

Тема 15. Волоконно-оптичні лінії зв'язку.

Лекція 15.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ). Попередній вибір компонентів системи. Принцип конструювання. Системи дальнього зв'язку. Служебні оптичні системи зв'язку. Магістральні лінії зв'язку. Реферат.

Тепер, коли вже накопичені певні знання про різні оптичні компоненти волоконно-оптичних систем, розглянемо вимоги, що пред'являються до цих компонентів в залежності від області їх застосування. На основі цих вимог в першу чергу вибираються найбільш підходящі для неї компоненти, а потім розраховують характеристики системи з точки зору загальної частотної характеристики і енергетичного балансу. Оптимальною є така система, в якій витрати енергії є мінімальними, а чутливість максимальна при заданих ширині смуги пропускання та точності відтворення. Щоби досягти цього, потрібно провести аналіз різних компонентів і вибрати найбільш підходящі для даної системи.

Попередній вибір компонентів системи.

Основні характеристики, які потрібні для розрахунку конструкції оптичної лінії зв'язку, наступні: швидкість передачі або ширина смуги пропускання (коефіцієнт широкосмужності); точність відтворення, яка визначається або співвідношенням S/N , або коефіцієнтом похибок; довжина оптичної лінії і кількість терміналів; вид інформації, що передається, і форма хвилі. Звичайно аналіз починається з дослідження загальної ширини смуги пропускання волокна і джерела для даної ретрансляційної ділянки. Якщо підходить $p-i-n$ фото діод, то недоцільно створювати більш складну схему для роботи з лавинним фотодіодом. Якщо зроблений вибір комбінації волокно – джерело не забезпечує потрібної швидкості передачі даних, то слід вдосконалити або цю комбінацію, або регенератор, при збереженні точності відтворення інформації.

В таблиці 1 наведено приклад первинного відбору різних компонентів волоконно-оптичної системи, в основу якого покладені такі вимоги як довжина лінії і швидкість передачі даних. В процесі ітерації ці компоненти будуть оптимізуватися з урахуванням робочих характеристик всієї системи та її вартості.

Таблиця 1

Компонента	$L < 100 \text{ м}$	$L < 1 \text{ км}$		
	$B < 2 \text{ Мбит/с}$	$B < 30 \text{ Мбит/с}$	$B < 100 \text{ Мбит/с}$	
Джерело	СВД ($GaAs$)	СВД ($AlGaAs$), ЛД ($AlGaAs$)	ЛД ($AlGaAs$)	ЛД ($InGaAsP$) ЛД ($AlGaAs$)
Волокно	Джгут із ступінчастих волокон	Ступінчасте волокно або джгут	Гرادієнтне волокно (з малими втратами)	Одномодове або градієнтне волокно
Приймач	$p-i-n$ діод або $p-n$ діод	Кремнієвий $p-i-n$ фотодіод	Кремнієвий лавинний фотодіод або $GaAs$ лавинний фотодіод	Кремнієвий лавинний фотодіод або германієвий лавинний фотодіод
Підсилювач	FET (польовий транзистор)	З оберненою величиною крутизни характеристики	Двополюсний з компенсацією	З температурною
Задаючий пристрій	Внутрішня електрична схема або транзистор	З попереднім зміщенням	З попереднім зміщенням або електрооптичний модулятор	Електрооптичний модулятор

Для передачі даних на короткі відстані із швидкістю 2 Мбит/с використовують дуже надійні та недорогі оптичні системи. Найкращім джерелом такого типу систем є світловипромінюючий діод (СВД), оскільки вартість його невелика, а характеристики забезпечують надійну роботу на протязі всього терміну служби (більше 10^6 г). При великих значеннях числової апертури можна досягти ефективності зв'язку між СВД та джгутом волокон рівної $1 - L_p$ - де L_p - відносні втрати, що обумовлені щільністю упаковки джгута. Для коротких ліній зв'язку, в яких передача ведеться на малих швидкостях, дисперсія у волокні не представляє серйозної проблеми і інформація в таких лініях зв'язку передається за допомогою імпульсного коду або кодуванням прямою модуляцією інтенсивності з застосуванням логічної схеми на транзисторі або простої внутрішньої схеми. В якості приймального пристрою в таких системах використовують фото діод з інтегрованим попереднім підсилювачем. Звичайний шум приймача для $p-i-n$ фото діоду при швидкості передачі 2 Мбит/с нижче -40 дБ для коефіцієнту похибки 10^{-9} . При проектуванні волоконно-оптичної лінії зв'язку слід враховувати також умови оточуючого середовища, в якому буде

експлуатуватися система (робочий діапазон температур, вологість, вплив радіації, корозію і т.п.).

Принцип конструювання.

Якщо мова йдеться про волоконно-оптичні системи із середніми вимогами до ширини смуги пропускання, то необхідно розрахувати їх робочі характеристики з врахуванням передавача, кабелю та приймача. Такий аналіз спрямовано на оптимізацію системи. При розрахунку робочих характеристик передавального пристрою слід враховувати оптичну потужність, довжину хвилі, спектральну ширину, форму та розмір пучка світла, частотні характеристики джерела, лінійність вихідної характеристики, а також спосіб модуляції або структуру коду. На роботу системи також впливають термін її служби, шуми в передавальному пристрої, температура оточуючого середовища, вібрація та вологість. При виборі волокна важливими показниками, які потрібно враховувати, є діаметр серцевини і світло відбиваючої оболонки волокна, профіль показника заломлення, коефіцієнт затухання, модальна і матеріальна дисперсії, міцність і втрати на мікровигини. Характеристики, що впливають на роботу оптичного приймального пристрою є наступними: еквівалентна потужність шуму, амплітудно-частотна характеристика приймального пристрою, квантова ефективність, шуми підсилювача та коефіцієнт підсилення. Хоча такий вид аналізу з урахуванням всіх параметрів системи достатньо складний, він себе виправдовує і дозволяє правильно вибрати необхідний компонент системи. Як тільки первинний вибір основних складових волоконно-оптичної системи закінчено, то можна приступити до ітеративного процесу оптимізації кожного компоненту окремо. На **рис.1-3** наведені приклади конструктивного аналізу, якій використовується при виборі передавального пристрою, волокна і приймального пристрою.

Аналіз ускладнюється тією обставиною, що деякі параметри однієї підсистеми залежать від параметрів іншої підсистеми. Наприклад, вибір спектральної ширини і довжини хвилі джерела залежить від дисперсії у волокні, а також від спектральної чутливості детекторного пристрою. Тому оптимальна система не може бути досконалою, а вибір тих чи інших її компонентів робиться виходячи з їх вартості.

Як тільки визначена структура системи, слід провести два розрахунки для визначення достовірності передачі інформації.

Перший з них стосується розрахунку чутливості системи і дозволяє оцінити її інформаційну пропускну здатність. По результату другого розрахунку можна оцінити надійність системи, на основі припустимої потужності передавального пристрою. Чутливість системи визначається через час наростання потужності для передавального пристрою τ_t , волокна τ_f та приймального пристрою τ_r наступним чином:

$$\tau_s = \sqrt{\tau_t^2 + \tau_f^2 + \tau_r^2} \quad (1)$$

Інформацію, що передається, при ширині смуги B можна виразити і через константу часу τ_B .

Якщо $\tau_s < \tau_B$, то чутливість системи вважають задовільною. Баланс потужності можна визначити шляхом розрахунку мінімальної оптичної потужності P_d (динамічного діапазону потужності приймального оптоелектронного модуля), яка може бути прийнята приймальним пристроєм при даній смузі пропускання і рівні сигналу, що задається відношенням S/N і максимальної потужності сигналу P_s приймального пристрою, з врахуванням всіх можливих втрат у системі. Якщо $P_s > P_d$, то вважається, що вибрана система задовольняє вимогам. Запас потужності, який виражається різницею між P_s та P_d , повинен бути рівним по крайній мірі 10 дБ, щоб не виникало проблем при виникненні різних непередбачених обставин. У таблиці 2 представлені результати аналізу балансу потужності і часу наростання багатоканальної системи кольорового телебачення. Компонентами цієї системи є *AlGaAs* лазер з подвійною гетеро структурою, градієнтне волокно і зіркоподібний розгалуджувач, який утворює розподільчу мережу з десятима кінцевими пристроями з лавинними фотодіодами, що розташовані на відстані 0.5 км один від одного.

В таблиці 3 представлена типова система передачі інформації із швидкістю 20 Мбіт/с. Довжина цієї лінії зв'язку км. В системі було використано чотирьох волоконний кабель на основі градієнтного волокна. На лінії зв'язку було проведено три зрощування. Як джерело світла був вибраний світло випромінюючий діод з повною випромінювальною потужністю 3 дБ. Лавинний фото діод, що був використаний як приймач, має постійну часу (час нарощування

вихідної напруги), яка дорівнює 3 нс. Розрахунковий час нарощування (інерційність) для системи, що розглядається, складає біля 14 нс, що не перевищує встановленого (35 нс) значення, яке визначається шириною смуги пропускання.

Таблиця 2.

*Аналіз багатоканальної оптичної системи кольорового телебачення**

Компоненти і характеристика системи	Баланс потужності	Час нарощування, нс
<i>AlGaAs</i> лазер	$P_l = 15\text{дБ}$	$\tau_t = 5$
Поправка на погіршення затухання	3 дБ	-
Втрати у з'єднанні з випромінювачем	5 дБ	-
Волокно градієнтне (3 дБ/км)	$\alpha_f = 3 \cdot 0.5 \cdot 10 = 15\text{дБ}$	$\tau_f = (\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{mat}}^2 + \tau_c^2)^{1/2} = 1.6$
Зіркоподібний розгалуджувач	$\alpha_c = 10 \lg 10 + 13 = 23\text{дБ}$	-
Поправка на погіршення затухання	3 дБ	-
Лавинний фотодіод	$P_r = -55\text{дБ}$	$\tau_r = 3$
Поправка на погіршення характеристик	5 дБ	-
Втрати потужності на ввід у приймач	10 дБ	-
Характеристика системи	Запас потужності (на компенсацію спотворення) $= 7 - 41 + 40 = 6\text{ дБ}$	$\tau_s = (25 + 2.56 + 9)^{1/2} = 6.05$

(* вимоги, що пред'являються до системи, наступні: $B = 6\text{ МГц}$; $BER = 10^{-9}$; десять кінцевих пристроїв на відстані $L = 0.5\text{ км}$; $\tau_B = 8\text{ нс}$.

Таблиця 3.

Аналіз системи цифрової передачі інформації.

Компоненти і характеристика системи	Баланс потужності, дБ	Час нарощування, нс
СВД	3	6
NRZ	-3	-
Волокно градієнтне (5 дБ/км)	40	10(дисперсія)
Втрати на зрощування (у трьох місцях)	1.5	-
Лавінний фотодіод	59	3
Втрати в з'єднанні: Джерело-волокно	10	-
Волокно-приймач	1	-
Погіршення характеристик при дії температури	1	-
Інші втрати	5	-
Характеристика системи 40+1.5+10+1+1+5	58	35
Передавально-приймаючі характеристики системи 3-3+59	59	$1.11\sqrt{6^2 + 3^2 + 10^2} = 13.4$

(* Вимоги, що пред'являються до системи, наступні: швидкість передачі інформації 20 Мбіт/с; BER=10⁻⁹; два термінали; відстань до терміналу 8 км; код для передачі даних: PCM, NRZ).

Але розрахунок рівня потужності дозволяє зробити висновок, що запас потужності дуже малий для компенсації будь-яких втрат у системі. Для збільшення запасу потужності слід використовувати волокно з малими втратами (менше 5 дБ/км). З цього прикладу видно, що для оптичної системи (BER=10⁻⁹), яка передає інформацію з швидкістю 20 Мбіт/с на відстань 8 км без використання регенератора, в якості джерела випромінювання підходить дешевий та надійний світловипромінювальний діод. Якщо в якості джерела світла використано лазер, то відстань на яку ведеться передача, можна збільшити вдвічі або більше. В системах передачі інформації використовують компоненти системи, які працюють на довжині хвилі 1.55 мкм.

На рис. 4 представлена структурна схема волоконно-оптичного ретранслятору для системи з імпульсно-ковою модуляцією. Спотворений і ослаблений оптичний сигнал, після того як він пройде по оптичному волокну, поступає на фотодіод, де відбувається його перетворення в електричний сигнал. Підсилювач, ємністю у декілька пікофарад, що має вхідний опір, який дорівнює $j\omega(C_{ampl} + C_{det}) + 1/R_{in}$ підсилює сигнал, і вносить в нього якомога менше шуму. Типові значення Z для параметрів системи варіюються від 1000 до 5000. Еквалайзер компенсує вплив приймача і дисперсію волокна, зменшуючи міжсимвольні завади за рахунок оптичної потужності. Якщо дисперсія в системі обмежена, то за допомогою еквалайзера можна збільшити відстань між ретрансляторами. Еквалайзер не потрібен, якщо головною задачею є збереження оптичної потужності. Пристрій для відновлення сигналу складається з компаратору сигналу, мереж відновлення мітки часу та форми сигналу, задавального пристрою та джерела. Регенератор повинен відтворювати потрібну форму імпульсу. Ця операція реалізується з використання зворотного зв'язку, який реагує на вихідний сигнал. Автоматичний ланцюг регулювання підсилення коректує зміни рівнів вхідного сигналу, коефіцієнту підсилення і температури у лавинному фотодіоді. Щоби відтворити потрібний потік світлових імпульсів, необхідно забезпечити подачу сигналу часу, що періодично повторюється, який синхронізується з інтервалами часових каналів імпульсів, що приймаються. Такий сигнал часу може генеруватися від вихідного сигналу приймального пристрою, шляхом використання синхронізованого по фазі сигналу мережі відновлення мітки часу, як це показано на **рис. 4**. Зміни у характеристиці імпульсу можуть призвести до флуктуації фази сигналу часу, що у свою чергу може привести до накопичення сумарної похибки на виході. Для того, щоби ланцюг фазової синхронізації був надійним, слід визначити оптимальне співвідношення між вимогами, що пред'являються до фільтру з вузькою смугою пропускання у ланцюгу фазової синхронізації і спроможністю стабілізувати модульовану по фазі компоненту.

Системи дальнього зв'язку.

В перших системах дальнього зв'язку широко використовувалася аналогова форма обробки даних, зокрема, метод частотного ущільнення каналів. Потім широке розповсюдження

отримав метод цифрової обробки сигналу. Система цифрової передачі інформації більш економічна у порівнянні з аналоговою системою. Вартість кінцевого пристрою для системи з використанням методу частотного ущільнення вище, ніж для системи цифрової передачі даних в якій використовується більш проста схема, що включає аналогово-цифровий і цифровий перетворювачі. Для кожного телефонного каналу аналоговий мовний сигнал є обмеженим частотним діапазоном від 300 до 3400 Гц. Кожний аналоговий сигнал квантується в межах від 0 до 8 кГц, і імпульс перетворюється в байт, що містить 8 біт. Звичайно 1 біт задає полярність сигналу, а решта 7 біт – значення сигналу в логаріфмічній шкалі. При цьому по кожному розмовному каналу передача реалізується із швидкістю 64 кбіт/с. Для системи ущільнення з розділенням по часу на 24 розмовних каналу необхідна швидкість передачі 1.54 Мбіт/с. В таблиці 4 наведені стандартні швидкості передачі інформації, що використовують у США та Європі.

Таблиця 4.

Стандарти швидкостей передачі інформації в США та Європі.

Система фірми Bell Systems (США)			Європейські системи	
Клас	Кількість каналів	Швидкість передачі, Мбіт/с	Кількість каналів	Швидкість передачі, Мбіт/с
T1	24	1.544	32	2.048
T2	96	6.312	120	8.448
T3	672	46.304	480	34.368
T4	4032	274.0	1920	139.364

Розділення по часу реалізується за допомогою послідовних часових каналів. Серед цих каналів є по крайній мірі один, який використовують для синхронізації, резервування або передачі управляючого сигналу. Отже, загальна кількість розмовних каналів буде дещо менше числа можливих при загальних швидкостях передачі системи. Блоки ущільнення каналів з розділенням по часу для систем дальнього зв'язку в США класифікуються наступним чином: T1, T2, T3 і т.п. Стандарти для європейських систем має деякі відмінності (див. табл. 4).

В сучасних системах дальнього зв'язку використовують скручені пари, коаксіальні кабелі, мікрохвильові системи наземного

та космічного базування та волоконно-оптичні системи (Таблиця 5). Кожна система має свої переваги і недоліки.

Таблиця 5

Порівняння коаксіальної, мікрохвильової і волоконно-оптичної систем дальнього зв'язку, що працюють із швидкістю 45 Мбіт/с

Система	Формат	Підсилення, дБ	Втрати, дБ	Довжина, км
Коаксіальна	4B3T	90	85	7
Мікрохвильова (11 ГГц)	16QAM	109	100	50
Волоконно-оптична система (1.55 мкм)	NRZ	51	45	50

При порівнянні цих систем найбільш важливим параметром є максимальна дальність передачі сигналу без ретранслятору. Як видно з таблиці 5, ця відстань менша за всіх у коаксіальній системі. Максимальна дальність передачі сигналу у волоконно-оптичній лінії може бути така ж сама як і в мікрохвильовій, але при умові використання більших довжин хвиль (1.55 мкм).

Волоконно-оптичні системи набагато привабливіші решти завдяки простоті і економічності.

Служебні оптичні системи зв'язку.

Починаючи з 1977 р. в США, Японії, Європі прокладено багато оптичних ліній зв'язку, які працюють з різними швидкостями передачі, у різних умовах оточуючого середовища.

В Чикаго була прокладена система (1979) для того щоби оцінити можливості технології волоконної оптики для умов експлуатації ліній зв'язку Bell Systems. Волокна, що використовувалися мали затухання приблизно 4 дБ/км. Кабелі прокладали вздовж маршруту загальною довжиною 2.5 км, через 32 колодця з п'ятьма зрощуваннями. Під землею було прокладено поліетіленовий кабелепровід, щоби створити сприйнятливі контрольовані умови для оптичних волокон. Відстань між ретрансляторами неможливо визначити достатньо точно, якщо враховувати тільки потужність передавального

пристрою, затухання у волокні і чутливість приймача. Необхідно мати на увазі непередбачені втрати у волокні, які можуть виникнути в ході прокладки кабелю та зрощування із-за складності рел'єфу, а також труднощі, що виникають при зрощуванні у колодцях. При проектуванні ліній зв'язку потрібно приймати масу факторів в підземних лініях та колодцях можуть бути присутні вода, каналізаційні стоки, пар, активні хімічні речовини. Нижче приведені параметри цієї системи.

Швидкість передачі	– 44.7 Мбіт/с
Загальна довжина	- 2.5 км
Кількість каналів	– 144
Волокно	– градієнтне
Числова апертура	– 0.23
Діаметри:	
серцевини	– 55 мкм
оболонки	– 110 мкм
Затухання	– 4 дБ/км
Втрати на зрощування	– 0.8 дБ
Джерело	- <i>AlGaAs</i> з подвійною гетероструктурою
Довжина хвилі	– 0.82 мкм
Потужність	– 3 дБ
Приймач	– кремнієвий лавінний фотодіод
Чутливість	- -54 дБ
Конструкція сердечнику кабеля	– стрічкова

Магістральні лінії зв'язку.

Фактори, що приймаються до уваги при конструюванні магістральних оптичних ліній зв'язку, дещо інші, ніж ті, що в аховуються при проектуванні службових та міських ліній. В магістральних лініях використовують ретранслятори, відстань між якими визначається в основному потужністю, що передається, чутливістю приймального пристрою, шириною смуги пропускання, точністю відтворення та втратами в системі. Ці параметри розраховуються з врахуванням затухання та дисперсії у волокні, завад в сиистемі, спотворення сигналу і міжсимвольних завад. На **рис. 5** показані границі в яких можна встановлювати відстані між ретрансляторами для різних типів систем. Коефіцієнт похибок для

звичайних систем дальнього зв'язку дорівнює 10^{-9} . Для систем з великою кількістю ретрансляторів BER може бути дуже великим.

Як приклад розглянемо оптичний ретранслятор в якому використані елементи для магістральної високошвидкісної (більше 1 Гбіт/с) зв'язку. Якщо система прокладена по дну океана, то потрібно більш ретельно вибирати її оптичні компоненти. Для того щоб максимально збільшити відстань між ретрансляторами, необхідно використовувати в системі одномодові волокна з малою дисперсією, які працюють на довжині хвилі 1.3 мкм і мають коефіцієнт затухання менше 0.5 дБ/км. В якості джерела сигналу слід використати *InGaAsP* напівпровідниковий лазер, що приводиться у дію *GaAs* польовим транзистором. Лазер може безпосередньо модулюватися в форматі ИКМ за допомогою імпульсного струму, що накладено на постійний струм зміщення. Модульований сигнал потім вводиться в одномодове волокно. Кабель у підводній системі зв'язку повинен бути дуже міцним (при прокладці або підйому з глибини 6000 м розтягуючі навантаження складають більше 10 Т, суттєві також і давлячі навантаження). Приймальні пристрої, які працюють на довжині хвилі 1.3 мкм, повинні бути виконані на основі *Ge* або *InGaAs*- лавінних фотодіодів з підсилювачами на польових транзисторах з малим рівнем шуму.

При коефіцієнті похибок 10^{-9} чутливість *Ge* лавінного фотодіоду складатиме -31.9 дБм. Це гірше, ніж у *InGaAs*- лавінного фотодіоду, якщо врахувати, що передача буде вестися на довжину 44.3 км з швидкістю 2 Гбіт/с в системі з сигналом з поверненням до нуля (RZ). В загальному випадку форма сигналу RZ покращує чутливість приймача на 1 дБ у порівнянні з сигналом NRZ (без повернення до нуля) при тій же самій швидкості передачі даних. Щоби збільшити відстань між ретрансляторами до більшої 45 км в системі із швидкістю передачі даних 2 Гбіт/с, необхідно вибирати волокна з ще меншим затуханням (менше 0.3 дБ/км), а також зменшити втрати розсіювання до 3 нс/км. Отже в даному випадку йдеться про використання волокон з нульовою дисперсією і надзвичайно малим затуханням (менше 0.2 дБ/км). В таких лініях передачі застосовуються ЛД, які працюють на довжині хвилі 1.55 мкм. Вважається, що для магістральних високошвидкісних оптичних систем краще за все підходять волоконно-оптичні складові, що працюють на довжині хвилі 1.55 мкм.

Контроль периферійних пристроїв і розподілу даних.

Окрім техніки дальнього зв'язку волоконна оптика використовується також і в системах для передачі і розподілу даних всередині приміщення або групи приміщень, для контролю та розподілу електроенергії і т.п.

Система, що розміщена всередині приміщення, складається з пристрою що з'єднує високошвидкісну волоконно-оптичну лінію передачі даних з терміналом абонента (тобто відеосистемою, телефоном, комп'ютером і т.п.). Інформація, що передається і дані можуть розподілятися по ряду місцевих оптичних ліній за допомогою центрального процесору. Кожна місцева волоконно-оптична лінія має свій пристрій спряження, якій з'єднано з декількома терміналами. В цих системах використовують загально прийняте часове розділення каналів, що потім використовують для передачі даних на різні термінали.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку використовують також для контролю та розподілу енергії. При прокладці звичайної лінії зв'язку поряд з високовольною лінією (напруга вище 200 кВ) виникає маса проблем, що зв'язані з завадами та шумами, оскільки сильні електромагнітні поля від лінії негативно впливають на лінію зв'язку, ускладнюючи її роботу. Тому система зв'язку для таких цілей повинна бути достатньо надійною і реалізовувати передачу інформації на великих швидкостях (до 30 Мбіт/с). Використання мікропроцесорів спільно з волоконно-оптичними лініями в енергетиці дозволяє автоматизувати процес розподілу енергії і реалізувати контроль завантажкою лінії і системою зв'язку, що включає цілодобові вимірювання, дистанційне управління і запис даних, контроль за банком даних, регулювання температури трансформаторів, виявлення місця пошкодження на лінії та пошкодження ізоляції, переключення пристрою подачі живлення і т.п.

Рекомендована література: 8

8. Гауэр Дж. Оптические системы связи.-М.:Радио и связь, 1989.-504.