

Tatiana Medeiros Guasque de Mesquita

**Estatística do Ganho Dependente da
Polarização em Sistemas Ópticos com
Amplificação RAMAN**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Elétrica

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Agosto de 2003



Tatiana Medeiros Guasque de Mesquita

**Estatística do Ganho Dependente da
Polarização em Sistemas Ópticos com
Amplificação RAMAN**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro
Agosto de 2003



Tatiana Medeiros Guasque de Mesquita

**Estatística do Ganho Dependente
da Polarização em Sistemas Ópticos
com Amplificação RAMAN**

Dissertação 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

Prof. Alexandre de Oliveira Dal Forno

UERJ

Prof. Luis Carlos Blanco Linares

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Rogério Passy

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de agosto de 2003

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

Tatiana Medeiro Guasque de Mesquita

Graduou-se em Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção (dupla habilitação) na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em julho de 2001. Em agosto do mesmo ano iniciou no Centro de Estudos de Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu mestrado na área de Eletromagnetismo Aplicado.

Ficha Catalográfica

Mesquita, Tatiana Medeiros Guasque de

Flutuação da PDG devido a PMD em sistemas óticos com amplificação Raman / Tatiana Medeiros Guasque de Mesquita ; orientador: Jean Pierre von der Weid. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

62 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Telecomunicação. 3. Amplificação Raman. 4. Polarização (Eletricidade). 5. Comunicações digitais. 6. Fibras óticas. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro de Estudos em Telecomunicações. IV. Título.

CDD: 621.3

Dedico este trabalho a meus pais, Maria Teresa Medeiros Guasque de Mesquita e Feliciano Adolfo Mesquita que me encheram de amor e incentivo ao longo de toda a minha vida. A meus irmãos Joyce Medeiros Guasque de Mesquita e Carlos André Medeiros Guasque de Mesquita e aos meus amigos que estiveram sempre me apoiando.

Agradecimentos

A meu orientador, Professor Jean Pierre von der Weid, pela competência, paciência, confiança e dedicação.

Ao Alexandre Bessa dos Santos pelo apoio, sem o qual seria impossível implementar os experimentos.

Ao Giancarlo Vilela de Faria, Felipe dos Santos, ao Luis Carlos Linares e a Marcia Betânia da Costa e Silva, pelo suporte, paciência e atenção.

Aos meus queridos amigos, em especial ao JJ, a Ana Elisa e ao Rodrigo pelo apoio, carinho e amizade.

Ao professor Marbey Mosso do CETUC, pelo enorme incentivo para realizar o curso de mestrado sem o qual não estaria aqui.

À minha tia Maria Lúcia por ter sempre dado "asas à minha imaginação", incentivo à minha carreira acadêmica e suporte na minha vida emocional.

Aos demais familiares e amigos do laboratório de opto-eletrônica.

Resumo

Tatiana Medeiros Guasque de Mesquita. **Estatística do ganho dependente da polarização (PDG-Polarization Dependent Gain) em sistemas ópticos com amplificação Raman.** Rio de Janeiro, 2003. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho visa estabelecer na prática a estatística do ganho dependente da polarização (PDG-Polarization Dependent Gain) em sistemas ópticos com amplificação Raman. A amplificação Raman depende fortemente da polarização relativa entre os fótons de bombeio e de sinal, que tem que ser paralelas para máximo ganho [1]. Portanto, a birrefringência é um importante limitador de desempenho de sistemas de longa distância amplificados por esta técnica visto que modifica os estados de polarização de forma diferente para cada comprimento de onda. A birrefringência varia aleatoriamente de acordo com as flutuações do ambiente onde está a fibra óptica, dando origem à dispersão dos modos de polarização, efeito este conhecido pela sigla PMD.

Alguns experimentos recentes mostraram que o amplificador Raman não só depende do estado de polarização do sinal de entrada, mas também que o valor da dependência do ganho com a polarização (*PDG-Polarization Dependent Gain*) flutua devido a natureza aleatória da PMD [4,5].

É importante conhecer a estatística da PDG, sua relação com a PMD e como a PDG pode ser reduzida a níveis aceitáveis. Nesse trabalho será medida experimentalmente a distribuição estatística da PDG em fibras de dispersão deslocada e os resultados comparados com as previsões teóricas dadas por [2].

Palavras-chave

Sistemas de transmissão ópticos, amplificadores ópticos, espalhamento Raman stimulado, amplificação Raman, birrefringência, dispersão dos modos de polarização (PMD-Polarization Mode Dispersion) e ganho dependente da polarização (PDG - Polarization Dependent Gain).

Abstract

Medeiros Guasque de Mesquita, Tatiana. **Análise de Desempenho de Modulação Adaptativa com utilização em sistemas WCDMA/HSDPA.** Rio de Janeiro, 2003. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Raman amplifiers are very attractive because they provide a large and relatively flat gain over a wide bandwidth while maintaining a small noise figure, and they can be made using regular silica fiber. However, the Raman Gain coefficient is polarization sensitive and can be up to ten times higher when the signal and pump polarization states are parallel rather than perpendicular [1].

Usually fibers present some degree of residual asymmetry – because the fiber core is slightly out-of-round, or because of mechanical stress on the deployed fiber – and this causes polarization mode dispersion. The light traveling along one polarization axis moves slower or faster than the light polarized along the other axis. This effect distorts the signal and causes polarization fluctuations along the fiber. As the Raman gain is higher when the signal and pump polarization states are parallel these fluctuations of the relative polarization between signal and pump vary the instantaneous value of the Raman gain. So the Polarization Dependence Gain (PMG) is directly related to the PMD.

Several experimental studies have shown not only that the gain of raman amplifiers depends on the state of polarization of the input signal but also that this polarization-dependent gain (PDG) fluctuates over a wide range because of the random nature of polarization mode dispersion (PMD) [4,5].

It is important to know the statistics of PDG, its relationship to the PMD, and how the PDG can be reduced to acceptable low levels. In this letter we will demonstrate experimentally the statistical distribution of the PDG given by [2].

This In this work the polarization dependent gain (PDG) fluctuations due to PMD in Raman amplified optical transmissions is experimentally demonstrated.

Keywords

Optical communications, polarization dependent gain (PDG), stimulated raman scattering (SRS), wavelength-division multiplexing (WDM), polarization mode dispersion (PMD), Optical Fiber Amplifiers and dispersion shifted (DS) fiber.

Sumário

1. Introdução	11
2. Introdução Teórica	15
2.1. Espalhamento Raman	15
2.2. Amplificação Raman	21
2.3. Espectro do Ganho Raman	23
2.4. Limiar Raman	25
2.5. Amplificador Raman	28
3. Polarização da Luz	34
3.1. Dispersão dos Modos de Polarização (PMD – <i>Polarization Mode Dispersion</i>)	40
3.2. Estatística do ganho dependente da polarização (PDG – <i>Polarization Dependent Gain</i>) em sistemas ópticos com amplificadores Raman	42
4. Montagem Experimental	45
4.1. Medida do Espectro do Ganho Raman	45
4.2. Flutuações da PDG devido a PMD em sistemas ópticos com amplificação Raman	48
5. Resultados	52
6. Conclusões	58
7. Referências Bibliográficas	59
8. Glossário	61

Lista de figuras

Figura 1: Comparação de sistemas com e sem amplificadores Raman	13
Figura 2. Tipos de Espalhamento	15
Figura 3. Propagação do fônon	16
Figura 4. Espalhamento Raman	17
Figura 5: Diagrama de níveis de energia para o processo Stokes	19
Figura 6: Diagrama de níveis de energia para o processo anti-Stokes	19
Figura 7: Momento de dipolo variando em sintonia com a onda de luz	20
Figura 8: Esquema de um amplificador Raman [25]	22
Figura 9: Raman para fibra de sílica fundida com um bombeio localizado em $\lambda_p=1\mu\text{m}$ [25].	24
Figura 10: Variação do ganho G_A com a potência P_0 [25] .	30
Figura 11: Propagação de uma onda eletromagnética polarizada linearmente	34
Figura 12: Polarização Linear com ângulo qualquer em relação ao eixo y.	35
Figura 13: de polarização elíptica e definições dos ângulos de referência.	38
Figura 14: Esfera de Poincaré e os principais estados de polarização.	39
Figura 15: Decomposição de um pulso em duas componentes ortogonais.	40
Figura 16: Seção transversal de uma fibra óptica.	41
Figura 17: Seção transversal de três fibras óticas: com seção transversal perfeitamente redonda, oval e submetida a tensão mecânica, respectivamente.	41
Figura 18: Alargamento do pulso gerado pela dispersão.	41
Figura 19: Montagem experimental de um esquema co-propagante de um amplificador Raman usando um laser de bombeio de 200mW em 1480nm.	46
Figura 20: Espectro do Laser de Bombeio.	46
Figura 21: Ganho Raman com um laser de bombeio de 200 mW em 1480 nm co-propagante	47
Figura 22: Ganho Raman com um laser de bombeio de 200 mW em 1480 nm contra- propagante.	48
Figura 23: Diagrama de blocos do experimento usado para medir PDG.	51
Figura 24: Medidas da PDG e do ganho ao longo do tempo.	52

Figura 25: Histograma medido da PDG. Fibra de 15,5 km e $D_p = 0.127 \text{ ps/km}^{1/2}$.	53
Figura 26: Histograma medido da PDG. Fibra de 15 Km $D_p=0,1358 \text{ ps/km}^{1/2}$	54
Figura 27: Histograma medido da PDG. Fibra de 15.4 Km; $D_p=0.044 \text{ ps/km}^{1/2}$	54
Figura 28: Histograma medido da PDG. Fibra de 8,489 Km; $D_p=0,0625 \text{ ps/km}^{1/2}$.	55
Figura 29: Histograma medido da PDG. Fibra 27: 4,273 Km; $D_p=0,123 \text{ ps/km}^{1/2}$.	55
Figura 30: PDG média como função do coeficiente de PMD, normalizado em função do ganho Raman médio.	56
Figura 31: Desvio padrão da distribuição da PDG em função do coeficiente de PMD.	57

Lista de tabelas

Tabela 1: Tabela de medidas de PMD de uma fibra DS de 8, 489 km pelo método interferométrico	49
Tabela 2: Tabela de medidas de PMD de uma fibra DS de 15, 034 km pelo método interferométrico	49
Tabela 3: Tabela de medidas de PMD de uma fibra DS de 8, 406 km pelo método interferométrico	50