

УДК 623.004.67

А.М. Науменко, С.Г. Леонова, О.А. Кононова

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ НА ШВИДКІСТЬ І ДАЛЬНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Аналізуються впливи параметрів волоконно-оптичних датчиків, таких як, коефіцієнт загасання середовища, час поширення їх спектральних і поляризаційних компонентів, на швидкість і дальність передачі інформації за допомогою них у лініях зв'язку.

**Ключові слова:** волокно, спектр, опір, поляризація, частота.

### Вступ

**Постановка задачі.** У волоконно-оптичних датчиках оптичне волокно може бути застосоване як в якості лінії передачі, так і в якості самого чутливого елемента датчика. В останньому випадку використовуються чутливість волокна до магнітного поля (ефект Фарадея), до вібрації, температури, тиску, деформаціям (наприклад, до вигину) і т.і., що в оптичних системах зв'язку оцінюються як недоліки. Поява цих явищ у датчиках вважається перевагою, яку варто розвивати. Тому вивчення впливу параметрів волокна на характеристики волоконно-оптичних засобів є актуальною науково-прикладною задачею.

**Аналіз літератури** В відомій літературі [1-5] розглядаються основні види інтерференційних волоконно-оптичних датчиків: торцевий волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо, інтерферометр Маха-Цендера і багатомодовий інтеферометр, але в цій літературі не визначаються питання, що пов'язані з основними елементами волоконно-оптичного датчика, такі як оптичне волокно, світловипромінюючий та світлоприймальний прилади чутливого елемента. Крім того, не розглянуті спеціальні лінії, що необхідні для зв'язку між цими елементами або для формування вимірювальної системи з датчиком.

**Метою статті** є дослідження впливу параметрів волоконно-оптичних датчиків, таких як, коефіцієнт загасання середовища, час поширення їх спектральних і поляризаційних компонентів, на швидкість і дальність передачі інформації за допомогою них у лініях зв'язку

### Основний матеріал

По мірі поширення світла в оптичному середовищі воно загасає. Тобто здійснюється загасання середовища – загасання оптичного волокна (ОВ). Загасання залежить від довжини хвилі випромінювання, що вводиться у волокно. У цей час передача сигналів по волокну здійснюється в трьох діапазонах: 850 нм, 1300 нм, 1550 нм, тому що саме в цих

діапазонах кварц має підвищену прозорість. Загасання (рис. 1) звичайно вимірюється в дБ/км і визначається втратами на поглинання й на розсіювання випромінювання в оптичному волокні [5]: релеевське розсіювання; розсіювання на дефектах волокна; власне поглинання кварцового скла; сумішне поглинання; поглинання на мікро й макровигинах.



Рис. 1. Загасання середовища

Ступінь втрат визначається коефіцієнтом загасання  $\alpha$ , який у загальному виді дорівнює:

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{нк}}, \quad (1)$$

Детально розглянемо складові виразу (1).

$\alpha_{\text{п}}$  – коефіцієнт загасання, обумовлений втратами на поглинання світлової енергії. Власне поглинання кварцового скла визначається поглинанням фотонів при яких енергія фотона переходить в енергію електронів, або в коливальну енергію решітки. Спектр власного електронного поглинання кварцового скла знаходиться в ультрафіолетовій області ( $\lambda < 0,4$  мкм). Спектр поглинання решітки знаходиться в інфрачервоній області ( $\lambda > 7$  мкм). Оскільки структура кварцового скла аморфна, смуги поглинання мають розмиті границі, а їх «хвости» заходять у область спектра, яку можна бачити. В другому й третьому вікнах прозорості в діапазоні довжин хвиль 1,3 – 1,6 мкм втрати, викликані власним поглинанням, мають порядок 0,03 дБ/км.

$\alpha_{\text{р}}$  – коефіцієнт загасання, що обумовлений релеевським розсіюванням на неоднорідностях мате-

ріалу ОВ, розміри яких значно менше довжини світлової хвилі, і тепловими флуктуаціями показника переломлення. Цей вид розсіювання визначає теоретичну границю, нижче якої загасання не може бути зменшене й в сучасних ОВ є основним джерелом втрат у робочих областях спектра. Релеєвське розсіювання викликається розсіюванням на неоднорідностях показника переломлення, що виникли в розплавленому кварці у зв'язку з локальними термодинамічними флуктуаціями концентрації молекул (щільності) кварцу через їхнього хаотичного руху в розплавленому стані. При затвердінні волокна неоднорідності, що виникли в розплавленій фазі, застигають у структурі кварцового скла. Коливання щільності приводять до випадкових флуктуацій показника переломлення в масштабі, меншому, тому довжина світлової хвилі  $\lambda$ .

$\alpha_{\text{пр}}$  – коефіцієнт загасання, викликаний присутніми в ОВ домішками, що приводять до додатковому поглинанню оптичної потужності, це іони металів (Fe, Cu, Ni, Mn, Cr), що викликають поглинання в діапазоні довжин хвиль 0,6-1,6 мкм, і гідроксильні групи (ВІН), через які з'являються резонансні сплески загасання  $\alpha(\lambda)$  на довжинах хвиль 0,75 мкм, 0,97 мкм і 1,39 мкм.

$\alpha_{\text{к}}$  – додаткові втрати, що обумовлені деформацією ОВ у процесі виготовлення кабелю, викликаною скруткою, вигином, відхиленням від прямолінійного розташування і термомеханічними впливами, які мають місце при накладенні оболонки і покриттів на серцевину волокна при виготовленні оптичного кабелю (ОК), їх називають кабельними.

$\alpha_{\text{нк}}$  – коефіцієнт загасання, що залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання й за рахунок поглинання в інфрачервоній області зростаючий у показовому ступені з ростом довжини хвилі. У цей час у техніку зв'язку в основному застосовуються кварцові ОВ, область ефективного використання яких перебуває в діапазоні довжин хвиль до 2 мкм. На більш довгих хвилях у якості матеріалу для волокна використовуються галогенне, халькогенне й фторидне скло. У порівнянні із кварцовими волокнами вони мають більшу прозорість і забезпечують зниження втрат на менше число порядків. З появою ОВ з нових матеріалів стає реальним створення волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) без ретрансляторів. Загасання оптичного хвилеводу враховується при розрахунках енергетичного бюджету. Загасання оптоволоконної лінії з урахуванням втрат на роз'ємних з'єднаннях і зростках (нероз'ємних з'єднаннях) визначається за формулою:

$$A = A_{\text{нк}} \cdot n_{\text{нк}} + \alpha \cdot L + A_{\text{рс}} \cdot n_{\text{рс}}, \quad (2)$$

де  $A_{\text{нк}}$  і  $A_{\text{рс}}$  – значення втрат на зростку й рознімання відповідно;  $n_{\text{нк}}$  і  $n_{\text{рс}}$  – кількість зростків і роз'ємних з'єднань протягом оптоволоконної лінії довжиною

$L$ ;  $\alpha$  – кілометричний коефіцієнт загасання оптичного волокна, вимірюваний у дБ/км.

В цьому випадку енергетичний бюджет розраховується по формулі:

$$A_{\text{еб}} = P_{\text{вих}} - P_{\text{фпр}} A_{\text{еза}} - A_{\text{езк}} - A, \quad (3)$$

де  $P_{\text{вих}}$  і  $P_{\text{фпр}}$  – потужність джерела оптичного випромінювання й чутливість фотоприймача в дБ відповідно;  $A_{\text{еза}}$  і  $A_{\text{езк}}$  – експлуатаційний запас для апаратури та для кабелю (дБ), які беруться із технічних умов (контрактних специфікацій) для встаткування ВОЛЗ.

Стрімкий розвиток техніки оптичної передачі інформації в останні десять років призвело до того, що поляризаційні ефекти у волоконно-оптичних лініях зв'язку, що ще недавно вважалася незначними, стали відігравати роль основного фактора, що стримує подальше збільшення швидкості й дальності передачі інформації. Це пов'язане з тим, що обмеження, що накладаються загасанням світлових сигналів, і обмеження, що накладаються викривленнями світлових сигналів через хроматичну дисперсію, успішно долаються в міру впровадження оптичних підсилювачів і поліпшення їх характеристик і в результаті розробки ефективних методів компенсації хроматичної дисперсії. По мірі збільшення швидкості передачі інформації з одного каналу до 10 і 40 Гбіт/с і дальності до декількох тисяч кілометрів навіть слабкі ефекти поляризаційної модової дисперсії PMD (polarization mode dispersion), накопичуючись, дають помітний внесок у роботу системи. Це пов'язано з тим, що світло являє собою електромагнітну хвилю, а її поширення в будь-якому середовищі описується рівняннями Максвелла. Також поширення світла може розглядатися шляхом визначення розвитку пов'язаних з ним векторів електричного  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  і магнітного  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  полів в просторі й часу, де  $\mathbf{r}$  – є просторове положення вектора. Більш зручно оперувати з перетворенням Фур'є цих векторів. Перетворення Фур'є для  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  визначається аналогічним образом.

Оскільки електрони в атомі заряджені негативно, а ядро несе позитивний заряд, то при дії електричного поля на матеріал, подібний кварцу, відбувається поляризація атомів. Поляризація, яка є індукованою, описується вектором  $\mathbf{P}$ , що залежать від особливостей середовища та прикладеного електричного поля і зв'язаним с вектором  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  та електричною індукцією  $\mathbf{D}$  виразом:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P}. \quad (4)$$

Зв'язок  $\mathbf{P}$  і  $\mathbf{E}$  в оптичному волокну визначається властивостями середовища та є причиною важливого явища – дисперсії.

Розглянемо поведінку фундаментальної моди, представивши електричне поле  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  світлової хвилі у вигляді:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_x \mathbf{e}_x + E_y \mathbf{e}_y + E_z \mathbf{e}_z, \quad (5)$$

де  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  – відповідно поодинокі вектори, причому  $z$  – напрямок поширення світла. Це рівняння має два лінійно незалежні розв'язання, що відповідають фундаментальній моді.

Згодом мінливе електричне поле вважається лінійно поляризованим, якщо його напрямок залишається постійним (не залежить від часу). Якщо електричне поле, асоційоване з електромагнітною хвилею, не має позовжнього компонента, поле вважається поперечним, а якщо ні, то – позовжнім. Враховуючи це, два лінійно незалежні розв'язання хвильового рівняння представляються лінійно поляризованими уздовж вісі  $x$  та вісі  $y$  електричні поля, що в силу взаємної перпендикулярності називаються ортогонально поляризованими складовими електричного поля або станами поляризації SOP (State of Polarization). Будь-яка лінійна комбінація цих двох лінійно поляризованих складових також є розв'язком рівняння тобто фундаментальною модою. В ідеальному ізотропному оптичному волокні ці дві стани поляризації мають ту ж саму постійну поширення, тобто поширюються з однаковою швидкістю, в результаті проходження цього середовища тривалість результуючого імпульсу залишається незмінною. Але в реальних оптичних волокнах через порушення кругової симетрії виникає певна анізотропія, тому, враховуючи, що світлова енергія розподілена між SOP, відмінність констант поширення викликає збільшення тривалості імпульсу на виході ОВ.

Анізотропія (двопроменезаломлення оптичного волокна) може бути пов'язана або з порушенням ідеальної кругової форми сердцевини, або з наведеним двопроменезаломленими речовини, наприклад, через несиметричні напруги в матеріалі ОВ, як це показано (рис. 3), або враховуючи розбіжності геометричних центрів сердцевини й оболонки.

Втрата кругової симетрії призводить до появи анізотропії, при цьому, в оптичному волокні поширюються дві ортогонально поляризовані моди з різними фазовими й груповими швидкостями.

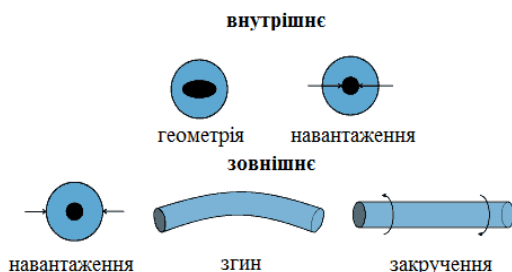


Рис. 3. Причини виникнення анізотропії оптичного волокна

Швидкості поширення поляризаційних компонентів світлового імпульсу різні, що призводить до виникнення тимчасової затримки  $\delta t$ , яку прийнято називати диференціальною груповою затримкою

DGD (Differential Group Delay), що призводить до розширення результуючого сигналу.

Стан поляризації, що задає найшвидше й саме повільне поширення сигналу, має назву швидкого й повільного головного стану поляризації PSP (Principal State of Polarization).

Вісі лінійних поляризацій швидкого й повільного PSP мають назву «швидкої» і «повільної» вісями анізотропного середовища.

Після прокладки кабелю багато параметрів, у тому числі й PMD, можуть за рядом причин (деформації волокна, температурні зміни, натяження і т.д.) випробувати відхилення від паспортних даних. Це вимагає проведення вимірів PMD оптичних волокон після інсталяції волоконно-оптичної кабельної системи.

Також у процесі експлуатації слід проводити регулярні перевірки параметра PMD. Для складних ліній з великим числом послідовних сегментів волоконно-оптичних кабелів доречно проводити тестування PMD і окремих сегментів.

## Висновки

1. Чутливість волокна до магнітного поля (ефект Фарадея), до вібрації, температури, тиску, деформаціям (наприклад, до вигину) і т.і., що в оптичних системах зв'язку оцінюються як недоліки, у датчиках вважається перевагою, яку варто розвивати.

2. За результатами проведеного аналізу визначимо, що при створенні ВОЛЗ необхідно враховувати характеристики основних елементів волоконно-оптичного датчика, а саме: оптичне волокно, що є світловипромінююче (джерело світла); світлоприймальні прилади чутливого елемента.

3. Для практичного впровадження волоконно-оптичних датчиків необхідно мати елементи системної техніки, які в сукупності з основних елементами волоконно-оптичного датчика та лінією зв'язку утворюють вимірювальну систему.

## Список літератури

1. Волоконно-оптические датчики / Т. Окуси и др. Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Волоконно-оптичні системи. Довідник / Під ред. І.І. Гроднева. – К., 1993. – 320 с.
3. Волоконно-оптичні лінії зв'язку. Довідник / Під ред. С.В. Свечнікова. – К., 1999. – 432 с.
4. Бусурин Б.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики / Б.И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 226 с.
5. Міровіцькій Д.І. Мультиплексовані системи волоконно-оптичних датчиків / Д.І. Міровіцькій // Вимірювальна техніка. – 1992. – № 1. – С. 40-42.

Надійшла до редколегії 22.10.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ  
НА СКОРОСТЬ И ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

А.Н. Науменко, С.Г. Леонова, Е.А. Кононова

*Проводится анализ влияния параметров волоконно-оптических датчиков, таких как коэффициент затухания среды, время распространения их спектральных и поляризационных компонентов на скорость и дальность передачи информации в линиях связи.*

**Ключевые слова:** *волокно, спектр, сопротивление, поляризация, частота.*

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF PERFORMANCE FIBER OPTIC SENSORS  
THE SPEED AND RANGE OF INFORMATION TRANSFER**

A.N. Naumenko, S.G. Leonova, O.A. Kononova

*The analysis of the influence parameters of fiber optic sensors, such as the damping coefficient of the medium, the time of propagation and polarization of the spectral components on the transmission speed and distance information in communication links.*

**Keywords:** *fiber, spectrum, resistance, polarization, frequency.*