

1 Teoria da Dispersão dos Modos de Polarização – PMD

Teoria básica da dispersão dos modos de polarização discutida na referência 6, Test and Measurements. Neste capítulo serão abordados os aspectos mais importantes da Teoria da PMD.

1.1 Definição da PMD

A dispersão dos modos de polarização, PMD, é uma propriedade fundamental da fibra óptica monomodo e componentes, no qual a energia do sinal em um dado comprimento de onda é decomposta em dois modos de polarização ortogonais com velocidades de propagação levemente diferentes.

A diferença resultante do tempo de propagação entre os modos de polarização é chamada de atraso diferencial de grupo, comumente simbolizada por $\Delta\sigma$, $\Delta\sigma$ ou ainda somente DGD (Differential Group Delay). A PMD causa sérias degradações na capacidade de transmissão, incluindo o alargamento do pulso. Em relação a isto, seus efeitos se parecem com aqueles da dispersão cromática, porém existe uma importante diferença. A dispersão cromática é um fenômeno relativamente estável e em um sistema de telecomunicações pode ser calculada a partir da soma das suas partes. O local e valor dos compensadores de dispersão cromática podem ser planejados antecipadamente. Em contraste, a PMD em fibras ópticas monomodo, em qualquer comprimento de onda do sinal não é estável, forçando os projetistas de sistemas a fazer previsões estatísticas dos efeitos da PMD e fazendo a compensação passiva impossível. O efeito da PMD em sistema de transmissão digital é mostrado na Figura 1.

Projetistas de sistemas minimizam o impacto da PMD através da especificação de fibras e componentes com baixos valores de PMD e PDL. A PMD de algumas fibras instaladas já há algum tempo pode ser muito maior que as das fibras mais recentemente produzidas, e operadores de sistemas freqüentemente medem estas fibras instaladas quando planejam melhorar seus sistemas para taxas de transmissão mais altas.

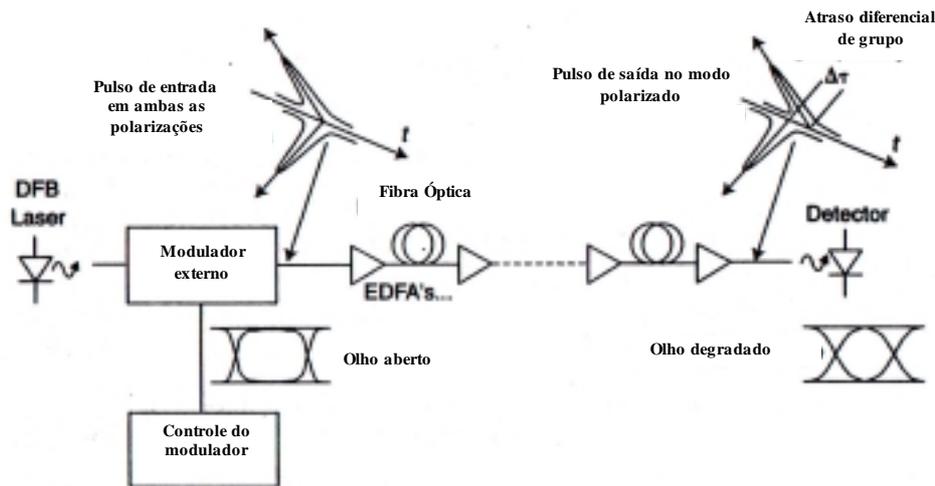


Figura 1 - O efeito da PMD, em um sistema de comunicação digital.

1.2 Causas da PMD

Fibras ópticas e componentes de fibra óptica tipicamente exibem uma pequena diferença no índice de refração para um par particular dos estados de polarização ortogonais, uma propriedade chamada de birrefringência. A diferença dos índices resulta em uma diferença no tempo de propagação - o atraso diferencial de grupo, DGD - para ondas viajando nestes modos de polarização, como no caso da transmissão de pulso da Figura 2.

Em uma fibra monomodo, a birrefringência origina-se a partir da não circularidade ou ovalização do núcleo da fibra em dois sentidos: um guia de onda oval é inerentemente birrefringente, e o campo do esforço mecânico ajustado pelo núcleo oval induz uma birrefringência adicional. O efeito de guia de onda geralmente domina em fibras de baixa PMD. O fenômeno de acoplamento do modo, a ser discutido na Seção 1.3, complica a Figura 2 fazendo o atraso diferencial de grupo uma função do comprimento de onda e das condições ambientais.

A birrefringência de materiais cristalinos como quartz é produzida pela estrutura regular do cristal. A PMD em componentes ópticos pode ser causada pela birrefringência dos seus sub componentes, os quais incluem elementos de quartz, por exemplo, ou segmentos de fibra assimétrica.

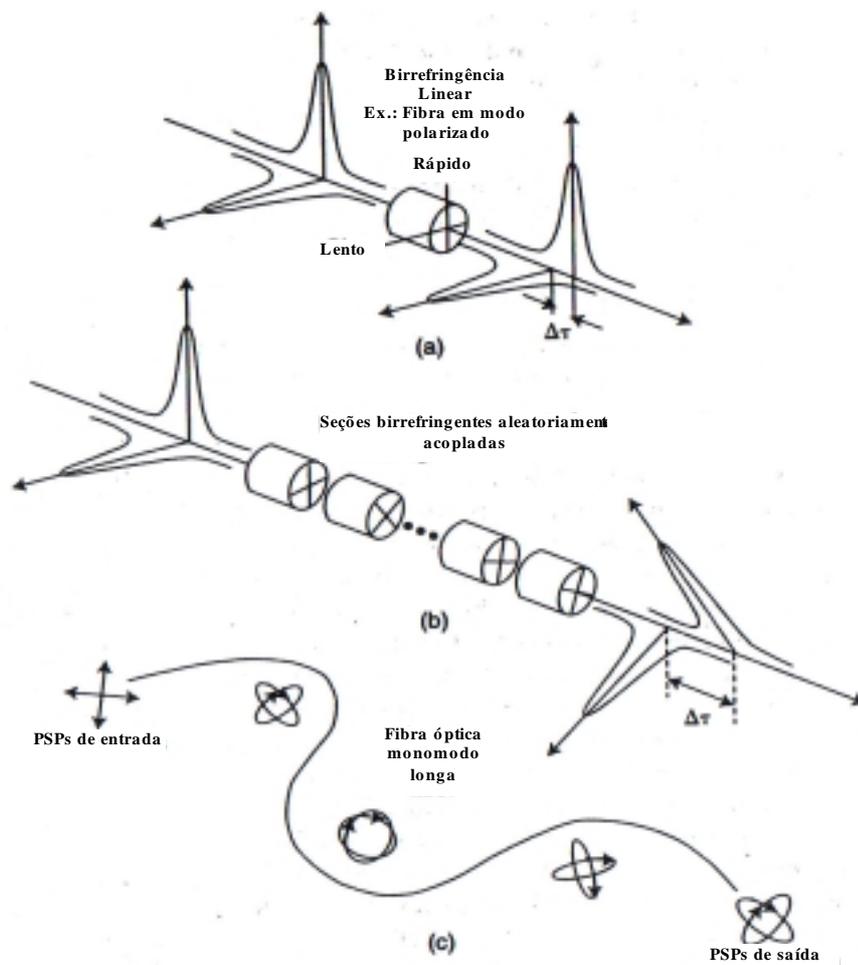


Figura 2 – Modelo conceitual da PMD.

A propagação do sinal ao longo de caminhos paralelos de comprimentos ópticos levemente diferentes, onde a divisão é uma função da polarização, também produz atraso diferencial de grupo. Certos tipos de isoladores ópticos possuem a sua PMD devido a este mecanismo de caminho paralelo. Componentes para sistema de comunicações de última geração são tipicamente especificados com menos de 0,05 ps de atraso diferencial de grupo.

Uma fibra mantenedora de polarização (PMF ou fibras Hi-Bi) é um exemplo extremo de birrefringência induzida por tensão. Elementos de vidro diferentes dopados na casca asseguram que o núcleo seja exposto a um campo de tensão assimétrica que é uniforme ao longo do comprimento da fibra. Quando a luz polarizada é acoplada em uma seção de fibra Hi-Bi, conforme ilustrado na Figura 2.a, o campo elétrico da luz de entrada decompõe-se em dois modos de polarização com velocidades de propagação levemente diferentes. Os

modos de polarização são mantidos ao longo da fibra e a energia não se acopla entre os modos. Como previamente indicado, a diferença no tempo de propagação entre estes dois modos de polarização ortogonais, é chamado de atraso diferencial de grupo, DGD (Differential Group Delay). Os modos de polarização e o atraso diferencial de grupo de um simples dispositivo birrefringente linear são independentes do comprimento de onda. O grau de birrefringência que a fibra Hi-Bi exhibe é freqüentemente expressa em termos de comprimento de batimento, definido como o comprimento de fibra sobre o qual as ondas rápida e lenta mudam a fase relativa em 360° . O comprimento de batimento é tipicamente de poucos milímetros na fibra Hi-Bi.

A birrefringência da fibra é também induzida por curvatura. Através do efeito fotoelástico, a curvatura produz uma assimetria do índice de refração. Isto é a base dos controladores de polarização de fibra. A birrefringência induzida por curvatura não é por si uma causa significativa de PMD, embora pela modificação da extensão do modo de acoplamento ao longo da fibra, pode causar uma diferença na medida de PMD entre fibra bobinada, cabeada e instalada.

1.3

Acoplamento dos Modos e Estados Principais de Polarização

A birrefringência das fibras monomodo varia ao longo do seu comprimento, uma conseqüência da variação no puxamento e processo de cabeação. Um modelo estatístico detalhado da PMD tem sido desenvolvido a partir da base das birrefringências locais acumuladas, e tem sido experimentalmente confirmada. Uma fibra longa é representada na figura 2.b, como uma série de comprimentos aleatórios, segmentos birrefringentes de rotações aleatórias. Cada segmento exhibe modos de polarização lenta e rápida, geralmente com algum sinal de luz propagando em cada um. O campo elétrico que emerge de cada segmento é projetado para os modos de polarização do seguimento a seguir, gerando um processo chamado de acoplamento de modos. Este processo é repetido diversas vezes ao longo do enlace de fibras ou enlaces de comunicação, e é este o mecanismo que causa o atraso diferencial de grupo na maioria dos sistemas de fibras já instaladas mostrando uma dependência do comprimento de onda das condições ambientais.

A propagação mais rápida e mais lenta através do enlace de fibras pode estar relacionada ao estado de polarização de entrada ortogonal, particular para enlaces de fibras e condições ambientais. Esta relação é mais facilmente entendida usando-se a esfera Poincaré. Geralmente, a polarização de saída de um componente óptico ou fibra traçará um caminho irregular sobre a esfera de Poincaré quando o comprimento de onda é mudado. Sobre um pequeno intervalo de comprimento de onda, qualquer fração deste caminho pode ser representado como um arco de círculo. O centro do círculo projetado normal ao plano do círculo e a superfície da esfera, localiza dois estados que são diametricamente opostos e conseqüentemente ortogonais. Estes estados são chamados estados principais de polarização, PSP (Principal States of Polarization). A definição característica dos estados principais de polarização é que sobre um estreito intervalo de comprimento de onda, eles localizam o eixo da esfera sobre o qual o estado de polarização de saída roda quando o comprimento de onda é mudado. A Figura 3, mostra dois exemplos.

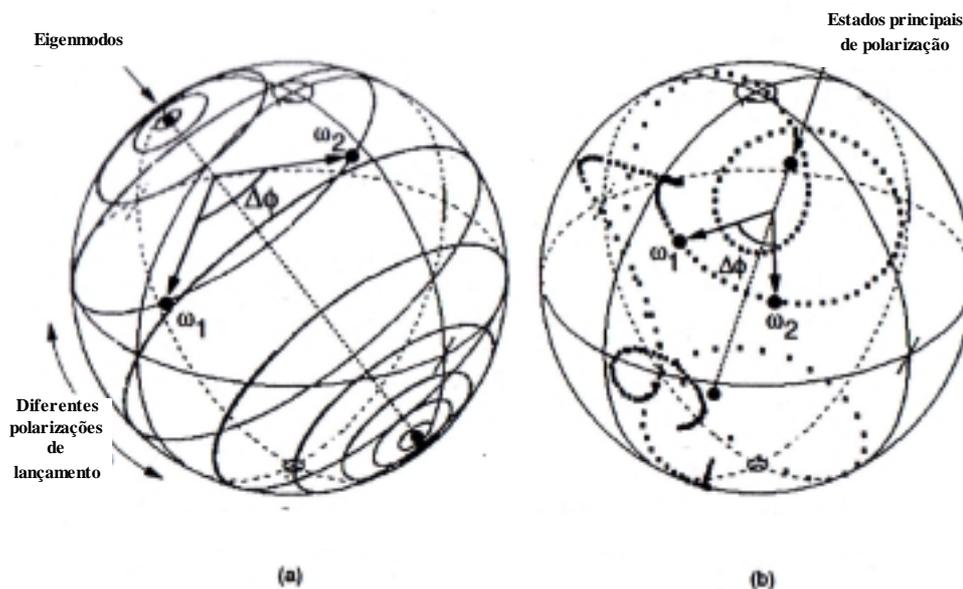


Figura 3 – Variação da polarização de saída com λ , (a) Um dispositivo birrefringente comum, (b) Fibra Monomodo longa; acoplamento de modo aleatório.

Na ausência de acoplamento de modos, o caso típico para componentes ópticos, os estados principais são fixos, enquanto o comprimento de onda varia, os estados de polarização de saída, ω_2 , orbitam regularmente ao redor do eixo

do estado principal da esfera conforme mostrado na Figura 3a. O caso geral para enlaces longos de fibras monomodo em que os estados principais mudam aleatoriamente sobre a esfera como uma função do comprimento de onda, conforme mostrado na Figura 3b, podem ser considerados que permanecem orbitando em torno de um ponto na esfera somente para um estreito intervalo de comprimento de onda.

1.4 Caracterização Estatística da PMD em Fibras com Acoplamento de Modo

Os projetistas de sistemas de telecomunicações submarinos estimam o impacto da distribuição do atraso diferencial de grupo (DGD), parâmetro que determina o alargamento do pulso. Foi demonstrado que no acoplamento de modos aleatórios ou regime em fibras longas, o DGD segue a distribuição de Maxwell. Isto é, a distribuição de valores medidos de DGD sobre uma faixa larga de comprimentos de onda será Maxwelliana. A mesma distribuição será encontrada sobre o tempo a um comprimento de onda fixo, se o caminho óptico for influenciado pelas condições ambientais. Como resultado desta variabilidade, a PMD de um caminho óptico é expressa estatisticamente, como qualquer uma das duas médias ou valor rms do DGD, expressa pela Equação 1.

$$PMD = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \langle \Delta\tau \rangle \quad (1)$$

A equação mostra a relação existente entre a distribuição de Maxwell com o vetor de dispersão. A um dado comprimento de onda, a direção Ω localiza o PSP na superfície da esfera de Poincaré e o seu comprimento nos dará a magnitude do DGD. O vetor de dispersão pode ser decomposto em três vetores ortogonais ao longo dos eixos da esfera. Devido a cada um destes componentes originados, as birrefringências aleatórias podem ser descritas estatisticamente pela distribuição Gaussiana, na forma :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

A magnitude do vetor de dispersão de polarização é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de três variáveis aleatórias normais e independentes, com média zero, descrita por uma distribuição Gaussiana que é Maxwelliana, dada por:

$$f(x) = \frac{32 x^2}{\alpha^3} e^{-\frac{4x^2}{\pi \cdot \alpha^2}} \quad (3)$$

Os formatos das curvas Gaussiana e distribuição de Maxwell são mostrados abaixo na Figura 4. Os valores rms e médio da distribuição Maxwelliana são dados por:

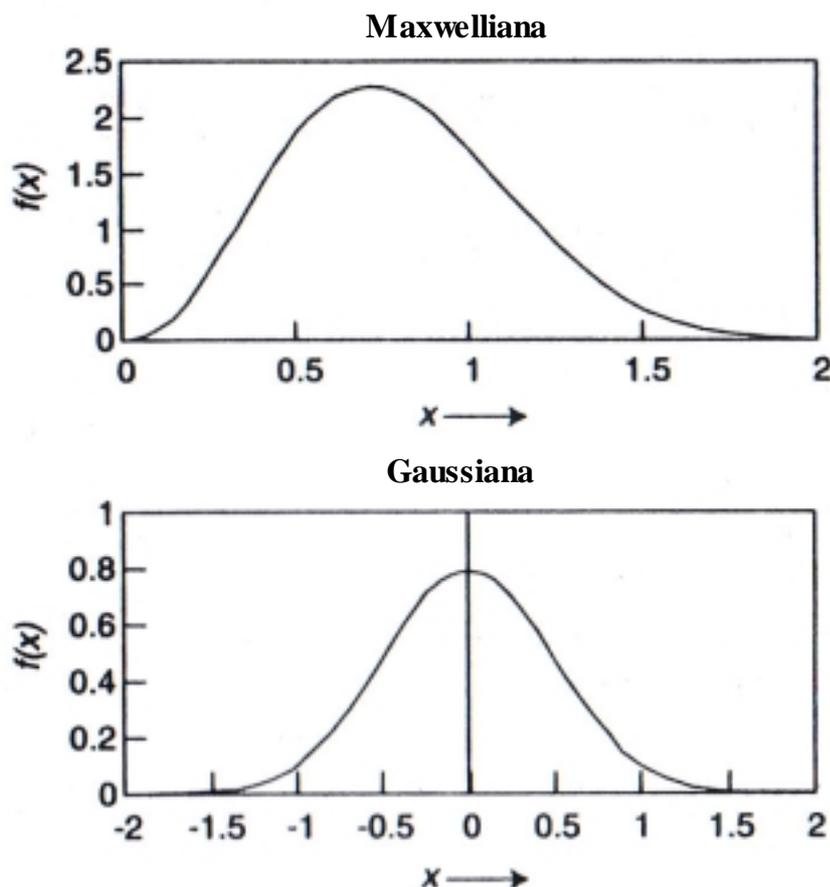


Figura 4 – Distribuições Maxwelliana e Gaussiana.

$$rms = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \alpha \quad (4)$$

Valor médio : α (5)