовності бітів, що емулює реальний сигнал і дозволяє виконати тестування системи на різних вхідних даних;

генератора імпульсів NRZ Pulse Generator, який створює цифрові імпульси, що представляють дані у форматі Non-Return-to-Zero (NRZ)**,** що є основою для передачі даних у телекомунікаціях та комп'ютерних мережах;

високо стабільного лазера такого самого, як в попередньому випадку;

в цьому експерименті використовується безпосередня, так звана «пряма» модуляція, при якої імпульси, що модулюють змінюють струм накачки лазера.

В якості модуля компенсації дисперсії використовується спеціальне волокно для компенсації.

Приймач складається з:

фотодіоду (PIN Photodiode), такого, як і в попередньому випадку;

фільтру низьких частот Бесселя (Low Pass Bessel Filter), такого, як і в попередньому випадку;

оптичного атенюатору.

Іншими компонентами схеми є:

оптичний спектр аналізатор (Optical Spectrum Analyzer), такий як і в попередньому випадку;

оптичний візуалізатор у часовий області для спостереження за формою оптичного сигналу - це важливий вбудований інструмент для аналізу сигналів у

часовій області, подібно до того, як працює реальний OTDR; він дозволяє бачити імпульси, потужність, фазу та бітові шаблони з плином часу, допомагаючи діагностувати різні проблеми;

аналізатор помилок (BER Analyzer) такий, як і в попередньому випадку;

оптичний візуалізатор вимірювача оптичної потужності.

3.5.2 Складання схеми та конфігурація компонентів

На основі обраних компонентів, які відповідають вимогам до компенсації дисперсії в оптичному волокні, розроблена схема в CAD-середовищі. Схема включає вхідний блок для оптичних сигналів, оптичний компенсатор – спеціальне оптичне волокно, що реалізує процес компенсації дисперсії, та блок аналізаторів для визначення ефективності системи. Вихідні сигнали з системи піддаються аналізу для визначення рівня компенсації дисперсії та інших параметрів, необхідних для оптимізації. Також передбачено можливість оптимізації та настроювання параметрів системи для досягнення кращої ефективності. Схема представлена на рис. 3.13.

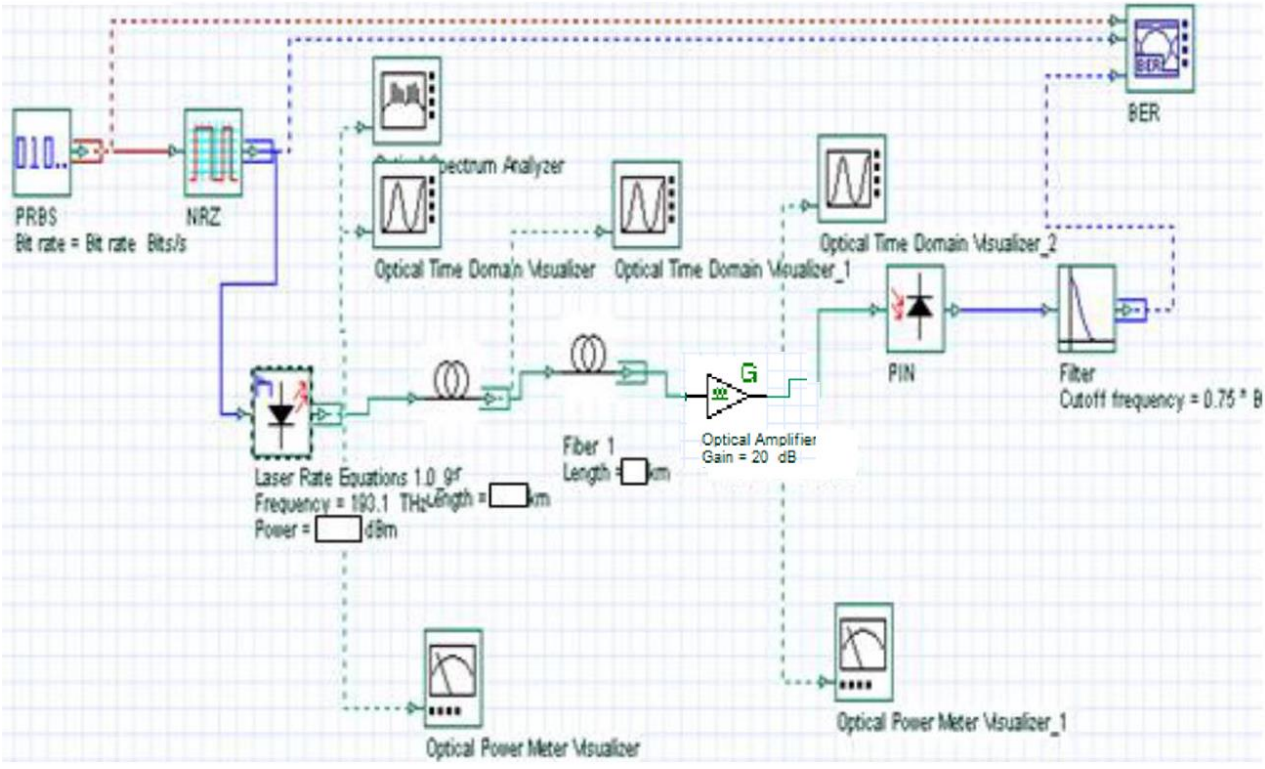


Рис. 3.13 Схема для перевірки роботи системи компенсації дисперсії

Більшість обраних компонентів має набір параметрів за замовчуванням. Однак, як і в попередньому випадку можна змінювати конфігурацію системи за замовчуванням для вирішення конкретних задач, які виникають при проектуванні.

Встановлюємо наступні значення початкових параметрів симуляції.

Параметри передавача:

швидкість передачі даних генератора PRBS (Bit Rate) - B = 10 Гбіт/с,

частота випромінювання лазера (CW Laser) - $f_л$ = 193,1 ТГц,

потужність випромінювання лазера (CW Laser) - P = 0 дБм.

Параметри каналу:

довжина оптичного волокна (Optical Fiber) - L = 100 км,

погонна дисперсія оптичного волокна (Optical Fiber - G.652)

на довжині хвилі 1550 нм має значення - $D_{пог}$= 16,75 пс/(нм·км),

погонне загасання оптичного волокна - α = 0,19 дБ/км;

підсилення оптичного підсилювача (Optical Amplifier) - A = 20 дБ,

Параметри компенсації дисперсії (linear dispersion):

погонна дисперсія волокна, що компенсує = -150 пс/(нм·км),

довжина волокна, що компенсує дисперсію $L_{комп}$ = 4 км.

Параметри приймача:

Частота зрізу фільтру (Low pass bessel filter) = 0.75*(Bit Rate) Гц.

3.5.3 Моделювання та аналіз результату

Для оцінки вихідних параметрів та виявлення характеристик оптоволоконної системи в базових умовах проводиться запуск симуляції без використання волокна, яке компенсує дисперсію. Для цього у вікні параметрів волокна, що компенсує дисперсію (довжина) поставимо значення 0. Для запуску натискаємо кнопку *Calculate*, обираємо варіант *Calculate the whole project*, активуємо опцію *Display Messages*. Це дозволить побачити звіт про помилки, якщо такі виникнуть. При такому настроюванні

сигнал від передавача прийде через лінійне волокно без компенсації дисперсії безпосередньо на фотодіод приймача.

В результаті отримуємо показники аналізаторів, які наведені нижче.

$$BER = 5{,}7 \cdot 10^{-4},\ Q = 3{,}3.$$

Це означає, що система передачі не працює – дуже велика кількість помилок. Дійсно, загальна дисперсія при таких значеннях параметрів дорівнює

$$D_{заг} = D_{пог} \cdot d \cdot L = 16{,}75 \cdot 0{,}5 \cdot 100 = 850 \text{ пс}.$$

Звідси можна розрахувати швидкість передачі [ ]

$$B = 0{,}25 / D_{заг} = 0{,}25/850 \cdot 10^{-12} = 294 \text{ Мбіт/с},$$

а у нас вказана швидкість передачі 10 Гбіт/с.

Наступним етапом експерименту є підключення волокна, що компенсує дисперсію. Підключимо волокно довжиною 4 км. Для цього у вікні параметру волокна, яке компенсує дисперсію введемо значення довжини. Після запуску симуляції так, як у попередньому випадку, одержімо наступний результат:

$$BER = 7{,}8 \cdot 10^{-7},\ Q = 4{,}6.$$

Це означає, що система передачі працює, але якість її не задовольняє встановленим нормам.

Наступний етап – розрахунок необхідного значення довжини волокна для компенсації дисперсії. Для того, щоб повністю компенсувати дисперсію значення довжини волокна для компенсації визначимо з умови, що необхідне компенсувати 850 пс волокном, в якого дисперсія від'ємна та дорівнює – 150 пс/км, звідси

$$L_{комп} = 850(\text{пс})/150(\text{пс/км}) = 5{,}7 \text{ км}.$$

Підключимо це волокно, для цього у вікні параметру волокна, яке компенсує дисперсію введемо значення довжини 5,7 км. Після запуску симуляції так, як у попередньому випадку, одержімо наступний результат:

$$BER = 3{,}4 \cdot 10^{-13},\ Q = 7{,}35.$$

Розрахуємо загасання експериментальної лінії.

Загасання лінії без урахування волокна, що компенсує дисперсію, дорівнює:

$$A_{\text{без комп}} = \alpha \cdot L = 0{,}19 \cdot 100 = 19 \text{ дБ}.$$

Загасання лінії з урахуванням волокна, що компенсує дисперсію, дорівнює:

$$A_{\text{з комп}} = \alpha \cdot L + \alpha_{комп} \cdot L_{комп} = 0{,}19 \cdot 100 + 0{,}5 \cdot 5{,}7 = 21{,}85 \text{ дБ}.$$

Це значення загасання перекривається підсилювачем, що розташований перед приймачем. Потрібне відповідно задати значення підсилення.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто види дисперсії (між модова, поляризаційна, хроматична, матеріальна, хвилеводна) та причини її виникнення. Проведене дослідження методів компенсації дисперсії, яка має місце в оптичному волокні.

Розглянуто оптичні методи компенсації дисперсії: волокна, які компенсують дисперсію, та волоконно-оптичні ґратки для компенсації дисперсії.

Розглянуто також електронні методи компенсації дисперсії: використання кола зворотного зв’язку для компенсації дисперсійних викривлень; використання попереднього викривлення сигналу.

Розглянуто інтегральні методи компенсації дисперсії та нелінійних властивостей оптичного волокна, в яких застосовується попереднє викривлення сигналу та компенсація дисперсії. Проведене дослідження застосування складних форматів модуляції, які є стійкими до дисперсійних перекручень.

Проведене моделювання модулю компенсації дисперсії в оптичних мережах з використанням програмного забезпечення - системи автоматизованого проектування OptiSystem. Для компенсації дисперсії обрано два методи, які наразі найбільш застосовуються: гратка Брегга (FBG) та оптичне волокно з від’ємною дисперсією.

З використанням CAD OptiSystem спроектовано дві системи компенсації дисперсії відповідно до кожного з обраних методів. Перевірено роботу систем та для кожної системи досягнена прийнятна якість передачі сигналу.

Показано, що для досягнення найкращої результату необхідно коригувати параметри модуля компенсації, визначивши значення дисперсії в волокні конкретної довжини.

Результати роботи можуть бути застосовані при проектуванні оптичних систем передачі інформації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аснис Л.Н. Технологии спектрального мультиплексирования для оптической связи. Учебное пособие. / Л.Н.Аснис, И. Ю. Денисюк. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008, - 105 с.

2. Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку/ В.Б. Каток. - Київ.: ВЕЛАР, 1999.- 483с.

3. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. / А.Б. Иванов. – М.: SYRUS SYSTEMS, 1999. – 671 с.

4. ITU-T Recommendation G.655 Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable (Характеристики одномодових волокон та кабелю з не нульовою зміщеною дисперсією).

5. ITU-T Recommendation G.656 Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport (Характеристики волокон та кабелю з ненульовою зміщеною дисперсією для широкополосних оптичних транспортних мереж).

6. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. / Р. Фриман. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2003. – 590 с.

7. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. / Р.Р. Убайдуллаев. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 242 с.

8. Величко М.А. Электронные методы компенсации дисперсии в оптических линиях связи / М.А. Величко // LIGHTWAVE Russian Edition №1, 2007.

9. Листвин А. В. Оптические волокна для линий связи. / А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков. — М.: ЛЕСАРарт, 2003. — 288 с.

10. Осадчук В.С. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. — Вінниця: ВНТУ, 2005. — 225 с.

11. Дисперсия в оптических волокнах [Електронний ресурс] / Режим доступа: https://studfile.net/preview/15226114/page:7/

12. Гладышевский М.А. Поляризационная модовая дисперсия в оптическом волокне /

М.А. Гладышевский, Д.Д. Щербаткин // Lightwave Russian Edition, 2005, № 1, с.48-51.
13. IEC 60793-2 Optical fibres - Part 2: Product specification (Оптичні волокна – Частина 2: Технічні умови на виріб).
14. What is Dispersion Compensating Fiber (DCF)? (2025) [Электронный ресурс] / Режим доступа: / https://www.linkedin.com/pulse/what-dispersion-compensating-fiber-dcf-uses-how-works-top-companies-o6qoc/
15. Prati G. Electronic dispersion compensation. Proc. ECOC 2005, Mo 4.6.
16. Hardy S. Optical duobinary promises improved reach, greater flexibility / S. Hardy // Lightwave. № 5, 2006.
17. Величко М.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // LIGHTWAVE Russian Edition № 4, 2015.
18. Downie J.D. 1500 km transmission over NZDSF without inline or postcompensation of dispersion for 38 10.7Gbit/s channels / J.D. Downie, M. Sauer, J. Hurley // Electronics Letters. 2006, May 25. Vol. 42, No. 11.
19. Faerbert A. Application of Digital Equalization in Optical Transmission Systems / A. Faerbert // OFC 2006, Conf. Proc., paper OTuE5, 2006.
20. Conradi Jan. BandwidthEfficient Modulation Formats for Digital Fiber Transmission Systems. / Jan. Conradi // Optical Fiber Telecommunications, 2002, vol. IV B, p. 862.
21. Winzer P.J. Advanced optical modulation formats. / P.J. Winzer, R.J. Essiambre // ECOCIOOC, 2003, Proceedings, vol. 4, pp. 1002–1003, Rimini, 2003.
22. Ferber S. Comparison of DPSK and OOK modulation format in a 160 Gb/s transmission system // ECOCIOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1004–1005, Rimini, 2003.
23. Idler W. System Performance and Tolerances of 43Gb/s ASK and DPSK modulation formats // ECOCIOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1006 1007, Rimini, 2003.
24. Hayase S. Proposal of 8State per Symbol (Binary ASK and QPSK) 30Gbit/s Optical Modulation / Demodulation Scheme // ECOCIOOC 2003 Proceedings, vol. 4, pp. 1008–1009, Rimini, 2003.

25. Klekamp A. Comparison of FSK by directly modulated DBF laser with DPSK, NRZ and RZ modulation formats at 10 Gb/s // ECOCIOOC, 2004.

26. Golovochenko E.A. Transmission Properties of Chirped Return-to-Zero Pulses and Nonlinear Intersymbol Interference in 10 Gb/s WDM Transmission. / E.A. Golovochenko // OFC'00, paper FC3, Baltimore.

27. Bigo S. What has hybrid phase/intensity encoding brought to 40 Gbit/s ultra longhaul systems? / S. Bigo // ECOCIOOC, 2004. Proceedings, Th2.5.

28 Модуляция символьных и кодовых данных [Електронний ресурс] / Режим доступа: https://studfile.net/preview/3047365/page:6/

29. The phase-shaped binary transmission (PSBT): a new technique to transmit far beyond the chromatic dispersion limit. [Електронний ресурс] / Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/553112.

30. Основы компьютерного моделирования оптических систем различных классов. Учебно-методическое пособие. [Електронний ресурс] / Режим доступа: https://studfile.net/preview/21959367/

31. OptiSystem Getting Started [Електронний ресурс] / Режим доступа: http://optiwave.com/resources/downloads/optisystem-getting-started. — 26.07. 2016.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього рівня магістр
студента групи ТСДМ – 61

Головатюка
Арсенія В'ячеславовича

Київ - 2025

ДУІКТ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Наразі найбільшу роль в зв´язку відіграють широкосмугові телекомунікаційні послуги: Інтернет, мобільний зв'язок, передача телевізійних зображень та інші. Передбачається підвищення швидкості передачі до одиниць Тбіт/с.

Існують технології передачі оптичних сигналів, що дозволяють зробити такий стрибок. Серед них найвідоміша WDM – технологія спектрального ущільнення смуги пропускання оптичного волокна. Ця технологія підвищила вимоги до оптичних параметрів волокна.

Найбільш вагомим параметром при збільшенні швидкості передачі виявляється дисперсія, яка призводить до спотворення імпульсу при передачі його через оптичне волокно.



При проектуванні нових та модернізації існуючих оптичних мереж доцільне проводити компенсацію дисперсії, тому що це дозволяє збільшити довжину ділянки регенерації та підвищити швидкість передачі. Таким чином дослідження дисперсії та методів її компенсації є актуальною задачею.

ДУІКТ 2

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Мета роботи – дослідження явища дисперсії та методів її компенсації, розрахунок основних дисперсійних характеристик.

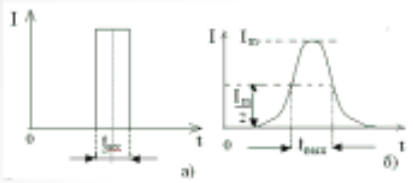
Об'єкт дослідження – оптичні волокна та пристрої і методи компенсації дисперсії в них.

Предмет дослідження – явище дисперсії та методи компенсації дисперсії.

Короткий зміст роботи: у роботі проведений аналіз методів компенсації дисперсії, розглянуто оптичні та електронні методи компенсації; з використанням CAD OptiSystem спроектовано дві системи компенсації дисперсії (граткою Брегга та волокном з від'ємною дисперсією); для кожної системи досягнена прийнятна якість передачі сигналу; показано, що для досягнення найкращої результату необхідно коригувати параметри модуля компенсації, визначивши значення дисперсії в волокні конкретної довжини.

ДИСПЕРСІЯ В ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ

Явище дисперсії в оптичному волокні



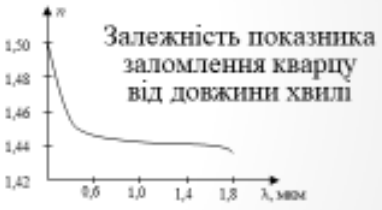
Часове уширення імпульсу

$$\tau(L) = \sqrt[2]{t_{вих}^2 - t_{вх}^2}.$$

Класифікація дисперсії

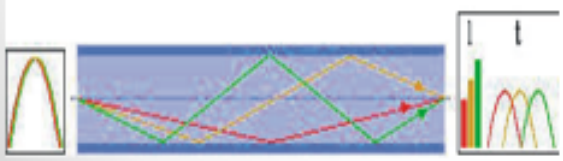


Матеріальна дисперсія

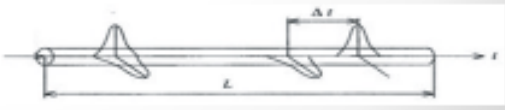


Залежність показника заломлення кварцу від довжини хвилі

Міжмодова дисперсія

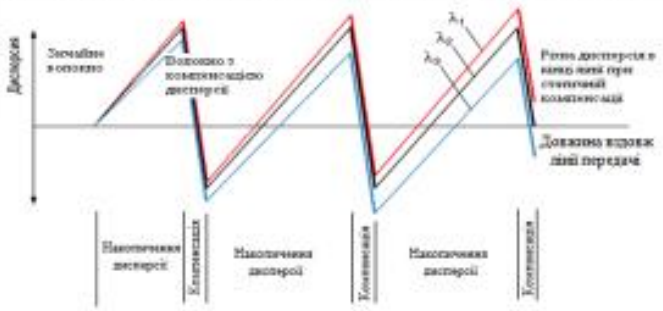


Поляризаційна модова дисперсія

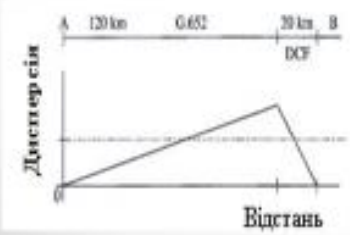


КОМПЕНСАЦІЯ ДИСПЕРСІЇ ОПТИЧНИМИ ВОЛОКНАМИ З ДИСПЕРСІЄЮ ПРОТИЛЕЖНОГО ЗНАКУ

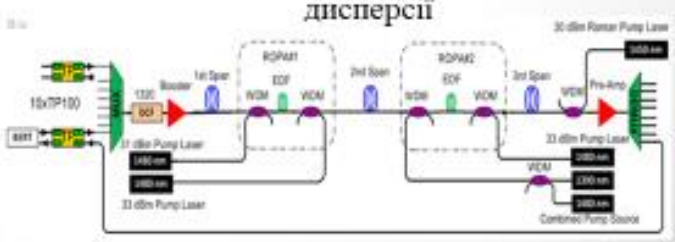
Дисперсійна діаграма ділянки оптичної лінії



Один крок компенсації

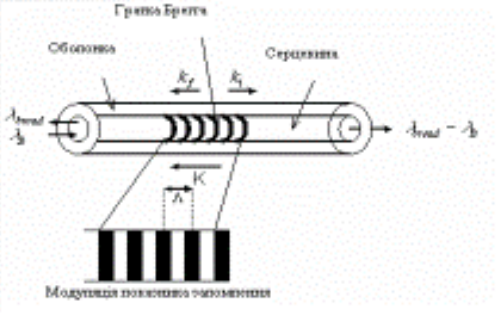


Система передачі WDM з компенсацією дисперсії



КОМПЕНСАЦІЯ ДИСПЕРСІЇ БРЕГІВСЬКОЮ ГРАТКОЮ

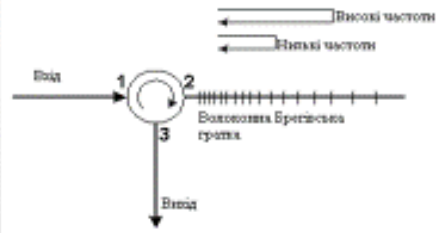
Структура волоконно-оптичної Брегівської гратки



Умова Брега першого порядку

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

Брегівська гратка, що компенсує дисперсію на однієї довжині хвилі



Брегівська гратка, що компенсує дисперсію на трьох довжинах хвиль

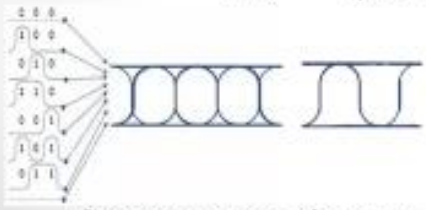


ПОРІВНЯННЯ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ

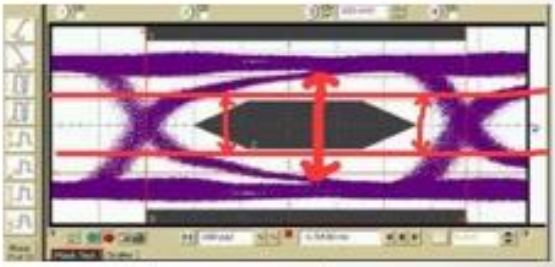
Особливості CAD	Середовища для проектування оптичних мереж			
	Photon Design	VPIphotonics Design Suite	RSoft (Synopsys)	OptiSystem (OptiWave)
Типи компонентів для моделювання	Пасивні (оптичні хвилеводи, фотонні кристали, …)	Активні та пасивні (широка бібліотека компонентів)	Активні та пасивні (різноманітні моделі та елементи)	Велика кількість готових моделей
Моделювання помилок та деградації	-	+	+	+
Симуляція DWDM систем	-	-	+	+

$$BER = \frac{1}{2} \cdot erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{exp\left(-\frac{Q}{4}\right)}{\sqrt{2\pi Q}}$$

- зв'язок коефіцієнта якості Q та BER



Створення око-діаграми



Типова око-діаграма

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ ГРАТКОЮ БРЕГГА



Структурна схема модельного експерименту

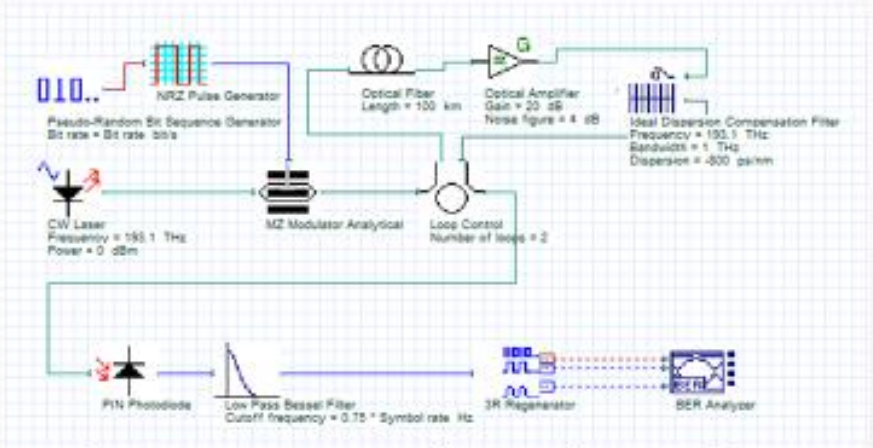
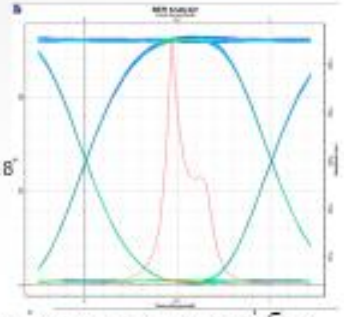


Схема системи компенсації дисперсії граткою Брегга

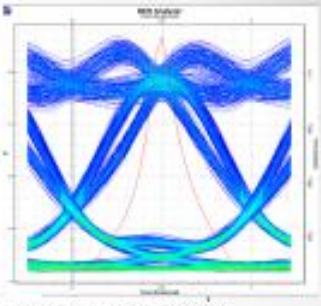
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Q ≈ 9,5;
BER < 1,2 10^{-18}



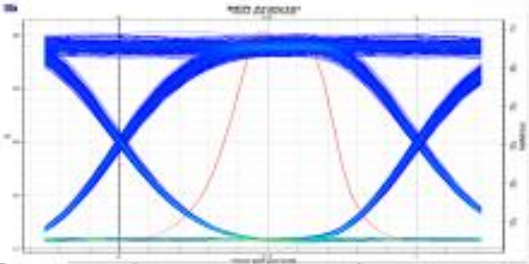
BER та око-діаграма в системі без волокна та компенсатора дисперсії

Q ≈ 6,2;
BER ≈ 9,2 10^{-11}



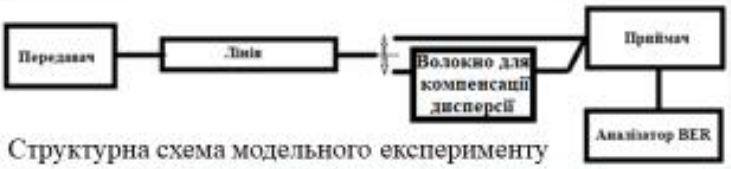
BER та око-діаграма в системі з волокном та компенсатором дисперсії

Q ≈ 7,3;
BER ≈ 5,7 10^{-13}



BER та око-діаграма в системі з налаштованим компенсатором дисперсії

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ ОПТИЧНИМ ВОЛОКНОМ З ВІД'ЄМНОЮ ДИСПЕРСІЄЮ



Структурна схема модельного експерименту

Q ≈ 3,3; BER < 5,7 10^{-4}
Без компенсації

BER = 7,8·10^{-7}, Q = 4,6
Компенсація без розрахунку

BER = 3,4·10^{-13}, Q = 7,35
Компенсація з попереднім розрахунком дисперсії волокна

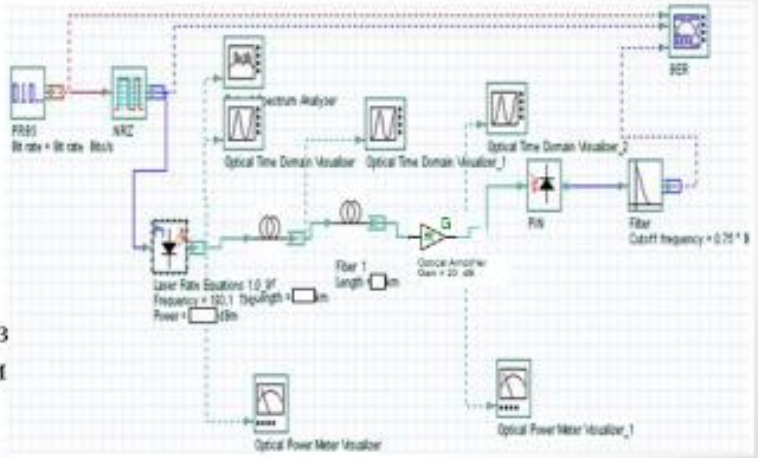


Схема системи компенсації дисперсії волокном з від'ємною дисперсією

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто види дисперсії та причини її виникнення. Проведене дослідження методів компенсації дисперсії, яка має місце в оптичному волокні.

Розглянуто оптичні, електронні та інтегральні методи компенсації дисперсії.

Проведене дослідження застосування складних форматів модуляції, які є стійкими до дисперсійних перекручень.

Проведене моделювання модулю компенсації дисперсії в оптичних мережах з використанням програмного забезпечення - системи автоматизованого проектування OptiSystem. Для компенсації дисперсії обрано два методи, які наразі найбільш застосовуються: гратка Брегга (FBG) та оптичне волокно з від'ємною дисперсією.

Показано, що для досягнення найкращої результату необхідно коригувати параметри модуля компенсації, визначивши значення дисперсії в волокні конкретної довжини.

Результати роботи можуть бути застосовані при проектуванні оптичних систем передачі інформації.

Дякую за увагу.

• • •

Доповідь закінчено.