

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Janaina Ferreira

Simulações do Comportamento Temporal da Dispersão dos Modos de Polarização

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

Abril de 2007



Janaina Ferreira

Simulações do Comportamento Temporal da Dispersão dos Modos de Polarização

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.

Prof. Jean Pierre von der Weid
Orientador
CETUC / PUC - Rio

Prof. Luiz Carlos Blanco Linares
Departamento de Engenharia Mecânica / PUC-Rio

Prof. Rogério Passy
MLS Wireless

Prof. Alexandre de Oliveira dal Forno
UERJ

Prof. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luiz Jimenez
CETUC / PUC - Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Abril de 2007

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

Janaina Ferreira

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Goiás (Goiás, Brasil). Especializou-se em Telecomunicações, Eletromagnetismo Aplicado a Propagação de Sinais, Medidas e Modelagem de Canais Rádio Móveis. Concluiu o Mestrado em 2003, pela PUC-Rio. Durante o doutorado especializou-se nos efeitos dispersivos dos modos de polarização em fibras ópticas.

Ficha Catalográfica

Ferreira, Janaina

Simulações do Comportamento Temporal da Dispersão dos Modos de Polarização/ Janaina Ferreira; orientador: Prof. Jean Pierre von der Weid. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

[13], 93 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Telecomunicações. 3. Dispersão por Modos de Polarização. 4. Multiplexação por Divisão de Comprimento de Ondas I. von der Weid, Jean Pierre. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, Josmar e Neuza

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Jean Pierre von der Weid, minha eterna gratidão, pela confiança depositada em mim.

Ao professor Luiz Costa, pela paciência e atenção no início da minha caminhada no CETUC.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao pessoal do CETUC, presente no difícil dia-a-dia, Amália, Marçal, Giovanna, Guilherme, Ana Sérgio, Maria Lucia, Mônica, Djeisson, Tiago, Claiton, Bessa, Andy, Tonhão, Rogério, Felipe Forte e Douglas.

A Giancarlo, um grande amigo que colaborou bastante com meu trabalho, inclusive cedendo resultados de medidas experimentais realizadas por ele.

A três pessoas muitíssimo importantes na minha escolha por esse caminho, Luiz Macêdo, Lucia Macêdo e Luiz Henrique Macêdo.

Aos amigos queridos que me deram suporte emocional ao longo desses anos, Lara Mendonça, Leandro Chiaretto, Mércia Silva, Marcia Silva, Suzana Costa, Warley Rocha, Eulânia Paçô, Leonardo Paçô, Renata Brás, Tiago Vinhoza, Dida Figueiredo, Aline Ribeiro, Moacir Cavalcante, Guilherme Xavier, Vivan Carvalho, Robson Vieira e Tatiana Coelho.

A minha família, sem os quais nada disso teria sentido, em especial a Dirce, Anibal, Neuza, Josmar, Leonardo, Carlos Alexandre, Maria Helena, Zaima, Tatiana, Flávio, Laura, Guiolar, Iranilma, Bruno e Marília.

Ao Marcelo, por todo o seu amor.

Resumo

Ferreira, Janaina; von der Weid, Jean Pierre. **Simulações do Comportamento Temporal da Dispersão dos Modos de Polarização**. Rio de Janeiro, 2007. 93p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho propõe um estudo da PMD (*Polarization Mode Dispersion*) para um sistema com múltiplos comprimentos de onda. Para tanto, apresenta uma ferramenta computacional que permite simulações do comportamento do DGD (*Dispersion Group Delay*) em função da variação contínua temporal. Estes dados são validados através da comparação com simulações convencionais, em função do comprimento de onda. Também são apresentados métodos de controle de polarização e compensação de PMD utilizando o simulador temporal desenvolvido. Foram realizadas medidas experimentais analisando o sinal de potência de RF de saída e a polarização de saída do sinal para diferentes canais WDM (*Wavelength Division Multiplex*).

Palavras-chave

PMD, DGD, múltiplos canais, compensação de PMD, WDM

Abstract

Ferreira, Janaina; von der Weid, Jean Pierre. **Time Domain PMD Simulations in Optical Fibers and Emulators**. Rio de Janeiro, 2007. 93p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work proposes a PMD (*Polarization Mode Dispersion*) study in WDM communications systems. A simulation tool for the calculation of the statistics and correlations of PMD-related variables in time domain is presented here. Calculations are performed in time domain, allowing the simulation of the temporal evolution of differential group delay (DGD), principal states of polarization (PSP) among others. Results are validated with predictions from spectral calculations. A polarization control and a PMD mitigation scheme are also presented.

Key-words

PMD, DGD, multiple channel, PMD mitigation, WDM

Conteúdo

1 Introdução	15
1.1. Revisão Bibliográfica	15
1.2. Motivação do Trabalho	18
1.3. Arquitetura do Sistema	19
2 Teoria	20
2.1. Teoria de PMD	20
2.2. Tecnologia de Multiplexação por Comprimento de Onda - WDM	24
3 Simulador Temporal	26
3.1. Modelagem do Simulador Temporal	26
3.2. Aplicação do <i>Software</i>	30
4 Resultados	43
4.1. Validação do Simulador Temporal	43
4.2. <i>Hinge Model</i>	54
4.3. Controle de Polarização	60
4.4. Compensação de PMD	63
4.5. Comparação entre Medidas Experimentais e Dados Simulados	70
5 Conclusão	83
Referências Bibliográficas	86

Lista de Figuras

1.1 – Esquema de compensação de PMD através de lançamento no PSP.	16
1.2 – Esquema de compensação de PMD com utilização de linha de atraso.	17
2.1 – Propagação de um pulso óptico ao longo de uma fibra HiBi.	20
2.2 – Vetor PMD representado na Esfera de Poincaré. Gráfico retirado da referência [30].	22
2.3 – Densidade de Probabilidade Maxwelliana do DGD para uma fibra com PMD igual a 1 ps. Gráfico retirado da referência [45].	23
2.4 – Densidade de Probabilidade Maxwelliana do DGD para uma fibra com PMD igual a 1 ps. Gráfico retirado da referência [45].	24
2.5 – Princípio de funcionamento de um sistema WDM.	25
3.1 – Representação gráfica da atuação de um compensador de PMD num pulso óptico com dispersão.	32
3.2 – Esquema para utilização da técnica <i>Mid-span</i> .	33
3.3 - Uniformidade na distribuição da polarização na esfera de Poincaré, para um misturador de polarização contendo três lâminas.	36
3.4 – Evolução do DGD ao longo do tempo e a correspondente evolução do sinal de RF.	38
3.5 – RF apresentado na Figura 3.4, sofrendo atuação de misturador de polarização.	39
3.6 – Palavra-código contendo os dados a serem transmitidos e os <i>bits</i> de redundância, utilizados para correção de erros.	40
3.7 – Esquema utilizado para simulação de um sistema de compensação de PMD com a utilização de FEC, misturador de polarização e um elemento de controle de polarização.	42
4.1 – Simulação da evolução espectral do DGD para uma fibra com PMD igual a 8 ps.	44
4.2 – Simulação da evolução temporal do DGD para uma fibra com PMD igual a 8 ps.	44
4.3 – Estatística dos dados apresentados na Figura 4.2. A linha sólida mostra o ajuste Maxwelliano.	45
4.4 – Função de correlação espectral do DGD. Dados gerados a partir de simulações com variação espectral.	46
4.5 – Função de correlação temporal do DGD. Dados gerados a partir de simulações com variação temporal.	47
4.6 – Dependência espectral de dados gerados a partir de variação temporal.	48
4.7 – Função de Autocorrelação Espectral a partir de simulação espectral (linha) e simulação temporal (símbolo).	49
4.8 – Função de Autocorrelação Espectral a partir de simulação espectral (linhas) e simulação temporal (símbolos).	50

4.9 – Função de Autocorrelação do DGD.	51
4.10 – Função densidade probabilidade do DGD para simulações temporais (símbolos) para fibras resultantes da concatenação de 10 e 100 seções de fibra, com diferentes ângulos de acoplamento. A linha representa a distribuição Mawxelliana.	52
4.11 – Função autocorrelação do DGD (símbolos brancos) e PSP (símbolos pretos). Símbolos iguais correspondem a um mesmo valor de PMD.	53
4.12 – Variação do DGD médio para diferentes canais WDM para um sistema com piezos e fibras no lugar dos <i>hinges</i> .	54
4.13 – Variação do DGD médio para diferentes canais WDM para uma transmissão em um sistema contendo 2 <i>hinges</i> e 3 fibras de 1 ps de PMD cada.	55
4.14 – Evolução temporal do DGD médio e seu desvio padrão para diferentes números de <i>hinges</i> .	56
4.15 – Manipulação dos dados simulados.	57
4.16 – Medidas de PMD em função do tempo. Gráficos retirados das seguintes referências: (a) referência [35] e (b) referência [59].	58
4.17 – Distribuição de Probabilidade de eventos de falha para diferentes níveis de DGD. O detalhe mostra a evolução temporal do pior evento para cada um dos valores de DGD médio.	59
4.18 – Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pelo canal vizinho, espaçado de 0,8 nm.	61
4.19 – Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pela média dos canais adjacentes. Cada um dos canais adjacentes é espaçados de 0,8 nm do canal central.	62
4.20 – Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pela média dos canais adjacentes. Cada um dos canais adjacentes é espaçados de 0,4 nm do canal central.	62
4.21 – Exemplificação do cálculo de tempo que o sinal de RF fica abaixo de um determinado limiar.	64
4.22 – Esquema para utilização da técnica <i>Mid-span</i> com misturador de polarização na entrada da fibra.	65
4.23 – Tempo de permanência abaixo de um determinado limia da potência de RF do sinal de saída do sistema.	66
4.24 – Função de probabilidade cumulativa para um sistema WDM de 20 canais	67
4.25 – Relação sinal-ruído relativo, para um sistema com e sem controle, em função da PMD. A comparação é realizada com dados apresentados na referência [36].	69
4.26 – Esquema de montagem experimental para medidas de correlação de RF.	70
4.27 – Sinal de RF medido para dois canais vizinhos: 1545,35 nm e 1547,72 nm.	71
4.28 – Estatística do sinal RF medido e simulado para um sinal modulado em 7 GHz num sistema com um emulador de PMD de 32 ps.	72

4.29 – Esquema de montagem experimental para medidas de correlação de SOP.	74
4.30 – Evolução na esfera de Poincaré, do SOP do λ_1 durante 20 minutos, com (esquerda) e sem (direita) controle de polarização do canal vizinho, λ_2 .	75
4.31 – DOP medido (símbolos em preto) e simulado (símbolos em branco) em função da separação do comprimento de onda.	75
4.32 – Medidas da evolução do SOP para um canal controlado, separado de 2,4 nm do canal mantido fixo (canal de referência) e num sistema com PMD igual a 3,5 ps.	76
4.33 – Esquema de montagem experimental para um sistema de controle de polarização com três canais, onde o canal central (λ_2) é mantido estável a partir da atuação do controle nos canais adjacentes (λ_1 e λ_3).	78
4.34 – SOP_{out} mostrado na esfera de Poincaré para um sistema sem compensação (acima) e com compensação atuando.	79
4.35 – Esquema de montagem experimental para medidas de compensação de PMD.	80
4.36 – Resultados simulados e medidos de probabilidade de falha para um sistema de compensação de PMD por transmissão no PSP.	82

Lista de Tabelas

4.1 – DGD para 20 canais para <i>hinge model</i> .	56
4.2 – Comparação entre medidas e simulações, para a penalidade de potência inserida pela variação da polarização do sinal de saída S_{out} .	78

Lista de Abreviaturas

ASE - Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*)

BER - Taxa de Erro de Bits (*Bit Error Ratio*)

DGD - Atraso Diferencial no Tempo de Propagação dos Modos de Polarização (*Dispersion Group Delay*)

DL - Linha de atraso (*Delay Line*)

DOP - Grau de Polarização (*Degree of Polarization*)

EDFA - Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*)

FEC - Códigos Corretores de Erros (*Forward Error Control*)

HiBi - Alta Birrefringência (*High Birefringence*)

OSNR - Relação Sinal-Ruído Óptica (*Optical Signal-To-Noise Ratio*)

PDL - Perda Dependente da Polarização (*Polarization Dependent Loss*)

PMD - Dispersão dos Modos de Polarização (*Polarization Mode Dispersion*)

PSP - Estados Principais de Polarização (*Principal State of Polarization*)

RF - Rádio Frequência (*Radio Frequency*)

SOP - Estado de Polarização (*State of Polarization*)

WDM - Multiplexação por Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplex*)

Mas há a vida
que é para ser
intensamente vivida,
há o amor.
Que tem que ser vivido até a última gota.
Sem nenhum medo.
Não mata.

Clarice Lispector