



Karoline de Souza

**Impacto dos Efeitos da PMD no Controle
de Polarização da Luz em Fibras Ópticas
Monomodo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Jean Pierre von der Weid

Co-orientador: Prof. Giancarlo Vilela de Faria

Rio de Janeiro

Abril de 2011



Karoline de Souza

**Impacto dos Efeitos da PMD no Controle
de Polarização da Luz em Fibras Ópticas
Monomodo**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Jean Pierre von der Weid
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Giancarlo Vilela de Faria
Co-Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Profa. Janaina Ferreira
IFG

Prof. Guilherme Penelo Temporão
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Rogério Pssay
MLS Wireless

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

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2011

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

Karoline de Souza

Formada em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP) em 2006. Kursou especialização em Sistemas de Telecomunicações na Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2008.

Ficha Catalográfica

Souza, Karoline de

Impacto dos efeitos da PMD no controle de polarização da luz em fibras ópticas monomodo / Karoline de Souza; orientador: Jean Pierre von der Weid; co-orientador: Giancarlo Vilela de Faria. – 2011.

86 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Polarização. 3. Dispersão dos modos de polarização (PMD). 4. Controle de polarização. 5. Multiplexação em polarização (PolMux). I. Weid, Jean Pierre von der. II. Faria, Giancarlo Vilela. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, Francisca e Sergio.

Agradecimentos

A Deus, que com sua bondade e misericórdia tem me guiado, me protegido e me concedido grandes conquistas.

Ao Prof. Jean Pierre von der Weid, meu orientador, pela atenção, apoio, incentivo e ensinamentos que foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.

Ao Giancarlo, meu co-orientador, pela paciência, conselhos e contribuições.

A todos os colegas do Laboratório de Optoeletrônica por estarem sempre dispostos a colaborar e pelo companheirismo: Amália, Andy, Djeisson, Fernando, Guix, Tito, Rogério (Chu), Tarcísio, Temporão e, em especial, Thiago.

Aos meus amados e queridos pais, Sergio e Francisca, por todo o amor, apoio, incentivo e exemplo de vida.

À Érica, Fábio Bicego, Iakya, Janaina e Márcio Henrique por todo carinho e apoio.

A todos os familiares por terem contribuído de alguma forma para mais esta importante etapa da minha vida.

Aos professores e funcionários do CETUC pelo apoio e ensinamentos concedidos.

À PUC-Rio e ao CNPq, que financiaram este trabalho.

E a todos que acreditaram e acreditam em mim. Muito Obrigada!

Resumo

Souza, Karoline; von der Weid, Jean Pierre (Orientador); Faria, Giancarlo Vilela de (Co-orientador). **Impacto dos efeitos da PMD no controle de polarização da luz em fibras ópticas monomodo**. Rio de Janeiro, 2011. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta o estudo e a realização de experimentos a fim de investigar os efeitos da PMD (*Polarization Mode Dispersion*) no controle de polarização implementado em um enlace de fibra óptica monomodo. Esse estudo permitirá a otimização de controladores de polarização em sistemas de transmissão que venham a utilizar multiplexação em polarização (PolMux) combinado a técnicas de UDWDM (*Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*), possibilitando o aumento da taxa de transmissão em um canal. Para tanto, foram realizadas medidas experimentais que demonstrem o desvio angular da polarização devido à decorrelação entre canais, através da análise da evolução da polarização do sinal óptico em função da PMD, do comprimento de onda e do espaçamento espectral; foram analisadas duas propostas para se utilizar no controle de polarização; estatísticas referentes à atenuação dos canais utilizados foram realizadas e também o cálculo da correlação com intuito de analisar como esses canais se relacionam.

Palavras-chave

Polarização; dispersão dos modos de polarização (PMD); controle de polarização; multiplexação em polarização (PolMux).

Abstract

Souza, Karoline; von der Weid, Jean Pierre (Advisor); Faria, Giancarlo Vilela de (Co-advisor). **Impact of the effects of PMD in the light polarization control in single-mode fibers**. Rio de Janeiro, 2011. 86p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the study and conducting experiments to investigate the PMD (Polarization Mode Dispersion) effects in polarization control implemented in a single-mode fiber optic link. This study will allow the optimization of polarization controllers in transmission systems that will use polarization multiplexing (PolMux) combined with techniques like UDWDM (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing), and thereby to increase the transmission rate in a channel. Therefore, we performed experimental measurements showing the angular displacement of the polarization due to decorrelation between channels by analyzing the evolution of the polarization of the optical signal as a function of PMD, wavelength and the spectral spacing, analyzed using two proposals for the control of polarization, statistics of the fading channels used and also performed the calculate the correlation with the aim to analyze how these channels are related.

Keywords

Polarization; polarization mode dispersion (PMD); polarization control; polarization multiplexing (PolMux).

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Revisão Bibliográfica	17
1.2. Motivação	19
2. Aspectos teóricos	20
2.1. Fibras Ópticas	20
2.2. Polarização	21
2.2.1. Classificação da polarização	22
2.3. Representação dos Estados de Polarização	24
2.3.1. Vetor de Jones	24
2.3.2. Vetor de Stokes e Representação de Poincaré	27
2.4. Birrefringência e PMD	31
2.5. Métodos para a Medição da PMD	36
2.5.1. Método Polarimétrico	37
2.5.2. Método de Varredura do Comprimento de Onda	38
2.5.3. Método Interferométrico	40
2.6. Transmissão de sinal utilizando Multiplexação de Polarização	43
2.6.1. Detecção direta e Detecção coerente	46
3. Montagem Experimental	47
4. Resultados Experimentais	54
5. Conclusão	81
6. Referências bibliográficas	83

Lista de Figuras

Figura 1: Onda plana se propagando na direção positiva do eixo z.	21
Figura 2: Representação da Polarização Linear Vertical.	23
Figura 3: Representação da Polarização Circular	23
Figura 4: Representação da Polarização Elíptica.	24
Figura 5: Esfera de Poincaré e representação dos principais estados de polarização.	30
Figura 6: Um estado de polarização na superfície da esfera de Poincaré, representado pelo ponto P, e suas coordenadas esféricas 2χ e δ .	31
Figura 7: Mecanismos de birrefringência: (a) intrínsecos e (b) extrínsecos.	32
Figura 8: Representação do atraso entre os modos de polarização ortogonais ao longo de uma fibra HiBi.	34
Figura 9: Representação esquemática da evolução temporal de um dos estados principais de polarização (PSP).	35
Figura 10: Distribuição estatística do DGD para um valor de PMD determinado.	36
Figura 11: Montagem experimental utilizada para medir a PMD através do método Polarimétrico.	37
Figura 12: Montagem experimental utilizada para medir a PMD através do método de varredura do comprimento de onda.	38
Figura 13: Medida da PMD, através do método de varredura do comprimento de onda, de uma fibra HiBi.	39
Figura 14: Medidas de PMD através do método interferométrico; (c) medida utilizando uma fibra HiBi; (d) medida utilizando uma fibra normal.	41
Figura 15: Pico de autocorrelação e picos laterais.	42
Figura 16: Transmissão de canais utilizando PolMux.	43
Figura 17: Diagrama de um sistema PolMux com processamento digital de sinais (PDS). Fonte [29]	44

Figura 18: Montagem experimental padrão utilizada.	51
Figura 19: Ilustração dos canais que podem ser utilizados no controle de polarização de um sistema.	53
Figura 20: Esquema utilizado como base para os cálculos apresentando os canais e os espaçamentos entre eles.	56
Figura 21: Função de Autocorrelação Espectral	58
Figura 22: Função de Autocorrelação	60
Figura 23: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,09$ ps e $\Delta\omega = 5$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	62
Figura 24: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,09$ ps e $\Delta\omega = 15$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	63
Figura 25: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,09$ ps e $\Delta\omega = 30$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	64
Figura 26: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,09$ ps e $\Delta\omega = 50$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	65
Figura 27: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,24$ ps e $\Delta\omega = 5$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	67
Figura 28: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,24$ ps e $\Delta\omega = 15$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	68
Figura 29: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,24$ ps e $\Delta\omega = 30$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	71
Figura 30: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 0,24$ ps e $\Delta\omega = 50$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	73
Figura 31: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para $PMD = 3,5$ ps e $\Delta\omega = 5$ GHz. (a) Atenuação do SOP_2 em relação ao SOP_1 . (b) Atenuação do SOP_2 em relação ao $SOP_{Médio}$.	75

Figura 32: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para PMD = 3,5 ps e $\Delta\omega = 15$ GHz. (a) Atenuação do SOP₂ em relação ao SOP₁.
(b) Atenuação do SOP₂ em relação ao SOP_{Médio}. 76

Figura 33: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para PMD = 3,5 ps e $\Delta\omega = 30$ GHz. (a) Atenuação do SOP₂ em relação ao SOP₁.
(b) Atenuação do SOP₂ em relação ao SOP_{Médio}. 78

Figura 34: Atenuação [dB] x Números de Amostras, para PMD = 3,5 ps e $\Delta\omega = 50$ GHz. (a) Atenuação do SOP₂ em relação ao SOP₁. (b) Atenuação do SOP₂ em relação ao SOP_{Médio}. 79

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Modificações realizadas na montagem experimental	52
Tabela 2 – Espaçamentos aplicados através do MatLab	55
Tabela 3 – Espaçamento espectral x Autocorrelação	59

Lista de Acrônimos

ASE - *Amplified Spontaneous Emission*
ASK - *Amplitude Shift Keying*
BER - *Bit Error Rate*
CD - *Chromatic Dispersion*
DGD - *Differential Group Delay*
DOP – *Degree of Polarization*
DQPSK – *Differential Quadrature Phase Shift Keying*
GVD - *Differential Group Delay*
HiBi – *High Birefringence*
LED - *Light-Emitting Diode*
OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexed*
OSA – *Optical Spectrum Analyzer*
OSNR - *Optical Signal to Noise Ratio*
PBS/C - *Polarization Beam Splitter/Combiner*
PDL – *Polarization Dependent Loss*
PMD - *Polarization Mode Dispersion*
POLMUX - *Polarization Multiplexing*
PSK - *Phase Shift Keying*
PSP - *Principal State of Polarization*
QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*
SNR - *Signal to Noise Ratio*
SOP - *State of Polarization*
SSB - *Single Sideband Modulation*
TEM – *Transverse Electromagnetic*
UDWDM - *Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*
VSB - *Vestigial Sideband Modulation*
WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

*“Procure ser uma pessoa de valor ao invés de tentar ser alguém de
sucesso”*

Albert Einsten