

Євген Чернихівський, Михайло Климаш, Ярослав Шийка
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН ЗА ДОПОМОГОЮ МАТРИЦЬ МЮЛЛЕРА І ДЖОНСА

© Чернихівський Євген, Климаш Михайло, Шийка Ярослав, 2004

Розглянуто явище і причини виникнення поляризаційної модової дисперсії в оптичних магістральних трактах, проведено аналіз поляризаційних характеристик оптичних волокон магістральних лінійних трактів, запропоновано метод аналізу і розрахунку коефіцієнта поляризаційної модової дисперсії і поляризаційно залежних втрат оптичних магістральних волокон за допомогою матриць Джонса і Мюллера, отримано залежності параметрів поляризованого випромінювання від поляризаційних характеристик оптичного волокна та інших оптичних компонент.

The phenomena and reasons of origin polarization mode dispersion in optical main tracts are considered. An analysis of the polarization characteristics of optical fibers main linear tracts are conducted. The method of an analysis and calculation of the coefficient of polarization mode dispersion optical main fibers by means of Jones and Mueller matrixes, were offered and the parameters of dependency polarized radiating from polarization characteristics of optical fiber and other optical component were given.

Вступ

Проектуючи високошвидкісні системи передачі, однією з основних проблем, з якою стикаються розробники, є забезпечення максимальної швидкості і дальності передачі при мінімальних економічних затратах. Обмежувачими чинниками цих параметрів є дисперсія і затухання оптичного волокна (ОВ). Сучасні одномодові ОВ з малим погонним затуханням, а також використання підсилювачів EDFA дають змогу уникати обмеження довжини регенераційної ділянки затуханням, тому вирішальним обмежувачим чинником є сумарна дисперсія ОВ. На сьогоднішній день відомо багато методів компенсації матеріальної і хроматичної дисперсії, тому у цій роботі вони не розглядатимуться. У високошвидкісних волоконно-оптичних системах передачі (ВОСП) істотний вплив на ВЛ-обмеження має поляризаційна модова дисперсія (PMD). Як відомо, світлова хвиля може бути подана у вигляді двох ортогональних поляризованих мод, що поширюються вздовж швидкої і повільної осей матеріалу з подвійним променезаломленням (анізотропним оптичним середовищем). На поляризаційні характеристики ділянки ОВ впливають різні статичні і динамічні чинники (згин, деформація, температура тощо), тому значення PMD змінюється в часі і носить випадковий характер (в одномодовому ОВ), а в РМ-волокні стан поляризації підтримується по усій довжині волокна за рахунок оболонки. Статистична модель PMD розроблена у вигляді накопичення результатів диференціальної групової затримки. Точний опис PMD для конкретного волокна у цей момент часу вимагає визначення основних станів поляризації (диференціальної групової затримки), залежно від довжини хвилі, в той час, коли на практиці визначається середнє і середньоквадратичне значення ДГЗ. Поведінка основних станів поляризації, взаємодія мод, вимірювання, контроль PMD, зменшення і компенсація PMD викликають основний інтерес у дослідників і виробників ОВ.

1. Методи подання поляризованого світла і поляризаційних характеристик оптичних компонент

На сьогодні існує багато методів представлення поляризованого світла. Вектор Стокса є сукупністю чотирьох величин, за допомогою якого можна уявити як поляризоване, так і частково поляризоване світло. Параметри Стокса визначаються в такий спосіб:

I – Усереднена за часом повна потужність оптичного сигналу, сума потужностей поляризованої і неполяризованої компонент.

M – Різниця між потужністю лінійної горизонтальної і лінійної вертикальної поляризаційними компонентами оптичного сигналу.

C – Різниця між потужністю лінійної $+45^\circ$ і лінійної -45° поляризаційними компонентами оптичного сигналу.

S – Різниця між потужністю кругової правосторонньої і кругової лівосторонньої поляризаційними компонентами світлового сигналу.

Параметри Стокса описують світловий сигнал в енергетичному поданні, мають розмірність інтенсивності, а параметри M , C , S можуть бути додатними, від'ємними чи такими, що дорівнюють нулю. Ні один параметр не може бути більшим за перший. Інші лежать в інтервалі від $-I$ до $+I$. Якщо пучок повністю неполяризований, то $M=C=S=0$, якщо повністю поляризований, то $(M^2+C^2+S^2)^{1/2}=I$.

Вектор Джонса зручно використовувати для розв'язання задач, в яких необхідно враховувати фазове співвідношення між пучками. Вектор Джонса (Максвелла) – це стовпець із двох елементів, який описує форму поляризації пучка і амплітуду компонент в деякій точці променя. Якщо світло поширюється вздовж осі z , то вектор має таку загальну форму:

$$\begin{bmatrix} n \\ m \end{bmatrix}, \text{ або } \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \text{ чи } \begin{bmatrix} A_x e^{i(\epsilon_x + 2\pi\nu t)} \\ A_y e^{i(\epsilon_y + 2\pi\nu t)} \end{bmatrix},$$

де E_x , E_y – скалярні компоненти електричного вектора в певний момент t вздовж осей x і y ; A_x , A_y – максимальна величина E_x , E_y , відповідно; ϵ_x і ϵ_y – фаза компонент E_x і E_y в момент $t=0$ в заданій точці.

Крім цих двох методів подання поляризованого світла, існують: метод подання на сфері Пуанкаре, подання поляризованих станів світла комплексними числами, математичний опис поляризованих хвиль, матриці когерентності, але при моделюванні оптичних середовищ ми користуватимемося першими двома, тому інші детальніше не розглядатимуться.

Оптичне середовище (оптичний пристрій) можна подати у вигляді матриці (матриць) Мюллера і матриці (матриць) Джонса. Метод Мюллера є матричним описом світлового пучка і оптичного пристрою, через який проходить світло і дає змогу обчислити результат взаємодії світла з цим пристроєм. Матриця Мюллера (матриця 4×4 , містить 16 елементів) – це вираз, яким можна описати будь-який оптичний пристрій. Конкретні матриці характеризують не тільки сам пристрій, але і його азимут (орієнтацію). Щоб отримати вектор Стокса вихідного пучка, потрібно вхідний світловий пучок перемножити з матрицею оптичного пристрою. Якщо на шляху променя зустрічаються декілька оптичних пристроїв, то їх матриці Мюллера перемножуються.

Переваги методу Джонса над методом Мюллера полягають в тому, що, по-перше, використовуються матриці 2×2 замість 4×4 , по-друге, метод можна використовувати для розв'язання таких задач, в яких необхідно враховувати фазові співвідношення. Але метод Джонса не можна використовувати для моделювання деполаризуючих пристроїв.

Використовуючи метод Джонса, необхідно записати вектор Джонса для вхідного світла, далі записати матриці Джонса для оптичних пристроїв, через які проходить світло, і перемноживши ці вирази, отримати вектор Джонса для вихідного світлового пучка.

Розрахунки за методами Мюллера і Джонса мають багато спільного, хоча між ними є багато відмінностей:

- метод Мюллера використовується для таких систем, в яких відбувається деполяризація пучка, а метод Джонса в цьому разі неприйнятний;
- розрахунок за методом Джонса дає змогу враховувати абсолютну фазу, в розрахунках за методом Мюллера фаза не розглядається;
- елементи матриць Джонса пов'язані з амплітудою, а елементи матриць Мюллера – з інтенсивністю випромінювання.

Тому метод Мюллера можна використовувати для визначення поляризаційно-залежних втрат, а метод Джонса – для визначення різниці фаз між поляризаційними компонентами, диференціальної групової затримки і повороту еліпса поляризації.

Між коефіцієнтами матриць Мюллера і Джонса існує взаємозв'язок, тому для певного оптичного компонента можна здійснювати перехід від однієї матриці до іншої, що дасть змогу нам в сумі розглядати як поляризаційно залежні втрати деполяризацію світлового випромінювання, так і фазові співвідношення між основними станами поляризації.

2. Визначення поляризаційно залежних втрат (PDL) і диференціальної групової затримки

Матриця Мюллера виражає зв'язок вхідного і вихідного векторів Стокса будь-якого оптичного пристрою у формі:

$$\begin{bmatrix} I_1' \\ M_1' \\ C_1' \\ S_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ M_1 \\ C_1 \\ S_1 \end{bmatrix}.$$

Використовуючи стандартні методи матричного множення, можна записати

$$I_1' = m_{00}I_1 + m_{01}M_1 + m_{02}C_1 + m_{03}S_1.$$

Таким чином, матриця Мюллера описує характеристики передачі поляризації, причому для розрахунку PDL необхідні тільки елементи $m_{00} - m_{03}$ першого ряду матриці. Виходячи із значень коефіцієнтів передачі T , можна визначити поляризаційно залежні втрати.

Максимальне і мінімальне значення коефіцієнта передачі становлять

$$T_{\max} = m_{00} + \sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2 + m_{03}^2},$$

$$T_{\min} = m_{00} - \sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2 + m_{03}^2}$$

і

$$PDL = 10 \log \frac{T_{\max}}{T_{\min}}.$$

Розглянемо розповсюдження поляризованого світла в анізотропному середовищі на прикладі оптичного волокна з подвійним променезаломленням. Результуюча поляризація такого ОВ з врахуванням часової компоненти може бути подана у вигляді

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_z = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_0 e^{j\omega t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -BE_0 e^{j\omega t} \\ A^* E_0 e^{j\omega t} \end{bmatrix},$$

де $A = \cos(\varphi/2) + j\cos(\chi)\sin(\varphi/2)$; $A^* = \cos(\varphi/2) - j\cos(\chi)\sin(\varphi/2)$; $B = \sin(\chi)\sin(\varphi/2)$; $(\varphi/2)^2 = (\delta/2)^2 + F^2$; $\text{tg}(\chi) = F/(\delta/2)$; F – обертання Фарадея; δ – фазове запізнення волокна завдовжки z .

Від компонент електричного поля ми можемо перейти до інтенсивності світлової хвилі, пропорційної до квадрата модулів E_x і E_y .

Вираження елементів матриці Мюллера через елементи матриці Джонса має такий вигляд:

$$M_{11}=(G_{11}J_{11} + G_{21}J_{21} + G_{12}J_{12} + G_{22}J_{22})/2,$$

.....

$$M_{44}=(G_{22}J_{11} + G_{11}J_{22} - G_{12}J_{21} - G_{21}J_{12})/2,$$

де J_{ij} – елементи матриці Джонса; G_{ij} – елементи комплексно-спряженої транспонованої матриці Джонса.

Матриця Мюллера для ідеального ізотропного оптичного волокна, що підтримує поляризацію, має такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D^2 - E^2 + G^2 & 2DE & -2EG \\ 0 & 2DE & -D^2 + E^2 + G^2 & 2DG \\ 0 & 2EG & -2DG & 2G^2 - 1 \end{bmatrix}$$

де $D = M \sin \delta/2$, $E = C \sin \delta/2$, $F = S \sin \delta/2$, $G = \cos \delta/2$; M , C , S – відповідно другий, третій і четвертий параметри Стокса.

Ця матриця задає оптичне волокно з довільним кутом орієнтації швидкої осі відносно напрямку основних станів поляризації вхідного випромінювання.

Втрати такого волокна в матриці не задано.

Висновки

Отже, використовуючи метод матриць Джонса, можна отримати залежність вихідного еліпса поляризації від поляризаційних характеристик оптичного середовища, а використовуючи метод Мюллера, можна визначити поляризаційно залежні втрати. Користуючись цими методами, можна прогнозувати перевищення максимально допустимих значень PDL і значення PMD, визначити коефіцієнт помилок для заданої комбінації оптичних компонент.

1. Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку. – К., 1999. 2. Убайдулаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М., 2000. 3. TIA/EIA FOTP-124. Polarization-mode dispersion measurement for single-mode optical fibers by interferometric method. Washington, DC: Telecommunications Industry Assotiation, 1996. 4. У. Шерклифф. Поляризованный свет. – М., 1965.