

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем

«На правах рукопису»
УДК 621.395.49

«До захисту допущено»

ВО завідувача кафедри

_____ Аліна МОШИНСЬКА

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Дослідження методів підвищення перепускної здатності оптичних транспортних мереж»

Виконав:

студент II курсу, групи ТС-11мп
Бовсуновський Дем'ян Романович _____

Керівник:

Доцент кафедри ІКТС, доцент
Носков В. І. _____

Рецензент:

Незалежний експерт з телекомунікацій, к. т. н.
Вахрушев В. П. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (освітня програма) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 («Системи та мережі електронних комунікацій»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ Аліна МОШИНСЬКА

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Бовсуновському Дем'яну Романовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Дослідження методів підвищення перепускної здатності оптичних транспортних мереж»

науковий керівник дисертації доцент кафедри ІКТС Носков В'ячеслав Іванович
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» «__» 202__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації «_06_» «_12_» 2022 р.

3. Об'єкт дослідження – оптична транспортна мережа OTN/OTN

4. Предмет дослідження – комплекс технічних методів, що впливають на перепускную здатність оптичних транспортних мереж

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- 1) Проаналізувати структуру оптичної транспортної мережі, технічні принципи її побудови та визначити проблеми обмеження її перепускної здатності
- 2) Дослідити методи модуляції оптичного сигналу з точки зору їх впливу на перепускную здатність оптичної мультиплексорної секції OTN

- 3) Дослідити вплив параметрів завадостійкого кодування на перепускную здатність оптичної мультиплексорної секції OTN
- 4) Надати пропозиції щодо підвищення перепускної здатності оптичної мультиплексорної секції OTN

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

Слайд №1 «Тема магістерської дисертації»

Слайд № 2 «Актуальність теми»

Слайд № 3 «Мета, об'єкт, предмет досліджень»

Слайд № 4 «Структура транспортної мережі OTN/OTN та її проблеми»

Слайд № 5 «Результати досліджень оптичних підсилювачів»

Слайд № 6 «Результати досліджень впливу параметрів завадостійкого кодування»

Слайд № 7 «Результати досліджень впливу методів модуляції»

Слайд № 8 «Критерії та рекомендації з оптимального вибору комплексу параметрів підсилювача, модуляції та завадостійкого кодування»

7. Дата видачі завдання 11.10.2021 р.

Календарний план

№ з/п	Зміст	Строки виконання
	Вступ	30.11.2022
1	Транспортна мережа як складова частина системи електронних комунікацій	01.01.2022
2	Структура оптичної транспортної мережі OTN/OTN та проблема обмеження перепускної здатності	01.02.2022
3	Дослідження методів модуляції оптичного сигналу в транспортних мережах OTN	01.03.2022
4	Дослідження впливу параметрів завадостійкого кодування на перепускну здатність	31.05.2022
5	Дослідження впливу параметрів оптичного підсилювача на перепускну спроможність OTN	30.09.2022
6	Критерії та рекомендації з оптимального вибору комплексу параметрів підсилювача, модуляції та завадостійкого кодування	31.10.2022
	Висновки	30.11.2022

Студент

(підпис)

Дем'ян БОВСУНОВСЬКИЙ
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В'ячеслав НОСКОВ
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Мета роботи: Дослідження методів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж та пошук найкращої комбінації параметрів різних методів (підсилювачі, модуляція, кодування) для досягнення максимальної пропускної здатності секцій оптичної транспортної мережі.

Актуальність: Відомо, що OTN-мережі базуються на принципах DWDM, і чим більше світлових хвиль використовується, тим більше потенційно може бути пропускна здатність транспортної мережі. Але можлива кількість світлових хвиль обмежується тим, що зі зростанням їх кількості збільшується пік-фактор сумарного світлового потоку, а це може призвести до виникнення комбінаційних складових по причині виходу за межі лінійності амплітудної характеристики оптичних підсилювачів в секціях транспортної мережі. Для уникнення цього необхідно використовувати підсилювачі з великим динамічним діапазоном, або/та зменшувати потужність оптичного сигналу на кожній хвилі. Це, в свою чергу, призводить до зниження співвідношення сигнал/шум в світлових каналах. Для компенсації виникаючих при цьому втрат завадостійкості потрібно використовувати завадостійке кодування. Таким чином, на пропускну спроможність секцій OTN впливають динамічний діапазон підсилювачів, параметри завадостійкого кодування, а також вид модуляції світлового сигналу. Комплексний пошук оптимальних параметрів підсилювачів, параметрів кодування та модуляції представляє собою актуальну задачу, спрямовану на підвищення пропускної здатності секцій OTN і в цілому транспортної мережі.

Об'єкт досліджень: Транспортна мережа OTN/OTN.

Предмет досліджень: комплекс технічних методів, що впливають на пропускну здатність оптичних транспортних мереж

Результати досліджень: В роботі визначені критерії та надані рекомендації щодо комплексу параметрів підсилювачів, модуляції та завадостійкого кодування, які забезпечують максимум перепускної здатності секцій OTN

Висновки: Використання оптичних підсилювачів типу RFA з розширеним динамічним діапазоном та з забезпеченням плоскостної амплітудно-частотної характеристики у поєднанні з багатопозиційною модуляцією та завадостійким кодуванням забезпечує збільшення перепускної здатності оптичних мультиплексорних секцій OTN.

Ключові слова: пропускна здатність, оптичні транспортні мережі, оптичний сигнал, завадостійке кодування, оптичні підсилювачі, модуляція

ABSTRACT

The purpose of the work: Researching methods of increasing the throughput optical transport networks and finding the best combination of parameters various methods (amplifiers, modulation, coding) to achieve the maximum throughput sections of the optical transport network.

Relevance: It is known that OTN networks are based on DWDM principles, and the more light waves are used, the greater the potential bandwidth of the transport network. But the possible number of light waves is limited by the fact that as their number increases, the peak factor of the total light flux increases, and this can lead to the appearance of combinational components due to going beyond the linearity of the amplitude characteristic of optical amplifiers in sections of the transport network. To avoid this, it is necessary to use amplifiers with a large dynamic range, and/or reduce the power of the optical signal at each wave. This, in turn, leads to a decrease in the signal/noise ratio in light channels. In order to compensate for the resulting loss of immunity, it is necessary to use immunity coding. Thus, the bandwidth of OTN sections is affected by the dynamic range of amplifiers, parameters of interference-resistant coding, as well as the type of light signal modulation. Complex search for optimal parameters of amplifiers, coding and modulation parameters is an urgent task aimed at increasing the bandwidth of OTN sections and the transport network as a whole.

Object of research: OTN/OTH transport network.

Subject of research: Complex of technical methods which impact on optical transport network bandwidth.

Research results: The work defined criteria and provide recommendations for a set parameters of amplifiers, modulation and interference-resistant coding, which ensure the maximum bandwidth of OTN sections.

Conclusions: Using of RFA optical amplifier with extended dynamical range and flat amplitude-frequency characteristic in combination with high level modulation and interference-resistant coding provide OTN OMS bandwidth increasing.

Key words: bandwidth, optical transport networks, optical signal, interference-resistant coding, optical amplifiers, modulation

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	13
1 ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	14
1.1 Функції та місце транспортної мережі в телекомунікаційній системі	14
1.1.1 Класифікація телекомунікаційних мереж	14
1.1.2 Складові телекомунікаційних мереж	15
1.2 Висновки до розділу 1	17
2 ОПТИЧНА ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА OTN/OTN	18
2.1 Історія виникнення та особливості оптичної транспортної мережі як інтегруючої транспортної платформи.....	18
2.2 Терміни та визначення в OTN-OTN.....	18
2.3 Структура цифрової оптичної транспортної мережі.....	20
2.4 DWDM як шлях до практично необмеженої перепускної спроможності відповідно до вимог довгострокової перспективи. Принципи та проблеми	23
2.5 Мультиплексування в OTN. Інформаційні структури OTN-OTN	26
2.6 Методи модуляції оптичних несучих та їх вплив на перепускну спроможність OTN.....	29
2.7 Висновки до розділу 2	42
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ ЯК МЕТОДА ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ OTN.....	43
3.1. Класифікація завадостійких кодів.....	43
3.2. Ітеративні блокові коди	44
3.3 БЧХ-коди та коди RS (Ріда-Соломона).....	47
3.4 Простий потоковий код Фінка-Хегельбергера.....	49
3.5 Розширений код Фінка-Хегельбергера	50

	10
3.6 Загальні засади кодування для «згорткових» кодів.....	52
3.7 Напрямки реалізації потокового декодування.....	55
3.8 Висновки до розділу 3	57
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ПІДСИЛЮВАЧА НА ПЕРЕПУСКНУ СПРОМОЖНІСТЬ OTN.....	58
4.1 Домішні підсилювачі оптичного випромінювання	61
4.2 Оптичні підсилювачі на ефекті вимушеного комбінаційного (раманівського) розсіювання.....	73
4.3 Напівпровідникові оптичні підсилювачі (НПОП).....	85
4.4 Висновки до розділу 4	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ASE	Amplified Spontaneous Emission
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BOA	Booster Optical Amplifier
BPSK	Binary Phase Shift-Keying
COMMS	General management communications
CSF	Client Signal Fail
DCF	Discrete Raman Amplifier
DRA	Distributed Raman Amplifiers
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EAMs	Electro-Absorption Modulators
EDRA	Erbium Doper Raman Amplifier
GEF	Gain Equalising Filters
ITU	International Telecommunication Union
LPF	Low-Pass Filter
MQW	Multiple Quantum Well
MZ	Mach- Zehnder
NGN	New Generation Networks
NRZ	Non Return to Zero
ODU	Optical Data Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OH	OverHead
OMS	Optical Multiplex Section
ONNI	Optical Transport Network Node Interface
OPU	Optical Payload Unit
OTH	Optical Transport Hierarchy
OTM	Оптичний Транспортний Модуль

OTN	Optical Transport Network
OTS	Optical Transport sSection
OTU	Optical Transport Unit
OCh	Optical Channel
PDM	Polarization-Division Multiplexing
PLC	Planar Lightwave Circuits
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadra-Phase-Shift-Keying
RZ	Return to Zero
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
STM	Synchronous Transport Module
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ВОП	Волоконно-оптичні підсилювачі
ВОСП	Волоконно Оптичні Системи Передачі
НПОП	Напівпровідникові оптичні підсилювачі

ВСТУП

В усі часи людської цивілізації була необхідність обмінюватись інформацією не тільки у вузькому колі, а й глобально, на далекі відстані. З плином часу методи передачі інформації покращувались й визначним етапом стала друга половина ХХ століття, коли була винайдена телекомунікаційна транспортна мережа. На сьогоднішній день передача даних по оптичному волокну є найкращим варіантом.

В наші дні люди вже передають не тільки важливу інформацію, а й якісь буденні переживання, тому передаваний трафік зростає кожного дня. Для подолання цієї задачі необхідно неабияка пропускна здатність каналу мережі, тому з'являться нові технології.

Також із розвитком технологій постала необхідність об'єднувати їх в один канал, аби не будувати кожного разу нову мережу, а просто модернізувати існуючу. На сьогоднішній день, найбільш відповідною до усіх вимог є технологія OTN-OTN (Optical Transport Network - Optical Transport Hierarchy), за допомогою якої можна передавати різні сигнали по одній мережі.

Але й простого використання цієї технології недостатньо, необхідно ще звернути увагу на пропускну здатність каналу й на фактори, які впливають на неї. Основними такими факторами є модуляція сигналів, кодування сигналів й використання відповідного обладнання, зокрема оптичних підсилювачів.

1 ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

1.1 Функції та місце транспортної мережі в телекомунікаційній системі

[3]Для початку необхідно визначити, що таке телекомунікаційна система та транспортна телекомунікаційна мережа. Згідно з КМ України, Постановою КМ "Про затвердження Порядку взаємодії органів виконавчої влади з питань захисту державних інформаційних ресурсів в інформаційних та телекомунікаційних системах" від 16.11.2002 N 1772 телекомунікаційна система – це сукупність технічних і програмних засобів, призначених для обміну інформацією шляхом передавання (випромінювання) або приймання сигналів, знаків, звуків, рухомих чи нерухомих зображень або іншим способом. А транспортна телекомунікаційна мережа – це мережа, що забезпечує передавання знаків, сигналів, письмового тексту, зображень та звуків або повідомлень будь-якого роду між підключеними до неї телекомунікаційними мережами доступу, відповідно до ВР України, Закон "Про електронні комунікації" від 16.12.2020 N 1089-IX.

1.1.1 Класифікація телекомунікаційних мереж

Телекомунікаційні мережі можуть бути класифіковані за географічним положенням таким чином:

- Локальна мережа (Local Area Network, LAN) — розташована в межах будинку.
- Глобальна мережа (Wide Area Network, WAN) — охоплює географічний регіон (країну або континент).
- Міська мережа (Metropolitan Area Network, MAN) — застосовується для об'єднання мереж в місті в одну велику мережу.

- Internet — індивідуальні комп'ютери під'єднані до інших мереж у світі через публічну мережу (мережу загального користування).
- Intranet — індивідуальні комп'ютери під'єднані до інших мереж через приватну мережу.
- Віртуальна приватна мережа (Virtual Private Network, VPN) — індивідуальні комп'ютери під'єднані до інших мереж через сегмент публічної мережі

За призначенням можна виділити такі мережі:

- Мережі доступу - нижній рівень ієрархії телекомунікаційної мережі. До цієї мережі підключаються кінцеві (термінальні) вузли — обладнання, встановлені у користувачів (абонентів, клієнтів) мережі.
- Транспортні мережі - мережі, що забезпечують передавання знаків, сигналів, письмового тексту, зображень та звуків або повідомлень будь-якого роду між підключеними до неї телекомунікаційними мережами доступу.
- Мережі вузлів – мережі, що забезпечують достовірний напрямок передавання сигналів.
- Мережі надання послуг – мережі, що підтримують роботоздатність абонентських сервісів.

1.1.2 Складові телекомунікаційних мереж

Всі сучасні телекомунікаційні мережі складаються з п'яти основних компонентів, які присутні в кожному мережевому середовищі, незалежно від типу чи використання. Ці основні компоненти включають в себе:

- термінали — є вихідними і кінцевими пунктами у будь-якому середовищі телекомунікаційної мережі. Будь-який вхід або вихід пристрою,

який використовуються для передачі або прийому даних може бути класифікований як термінал компонента;

- телекомунікаційні процесори підтримують передачу і прийом даних між терміналами та комп'ютерами, шляхом надання різних функцій керування та допоміжних функцій (наприклад, перетворення даних з цифрового в аналоговий і навпаки);

- телекомунікаційні канали — шлях, по якому дані передаються і приймаються дані. Телекомунікаційні канали створюються за допомогою різних фізичних носіїв, з яких найпопулярнішими є мідні дроти і коаксіальний кабель (СКС). Волоконно-оптичні кабелі все частіше використовуються для більш швидкого і надійного зв'язку, як для бізнесу, так і домашніх потреб;

- комп'ютери;

- програмне забезпечення керування телекомунікаціями присутнє на всіх комп'ютерах мережі і відповідає за контроль мережевої активності та функціональності.

Загалом, кожна телекомунікаційна мережа концептуально складається з трьох частин, або площин (різного рівня, тому що вони можуть розглядатися, і часто є, частиною більш складної мережі):

- В площині керування здійснюється передача керуючої інформації (також відомої як сигналізація).

- Площина даних або площина користувача або площина пред'явника несе трафік користувачів мережі.

- Керування трафіком здійснюється в площині операцій.

Телекомунікаційні транспортні мережі повинні відповідати таким критеріям:

- Високий рівень технічної експлуатації – використання функціоналу ОАМ (Operating, Administration and Maintenance)

- Мінімально можлива затримка сигналів
- Коефіцієнт готовності 0,99999
- Рівень бітових помилок – $10^{-11} \dots 10^{-12}$
- Час відновлення за рахунок системи резервування ≤ 50 мс



Рисунок 1.2 – Вимоги до транспортних мереж

1.2 Висновки до розділу 1

В розділі було визначено, що таке телекомунікаційна система та телекомунікаційна транспортна мережа. Також було розглянуто, як можна класифікувати телекомунікаційні мережі та з яких компонентів вони складаються, та яким критеріям вони мають відповідати.

2 ОПТИЧНА ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА OTN/OTH

2.1 Історія виникнення та особливості оптичної транспортної мережі як інтегруючої транспортної платформи

Створена наприкінці 80-х років минулого сторіччя технологія SDH достатньо тривалий час забезпечувала потреби транспортування трафіку, переважно телефонного, однак з початку 2000 років відмічається бурхливе зростання трафіку передачі даних, що призвело до модернізації технології SDH під нові потреби (технологія NGSDH), проте, наприкінці 2000 років пропускну здатність SDH, обмеженої в 40 Гбіт/с стало недостатньо. Подальше збільшення пропускну здатності SDH за рахунок вводу в дію ще одного рівня ієрархії швидкостей STM1024 (160Гбіт/с) виявилось вельми проблематичним по причині суттєвого впливу хроматичної дисперсії на форму світлового імпульсу при такій швидкості, тому збільшення пропускну здатності відбувалось за рахунок використання технології хвильового мультиплексування (WDM). При цьому у волокні організуються до 80 світлових каналів (для щільного WDM-DWDM) для незалежної передачі цифрових потоків від мереж, які використовують різноманітні технології (SDH, ATM, Ethernet, IP/MPLS...).

2.2 Терміни та визначення в OTN-OTH

OTN (Optical Transport Network) – оптична транспортна мережа

OTH (Optical Transport Hierarchy) – оптична транспортна ієрархія

Оптичний канал – частина комунікаційної системи, яка зв'язує між собою джерело та отримувача сигналу.

Оптичний мультиплексор/демультиплексор – прилади, які призначені для об'єднання/розділення інформаційних каналів.

Оптичний підсилювач – пристрій, який підсилює потужність сигналу.

Оптична мультиплексійна секція – секція в якій відбувається мультиплексування/демультиплексування (об'єднання/розділення) оптичних сигналів.

Оптична передавальна секція – секція по якій передається сигнал по оптичному каналі.

Транспондер – пристрій, який перетворює оптичні сигнали з однієї вхідної довжини хвилі в іншу вихідну довжину хвилі, відповідну до системи.

Рівень OPU (Optical Payload Unit) – блок користувацьких даних оптичного каналу. Відповідає за доставку даних між користувацькими мережами. Функції:

- Інкапсуляція користувацьких даних, таких систем як SDH, Ethernet, ATM, Fiber Chanel... у блоки OPU
- Узгодження бітових швидкостей передачі користувацьких даних і блоків OPU

В залежності від швидкості передачі даних передбачені блоки OPU1, OPU2 та OPU3. Для виконання своїх функцій блок OPU додає до користувацьких даних свій заголовок OPU OH (OverHead). Блоки OPU не модифікуються мережею

Рівень ODU (Optical Data Unit) – блок даних оптичного каналу. Працює між кінчними вузлами мережі OTN. В його функції входить:

- Мультиплексування і демупльтиплексування блоків OPU
- Підтримка функції моніторинга якості з'єднання в мережі OTN

Формуються блоки ODU шляхом додавання до блоків OPU свого заголовка.

Рівень OTU (Optical Transport Unit) – транспортний блок оптичного каналу. Працює між двома сусідніми вузлами мережі OTN, які підтримують функції регенерації оптичного сигналу, також називаємі функціями 3R (Re-timing, Re-shaping та Re-amplification). Основним призначенням цього рівня – це

контроль і виправлення помилок за допомогою кодів FEC. Блок OTUk створюється шляхом додавання до блоку ODUk закінчення, що містить код FEC. Блоки OTUk передаються безпосередньо в оптичному каналі.

2.3 Структура цифрової оптичної транспортної мережі

Мережа наступних поколінь – це мережа з пакетною комутацією, придатна для надання послуг електрозв'язку і для використання декількох широкосмугових технологій транспортування із включеною функцією QoS, у якій пов'язані з обслуговуванням функції не залежать від застосованих технологій, що забезпечують транспортування. Забезпечує вільний доступ користувачів до мереж і конкуруючих постачальників послуг/або обраними ними послугам. Підтримує універсальну мобільність, яка забезпечує постійне і повсюдне надання послуг зв'язку.

Для задоволення вимог архітектура мережі NGN передбачає використання зв'язаних між собою кількох груп функцій, взаємодія між якими визначає функціональну архітектуру мережі. Вона включає наступні принципи:

- 1) підтримка декількох технологій доступу з метою формування гнучкості на мережах доступу;
- 2) розподілене керування;
- 3) відкрите керування, яке потребує відкритості обладнання контролю мережі для можливості створення послуг, відновлення та можливості підключення сервісних послуг третіми особами;
- 4) покращений захист і безпека, як базовий принцип відкритої архітектури для захисту інфраструктури мережі.

Однією з вимог NGN є зв'язність – прямо або за допомогою інших мереж (рис. 2.1 зв'язність мережі NGN). Дана схема передбачає використання наступних стандартних інтерфейсів.

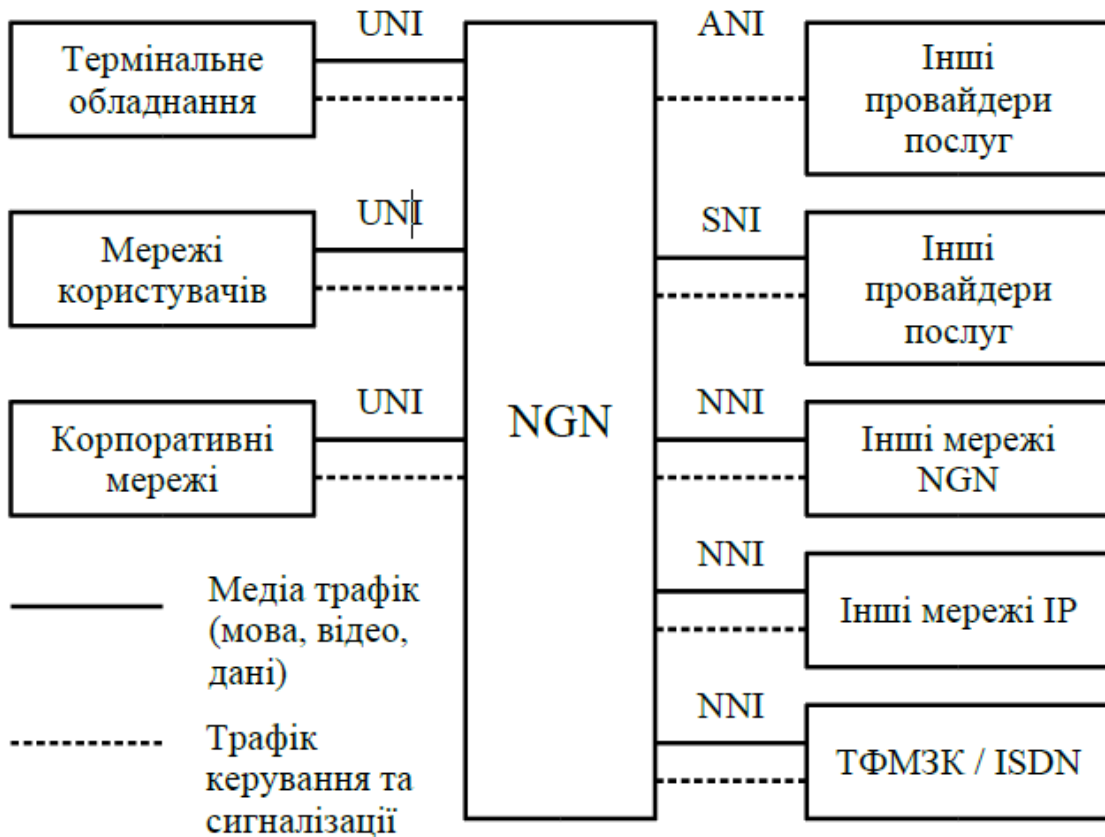


Рисунок 2.1 - Зв'язність мережі NGN

Інтерфейс користувач – мережа (User – network interface, UNI) використовується для підключення до термінального обладнання, корпоративних мереж або мереж користувачів.

Інтерфейс мережа – мережа (Network – network interface, NNI) використовується для підключення NGN до інших мереж NGN (на рівні послуг або транспорту), існуючих мереж на базі IP протоколу.

Інтерфейс додаток – мережа (Application – network interface, ANI) служить для організації обміну між NGN і додатками, які виконуються на обладнанні сторонніх провайдерів.

Мережний інтерфейс послуг (Service network interface, SNI) забезпечує канал обміну та взаємодії між NGN та іншими провайдерами.

Функції NGN поділяються на функції рівня послуг, рівня керування та рівня транспорту (рис. 2.2 розподіл функцій надання послуг і транспорту в NGN).

Завдяки транспортному рівні забезпечуються наступні з'єднання: користувач – користувач, користувач – платформа надання послуг (сервісна платформа) і сервісна платформа – сервісна платформа.

У загальному випадку, на транспортному рівні можуть бути використані типи технологій передачі згідно з рекомендаціями ITU G.805 і G.809:

- 1) з встановленням з'єднання та комутацією каналів (connection-oriented circuit-switched, CO-CS);
- 2) з встановленням з'єднання та комутацією пакетів (connection-oriented packet-switched, CO-PS);
- 3) без встановлення з'єднання та комутацією пакетів (connectionless packet-switched, CLPS).

За допомогою протоколу IP здійснюється обмін даними, керування і сигналізація.

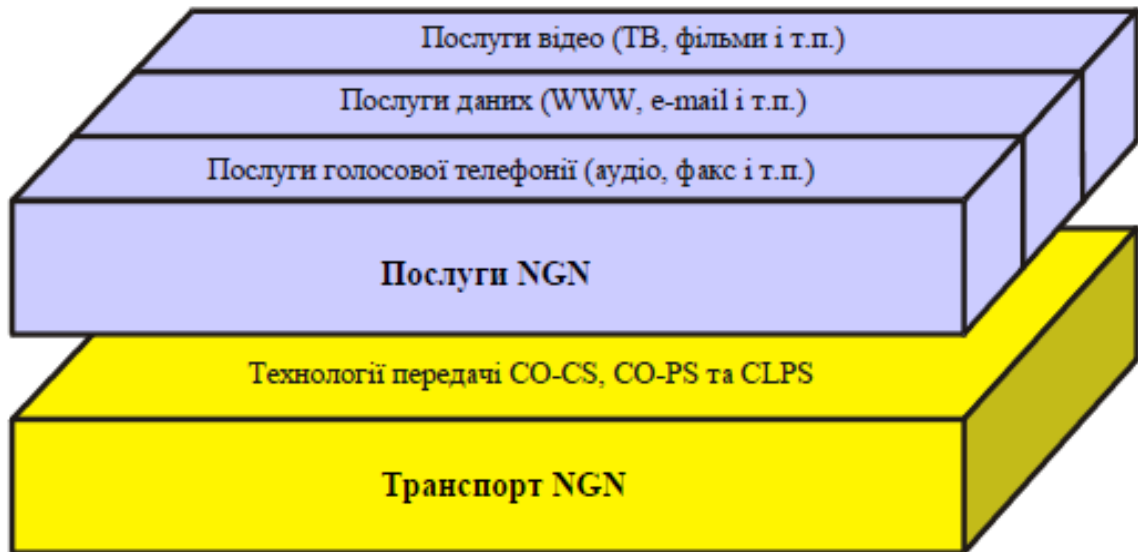


Рисунок 2.2 - Розподіл функцій надання послуг і транспорту в NGN

Крім відповідних функцій, обидва ці рівні включають функції керування і контролю. Тому в літературі з NGN часто описується трирівнева модель мережі. Слід враховувати, що функції рівня транспорту реалізуються обладнанням транспортної мережі (транспортного ядра NGN) і мереж доступу. Тому рівень транспорту розділяється на два підрівні: транспортного ядра і доступу. У випадку виділення цих підрівнів у якості окремих рівнів, отримуємо чотирирівневу архітектуру мережі NGN: рівень транспорту, доступу, надання послуг і керування.

2.4 DWDM як шлях до практично необмеженої пропускної спроможності відповідно до вимог довгострокової перспективи. Принципи та проблеми

Спектральне ущільнення каналів передачі, або ущільнення за довжинами хвиль (Wavelength Division Multiplexing, WDM) — технологія, яка дає змогу одночасно передавати декілька незалежних інформаційних каналів оптичним волокном, використовуючи оптичні несучі з різними довжинами хвиль. Технологія WDM дає змогу істотно збільшити пропускну здатність оптичного волокна за рахунок використання всієї його оптичної смуги пропускання.

Характерною особливістю і суттєвою перевагою WDM технології є можливість реалізації в одному оптичному волокні багатьох оптично прозорих каналів, в кожному з яких можна вести передачу сигналів з будь-яким форматом. Таким чином, одним оптичним волокном можна одночасно передавати синхронні, асинхронні і аналогові сигнали, і немає потреби в єдиній структурі сигналів, як це є, наприклад, в системах із часовим ущільненням каналів передачі.

DWDM (Dense WDM) – це щільні WDM системи з шириною каналу не меншого 100 ГГц, що дають змогу мультиплексувати не більше 32 каналів.

Оптичні компоненти DWDM дозволяють збільшити пропускну здатність ВОСП СР за рахунок одночасної передачі декількох сигналів на різних довжинах хвиль по спільному волокну, а також забезпечують вод/вивід та крос-комутацію оптичних каналів.

Структурна схема ділянки мережі DWDM показана на рис. 2.3

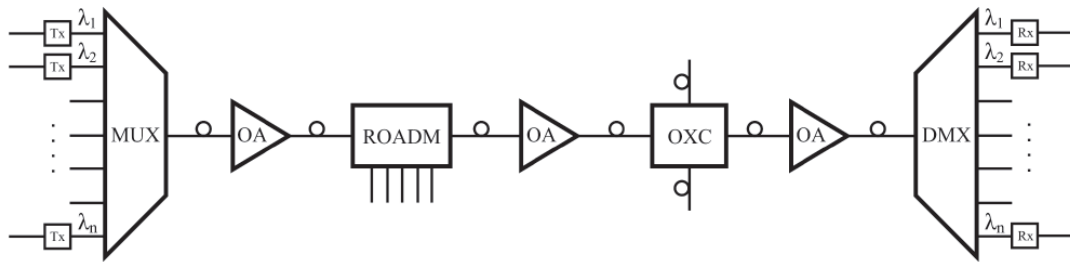


Рисунок 2.3 – структурна схема ділянки мережі DWDM

Оптичний мультиплексор (MUX) – об’єднує сигнали різних довжин хвиль, що генеруються «кольоровими» оптичними передатчиками інтерфейсів SDH, GE, 10 GE і транспондерів, в багатоканальний складовий оптичний сигнал, який далі поширюється через оптичне волокно.

Оптичний демультиплексор (DMX) – виконує поділ по довжині хвилі складеного оптичного сигналу на каналні оптичні сигнали, на дальньому кінці мультиплексної секції.

Реконфігуровані оптичні мультиплексори вводу/виводу (ROADM) - забезпечують можливість програмно вводити і виділяти будь-яку комбінацію оптичних каналів з напрямків, що сходяться у вузлі оптичної мережі.

Оптичні крос-комутатори (OXC) - організовуються в найбільш завантажених вузлах мережі, де сходяться три і більше напрямків. Вони виконують крос-комутацію оптичних каналів між різними напрямками, тобто дозволяють перенаправляти (маршрутизувати) оптичні канали з нових напрямків.

Компенсатори хроматичної дисперсії (DC) - вводять до складу лінійного тракту DWDM для корекції форми імпульсів цифрового сигналу.

Оптичні підсилювачі (OA): вихідні, попередні і лінійні - встановлюються в лінійному тракту DWDM при великій довжині оптичної мультиплексної секції. Вони забезпечують компенсацію втрат в оптичному волокні і в пасивних компонентах DWDM.

Пасивними компонентами є: оптичні мультиплексори і демультимплексори, оптичні мультиплексори вводу/виводу, оптичні крос-комутатори і компенсатори хроматичної дисперсії.

Оптичні компоненти систем DWDM працюють на стандартизованих частотах відповідно до частотного плану ITU-T G.694.1.

Технологія DWDM виявилася незамінною на магістральних і внутрішньозонових мережах зв'язку, в яких необхідно передавати величезні потоки інформації на великі відстані, що вимагають застосування оптичних підсилювачів.

До переваг технології DWDM можна віднести:

- високу перепускную спроможність (до 3,2 Тбіт/с);
- незалежність технологій передачі у кожному світловому каналі та підсилення всіх світлових сигналів одним підсилювачем.

Але вона також має низку недоліків, таких як:

- взаємні завади між світловими каналами передачі і вимоги до обмеження потужності світлових передавачів в наслідок великого пік-фактору сумарного сигналу;
- часто неефективно використовуються оптичні канали по причині неможливості мультиплексування декількох цифрових потоків в одному оптичному каналі передачі;
- відсутня єдина для всіх оптичних каналів передачі система управління та моніторингу;

- відсутня система резервування оптичних каналів передачі;
- неможливість контролю якості оптичних каналів передачі без переривання з'єднання;
 - відсутність системи автоматичного захисного перемикування (Automatic Protection Switching, APS);
 - неможливість оперативного усунення аварійних ситуацій внаслідок відсутності секціонування траси оптичного каналу передачі;
 - неможливість побудови системи керування мережею.

2.5 Мультиплексування в OTN. Інформаційні структури OTN-OTN

Оптична транспортна мережа OTN (Optical Transport Network) складається із сукупності елементів оптичної мережі, з'єднаних оптоволоконними лініями, і здатними виконувати функції з транспортування, мультиплексування, маршрутизації, керування, контролю та забезпечення живучості оптичних каналів, які транспортують сигнали користувачів. Елементи оптичної мережі обладнані інтерфейсами вузла оптичної транспортної мережі ONNI (optical transport network node interface) для зв'язку між собою.

Оптична транспортна ієрархія OTN (Optical transport hierarchy) – це ієрархічна група транспортних рівнів, відповідних їм інформаційних структур, алгоритмів формування та обробки, яка стандартизована для передавання корисного навантаження в мережі OTN.

Елемент оптичної мережі ONE (Optical Network Element) – це фрагмент мережного елемента, який містить функції оброблення трафіка між одним або кількома рівнями мережі OTN. Може бути автономним фізичним модулем або частиною мережного елемента.

Функціонування OTN здійснюється згідно з набором Рекомендацій ITU,

- які регламентують:

- архітектурні аспекти (ITU-T G.872);
- характеристики функціонування елементів (ITU-T G.798);
- модель керуючої інформації (ITU-T G.875);
- аспекти обслуговування устаткування (ITU-T G.874);
- характеристики фізичного шару (ITU-T G.664, G.959.1);
- інформаційні структури й відображення (ITU-T G.709).

Рекомендаціями G.709 і G.798 передбачена ієрархічна структура інтерфейсів мережі OTN, побудована за стандартною архітектурою "клієнт - сервер" (її спрощений варіант показаний на рис. 2.4 інтерфейси мережі OTN). Вона містить ряд рівнів обробки сигналу в оптичній та електричній формі. За аналогією з SDH, в OTN для моніторингу стану та керування трасою передаванням сигналу користувача, виконується її секціонування згідно з рис. 2.5 секціонування траси оптичного каналу в OTN.

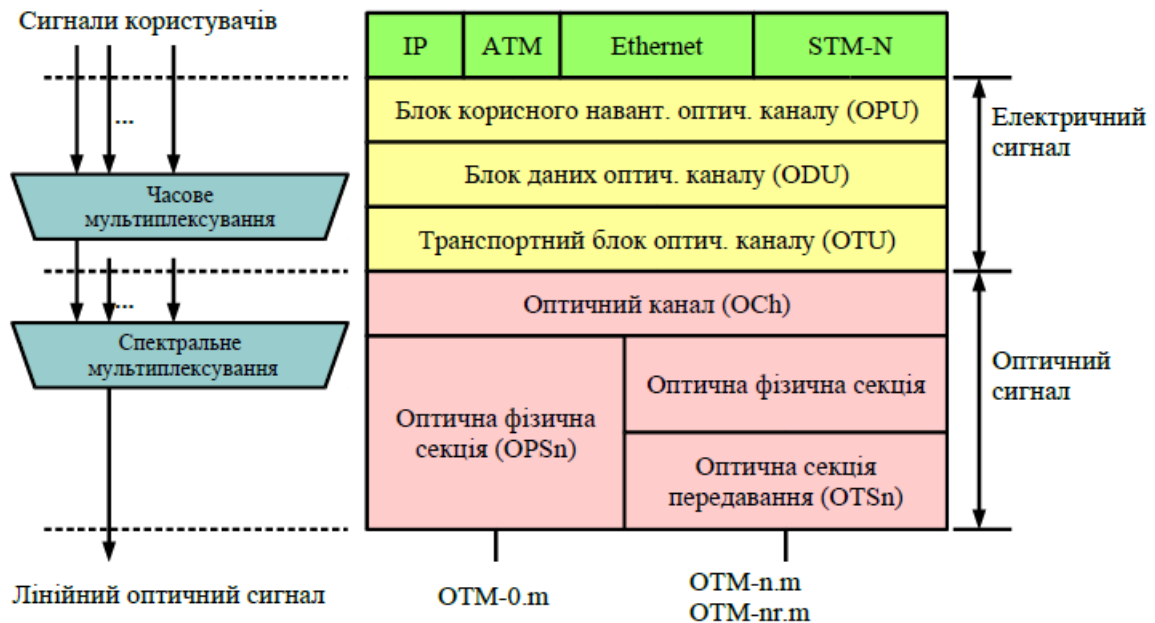


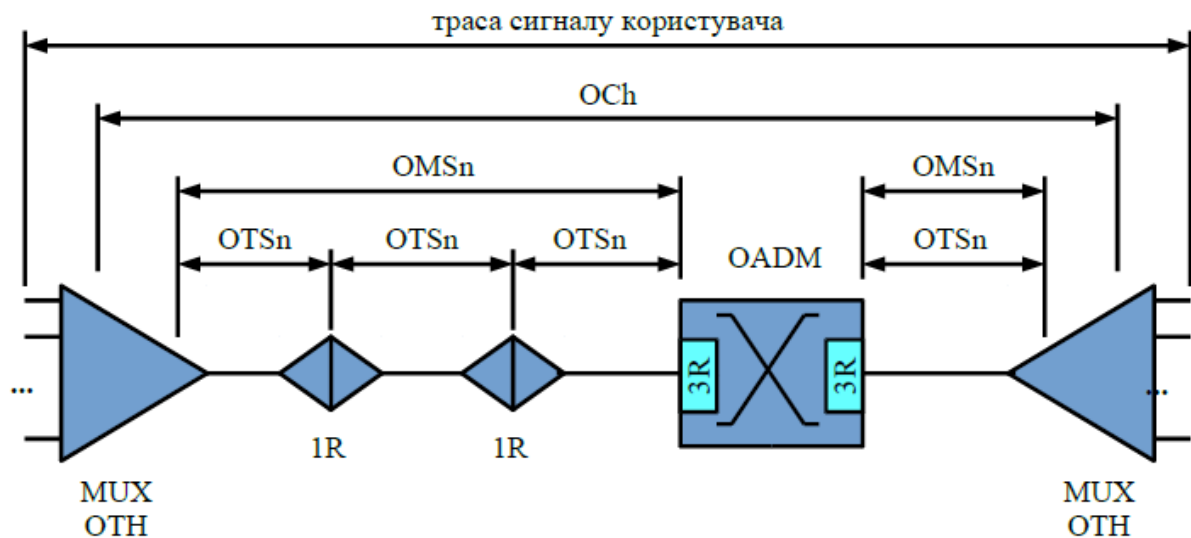
Рисунок 2.4 - Інтерфейси мережі OTN

З метою покращення показника ефективності використання середовища розповсюдження, формування групового сигналу виконується двома етапами:

1) часове мультиплексування кількох трибутарних сигналів в один блок оптичного каналу OCh, на цьому етапі з одного або кількох вхідних сигналів формується агрегований інформаційний потік зі швидкістю до 100 Гбіт/с;

2) спектральне мультиплексування сигналів кількох оптичних каналів в один оптичний транспортний модуль OTM з повною або обмеженою функціональністю.

Детальніше розглянемо призначення рівнів та інформаційних структур OTN.



- 1R – оптичний підсилювач;
- 3R – регенератор;
- OCh – оптичний канал;
- MUX OTN – мультиплексор OTN;
- OADM – оптич. мультиплексор введення-виведення;
- OMSn – оптична мультиплексорна секція;
- OTSn – оптична транспортна секція

Рисунок 2.5 - Секціонування траси оптичного каналу в OTN

Блок корисного навантаження оптичного каналу OPUk (Optical channel payload unit) - це інформаційна структура, що використовується для адаптації інформації користувача з метою подальшого її транспортування по оптичному

каналу. Складається із заголовка та інформаційного поля. Як навантаження може бути асинхронний (трафік Ethernet/IP/ATM) або синхронний (STM-N). Поточна Рекомендація ITU G.709 припускає формування OPUk чотирьох рівнів ієрархії ($k = 1, 2, 3, 4$). OPUk високого рівня ($k > 1$) може містити один трибутарний сигнал відповідної швидкості або кілька OPU нижніх рівнів. [3]

2.6 Методи модуляції оптичних несучих та їх вплив на перепускную спроможність OTN

У когерентних оптичних системах передачі на швидкостях від 40 Гбіт/с та вище до відомих рішень 1 Тбіт/с використовується виключно зовнішня модуляція оптичного випромінювання електричним впливом на середовище розповсюдження цього випромінювання. При цьому електричний модулюючий сигнал має, як правило, двійкове подання у форматах RZ або NRZ (рис. 2.6), а оптичний сигнал у середовищі модуляції може мати безперервний характер чи бути представленим оптичними імпульсними посилками.

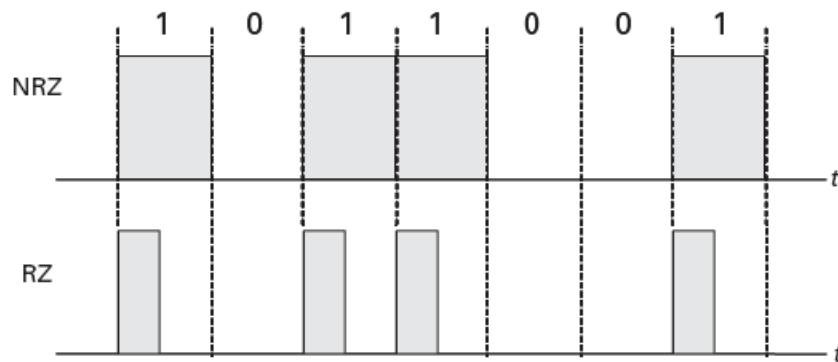


Рисунок 2.6 - Формати електричних сигналів для модуляції

випромінювання: NRZ – Non Return to Zero – кодування без повернення до нуля,

RZ – Return to Zero – повернення до нуля

Параметрами модуляції оптичного випромінювання можуть бути: інтенсивність оптичного випромінювання (дворівневі, трирівневі, n-рівневі); фазові стани оптичних імпульсних посилок (бінарні, квадратурні, 8-ми позиційні і т. д.); частотні стани (2-х частотні, 4-х частотні тощо); поляризаційні стани (однополяризаційні, двополяризаційні і т. д.); змішані стани оптичного сигналу при модуляції, тобто поєднання вище вказаних.

Залежно від параметрів модуляції будуються схеми зовнішніх оптичних модуляторів, які, у свою чергу, базуються на різних електричних і оптичних ефектах, наприклад, ефект Франца-Келдиша у зворотному напрямку зміщеному (замкненому) p-n-переході або електрооптичний ефект Поккельсу в анізотопних оптичних кристалах ніобату літію (LiNbO_3), нелінійний ефект Керра та ін.

Для реалізації щодо простої зовнішньої модуляції інтенсивності оптичного випромінювання застосовуються електроабсорбційні модулятори (Electro-Absorption Modulators, EAMs), і модулятори Маха-Зендера (Mach-Zehnder, MZ), що вбудовуються (інтегруються) у схеми з джерелами випромінювання (рис. 2.7, 2.8, 2.9, 2.10).

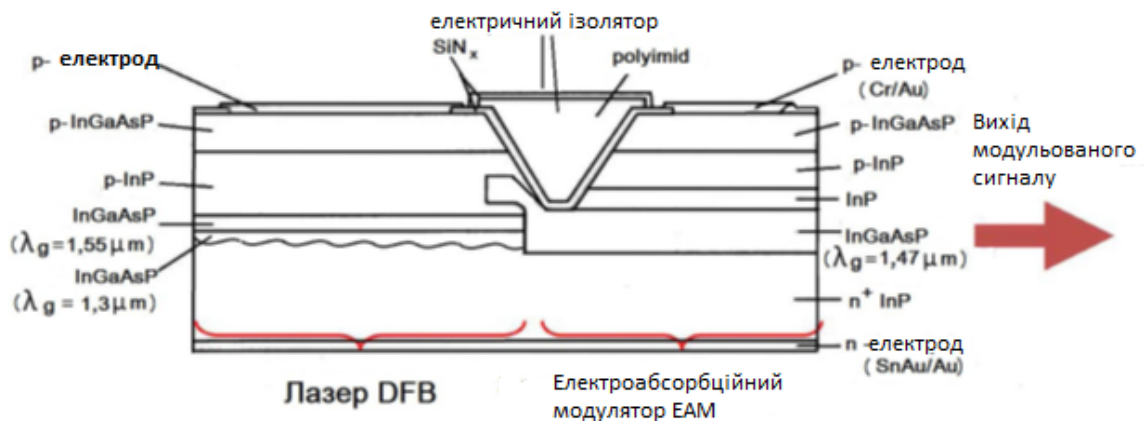


Рисунок 2.7 - Структура лазера із модулятором EAM

У модулі з EAM модуляція випромінювання інтенсивності (потужності на одиницю площі) походить від зміни напруженості електричного поля в шарі

InGaAsP EAM рис. 2.7 структура лазера із модулятором EAM, що примикає до аналогічного шару з бреггівськими ґратами лазера DFB. Електричний струм, що пропускається через конструкцію DFB, породжує одномодове вузькосмугове когерентне випромінювання, яке майже безперешкодно проникає в широкий шар середовища, прозорість якої залежить від величини напруженості електричного поля в обернено зміщеному або замкненому р-п-переході EAM (рис. 2.8 діаграма модуляції). Електричний струм через середовище модулятора не протікає, а випадковий струм від лазера DFB відсікається ізолятором. При цьому смуга частот модуляції визначається міжелектродною ємністю, власною ємністю замкненого р-п-переходу та опором ланцюга модулюючого сигналу. Контроль випроміненої потужності лазера проводиться за допомогою фотодіода PD.

У модулі з MZM модуляція інтенсивності випромінювання або фази випромінювання походить від зміни напруженості електричного поля між електродами одного або двох хвилеводних каналів (рис. 2.9, 2.10, 2.11), виконаних у підкладці з електрооптичного матеріалу (найчастіше з ніобату літію, що позначається LiNbO₃ або LN). Електричне поле в електрооптичному матеріалі впливає на коефіцієнт заломлення, тобто на швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі у хвилеводі. Це сприяє зміні фаз хвиль у двох паралельних каналах, тобто електромагнітна хвиля зі входу порівну розділена гілкою 1×2 (Y-спрямований розгалужувач), що пройшла з різною швидкістю в паралельних хвилеводах, складається в об'єднувачі 2×1 (Y-спрямований об'єднувач) з різницею фаз від 0 до 1800 або від 0 до π радіан.

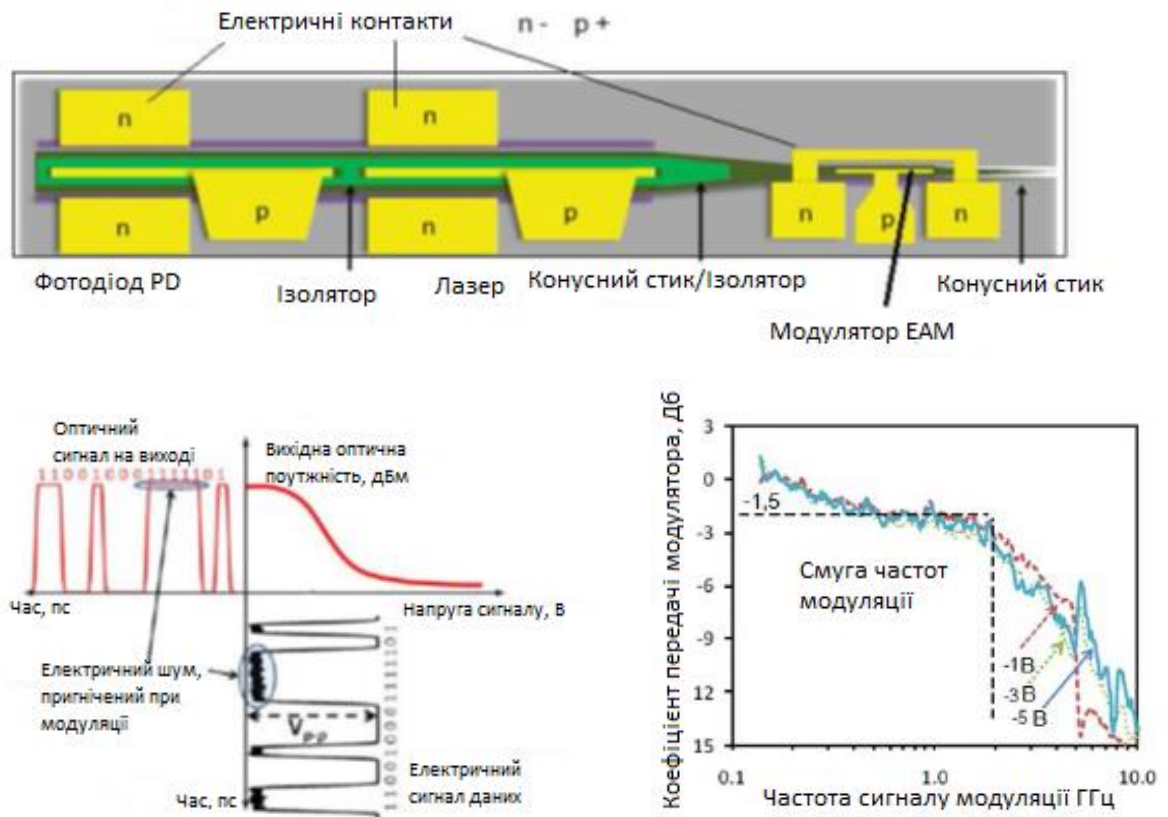


Рисунок 2.8 - Приклад побудови оптичного передавача зі схемою електроабсорбційного модулятора EAM, діаграма модуляції потужності (інтенсивності) та його модуляційна характеристика з різними напругами модуляції

Напряга електричного поля, створена модулюючим сигналом, при якому різниця фаз дорівнює π , називається напівхвильовим, що позначається V_{π} або U_{π} . При цьому напруга оптична потужність на виході MZM практично повністю відсутня. Таким чином, модулююча напруга повинна змінюватися в таких межах, щоб фазовий зсув знаходився в інтервалі від 0 до π радіан і тоді формуватиметься оптичний сигнал, що модульований за інтенсивністю (рис. 2.11, б). Смуга частот модуляції, як і в EAM, визначається міжелектродною електричною ємністю та опором ланцюга модулюючого сигналу і зазвичай не перевищує 20-50 ГГц.

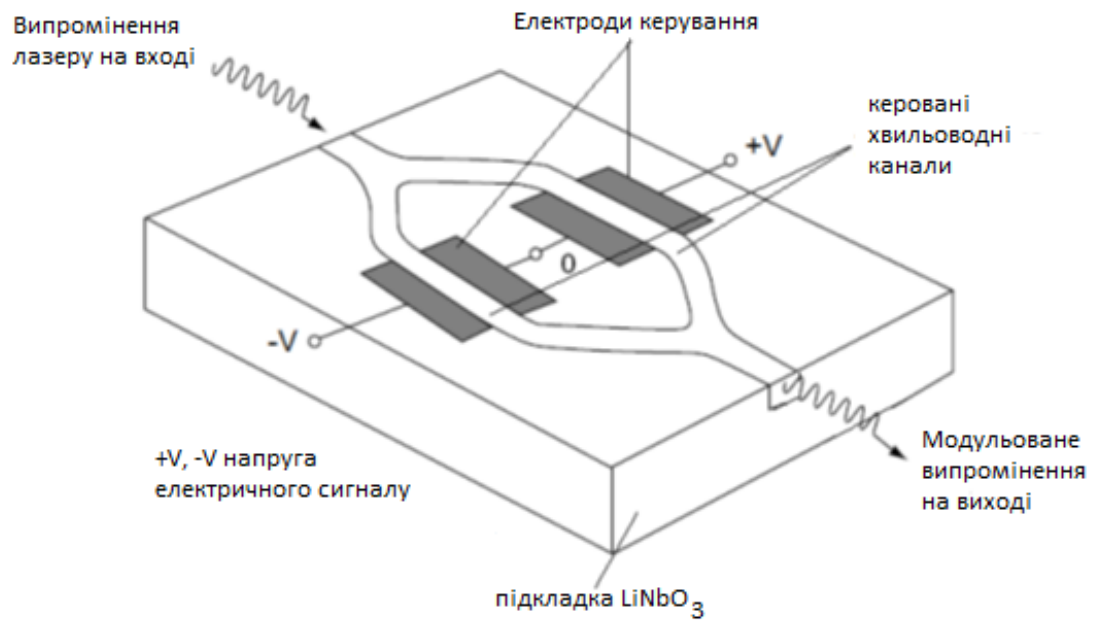


Рисунок 2.9 - Структура модулятора MZ

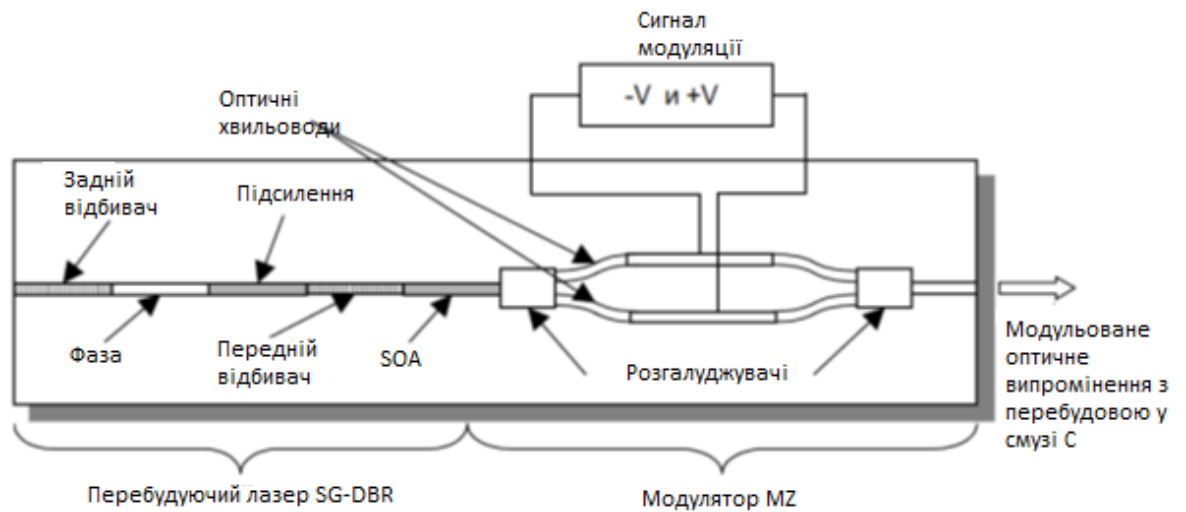


Рисунок 2.10 - Приклад побудови оптичного передавача зі схемою модулятора MZ

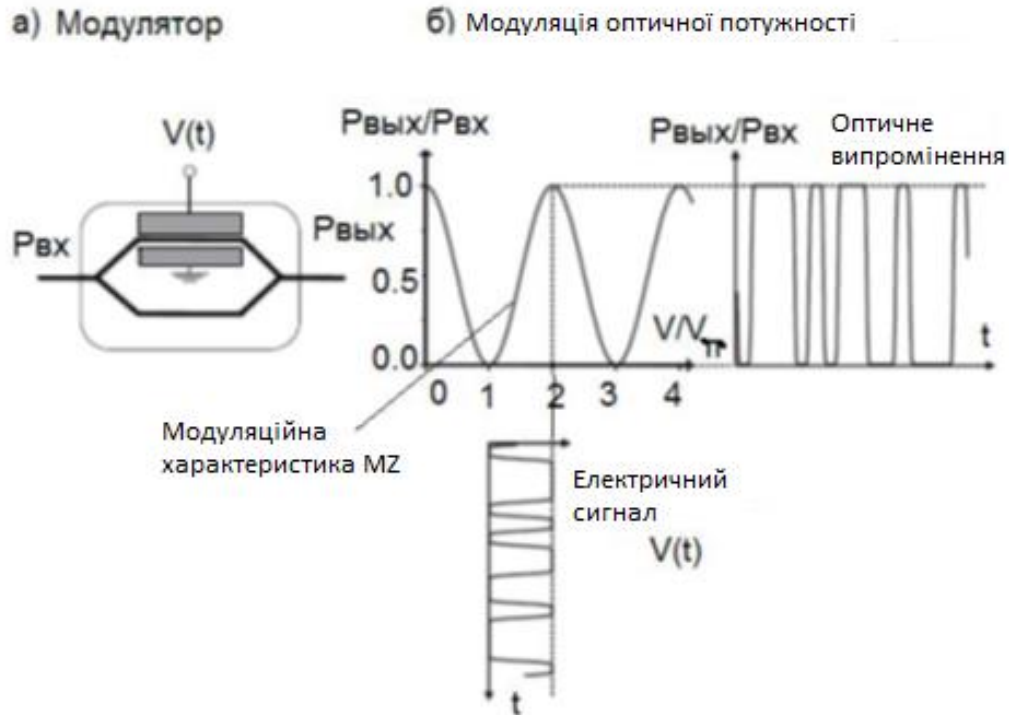


Рисунок 2.11 - Модулятор MZ та модуляція оптичної потужності (інтенсивності) випромінювання

Однією з основних проблем простої зовнішньої модуляції EAM і MZM для систем передачі з DWDM є обмеження смуги частот модульованого оптичного сигналу, обумовлене сіткою частот DWDM з інтервалами 25 ГГц, 50 ГГц, 100 ГГц, це зображено на рис. 2.12 проблема простої модуляції інтенсивності оптичної частоти.

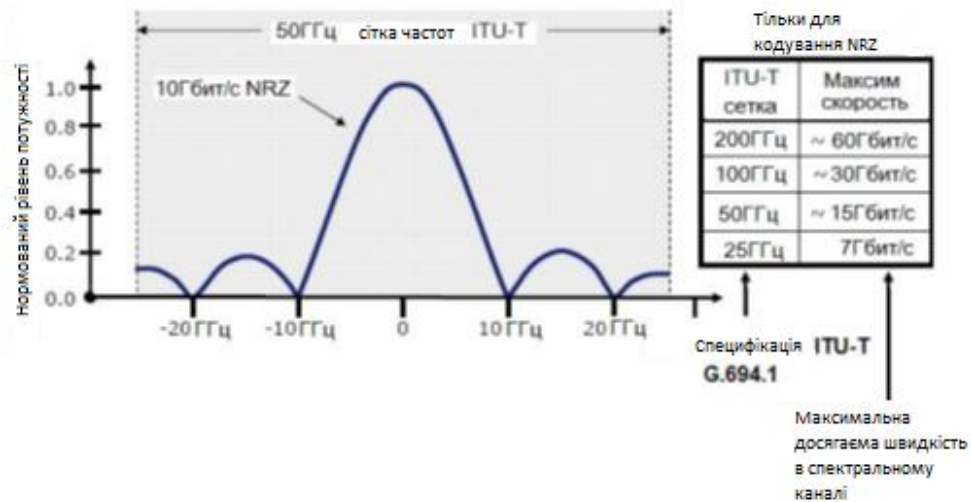


Рисунок 2.12 - Проблема простої модуляції інтенсивності оптичної частоти при зростанні швидкості передачі у спектральних каналах DWDM

При використанні простого формату NRZ для кодування модулюючого сигналу зі збільшенням швидкості передачі інформаційних даних (від 10 до 100 Гбіт/с) потрібно збільшити частотний інтервал між каналами і скоротити число спектральних каналів, що організуються в системі передачі. При цьому також зростуть дисперсійні спотворення у цих каналах, що вимагатиме використання додаткових засобів компенсації дисперсії та оптичного посилення.

Для вирішення цих проблем оптичної модуляції та передачі модульованих оптичних сигналів у протяжних лініях були запропоновані принципово інші способи та засоби модуляції, які передбачають обмеження смуги частот модульованого сигналу в межах відомої мережі частот ІТУ-Т, мінімальну чутливість сигналу до дисперсійних спотворень, накопичення оптичних шумів підсилювачах і т. д. Основою нових модуляторів стали інтегровані структури MZM та EAM на єдиних підкладках (рис. 2.13) у модульні структури. Для управління процесами модуляції розроблено схеми оптичних процесорів для передавачів та приймачів, алгоритми кодування, декодування, цифрової обробки сигналів для компенсації спотворень в оптичних каналах.

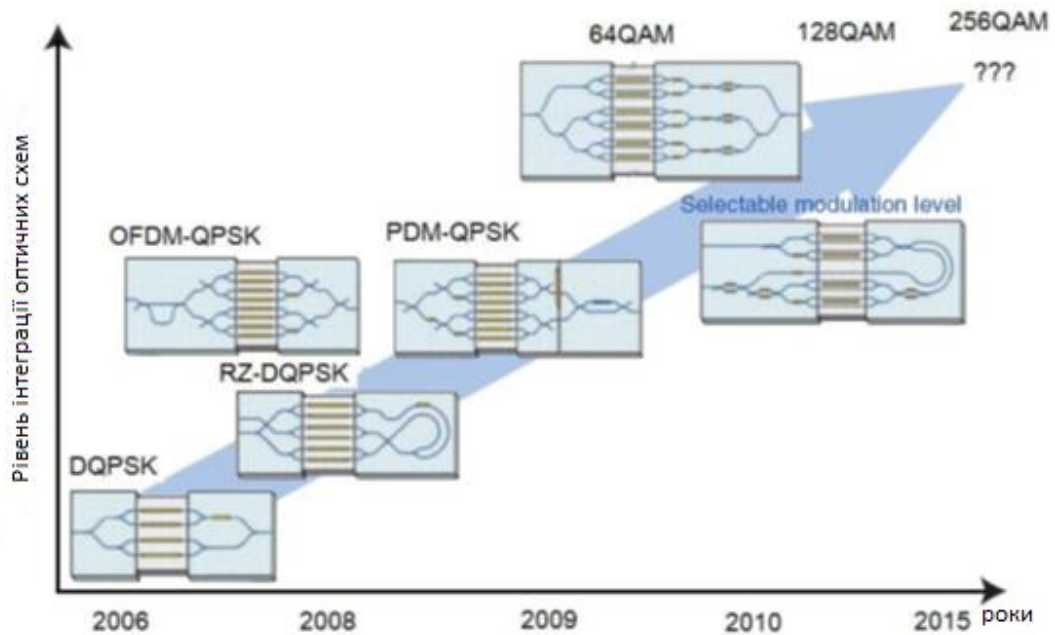


Рисунок 2.13 - Тренд розвитку інтеграції оптичних модуляторів

Одним з перших ефективних та широко застосовуваних рішень щодо побудови схем модуляторів для когерентної передачі став модулятор із чотирма паралельними оптичними каналами, побудованим з подвійним розгалуженням, зображений на рис. 2.14 модулятор QPSK. Така схема дозволила реалізувати квадратурну фазову модуляцію QPSK (Quadra-Phase-Shift-Keying).

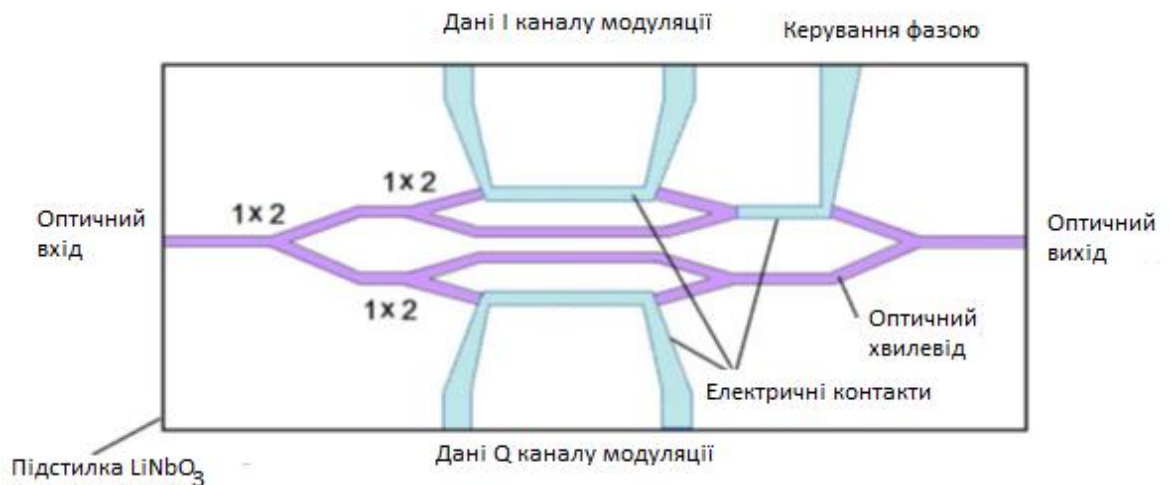


Рисунок 2.14 - Модулятор QPSK

Для реалізації схем модуляторів для когерентних систем, що зростають за складністю, використовується технологія планарних (плоських) оптичних каналів, створюваних на різних підкладках PLC (Planar Lightwave Circuits): Silica-on-Silicon PLCs із застосуванням металів Au, Au/Sn, Cr, NiCr, TiW, Al та Ti/Pt; полімерів Polymer PLCs. При цьому найкращі показники передачі забезпечують кремнієві підкладки (менше 0,02 дБ/см). До складу схем на PLC можуть входити не тільки розгалужувачі, паралельні канали, електроди управління, але і поляризатори оптичного випромінювання, які перетворюють пучок світла на дві ортогональні хвилі, що направляються в паралельні структури модулятора PDM-QPSK (Polarization-Division Multiplexing Quadrature Phase-Shift Keying) (рис. 2.15), де кожна хвиля модулюється фазою своїм закодованим сигналом (QPSK1, 2).

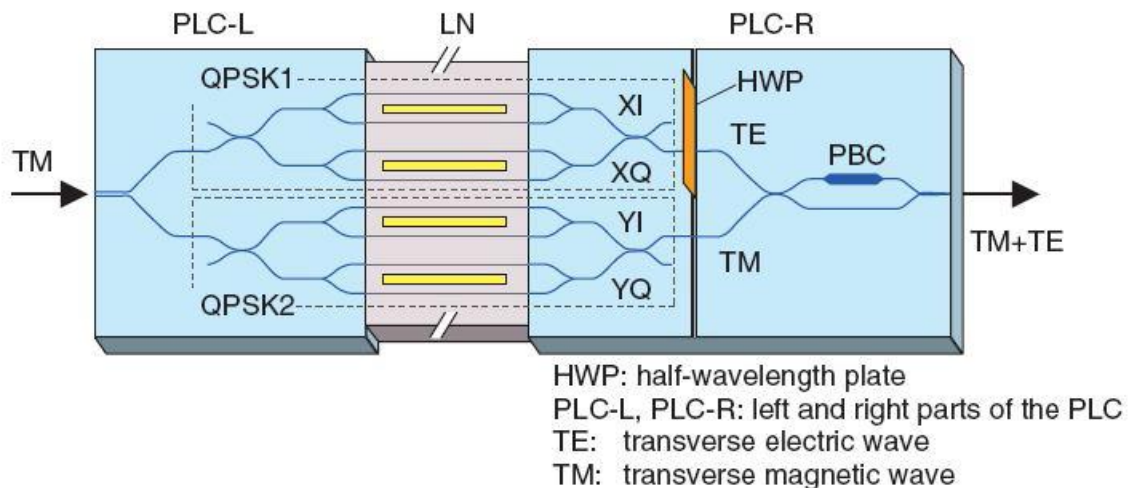


Рисунок 2.15 - Структура PDM-DQPSK модулятора технології PLC

Для реалізації форматів модуляції QAM (Quadrature Amplitude Modulation), у яких передбачається різна кількість станів амплітуд (потужності) оптичного сигналу (4, 8, 16, 32, 64, 128, 256), використовуються інтегровані модулятори EAM (рис. 2.16). У цих модуляторах також застосовуються

розгалужувачі оптичного сигналу, окремі канали модуляції з фіксованими фазовими затримками і атенюаторами для завдання амплітудного значення.

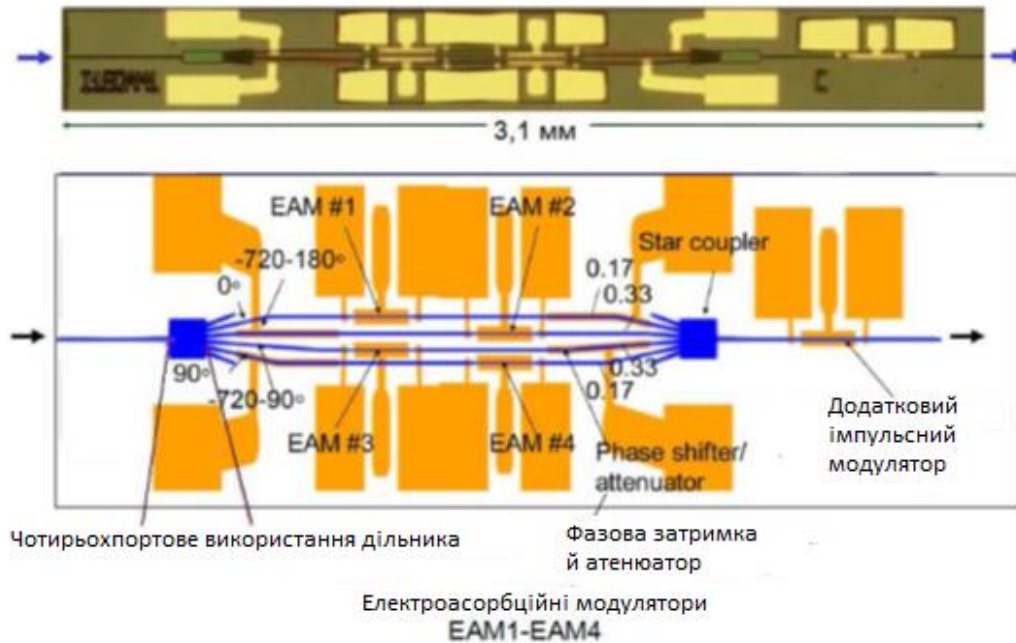


Рисунок 2.16 - Модулятор Bell Labs 16 QAM modulator

Також розроблені схеми модуляторів, що забезпечують модуляцію 2-х і більшої кількості оптичних частот одним інформаційним сигналом (рис. 2.17), де для поділу несучих частот використовуються інтерлівінгові фільтри ILF (Interleave Filter), побудовані за нерівноплечими схемами MZ.

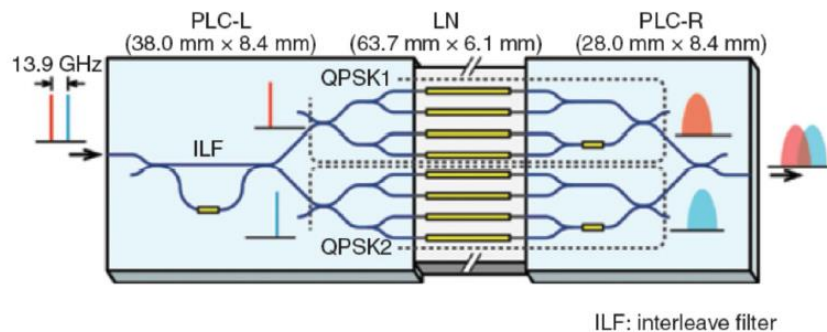


Рисунок 2.17 - Структура двочастотного OFDM QPSK модулятора технології PLC

Метод OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексування з ортогональним частотним поділом) – це метод передачі даних, при якому високошвидкісний потік даних поділяється на декілька відносно низькошвидкісних, кожен з яких передається на окрему оптичну несучу з наступним об'єднанням даних. Кожна з несучих модулюється незалежно, наприклад, з використанням модуляції виду BPSK (Binary Phase Shift-Keying, двопозиційна фазова маніпуляція), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying, квадратурна фазова маніпуляція) та їх різновидів або QAM. Таким чином, формується одночасна передача декількох паралельних каналів, які можуть створюватися одним або декількома лазерами, об'єднаними в решітку на одній підкладці. Одна з переваг OFDM полягає в тому, що зі зміною виду модуляції кожної з несучих з'являється можливість адаптації до параметрів каналу зв'язку (тобто за наявності перешкод швидкість зменшується, а за їх відсутності або зниження рівня відповідно збільшується). Можливості адаптації до параметрів каналу та умов передачі, закладені в OFDM-методі, забезпечують його високу стійкість до перешкод і надійність і в оптичних системах.

Зростання складності оптичної схеми модулятора призводить до помітного збільшення габаритів виробів (достатньо порівняти рис. 2.16 модулятор Bell Labs 16 QAM modulator та 2.18 структура модулятора 64QAM), що може позначитися і на габаритах обладнання. Крім того, потрібна складніша електронна база управління та її програмне забезпечення.

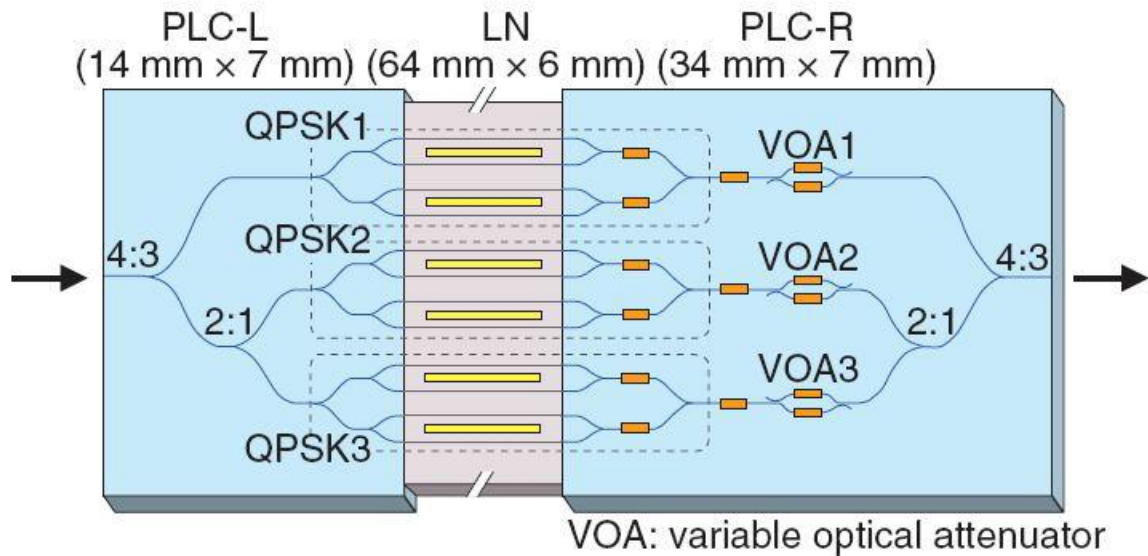


Рисунок 2.18 - Структура модулятора 64QAM

Приклади характеристик деяких складних схем оптичних модуляторів представлені в табл. 2.1 та на рис. 2.19 оцінка смуги пропускання модулятора PDM-QPSK.

Таблиця 2.1 Типові характеристики 4-х канального модулятора PDM-QPSK для швидкості передачі 112 Гбіт/с

Параметр	Типові	Допустимі
Внесені втрати	8,7	<14
Поляризаційні втрати	0,1	<1,5
Оптичні зворотні втрати	>35	>30
Коефіцієнт втрат при переході завад між каналами, дБ		
На передачі	>46	>22
На прийомі	>25	>20
Коефіцієнт поляризаційних втрат при розділенні, дБ	31	>20
Електрооптична полоса, ГГц	>27	>23
Напівхвильова напруга при модуляції на швидкості 32 ГБод, В	<3,5	<3,5

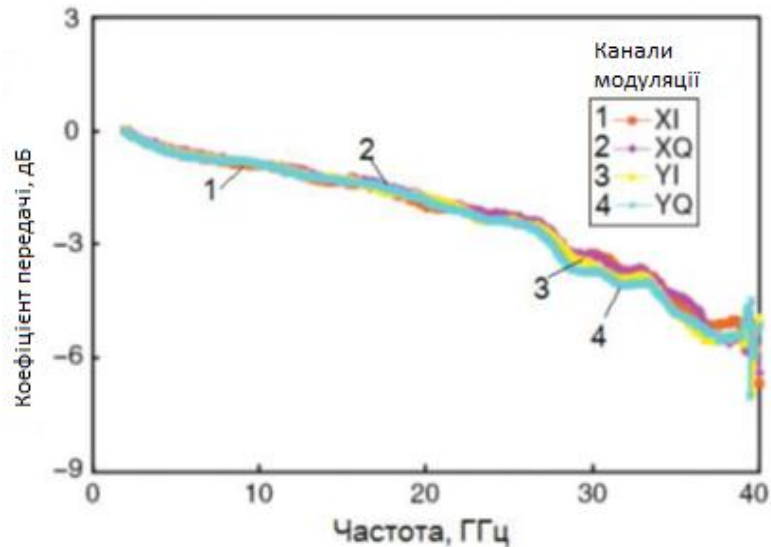


Рисунок 2.19 - Оцінка смуги пропускання модулятора PDM-QPSK

Головними факторами, що визначають використання складних схем модуляторів та засобів кодування інформаційних сигналів є:

- необхідність збільшення пропускної спроможності оптичних ліній без кардинальних змін інфраструктури оптичної мережі (оптичних кабельних ліній передачі, вузлів зв'язку, проміжних станцій та ділянок передачі – секцій посилення, мультиплексування та регенерації);

- гнучке нарощування пропускної спроможності спектральних каналів при незмінному їх числі чи їх збільшенні;

- збереження перешкодостійкості передачі (заданої величини OSNR в оптичному каналі) при реалізації функцій виділення та введення каналів у проміжних вузлах, наприклад, засобами мультиплексорів ROADMs;

- техніко-економічними показниками систем передачі.

Важливу роль підтримки перелічених чинників застосування складних схем когерентної передачі грають приймальні пристрої.

На перепускную здатність каналу, що має певну смугу частот, впливає вид модуляції. Модуляція відрізняється позиційністю, тобто кількістю

модуляційних символів, або інакше сигнальних точок. Приблизно це виглядає наступним чином: $R = F \times \log M$, де: R - швидкість передачі в каналі; F - ширина смуги частот каналу; M - позиційність модуляції. Наприклад, якщо $M=2$ (двопозиційна модуляція), то $R = F$, якщо використовується QAM64, то $R = F \times \log 64 = 6F$. Тобто з ростом позиційності модуляції зростає пропускна здатність каналу з фіксованою шириною смуги частот. Однак, при цьому потребується відповідне збільшення співвідношення сигнал/шум, та/або використання завадостійкого кодування.

2.7 Висновки до розділу 2

На початку розділу розглянуто історію виникнення саме оптичної транспортної мережі, потім були надані терміни, які використовуються в сфері OTN-OTN, та визначено структуру телекомунікаційної транспортної мережі. Після чого розглянуто технологію DWDM, яка добре себе показала, але через низку недоліків на її основі була розроблена технологія OTN-OTN. Розглянуто основні принципи OTN-OTN: інформаційні структури та мультиплексування. Було визначено, що для збільшення пропускної здатності каналу необхідно використовувати якомога більший порядок модуляції, однак при цьому потребується відповідне збільшення співвідношення сигнал/шум, та/або використання завадостійкого кодування.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ ЯК МЕТОДА ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ОТН

3.1. Класифікація завадостійких кодів

Огляд сучасних кодів із захистом від помилок представлений на рис. 3.1.

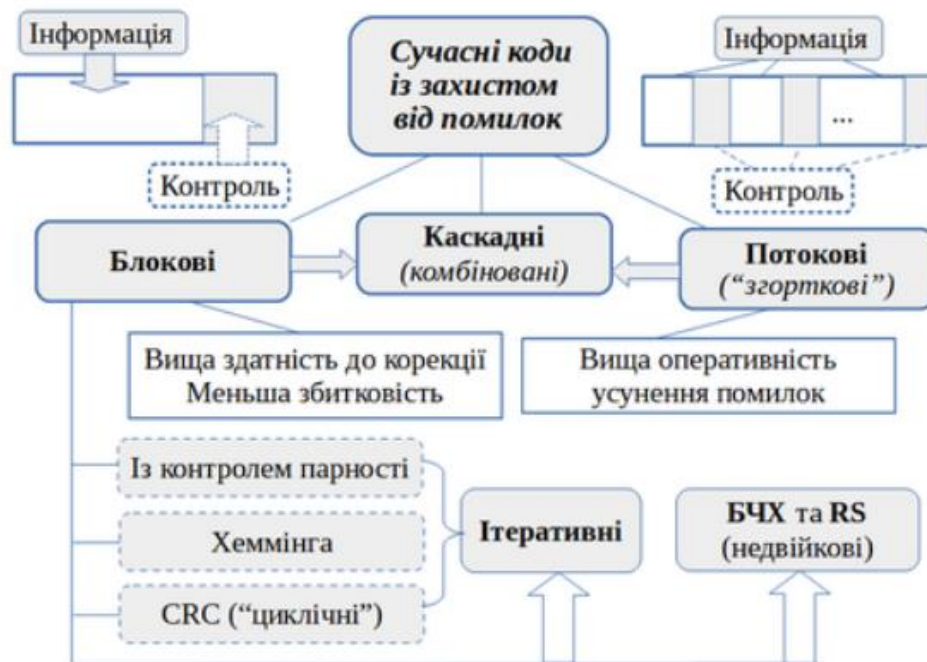


Рисунок 3.1 - Огляд сучасних кодів із захистом від помилок

Виділяються два основних види таких кодів: блокові, де пакету інформаційних розрядів відповідає множина контрольних (зокрема у вигляді «хвостовика»), а також поточкові (зазвичай їх називають також згортковими), де окремі фрагменти інформаційних розрядів захищаються короткими групами контрольних. Певний гібрид утворюють так звані каскадні коди, які включають блокові та поточкові складові на двох окремих рівнях. Всі ці напрямки мають власні царини у відповідності до їх специфічних переваг.

Важливими перевагами блокових кодів є їх більш висока здатність до корекції та відносно менша збитковість. Причиною тут те, що дія контрольних розрядів розповсюджується на весь блок інформаційних. Зворотній бік цих

властивостей — необхідність очікування обробки всього блоку для виявлення та усунення помилок, а отже й обмежена оперативність. Властивості поточкових кодів протилежні. Зокрема вони здатні усувати помилки одразу після їх виникнення, що важливо наприклад в мобільному зв'язку. При цьому поточкові коди не здатні скажимо виявляти довгі пачки помилок. Каскадні рішення в ряді важливих випадків дозволяють поєднати переваги обох цих підходів.

Як уже зрозуміло, раніше ми розглядали саме блокові коди (вони зокрема є більш простими). Зокрема сюди належать розглянуті коди із контролем парності, а також коди Хемінга та CRC. Надалі продовжимо розгляд блокових кодів в напрямку більш складних сучасних рішень. Зокрема розглянемо так звані ітераційні рішення, які здатні поєднувати попередньо згадані коди, а також коди BCH та RS (Ріда-Соломона), які розвивають ідеї CRC-кодування.

3.2 Ітеративні блокові коди

Із принципом ітеративного кодування ми познайомились на прикладі простого матричного кода із контролем парності. Такий код може бути узагальнено для випадку, коли по рядках і стовпцях використовуються і інші блокові коди (рис. 3.2).

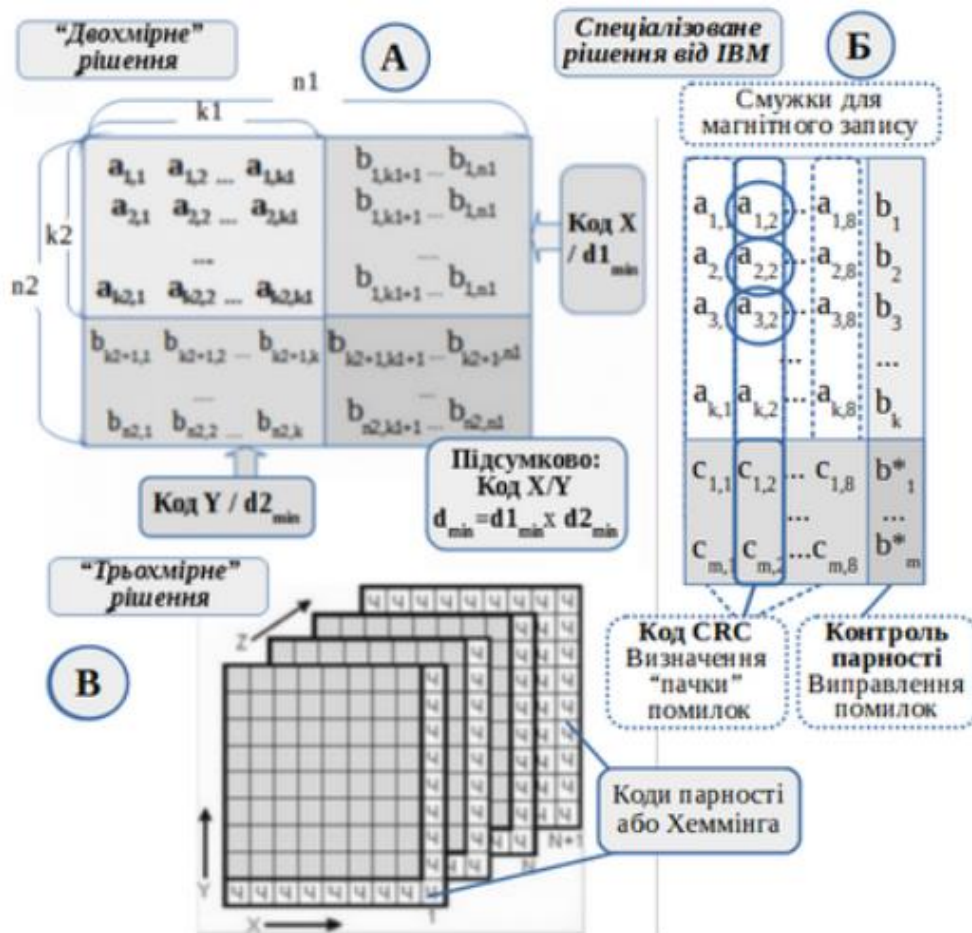


Рисунок 3.2 - Ітеративні коди

Крім перевірки парності тут можуть застосовуватися код Хеммінга або CRC. Подібні коди називають ітеративними, оскільки ті самі інформаційні розряди тут обробляються по рядках і стовпцях саме послідовно. В загальному випадку блок інформаційних розрядів $a_{i,j}$ включає k_1 стовпців і k_2 рядків. Загальна кількість стовпців і рядків з урахуванням контрольних розрядів $b_{i,j}$ складає відповідно n_1 і n_2 . Кодова відстань по рядку d_{1min} , а по стовпцю d_{2min} . При цьому для рядків і стовпців можуть використовуватися різні способи кодування (умовно код X і код Y).

Принципово важливо, що мінімальна кодова відстань для всього блоку дорівнює добутку відстаней по рядку і стовпцю (це доведено математично). У разі найпростішого матричного коду з перевіркою парності, як ми пам'ятаємо,

$d_{\min}=2 \times 2=4$ (код може виправляти поодинокі помилки). Якщо, наприклад, по рядку буде застосовуватися код Хеммінга із $d_{\min} = 3$, а по стовпцю - перевірка парності, то $d_{\min} = 3 \times 2 = 6$ (виправляються також помилки кратності 2). А при використанні для кожної з координат коду Хеммінга значення $d_{\min} = 3 \times 3 = 9$, що дозволяє виправляти вже всі помилки кратності до 4.

Вибір коду для рядка і стовпця матриці може визначатися не тільки вимогами до d_{\min} . Наприклад, для стрічкових накопичувачів широко застосовувався варіант, в якому за стовпцями виконувалося циклічне кодування з поліномом $g(x)$ ступеня 8 в поєднанні з контролем парності по рядках. Цей код, запропонований фірмою IBM, дозволяє виявляти пачки помилок, поява яких характерно для смужок магнітного запису. При цьому перевірка парності по рядку дозволяє виправляти помилки, оскільки одночасний збій на двох і більше смужках мало ймовірний.

Додаткове збільшення коректуючої здатності матричних кодів можливо за рахунок використання «третього виміру», коли в єдиний блок об'єднується пакет з декількох матриць. На рис. 3.2 Б показано найпростіше подібне рішення, коли N матриць містять інформаційні розряди і біти контролю парності по рядках (вісь Y) і стовпцями (вісь X). Додаткова матриця $N + 1$ включає тільки контрольні біти, значення яких підтримують контроль парності по осі Z . Зрозуміло, такий підхід може бути узагальнений на випадок використання різних кодів по кожній з координат. Більш того, теоретично можуть бути введені і додаткові координати. При цьому, як і раніше, діє правило, коли мінімальна кодова відстань для всього блоку коду визначається як добуток d_{\min} за всіма його координатами (рис. 3.2 В).

Таким чином, використання матричних ітеративних кодів є потужним інструментом забезпечення необхідної коректності здібності. При цьому до їх недоліків належить висока надмірність і перш за все - низька оперативність виявлення та виправлення помилок.

3.3 БЧХ-коди та коди RS (Ріда-Соломона)

Розглянуті вище коди орієнтовані на конкретні сфери застосування: код Хеммінга виправляє одноразові помилки, а циклічний - виявляє пачки помилок із заданим обмеженням по їх довжині. Більш загальний підхід - виправлення помилок будь-якої заданої кратності - забезпечують коди, створені за методом Боуза, Чоудхурі і Хоквінгема (так звані БЧХ-коди). До даного класу належить також популярний код Ріда-Соломона, для якого замість двійкових елементів можуть використовуватися наприклад алфавіти більшої довжини. Ці коди отримали широке практичне застосування. Однак їх математичний апарат є досить складним, тому ми розглянемо їх лише на рівні принципів (рис. 3.3).

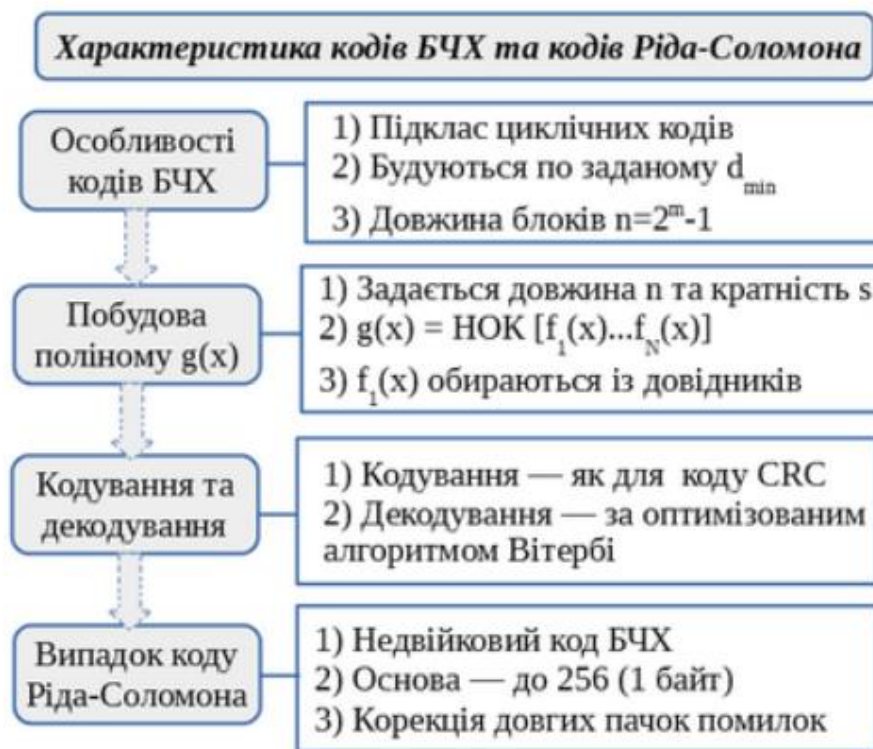


Рисунок 3.3 - Характеристика кодів БЧХ та РС

Коди БЧХ є підкласом циклічних кодів і звідси їх властивості визначаються утворюючим поліномом $g(x)$. При цьому сам такий поліном

будується спеціальним способом - виходячи із заданого d_{\min} (з урахуванням кратності виправляє помилок s) і заданої довжини кодового слова n . Така довжина повинна відповідати умові $n = 2m-1$, де m - ціле число. Властивості коду визначаються трійкою значень (n, k, d_{\min}) . Наприклад, позначення $(15, 7, 5)$ відповідає коду з довжиною блоку 15 розрядів, з яких 7 інформаційні, при цьому його мінімальна кодова відстань 5 дозволяє виправляти всі помилки з кратністю $s=1$ та $s=2$. Популярним є код $(255, 231, 7)$, який використовують для виявлення помилок з кратністю до 6 включно.

Процедура побудови $g(x)$ є досить громіздкою. Тут лише зазначимо, що утворюючий поліном будується виходячи із заданих значень s, n на базі набору неприводимих поліномів $f_i(x)$, які обираються з довідкових таблиць. Наприклад, для згаданого коду $(15, 7, 5)$ утворюючий многочлен виходить як $g(x) = f_1(x) * f_2(x) = (x^4 + x + 1) (x^4 + x^3 + x^2 + x + 1) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$.

Кодування за заданим $g(x)$ може виконуватися по тій самій процедурі, що і для будь-якого циклічного коду: «хвостовик» блоку будується за поліномом $r(x)$ - залишком від ділення вихідного кодового многочлена $f(x)$ на який утворюючий $g(x)$. Декодування також починається з обчислення залишку отриманого в результаті передачі многочлена $f^*(x)$ на утворюючий. Однак надалі для з'ясування розташування всіх помилок доводиться використовувати досить складні процедури (зокрема за так званим алгоритмом Вітербі).

Важливим окремим випадком БЧХ-кодів є недвійковий код Ріда-Соломона (РС). Тут замість двійкової змінної, значення якої відповідає одному біту, можуть застосовуватися змінні значно більшої розмірності. Наприклад, використовуються коди з 16-річної змінної, значення якої кодується напівбайтів. Популярні коди з 256-річної підставою (значення представляється байтом). При тому, що всі процедури для РС-кодів відповідають правилам БЧХ-кодів, їх коригувальна здатність значно вища. Такі коди використовуються,

наприклад для відновлення даних, що постраждали через подряпини на оптичних дисках.

3.4 Простий потоковий код Фінка-Хегельбергера

Ми познайомимося з реалізацією потокового кодування на прикладі простого коду, запропонований радянським вченим та інженером Фінком і згодом незалежно "перевідкритим" американцем Хегельбергером. Крім того, що цей код став історично першим в даному класі, тут нам не знадобиться складний математичний апарат (рис. 3.4).

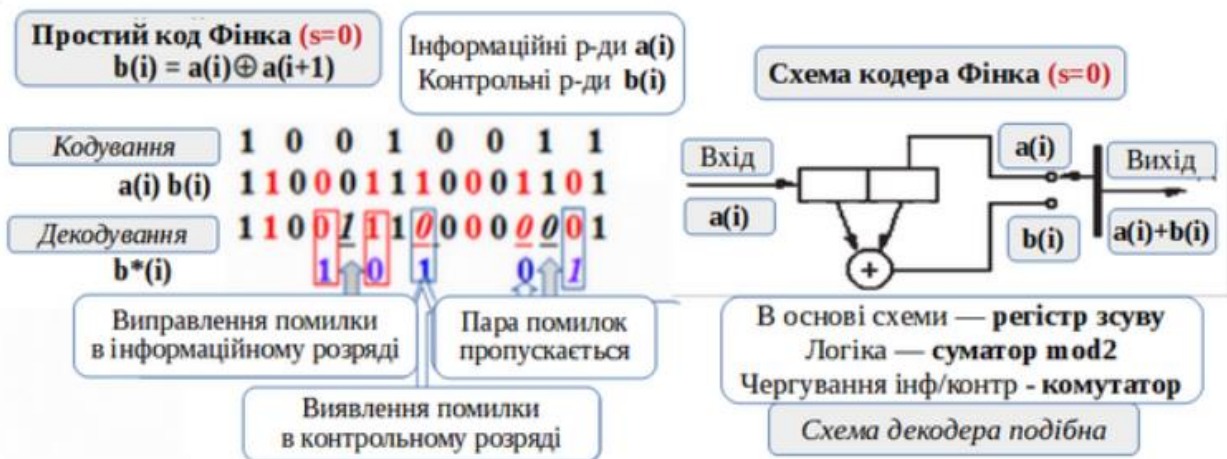


Рисунок 3.4 - Логіка та схема кодера простого коду Фінка

В даному коді контрольні розряди $b(i)$ (на рисунку показані червоним кольором) чергуються з інформаційними $a(i)$. У найпростішому випадку при кодуванні контрольні розряди визначаються як $b(i) = a(i) + a(i+1)$ (додавання по mod2). При декодуванні вони розраховуються знову $b(i)^* = a(i)^* + a(i+1)^*$ та порівнюються з отриманими в результаті передачі. Параметр коду $s=0$ означає, що для формування контрольних використовуються саме сусідні інформаційні розряди.

Помилка виявляється, якщо отримане при передачі значення контрольного розряду не збігається з розрахунковим. При цьому враховується закономірність: якщо спотвореним виявився інформаційний розряд $a(i)$, то розбіжність проявиться для двох контрольних розрядах, що його "обрамляють"; якщо ж при передачі був спотворений контрольний розряд, то розбіжність буде тільки в ньому. Це дозволяють гарантовано виправляти поодинокі помилки, проте вже при появі пари помилок (в інформаційному і сусідньому контрольному розрядах) такий варіант коду не може з ними впоратися.

Схема простого кодера Фінка включає двохрозрядний регістр зсуву, на вхід якого поступають інформаційні розряди $a(i)$. В першій половині кожного такту ці розряди без змін поступають на вихід схеми завдяки комутатору. В другій половині такту на вихід проходять контрольні розряди $b(i)$, які формуються суматором за модулем 2. Для декодування застосовується та сама схема, на вхід якої поступають одержані в результаті передачі розряди $a(i)^*$, а одержані контрольні розряди порівнюються із вхідними за правилами, які пояснює рис. 3.4.

3.5 Розширений код Фінка-Хегельбергера

Важливою метою використання потокових кодів є усунення «пачок» помилок (хоч би й досить коротких). Таку задачу дозволяє вирішувати удосконалений варіант коду Фінка, який ілюструє зокрема рис. 3.5.

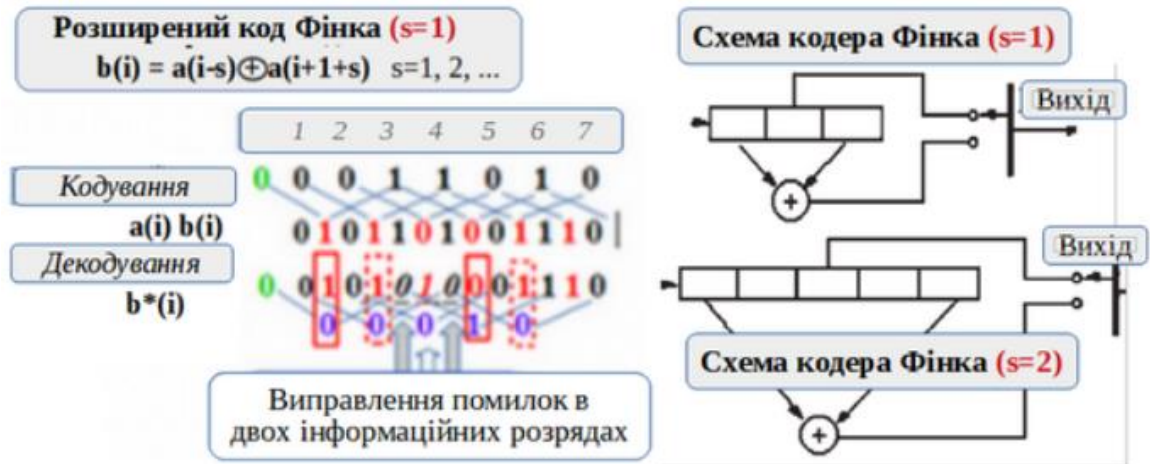


Рисунок 3.5 - Логіка та схеми розширеного коду Фінка

Можливість усунення коротких пачок помилок дає модифікація коду, яка передбачає інтервал між інформаційними розрядами, що беруть участь у визначенні контрольних: $b(i) = a(i+s) + a(i+1+s)$, де $s = 1, 2, \dots$. Зокрема при $s = 1$ між розрядами, які беруть участь в контролі знаходиться ще пара "проміжних", при $s = 2$ їх буде чотири (при $s = 0$ формула виродиться в раніше розглянутий варіант).

На рис. 3.5 показано виправлення пачки з трьох помилок (включаючи 2 інформаційних розряду) для випадку, коли $s=1$. При цьому оскільки в формуванні контрольного розряду $b(i)$ повинен брати участь не просто попередній йому інформаційний розряд $a(i)$, а й попередній по відношенню до нього $a(i-1)$, на початку кодування доводиться використовувати умовне значення $a(0)$ на рисунку показано зеленим кольором.

Зі збільшенням параметру s зростає довжина «пачки» помилок, що виправляється кодом. Зокрема для $s=1$ вона сягає 3 розрядів, а для $s=2$ - 5 розрядів. Але тут проявляється додаткове обмеження коду: між пачками помилок, які він може усунути має бути так званий «захисний інтервал», довжина якого l_z досить швидко зростає. Зокрема при $s=1$ потрібно $l_z = 13$, а для $s=2$ уже $l_z = 21$. В практиці значення $s > 2$ не застосовуються.

Схеми кодування для удосконаленого коду Фінка включають розширений регістр зсуву. Зокрема при $s=1$ він повинен включати три елементи пам'яті, а при $s=2$ — п'ять (рис. 3.5).

3.6 Загальні засади кодування для «згорткових» кодів

Для побудування потокових кодів із заданими властивостями потрібно застосовувати відповідний математичний апарат. Такий апарат використовує представлення кодів у вигляді поліномів (як і у випадку кодів CRC) і зокрема математичне перетворення «згортання» поліномів (саме завдяки цій базовій операції такі коди більше відомі як «згорткові») - (рис. 3.6).

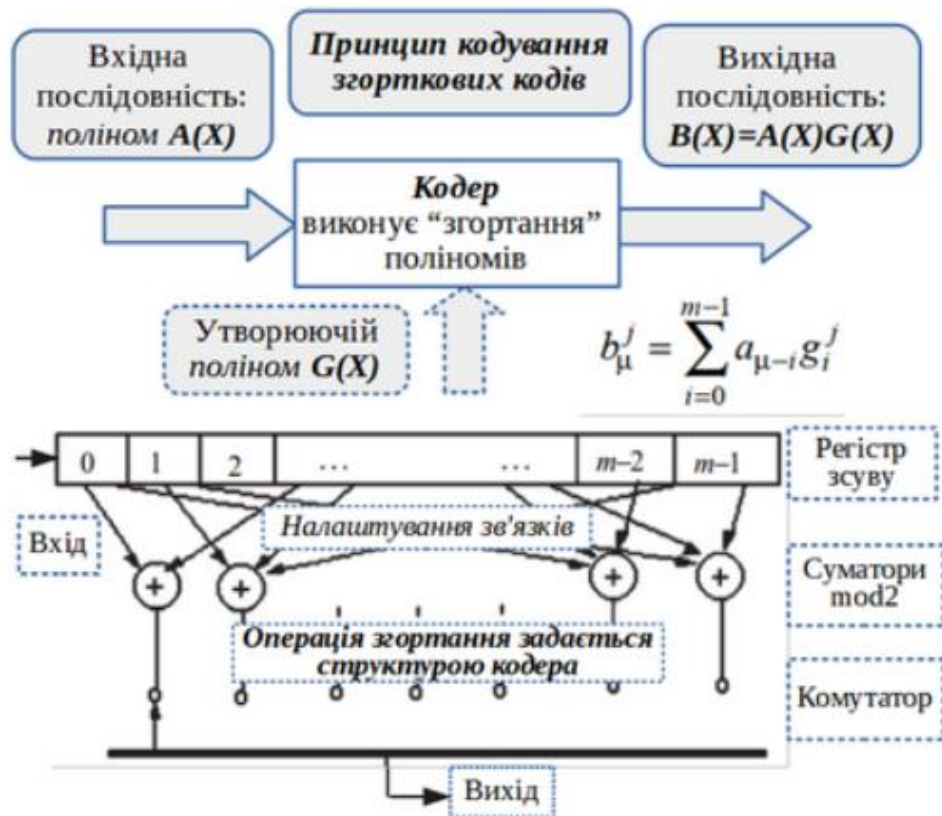


Рисунок 3.6 - Принцип кодування згорткових кодів та його схемне втілення

Вхідна кодова послідовність відображається у вигляді поліному $A(X)$. Вихідна послідовність створюється в результаті операції згортання вхідного поліному із утворюючим поліномом $G(X)$: $V_j(X) = A(X)G_j(X)$. Такий запис відповідає компактній векторній формі. Формула для визначення окремих розрядів вихідного коду наведена на рисунку.

Властивості утворюючого полінома $G_j(X)$ задаються уже знайомою нам схемою кодера, яка включає регістр зсуву, суматори за модулем 2, чие розташування відображає структуру $G_j(X)$. При цьому потокам інформаційних і контрольних розрядів відповідають окремі утворюючі поліноми, а втім і окремі групи суматорів. Відповідні складові вихідного потоку $V_j(X)$ об'єднуються комутатором. Також схема може масштабуватись для кількох вхідних потоків даних $A(X)$, кожному з яких відповідатиме свій регістр зсуву. Надалі ми розглянемо відповідні приклади.

Основні характеристики коду включають кількість вхідних і вихідних розрядів, оброблюваних схемою за один такт (відповідно k і n). Ці параметри визначаються кількістю вхідних потоків $A(X)$ та вихідних потоків $V_j(X)$. Їх співвідношення задає відносну швидкість кодування $R = k/n$. Також до основних характеристик коду належить значення d_{\min} , яке визначає кратність помилок, що можуть бути виправлені кодом.

Найважливіший показник здатності згорткових кодів до корекції - кратність помилок, що виправляються (s_m). Вона визначається виходячи з мінімальної кодової відстані коду за правилом $2s_m + 1 \leq d_{\min}$. Зокрема, при $d_{\min} = 3, 5, 7$ відповідні значення $s_m = 1, 2$ і 3 . Як можна бачити, формула для визначення кратності помилок, що виправляються (в даному випадку вона збігається з довжиною пачки помилок), по суті збігається з тією, яка була отримана для блокових кодів. При цьому існують суттєві особливості у визначенні мінімальної кодової відстані: для блокових кодів довжина всіх кодових слів однакова, а в разі ж згорткових кодів вона не є фіксованою. Не

вдаючись до подробиць підходів до визначення d_{min} для згорткових кодів, охарактеризуємо відповідне практичне рішення.

На практиці для визначення d_{min} використовується наступний підхід (рис. 3.7).

Структура кодера	R	Утворюючі поліноми	Послідовність $V(X)$ на виході кодера	l_p	d_{min}
	1/2	1 $1+X^2$	<u>110001000</u>	6	3
	1/2	$1+X+X^2$ $1+X^2$	<u>111011000</u>	6	5
	1/3	$1+X+X^2$ $1+X+X^2$ $1+X^2$	<u>111110111000</u>	8	7
	2/3		<u>111111000</u>	6	5

Рисунок 3.7 - Характеристика здатності згорткових кодів до корекції помилок

Шляхом моделювання роботи кодера визначається вихідна послідовність $V(X)$, яка відповідає вхідний виду $A(X) = 10000 \dots$ (всі «0» нулі після першої «1»).

d_{min} визначається як кількість «1» на інтервалі довжиною l_p від початку $V(X)$.

На рисунку показані «тестові» послідовності $B(X)$ і відповідні значення d_{\min} для декількох розглянутих вище структур кодерів (інтервал довжиною l_p для підрахунку кількості «1» при визначенні d_{\min} підкреслений).

У практиці вимоги до корегуальної здатності згорткових кодів залежать від сфери застосування. Зокрема, в мобільному зв'язку, де згортковий код є елементом стандарту GSM, застосовуються стандартизовані кодера з $d_{\min} = 7$ (зокрема $G1(X) = 1 + X^3 + X^4$, $G2(X) = 1 + X + X^3 + X^4$). У системах супутникової передачі даних застосовуються кодера з $d_{\min} = 10$ (зокрема $G1(X) = 1 + X^2 + X^3 + X^5 + X^6$, $G2(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^6$).

3.7 Напрямки реалізації потокового декодування

Декодування згорткових кодів є значно складнішою задачею, ніж для коду Фінка. Зокрема нині використовується декілька напрямків такого декодування (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 - Огляд напрямків декодування згорткових кодів

«Порогове» декодування є найбільш простим в реалізації. Тут синдроми імовірних помилок (кодові послідовності, які указують на помилкові розряди), визначаються за принципами, що схожі зокрема із декодуванням CRC. Кінцеве рішення про значення розрядів кода приймається за так званим «мажоритарним» принципом на користь більш імовірного варіанту. Кількість операцій декодування обмежена на певному гарантованому рівні. Разом з тим цей метод не повністю реалізує потенціальні можливості декодування. Окрім того його застосовують лише для систематичних кодів.

«Послідовне» декодування більш повно розкриває можливості згорткових кодів, забезпечуючи більш повне усунення помилок. Зокрема цей метод дозволяє адаптуватись до змін рівню шуму в каналі (а отже й імовірності помилок). Ціною тут є вища ресурсоемність. Крім того, в зв'язку з тим, що кількість операцій декодування є випадковою, тут можливі ситуації «перевантаження» алгоритму, коли час декодування значно збільшується.

Метод декодування Вітербі (за ім'ям автора алгоритму) використовує порівняння всіх можливих траєкторій зміни станів декодера, обираючи той, що найбільш правдоподібно відповідає переданим даним. При досить високій ресурсоемності цей метод найбільш повно відповідає потенціальним можливостям згорткових кодів і до того ж не є чутливим до синхронізації. Нині він широко використовується в ряді стандартних протоколів передачі даних і може вважатись найпопулярнішим.

Завадостійке кодування дозволяє зменшити вимоги до співвідношення сигнал/шум і, таким чином, створити умови збільшення кількості оптичних каналів не виходячи за межі динамічного діапазону підсилювача. Але при цьому самі завадостійкі коди мають надлишковість (за рахунок цього і досягається між іншим підвищення завадостійкості). Ця надлишковість зменшує швидкість передачі корисних даних, тобто перепускную здатність. Тому потрібно обирати

завадостійкі коди з мінімальною надлишковістю та при цьому з достатньо великим вирашом в завадостійкості (виграш в завадостійкості це відношення сигнал/шум системи без кодування до сигнал/шум системи з кодуванням при однаковому коефіцієнту помилок). Цім вимогам відповідають блочні коди, наприклад, Ріда-Соломона або сигнально-кодові конструкції.

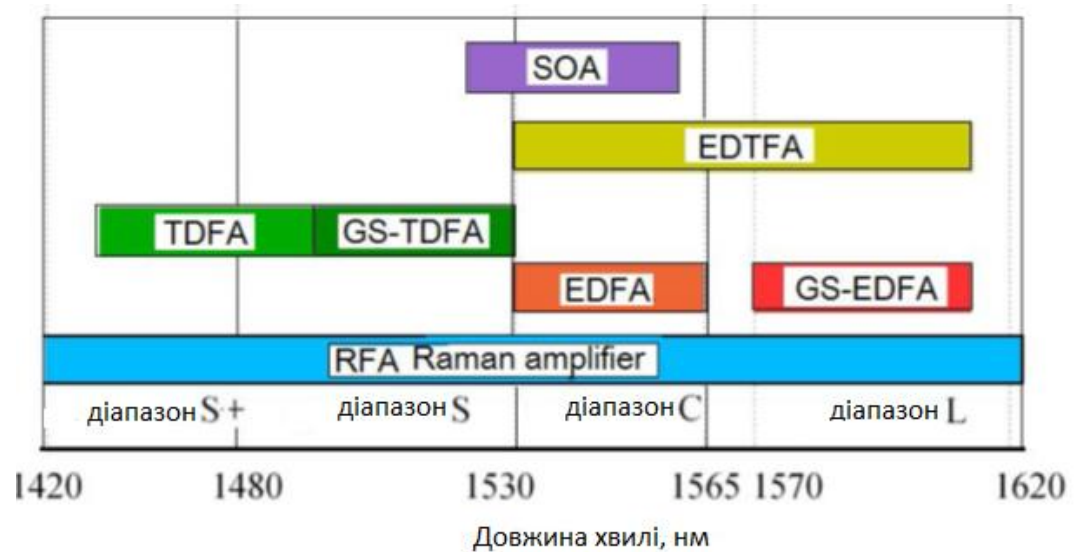
3.8 Висновки до розділу 3

В розділі було розглянуто різні види лінійних та завадостійких кодів. Лінійні коди майже не впливають на перепускнну здатність каналу, тому їх не доцільно використовувати в цьому випадку, натомість завадостійке кодування дозволяє збільшити позиційність модуляції і тим самим підвищити перепускнну спроможність каналу, але при цьому самі завадостійкі коди мають надлишковість, яка зменшує швидкість передачі корисних даних, тобто перепускнну здатність, через це доцільно обирати завадостійкі коди з мінімальною надлишковістю та при цьому з достатньо великим вирашом в завадостійкості, оптимальним варіантом для цього випадку будуть блочні коди Ріда-Соломона або сигнально-кодові конструкції з використанням згортовних кодів.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ПІДСИЛЮВАЧА НА ПЕРЕПУСКНУ СПРОМОЖНІСТЬ OTN

Оптичні підсилювачі - це компоненти когерентних систем передачі, що підтримують необхідні рівні передачі на всіх областях на відстані та на всіх робочих частотах із спектральними каналами.

Оптичні підсилювачі відрізняються структурами, принципом дії та характеристиками передачі сигналу. У відомих діапазонах хвиль (оптичні частоти), що використовуються для побудови когерентних систем передачі, використовуються волоконні оптичні підсилювачі типу домішок (легування ербієм - Er, тулієм - Tm, теллуром - Te та інші рідкісними елементами), волокні романівські та напівпровідникові (рис. 4.1). Привертають увагу романівські підсилювачі, які придатні в усіх робочих діапазонах від 1420 нм до 1620 нм. Більше того, всі інших можна використовувати лише з обмеженими частотами. Це пов'язано з різним принципом збільшення оптичної сили сигналів, що проходять через середовище посилення. Основними характеристиками оптичних підсилювачів є: смуга чи діапазон частот (хвиль) посилення; коефіцієнт посилення та його рівномірність; шуми, що вносяться підсилювачем; поляризаційна чутливість; нелінійні спотворення чи перевантаження; показники енергоефективності; масогабаритні показники; температурна стійкість тощо.



- EDFA: Erbium Doped Fibre Amplifier (1530-1565nm)
- GS-EDFA: Gain-Shifted EDFA (1570-1610nm)
- TDFA: Thulium Doped Fluoride-based Fibre Amplifier (1450-1490nm)
- EDTFA: Tellurium-based gain-shifted TDFA (1530-1610nm)
- GS-TDFA: Gain-Shifted Thulium Doped Fibre Amplifier (1490-1530nm)
- RFA: Raman Fibre Amplifier (1420-1620nm or more as multi-arm)
- SOA: Semiconductor Optical Amplifier (1520-1560nm)

Рисунок 4.1 - Типи оптичних підсилювачів та робочих діапазонів

Приклади деяких інтегрованих характеристик романівських та домішкових підсилювачів стосовно когерентних систем з оптичними каналами 100 Гбіт/с представлені на рис. 4.2.

Перевага романівських підсилювачів полягає в більш розширеній смузі і, відповідно, у більшій ємності волоконної лінії з точки зору кількості каналів та їх загальній швидкості передачі інформаційних сигналів.

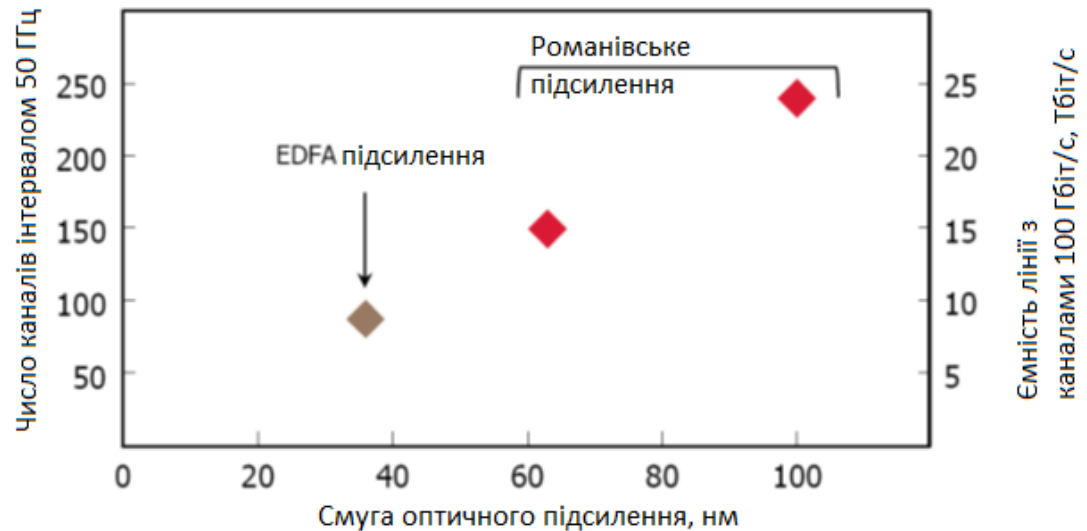


Рисунок 4.2 - Співвідношення для домішкових та романівських оптичних підсилювачів

Поєднання різних типів підсилювачів (розподілених романівських DRA (Distributed Raman Amplifiers), зосереджених домішкових та романівських – Discrete Raman Amplifier) дозволяє будувати протяжні оптичні канали з гарантованими співвідношеннями OSNR на всіх ділянках, на яких зведені до мінімуму наслідки від нелінійних ефектів скловолокон підсилювачів (рис. 6.3).

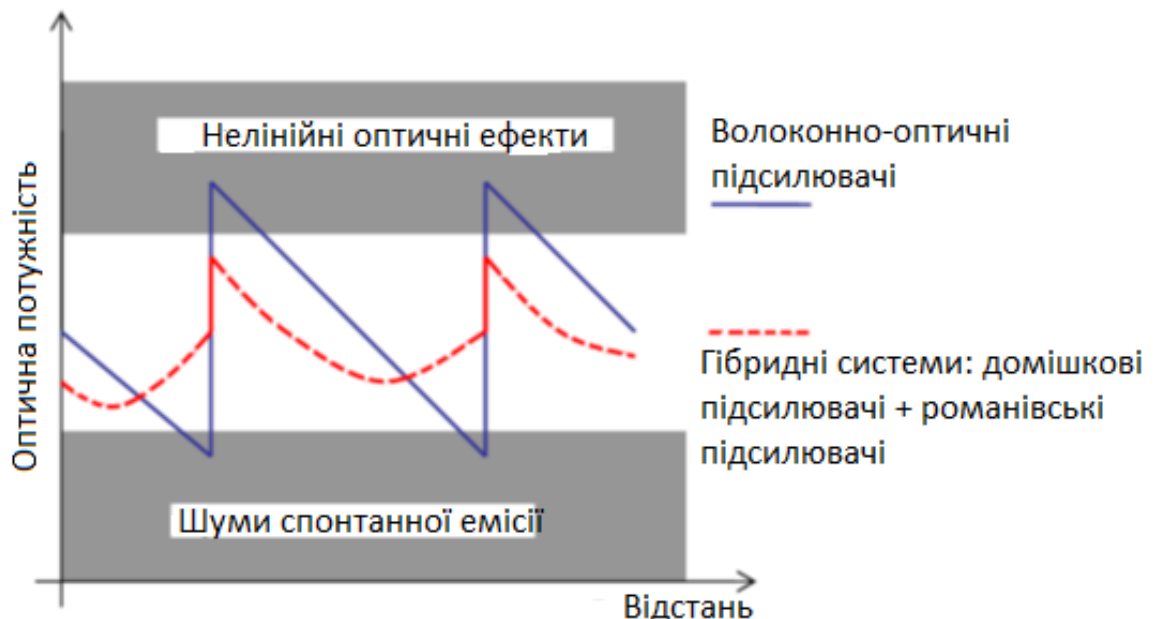


Рисунок 4.3 - Обмеження на величину посилення оптичних підсилювачів

4.1 Домішні підсилювачі оптичного випромінювання

Волоконно-оптичні підсилювачі (ВОП) з домішковими рідкісноземельними компонентами (Er, Tm, Te) набули великого поширення у волоконнооптичних системах передачі. Це пов'язано з низкою їх переваг:

- простота конструкції;
- висока надійність;
- великі коефіцієнти посилення;
- малі шуми;
- широка смуга посилення;
- нечутливість до поляризації світла, що посилюється.

Для передачі оптичних сигналів в лініях з посиленням для діапазонів, L найчастіше застосовуються EDFA, на принципі дії яких далі пояснюються характеристики посилення.

Основу конструкції ВОП-EDFA становить оптичне волокно довжиною від 10 м до 100 м з домішкою рідкісноземельного матеріалу Er. Принцип дії ВОП ґрунтується на ефекті збудження за допомогою зовнішнього накачування атомів рідкісноземельного матеріалу, поміщених у серцевину звичайного одномодового скловолокна (рис. 4.4). Рідкоземельні матеріали обрані з таким розрахунком, щоб були зони поглинання зовнішньої енергії та створювалася інверсна населеність, що призводить в кінцевому результаті до спонтанної та стимульованої емісії (рис. 4.5). При цьому вимушене світіння буде зумовлене вхідним сигналом і збігається з ним довжиною хвилі.

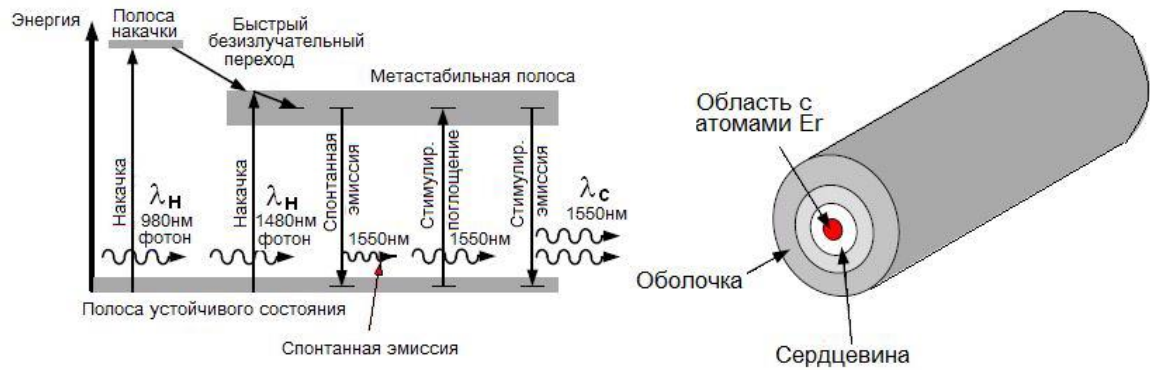


Рисунок 4.4 - Схема оптического усиления в эрбиевом волоконном усилителе

У сердцевині скловолокна вміщено іони ербію (Er^{3+}). Для накачування іонів можуть застосовуватися випромінювання з довжинами хвиль 1480 нм, 980 нм, 800 нм, 670 нм та 521 нм. Реально використовуються 1480 нм та 980 нм. Це зумовлено низкою причин: ефективністю напівпровідникових лазерів великої потужності, малим загасанням оптичного волокна, низькими вимогами до точності довжини хвилі накачування.

На довжині хвилі 980 нм спостерігаються найменші шуми посилення, а на довжині хвилі 1480 нм немає жорстких вимог щодо точності налаштування. Оптичний підсилювач із накачуванням на довжині хвилі 1480 нм називають дворівневим, а підсилювач із накачуванням на довжині хвилі 980 нм – трірівневим (рис. 4.5).

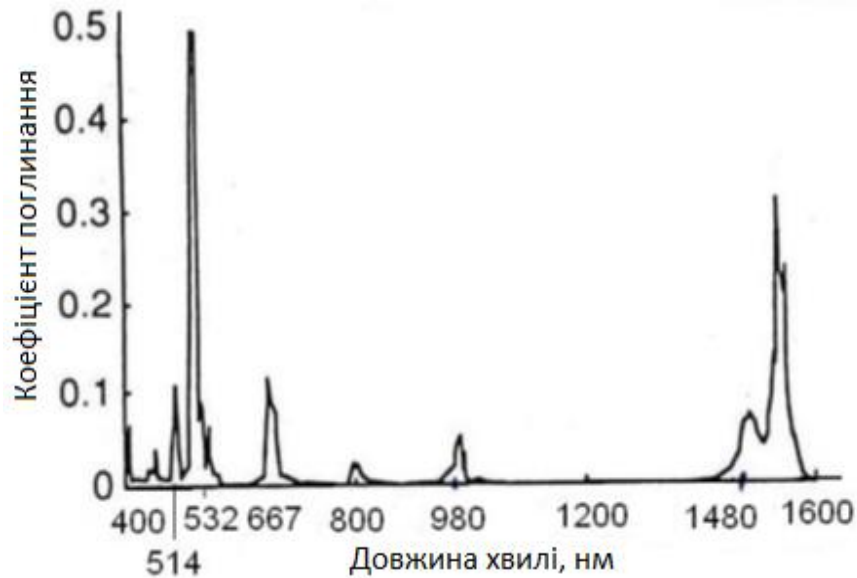


Рисунок 4.5 - Коефіцієнти поглинання атомів ербію на різних хвилях накачування

Іони ербію збуджуються за рахунок поглинання енергії хвиль генератора накачування (λ_H). Вони переходять з основного рівня на вищі енергетичні рівні, а потім без випромінювання в необхідному діапазоні знижуються (релаксують) до метастабільного рівня. Одночасно на збуджені атоми впливає випромінювання сигналу (λ_C), що викликає стимульоване випромінювання на всій довжині активного волокна.

Однак не всі атоми взаємодіють з випромінюванням сигналу і спонтанно переходять на основний рівень протягом приблизно 10 мс. Спонтанна емісія фотонів породжує шум випромінювання, який може посилюватися (такі шуми прийнято позначати: ASE, Amplified Spontaneous Emission). При досить інтенсивному вхідному сигналі з довжиною хвилі λ_C спонтанне випромінювання в ербієвому підсилювачі може бути придушене (рис. 4.6). Використання лазерів накачування на різних хвилях (980 нм та 1480 нм) створює різні умови посилення щодо ASE, коефіцієнта посилення та схем накачування.

Лазери з хвилею накачування 980 нм забезпечують найменший шум підсилення, а лазери хвилі 1480 нм дозволяють отримати більший коефіцієнт посилення при більшій величині шуму ASE. Виходячи з цих фактів можна визначити застосування: на хвилі 980 нм накачування необхідне підсилювачах попередніх на вході приймачів оптичного випромінювання в системах з великим числом спектральних каналів; на хвилі 1480 нм накачування необхідне для отримання максимального посилення для отримання максимальної потужності введення в лінію волоконну. Особливості характеристик EDFA на різних хвилях накачування наведено у табл. 4.1.

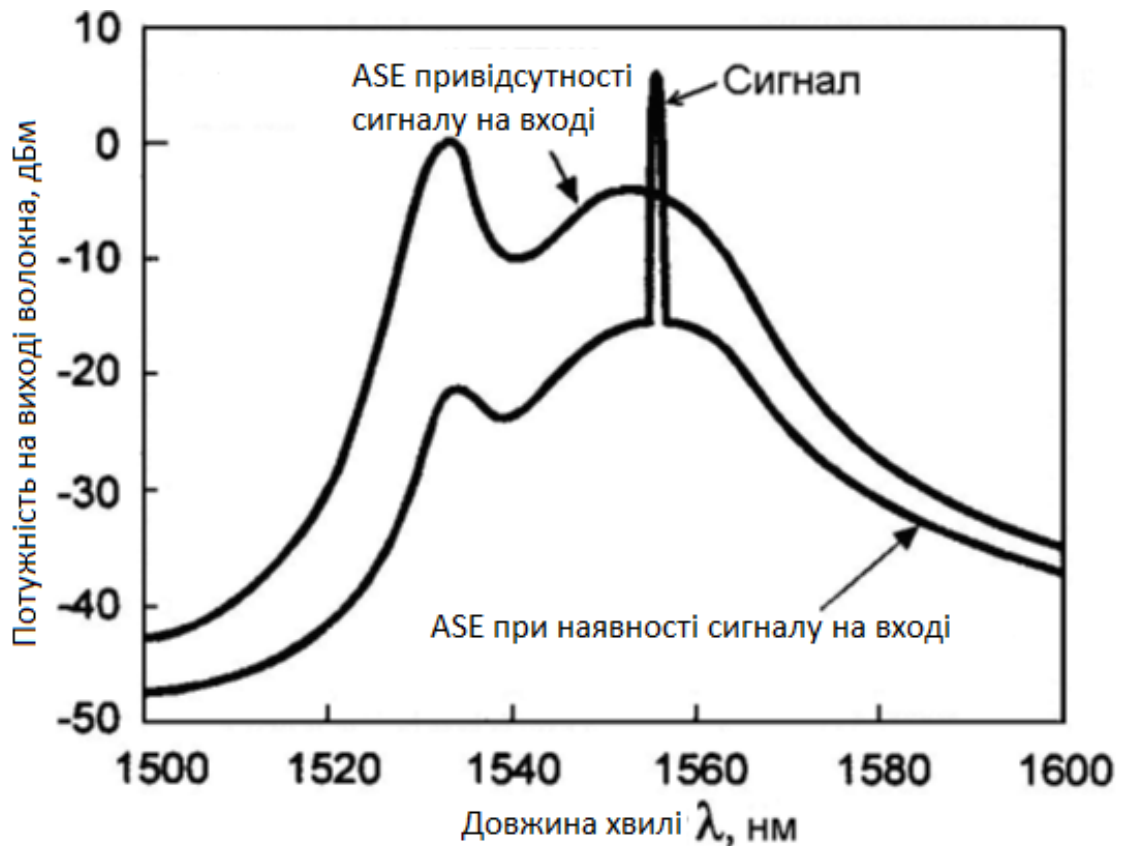


Рисунок 4.6 - Придушення шуму спонтанної емісії у EDFA

Коефіцієнт шуму EDFA визначається наступним співвідношенням:

$$NF = \frac{2P_{ASE}}{hf\Delta f(G_A - 1)} \quad (4.1)$$

де P_{ASE} – потужність посиленої спонтанної емісії, h – стала Планка, f – частота оптичного сигналу, Δf – смуга посилення. Зазвичай $3 \text{ дБ} < NF < 6 \text{ дБ}$, G_A – коефіцієнт посилення. При каскадному включенні підсилювачів може відбуватися накопичення шумів від числа підсилювачів n

$$NF_n = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{NF_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (4.2)$$

При цьому шуми визначаються переважно першим каскадом (NF_1).

Таблиця 4.1 Порівняльні характеристики EDFA для різних хвиль накачування

Характеристики	Для хвилі 1480 нм	Для хвилі 980 нм
Напівпровідник лазера/тип лазера	InGaAs/InP (Фабрі-Перо)	InGaAs (Суперрешітка)
Ефективність посилення	5 дБ/мВт	10 дБ/мВт
Шум ASE	~ 5,5 дБ	3-4 дБ
Вихідна потужність насичення	+20 дБ	+5 дБ
Діапазон хвиль накачки	1470-1490 нм (20 нм)	979-981 нм (2 нм)
Потужність накачки	50-200 мВт	10-20 мВт

Приклади характеристик волоконного світловоду з атомами Eг наведено на рис. 4.7–4.9.

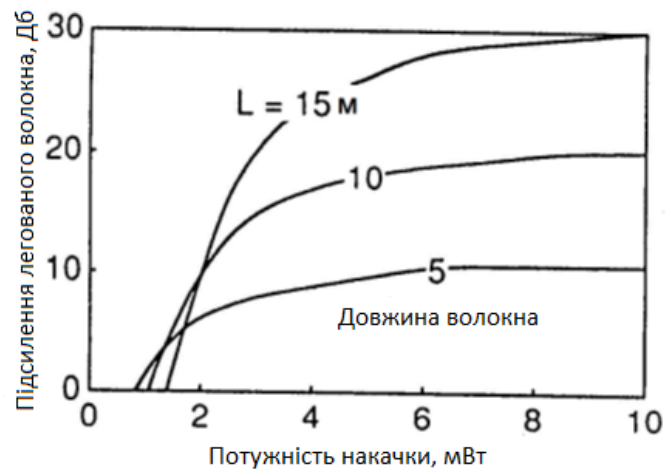


Рисунок 4.7 - Залежність посилення легованого Er волокна від довжини та потужності накачування на хвилі 1480 нм

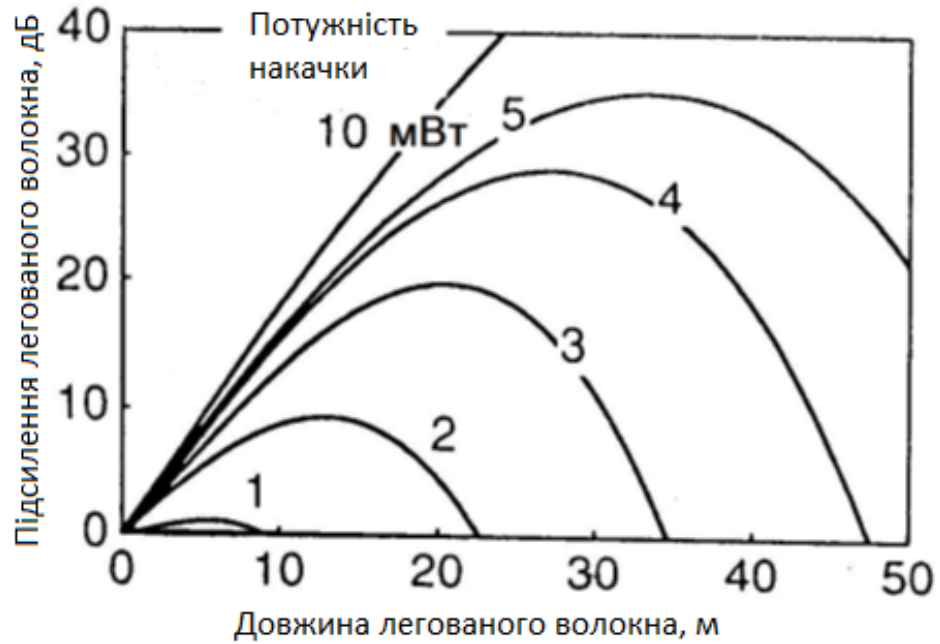


Рисунок 4.8 - Екстремальні характеристики посилення волокна з Er для різних довжин та потужностей накачування на хвилі 1480 нм

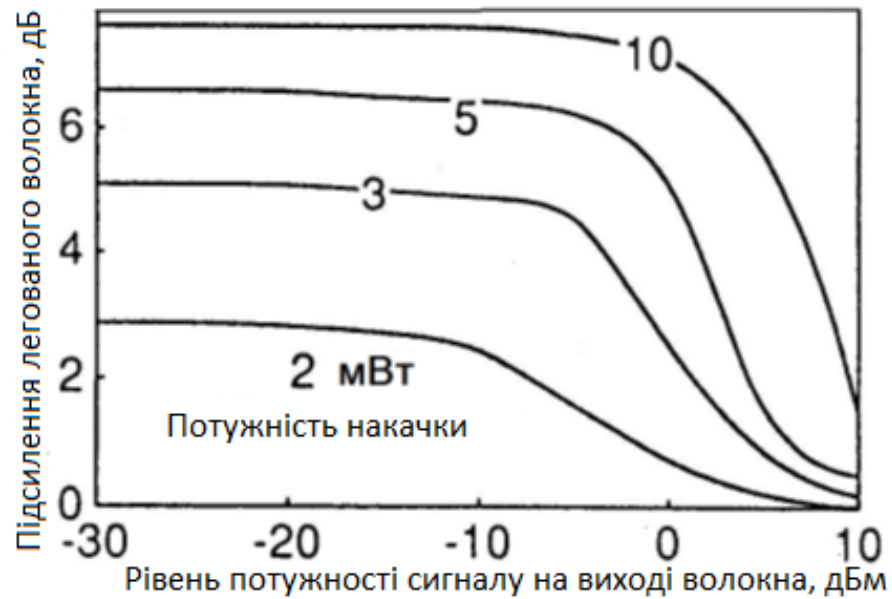


Рисунок 4.9 - Характеристики насичення волокна з Er при різних потужностях накачування на хвилі 1480 нм

Відомі частотні характеристики посилення ербієвих підсилювачів відрізняються нерівномірністю (рис. 4.10), що сприяє відмінностям оптичних каналів на різних хвилях OSNR. Для усунення нерівномірності посилення застосовуються інші базові компоненти (наприклад, фтор, цирконій) та окремі оптичні вирівнювачі (GEF, Gain Equalising Filters) з протилежними посиленню характеристик передачі (рис. 4.11), що сприяє вирівнюванню посилення широкої смуги частот (хвиль до 40 нм) (рис. 4.12). Також можуть використовуватись керовані еквалайзери у структурах з ербієвими підсилювачами.

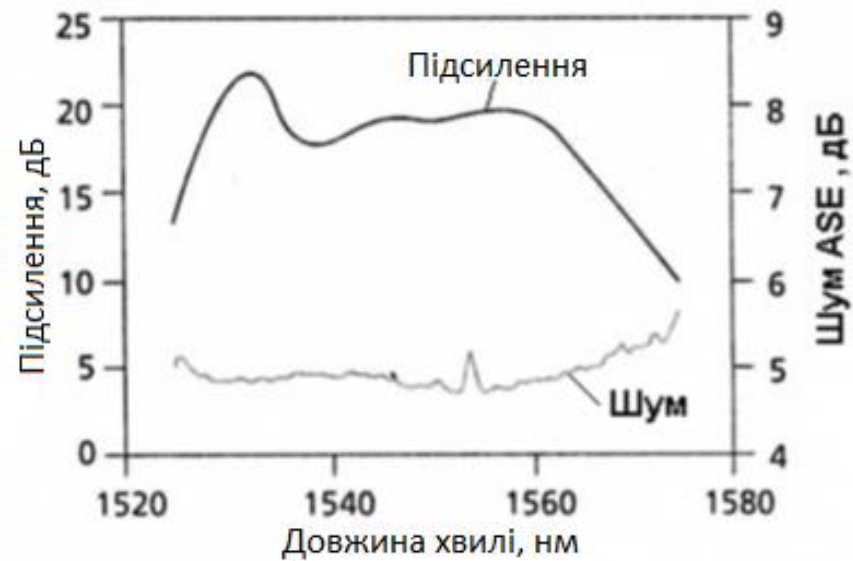


Рисунок 4.10 - Фігури характеристик нерівномірності посилення та шуму EDFA

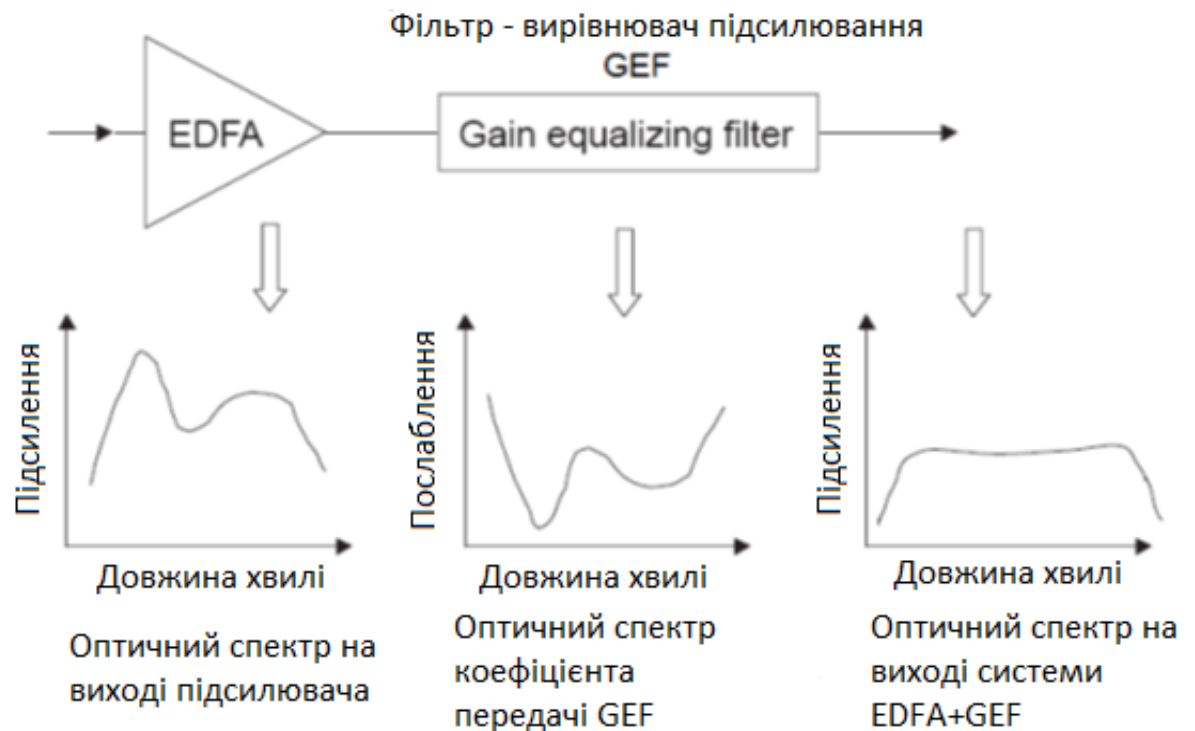


Рисунок 4.11 - Принцип вирівнювання посилення EDFA

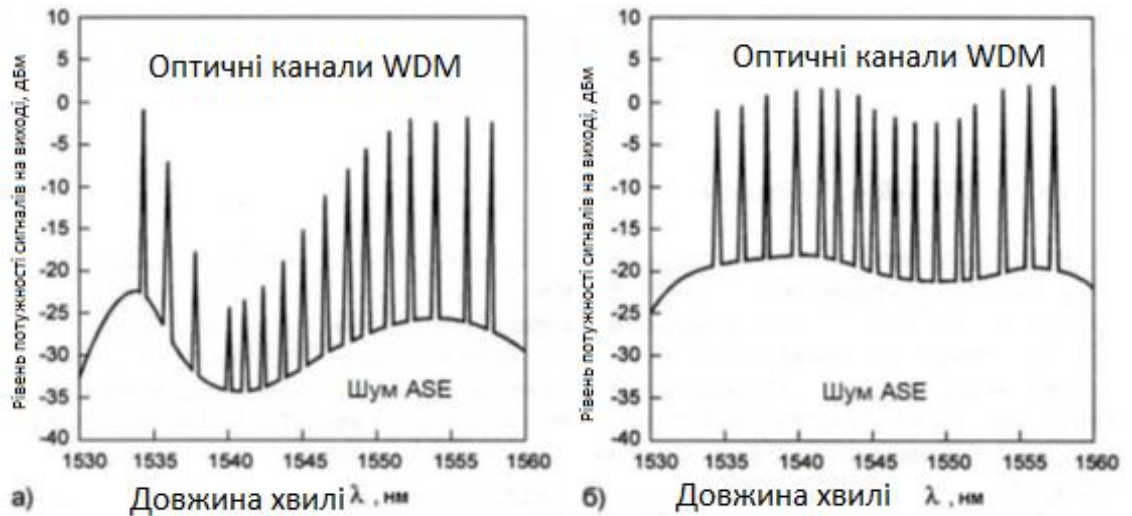


Рисунок 4.12 - Криві рівнів потужності оптичних каналів та шуму: а) для EDFA на кремнієвій основі; б) для EDFA на фтор-цирконатній основі

Підсилювачі на фтор-цирконатній основі мають один недолік - вони більше шумлять, тому що для накачування використовується лише хвиля 1480 нм.

Зменшити шумові складові та розширити смугу рівномірного посилення до 84 нм запропонувала компанія Lucent за рахунок паралельного включення домішкових підсилювачів з вирівнювачами GEF та п'ятьма каскадами накачування у кожному з двох підсилювальних ланцюгів. Отримана у своїй характеристика посилення представлена рис. 4.13.

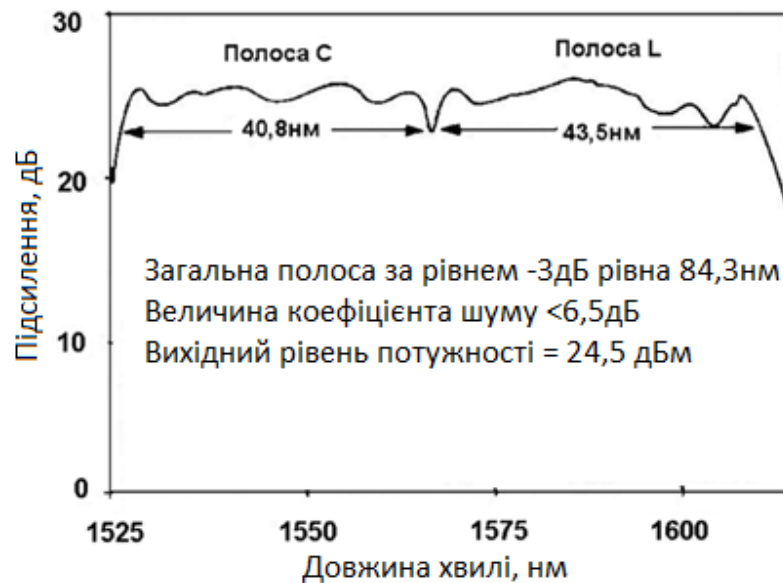


Рисунок 4.13 - Характеристика посилення п'ятикаскадного двоканального оптичного підсилювача

При організації спектральних каналів для оптичних підсилювачів прийнято вважати, що потужність лазера накачування теоретично рівномірно розподіляється між ними, тому чим більше каналів у системі, тим потужнішим повинен бути лазер накачування або каскад накачування. Найбільшого поширення набули три схеми накачування домішкового волокна оптичного підсилювача: узгоджена чи пряма; зустрічна або протиспрямована стосовно посилюваного сигналу; двоспрямована під час використання двох лазерів. Спрощені схеми цих методів накачування представлені на рис. 4.14–4.16.

Пряме накачування на хвилі 980 нм забезпечує низький рівень шуму при малій потужності вхідного сигналу і великому коефіцієнті посилення. Зустрічна накачування на хвилі 1480 нм швидше призводить до режиму насичення волокна, простіше досягається режим максимальної вихідної потужності. Використання двох лазерів накачування з різними довжинами хвиль (узгоджено 980 нм, 1480 нм зустрічно) дозволяють отримати від підсилювача мінімальні шуми при максимальному посиленні.

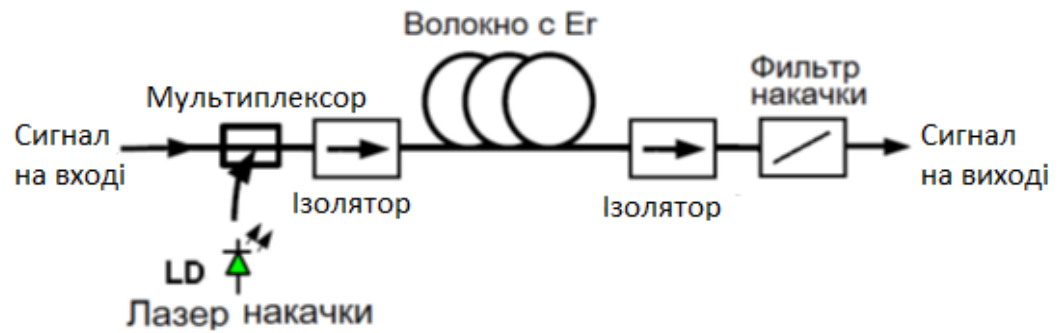


Рисунок 4.14 - Пряме накачування в оптичному підсилювачі

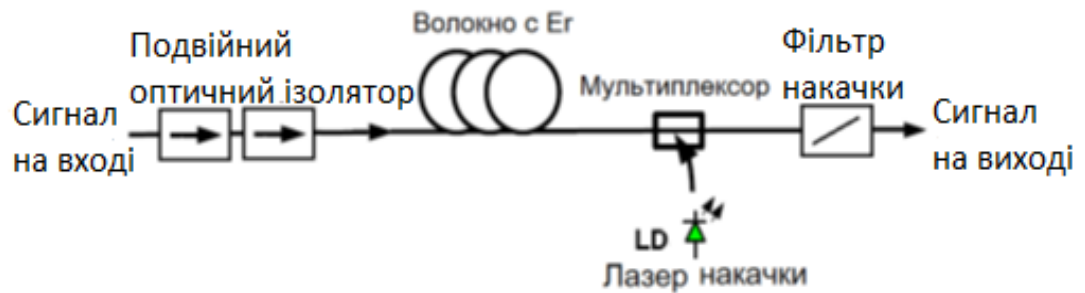


Рисунок 4.15 - Протиспрямоване накачування в оптичному підсилювачі

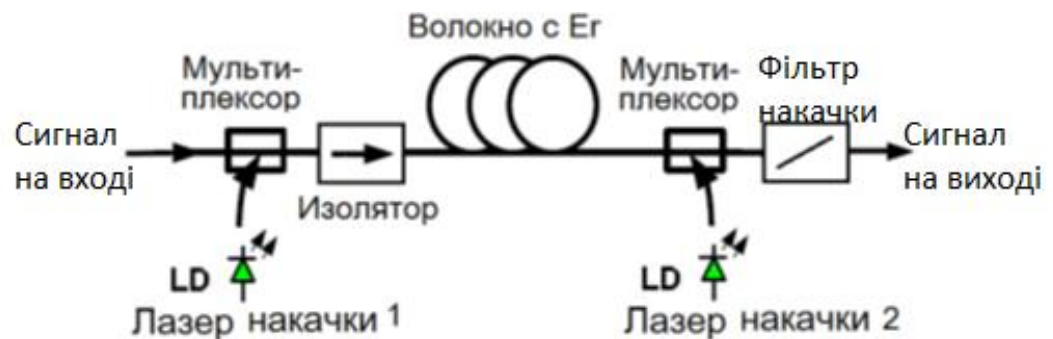


Рисунок 4.16 - Двонаправлене накачування в оптичному підсилювачі

Нижче наведено характеристики EDFA ONS 15216 Cisco, що входить до номенклатури пристроїв для оптичних мереж DWDM з числом спектральних каналів до 40В діапазоні хвиль 1530–1563 нм (рис. 4.17).

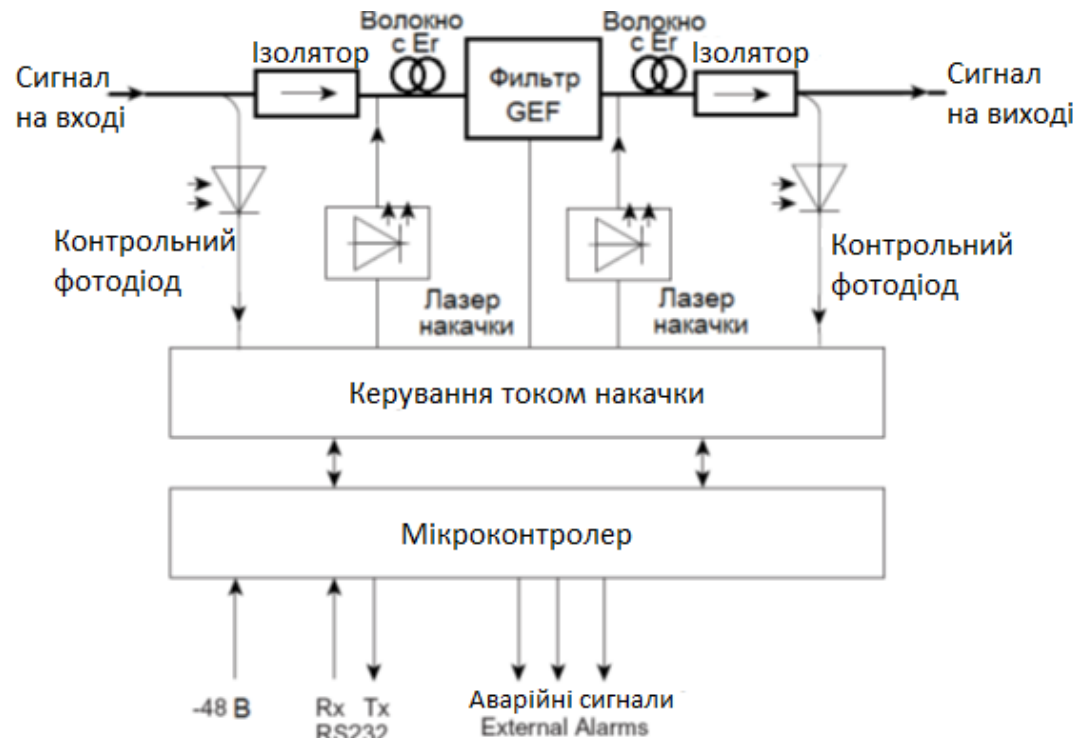


Рисунок 4.17 - Типова структура підсилювача ербієвого ONS 15216
EDFA1 Cisco

Підсилювач допускає загальний рівень потужності на вході від -29 дБм до -6 дБм, тобто при одному сигналі (λ_1) на вході допустимий рівень -6 дБм, при двох сигналах (λ_1, λ_2) на вході допустимий рівень -9 дБм, при трьох сигналах на вході ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) допустимий рівень -10,8 дБм і т. д. При 40 λ на вході допустимий рівень одного каналного сигналу становитиме лише -22,1 дБм.

Максимальний рівень потужності на виході підсилювача може сягати +17 дБм. Загальний коефіцієнт посилення 23 дБ при нерівномірності смуги посилення $\pm 1,25$ дБ. Така точна характеристика посилення забезпечується вирівнюючим оптичним фільтром GEF. Фігура кривої шуму спонтанної емісії ASE не перевищує 6 дБ при хвилях накачування 980 нм. ПМД, що вноситься, не перевищує 0,6 пс. Поляризаційна чутливість становить 0,5 дБ. Підсилювач може бути підключений до системи керування через стандартний інтерфейс RS232. У підсилювачі можуть фіксуватись аварійні сигнали на передній панелі зі світлодіодами.

4.2 Оптичні підсилювачі на ефекті вимушеного комбінаційного (раманівського) розсіювання

Принцип дії раманівських підсилювачів заснований на ефекті комбінаційного розсіювання, який був відкритий індійським ученим Раманом в 1929 р. При спонтанному комбінаційному розсіюванні світла на молекулах будь-якого матеріалу (середовища) невелика частина потужності випромінювання накачування перетворюється на випромінювання з більш частотного зсуву визначається коливальними модами середовища розповсюдження (рис. 4.18). Відомі два типи коливальних мод: акустичні та оптичні фонони. Взаємодія фотонів з акустичними фононами називається розсіянням Мандельштама-Брілюена. Оптичні фотони пов'язані з електричним полем, довжина якого лежить в оптичному діапазоні. В обох випадках фотон вивільняє деяку енергію, яка створює один або кілька фононів із різною енергією імпульсом. Таким чином падаюча хвиля служить хвилею накачування для генерації випромінювання на зміщеній частоті, також званої стоксовою компонентою випромінювання ($V-VR$). Також можливе спостереження процесу, при якому падає фотон (хвиля) отримує енергію від фонону і розсіюється зі збільшенням частоти. Таке випромінювання називається антистоксовим ($V+VR$). При значному збільшенні рівня накачування утворюється явище – вимушене комбінаційне (раманівське) розсіювання, у якому інтенсивність стоксової компоненти зростає настільки швидко, що у неї переходить більшість енергії накачки. Таким чином, при одночасному поширенні в середовищі випромінювання накачування і сигналу, що віддаляється на величину зсуву стоксу, буде спостерігатися його посилення (на рис. 4.18 показано фотоном).

У техніці оптичного зв'язку раманівські підсилювачі будуються з урахуванням волоконних світловодів. У цьому коефіцієнт посилення залежить

від складу скловолокна (рис. 4.19). Найбільший коефіцієнт посилення спостерігається у волокнах DCF, тобто у волокні для компенсації дисперсії.

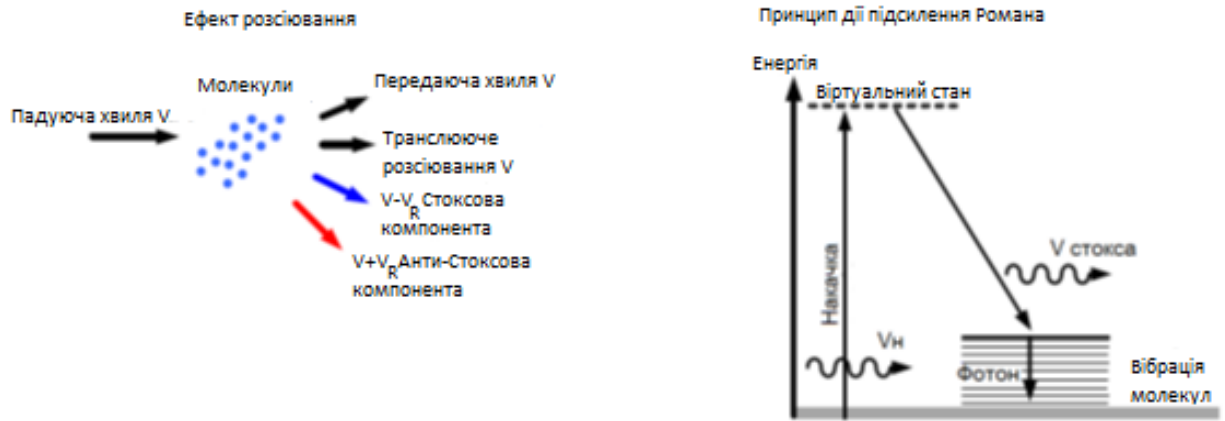


Рисунок 4.18 - Раманівське розсіювання в скловолокні та принцип дії оптичного підсилувача

Раманівське посилення значно залежить від станів поляризації сигналів (накачування та інформаційних). У разі збігу станів поляризації сигналів, раманівське посилення на порядок вище, ніж при ортогональному розташуванні станів поляризації. У волокнах без збереження поляризації через явище випадкового зв'язку мод поляризаційна залежність знижується. Посилення внаслідок ВКР залежить від інтенсивності (рівної потужності накачування P_H , поділеної на площу модової плями A), довжини взаємодії L хвилі накачування та сигнальної хвилі та коефіцієнта посилення g (рис. 4.19) визначається за (4.3):

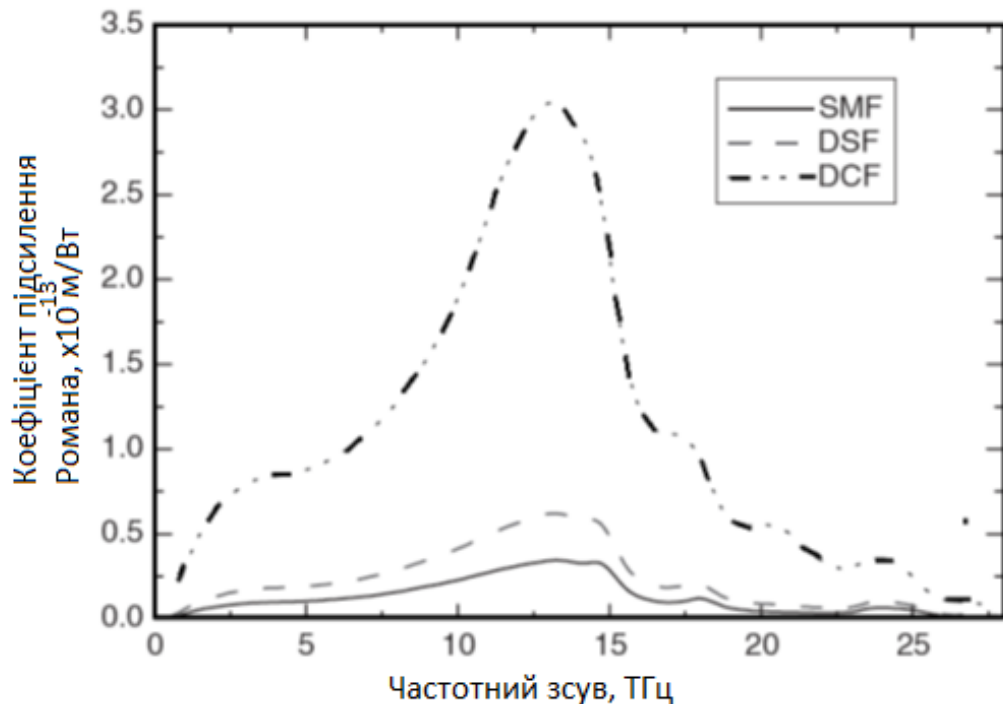


Рисунок 4.19 - Коефіцієнт раманівського посилення g для різних волокон на хвилі накачування 1510 нм, що відрізняються ефективною площею: DCF ~ 20 $\mu\text{м}^2$; DSF ~ 50 $\mu\text{м}^2$; SMF ~ 80 $\mu\text{м}^2$

$$G_R \approx \exp\left(\frac{gP_iL}{A}\right) \quad (4.3)$$

У світловоді з низькими втратами довжина взаємодії може становити понад 1 км, що знижує вимоги щодо потужності накачування та коефіцієнта посилення.

Величина коефіцієнта посилення g залежить від присадок до скловолокна, таких, як бір, германій, фосфор. Для волокна на основі двоокису кремнію SiO_2 величина коефіцієнта g при накачуванні 1480 нм представлена залежністю на рис. 4.20. З графіка видно, що за рівнем зменшення посилення вдвічі смуга посилення становить близько 5 ТГц за нерівномірної характеристики посилення. Зсув розсіяного випромінювання відбувається у довгохвильову область (рис. 4.21), тобто туди, де передаються інформаційні оптичні сигнали.

Посилення внаслідок ВКР залежить від інтенсивності (рівної потужності накачування P_H , поділеної на площу модової плями A), довжини взаємодії L хвилі накачування та сигнальної хвилі та коефіцієнта посилення g :

$$G_R \approx \exp\left(\frac{gP_iL}{A}\right) \quad (4.4)$$

У світловоді з низькими втратами довжина взаємодії може становити більше 1 км, що знижує вимоги щодо потужності накачування та коефіцієнта посилення.

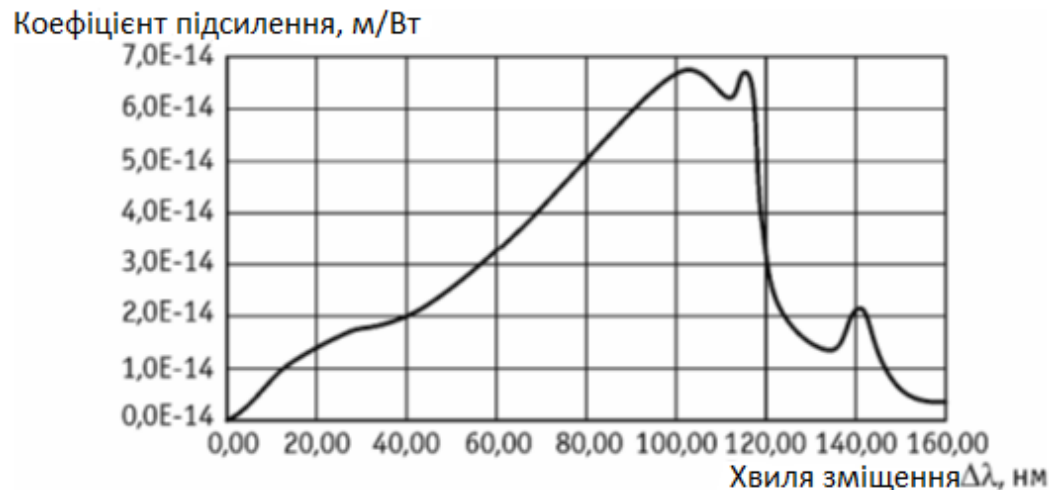


Рисунок 4.20 - Залежність коефіцієнта посилення від зсуву частоти при $\lambda_H = 1480$ нм у волокні SiO₂

Посилення залежить від довжини волокна і від величини поглинання потужності в матеріалі волокна:

$$L_e \approx \frac{1 - e^{-\alpha l}}{\alpha} \quad (4.5)$$

де l – дійсна довжина, α – загасання волокна (дБ/км), L_e – ефективна довжина взаємодії хвиль накачування та сигналу.

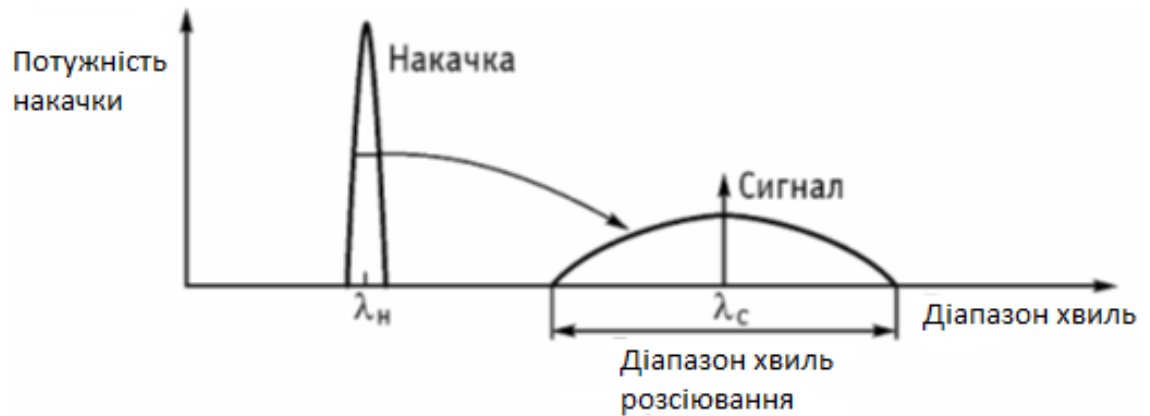


Рисунок 4.21 - Схема раманівського розсіювання

На довгих лініях (десятки кілометрів) можна вважати, що

$$L_e \approx 1/\alpha \quad (4.6)$$

Розмір потужності P_n розглядається усередненої за інтервал часу передачі імпульсного сигналу. Величина посилення приймається незалежною від поляризації сигналу, що посилюється.

Коефіцієнт шуму раманівського підсилювача визначається виразом

$$NF_R = 2/\ln G_R \quad (4.7)$$

Тобто при збільшенні коефіцієнта посилення зменшаться величина шуму, проте це відбувається при збільшенні потужності накачування, що, у свою чергу, може породити збільшення стоксового шумового випромінювання, не пов'язаного з сигналом.

Реальні величини коефіцієнтів посилення раманівських підсилювачів можуть набувати значення від 3...5 дБ до 20...35 дБ залежно від домішкового складу скловолокна та потужності накачування. Приклад схеми розподіленого підсилювача раманівського типу DRA (Distributed Raman Amplifier) наведено на рис. 4.22. Особливість схеми - зустрічна по відношенню до сигналу накачування від потужного лазерного діода (до 1 Вт), при цьому досягаються суттєві

збільшення довжини ділянок передачі (рис. 4.23, 4.24). Необхідно відмітити, що схеми підсилювачів Рамана можуть будуватися не лише за розподіленою схемою з лінійним оптичним волокном у кабелі, але й за схемою із зосередженим посиленням у котушці оптичного волокна DCF (Discrete Raman Amplifier).

Для розширення смуги частот, що підсилюються, і надання рівномірності посилення використовуються комбіновані схеми (рис. 4.25): ербієвий + раманівський; раманівський з двостороннім накачуванням на декількох частотах.

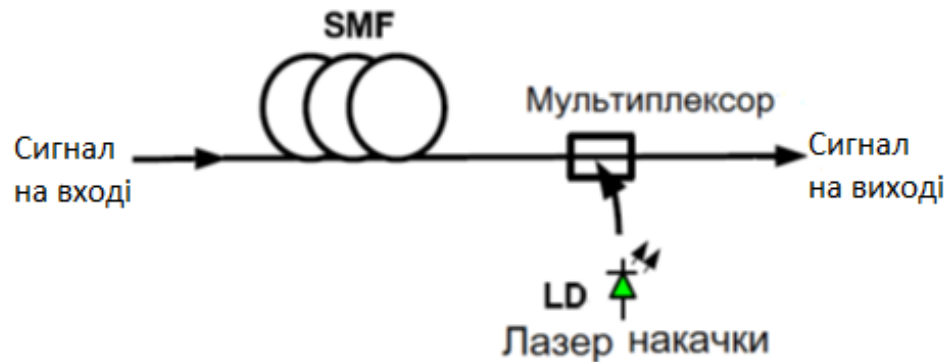


Рисунок 4.22 - Схема розподіленого підсилювача DRA із зустрічним накачуванням

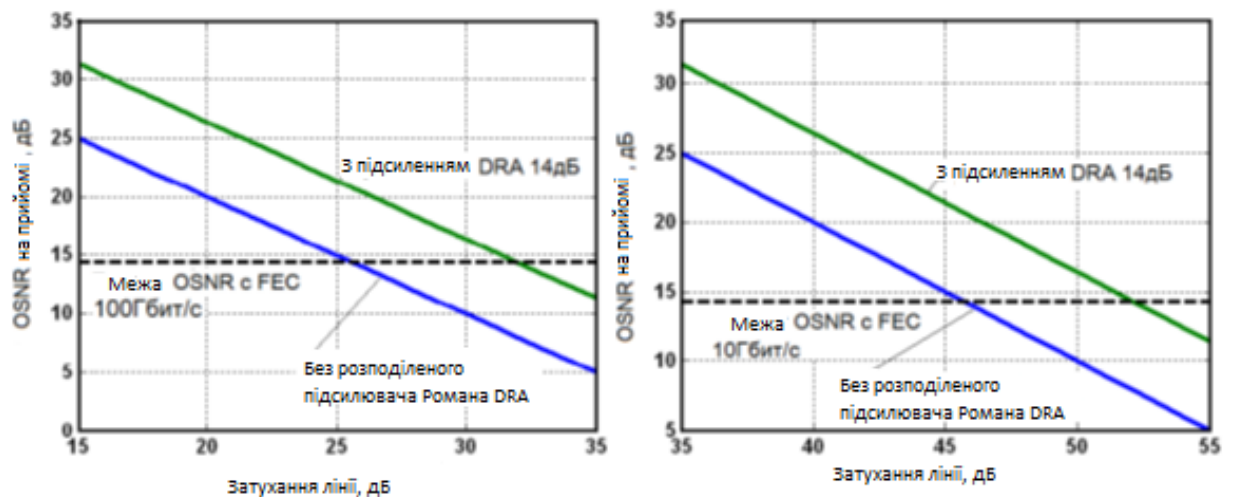


Рисунок 4.23 - Виграш із застосуванням DRA у каналах 10 Гбіт/с та 100

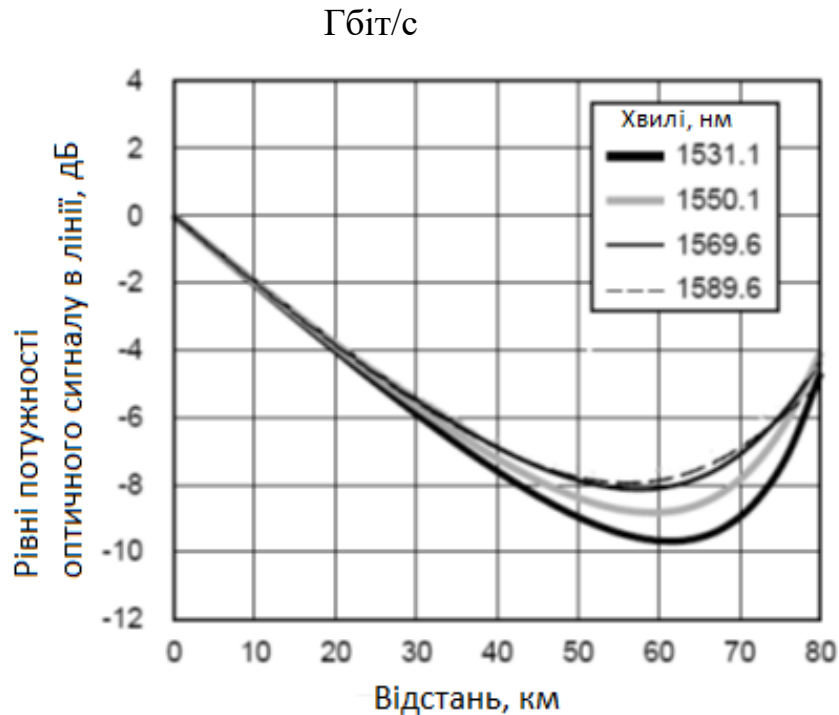


Рисунок 4.24 - Розподіл рівнів потужності оптичних каналів при використанні розподіленого накачування (DRA) у протяжній лінії

Результатом використання декількох лазерів накачування (рис. 4.26), тобто включення декількох лазерів з використанням мультиплексорів в одному місці або в каскадному ланцюжку для подачі накачування по окремих ділянках, можуть бути отримані характеристики посилення високого ступеня рівномірності (відхилення не більше 0,1 дБ) у широкому діапазоні хвиль (рис. 4.27), що конче необхідно для систем передачі з DWDM. Крім того, підбором потужності накачування, довжин хвиль накачування та схеми включення можливе формування характеристик посилення з різним нахилом, що необхідно для вирівнювання рівнів потужності спектральних каналів на різних хвилях на приймальній стороні та виконання вимог OSNR.

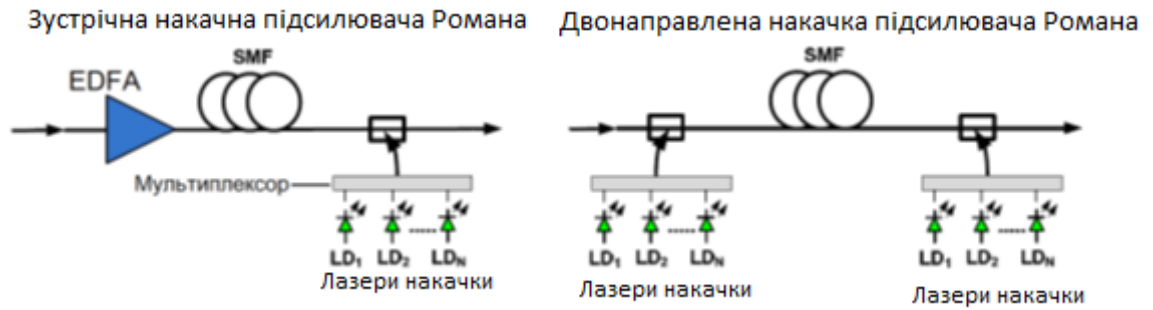


Рисунок 4.25 - Схеми включення широкопсмугового підсилювача Рамана спільно з EDFA, зустрічним накачуванням та двостороннім накачуванням

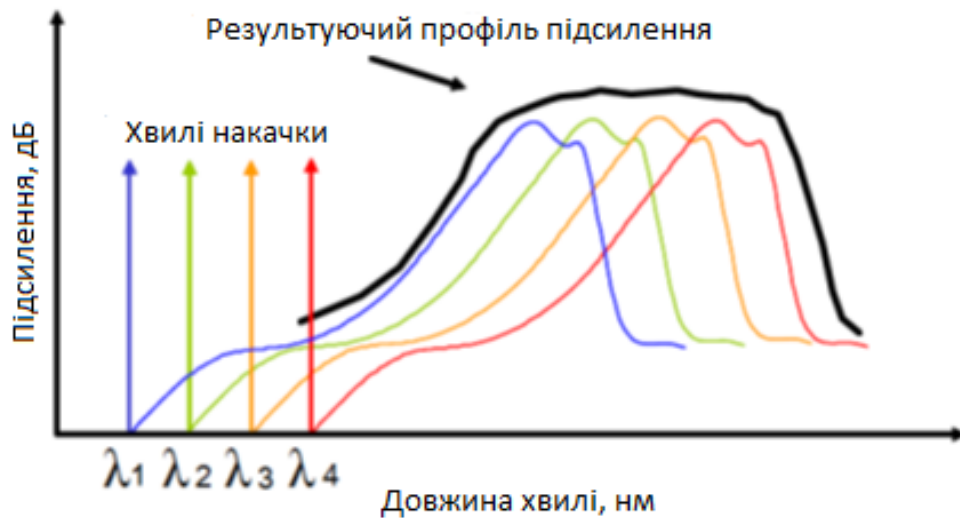


Рисунок 4.26 - Принцип розширення смуги частот підсилювача Рамана із застосуванням групи хвиль накачування

Можливості з організації протяжних оптичних каналів високих швидкостей передачі також досить ефективно можуть вирішуватися з DRA при регулярному розміщенні накачування, як показано на рис. 4.28.

Обмежуючим чинником дальності передачі оптичних сигналів в лініях з DRA є накопичення шумів посилення. Дослідження показують, що зустрічна та узгоджена накачування DRA викликають різні величини шуму ASE (рис. 4.29), тобто найгірші шумові властивості демонструють підсилювачі із зустрічним накачуванням.

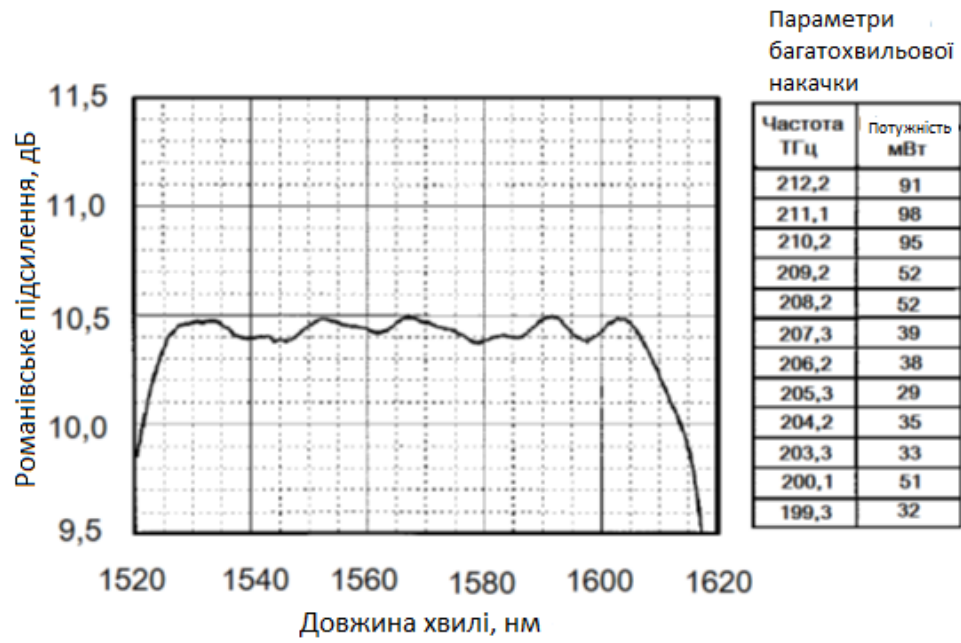


Рисунок 4.27 - Широкосмугове посилення (діпазони C та L) при багатохвильовому накачуванні

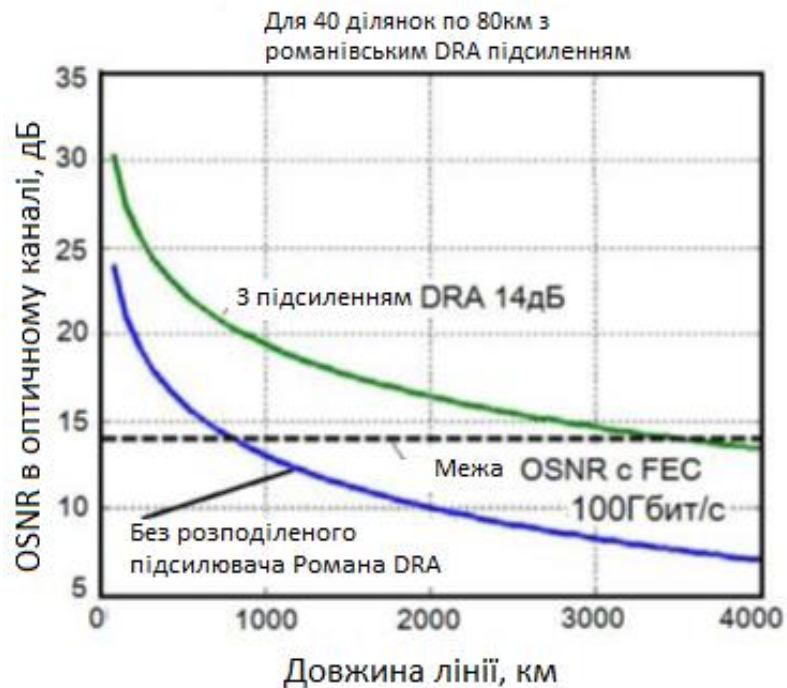


Рисунок 4.28 - Можливості щодо організації оптичних каналів на протяжних оптичних лініях під час використання DRA

При узгодженому накачуванні коефіцієнт шуму знаходиться в межах 4 дБ, а при зустрічній може зрости до 9 дБ при потужності накачування 300 мВт на хвилі 1400 нм для обох способів. Однак зустрічна накачування використовується для попередніх підсилювачів, тому що в місці прийому сигналу і введення вивчення накачування співвідношення сигнал шум залишається високим через посилення сигналу вимушеним розсіюванням.

Визнаним за своєю ефективністю побудови оптичних підсилювачів для когерентних оптичних зі спектральними каналами на швидкості 112 Гбіт/с стали комбіновані та інтегровані на одній карті підсилювач Рамана та EDFA, які отримали назву EDRA, Erbium Doper Raman Amplifier (рис. 4.30, 4.31).

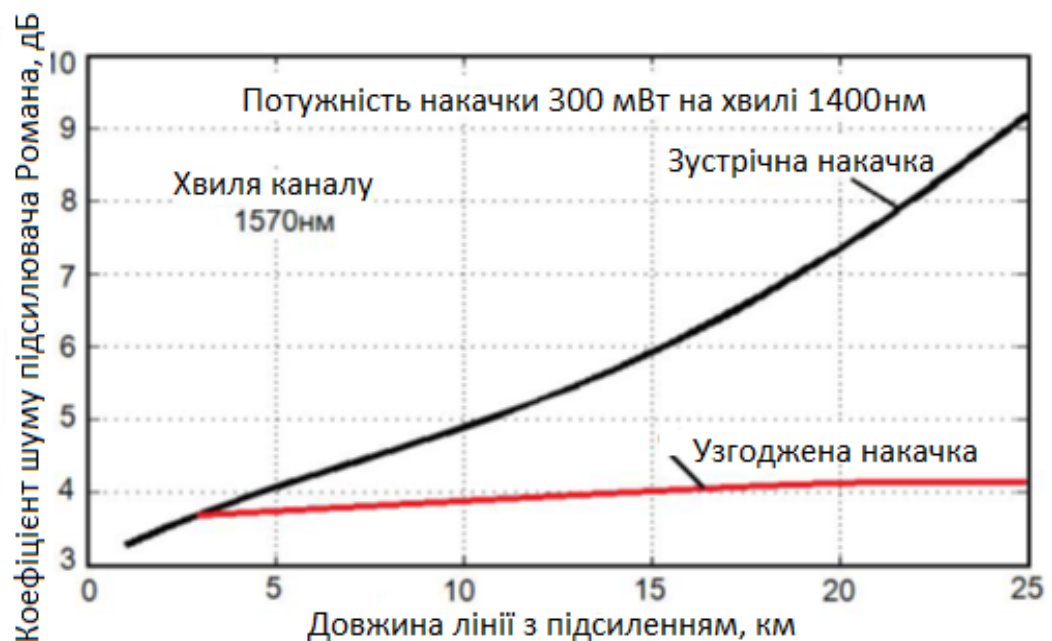


Рисунок 4.29 - Приклади шумових характеристик DRA для узгодженого та зустрічного накачування в DRA

Ефективність полягає в наступному: менші власні шуми, що вносяться на 6 дБ, ніж у існуючих EDFA підсилювачів з аналогічним коефіцієнтом посилення; можливим широким діапазоном перебудови посилення; підтримка в

смузі С до 96 спектральних каналів, а двох діапазонах С і L до 192 спектральних каналів.

Приклади таких розробок представлені різними компаніями. Нижче наведено можливості EDRA.

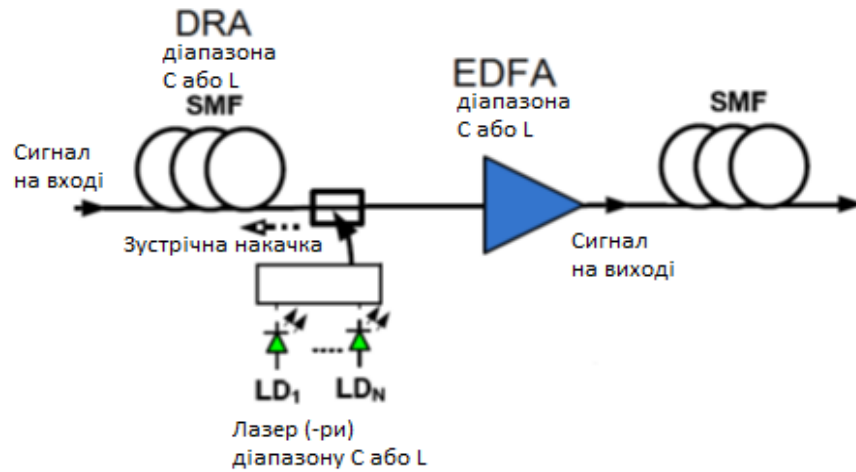


Рисунок 4.30 - Комбінований підсилювач EDRA на діапазон або L

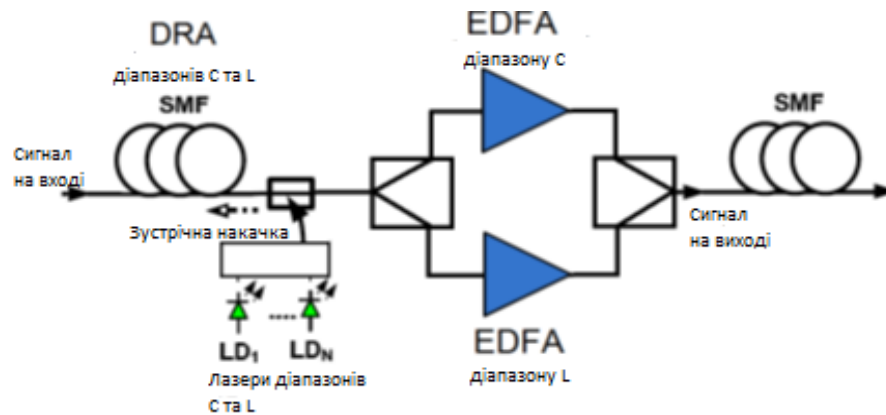


Рисунок 4.31 - Комбінований підсилювач EDRA на діапазони С та L

Таблиця 4.2 - Характеристики оптичного підсилювача EDFA Cisco для діапазону С у мультисервісній транспортній платформі ONS 15454

№	Специфікація	Дані
Загальні характеристики		
1	Робочий діапазон хвиль	1529,0-1562,5 нм
2	Діапазон хвиль сервісного каналу OSC	1500-1520 нм
3	Відхилення коефіцієнта підсилення (EDFA+RDA)	±0,2 - ±0,5 дБ
4	Поляризаційно-залежні втрати	0,2 дБ
5	Максимум ПМД	0,15 пс
6	Втрати на відбиття	40 дБ
Секція романівського підсилення		
7	Діапазон хвиль накачки	1425-1452 нм
8	Загальна потужність накачки	До 500 мВт
9	Керування загальною накачкою в межах	100-450 мВт
10	Точність налаштування потужності	±2%
11	Час переналаштування потужності	1 с
12	Типовий романівський коефіцієнт підсилення: SMF (G.652) E-LEAF (G.655) TW-RS (G.655)	8,5 дБ 10 дБ 13,5 дБ
Секія EDFA		
13	Величина підсилення: Нормальне Діапазон перестройки підсилення Контролюєма точність	14 дБ (з аттенюатором 0 дБ) 8-20 дБ ±0,5 дБ
14	Реакція підсилювача при додаванні каналу	0,1 мс
15	Вихідний рівень потужності для всіх каналів Максимальний Мінімальний (для одного каналу) Точність потужності	+17 дБм -10 дБм 0,1 дБ
16	Діапазон перестройки атенюатора	0 – 25 дБ
17	Вносима ПМД (максимум)	0,5 пс
18	Вносима хроматична дисперсія	±0,5 пс
19	Фігура шуму (при 0 дБ аттенюатора): Загальний шум всіх каналів Шум одного каналу	5,7 дБ (макс. 7 дБ) 6,7 дБ (макс. 7,5 дБ)

4.3 Напівпровідникові оптичні підсилювачі (НПОП)

Напівпровідникові оптичні підсилювачі також знайшли застосування у когерентних оптичних системах у вигляді підсилювачів потужності (BOA, Booster Optical Amplifier) та універсальних підсилювачів (SOA, Semiconductor Optical Amplifier). Підсилювачі є багатошаровими напівпровідниковими кристалами, в середній частині яких знаходиться р-n-перехід, що накачується носіями зарядів (електронами і дірками). Це середовище з надлишковим вмістом електронів і дірок є каналом посилення оптичних сигналів, що подаються на один із двох торців (рис. 4.32). При проходженні сигналу фотони посилюються завдяки вимушеному цим сигналом рекомбінації процесу електронів і дірок. Однак у цьому потоці фотонів, що посилюються, утворюються також і випадкові за часом, фазою і частотою фотони через випадкові рекомбінації електронів і дірок, що викликає оптичний шум або шум спонтанної емісії (ASE).

У підсилювачах типу BOA, на відміну від SOA, застосовується високоефективний канал посилення на основі InP/InGaAsP Multiple Quantum Well (MQW), який дозволяє помітно, як показано нижче, зменшити рівень шуму.

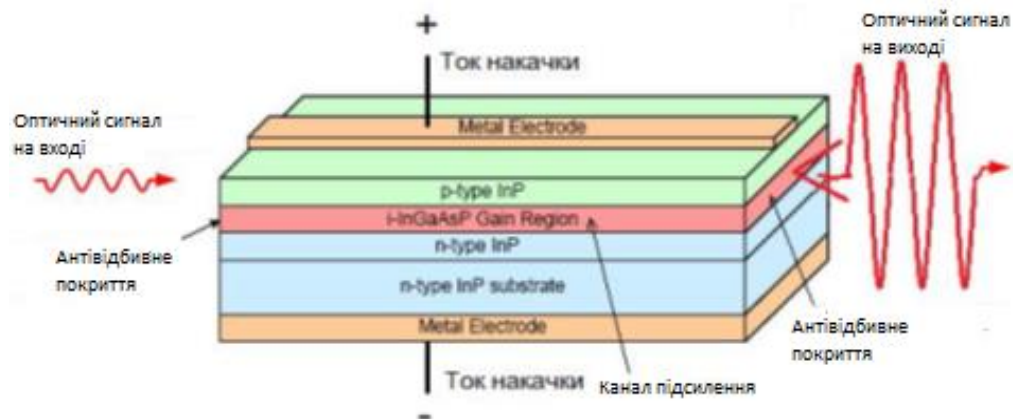


Рисунок 4.32 - Конструкція напівпровідникового широкопasmового.

оптичного підсилювача SOA

Антивідбивне покриття торців кристала BOA або SOA, а також скошений канал посилення (рис. 4.33) дозволяють усунути відображення сигналу від торців та утворення середовища з лазерною генерацією, як у лазері типу F-P, що дозволяє формувати рівномірне посилення в широкому діапазоні хвиль (1520-1620 нм).

Для введення та виведення оптичного випромінювання використовуються одномодові волоконні світловоди двох типів: без збереження поляризації сигналу типу SMF та зі збереженням або наданням поляризації типу PMF. При цьому волоконні світловоди можуть являти собою відрізки волокон до 1–1,5 м з кінцем роз'ємними з'єднувачами FC/APC або без них для зварювання (рис. 4.34).



Рисунок 4.33 - Конструктивне оформлення НПОП зі скошеним каналом посилення для виключення відбитих хвиль



Рисунок 4.34 - Конструкція SOA у корпусі типу «butterfly» з волоконними оконечними виводами

До складу BOA/SOA можуть входити оптичні ізолятори, що поєднуються з входом та виходом підсилювача.

Типові застосування BOA у складі систем передачі: вихідні підсилювачі випромінювання лазерів у передавачах; компенсатори втрат оптичної потужності таких пасивних пристроїв, як мультиплексори та демультиплексори, оптичні фільтри.

Типові застосування SOA у складі систем передачі: лінійний підсилювач замість регенератора; передпідсилювач перед фотодетектором; швидкий оптичний комутатор або керований комутаційний осередок (час перемикання ~ 1 нс).

Можливості збільшення оптичної потужності представлені в характеристиках: амплітудної (рис. 4.35), де показана залежність вихідної потужності оптичного сигналу від струму накачування і залежність посилення від струму накачування і вихідної потужності сигналу; частотної (рис. 4.36), де показані залежності посилення та коефіцієнта шуму від довжини хвилі сигналу, що посилюється. Крім того, представлені залежності посилення сигналів з різною поляризацією (рис. 4.37).

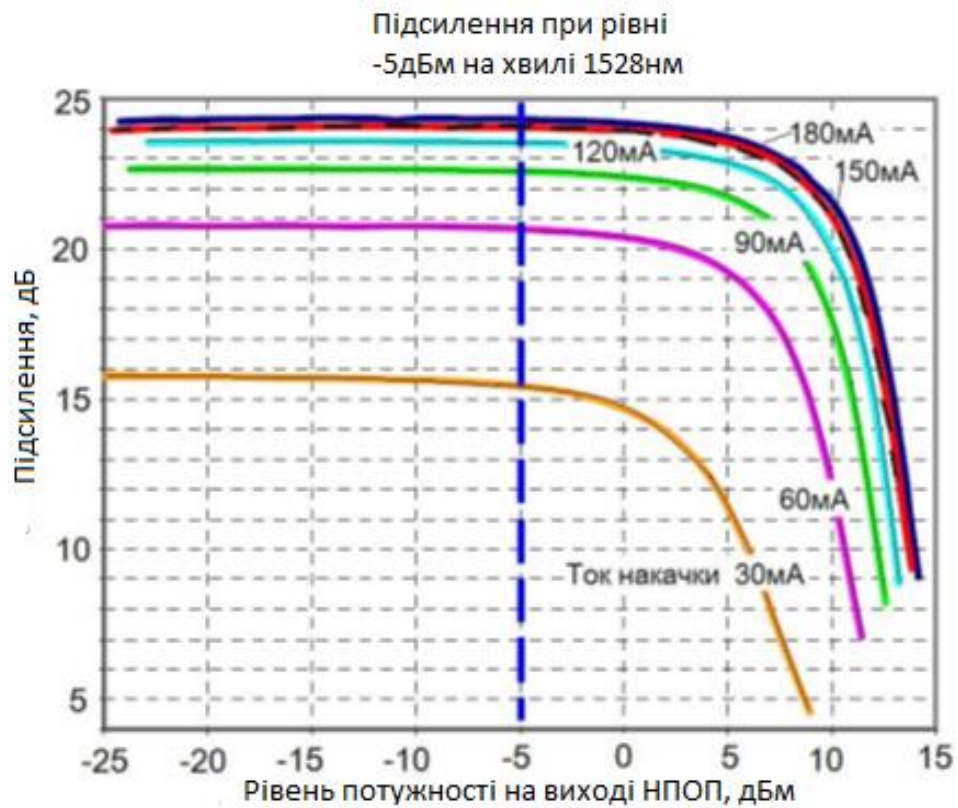


Рисунок 4.35 - Характеристики посилення напівпровідникового оптичного підсилювача НПОП

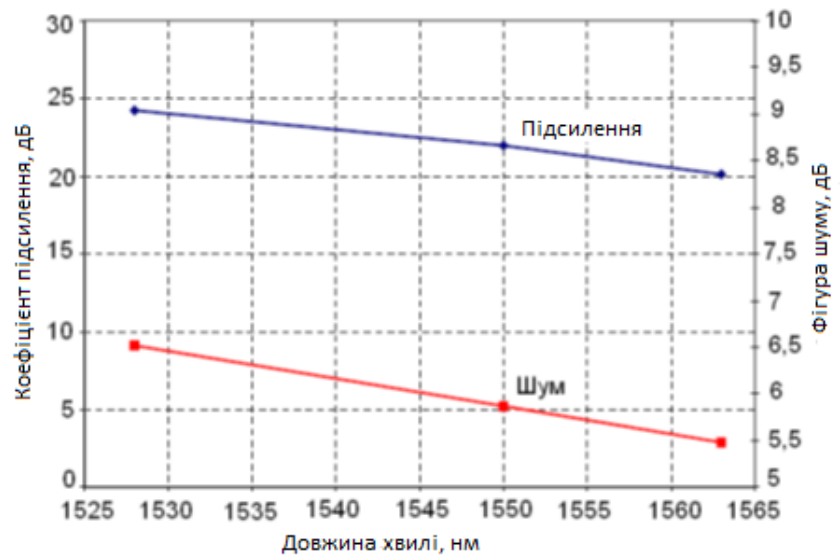


Рисунок 4.36 - Характеристики посилення та шуму НПОП

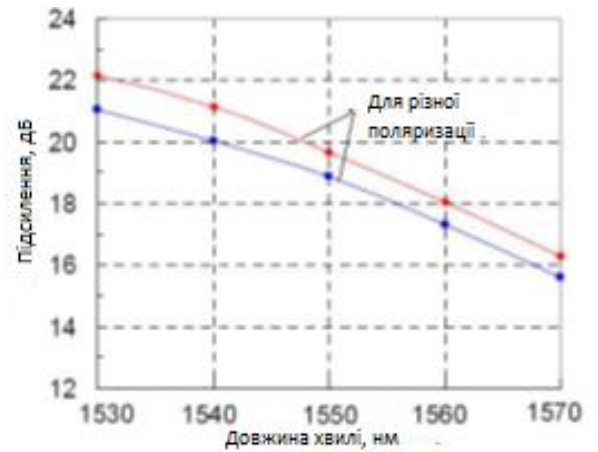
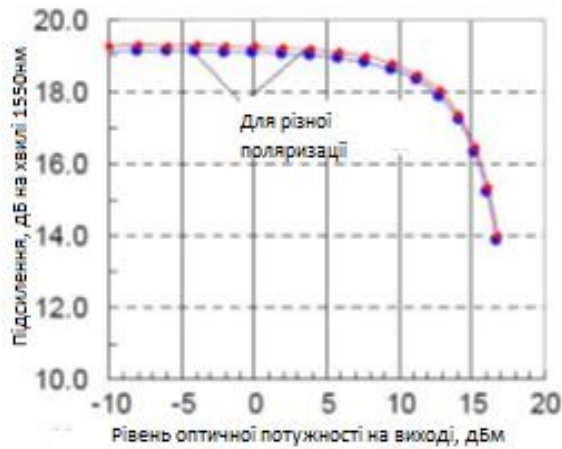


Рисунок 4.37 - Характеристики підсилювача SOA1013Covega для різних поляризованих сигналів при шумі 8,5-9,0 дБ

Підсилювачі відрізняються значними відмінностями у посиленні оптичних сигналів із різними значеннями поляризації (1,0–1,5 дБ). Загальна смуга посилення НПОП може сягати від 40 нм до 85 нм і більше (рис. 4.36, 4.37, 4.38).

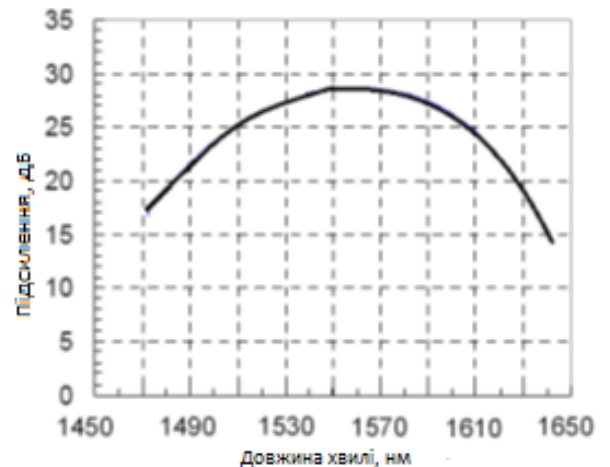
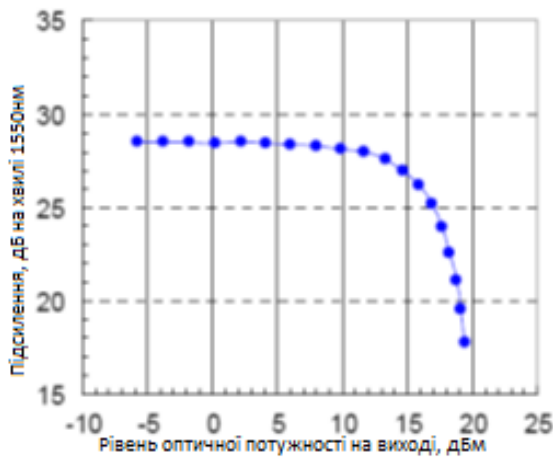


Рисунок 4.38 - Характеристики підсилювача BOA1007Covega

Для порівняльної оцінки BOA та SOA у табл. 4.3 наведено основні характеристики

Таблиця 4.3 - Характеристики оптичних підсилювачів BOA/SOA Thorlabs

Прилад	Центральна хвиля	Полоса підсилення по рівню -3дБ	Вихідний рівень потужності	Підсилення при входному сигналі -20дБм	Фігура шуму
SOA1117S SOA1117P	1550 нм	85 нм	9 дБм	20 дБ	9 дБ
BOA1007C BOA1007H	1550 нм	85 нм	18 дБм	30 дБ	6 дБ
BOA1004S BOA1004P	1550 нм	85 нм	15 дБм	27 дБ	7,5 дБ
SOA1013S	1550 нм	85 нм	14 дБм	13 дБ	8 дБ

Також у табл. 4.4 наведено порівняння основні усереднені характеристики оптичних підсилювачів різного типу.

Таблиця 4.4 - Характеристики різних типів оптичних підсилювачів

Характеристика	EDFA	RFA	SOA/BOA
Підсилення, дБ	>40	>25	>30
Діапазон робочих хвиль, нм	1530-1560	1280-1650	1280-1650
Полоса підсилення по рівню - 3дБ, нм	~30-60	Залежить від накачки	~40-90
Максимальний рівень потужності по виходу, дБм	22	0,75×накачка	18
Чутливість до поляризації	ні	ні	так
Фігура шуму, дБ	5-6	4-5	6-9
Постійна часу, с	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-15}$	$\sim 2 \times 10^{-9}$
Виконання конструкції	Окремий вбудований блок	Вбудований блок	Компактне розміщення в блоці
Можливість використання для комутації	ні	ні	так
Ціновий фактор	середній	високий	низький
Потужність/ток накачки	25,0 дБм	>30 дБм	<400 мА

В системах OTN використовується технологія DWDM, яка призначена для збільшення пропускної здатності оптоволоконних з'єднань. І чим більше оптичних сигналів має у своєму складі DWDM, тим більшою буде пропускна здатність оптичного з'єднання. Але загальний сигнал, який складається з багатьох модульованих несучих має значний пік-фактор, який визначається як відношення пікового значення рівня загального сигналу до його середнього значення. Тобто загальний сигнал має не постійну огинаючу. Чим більше складових у DWDM, тим більший буде пік-фактор. При проходженні такого сигналу скрізь оптичний підсилювач, пікові значення його рівня можуть обмежуватись, що утворює комбінаційні складові у спектрі DWDM, які можуть накладатися на робочі сигнали і, таким чином, створювати їм заваду. Це призводить до значного зменшення сигнал/завада в світлових каналах і, відповідно, зменшує їх пропускну здатність (У цьому випадку потрібно використовувати модуляцію з меншою позиційністю, або взагалі цей світловий канал стає непрацездатним). Крім того, наявність амплітудних обмежень сама по собі обмежує кількість світлових каналів DWDM. Щоб максимізувати

кількість світлових каналів потрібно обирати підсилювачі з найбільшим динамічним діапазоном, тобто лінійність його амплітудної характеристики має зберігатися в якомога більшому діапазоні вхідних рівнів сигналу DWDM.

4.4 Висновки до розділу 4

В цьому розділі було розглянуто різні типи оптичних підсилювачів з різними характеристиками. Для збільшення пропускної здатності оптичного каналу необхідно використовувати з найбільшим динамічним діапазоном. З цією задачею найкраще справляються раманівські підсилювачі (RFA), але також непоганою бюджетною альтернативою будуть напівпровідникові підсилювачі (SOA/BOA).

ВИСНОВКИ

В ході дослідження теми магістерської дисертації було визначено структуру, характеристики та критерії, яким має відповідати телекомунікаційна транспортна мережа.

Технологія DWDM – це найбільш ефективний шлях до збільшення пропускної здатності транспортної мережі, але має певні недоліки, такі як неможливість мультиплексування декількох цифрових потоків в одному світловому каналі для ефективного його використання та відсутність єдиної для всіх світлових каналів системи керування. Через що була розроблена нова оптична транспортна мережа, яка отримала назву OTN-OTN.

OTN-OTN увібрала в себе найліпші сторони технологій SDH та DWDM: забезпечення гнучкого мультиплексування цифрових потоків різних джерел (SDH, ATM, Ethernet, IP/MPLS...) в одному світловому каналі, забезпечення розподілу групових потоків по оптичним каналам з можливістю резервування, забезпечення завадостійкого кодування цифрових потоків в оптичних каналах, організація єдиного каналу управління для групи оптичних каналів та вона має свою ієрархію швидкостей оптичних інтерфейсів, яка визначається оптичними транспортними блоками (OTU) і стандартизована МСЕ-Т G.709.

Через мультиплексування цифрових потоків різних джерел в одному світловому каналі постало питання пропускної здатності оптичного каналу. Було визначено фактори, які можуть покращити цей показник: модуляція, кодування, підсилювачі.

У якості метода модуляції доцільно обирати QAM64 у поєднанні з завадостійким кодуванням блочними або згортковими кодами.

На великі відстані необхідно використовувати оптичні підсилювачі, а для того, аби збільшити ще й пропускну здатність каналу необхідно обирати

підсилювачі із найширшим динамічним діапазоном та пласкою амплітудно-частотною характеристикою.

Зважаючи на всі вище зазначені умови, для максимально ефективного підвищення пропускну здатності каналу необхідно використовувати наступну комбінацію методів: модуляція QAM64, коди Ріда-Соломона, або згорткові коди та раманівські підсилювачі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління: конспект лекцій. Модуль 5.2 / Педяш В.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017.
2. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети: Учебное пособие/Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; каф. многоканальной электросвязи и оптических систем. Новосибирск, 2015.
3. Бовсуновський Д.Р. Аналіз принципів побудови оптичних транспортних мереж OTN/OTN/ бакалаврська робота. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021
4. КМ України, Постановою КМ "Про затвердження Порядку взаємодії органів виконавчої влади з питань захисту державних інформаційних ресурсів в інформаційних та телекомунікаційних системах" від 16.11.2002 N 1772
5. ВР України, Закон "Про електронні комунікації" від 16.12.2020 N 1089-IX
6. Галина Дікер-Пілдуш. Мережі АТМ корпорації Cisco (Cisco ATM Solutions). — Москва: «Вільямс», 2004.
7. Довідник з технологій об'єднаних мереж (Internetworking Technologies Handbook). — Москва: «Вільямс», 2005.
8. Телекомунікаційні системи передавання інформації: навч. посіб. / М. М. Климаш, Р. С. Колодій. — Львів: Львівська політехніка, 2018
9. "Евсеенко Г. Н.Е 25 Цифровые системы передачи: Учебное пособие. — Ростов-на-Дону: РКСИ, 2005.
10. Технічна електроніка в телекомунікаціях: навч. посіб. для студ. спец. 6.050903 «Телекомунікації» Ін-ту телекомунікацій, радіоелектрон. та

електрон. техніки / Я. В. Шийка, О. М. Яремко, С. С. Думич; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка», 2011.

11. www.altera.com
12. <https://tik-diit.dp.ua/m387/>
13. <https://carrier.huawei.com/en/products/fixednetwork/transmission/wdm-otn/osn8800>
14. www.enablence.com
15. <https://www.itu.int/ru/ITU-T/publications/Pages/recs.aspx>