

Dispersão em Fibras Ópticas

Unicamp – 2009-2010

Prof. Felipe Rudge

Princípios e Definições:

Dispersão é o fenômeno que ocorre na propagação de campos eletromagnéticos (EM) em meios materiais, causando atrasos na propagação desses campos. Diferentes naturezas de interação causam diferentes efeitos de dispersão.

Apresentamos a seguir as definições e conceitos, e na sequência as respectivas equações. Finalizamos esta Nota Técnica avaliando os atrasos de propagação em cada caso.

Dispersão modal – devido ao confinamento da luz num guia, o campo EM distribui-se espacialmente por várias formas de propagação, ditos modos do guia de onda, que são as soluções ortogonais (linearmente independentes) da equação de onda no guia. Os diferentes modos de propagação tem diferentes caminhos óticos, levando a diferentes atrasos do sinal na fibra multimodo, que resultam na dispersão modal. Esta é a maior fonte de atraso nas fibras multimodo. Quando a propagação se dá no modo fundamental apenas, a fibra é dita monomodo.

Dispersão cromática – é o atraso diferencial que as várias componentes espectrais do pulso ou do sinal propagante experimentam, é também conhecida como dispersão da velocidade de grupo (GVD). Esta é a principal fonte de atraso em fibras monomodo. Como depende apenas do comprimento de onda, é dita cromática; entretanto, pode ser dividida em dispersão material e dispersão de guia de onda.

$$D = D_m + D_{go} \quad [\text{ps}/\text{nm.km}]$$

- a) dispersão de guia de onda - no caso particular de estar no modo fundamental, ainda assim as componentes espectrais sofrem uma pequena variação de propagação.
- b) dispersão material – nas fibras monomodo esta é a maior contribuição para atraso dos sinais em regime linear. Ela se deve não só á impurezas presentes no material, que vão também contribuir para atenuação, como a própria reação do material ao campo EM, fazendo com que as componentes espectrais tenham diferentes índices de propagação. Regida pela equação de Sellmeyer no vidro.

Dispersão dos modos de polarização (PMD) – trata-se da variação de velocidade de propagação das componentes ortogonais de polarização (x e y, propagação z). É devida a efeitos de birefringencia da fibra, devido a tensões (embutidas no processo de puxamento da fibra) e imperfeições mecânicas no núcleo e nas interfaces núcleo-casca das fibras. É muito importante em fibras monomodo para altas taxas de transmissão (acima de 2,5 Gb/s) e longas distancias, especialmente quando se tem enlaces com mecanismos de compensação da dispersão GVD. Nas fibras multimodo também ocorre, mas é completamente mascarada pela dispersão modal.

Fórmulas de cálculo:

♣ Dispersão modal:

Parâmetro V , frequência normalizada:

$$V = [\pi d / \lambda] \sqrt{n_n^2 - n_c^2} \approx [\pi d / \lambda] n_c \sqrt{2\Delta};$$

onde, d é o diâmetro do núcleo, n_n é índice do núcleo, n_c é índice da casca, aproximação válida pra Δ pequeno; $\Delta \approx 0,01-0,02$. O parâmetro Δ é muito usado pelos fabricantes de fibra para especificar abertura numérica e dispersão modal.

$$AN = n_c \sqrt{2\Delta}$$

Através técnica de traçado de raios da Ótica Geométrica, pode-se avaliar facilmente a dispersão modal em fibra de índice degrau:

$$\Delta\tau_{\text{mod}} = n_n \cdot \Delta \cdot L / c$$

para $n_n=1,5$ e $\Delta=0,01$, temos $\Delta\tau_{\text{mod}} = 0,015L/c$, que é quase duas ordens de grandeza maior que a dispersão cromática em fibras monomodo.

Parâmetro b (Fig.1), const. propagação: $b = (n_m - n_c) / (n_n - n_c)$

onde, e n_m é o índice modal (índice efetivo percebido pelo modo m). Na fibra de índice degrau $n(r) = n_n = \text{cte.}$; nas fibras de índice gradual, $n(r) = n_n \cdot f(r)$ [quadrática];

=> mais detalhes, ver G.Keiser, pgs. 64-70.

♣ Dispersão monomodo (dispersão cromática)

$$D = D_{\text{mat}} + D_{\text{go}} = -\lambda/c \, d^2n/d\lambda^2$$

✧ Dispersão material:

$$D_{\text{mat}} = 1/c \, dn/d\lambda$$

✧ Dispersão de guia de onda:

$$D_{\text{go}} = - (1/2\pi c) V^2 \, d^2b/dV^2$$

A dispersão monomodo é chamada cromática pois fixando-se os parâmetros geométricos e os índices do guia, varia apenas com comprimento de onda.

♣ Dispersão polarização:

Não há presentemente uma formulação analítica para D_{pmd} , devido ao seu caráter estatístico. O que se tem é uma formula semi-empírica, baseada em medidas experimentais e valores de campo para D_{pmd} , os quais são usados para estimativa do atraso.

Atraso na propagação:

Sinais contínuos podem sofrer atraso em relação a origem, mas trata-se apenas de um deslocamento do início e do final do sinal, de modo que a dispersão não é problema para sinais contínuos. Sinais pulsados, com intervalos maiores que o período do pulso, também não são muito sensíveis aos efeitos da dispersão.

Sinais digitais, por outro lado, são extremamente sensíveis aos efeitos de dispersão. Cada *bit-slot* ($T_b=1/B$) tem uma duração definida, e contém informação 0 ou 1, que não pode ser alterada (se for alterada gera erro). O limite de propagação de um enlace é aquele dado pela taxa de bit B , e pela distancia L , nas quais a recepção é isenta de erros – ou melhor, a

recepção tolera uma pré-determinada taxa de erro. O atraso máximo usualmente aceito é de 15-25% T_b (dependendo da aplicação).

Atraso devido a dispersão cromática:

- a) Fontes com largura espectral larga ($\Delta\lambda \geq 1\text{nm}$), maior que a taxa de modulação (modulação direta)::

$$\Delta\tau = D.L.\Delta\lambda$$

para fibras padrão SMF, $D=16-18 \text{ ps/nm.km @ } 1550$;

para fibras NZD, $D=2-5 \text{ ps/nm.km}$.

para fibra DS @1550 ou fibra SMF @1300, adota-se $D<0,5 \text{ ps/nm.km}$;

- b) Fontes com largura espectral estreita ($\Delta\lambda < 0,1\text{nm}$), (modulação externa)

$$\Delta\tau = (|\beta_2|.L)^{1/2}$$

onde, $\beta_2 = - D.\lambda^2 / 2\pi v_c \text{ [ps}^2/\text{km]}$;

$v_c = c/n$, sendo n o índice efetivo de propagação (grosseiramente, $n \approx 1,5$ nos vidros; em casos mais exatos, deve-se usar n_m como visto acima)

=> em ambos os casos, pode-se usar atrasos permitidos de $\Delta\tau = T_b/4$ ou $T_b/2$, conforme a tolerância do sistema seja 1 ou 3 dB de margem, sendo as distancias máximas permitidas calculadas de acordo.

Maiores detalhes:: ver [G. Agrawal \(2002\)](#).

Atraso devido a PMD

$$\Delta\tau = D_{PMD}.\sqrt{L}$$

para fibras (antigas) sem controle de PMD, $D_{PMD} \approx 2-5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$;

para fibras modernas (<10 anos), com controle rigoroso de PMD na fabricação, $D_{PMD} \leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

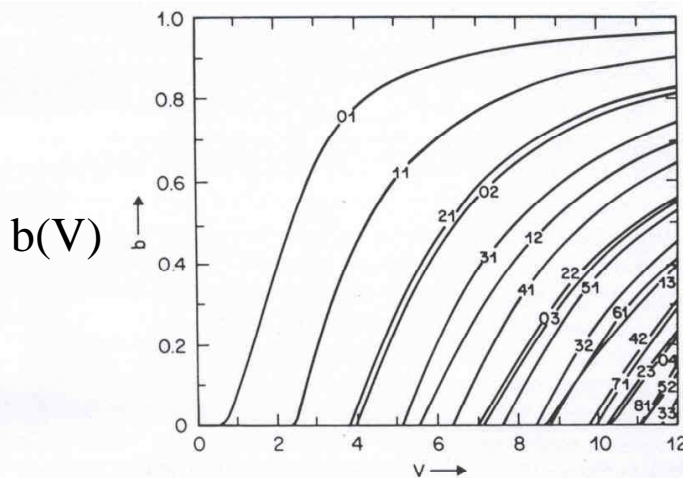


Fig. 3.3 Normalized propagation constants of a number of LP modes as functions of V.

V

Fig.1

Fig.1 – Modos de propagação em função da frequência normalizada V .

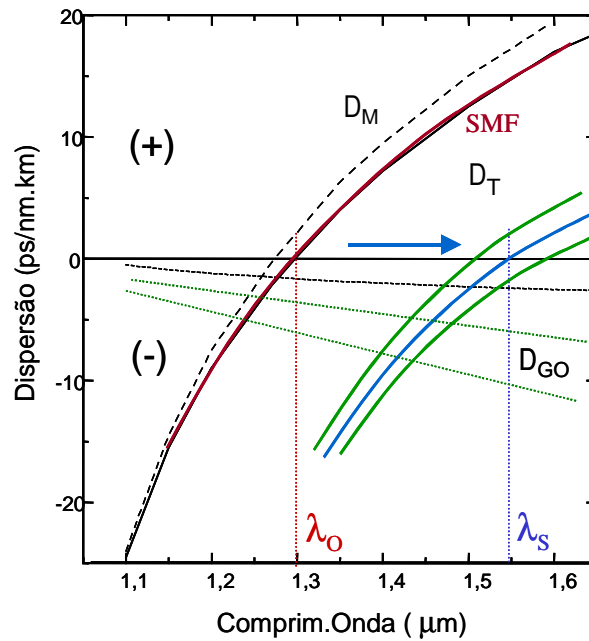


Fig. 2 – Dispersão cromática em fibras.

Referências:

- F.R.Barbosa, “Fundamentos de Comunicações Ópticas – componentes, sistemas e redes”, curso especialização, Ceset-Unicamp-Limeira, Maio 2007.
- G. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd. ed., John Wiley, New York, 2002.
- R. Ramaswami, K.Sivarajan, *Optical Networks – a practical perspective*, 2nd. Ed., Morgan Kaufman, San Fransisco, USA, 2002.
- J.Wilson, J.F.Hawkes, *Optoelectronics, an introduction*, 2nd. Ed., Prentice Hall, new York, 1989.
- G.Keiser, *Optical Fiber Communications*, 2nd. Ed., McGraw-Hill Intl., London, 1991.

~ ~ ~ ~ ~