

ЗАГАСАННЯ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ У ВОЛЗ

Вступ

Технічні характеристики і параметри сучасних волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) такі як висока інформаційна ємність та швидкість передачі; велика довжина пасивних ділянок і ділянок без використання регенераторів; висока завадостійкість; економічна ефективність та інші сприяють активному використанню ВОЛЗ при побудові і модернізації різноманітних ліній зв'язку. Також вважається, що ВОЛЗ мають високу скритність і захищеність.

З точки зору несанкціонованого отримання інформації, яка передається лініями зв'язку, найдоступнішими є канали зв'язку. Запобігання витоку інформації з мереж зв'язку, в наш час, є достатньо важким завданням. Принцип роботи і побудова більшості з елементів ВОЛЗ є відомими і описаними в літературі. Але, у відкритій літературі майже немає інформації щодо методів і можливостей несанкціонованого підключення до ВОЛЗ.

Детальний аналіз захищеності інформації, що передається в ВОЛЗ, розпочався відносно недавно, і на цей час цю проблему досліджено недостатньо. Аналіз захисту інформації в ВОЛЗ найкраще починати з побудови моделі втрат або загасання. Це обумовлено точками витоку інформації в лінії зв'язку.

Основна частина

Виходячи з особливостей оптичного волокна модель загасання сигналу має містити дві складові:

- загасання оптичного сигналу (ОС), обумовлене фізичними особливостями оптичного волокна (ОВ);

- загасання ОС, обумовлене навмисними діями на ОВ потенційного порушника.

Загасання ОС за рахунок фізичних особливостей ОВ обумовлюється існуванням втрат при передачі інформації.

При розповсюдженні оптичного імпульсу уздовж однорідного волокна потужність P і енергія W імпульсу зменшуються через втрати енергії, викликані розсіюванням і поглинанням за експоненціальним законом (закон Бугера, рис. 1) і визначається, як:

$$P(L) = P(0) \exp(-\alpha L), W(L) = W(0) \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

де $P(L)$ - потужність випромінювання на відстані L ;

$P(0)$ - потужність випромінювання в початковій точці;

α - коефіцієнт затухання, якій визначається виразом:

$$\alpha = \left(\frac{1}{L}\right) \ln \left[\frac{P(0)}{P(L)} \right] \quad (2)$$

В одиницях дБ/км коефіцієнт ослаблення α може бути виражений, як:

$$\alpha \left(\frac{dB}{км}\right) = \frac{10}{L} \log \left[\frac{P(0)}{P(L)} \right] = 4.343 \alpha \text{ (км}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

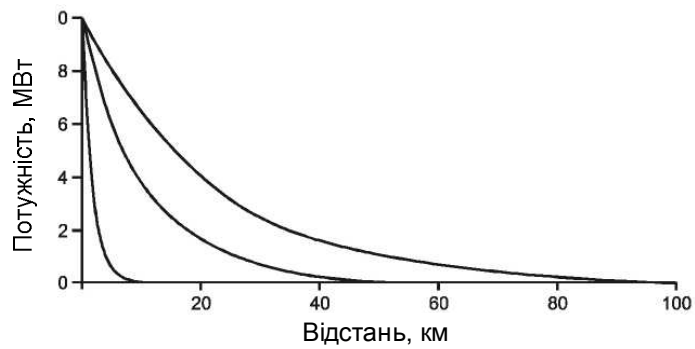


Рис 1. Закон Бугера. Залежність потужностей світлових імпульсів від відстані вздовж волокна на довжинах хвиль 1550 нм, 1300 нм і 985 нм.

Коефіцієнт загасання є функцією від довжини хвилі. На рис.2 подано графік залежності коефіцієнта загасання від довжини хвилі.

Загасання світла в ОВ складається з втрат на поглинання, втрат на розсіювання і кабельні втрати. В свою чергу втрати на поглинання ($\alpha_{\text{погл}}$) і на розсіювання ($\alpha_{\text{роз}}$) разом визначаються як власні втрати ($\alpha_{\text{особ}}$), а кабельні втрати ($\alpha_{\text{каб}}$) і втрати, зв'язані з несанкціонованим доступом (НСД) через їх фізичну природу можна назвати додатковим втратами ($\alpha_{\text{дод}}$).

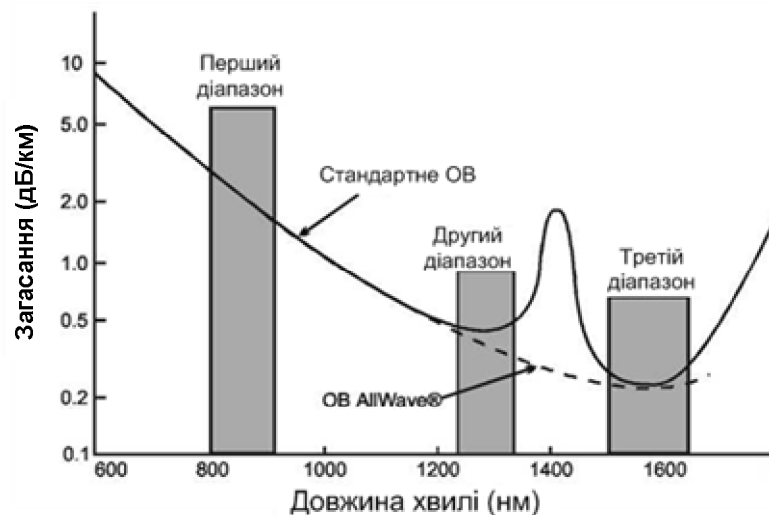


Рис 2. Залежність коефіцієнта загасання від довжини хвилі

Загасання сигналу в ОВ залежить від довжини хвилі і становить 0,5 дБ/км для 1300 нм і 0,3 дБ/км для 1550 нм стандартного одномодового волокна (суцільна лінія). Це волокно має пік загасання в області 1400 нм, який є результатом поглинання енергії молекулами води. Пунктирною лінією на рис. 2 показано загасання для волокна Allwave®, вільного від води.

Таким чином, повне загасання в ОВ з урахуванням НСД можна представити в такому вигляді:

$$\alpha = \alpha_{\text{особ}} + \alpha_{\text{дод}} = \alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{роз}} + \alpha_{\text{каб}} + \alpha_{\text{нсд}} \quad (4)$$

Втрати на поглинання ($\alpha_{\text{погл}}$) складаються з втрат в кварцовому склі, які визначаються, як ультрафіолетове і інфрачервоне поглинання, а також з втрат, пов'язаних з поглинанням оптичної енергії на домішках (Втрати в кварцовому склі викликаються власним поглинанням атомами оптичного матеріалу – кварцу (і поглинанням атомними дефектами в скляному складі ($\alpha_{\text{дефект}}$)).

$$\alpha_{\text{погл}} = \alpha_{\text{с.о.м.}} + \alpha_{\text{доміш}} + \alpha_{\text{дефект}} \quad (5)$$

Основною реакцією скловолокна на атомне випромінювання є збільшення загасання оптичної енергії унаслідок створення атомних дефектів, або центрів ослаблення, які

поглинають оптичну енергію.

Поглинання на домішках (забрудненнях) виникає переважно від іонів металу і від ОН (водяних) іонів. Домішки металу обумовлюють втрати від 1 до 10 дБ/км.

Раніше ОВ мали високий рівень вмісту ОН-іонів, який призводив до великих піків поглинання на довжинах хвиль 1400, 950 і 725 нм. Шляхом зменшення залишкового вмісту ОН-іонів у волокні (для одномодових волокон - близько 1 частки на мільярд), на цей час ОВ мають номінальні загасання 0,5 дБ/км на 1300 нм і 0,3 дБ/км на 1550 нм, як показано суцільною лінією на рис. 2. Слід звернути увагу на центр домішки в районі 1480 нм, який є домішкою ОН-іонів у волокні. На цій довжині хвилі завжди наявний пік поглинання в кварцовому волокні.

Так звані центри домішок, залежно від типу домішки, поглинають світлову енергію на певних, властивих даній домішці, довжинах хвиль і розсіюють її у вигляді теплової енергії.

Власне поглинання атомами оптичного матеріалу складається з :

- поглинання електронів в ультрафіолетовій області;
- поглинання електронів на межі інфрачервоної області.

Ультрафіолетова межа поглинаючих смуг електронів відповідно до закону Урбача визначається як:

$$\alpha_{\text{погл}} = C \exp (E/E_0) \quad (6)$$

де C і E_0 емпіричні сталі і E –енергія фотону.

Характерний розподіл ультрафіолетового і інфрачервоного поглинання представлений на рис. 3

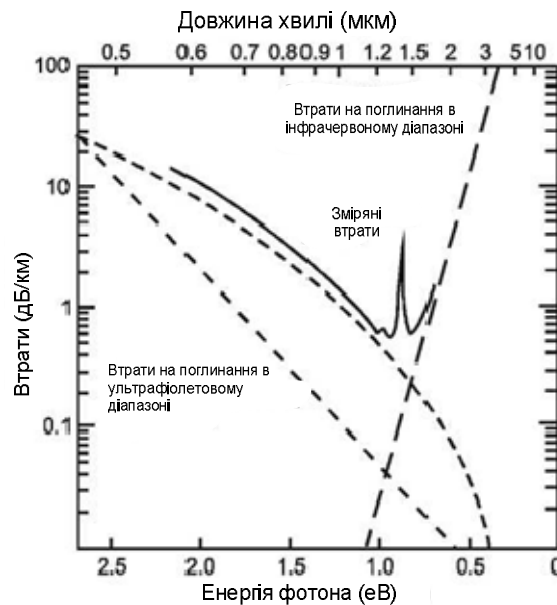


Рис 3. Розподіл ультрафіолетового і інфрачервоного поглинання

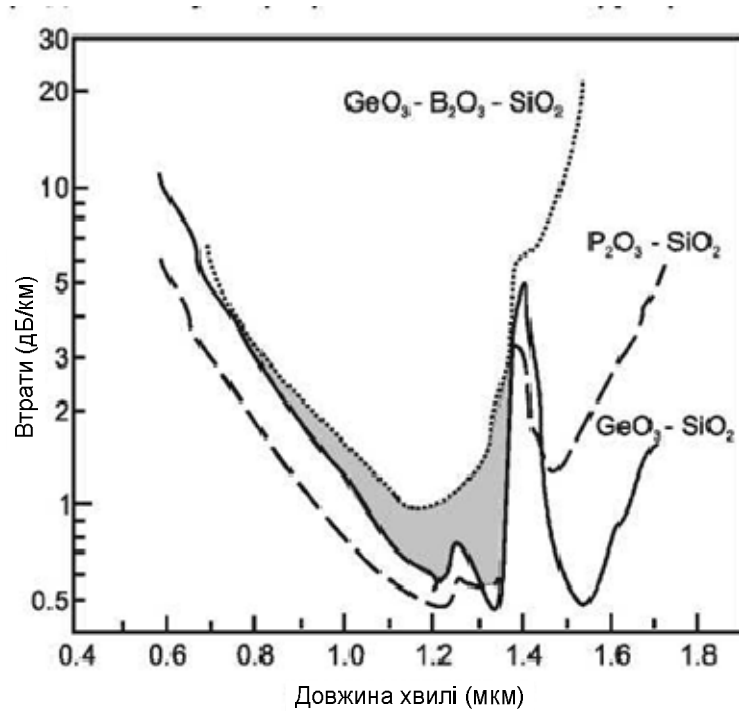


Рис.4. Порівняння інфрачервоного поглинання, викликаного різними домішками.

Значення загасання в ультрафіолетовій області є малим, в порівнянні із загасанням в інфрачервоній області для малих значень енергії фотона. Власні втрати на поглинання зростають при збільшенні довжини хвилі випромінювання і стають значними в ультрафіолетовій і інфрачервоній областях. Так при довжині хвилі випромінювання більшій 1,6 мкм звичайне кварцове скло втрачає властивість прозорості через зростання втрат, які пов'язані з інфрачервоним поглинанням (рис.3).

На рис. 4 представлено залежності втрат від довжини хвилі випромінювання для ОВ з кварцового скла з гранично малими втратами і багатокомпонентними ОВ, виготовлених з різних оптичних матеріалів.

Розсіюванням представляє процес видалення частини енергії з хвилі, що розповсюджується, з наступною емісією деякої частини цієї енергії.

Джерела виникнення розсіювання в ОВ:

- маленькі газові бульбашки;
- неоднорідний склад оптичного матеріалу;
- вигин ОВ.

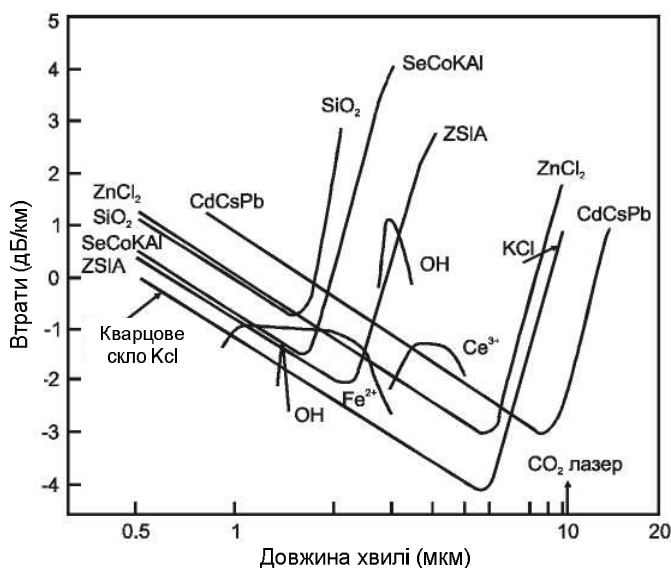


Рис 5. Залежність втрат від довжини для різних матеріалів

Втрати на розсіювання стають визначальним чинником загасання у волокні вже з 1970 р., коли була досягнута чистота ОВ порядку 99,9999%.

Подальшому зменшенню загасання перешкождали втрати на розсіювання. У загальному виді втрати на розсіювання визначаються наступним виразом:

$$\alpha_{\text{роз}} = \alpha_{\text{рел}} + \alpha_{\text{ми}} + \alpha_{\Sigma\text{згиб}} + \alpha_{\Sigma\text{стик}} + \alpha_{\text{вкр}} + \alpha_{\text{врбм}} \quad (7)$$

де $\alpha_{\text{рел}}$ - втрати, обумовлені Релеєвським розсіюванням. Причиною Релеєвського розсіювання є те, що атоми в склі (SiO_2) мають випадковий просторовий розподіл, і локальні зміни в складі приводять до локальної зміни індексу заломлення, що і викликає розсіювання оптичної енергії. Тому хвилі малої довжини повинні більше розсіюватися і, отже, мати вищі втрати, ніж хвилі з більшою довжиною.

$\alpha_{\text{ми}}$ - втрати, обумовлені Мі-розсіюванням. Даний тип лінійного розсіювання виникає на іонах домішки, розмір яких порівнюється з довжиною хвилі. У високоякісних ОВ такі втрати відсутні.

$\alpha_{\Sigma\text{згиб}}$ - сумарні втрати, обумовлені мікро ($\alpha_{\text{мікро}}$) і макро ($\alpha_{\text{макро}}$) вигинами ОВ, що визначаються виразом:

$$\alpha_{\Sigma\text{згиб}} = \alpha_{\text{мікро}} + \alpha_{\text{макро}} \quad (8)$$

Мікрівигини виникають в процесі виготовлення ОВ і при формуванні пластикового конверту в процесі виготовлення оптичного кабеля. Макровигини виникають в процесі прокладки оптичного кабеля і є функцією від радіусу вигину ОВ. Тоді втрати на макровигинах можна представити виразом:

$$\alpha_{\text{макро}} = 2\alpha_{\text{п.п.}} + \alpha_{\text{п.м.у.}} + \alpha_{\text{п.м.}} \quad (9)$$

де $\alpha_{\text{п.п.}}$ - втрати, обумовлені переходами від прямої ділянки світлопроводу до зігнутої, а також від зігнутої до прямої ділянки; $\alpha_{\text{п.м.у.}}$ - втрати на зігнутій ділянці ОВ; $\alpha_{\text{п.м.}}$ - втрати, обумовлені наявністю мікротріщин; $\alpha_{\Sigma\text{стик}}$ - сумарні втрати, обумовлені стиковкою ОВ і визначувані внутрішніми ($\alpha_{\text{внутр}}$) і зовнішніми ($\alpha_{\text{зовн}}$) втратами згідно виразу:

$$\alpha_{\Sigma\text{стик}} = \alpha_{\text{внутр}} + \alpha_{\text{зовн}} \quad (10)$$

Внутрішні втрати визначаються важко контрольованими чинниками – парною варіацією діаметрів серцевин, показників заломлення, числових апертур, ексцентриситетів «серцевина/оболонка», концентричністю серцевини у волокнах, що сполучаються. Можна отримати випадкові зміни перерахованих чинників, оскільки вони залежать не від конструкції з'єднувача, а від технології виробництва ОВ.

Причинами зовнішніх втрат є недосконалість конструкції з'єднувача, а також процесу складання ОВ і з'єднувача. Зовнішні втрати залежать від механічного нестикування (кутовий, радіальний і осьовий зсув), шорсткості на торці серцевини, чистоти ділянки і наявності зазору між торцями з'єднаних ОВ. Наявність зазору приводить до появи френелівського віддзеркалення через утворення середовища з показником заломлення, відмінним від показника заломлення ОВ.

$$\alpha_{\text{зовн}} = \alpha_{\text{кут}} + \alpha_{\text{рад}} + \alpha_{\text{ось}} + \alpha_{\text{обр}} \quad (11)$$

де $\alpha_{\text{кут}}$ - втрати, викликані кутовим зсувом світлопроводів; $\alpha_{\text{рад}}$ - втрати, викликані радіальним зсувом осей ОВ; $\alpha_{\text{ось}}$ - втрати, викликані осьовим зсувом торців ОВ; $\alpha_{\text{обр}}$ - втрати, обумовлені зворотним френелівським віддзеркаленням.

З врахуванням викладеного, вираз (10) прийме наступний вигляд:

$$\alpha_{\Sigma\text{стик}} = \alpha_{\text{внутр}} + \alpha_{\text{кут}} + \alpha_{\text{рад}} + \alpha_{\text{ось}} + \alpha_{\text{обр}} \quad (12)$$

Сумарні втрати, обумовлені стикуванням ОВ, також називають втратами, що вносяться.

- втрати, обумовлені вимушеним комбінаційним розсіюванням. Це розсіювання називається розсіюванням Рамана-Мандельштама і виникає у волокні тоді, коли оптична потужність, що проходить в ньому, досягає деякого порогу. Поріг розсіювання залежить від площі поперечного перетину і довжини ОВ, а також від коефіцієнта втрат. Розсіювання розповсюджується переважно у напрямі початкового випромінювання.

- втрати, обумовлені вимушеним розсіюванням Манделштама-Бріллюена. Фізична суть розсіювання полягає в тому, що при достатньо високому рівні потужності випромінювання відбувається зміна енергетичних квантових станів молекул і атомів ОВ, що виражається в коливальному русі молекул. Це приводить до флуктуації щільності речовини, тобто до виникнення акустичних фононів. На цих фононах відбувається нелінійне розсіювання світла, що полягає в тому, що фотони віддають частину енергії акустичним фононам, внаслідок чого в спектрі випромінювання з'являються нові компоненти, які називають стоксовими.

Для забезпечення працездатності ВОЛЗ необхідно, щоб для повного загасання α сигналу у волоконно-оптичному тракту виконувалися наступні умови:

$$\alpha = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} - \alpha_{\text{зап}} \text{ при } P_{\text{пр}} \geq P_{\text{пр.мін}}, \quad (13)$$

$$\Delta \alpha \leq \alpha_{\text{зап}}$$

де $P_{\text{пер}}$ - потужність випромінювання оптичного передавача (дБ/м); $P_{\text{пр}}$ - потужність на вході фотоприймача (дБ/м); $\alpha_{\text{зап}}$ - експлуатаційний запас (дБ/м); $\Delta \alpha$ - абсолютна зміна загасання тракту при зміні температури навколишнього середовища. Параметр α визначає довжину регенераційної ділянки.

Таким чином, значення втрат потужності P_l в довільній точці визначається розв'язком системи рівнянь:

$$P_l = \begin{cases} P_0 e^{-(\alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{рел}} + \alpha_{\text{мі}} + \alpha_{\Sigma\text{згиб}} + \alpha_{\Sigma\text{стик}} + \alpha_{\text{вкр}} + \alpha_{\text{врбм}} + \alpha_{\text{нсд}})l}, & l > 0 \\ P_0, & l = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Дії з навмисного зняття інформації з ВОЛС повинні бути направлені на отримання необхідної частки енергії основного випромінювання або максимальної частини потужності випромінювання за рахунок використання існуючих, а також створення додаткових втрат, і повинні складатися з наступних кроків:

1. Фіксації з подальшим посиленням і обробкою випромінювання витікаючих мод.
2. Фіксації з подальшим посиленням і обробкою випромінювання за рахунок Релеєвського розсіювання.
3. Фіксація з подальшим посиленням і обробкою випромінювання в місцях зварювання, роз'ємних з'єднань.
4. Пошук місць з підвищеним випромінюванням (місць з мікрОВИГІНАМИ, мікротріщинами) з подальшим посиленням і обробкою прийнятого сигналу.
5. Створення додаткових вигинів, натягнень, порушень оболонки з метою збільшення потужності витоку основного випромінювання або витоку, обумовленого фізичними властивостями ОВ.
6. Розрив волокна і застосування спеціальних засобів і методів, направлених на мінімізацію виявлення вчиненої дії.
7. Дії, направлені на збій приймання-передавання інформації шляхом збільшення значення хроматичної дисперсії в багатомодових оптичних кабелях.

Системи, що використовують п. 5, 6 і 7 реально існують і принцип їх дії описано в існуючій літературі. Розробку засобів за п. 1-4 можна розглядати як перспективні, оскільки їх використання ніяк не позначається на сигналі, який передається по ОВ, і виявлення несанкціонованої дії зведено до мінімуму.

На підставі запропонованої вище моделі можна приступати до побудови системи захисту інформації

Відомі системи захисту мають два напрями:

1. Системи захисту, направлені на контроль ВОЛЗ;
2. Системи захисту, направлені на захист самої інформації.

Обидва ці напрями дозволяють здійснювати повний контроль дій, вказаних в п 5 і 6 тегів. Для вказаних в п.1-4 тегів ці напрями (крім криптографічних) є непридатними.

Крім того для побудови складних систем захисту необхідно враховувати дії порушника, направлені на використання фізичних особливостей оптичного волокна.

Висновок

Запропонована модель загасання сигналу в оптико-волоконних лініях зв'язку, яка враховує загасання, спричинене як фізичними особливостями оптичного волокна так і навмисними діями на ОВ потенційного порушника, може бути застосована при проектуванні засобів захисту інформації в системах передачі інформації з використанням ВОЛЗ, а також для оцінки захищеності інформації.

Список літератури

- 1.Скляров О.К.-Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. Скляров О.К. – М.:Солон- Р, 2001. -240с.
- 2.Kaiser G/- Optical Fibre Communications. McGraw-Hill, 2nd Ed., 1991. Ch2-3.
- 3.Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи/ Гроднев И.И. – М.: Радио и связь, 1990. -224с.
- 4.Гальярди Р.М. – Оптическая связь/ Гальярди Р.М., Капри Ш.И. – М.: Связь, 1978. -424с.
- 5.Гринфилд Д. – Оптические сети/ Гринфилд Д. – К.: ООО«Тид ДС», 2002 – 256с.

*Рецензент: д.т.н., проф. Корченко О.Г.
Надійшла 25.02.2010 р.*