

ВТРАТИ ТА РОЗСІЮВАННЯ СИГНАЛУ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ

Вступ

ВОЛС є лінією або з обмеженими втратами (загасанням), або з обмеженою дисперсією. У 1980-х і на початку 1990-х при проектуванні ВОЛЗ треба було пристосовуватися до цих двох основних ефектів. У цьому сенсі процес проектування лінії був достатньо прямолінійним.

З початком використання оптичних підсилювачів - ОП, а потім і систем WDM (а згодом і DWDM), виникли інші причини, що приводять до погіршення характеристик систем. Вони, звичайно, існували весь час, але мали такий малий вплив, що проектувальники могли їх до деякого часу повністю ігнорувати. Інші ж причини з'явилися завдяки використанню нових технологій. До них, наприклад, відноситься *чотирьох хвильове змішення* - ЧХС (FWM). Як тільки з'являється другий канал, так з'являється і ЧХС, хоча і, можливо, дуже малого рівня.

Коли почали використовувати ВОЛЗ, робочі сигнали були достатньо низького рівня: від -2 до +3 дБм. Однією з причин було бажання продовжити життя лазерних діодів. Як тільки з'явилися системи WDM, а, особливо, DWDM, рівні сигналів зросли стократно. При об'єднанні виходу лазерного передавача з ОП потрібно було генерувати рівні сигналів порядку +20 дБм, щоб компенсувати втрати, викликані використанням пасивних елементів систем WDM. Ці високі рівні сигналів загострили багато причин погіршень, що так або інакше приводять до деградації сигналу і характеристик в цілому. Ще одним негативним чинником з'явилося збільшення швидкості передачі, враховуючи, що потоки в 40 Гбіт/с стали реальністю.

Основна частина

Розглянемо причини втрат рівня сигналу при його проходженні по оптичному волокну. Існують шість причин втрат в оптоволокну:

1. Власні внутрішні втрати.
2. Втрати, викликані домішками (іноді звані зовнішніми втратами).
3. Втрати, викликані недосконалістю оптоволокну.
4. Розсіяння Релея та Бугера.
5. Міжмодова дисперсія.
6. Матеріальна дисперсія.

1. Власне внутрішнє поглинання матеріалу є втратами, викликаними тільки чистим кремнієм, тоді як зовнішні втрати - це втрати, викликані наявністю домішок в оптоволокну. У кожному конкретному матеріалі, завдяки його молекулярній структурі, існує поглинання сигналу певних довжин хвиль. У разі двоокису кремнію (SiO₂) існують електронні резонанси в ультрафіолетовій області для довжин хвиль $l < 0,4$ мкм. Існують також коливальні резонанси в інфрачервоній області, де $l > 7$ мкм. Розплавлений двоокис кремнію (скло), який є матеріалом оптичного хвилеводу, за своєю природою аморфний. Тому ці резонанси існують у формі смуг поглинання, хвосту яких тягнуться в область видимого спектру. У другому і третьому вікнах прозорості цей тип поглинання робить внесок на рівні не більше ніж 0,03 дБ/км. Виробники оптоволокну не можуть впливати на цю складову поглинання, хіба що перейти на інший матеріал для передачі світлового сигналу.

2. Зовнішні втрати поглинання привнесені домішками оптоволоконна. Сучасні технології виробництва зменшили внесок від цих втрат до дуже низького рівня. У цю групу втрат вносять внесок наступні домішки: залізо, мідь, нікель, магній і хром, які створюють істотні джерела поглинання у вікнах прозорості, що цікавлять нас. У сучасному процесі виробництва вміст цих металів був понижений до величин менше однієї мільярдної частинки, і, отже, вони мають дуже малий внесок до загальних зовнішніх втрат поглинання. На відміну від них, втрати за рахунок наявності залишкових гідроксильних іонів (ОН) створюють лінію поглинання 2730 нм, її гармоніки і комбінаційні складові 1390, 1240 і 950 нм, всі вони мають істотний внесок до загальних зовнішніх втрат поглинання. Ці втрати викликані наявністю води у волокні, що залишилася в процесі виробництва. Рівень іонів ОН в оптоволокні повинен бути понижений до значень менших однієї стомільйонної частинки, для того, щоб підтримувати втрати волокна на належному рівні. Навіть така мала концентрація ОН, як одна мільйонна, здатна викликати втрати 50 дБ в районі «водяного піку» - 1390 нм.

3. Недосконалість волокна - ще одне джерело втрат. Це втрати включають втрати від мікрОВигинів і макрОВигинів. Геометрія волокна - ще одне важливе поняття, що описує недосконалість і що вимагає розгляду. **Геометрія скла** описує кінцеві розмірні характеристики оптичного волокна. Геометрія (і це вже давно зрозуміли) є головним чинником, що визначає втрати в зростку і відсоток вдало виконаних зростків. Головна мета виробника оптоволоконна отримати точнішу геометрію волокна. Волокно, отримане з дотриманням жорсткіших допусків на його геометрію, легше і швидше зростити і при цьому бути упевненим у високій якості зростка і надійності отриманих характеристик.

Три параметри (як показала практика) роблять найбільший вплив на характеристики зростка: концентричність перетинів серцевини і оболонки, допуск на діаметр оболонки і власний вигин волокна.

Концентричність серцевини і оболонки дає зрозуміти наскільки добре серцевина волокна центрується в склі оболонки. Поліпшення цієї характеристики при виробництві волокна зменшує шанс неточного розташування серцевини, що сприяє отриманню зростків з меншими втратами.

Зовнішній діаметр оболонки визначає розмір волокна. Чим жорсткішою є специфікація діаметру оболонки, тим менше шансів, що партії волокна матимуть різні діаметри. Допуск на діаметр оболонки є особливо важливим, коли використовуються наконечники, що калібруються, або здійснюється зчленування роз'ємних з'єднувачів в польових умовах. Всі ці з'єднувачі розраховані по діаметру оболонки в місці вирівнювання волокон для з'єднання.

Власний вигин волокна указує на величину кривизни волокна уздовж деякої довжини волокна. Велика величина власного вигину може привести до дуже великого зсуву волокна при зварюванні або вирівнюванні кінця волокна в V-образній канавці, що може привести до зростків з великими втратами.

4. Розсіювання Релея та Бугера. Цей тип втрат є внутрішнім і викликається флуктуаціями миттєвої щільності і варіаціями концентрації молекул за рахунок недосконалості внутрішньої структури волокна: повітряних бульбашок, неоднорідностей і тріщин, або недосконалістю направляючого хвилеводу, обумовленою загальною нерегулярністю системи серцевина-оболонки. Існує точка на кривій поглинання в районі 1550 нм, де поглинання інфрачервоних і ультрафіолетових хвостів є мінімальними. Навколо цієї точки Релеївське розсіювання є головною складовою загальних втрат. Релеївське розсіювання є обернено пропорційним до довжини хвилі. Із зростанням довжини хвилі розсіювання зменшується. На довжинах хвиль вище 1600 нм інфрачервоне поглинання стає домінуючим.

Закон Бугера проявляється при проходженні сигналу вздовж однорідного волокна потужністю P і енергією W . Сигнал зменшується через втрати, викликані розсіюванням і поглинанням за експоненціальним законом і виражається так:

$$\begin{aligned} P(L) &= P(0)\exp(-\alpha L), \\ W(L) &= W(0)\exp(-\alpha L), \end{aligned} \quad (1)$$

де $P(L)$ - потужність випромінювання на відстані L ;
 $P(0)$ - потужність випромінювання в початковій точці;
 α – коефіцієнт затухання, який вражається так:

$$\alpha = (1/L)\ln[P(0)/P(L)]. \quad (2)$$

і є функцією від довжини хвилі

Вплив дисперсії позначається в розширенні світлового імпульсу при його передачі по оптоволокну. Розрізняють чотири типи дисперсії, кожен з яких викликаний тими або іншими причинами: міжмодова дисперсія, матеріальна дисперсія, хроматична дисперсія (у багатьох джерелах матеріальна і хроматична дисперсії не розділяються), поляризаційна модова дисперсія (PMD).

5. Міжмодова дисперсія. Світло, що розповсюджується по багатомодовому волокну представлено багатьма траєкторіями променів, шлях кожного з яких в серцевині волокна відрізняється один від одного. Число мод, що розповсюджуються по волокну, рівне:

$$M = V^2 / 2 \quad (3)$$

де V - нормалізована частота. Якщо $V = 2,405$ або менше, то розповсюджується тільки одна мода, якщо ж V більше, то розповсюджуються багато мод. До приймального кінця волокна енергія різних мод прибуває з якоюсь затримкою в часі по відношенню до основної моди (He11). Це викликає розмазання прийнятого імпульсу, що безумовно має деструктивну дію, оскільки частина енергії, що розмазана, потрапляє в бітовий інтервал сусіднього біта. Якщо в цей бітовий інтервал потрапить достатня кількість енергії, що розмазана, то з вірогідністю 50% сусідній біт буде прийнятий з помилкою.

6. Матеріальна дисперсія (DM) викликана тим, що різні довжини хвиль проходять через певні матеріали з різними швидкостями. Відоме співвідношення визначає показник заломлення (n):

$$n = c/v \quad (4)$$

де c - швидкість світла у вакуумі, а v - швидкість досліджуваної хвилі в даному матеріалі. Звичайно, матеріалом, що цікавить нас, є кварцове скло (SiO_2). Проблема в тому, що кожна хвиля розповсюджується в даному матеріалі з швидкостями, які дещо відрізняються одна від одної.

Інститут IEEE [4] визначає *матеріальну дисперсію* «як дисперсію, співвідношення залежності довжини хвилі від показника заломлення того матеріалу, з якого сформований хвилевід».

Світловипромінюючий діод (СВД) випромінює широкий спектр довжин хвиль в діапазоні від 30 до 100 нм, тоді як DFB лазер випромінює спектральну лінію шириною від 0,1 до 1,0 нм. Очевидно, якщо в якійсь певній ланці ми маємо проблему з дисперсією, то можна було б використовувати DFB лазер замість СВД і орієнтуватися на одномодове волокно.

Існує одне цікаве явище щодо швидкостей розповсюдження усередині матеріалу. У смузі прозорості 850 нм довші хвилі розповсюджуються з більшою швидкістю, ніж короткі

(наприклад, випромінювання на довжині хвилі 865 нм розповсюджується в кварцовому склі з більшою швидкістю, ніж випромінювання на довжині хвилі 835 нм).

Зовсім навпаки відбувається в смузі прозорості 1550 нм: хвилі коротшої довжини розповсюджуються з великими швидкостями, ніж довшої (наприклад, хвилі довжини 1535 нм розповсюджуються швидше, ніж хвилі довжини 1560 нм).

Ще одне цікаве явище має місце в смузі прозорості 1310 нм. Існує довжина хвилі λ_{ZD} , вище за яку дисперсійний параметр DM є позитивним, а нижче якої DM є негативним. Ця довжина хвилі називається *довжиною хвилі нульової дисперсії*, вона рівна для чистого діоксиду кремнію 1276 нм. Її значення може мінятися в межах 1270-1290 нм для оптичного волокна, серцевина і оболонка якого легуються для отримання необхідного показника заломлення. Довжина хвилі нульової дисперсії для оптичних волокон залежить також від діаметру сердечника і внеску кроку D показника заломлення в перетині хвилеводу в повної дисперсії[3].

Слід вказати, що *хвилеводна дисперсія* зміщує довжину хвилі нульової дисперсії на 30-40 нм, так що повна дисперсія виявляється рівною нулю близько 1310 нм для промислових волокон.

Матеріальна дисперсія є головною складовою дисперсії в системах з одномодовим волокном. Для систем з багатомодовим волокном внесок матеріальної дисперсії в повну дисперсію фактично незначний. Основною тут є модова дисперсія.

Розглянемо вплив дисперсії на двійковий потік, що приймається. Якщо швидкість передачі зростає, ширина бітового інтервалу стає менше. Якщо формат кодування - NRZ, то ширина цього бітового інтервалу стає рівною *бітовому періоду*. Отже,

$$\text{бітовий період (в сек)} = 1/(\text{бітову швидкість передачі}) . \quad (5)$$

Чим менше він стає, тим більше він схильний до дії дисперсії!

В процесі еволюції ВОЛЗ робота на довжині хвилі поблизу нуля дисперсії була дуже привабливою. Проте системи з меншими швидкостями працювали в смузі прозорості 1550 нм, де втрати на кілометр кабелю були мінімальні. Було б чудово, якби ми змогли перенести область нульової дисперсії в смугу прозорості 1550 нм.

Висновок. Проведений аналіз причин втрат сигналу а також видів дисперсії в оптиковолоконні дозволить створювати рекомендації для проектування систем цього типу, а також врахувати і використати ці дані при розроблені захисту інформації в волоконно-оптичних системах зв'язку.

Список літератури

1. Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
2. The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, 6th ed., IEEE, New York, 1996.
3. Р.Фриман, Волоконно-оптические системы связи, Техносфера. Москва 2003.

Надійшла 10.11.09