

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Luis Carlos Blanco Linares

**Estudo da Compensação da Dispersão dos Modos de
Polarização em Sistemas Ópticos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro, junho de 2003.



Luis Carlos Blanco Linares

Estudo da Compensação da Dispersão dos Modos de Polarização em Sistemas Ópticos

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Jean Pierre von der Weid

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Rogério Passy

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Luiz Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Alexandre de Oliveira Dal Forno

Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Miriam Regina Xavier de Barros

Fundação CPqD

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de junho de 2003.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luis Carlos Blanco Linares

Graduou-se em Engenharia Elétrica, em 1997, na Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, e em 1998 fixou-se no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro onde iniciou seus estudos na área de Telecomunicações. Em 1999 conclui seu mestrado e iniciou seu doutorado, desenvolvendo pesquisas na área de metrologia óptica ligada a efeitos de distorção de sinais devido à dispersão dos modos de polarização em fibras ópticas.

Ficha Catalográfica

Linares, Luis Carlos Blanco

Estudo da Compensação da Dispersão dos Modos de Polarização em Sistemas Ópticos / Luis Carlos Blanco Linares; orientador: Jean Pierre von der Weid. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[13], 119 f.: 69 il. ; 29,7 cm

1. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Telecomunicações. 3. Comunicações Ópticas. 4. Metrologia Óptica. 5. Distorção de Sinais. 6. Dispersão dos Modos de Polarização. 7. PMD. 8. Compensação de PMD.

CDD: 621.3

A minha família:

Com quem sempre dividi os momentos mais importantes da minha vida!

Agradecimentos

Ao professor Jean Pierre von der Weid, pela orientação durante a execução deste trabalho e pelos ensinamentos pessoais e profissionais transmitidos ao longo deste período.

A minha esposa Olga Emília, pelo apoio, carinho e compreensão, mas principalmente pela coragem de me acompanhar nesta conquista.

Aos meus pais Luiz Carlos e Maria Antonieta, apoio e carinho, mas principalmente por sempre me incentivar a seguir em busca de meus ideais.

A meu irmão Carlos Eduardo, pela amizade e incentivo.

Ao Prof. Nelson Schuch, pela amizade e incentivo em buscar o aprimoramento de meus conhecimentos.

Aos “tios” Roberto e Suzana, pelo apoio, amizade e carinho.

Aos Profs. Luiz Carlos Guedes Valente, Rogério Passy e Alexandre Dal Forno pelas discussões e auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos professores do CETUC, pelos ensinamentos profissionais.

Aos colegas Claiton, Giancarlo, Alexandre, Márcia, Djeisson, Guilherme e aos demais estagiários do laboratório pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários do CETUC, pelo apoio técnico, em especial ao Marcelo Roberto, Braz, Alzira e Ana.

A Dra. Adriana Triques pela fabricação de alguns dispositivos ópticos.

A Ericsson e ao CNPq pelo suporte financeiro.

A todos aqueles que de alguma maneira tenham contribuído para a realização deste trabalho.

Resumo

Linares, Luis Carlos Blanco Linares; Jean Pierre von der Weid. **Estudo da Compensação da Dispersão dos Modos de Polarização em Sistemas Ópticos**. Rio de Janeiro, 2003. 119p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é desenvolvido um modelamento matemático para os elementos que compõem um sistema de compensação de PMD de 1ª ordem, visando obter alternativas de solução para a metodologia de controle do sistema de compensação.

Um algoritmo de controle utilizando uma lógica simplificada, diferente das encontradas em outros sistemas de compensação, é desenvolvido.

Os resultados das simulações matemáticas, das diferentes partes do sistema de compensação e do algoritmo de controle desenvolvido, são comparados com resultados experimentais, obtendo-se uma excelente concordância.

Um protótipo de um compensador de PMD de 1ª ordem, utilizando diferentes topologias de compensação, é implementado e os resultados experimentais apresentados.

Os resultados experimentais obtidos demonstram que a performance do protótipo desenvolvido é melhor que a obtida com outros sistemas de compensação desenvolvidos por outros grupos de pesquisa [22, 60].

Palavras-chave

Comunicações Ópticas, Metrologia Óptica, Distorção de Sinais, Dispersão dos Modos de Polarização, PMD, Compensação de PMD.

Abstract

Linares, Luis Carlos Blanco Linares; Jean Pierre von der Weid (Advisor). **Study of Polarization Mode Dispersion Compensation in Optical Systems.** Rio de Janeiro, 2003. 1119p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work a mathematical model for the elements of the first order compensation system is developed to obtain alternative solutions of control methodology of the compensator.

A control algorithm, using a simplified logic, different from the ones found in other compensation systems, is developed.

The mathematical simulations results of the implemented model for different parts of the compensation system and of the control algorithm are compared to the experimental results showing good agreement.

A first order PMD compensation prototype is implemented, using different compensation topologies. The experimental results are presented, proving a better performance when compared to the experimental results obtained by other research groups [22, 60].

Keywords

Optical Communications, Optical Metrology, Signal Distortion, Polarization Mode Dispersion, PMD, PMD Compensation.

Sumário

1	Introdução	18
2	Efeitos de Polarização em Fibras Ópticas	21
2.1	Teoria da Polarização da Luz	21
2.1.1	Parâmetros de Stokes e Representação de Poincaré	22
2.1.2	Propagação da Luz nos Dispositivos Ópticos	24
2.1.3	Matriz de Jones de Alguns Dispositivos	26
2.2	Estudo da Dispersão dos Modos de Polarização em Fibras Ópticas	27
2.2.1	Origens e Definições da PMD	28
2.2.2	Teoria da PMD	32
2.3	Visão Geral dos Compensadores de PMD	36
2.4	Princípio Básico de Funcionamento dos Compensadores de PMD	37
2.4.1	Os Sinais de realimentação	39
2.5	Esquemas de Compensação	40
2.5.1	Pré-Compensação pelo PSP	40
2.5.2	Pós Compensação de 1ª Ordem	41
2.6	Aprimoramentos em Compensadores de PMD	42
2.7	Performance dos Compensadores	43
3	Emuladores de PMD e Linhas de Atraso	44
3.1	Teoria dos Emuladores	44
3.2	Modelamento Matemático de um Emulador	46
3.3	Simulação Matemática de Emuladores de PMD e Comparação com Resultados Experimentais	49
3.4	Simulação Matemática e Resultados Experimentais de uma Linha de Atraso Ativa para Compensação de PMD	53
3.5	Linha de Atraso Polarizada Baseada em Redes de Bragg Sem Chirp	56
3.5.1	Montagem Experimental	59
4	O Canal Óptico	63
4.1	A Função de Transferência dos Emuladores de PMD	64
4.2	Medidas do DGD em Função do Tempo e do Comprimento de Onda	67

4.3. Medidas de PMD em Cabos Instalados	69
4.4. Medidas Polarimétricas de PMD e Flutuações no Atraso Diferencial de Grupo em Redes de Bragg com Chirp	71
5 O Seguidor de Polarização	78
5.1. Modelamento Matemático de um Seguidor de Polarização	78
5.2. Simulação Matemática de um Seguidor de Polarização	81
5.3. O Seguidor de Polarização	88
6 O Compensador de PMD	95
6.1. O Compensador de PMD Desenvolvido	96
6.1.1. Montagem experimental	96
6.1.2. Resultados Experimentais	99
7 Conclusão	109
8 Referências Bibliográficas	112

Lista de figuras

Figura 1 - Esfera de Poincaré e os Principais Estados de Polarização.	24
Figura 2 – Evolução da polarização da luz em uma fibra HiBi com lançamento a 45° com os eixos principais.	29
Figura 3 – Propagação de um pulso ao longo de uma fibra HiBi.	30
Figura 4 – Medida típica da variação do DGD em função do comprimento de onda.	31
Figura 5 – Representação esquemática da evolução temporal de um dos estados principais de polarização (PSP).	32
Figura 6 – Distribuição estatística do DGD normalizada em relação a PMD.	33
Figura 7 – Distribuição de probabilidade da PMD de 2ª ordem.	35
Figura 8 – Princípio de funcionamento de um compensador utilizando o método do PSP.	36
Figura 9 – Princípio de operação de um compensador de PMD de 1ª ordem.	37
Figura 10 – Esquema básico de um compensador de PMD.	38
Figura 11 – Ilustração das maneiras de se realizar a compensação de PMD.	38
Figura 12 – Pré-compensação da PMD de 1ª ordem utilizando o método de transmissão no PSP.	41
Figura 13 – Pós-compensação da PMD de 1ª ordem com linha de atraso fixa.	42
Figura 14 – Pós-compensação da PMD de 1ª ordem com linha de atraso variável.	42
Figura 15 – Emulador construído pela concatenação de fibras HiBi.	45
Figura 16 – Diagrama de blocos para a simulação da medida de PMD, utilizando a técnica de varredura em comprimento de onda.	48
Figura 17 – Simulação matemática de uma fibra real com 10 ps através de um emulador com 100 seções.	49
Figura 18 – Histograma da distribuição dos DGDs para um emulador de 3 ps com 20 seções.	50
Figura 19 – Espectro da medida do DGD em função do comprimento de onda para a simulação do emulador de 3 ps.	50
Figura 20 – Simulação de uma medida de varredura em comprimento de onda para um emulador de 3 ps com 20 seções.	51
Figura 21 – Medida de varredura em comprimento de onda em um emulador de 3 ps de PMD.	51

- Figura 22 – Simulação do DGD em função do ângulo de acoplamento para uma fibra HiBi de 90 ps pressionada no meio à 45° com seus eixos de birrefringência. 53
- Figura 23 – Medida do atraso em função da tensão aplicada no atuador piezoelétrico HiBi de 90 ps pressionada no meio à 45° com seus eixos de birrefringência. 54
- Figura 24 – Excursão de um dos PSPs em função do ângulo de acoplamento para uma HiBi pressionada no meio. 54
- Figura 25 – Simulação do DGD em função do comprimento de onda para um emulador de 4 seções onde dois dos ângulos entre as fibras são mantidos fixos e um variado de 0 à 90° em passos de 10°. 55
- Figura 26 – Diagrama esquemático da montagem de linha de atraso polarizada baseada em redes de Bragg sem *chirp*. 56
- Figura 27 – Espectro típico das redes da linha de atraso polarizada. 58
- Figura 28 – Caracterização de uma rede aplicando-se tensão ao longo do eixo x: (a) tensão em função do comprimento de onda para as polarizações linear x e y; (b) Espectro para ambas polarizações com 40 kgf/cm de stress aplicado. 58
- Figura 29 – Montagem experimental para a medida temporal da linha de atraso. 59
- Figura 30 – Montagem Experimental para a medida da linha de atraso utilizando o método do desvio de fase. 60
- Figura 31 – Pulso refletido pela linha de atraso para diferentes polarizações de entrada. 61
- Figura 32 – Atraso medido em função da pressão aplicada na rede 1 para uma polarização de entrada linear 45°. 61
- Figura 33 – Ilustração de uma linha de atraso discreta, variável em passos de 10 ps. 62
- Figura 34 – Medida (linha) e cálculo (pontilhado) da função de transferência de uma fibra HiBi com 565 ps de DGD para uma polarização de entrada linear 45°. 65
- Figura 35 – Medida (linha) e cálculo (pontilhado) da função de transferência de dois emuladores de PMD (38 ps e 100 ps) para lançamento da polarização de entrada no PSP lento ou rápido (melhor caso) e para polarização de entrada à 45° (luz acoplada em ambos PSPs - pior caso). 66
- Figura 36 – Diagrama da montagem da medida do DGD em função do tempo

para 4 comprimentos de onda utilizando o método do desvio de fase.	67
Figura 37 – Medida do DGD do emulador de 38 ps em função do tempo para 4 comprimentos de onda.	68
Figura 38 – Distribuição estatística do DGD medido em 4 comprimentos de onda.	69
Figura 39 – Estatística das Medidas de PMD ponto a ponto em cabos de fibra óptica instalados.	70
Figura 40 – Estatística das medidas de PMD das fibras agrupadas em seções de ~ 400 km.	71
Figura 41 – Montagens experimentais: (a) medida polarimétrica, (b) medida pelo método do desvio de fase.	74
Figura 42 – Refletividade e atraso diferencial de grupo para cada PSP, para uma rede de Bragg não apodizada, 0.7 nm de largura espectral, centrada em 1554.2 nm com uma dispersão média de 1244 ps/nm.	74
Figura 43 – Evolução do estado principal de polarização (PSP) na região de reflexão da rede quando os dos PSPs são igualmente excitados.	75
Figura 44 – (a) Curvas de atraso de grupo para fase máxima e mínima, (b) DGD da rede para medidas de atraso de fase, (c) DGD calculado pela excursão do SOP na esfera de Poincaré.	76
Figura 45 – Medida da birrefringência de 2 pedaços de fibra na qual a rede foi gravada. (a) Peça de fibra com 85.2 cm de comprimento contendo a rede. (b) Peça menor (38 cm) obtido cortando um pedaço da fibra onde a rede foi gravada. Em (a) a região espectral na qual a rede reflete foi excluída da medida, correspondendo ao menor gap na evolução do SOP.	77
Figura 46 – Elementos empregados na simulação matemática de um seguidor de polarização.	79
Figura 47 – Estados de polarização de entrada usados para testar o número de passos para o sistema alinhar a polarização de entrada com o polarizador.	84
Figura 48 – Estatística do número de passos de simulação até o sistema ser considerado alinhado.	85
Figura 49 – Fragmento da trajetória do PSP de entrada usado na simulação para testar o seguidor de polarização.	85
Figura 50 – Trajetória completa do PSP de entrada usada na simulação de teste do seguidor de polarização.	86
Figura 51 – Simulação para avaliação do desempenho do algoritmo quando os a	

polarização de entrada é mudada e o algoritmo do seguidor de polarização mantém a intensidade próxima do máximo e o ângulos da lâminas do controlador de polarização rodam menos de 360° .	87
Figura 52 – Distribuição estatística correspondente a variação de intensidade para os mais de 30000 passos de simulação realizados de acordo com a figura 51.	87
Figura 53 – Diagrama esquemático da montagem de caracterização dos parâmetros de realimentação do sistema de controle da polarização.	89
Figura 54 – Espectros dos tons de modulação inseridos em cada lâmina do controlador de polarização à medida que se alinha a polarização de entrada com o polarizador na saída.	90
Figura 55 – Comportamento do controlador de polarização desde a condição de desalinhamento até atingir o alinhamento no alvo desejado.	91
Figura 56 – Montagem experimental do seguidor de polarização.	92
Figura 57 – Medida da intensidade de sinal de saída do seguidor de polarização e da tensão nas lâminas do controlador de polarização durante uma hora de medida.	93
Figura 58 – Medida da intensidade de sinal no detector óptico durante 60 horas de medida para avaliação da performance do seguidor de polarização.	93
Figura 59 – Montagem experimental para medida utilizando o esquema de pós-compensação de 1ª ordem.	98
Figura 60 – Montagem experimental para medida utilizando o esquema de pré-compensação de 1ª ordem pelo método do PSP.	99
Figura 61 – Comparação entre distribuições das medidas de BER para os métodos de compensação de PMD.	100
Figura 62 – Comparação entre as distribuições de Penalidade de Potência para os métodos de compensação de PMD.	102
Figura 63 – Evolução temporal da linha de atraso do compensador. A figura menor representa a distribuição estatística dos DGDs.	102
Figura 64 – Excursão do PSP de entrada: (a) 45 segundos e (b) 1 hora de medida.	103
Figura 65 – Comparação entre medidas de compensação com variação rápida e lenta do DGD.	104
Figura 66 – Estatística da linha de atraso variável durante uma hora de medida.	105
Figura 67 – Desvio padrão do log (BER) em função de diferentes valores de	

atraso para linha de atraso fixa do compensador. 106

Figura 68 – BER média e desvio padrão usando o método do PSP em enlaces de diferentes distâncias. 107

Figura 69 – Probabilidade Cumulativa para os diferentes esquemas de compensação: (N-Comp) sistema não compensado, (LAF) e (LAV) pós-compensação de 1ª ordem linha de atraso fixa e variável, respectivamente, e (PSP) pré-compensação pelo método de transmissão no PSP. 108

Lista de Símbolos

\vec{D} – Vetor Indução Elétrica;

n – Índice de Refração;

ϕ – Fase do sinal óptico na entrada da fibra, determina o estado de polarização;

χ – Ângulo que define o estado de polarização elíptica;

P_0 – Parâmetro de Stokes que representa a intensidade total da onda;

P_1 – Parâmetro de Stokes que representa a diferença entre as intensidades das componentes lineares da onda em O_x e O_y ;

P_2 – Parâmetro de Stokes que representa a diferença entre as intensidades das componentes lineares ao longo dos eixos a 45° com os eixos O_x e O_y ;

P_3 – Parâmetro de Stokes que representa a diferença entre as intensidades das componentes circularmente polarizadas E e D .

S_0, S_1, S_2 e S_3 – Parâmetro de Stokes normalizados;

S_{in} e S_{out} – Vetor polarização na entrada e na saída do sistema;

\hat{D}_e – Estado de polarização emergente;

\hat{D}_i – Estado de polarização incidente;

L_b – Comprimento de batimento da fibra;

$\vec{\Omega}$ – Vetor tridimensional de dispersão de polarização;

$\vec{\Omega}(\omega)$ – Vetor dispersão em função da frequência óptica;

$\delta\tau(\omega)$ – DGD em função da frequência óptica;

B – Birrefringência modal média;

h – Comprimento médio de acoplamento;

l – Comprimento da fibra;

$\delta\tau$ – Valor do DGD;

$\Delta\tau$ – Valor da PMD;

f – Frequência de modulação;

m – Índice de modulação;

ω_0 – Frequência óptica;

c – Velocidade da luz

$\omega(t)$ – Freqüência óptica instantânea do laser;

I_{out} – Intensidade óptica no fotodetector;

Lista de Abreviaturas

- AM – Modulação em amplitude (*Amplitude Modulation*);
- DCF – Fibra de Compensação de Dispersão (*Dispersion Compensation Fiber*);
- DGD – Atraso diferencial de grupo (*Differential Group Delay*);
- Fibra SMF – Fibra monomodo standard (*Single Mode Fiber*);
- Fibra HiBi – Fibra óptica de alta birrefringência;
- FM – Frequência modulada;
- Laser DFB – Laser semiconductor com realimentação distribuída (*Distributed Feedback Laser*);
- LED – Diodo emissor de luz (*Light Emitting Diode*);
- OSA – Analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyzer*);
- PDF – Função densidade de probabilidade (*Probability Density Function*);
- PDL – Perda dependente da polarização (*Polarization Dependent Loss*);
- PMD – Dispersão dos modos de polarização (*Polarization Mode Dispersion*);
- PSP – Estado principal de polarização (*Principal State of Polarization*);
- RF – Rádio Frequência (*Radio Frequency*);
- SOP – Estado de Polarização (*State of Polarization*);
- Sinal CW – Sinal de uma onda contínua (*Continuous Wave*);
- Sinal DC – Sinal contínuo, não varia no tempo (*Direct Current*);