

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Сумський державний університет**Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Циклова комісія «Бакалаврат інженерних спеціальностей»

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис) Андрій БЕДРИК
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)
10 травня 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня**бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171 Електроніка ,

(код та назва)

освітньо-професійної програми 171.00.09 Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової (назва програми))

на тему: Направляючі системи волоконно-оптичної лінії зв'язкуЗдобувача групи ЕІск3 -01б Бедрика Андрія Васильовича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

(підпис) Андрій БЕДРИК
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник викладач, к.ф.-м.н. Тетяна ГРИЧАНОВСЬКА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант¹⁾ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

АНОТАЦІЯ

Оптоволоконні технології важливий символ нової світової технологічної революції та головний інструмент передачі різноманітної інформації. Тому, на теперішній час, ведуться інтенсивні дослідження спрямовані на збільшенні потужності, яка передається оптичним волокном та швидкості передавання сигналів до 50-100Тбіт/с. Вирішення таких проблем потребує створення нових поколінь оптичного волокна і оптичних кабелів

Мета дослідження полягає у всебічному і достовірному вивчення будови і характеристик оптичного волокна, оптичних кабелів і волоконно-оптичного зв'язку.

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- з'ясувати ступінь важливості вибору матеріалу і типу оптичного волокна для оптимальної роботи різних оптоволоконних систем та мереж.
- оцінити вплив матеріалу і будови направляючих систем ВОЛЗ на технічні характеристики і параметри ВОСП.
- розглянути фактори які впливають на якість функціонування телекомунікаційні системи і запропонувати власні пропозиції по вдосконаленню направляючих систем ВОЛЗ.

При виконанні роботи використовувалися наукові методи аналізу і синтезу теоретичного матеріалу.

У результаті проведених досліджень встановлено, що вдосконалити характеристики і параметри оптичного волокна можна змінюючи геометрію і склад матеріалу оптичних волокон, як направляючих ВОЛЗ.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є оптичне волокно і оптичні кабелі волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Предметом досліджень є напрямки вдосконалення параметрів і характеристик оптичних волокон і оптичних кабелів, як направляючих елементів волоконно-оптичних ліній і систем зв'язку .

Робота може бути корисною при проектуванні і експлуатації волоконно-оптичних систем передачі інформації.

Робота викладена на _44_ сторінках, у тому числі включає _18__ рисунків, _5_ таблиць, список цитованої літератури із _38__ джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ОПТИЧНИЙ КАБЕЛЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	С. 5
РОЗДІЛ 1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ	6
1.1. Принцип волоконно-оптичного зв'язку.....	6
1.2. Фактори впливу на оптичний зв'язок	11
РОЗДІЛ 2 ОПТОВОЛОКОННІ КАБЕЛІ	20
2.1. Типи оптоволоконних кабелів.....	20
2.2. Перспективні напрямки розвитку оптичних волокон.....	24
РОЗДІЛ 3 МЕРЕЖІ І ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ	30
3.1. Будова і класифікація ВОСП.....	30
3.2. Розподільні мережі.....	33
ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

ВСТУП

Оптоволоконні технології важливий символ нової світової технологічної революції та головний інструмент передачі різноманітної інформації. Тому, на теперішній час, ведуться інтенсивні дослідження спрямовані на збільшенні потужності, яка передається оптичним волокном та швидкості передавання сигналів до 50-100Тбіт/с [1, 2]. Вирішення таких проблем потребує створення нових поколінь оптичного волокна і оптичних кабелів [3],

На теперішній час досягнуто значних успіхів у створенні технологічно нових оптичних волокон, таких, як фотонно-кристалічне волокно, що здатне досягти мінімальних оптичних втрат на рівні 1,7 дБ/км [4]. Для підводної передачі даних на великі відстані використовуються спеціальні кабелі, наприклад трансатлантичний кабель зв'язку. Нові (2011–2013) кабелі, що експлуатуються комерційними підприємствами (Emerald Atlantis , Hibernia Atlantic), зазвичай мають чотири нитки волокон і сигнали перетинають Атлантику (Нью-Йорк-Лондон) за 60–70 мс [5].

Враховуючи актуальність даної теми, постійно існує потреба у вивченні параметрів сучасних оптичних волокон, оптоволоконних кабелів, волоконно-оптичних ліній зв'язку і мереж на їх основі. Для успішного проектування і експлуатації сучасних волоконно-оптичних систем зв'язку необхідно розуміти фізичну природу використовуваних явищ, технологію виготовлення і застосування активних і пасивних елементів.

Отже, метою дослідження стало всебічне достовірне вивчення будови і характеристик оптичного волокна , оптичних кабелів і волоконно-оптичного зв'язку. З'ясувати ступінь важливості вибору матеріалу і типу оптичного волокна для оптимальної роботи різних оптоволоконних систем та мереж. Оцінити вплив матеріалу і будови направляючих систем ВОЛЗ на технічні характеристики і параметри ВОСП. Розглянути фактори які впливають на якість функціонування телекомунікаційні системи і запропонувати власні пропозиції по вдосконаленню направляючих систем ВОЛЗ.

РОЗДІЛ 1

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ

Оптоволоконна технологія зв'язку виникла з оптичних комунікацій і зараз відіграє вирішальну роль у сучасних телекомунікаційних мережах. Оптоволоконний зв'язок використовує світлові хвилі для передачі сигналів, де в якості фізичного середовища передачі виступає оптичне волокно. Оптоволоконна технологія також важливий символ нової світової технологічної революції та головний інструмент передачі різноманітної інформації в майбутньому інформаційному суспільстві. Оптичне волокно, вперше розроблене в 1970-х роках, зробило революцію в галузі телекомунікацій і відіграло важливу роль у настанні інформаційної ери [1] замінивши, значною мірою, мідні дроти в магістральних мережах розвинених країн світу [2].

1.1 Принцип волоконно-оптичного зв'язку

Волоконно-оптичний зв'язок це спосіб передачі інформації з одного місця в інше шляхом надсилання імпульсів інфрачервоного або видимого випромінювання через направляючі (оптичні волокна, оптичні кабелі) [6, 7]. В цьому процесі світло відіграє роль несучої хвилі, яка модулюється для перенесення певної інформації [8].

Принцип оптичної системи зв'язку полягає в передачі сигналу на віддалений приймач по оптичному волокну (кабелю) яке є елементом направляючої системи. На передавальному кінці електричний сигнал перетворюється в оптичний домен, а на приймальному кінці перетворюється назад у вихідний електричний сигнал. Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) це система, яка призначена для прийому та передачі інформації через оптичне середовище. До складу системи входять пасивні і активні елементи (рис. 1.1). В якості активних можна назвати такі пристрої, як мультиплексор/демультиплексор, що виконують функції з'єднання та поділу інформаційних каналів. Активним елементом також є пристрій для відновлення форми переданого в оптичному середовищі сигналу - регенератор. Активними

елементами ВОЛЗ можна вважати і підсилювач потужності сигналу, модулятор оптичної хвилі та детектор оптичного сигналу (фотодіод). В якості пасивних елементів ВОЛЗ виступають волоконно-оптичні кабелі (направляючі системи), оптичні муфти для з'єднання декількох кабелів та оптичні кроси призначені для підключення оптоволокна до кінцевого обладнання волоконно-оптичної системи передачі. Сукупність оптичних пристроїв і ліній передачі, які забезпечують формування, обробку та передачу оптичних інформаційних сигналів разом утворюють волоконно-оптичну систему передачі інформації, скорочено ВОСП. ВОЛЗ і ВОСП разом складають волоконно-оптичну лінію передачі (ВОЛП).

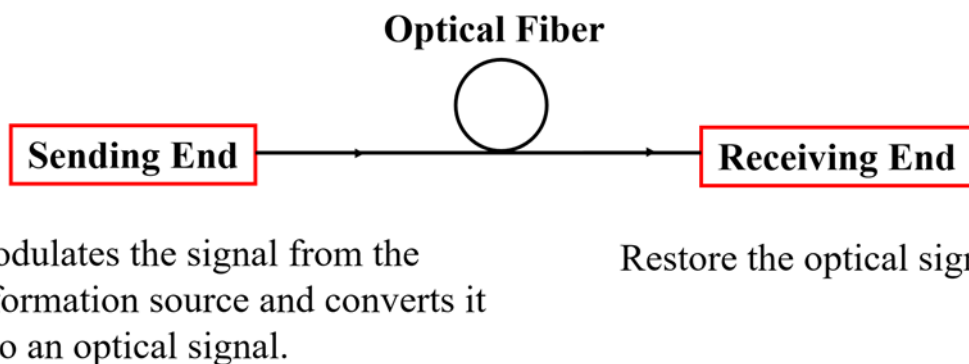


Рис. 1.1. Принцип оптичного зв'язку [7]

Процес комунікації за допомогою волоконної оптики включає в себе наступні основні етапи [9]:

1. Перетворення електричного сигналу в оптичний за допомогою передавача;
2. Модуляція оптичного сигналу за допомогою вхідного кодувального пристрою;
3. Ретрансляція модульованого оптичного сигналу вздовж волокна;
4. Детектування (отримання) оптичного сигналу і перетворення його в електричний сигнал;
5. Підсилення сигналу у приймачі
6. Декодування сигналу.

Отже, в загальному випадку будь-яка ВОЛЗ повинна містити вхідний кодувальний пристрій, передавач, оптичний кабель, ретранслятор, приймач і декодувальний пристрій (рис. 1.2). Таким чином, закодований сигнал надходить на передавач, що складається з джерела випромінювання і оптичного модулятора.

Модулятор керує інтенсивністю випромінювання, яке надходить від джерела світла, у відповідності зі зміною електричного модулюючого сигналу. Таким чином, по оптичному кабелю поширюється змінний оптичний сигнал, який переносить задовану інформацію. При великій довжині ВОЛЗ, щоб запобігти ослабленню світлового променя і для відновлення його інтенсивності використовується ретранслятор. У приймачі оптичне випромінювання перетворюється в електричний сигнал, підсилюється за потужністю і передається на декодувальний пристрій, який дозволяє розшифрувати передану по ВОЛЗ інформацію. Інформація, що передається, зазвичай є цифровою, створеною комп'ютерами або телефонними системами.



Рис. 1.2. Структурна схема ВОЛЗ

Найбільш часто використовуваними оптичними передавачами є напівпровідникові пристрої, такі як світло-випромінюючі діоди (СВД) і лазерні діоди. Різниця між світлодіодами та лазерними діодами полягає в тому, що світлодіоди випромінюють некогерентне світло тоді, як лазерні діоди є джерелом когерентного випромінювання. Для використання в оптичному зв'язку напівпровідникові оптичні передавачі повинні бути компактними, ефективними та надійними, працюючими в оптимальному діапазоні довжин хвиль і з безпосередньою модуляцією оптичного сигналу на високих частотах.

У своїй найпростішій формі світлодіод випромінює світло через спонтанне випромінювання, таке явище, як електролюмінісценція. Випромінюване світло є некогерентним із відносно широкою спектральною шириною 30–60 нм. Світлодіоди для зв'язку найчастіше виготовляються з фосфіду арсеніду галію (InGaAsP) або арсеніду галію (GaAs). Значна ширина спектру світлодіодів визначається величиною дисперсії волокон, що обмежує їх добуток швидкості передачі даних на відстань

(загальна міра корисності). Світлодіоди придатні в першу чергу для додатків локальної мережі зі швидкістю передачі даних 10–100 Мбіт/с і відстанями передачі в кілька кілометрів. Світлодіодна передача сигналу є малоефективною, оскільки лише близько 1% вхідної потужності (близько 100 мкВт) перетворюється на корисну потужність, яка потрапляє в оптичне волокно [10].

На теперішній час, розроблено світлодіоди (LED), які використовують кілька квантових ям для випромінювання світла на різних довжинах хвиль у широкому спектрі, які в даний час використовуються для програм локального мультиплексування за довжиною хвилі (WDM – wavelength-division multiplexing).

Світлодіоди були значною мірою витіснені пристроями поверхнево-випромінюючого лазера з вертикальним резонатором (VCSEL - vertical-cavity surface-emitting laser), які пропонують покращену швидкість, потужність і спектральні властивості за аналогічну вартість. Однак, через відносно просту конструкцію і дешевизну, світлодіоди досі широко застосовуються. Зазвичай використовувані класи напівпровідникових лазерних передавачів, що використовуються у ВОЛЗ, включають VCSEL, інтерферометр Фабрі–Перо та лазер із розподіленим зворотним зв'язком.

Напівпровідниковий лазер випромінює світло через стимульоване випромінювання, а не спонтанне випромінювання, що призводить до високої вихідної потужності (~100 мВт), а також до інших переваг, пов'язаних із природою когерентного світла. Вихід лазера є відносно спрямованим, що забезпечує високу ефективність зв'язку (~50%) в одномодовому волокні. Звичайні пристрої VCSEL також добре підключаються до багатомодового волокна. Вузька спектральна ширина також забезпечує значну швидкість передачі даних, оскільки вона зменшує ефект хроматичної дисперсії. Крім того, напівпровідникові лазери можна модулювати безпосередньо на високих частотах через короткий час рекомбінації.

Лазерні діоди часто мають пряму модуляцію, тобто вихід світла контролюється струмом, що подається безпосередньо на пристрій. Для дуже високих швидкостей передачі даних або дуже великих відстаней джерело лазера може працювати безперервно, а світло можна модулювати зовнішнім пристроєм - оптичним модулятором, таким як модулятор електропоглинання або інтерферометр Маха-

Цендера. Зовнішня модуляція збільшує досяжну відстань зв'язку шляхом усунення лазерного чирпу (чирп — це синусоїдальний сигнал, частота якого зростає або зменшується з часом) у волокні. Для дуже високої ефективності смуги пропускання можна використовувати когерентну модуляцію для зміни фази світла на додаток до амплітуди, що дозволяє використовувати квадратурну амплітудну (QAM) і квадратурну фазову (QPSK) модуляції, та ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) [11].

Основним компонентом оптичного приймача (рис. 1.3) є фотодетектор, який перетворює світловий сигнал в електричний за допомогою фотоефекту. Основні фотодетектори для телекомунікацій виготовлені з арсеніду індію-галію. Фотодетектор зазвичай є фотодіодом на основі напівпровідника. Декілька типів фотодіодів включають рп фотодіоди, штирькові фотодіоди та лавинні фотодіоди. Фотодетектори метал-напівпровідник-метал (MSM) також використовуються через їх придатність для інтеграції схем у реінтегратори та мультиплексори з поділом довжин хвиль.



Рис.1.3. Модуль GBIC (показаний тут зі знятою кришкою) — це оптичний і електричний приймач, пристрій, що поєднує передавач і приймач в одному корпусі. Електричний роз'єм знаходиться вгорі праворуч, а оптичні роз'єми – унизу ліворуч [11]

Оскільки світло може бути ослаблене та спотворене під час проходження через волокно, фотодетектори зазвичай поєднуються з трансїмпедансним підсилювачем і обмежувальним підсилювачем для отримання цифрового сигналу в електричній області, який було відновлено з вхідного оптичного сигналу. Подальша обробка сигналу, така як відновлення тактової частоти з даних, що виконується контуром

фазового автопідстроювання частоти, також може бути застосована перед передачею даних. Когерентні приймачі використовують лазерний гетеродин у поєднанні з парою гібридних елементів зв'язку та чотирма фотодетекторами на поляризацію, а потім високошвидкісні АЦП та цифрову обробку сигналу для відновлення даних, модульованих QPSK, QAM або OFDM.

1.2. Фактори впливу на оптичний зв'язок

Оптоволокну надають переваги у тих випадках, коли є потреба у передачі інформаційного сигналу на великі відстані з високою пропускнуою здатністю і захистити від впливу електромагнітних та радіаційних полів [12]. До переваг оптоволоконного зв'язку також можна віднести високі показники конфіденційності та адаптивності, невеликий розмір, легку вагу простоту у будівництві та обслуговуванні, багаті джерела сировини та потенційно низьку вартість.

Теоретично оптичне волокно тонке з людську волосину може передавати 100 мільярдів мовних каналів одночасно. Хоча до досягнення такої високої пропускнуої здатності ще далеко, експеримент використання одного оптичного волокна для одночасної передачі 240 000 голосових каналів виявився успішним. Це в десятки або навіть тисячі більше, ніж традиційні відкриті дроти, коаксіальні кабелі, мікрохвильові печі тощо. Більше ніж у рази. Пропускна здатність оптичного волокна настільки величезна, що оптичний кабель може включати десятки або навіть тисячі оптичних волокон. У поєднанні з технологією мультиплексування за довжиною хвилі одне оптичне волокно може використовуватися як кілька або десятки оптичних волокон для зв'язку.

Оскільки оптичне волокно має надзвичайно низький коефіцієнт загасання (наразі комерційне кварцове оптичне волокно досягло нижче 0,19 дБ/км), якщо воно оснащено відповідним оптичним передавальним та оптичним приймальним обладнанням, відстань реле може досягати сотень кілометрів. Це просто непорівнянно з традиційними кабелями (1.5км), мікрохвильовими печами (50 км) тощо. Тому волоконно-оптичний зв'язок особливо підходить для міжміського

первинного та вторинного зв'язку на тисячу ліній. Крім того, випробування оптичного солітонного зв'язку, яке вже триває, досягло рівня передачі 1,2 мільйона голосових каналів і 6000 кілометрів без реле. Таким чином, у найближчому майбутньому цілком можливо досягти глобального безрелейного оптоволоконного зв'язку.

Коли світлові хвилі передаються в оптичних волокнах, вони проходять лише в серцевині, і в основному світло не «витікає» назовні, тому його конфіденційність є чудовою.

Сильна адаптивність означає, що він не боїться перешкод від сильних зовнішніх електромагнітних полів, стійкий до корозії та має високу гнучкість.

Спосіб прокладки оптичних кабелів зручний і гнучкий. Він може бути безпосередньо закопаний, прокладений трубою, під водою або над головою.

Найосновнішою сировиною для виробництва кварцового оптичного волокна є кремнезем, який є піском, а пісок майже невичерпний у природі. Тому його потенційна ціна доволі низька.

При проектуванні ВОЛЗ слід враховувати фактори, що впливають на оптичний зв'язок: ослаблення сигналу при передачі, обмеження пропускної здатності ВОЛЗ, дисперсія. Так, під час проходження світла через оптичне волокно відбувається втрата енергії випромінювання внаслідок поглинання, розсіювання та інших процесів. У певний момент рівень потужності сигналу може стати настільки слабким, що приймач не зможе відрізнити світловий сигнал від фонового шуму.

Важливу роль відіграє такий фактор, як пропускна здатність. Оскільки оптичні сигнали складаються з різних частот, то волоконна оптика накладає обмеження на найвищі та найнижчі частоти і тим самим обмежує пропускну здатність інформаційного каналу ВОЛЗ. При передачі сигналів не можна уникнути і такого явища, як дисперсія. Вплив дисперсії стає відчутним при передачі оптичних сигналів через оптичні волокна, яка супроводжується звуженням або розширенням світлових імпульсів, а це в свою чергу обмежує пропускну здатність ВОЛЗ на надвисоких швидкостях передачі даних або на надвеликих відстанях.

Отже, для підвищення продуктивності ВОЛЗ виникає потреба у підсиленні сигналів, компенсації дисперсії, використанні методів цифрового попереднього спотворення, мультиплексування за довжиною хвилі сигналів, зменшити енергоспоживання оптики, використанням спеціалізованих кабелів, які дозволяють здійснювати просторове мультиплексування, використання спеціалізованих три-модових волоконно-оптичних кабелів або аналогічних спеціалізованих волоконно-оптичних кабелів.

Розглянемо процес цифрового передвикривлення сигналу. Як наголошувалося вище, передавач системи оптичного зв'язку складається з цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), драйверного підсилювача та модулятора Маха-Цендера. Розгортання вищих форматів модуляції ($> 4\text{-QAM}$) або вищих швидкостей передачі даних ($> 32\text{ GBd}$) знижує продуктивність системи через лінійні та нелінійні ефекти передавача. Ці ефекти можна класифікувати як лінійні спотворення внаслідок обмеження пропускної здатності ЦАП і перекосу I/Q передавача, а також нелінійні ефекти, викликані насиченістю підсилення в драйверному підсилювачі та модуляторі Маха-Цендера. Цифрове попереднє спотворення нейтралізує негативні ефекти та забезпечує швидкість передачі даних до 56 ГБд і формати модуляції, такі як 64-QAM і 128-QAM, з комерційно доступними компонентами. Процесор цифрового сигналу передавача виконує цифрове попереднє спотворення вхідних сигналів за допомогою моделі інверсного передавача перед тим, як відправити зразки в ЦАП. Старі методи цифрового попереднього спотворення стосувалися лише лінійних ефектів. Останні публікації також розглядають нелінійні спотворення. Berenguer та інші моделюють модулятор Маха-Цендера як незалежну систему Вінера, а ЦАП і драйверний підсилювач моделюють усіченим інваріантним у часі рядом Вольтерра. Khanna та інші використовують поліном пам'яті для спільного моделювання компонентів передавача [13]. В обох підходах ряди Вольтерра або коефіцієнти поліномів пам'яті знаходяться за допомогою архітектури непрямого навчання. Duthel та інші записують для кожної гілки модулятора Mach-Zehnder кілька сигналів з різною полярністю та фазами. Сигнали використовуються для розрахунку оптичного поля. Перехресна

кореляція синфазних і квадратурних полів визначає перекіс синхронізації. Частотна характеристика та нелінійні ефекти визначаються архітектурою непрямого навчання.

Розглянемо процес підсилення сигналу у ВОЛЗ. Відстань передачі волоконно-оптичної системи зв'язку традиційно обмежується загасанням і спотворенням сигналу у волокні. Завдяки використанню оптоелектронних повторювачів ці проблеми були усунені. Ці повторювачі перетворюють сигнал в електричний сигнал, а потім використовують передавач, щоб знову надіслати сигнал з вищою інтенсивністю, ніж отриманий, таким чином нейтралізуючи втрати, що виникли в попередньому сегменті. Через високу складність сучасних мультиплексованих сигналів із розділенням сигналів за довжиною хвилі, включно з тим, що їх потрібно встановлювати приблизно раз на 20 км (12 миль), вартість цих ретрансляторів дуже висока. Альтернативним підходом є використання оптичних підсилювачів, які підсилюють оптичний сигнал безпосередньо без необхідності перетворювати сигнал в електричну область. Одним із поширених типів оптичних підсилювачів є волоконний підсилювач з легованим ербієм (EDFA). Вони виготовляються шляхом легування волокна рідкоземельним мінералом ербієм і лазерного накачування світлом із коротшою довжиною хвилі, ніж сигнал зв'язку (зазвичай 980 нм). EDFA забезпечують посилення в діапазоні ІТУ С при 1550 нм.

Оптичні підсилювачі мають ряд істотних переваг перед електричними повторювачами. По-перше, оптичний підсилювач може одночасно підсилювати дуже широку смугу, яка може включати сотні мультиплексованих каналів, усуваючи необхідність демультимплексування сигналів на кожному підсилювачі. По-друге, оптичні підсилювачі працюють незалежно від швидкості передачі даних і формату модуляції, що дозволяє співіснувати з кількома швидкостями передачі даних і форматами модуляції та дає змогу покращувати швидкість передачі даних системи без заміни всіх ретрансляторів. По-третє, оптичні підсилювачі набагато простіше повторювачів з такими ж можливостями, а тому значно надійніші. Оптичні підсилювачі значною мірою замінили повторювачі в нових установках, хоча електронні повторювачі все ще широко використовуються, коли потрібна кондиціонування сигналу за межами посилення.

Розглянемо процес мультиплексування за довжиною хвилі. Мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) — це техніка передачі кількох каналів інформації через одне оптичне волокно шляхом надсилання кількох світлових променів різних довжин хвиль через волокно, кожен з яких модулюється окремим інформаційним каналом. Це дозволяє в разі збільшити доступну пропускну здатність оптичних волокон. Для цього потрібен мультиплексор із розділенням довжин хвиль у передавальному обладнанні та демультіплексор (по суті, спектрометр) у приймальному обладнанні. Матричні хвилеводні решітки зазвичай використовуються для мультиплексування та демультіплексування в WDM [14]. Використовуючи технологію WDM, яка зараз є комерційно доступною, пропускну здатність волокна можна розділити на 160 каналів [14] для підтримки комбінованої швидкості передачі даних у діапазоні 1,6 Тбіт/с.

Для сучасного скляного оптичного волокна максимальна відстань передачі обмежується не прямим поглинанням матеріалу, а дисперсією, тобто поширенням оптичних імпульсів під час їхнього проходження по волокну. Дисперсія обмежує смугу пропускання волокна, оскільки оптичний імпульс, що розповсюджується, обмежує швидкість, з якою імпульси можуть слідувати один за одним на волокні та залишатися помітними в приймачі. Дисперсія в оптичних волокнах спричинена різними факторами.

Інтермодальна дисперсія, викликана різними осьовими швидкостями різних поперечних мод, обмежує продуктивність багатомодового волокна. Оскільки одномодове волокно підтримує лише одну поперечну моду, міжмодова дисперсія усувається.

У одномодовому волокні продуктивність в основному обмежена хроматичною дисперсією, яка виникає через те, що індекс скла дещо змінюється залежно від довжини хвилі світла, і через модуляцію світла від оптичних передавачів обов'язково займає (вузький) діапазон довжин хвиль. Дисперсія поляризаційної моди, ще одне джерело обмеження, виникає тому, що хоча одномодове волокно може підтримувати лише одну поперечну моду, воно може переносити цю моду з двома різними поляризаціями, а незначні недоліки або спотворення у волокні можуть змінити

швидкості поширення для двох поляризацій. Це явище називається подвійним променезаломленням, і йому можна протидіяти за допомогою оптичного волокна, що зберігає поляризацію.

Деяку дисперсію, зокрема хроматичну, можна усунути за допомогою компенсатора дисперсії. Це працює завдяки використанню спеціально підготовленої довжини волокна, яке має дисперсію, протилежну тій, яку індукує волокно передачі, і це робить імпульс так, щоб його могла правильно розшифрувати електроніка.

Розглянемо процес використання трансмісійних вікон. Кожен ефект, який сприяє ослабленню та дисперсії, залежить від оптичної довжини хвилі. Є смуги довжин хвиль (або вікна), де ці ефекти найслабші, і вони є найбільш сприятливими для передачі. Ці вікна були стандартизовані (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Стандартні діапазони для оптоволоконного зв'язку [15]

Band Introduction	Type	Range(nm)
O-band	Original	1260 to 1360
E-band	Extended	1360 to 1460
S-band	Short wavelength	1460 to 1530
C-band	Conventional	1530 to 1565
L-band	Long wavelength	1565 to 1625
U-band	Ultra long wavelength	1625 to 1675

Зауважте, що ця таблиця показує, що сучасній технології вдалося поєднати E та S вікна, які спочатку не перетиналися. Історично існувало вікно з довжинами хвиль, коротшими за діапазон O, яке називається першим вікном, на 800–900 нм; однак у цьому регіоні втрати високі, тому це вікно використовується переважно для зв'язку на короткі відстані. Поточні нижні вікна (O та E) навколо 1300 нм мають набагато менші втрати. Ця область має нульову дисперсію. Найбільш широко використовуються середні вікна (S і C) близько 1500 нм. Ця область має найменші втрати затухання та досягає найдовшої дальності. Він має деяку дисперсію, тому для вирішення цієї проблеми використовуються пристрої компенсації дисперсії.

Затухання у волокні спричинене поєднанням поглинання матеріалу , розсіюванням Релея , розсіюванням Мі та втратами в з'єднувачах . Поглинання матеріалу для чистого кремнезему становить лише близько 0,03 дБ/км. Домішки в ранніх оптичних волокнах викликали загасання приблизно на 1000 дБ/км. Сучасне волокно має загасання близько 0,3 дБ/км. Інші форми загасання викликані фізичними навантаженнями на волокно, мікроскопічними коливаннями щільності та недосконалими методами зрощування [16].

Дослідження DTU , Fujikura та NTT примітні тим, що команда змогла зменшити енергоспоживання оптики приблизно до 5% порівняно з більш поширеними методами, що могло б призвести до нового покоління дуже енергоефективних оптичних компонентів.

Оскільки ефект дисперсії зростає з довжиною волокна, волоконна система передачі часто характеризується добутком смуги пропускання на відстань, який зазвичай виражається в одиницях МГц·км. Це значення є добутком смуги пропускання та відстані, оскільки існує компроміс між смугою пропускання сигналу та відстанню, на яку його можна передати. Наприклад, звичайне багатомодове волокно з добутком смуги пропускання на відстань 500 МГц·км може передавати сигнал 500 МГц на 1 км або сигнал 1000 МГц на 0,5 км.

Використовуючи мультиплексування за довжиною хвилі , кожне волокно може передавати багато незалежних каналів, кожен з яких використовує різну довжину хвилі світла. Чиста швидкість передачі даних (швидкість передачі даних без накладних байтів) на волокно – це швидкість передачі даних на канал, зменшена на накладні витрати прямого виправлення помилок (FEC), помножена на кількість каналів. Підсумок дослідження з використанням стандартних телекомунікаційних одномодових одножильних оптоволоконних кабелів наведено в таблиці 1.2.

Підсумок дослідження використання спеціалізованих кабелів, які дозволяють здійснювати просторове мультиплексування, використання спеціалізованих тримодових волоконно-оптичних кабелів або аналогічних спеціалізованих волоконно-оптичних кабелів наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.2

Стандартні оптоволоконні кабелі

рік	організація	Агрегатна швидкість	Режими поширення	канали WDM	Швидкість на канал	Відстань
2017	BT і Huawei [17]	11,2 Тбіт/с		28	400 Гбіт/с	250 км
2020	Університети RMIT, Monash & Swinburne [18]	39,0 Тбіт/с		160	244 Гбіт/с	76,6 км
2020	UCL [19]	178,08 Тбіт/с		660	25 Гбіт/с	40 км
2022	NICT [20]	1,53 Пбіт/с	(мультиплексор 110-MIMO)	184 (C-діапазон)	1,03 Тбіт/с	25,9 км

Таблиця 1.3

Спеціалізовані кабелі

рік	організація	Ефективна швидкість	Кількість режимів поширення	Кількість ядер	Канали WDM (на ядро)	Швидкість на канал	Відстань
2017	KDDI Research і Sumitomo Electric [21]	10,16 Пбіт/с	6-режимний	19	739 (діапазони C+L)	120 Гбіт/с	11,3 км
2018	NICT [22]	159 Тбіт/с	трирежимний	1	348	414 Гбіт/с	1045 км
2018	Хао Ху та ін. (DTU, Fujikura & NTT) [23]	768 Тбіт/с (661 Тбіт/с)	Однорежимний	30	80	320 Гбіт/с	
2021	NICT [24]	319 Тбіт/с	одномодовий	4	552 (діапазони S, C і L)	144,5 Гбіт/с	3001 км (69,8 км)
2022	Технічний університет Данії [25]	1,84 Пбіт/с	рекорд пропускної здатності за допомогою фотонного чіпа	37	223	223 Гбіт/с	7,9 км

Дослідження, проведені Університетом RMIT, Мельбурн, Австралія, розробили нанофотонні пристрої, які передають дані про світлові хвилі, які були закручені у форму спіралі, і досягли 100-кратного збільшення доступних на даний момент оптоволоконних швидкостей [15]. Техніка відома як орбітальний кутовий момент (ОАМ). Нанофотонний пристрій використовує ультратонкі листи для вимірювання часток міліметра викривленого світла. Нанoeлектронний пристрій вбудовано в роз'єм, менший за розмір роз'єму USB, і може бути встановлений на кінці оптоволоконного кабелю [16].

До списку найкращих компаній на ринку багатомодових оптоволоконних кабелів, на теперішній час, відносять Берк-Тек Левітон, CommScope, Corning, FiberHome, Fujikura, Фурукава, Футонг.

РОЗДІЛ II

ОПТОВОЛОКОННІ КАБЕЛІ

2.1. Типи оптоволоконних кабелів

Оптичне волокно використовується телекомунікаційними компаніями для передачі телефонних сигналів, Інтернет-зв'язку та сигналів кабельного телебачення. Він також використовується в інших галузях промисловості, включаючи медичну, оборонну, державну, промислову та комерційну. Крім телекомунікаційних цілей, він використовується як світловод, для інструментів зображення, лазерів, гідрофонів для сейсмічних хвиль, SONAR і як датчики для вимірювання тиску та температури.

Завдяки нижчому затуханню та перешкодам оптичне волокно має переваги перед мідним дротом у програмах передачі сигналів на великі відстані та з високою пропускнуою здатністю. Однак розвиток інфраструктури в містах є відносно складним і трудомістким, а волоконно-оптичні системи можуть бути складними та дорогими в установці та експлуатації. Через ці труднощі ранні волоконно-оптичні системи зв'язку в основному встановлювалися в програмах на великій відстані, де вони могли використовуватися на повну пропускну здатність, компенсуючи збільшення вартості. З 2000 року ціни на волоконно-оптичний зв'язок значно впали [26].

Ціна на розгортання оптоволокна в домівках наразі стала рентабельнішою, ніж розгортання мережі на основі міді. Ціни впали до 850 доларів США за абонента в США і нижче в таких країнах, як Нідерланди, де витрати на копання низькі, а щільність забудови висока.

З 1990 року, коли системи оптичного посилення стали комерційно доступними, телекомунікаційна галузь проклала велику мережу міжміських і трансокеанських оптоволоконних ліній зв'язку. До 2002 року було завершено будівництво міжконтинентальної мережі з 250 000 км підводного кабелю зв'язку з пропускнуою здатністю 2,56 Тбіт /с, і хоча конкретна пропускну здатність мережі є привілейованою інформацією, звіти про інвестиції в телекомунікації показують, що потужність мережі

різко зросла з 2004 року. [11] Оскільки 2020 року по всьому світу було прокладено понад 5 мільярдів кілометрів волоконно-оптичних кабелів. [12]

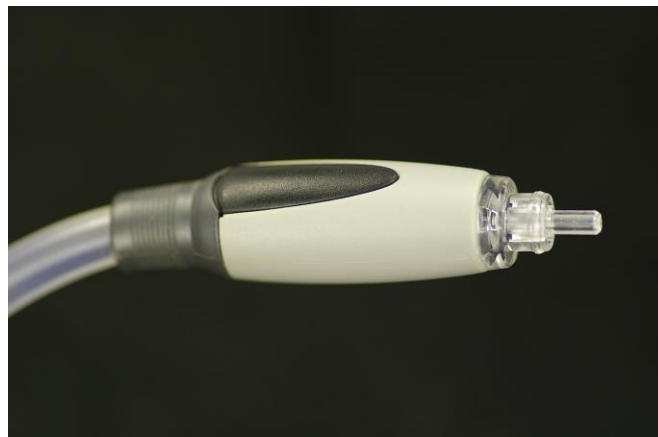


Рис. 2.1. Оптиволоконний кабель TOSLINK із прозорою оболонкою. Ці кабелі використовуються в основному для цифрового аудіо з'єднання між пристроями [7].

Рис. 2.2. TOSLINK (від Toshiba Link [7])

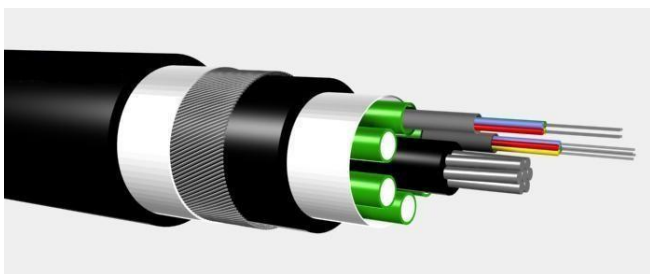


Рис. 2.3. Багатоволоконний оптичний кабель [7]

Волоконно -оптичний кабель є вузлом схожим на електричний кабель, але містить одне або кілька оптичних волокон, які використовуються для передачі світла. Виготовляють кабелі одно- і багатоволоконні (рис. 2.3). Одноволоконний кабель складається з осердя, оболонки та буфера (захисного зовнішнього покриття), в якому оболонка направляє світло вздовж осердя за допомогою методу повного внутрішнього відбиття (рис. 2.4). Серцевина та оболонка (яка має нижчий показник заломлення) зазвичай виготовляються з високоякісного кварцового скла, хоча обидва вони також можуть бути виготовлені з пластику. З'єднання двох оптичних волокон здійснюється за допомогою зварювання або механічного зрощування та вимагає

спеціальних навичок і технології з'єднання через мікроскопічну точність, необхідну для вирівнювання серцевин волокна [13].

Два основних типи оптичних волокон, що використовуються в оптичному зв'язку, включають багатомодові оптичні волокна (рис. 2.4) та одномодові оптичні волокна (рис. 2.5). Багатомодове оптичне волокно має більшу серцевину (≥ 50 мкм), що дозволяє підключати до нього менш точні, дешевші передавачі та приймачі, а також дешевші роз'єми. Однак багатомодове волокно створює багатомодове спотворення, яке часто обмежує пропускну здатність і довжину з'єднання. Крім того, багатомодові волокна, як правило, дорогі та демонструють вищий рівень затухання через вищий вміст легуючої домішки. Серцевина одномодового волокна менша (< 10 мкм) і вимагає дорожчих компонентів і методів з'єднання, але забезпечує набагато довші та високопродуктивні зв'язки. Як одномодове, так і багатомодове волокно пропонується в різних сортах (таблиця 2.1).

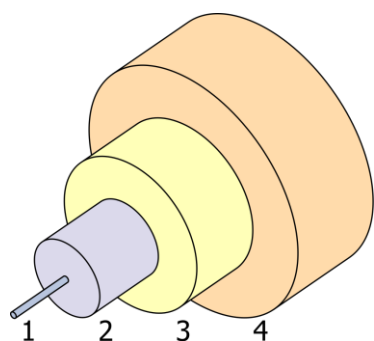


Рис. 2.4. Структура типового одномодового волокна [13]:

1. Діаметр серцевини 8–9 мкм
2. Діаметр оболонки 125 мкм
3. Буфер діаметром 250 мкм
4. Діаметр оболонки 900 мкм

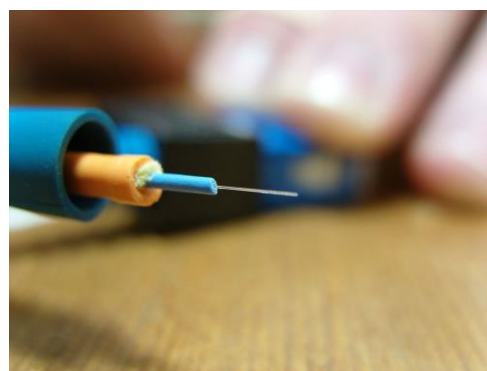


Рис. 2.5. Зачищене багатомодове волокно [13]

Багатомодове (MMF) оптичне волокно (Multi-mode optical fiber) — це тип оптичного волокна, який переважно використовується для зв'язку на короткі відстані, наприклад у будівлі чи на території університету. Багаторежимні канали можна використовувати для швидкості передачі даних до 800 Гбіт/с. Багатомодове волокно має досить великий діаметр серцевини, що дозволяє поширювати декілька мод світла

та обмежує максимальну довжину лінії передачі через модальну дисперсію. Стандарт G.651.1 [27] визначає найпоширеніші форми багатомодового оптичного волокна.

Таблиця 2.1

Порівняння марок волокна [37]

Тип волокна	Введено	Продуктивність
MMF FDDI 62,5/125 мкм	1987 рік	160 МГц·км при 850 нм
MMF OM1 62,5/125 мкм	1989 рік	200 МГц·км при 850 нм
MMF OM2 50/125 мкм	1998 рік	500 МГц·км при 850 нм
MMF OM3 50/125 мкм	2003 рік	1500 МГц·км при 850 нм
MMF OM4 50/125 мкм	2008 рік	3500 МГц·км при 850 нм
MMF OM5 50/125 мкм	2016 рік	3500 МГц·км на 850 нм + 1850 МГц·км на 950 нм
SMF OS1 9/125 мкм	1998 рік	1,0 дБ/км при 1300/1550 нм
SMF OS2 9/125 мкм	2000 рік	0,4 дБ/км при 1300/1550 нм

Одномодове оптичне волокно (SMF) У волоконно-оптичному зв'язку , також відоме як фундаментальне або мономодове [27], — це оптичне волокно , призначене для передачі лише однієї моди світла — поперечної моди. Моди є можливими розв'язками рівняння Гельмгольца для хвиль, яке отримано шляхом об'єднання рівнянь Максвелла та граничних умов. Ці режими визначають спосіб поширення хвилі в просторі, тобто як хвиля розподіляється в просторі. Хвилі можуть мати однаковий режим, але різні частоти. Так відбувається в одномодових волокнах, де ми можемо мати хвилі з різними частотами, але однієї моди, що означає, що вони розподіляються в просторі однаково, і це дає нам єдиний промінь світла. Хоча промінь рухається паралельно довжині волокна, його часто називають поперечною модою , оскільки його електромагнітні коливання відбуваються перпендикулярно (поперечно) довжині волокна. Нобелівську премію з фізики 2009 року отримав Чарльз К. Као за його теоретичну роботу щодо одномодового оптичного волокна [27]. Стандарти G.652 і G.657 визначають найбільш широко використовувані форми одномодового оптичного волокна.

Для того, щоб упакувати оптоволокну в комерційно життєздатний продукт, його зазвичай покривають захисним покриттям за допомогою акрилатних полімерів, затверділих ультрафіолетом і збирають у кабель. Після цього його можна покласти в землю, а потім провести крізь стіни будівлі та розгорнути по повітрю подібно до мідних кабелів. Ці волокна потребують менше обслуговування, ніж звичайні дроти типу вита пара після їх розгортання.

Для підводної передачі даних на великі відстані використовуються спеціальні кабелі, наприклад трансатлантичний кабель зв'язку. Нові (2011–2013) кабелі, що експлуатуються комерційними підприємствами (Emerald Atlantis, Hibernia Atlantic), зазвичай мають чотири нитки волокон і сигнали перетинають Атлантику (Нью-Йорк–Лондон) за 60–70 мс. У 2011 році вартість кожного такого кабелю становила близько 300 мільйонів доларів [5].

2.2. Перспективні напрямки розвитку оптичних волокон

На теперішній час, є потреби у значному збільшенні передаваних оптичним волокном потужностей та швидкості передавання сигналів до 50-100Тбіт/с, що потребує створення нових поколінь оптичного волокна [3]. До оптичних волокон, які здатні вирішити подібні задачі, можна віднести фотонно-кристалічне волокно (PCF - Photonic Crystal Fiber).

Фотонно-кристалічне волокно (PCF) — це клас оптичного волокна, заснований на властивостях фотонних кристалів. Вперше його дослідили в 1996 році в Університеті Бата, Великобританія. Завдяки своїй здатності обмежувати світло в порожнистих осердях, PCF тепер знаходить застосування у волоконно-оптичних комунікаціях, волоконних лазерах, нелінійних пристроях, високопотужній передачі, високочутливих датчиках газу та інших областях. Більш конкретні категорії PCF включають волокно з фотонною забороненою зоною (PCF, які обмежують світло за допомогою ефекту забороненої смуги), дірчасте волокно (PCF, у поперечному перерізі якого використовуються повітряні отвори), волокно з отворами (PCF, що направляють світло за допомогою звичайного осердя з вищими оптичними

показниками) і волокно Брегга (волокно з фотонною забороненою зоною, утворене концентричними кільцями багатошарової плівки). Фотонно-кристалічні волокна можна вважати підгрупою більш загального класу мікроструктурованих оптичних волокон (рис.2.6), де світло направляється структурними модифікаціями, а не лише відмінностями показників заломлення. Волокна з порожнистим сердечником є спорідненим типом оптичного волокна, яке має деяку схожість з дірчастим оптичним волокном [29].

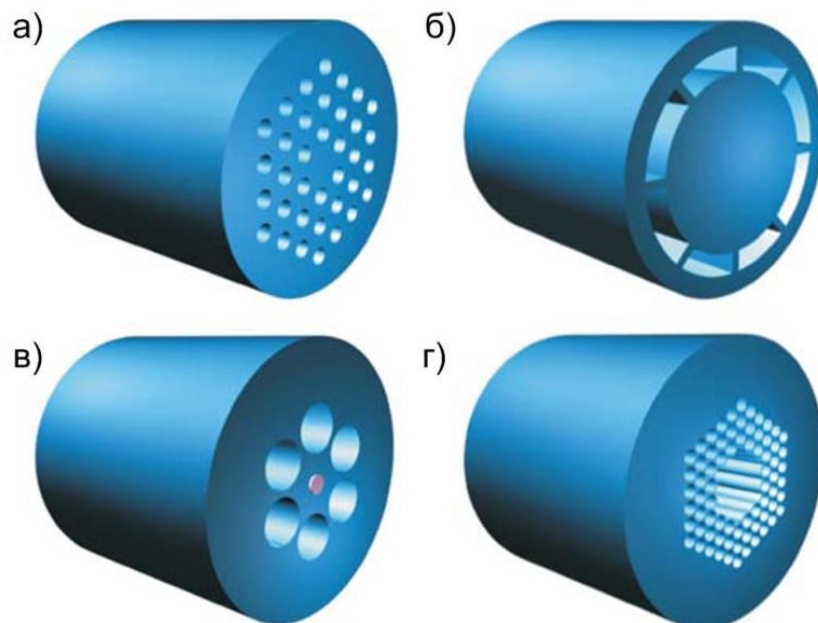


Рис. 2.6. Типи порожнистих волокон: а - одномодове порожнисте волокно (циліндричні повітряні порожнини розміщуються гексагонально симетрично без центральної повітряної порожнини); б – багатомодове волокно з кільцем повітряних порожнин в якості зовнішнього шару; в - активне волокно з легованого скла; г - порожнисте волокно з фотонним кристалом з забороненою зоною [4]

Загалом, регулярні структуровані волокна, такі як фотонно-кристалічні волокна, мають поперечний переріз (як правило, рівномірний по довжині волокна), що складається з одного, двох або більше матеріалів, які найчастіше періодично розташовані на більшій частині поперечного перерізу. Ця зона відома як «оболонка» і оточує серцевину (або кілька ядер), де обмежено світло. Наприклад, волокна, вперше продемонстровані Філіпом Расселом, склалися з шестикутної решітки повітряних

отворів у кремнеземному волокні з твердою [30] або порожнистою [31] серцевиною в центрі, куди спрямовується світло. Інші схеми включають концентричні кільця з двох або більше матеріалів, які вперше були запропоновані Йе та Ярвіом як «волокна Брегга» [32], метелик, панда та еліптичні отвори (використовуються для досягнення більшого подвійного променезаломлення через нерегулярність відносного показника заломлення), спіральні [33] конструкції, які дозволяють краще контролювати оптичні властивості, оскільки окремі параметри можна змінювати.

Одна з технологій виготовлення мікроструктурованого оптоволокна передбачає використання однорідного скла. В рамках технологічного процесу, скляні капіляри з достатньо великим діаметром складаються в потрібному порядку у пучок, який в розигрітому стані поступово витягують в оптичне волокно. Зовнішній такого волокна зазвичай має нижчий ніж у осердя показник заломлення і складається зі значної кількості циліндричних порожнин. Розташування порожнин визначається початковим розташуванням капілярів. Ці порожнини заповнюються газом або повітрям, в залежності від вимог до параметрів волокна. Повітряні отвори найчастіше створюють шляхом збирання порожнистих стрижнів у пучок і нагрівання пучка, щоб сплавити його в один стрижень із упорядкованими отворами. Це сформувало наступну основу для виробництва перших м'яких скляних і полімерних структурованих волокон. Дана технологія унікальна тим, що дозволяє отримувати два типи волокон, як порожнинні оптичні волокна так і волокна на фотонних кристалах, залежно від того як буде реалізований механізм повного внутрішнього відбиття. Зазвичай, скляна центральна частина порожнинних волокон оточена групою циліндричних повітряних порожнин, що знижують ефективний показник заломлення світла і отже, забезпечують умови повного внутрішнього відбиття. Розміри повітряних порожнин і відстані між ними співмірні з довжиною світлової хвилі (300 - 800 нм), а значить ефективний показник заломлення змінюватиметься в певних межах залежно від змін робочої довжини хвилі. Отже, подібне волокно здатне підтримувати одномодовий режим передачі сигналу незалежно від довжини хвилі. Зазвичай, подібні волокна володіють низькими показниками нелінійності і використовуються для передачі світла значних потужностей. На відміну від

порожнинних волокон, в фотонно-кристалічних волокнах локалізація світла в осерді волокна здійснюється за рахунок інтерференції на періодичній структурі створеній ґраткою циліндричних порожнин (фотонним кристалом), період якої порівнюваний з довжиною світлової хвилі. В подібній періодичній структурі (фотонному кристалі) промені світла, що відбилися від областей з різними показниками заломлення, накладаються створюючи інтерференційну картину – посилення або послаблення інтенсивності світла в залежності. Вигляд інтерференційної картини залежить від співвідношення між довжиною робочої хвилі і періодом структури. Це приводить до того, що завдяки інтерференції пригнічується (не поширюється) певний діапазон хвиль, які задовольняють умові мінімуму інтерференційної картини. Тобто з'являються, так звані, заборонені моди (довжини хвиль), або фотонні заборонені зони, які локалізуються в центральній частині волокна на всій його довжині. У тих спектральних областях, що відповідають фотонним забороненим зонам, Отже, це дозволяє створити фотонному волокну умови, за яких оптична хвиля не поширюватися в оболонці, а розповсюджується тільки в осерді волокна. Схематично, описані вище механізми поширення оптичних хвиль представлені на рис. 2.7.

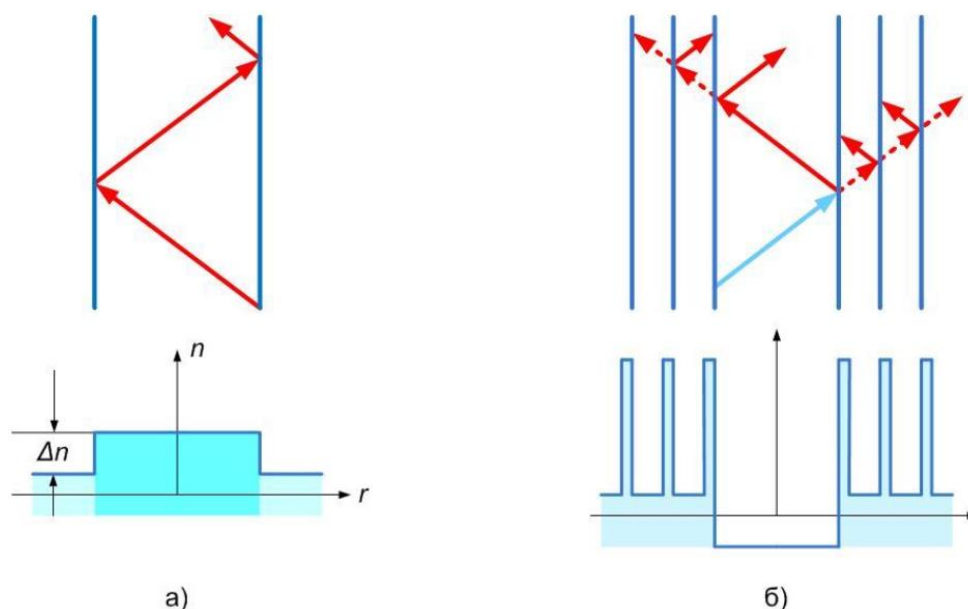


Рис. 2.7. Механізм розповсюдження оптичних променів в стандартних (а) оптичних волокнах та волокнах на основі фотонних кристалів (б) [4]

На теперішній час уже накопичено досвід використання порожнисте волокно з фотонним кристалом, в яких оптична хвиля розповсюджується вздовж повітряної

порожнини по центру волокна. До значних переваг таких волокон слід віднести безкінечно малу дисперсію, оскільки хвиля поширюється у повітрі і, як наслідок, мінімальні оптичні втрати на рівні 1,7 дБ/км [4]. На рис. 2.8 представлено спектр оптичних втрат порожнисте волокно з фотонним кристалом. На рисунку 2.8 фотонним забороненим зонам оболонки відповідають спектральні області низьких оптичних втрат.

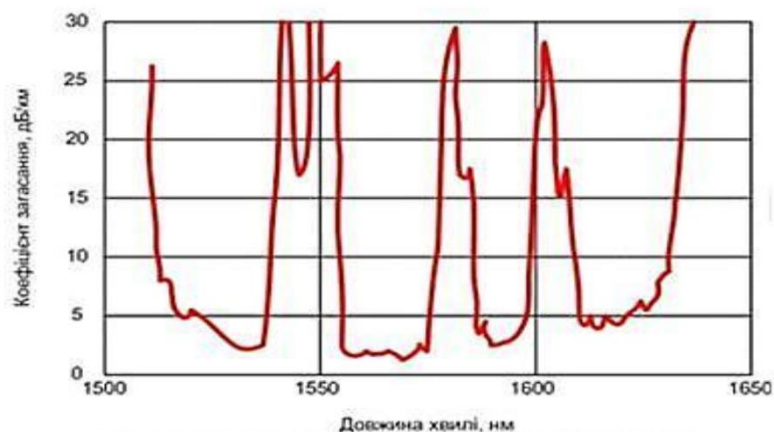


Рис. 2.8. Спектральна характеристика оптичних втрат у волокнах з повітряним осердям [3]

Більшість фотонно-кристалічних волокон були виготовлені з кремнеземного скла, але інше скло також використовувалось для отримання особливих оптичних властивостей (таких як висока оптична нелінійність). Існує також зростаючий інтерес до їх виготовлення з полімеру, де досліджено широкий спектр структур, включаючи градуйовані індексні структури, кільцеві структуровані волокна та волокна з порожнистим сердечником. Ці полімерні волокна отримали назву «MPOF», скорочення від *microstructured polymer optical fibers* [34]. Комбінація полімеру та халькогенідного скла була використана Temelkuran та ін. [35] у 2002 році для довжин хвиль 10,6 мкм (де діоксид кремнію не прозорий). MPOF використовуються, наприклад, для створення локальних обчислювальних мереж з багатомодовим режимом роботи, що дозволяє передавати інформацію зі швидкістю 10 Гбіт/с на відстань більше 100 м і 40 Гбіт/с на відстань більше 30 м на довжині хвилі 1300 нм. Апертуру порядку $0,17 \div 0,5$, робочу смугу від 40 МГц до більш чим 3000 МГц і показником заломлення осердя $n=1,49$ та оболонки від 1,42 до 1,46. Прикладом полімерного волокна, яке знайшло широке застосування, можна назвати волокно

полі-метилметанол-акрилату (PMMA - poly-methyl-meth-acrylate) з мінімальним загасанням 150 дБ/км на довжині хвилі 650 нм. Ще одним прикладом є перфторполімерні волокна (мінімумом загасання близько 10 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм) і фторполімерні волокна (з теоретичним мінімумом загасання 1 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм). Пластикові волокна стандартизовані стандартом ІЕС 60793-2-40 Optical fibres - Part 2-40: Product specification for category A4 multimode fibres (таблиця 2. 2). В стандарті волокна поділяються на кілька типів в залежності від зовнішнього діаметру, діаметру осердя волокна, величини числової апертури, робочої довжини хвилі.

Таблиця 2.2

Характеристики оптичних волокн категорії А4 [36]

Характеристики	Типи і категорії волокн А4							
	A4a	A4b	A4c	A4d	A4e	A4f	A4g	A4h
Діаметр осердя, мкм	Типове значення на 15 ÷ 35 мкм менше зовнішнього діаметра				≥ 500	200	120	62,5
Діаметр оболонки, мкм	1000	750	500	1000	750	490	490	245
Числова апертура	0,5 (теоретично)			0,3 (теоретично)	0,25 (теоретично)	0,19 (ефективне вимірне значення)		
Робочі довжини хвиль, нм	650	650	650	650	650	650; 850; 1300	650; 850; 1300	850; 1300

Перші п'ять категорій широко застосовуються у виготовленні сенсорів, автомобільної і цифрової аудіо промисловості. До переваг полімерних волокн можна віднести: – легкість монтажу; – висока температурна стабільність (при підвищенні температури) параметрів волокн; – низька вартість і доступність джерел випромінювання; – стійкість до згинів і значно більша тривкість у порівнянні з кварцовими волокнами; – стійкість до радіаційного впливу; – низька собівартість виробництва кабелю і оптичних з'єднувачів. Основні недоліки полімерних волокн в їх високій величині загасання, що зменшує сферу їх застосування.

РОЗДІЛ III

МЕРЕЖІ І ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

3.1. Будова і класифікація ВОСП

Волоконно-оптична система передачі (ВОСП) інформації це сукупність оптичних пристроїв і волоконно-оптичних ліній зв'язку, які забезпечують формування, обробку, передачу оптичних сигналів і їх відтворення. Основним у складі волоконно-оптичної системи передачі є каналоутворююче обладнання (КУО) в тракті передачі. Саме завдяки КУО відбувається формування групових трактів із типовою шириною смуги пропускання (тобто швидкістю передачі). Для об'єднання параметрів сигналу на виході КУО використовується обладнання сполучення тракту. Перетворення електричного сигналу в оптичний здійснює оптичний передавач (див. розділ I) або передавальний оптичний модуль. Обов'язковою умовою є співпадіння довжини хвилі оптичного сигналу з вікном прозорості оптичного волокна (приклад на рис. 3.1). Обов'язковими складовими елементами оптичного передавача є джерело оптичного випромінювання і погоджувальний пристрій (з мінімальними втратами надсилає оптичний сигнал в оптоволоконний кабель). Компенсацію загасання сигналу, при його проходженні через оптичне волокно, та його обробку, корекцію, відновлення після спотворень здійснює оптичний ретранслятор. Ретранслятори встановлюються на визначених відстанях – ретрансляційних ділянках. З їх допомогою відбувається та перетворення електричних сигналів в оптичні. Прийом оптичного випромінювання і перетворення його в електричний сигнал забезпечує приймальний оптичний модуль або оптичний приймач, який складається з приймача оптичного випромінювання, погоджувального пристрою. Важливою ланкою волоконно-оптичної системи передачі є обладнання сполучення тракту прийому, яке перетворює сигнал на виході приймального оптичного модуля в багатоканальний сигнал відповідного каналоутворюючого обладнання. Також до складу ВОСП входить каналоутворююче обладнання тракту прийому, яке здійснює зворотні

перетворення багатоканального сигналу в сигнали окремих типових каналів і трактів [36]. Узагальнена структурна схема ВОСП приведена на рисунку 3.2.

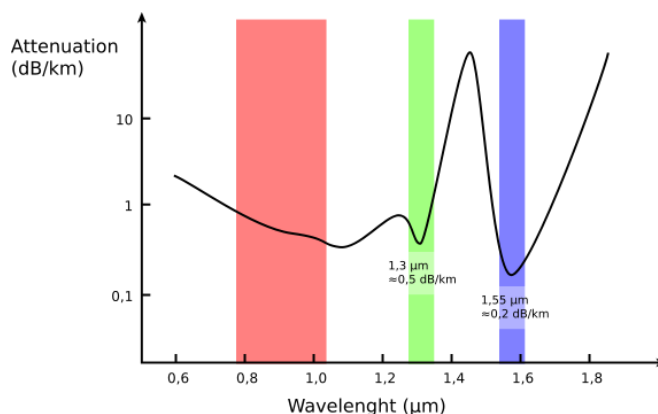


Рис.3.1. Вікна прозорості в кварцовому волокні на залежності загасання від довжини хвилі випромінювання [36]

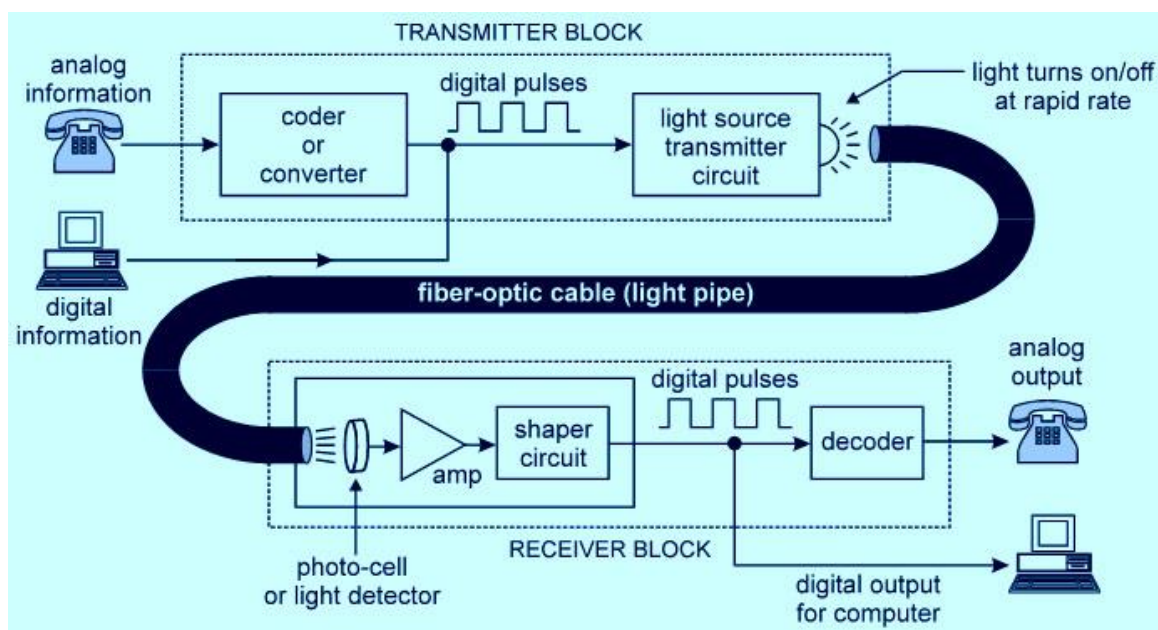


Рис. 2.5. Волоконно-оптична лінія передачі, що з'єднує основне підприємство з віддаленим цехом [36]

В залежності від застосованого каналоутворюючого обладнання, волоконно-оптичні системи передачі інформації діляться на аналогові і цифрові. ВОСП вважається аналоговою, якщо каналоутворююче обладнання створюється на основі аналогових методів модуляції параметрів несучої гармонійної хвилі (амплітудна, частотна, фазова модуляції та їх комбінації) або параметрів періодичної послідовності імпульсів (амплітудно-імпульсна, широтно-імпульсна, фазо-імпульсна

модуляції та їх комбінації). ВОСП вважається цифровою, якщо каналоутворююче обладнання будується на основі імпульсно-кодової модуляції, дельта-модуляції та їх різновидів.

Волоконно-оптичні системи передачі інформації, в залежності від способу модуляції оптичного випромінювання, діляться на дві групи. До першої групи відносять волоконно-оптичні системи з прямою модуляцією, тобто з модуляцією інтенсивності оптичного випромінювання і відповідною його демодуляції, які широко застосовуються в більшості цифрових ВОСП. До другої групи відносять волоконно-оптичні системи передачі інформації з аналоговими методами модуляції оптичного випромінювання (оптичної несучої хвилі).

Волоконно-оптичні системи передачі інформації підрозділяються, в залежності від способу прийому або демодуляції оптичного сигналу. Розрізняють ВОСП з прямою демодуляцією і когерентні ВОСП. У волоконно-оптичних системах передачі з прямою демодуляцією здійснюється безпосереднє перетворення інтенсивності оптичного випромінювання в електричний сигнал. Напряга або сила струму отриманого електричного сигналу однозначно відтворюють зміну інтенсивності оптичного сигналу. У когерентних ВОСП використовується гетеродинне або гомодинне перетворення частоти незалежно від виду модуляції (синхронна або несинхронна) оптичного сигналу, яке здійснюється на проміжній частоті. При гетеродинному прийомі одночасно з оптичним сигналом однієї частоти на фотодетектор подається досить потужне оптичне випромінювання місцевого гетеродина з іншою частотою. Отже, на виході фотодетектора виділяється проміжна частота, на якій і здійснюються подальші перетворення оптичного сигналу в електричний. При гомодинному методі прийому частоти коливаль прийнятого оптичного випромінювання і місцевого гетеродина однакові, а фази синхронізовані.

За способом організації двостороннього зв'язку, волоконно-оптичні системи передачі інформації поділяються на двоволоконну односмугову однокабельну, одноволоконну односмугову однокабельну та одноволоконну двосмугову однокабельну. Наприклад, у двоволоконній односмуговій однокабельній ВОСП передача і прийом оптичних сигналів відбуваються за двома оптичними волокнами

на одній довжині хвилі. А у одноволоконній односмуговій однокабельній ВОСП використовується одне оптичне волокно для передачі сигналів в двох напрямках на одній довжині хвилі.

Волоконно-оптичні системи передачі інформації також поділяються за призначенням і відстанню передачі сигналу. Так, магістральні системи передачі мають протяжність тисячі кілометрів, зонові прокладаються на 500 - 600 км, місцеві функціонують у межах населеного пункту, а локальні здійснюють розподіл інформації між окремими ділянками одного підприємства.

Процес мультиплексування покладено в основу розділення ВОСП за методами ущільнення. Розрізняють волоконно-оптичні системи передачі інформації зі спектральним ущільненням (мультиплексуванням з розділенням довжин хвиль), з частотним (гетеродинним ущільненням) та з часовим ущільненням (цифрові ВОСП).

3.2. Розподільні мережі

При передачі оптичних сигналів обов'язково виникає необхідність розподілу випромінювання в декілька волоконних каналів або ж об'єднання кількох оптичних сигналів для передачі по одному каналу. Отже, для виконання подібних задач потрібні волоконно-оптичні відгалужувачі і розгалужувачі сигналів. Волоконно-оптичні розгалужувачі (coupler) використовуються для поділу потужності вхідних сигналів на два або більше виходи (полюси чи порти), і у цьому випадку вони називаються спліттерами. З іншого боку, деякі типи розгалужувачів можна використовувати для об'єднання двох або більше входів в один вихід, у цьому випадку вони називаються суматорами.

Розгалужувачі, в яких вихідна потужність розподіляється між вихідними каналами, непропорційно називають відгалужувачі. Найпоширеніші відгалужувачів мають два вхідних і два вихідних полюси не зв'язані між собою. Подібний відгалужувач розподіляє оптичну потужність, яка надходить на вхідні канали між вихідними полюсами пропорційно або непропорційно. Особливістю такого пристрою є здатність функціонувати, як спрямований відгалужувач і при зворотному

підключенні, тобто зворотній подачі сигналу. На рисунку 3.3 представлено чотирьохполюсний спрямований відгалужувач, де стрілками показано інформаційні сигнали, а зміна величини стрілок відображає зміни потужності (рис. 3.3. б). Подібні відгалужувачі із чотирма полюсами ще називають X - відгалужувачі. Спрямований відгалужувач є невід'ємним компонентом розподільних мереж. Якщо на порт 1 відгалужувача надходить сигнал А потужністю P_1 , то він ділиться між портами 3 і 4 у відповідній пропорції і жодна частка потужності не потрапляє на порт 2, який стосовно сигналу А є ізольованим. Одночасно, порт 2 можна використовувати для надсилання сигналу В, потужність якого P_2 теж ділиться між портами 3 і 4 у заданій пропорції.

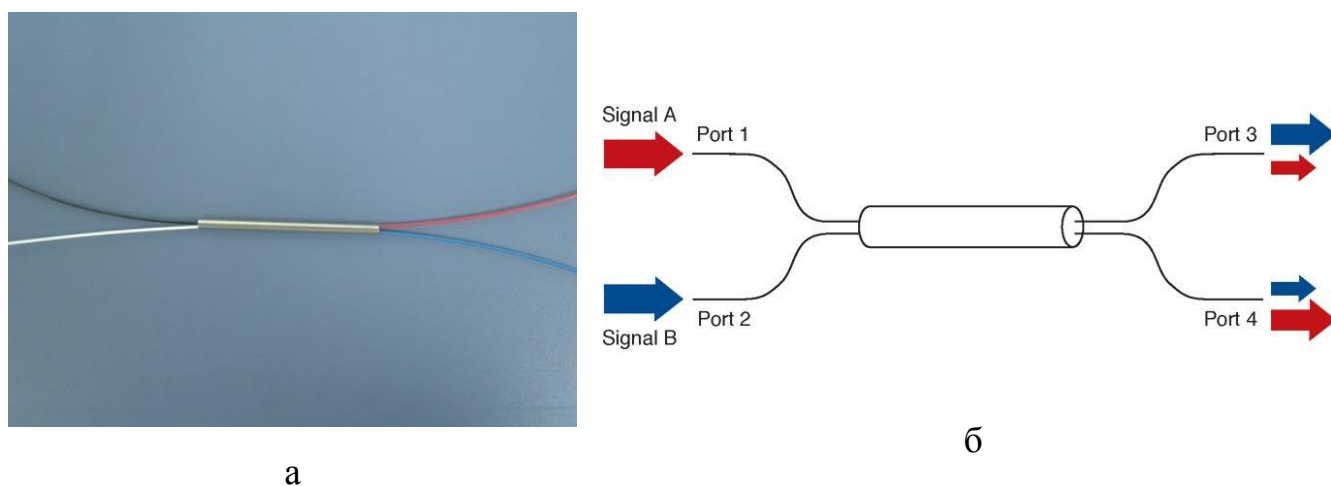


Рис. 3.3. Чотирьохполюсний спрямований відгалужувач (а) і схема розподілу потужностей оптичних сигналів (б) [37]

Використання відгалужувачів приводить до втрат потужності оптичного сигналу у ВОСП. До параметрів, які дозволяють оцінити втрати потужності у відгалужувачі, відносять коефіцієнт передачі, коефіцієнт квадрати відгалуження, коефіцієнт спрямованості та показник внесених втрат.

Коефіцієнт передачі визначає передачу потужності між вхідним портом 1 і одним із вихідних портів 4 як $k_{\text{пер}} = -10 \lg(P_4/P_1)$. Коефіцієнт втрат відгалуження показує втрати при передачі потужності між вхідним портом 1 і портом відгалуження як $k_{\text{від}} = -10 \lg(P_3/P_1)$. Коефіцієнт спрямованості $k_{\text{спр}} = -10 \lg(P_2/P_1)$ визначає передачу потужності між вхідним та ізольованим портами. Внесені втрати оцінюють

потужність втрачена у відгалужувачі внаслідок незапланованого випромінювання, розсіювання сигналу, поглинання та інше. В ідеальному відгалужувачі оптичний сигнал не потрапляє до ізольованого порта, отже, внутрішні втрати потужності його становлять $k_{\text{внутр}} = 0$ дБ. Відгалужувачі вважають високоякісними, якщо внесені втрати не перевищують 1 дБ і коефіцієнт спрямованості більший за 40 дБ. Відгалужувачі часто описують у термінах втрат відгалуження. Наприклад, 10-ти децибельний відгалужувач - це пристрій, що має втрати відгалуження у 10 дБ. Будь-який із чотирьох полюсів може бути вхідним. Спрямовані відгалужувачі звичайно виконують симетричними, так що втрати мають ті самі значення незалежно від того, який полюс обраний як вхідний.

На теперішній час, традиційними є дуплексна розподільна мережа, Т-подібна мережа, зіркоподібна мережа, кільцева мережа, гібридні системи розподілу та інші.

Розглянемо дуплексні розподільні мережі. При півдуплексній схемі передачі і прийому сигналу, для здійснення зв'язку між двома точками використовуються два оптичних волокна вздовж яких у протилежних напрямках транслюється інформація. У повнодуплексній системі (з одночасною передачею в обох напрямках в одному волокні) економиться волокно, що важливо для довгих ліній передачі. На рис.3.4 подано структурну схему повнодуплексної лінії з відгалужувачами, встановленими на кожній станції.



Рис. 3.4. Структурна схема повнодуплексної системи передачі сигналу.

Адаптовано з роботи [37]

До недоліків можна віднести факт, що при використанні в такому лінійному тракті навіть ідеальних три децибельних (3 дБ) спрямованих відгалужувачів між передавальним і приймальним обладнанням обов'язково вносяться додаткові втрати у з'єднувачах, що значно зменшує прийняту потужність..

Т-подібна мережа, схематично представлена на рисунку 3.5 в, пов'язує велику кількість терміналів, кожен з яких має передавальний і приймальний пристрій. Т- і Y-відгалужувачі (рис.3.5, а, б) просто розділяють сигнал на два виходи. Співвідношення розподілу потужності між двома виходами можна точно контролювати, наприклад, у Y-відгалужувачі це 10/90 відсотків, 20/80 відсотків, 30/70 відсотків, 40/60 відсотків або 50/50 відсотків. Т-з'єднувач функціонує так само, як Y-з'єднувач. Т-роз'єми можуть бути каскадними для з'єднання кількох терміналів у мережі, як показано нижче. Співвідношення розподілу між двома виходами має становити 10/90 відсотків або 20/80 відсотків, щоб залишилося достатньо потужності для наступного терміналу в ланці. Т-подібні з'єднувачі легко доступні, і їх можна завершувати за допомогою стандартних роз'ємів, таких як SC, ST, FC, LC тощо. Можна достатньо швидко налаштувати невелику мережу за допомогою Т-сполучників, каскадованих таким чином, як на рисунку 3.5 в.

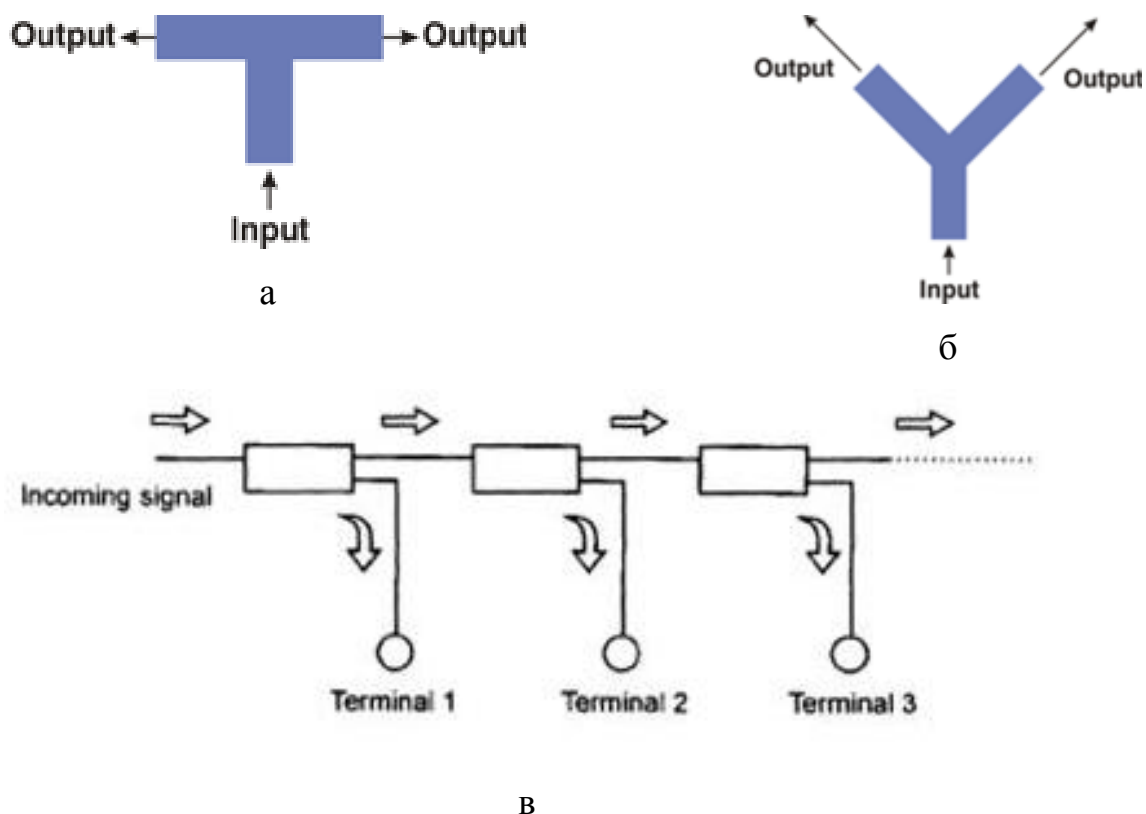


Рис. 3.5. Відгалужувачі Т- типу (а) та Y - типу (б) як складові Т-подібної мережі з 3 терміналами (в) [37]

В такому каскаді, по магістральному волокну, яке називають шиною даних, передається інформація між Т-подібними (чи Y- подібними) відгалужувачами, за

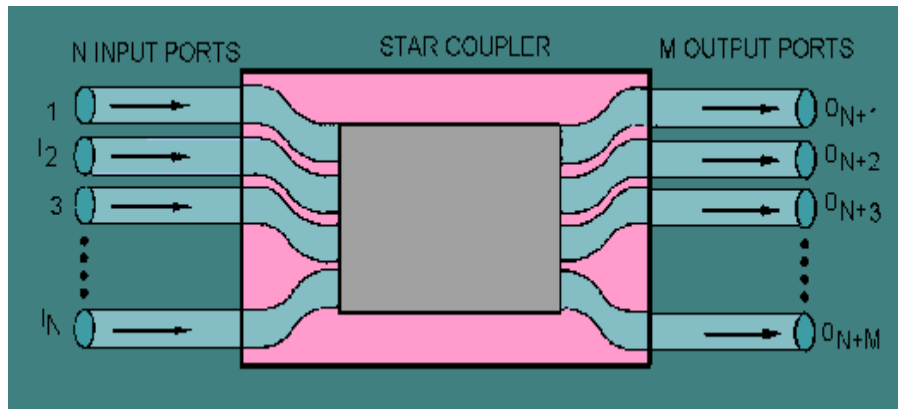
допомогою яких здійснюється відведення частини потужності оптичного інформаційного сигналу. Досить часто використовуються Т-подібні відгалужувачі зібрані з двох спрямованих Y – відгалужувачів. Їх використання забезпечує дуплексний оптичний потік у шині даних з одного волокна. На теперішній час, ведуться роботи по створенню Т-подібних відгалужувачів з великим коефіцієнтом розгалуження, що дозволить збільшити передавану потужність у багатотермінальних мережах. Отже, сигнали, які надходитимуть на приймальні пристрої будуть мати достатню потужність щоб подолати більші відстані з якіснішими параметрами інформаційного оптичного сигналу.

Якщо кількості терміналів досить велика і потужності Т-мережі недостатньо, то використовують зіркоподібні мережі і, відповідно, зіркоподібні відгалужувачі. У такій мережі зіркоподібний передавальний відгалужувач, який зв'язує n терміналів має $2n$ порти. Але принцип дії зіркоподібного відгалужувача можна представляти як принцип дії спрямованого відгалужувача з більшою ніж чотири кількістю портів.

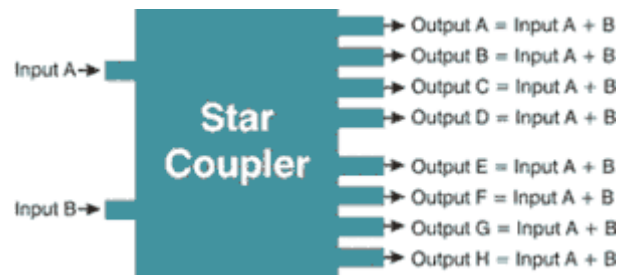
Зіркоподібні відгалужувачі мають декілька входів і виходів. Номери вхідного та вихідного портів можуть бути однаковими або не співпадати, наприклад, 2×2 , 4×4 , 8×8 тощо. Зіркоподібні відгалужувачі (зіркові з'єднувачі або зіркові муфти) рівномірно розподіляють вхідну потужність між вихідними волокнами.

Розрізняють два типи зіркоподібних відгалужувачів – направлені і ненаправлені.

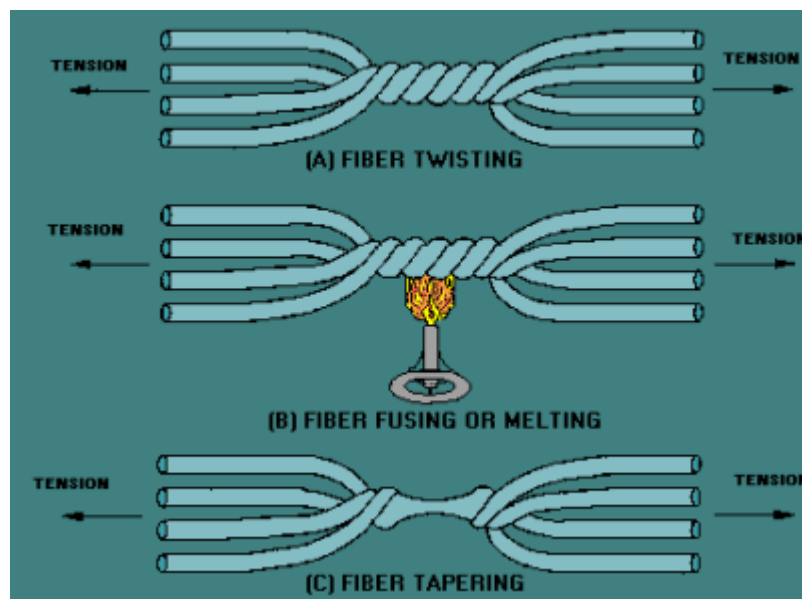
Перший тип відгалужувачів (направлений), спочатку об'єднує оптичні сигнали з усіх входів, а потім розподіляє їх між усіма виходами, як показано нижче на рисунку 3.6. Оптичний сигнал, який надходить у будь-який вхідний порт, поширюється на всі вихідні порти. Відгалужувачі це двонаправлені пристрої, отже, вони також можуть пропускати світло в протилежному напрямку. Цей спрямований тип зіркоподібного відгалужувача виготовляється шляхом злиття кількох волокон разом, як показано нижче на рисунку 3.6., в



а



б



в

Рис. 3.6. Зіркоподібні відгалужувачі з декількома вхідними портами (а) і з двома вхідними портами (б). Схема виготовлення відгалужувача (в) [37]

Другий тип зіркоподібного відгалуження - ненаправлений. Він приймає входи з усіх волокон, а потім розподіляє їх між усіма волокнами, як вхідними, так і вихідними, як показано нижче.

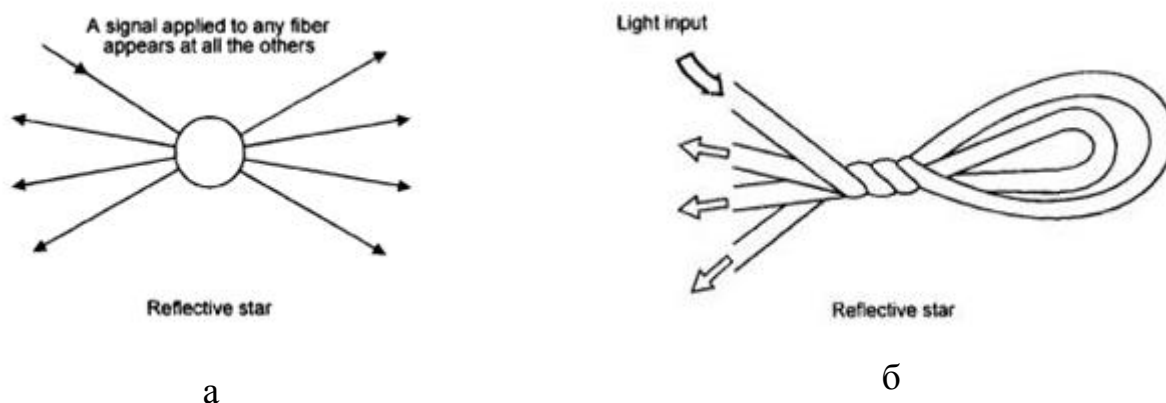


Рис. 3.7. Розподіл сигналів у ненаправленому зіркоподібному відгалужувачі (а) і його схематичне зображення (б) [37]

У ненаправленому відгалужувачі світло, що потрапляє в будь-який порт, виходить з усіх портів, включаючи вхід. Даний вид відгалужувача не користується великим попитом, але є на ринку. Ненаправлений відгалужувач створюється шляхом відбиття вхідного світла на всі вихідні порти. Він має дзеркало на кінці, як показано на малюнку нижче.

До переваг зіркових відгалужувач можна віднести наступні факти. Для мереж із більш ніж 3-ма або 4-ма терміналами використання зіркоподібного з'єднувача замість каскадного Т-сполучника має менші втрати. Це пояснюється тим, що для зіркоподібного роз'єму потрібен лише один вхідний з'єднувач і він зазнає лише однієї надлишкової втрати. Чим більше терміналів, тим суттєвішими є збитки.

Кільцева мережа розподілу передбачає, що волокна можуть з'єднувати численні термінали в кільцеву мережу, яка фактично є послідовним з'єднанням незалежних ВОЛЗ із однієї точки в іншу. Кожен вузол кільцевої мережі містить оптичні передавальний пристрій і приймальний пристрій.

Гібридні системи розподілу можна розглядати, як комбінації Т-подібної і зіркоподібної мереж [38]. Такий підхід забезпечує гнучкість при проектуванні багатотермінальних ВОСП. У гібридній мережі, зазвичай, зірка з'єднує близько розташовані термінали, а шина даних Т-подібних відгалужувачів з'єднує найбільш віддалені термінали.

ВИСНОВКИ

1. Кварцове волокно використовується у волоконній оптиці завдяки здатності передавати дані зі швидкістю 1 терабіт на секунду і втратами при передачі всього 1 децибел на кілометр; але, оскільки кварцове волокно дороге, його застосування обмежене у порівнянні з гнучким скляним або пластиковим волокном; кварц використовується для виробництва композитних матеріалів завдяки більшій стабільності порівняно зі скловолокном; композитне фотонно-кристалічне волокно дозволяє збільшити потужності та швидкості передавання сигналів до 50-100Тбіт/с;
2. При передачі інформації на короткі відстані із швидкістю 2 Мбит/с використовуються надійні, недорогі ВОСП на основі гнучкого скла або пластикового волокна з джерелом оптичного випромінювання - СВД (10⁶ годин безперебійної роботи), оскільки їх низька вартість і характеристики забезпечують надійну роботу на протязі терміну служби; пропускну здатність міжконтинентальних ВОСП до 160 Тбіт/с; використання мультиплексування за довжиною хвилі забезпечує передавання вздовж одного волокна багатьох незалежних каналів, кожен з яких використовує різну довжину хвилі світла;
3. Гібридні системи можна розглядати як найперспективніші у мережах розподілу інформації, оскільки, комбінації Т-подібних і зіркоподібних мереж покращує якість функціонування телекомунікаційні системи завдяки підвищенню надійності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alwayn, Vivek (April 23, 2004). "Fiber-Optic Technologies". Optical Network Design and Implementation. Cisco Press. ISBN 978-1-58705-105-0.
2. Jacoby, Mitch (March 16, 2020). "As telecom demands grow, optical fibers will need to level up". Chemical & Engineering News. Retrieved May 27, 2020
3. Дианов Е.М. Волоконная оптика: сорок лет, которые изменили мир / Фотон-экспресс, № 2 (82), март 2010. – с. 32-34.
4. Каток В. Б. Аналіз передавальних характеристик одномодових оптичних волокон мереж зв'язку / Зв'язок. – 2006.- №5.- С.14 – 19
5. "What are the Basic Elements of a Fibre Optic Communication System?". FOS. Archived from the original on 15 August 2020.
6. "Understanding Wavelengths In Fiber Optics". thefoa.org.
7. McIntosh, Jane; Chrisp, Peter; Parker, Philip; Gibson, Carrie; Grant, R. G.; Regan, Sally (October 2014). History of the World in 1,000 Objects. New York: DK and the Smithsonian. p. 382. ISBN 978-1-4654-2289-7.
8. Future Trends in Fiber Optics Communication (PDF). WCE, London UK. July 2, 2014. ISBN 978-988-19252-7-5.
9. "Guide To Fiber Optics & Permisses Cabling". The Fiber Optics Association. Retrieved December 22, 2015.
10. "The FOA Reference For Fiber Optics - Fiber Optic Transmitters and Receivers -". thefoa.org. Retrieved 2021-04-18.
11. "Ultrafast networks gear-up for deployment". Nature Photonics. 4 (3): 144. March 2010.
12. "What are the Basic Elements of a Fibre Optic Communication System?". FOS. Archived from the original on 15 August 2020.
13. Khanna, G.; Spinnler, B.; Calabro, S.; De Man, E.; Hanik, N. (2016). "A Robust Adaptive Pre-Distortion Method for Optical Communication Transmitters". IEEE Photonics Technology Letters. 28 (7): 752–755.

14. "Infinera Introduces New Line System". Infinera Corp press release. Archived from the original on 2010-01-15.
15. Paschotta, Dr Rüdiger. "Optical Fiber Communications".
16. Christopher C. Davis. "Fiber Optic Technology and its Role in the Information Revolution"
17. BT Labs delivers ultra-efficient terabit 'superchannel'. BT. 2017-06-19. Archived from the original on 2018-08-04.
18. ["Researchers just recorded world's fastest internet speed using a single optical chip"](#). www.rmit.edu.au. 2020-05-22.
19. Corcoran, Bill; Tan, Mengxi; Xu, Xingyuan; Boes, Andreas; Wu, Jiayang; Nguyen, Thach G.; Chu, Sai T.; Little, Brent E.; Morandotti, Roberto; Mitchell, Arnan; Moss, David J. (2020-05-22). ["Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source"](#)
20. ["Speed record shattered for data transmission over standard optical fiber"](#). ISPreview. 2022-11-12
21. ["Success of ultra-high capacity optical fibre transmission breaking the world record by a factor of five and reaching 10 Petabits per second"](#). Global Sei. 2017-10-13.
22. ["Researchers in Japan 'break transmission record' over 1,045km with three-mode optical fibre"](#). Fibre Systems. 2018-04-16
23. Hu, Hao; Da Ros, Francesco; Pu, Minhao; Ye, Feihong; Ingerslev, Kasper; Porto Da Silva, Edson; Nooruzzaman, Md.; Amma, Yoshimichi; Sasaki, Yusuke; Mizuno, Takayuki; Miyamoto, Yutaka; Ottaviano, Luisa; Semenova, Elizaveta; Guan, Pengyu; Zibar, Darko; Galili, Michael; Yvind, Kresten; Morioka, Toshio; Oxenløwe, Leif K. (2018-07-02). "Single-source chip-based frequency comb enabling extreme parallel data transmission" (PDF). Nature Photonics. 12 (8). Nature Photonics (volume 12, pages 469–473): 469–473.
24. ["New World Record as Fibre Optic Speeds Pushed to 319Tbps"](#). ISPreview. 2021-07-16. Archived from [the original](#) on 2023-04-04
25. Jørgensen, A. A.; Kong, D.; Henriksen, M. R.; Klejs, F.; Ye, Z.; Helgason, Ò. B.; Hansen, H. E.; Hu, H.; Yankov, M.; Forchhammer, S.; Andrekson, P.; Larsson, A.;

- Karlsson, M.; Schröder, J.; Sasaki, Y.; Aikawa, K.; Thomsen, J. W.; Morioka, T.; Galili, M.; Torres-Company, V.; Oxenløwe, L. K. (2022-10-20). "[Petabit-per-second data transmission using a chip-scale microcomb ring resonator source](#)". *Nature Photonics*. 16 (11). Nature: 798–802.
26. Fiber Optics Market by Application and Region - Global Forecast to 2024 | Technavio". BusinessWire. 2020-11-10.
27. Furukawa Electric North America. "OM4 - The next generation of multimode fiber" (PDF). Archived from the original (PDF) on April 22, 2014.
28. Cvijetic, Milorad; Djordjevic, Ivan (2013). *Advanced optical communication systems and networks*. Boston: Artech House.
29. <https://spie.org/news/photonics-focus/julyaug-2022/speeding-light-with-hollow-core-fibers?SSO=1>
30. Дж. К. Найт, Т. А. Біркс, П. Ст. Дж. Рассел і Д. М. Аткин, «Одномодове оптичне волокно з кремнезему з оболонкою фотонного кристала», *Opt. Lett.* 21, 1547-1549 (1996)
31. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, ST. J. Russell, Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers *SCIENCE* 20 Nov 1998 Vol 282, Issue 5393pp. 1476-1478
32. P. Yeh, A. Yariv, and E. Marom, "Theory of Bragg fiber," *J. Opt. Soc. Am.* 68, 1196–1201 (1978)
33. Arti Agrawal, Yousaf O. Azabi; B. M. Azizur Rahman Stacking the Equiangular Spiral [Journals & Magazines > IEEE Photonics Technology Let... Volume: 25 Issue:3](#)
34. Мартейн А. ван Ейкеленбург, Маріан К. Дж. Лардж, Олександр Аргірос, Джозеф Загарі, Стівен Манос, Надер А. Ісса, Ієн Бассетт, Саймон Флемінг, Росс К. Макфедран, К. Мартейн де Стерке та Ніколає А. П. Нікоровічі, "Microstructured polymer" оптичне волокно", *опт. Експрес* 9, 319-327 (2001)
35. Темелкуран, Бурак; Харт, Шандон Д.; Бенуа, Жиль; Джоаннопулос, Джон Д.; Фінк, Йоель (2002). "Порожністі оптичні волокна з масштабованою довжиною хвилі з великою фотонною забороненою зоною для передачі CO₂-лазера". *Природа* 420 (6916): 650–653.

36. Каток В.Б. Руденко І.Е., Однорог П.М. Волоконно-оптичні лінії зв'язку, 2016. – Київ: Нова книга. - 445 с.
37. <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95047750-optical-fiber-couplers>
38. Довгий С.О., Воробієнко П.П., Гуляєв К.Д. Сучасні телекомунікації: Мережі, технології, безпека, економіка, регулювання. – Видання друге (доповнене). - /За редакцією Довгого С.О. – К: «Азимут-Україна». – 2013. – 608 с.

