

Análise da Depleção Causada por SRS em WDM (2 e 3x2,5Gb/s) Usando Fibras DS

Shirley P. Neves, Renato T.R. de Almeida, Márcio Freitas, Moisés R. N. Ribeiro,
Luiz C. Calmon

Dept. Eng.Elétrica – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Vitória – ES

Resumo. O presente estudo analisa os efeitos de desgarramento (walk-off) de pulsos na interferência cruzada entre canais, causada pelo espalhamento estimulado de Raman (SRS), envolvendo dois ou três canais em sistemas WDM com fibras de dispersão deslocada (DS). Nesta investigação levamos em consideração a atenuação da fibra, a dispersão por velocidade de grupo e o efeito não linear de auto modulação de fase (SPM). Verificamos que o efeito da depleção é sensivelmente reduzido para o caso do posicionamento dos canais descentralizados em relação ao comprimento de onda de dispersão nula, e que a estimativa CW comumente utilizada na literatura para calcular a degradação torna-se bastante imprecisa e muito otimista quando o número de canais, suas potências, ou seus espaçamentos crescem.

Palavras chave. Espalhamento Estimulado de Raman (SRS), Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM), Interferência Cruzada.

I. INTRODUÇÃO

O desempenho de sistemas de comunicações óticas multiplexados em comprimento de onda (WDM) pode ser degradado por não linearidades das fibras óticas[1]. Através de esquemas especiais podemos reduzir substancialmente os efeitos não lineares tais como a modulação cruzada de fase, a mistura de quatro ondas, e o espalhamento estimulado de Brillouin. Com isto, o espalhamento estimulado de Raman permanece como limitador último do desempenho dos sistemas WDM.

A degradação do desempenho de sistemas WDM causada pelo espalhamento estimulado de Raman tem sido estudado em vários artigos [2]-[3]. Entretanto, os efeitos de desgarramento entre os diversos canais tem sido ignorados na maior parte das análises. Quando estes efeitos foram considerados [4]-[5], as soluções propostas incluíram somente a dispersão (GVD) da fibra, e desprezaram efeitos importantes como a auto modulação de fase e o ganho não linear obtido pelos canais de maior comprimento de onda no processo Raman. É de nosso entendimento que estes efeitos sob condições de potências óticas mesmo não muito elevadas em fibras DS (dispersão deslocada) não devem ser desprezados.

O presente estudo obtém através de análise numérica rigorosa, a depleção sofrida pelo canal de menor comprimento de onda, denominado de bombeio, no processo de espalhamento estimulado de Raman em sistemas óticos pulsados, para o caso de dois e três canais WDM em fibras de dispersão deslocada.

Nesta investigação levamos em consideração o desgarramento (walk-off) entre os canais devido a diferentes velocidades de grupo, a atenuação da fibra, a dispersão por velocidade de grupo e o efeito não linear de auto modulação de fase. Resultados foram obtidos para separação entre canais de 1nm (separação próxima à recomendada pelo ITU) e para canais ocupando toda a banda de 30nm (banda aproximada do amplificador ótico dopado com érbio), posicionando os canais imediatamente à direita, ou à esquerda, ou ainda centralizando-os em relação ao comprimento de onda de dispersão zero.

A seção II trata do modelo matemático utilizado. A seção III apresenta os resultados obtidos e faz comparações com os advindos de análise analítica simplificada. A seção IV discute os resultados e apresenta as conclusões.

II. MODELO MATEMÁTICO

A teoria CW (onda contínua) do espalhamento estimulado de Raman (SRS) necessita de modificação quando pulsos óticos são utilizados como bombeamento. A interação mútua entre os pulsos é então governada por um conjunto de equações de amplitude acopladas que incluem os efeitos do ganho de Raman, da depleção do bombeamento, da atenuação da fibra, da auto modulação de fase (SPM), e da dispersão por velocidade de grupo (GVD).

Se utilizarmos os subscritos 1, 2 e 3 para representar os canais relacionados às ondas de menor a maior comprimento de onda em ordem crescente respectivamente, e colocarmos a referência de tempo se movendo com o pulso de menor comprimento de onda, as equações acopladas das amplitudes se tornam[6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_{2_1} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 &= \\ j\gamma_1 |A_1|^2 A_1 - \frac{g_{p12}}{2} |A_2|^2 A_1 - \frac{g_{p13}}{2} |A_3|^2 A_1 &= \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} - d_{12} \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{j}{2} \beta_{2_2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 &= \\ j\gamma_2 |A_2|^2 A_2 + \frac{g_{s21}}{2} |A_1|^2 A_2 - \frac{g_{s23}}{2} |A_3|^2 A_2 &= \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} - d_{13} \frac{\partial A_3}{\partial T} + \frac{j}{2} \beta_{2_3} \frac{\partial^2 A_3}{\partial T^2} + \frac{\alpha_3}{2} A_3 &= \\ j\gamma_3 |A_3|^2 A_3 + \frac{g_{s31}}{2} |A_1|^2 A_3 + \frac{g_{s32}}{2} |A_2|^2 A_3 & \end{aligned} \quad (1)$$

onde $T = t - z/v_{g1}$, $d_{ij} = v_{g1}^{-1} - v_{g_j}^{-1}$ e $g_{sij} = g_{Rij} / A_{eff}$,
 $g_{pij} = (\omega_i / \omega_j) g_{Sij}$

Nestas equações, $A(z,T)$ são as amplitudes complexas dos pulsos nos canais WDM, z é a coordenada longitudinal, e T é o tempo medido em um sistema de coordenadas que se move com a velocidade de grupo dos pulsos do canal 1 (canal de menor comprimento de onda). β_{2j} é parâmetros de GVD de primeira ordem, com $j=1,2,3$. O parâmetro de não linearidade é $\gamma_j = 2\pi N_2 / \lambda_j A_{eff}$, com $N_2 = 2,45 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, e α é o coeficiente de atenuação. Os coeficientes de ganho $g_{s,p(i,j)}$ são diferentes quando os canais agem como canal de bombeamento ou como canal de Stokes. O parâmetro de desgarramento d leva em conta o descasamento entre as velocidades de grupo dos pulsos dos canais envolvidos. Os coeficientes de ganho g_s e g_p se relacionam com o fator de ganho de Raman g_R (m/Watt) que depende de λ_i e λ_j [2]. Para uma fibra de dispersão deslocada operando em torno de 1550nm os seguintes parâmetros são assumidos: área efetiva ($A_{eff}=50\mu\text{m}^2$), e atenuação ($\alpha=0,2\text{dB/km}$).

As amplitudes de entrada para os pulsos, sob a condição que os canais estejam carregados igualmente, podem ser escritas como:

$$A_j(0,T) = \sqrt{P_0} \sum a_k^j B(T - kT_b) \quad (2)$$

Onde P_0 é a potência de pico transmitida por canal, T_b é a duração do bit (NRZ 2,5Gb/s), a_k^j é a seqüência de bits para os canais $j=1,2,3$, e $B(T)$ é o formato do pulso. No presente caso, a seqüência de bits (sem chirp) injetada foi de 128 bits pseudo-randômicos com formato de pulso retangular com tempo de subida e descida igual a $T_b/4$.

A solução de (1) pode ser obtida pelo método “split-step” [6] para um conjunto de parâmetros de interesse. Em relação ao SRS em CW, a nova propriedade mais importante é o descasamento de velocidade de grupo que limita o processo de SRS para a duração enquanto os pulsos de bombeamento e de Stokes se sobreponham.

A solução analítica obtida por [2], para a depleção do canal de menor comprimento de onda (canal 1 na nossa nomenclatura) assume sinais CW para os canais, e despreza o ganho não linear obtido pelos canais de Stokes. Esta solução pode ser generalizada para o caso de N canais, resultando em:

$$\text{Depleção [dB]} = \sum_{j=2}^N \frac{10 \lambda_j g_{R1j} L_{eff} P_j}{\ln(10) \lambda_1 A_{eff}} \quad (3)$$

onde $L_{eff} = [\ell - \exp(-\alpha L)] / \alpha$

III. RESULTADOS

As seqüências de pulsos foram lançadas na fibra DS com diversas potências transmitida de pico de 10, 25, 50, 75, 100, 150 e 200mWatts sobre um enlace de 100km. Foram estudadas as separações ($\Delta\lambda$) entre os comprimentos de onda dos canais, de 1nm (próximo da recomendação do ITU – 0,8nm), e separações que utilizam a banda total de 30nm (banda útil do amplificador dopado com érbio). Investigamos ainda estas separações nas seguintes situações para $n = 2,3$ canais: i) canais centralizados em relação ao comprimento de onda de dispersão zero ($\lambda_0=1550\text{nm}$), ii) canais à direita de λ_0 ($\lambda_i=1560\text{nm}$) e finalmente iii) os canais à esquerda de λ_0 ($\lambda_j=1540\text{nm}$).

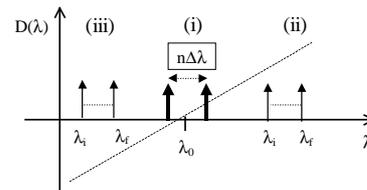


Figura 1. Disposição das alocações investigadas para os dois canais WDM

A. Resultados para $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$

As Figuras 2 (a) e (b) mostram o comportamento temporal dos pulsos do canal 1 (o mais depletado) e seu respectivo diagrama de olho, após 100km de fibra para um sistema WDM de 3 canais com separação entre canais de 1nm, com os canais centralizados em relação a λ_0 , com potência de pico de entrada de 75mW (18,75dBm).



Figura 2a. Comportamento temporal dos pulsos do canal 1 no sistema de 3 canais separados de 1nm, e centrados em torno de $\lambda_0 \cdot P_0 = 75\text{mW}$.

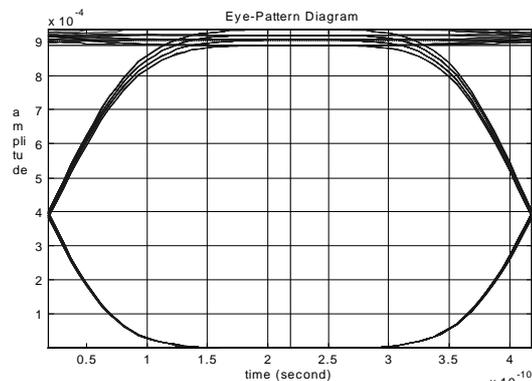


Figura 2b. Diagrama de Olho referente à figura anterior para canais centrados em torno de λ_0 .

A Figura 3 apresenta a variação da depleção do canal de bombeamento para o sistema de 2 e 3 canais separados de 1nm, contra a potência de entrada para os diferentes posicionamentos dos canais .

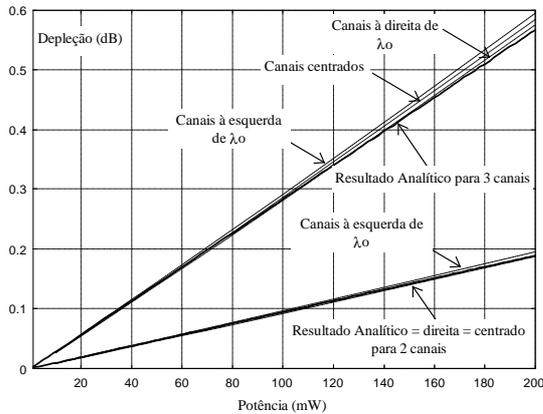


Figura 3. Comparação dos valores da depleção versus potência de pico transmitida para separação entre canais de 1 nm.

Nesta figura podemos observar que as diferenças de posicionamento dos canais não apresentam alterações muito significativas na depleção sofrida pelo canal de bombeamento em um sistema com 2 canais. Entretanto pequenas diferenças já se fazem sentir em um sistema de 3 canais, prevendo-se uma substancial alteração para um maior número de canais mesmo utilizando-se o espaçamento de 1nm.

B. Resultados para $n\Delta\lambda = 30\text{nm}$

As Figuras 4 (a.1,2), (b.1,2), e (c.1,2) mostram o comportamento temporal dos pulsos de bombeamento e seus respectivos diagramas de olho, após 100km de fibra para 3 canais ocupando toda uma janela de 30nm (separação individual entre canais de 15nm), com os canais centralizados, à direita, e à esquerda de λ_0 respectivamente, com potência de pico de 75mW.

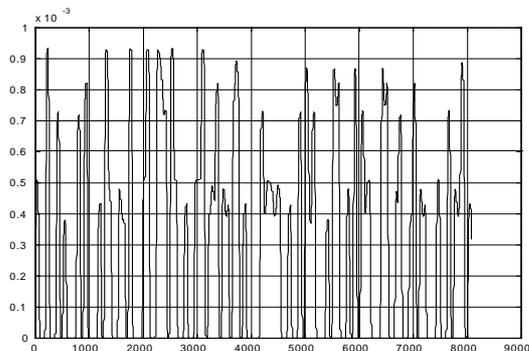


Figura 4a.1. Comportamento temporal para máxima separação entre os canais de 30nm e centrados em relação a λ_0

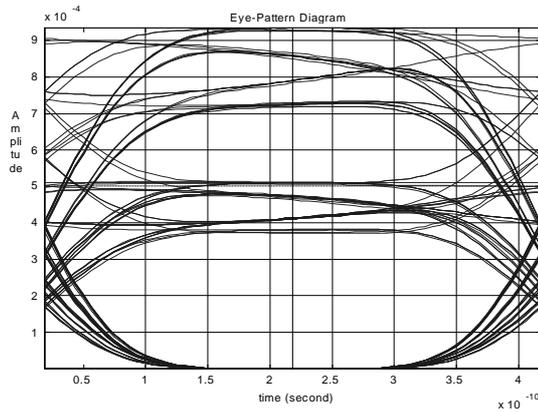


Figura 4a.2 Diagrama de Olho referente à figura anterior para canais centrados em torno de λ_0

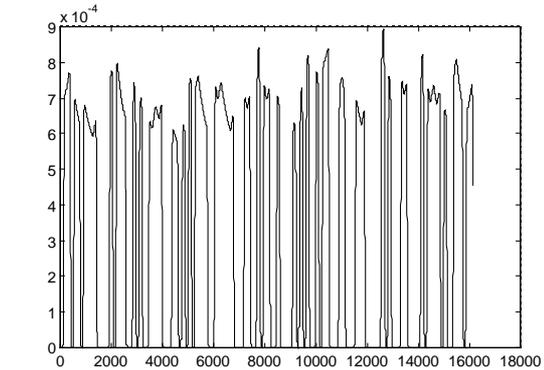


Figura 4b.1. Comportamento temporal para máxima separação entre os canais de 30nm e posicionados à direita de λ_0

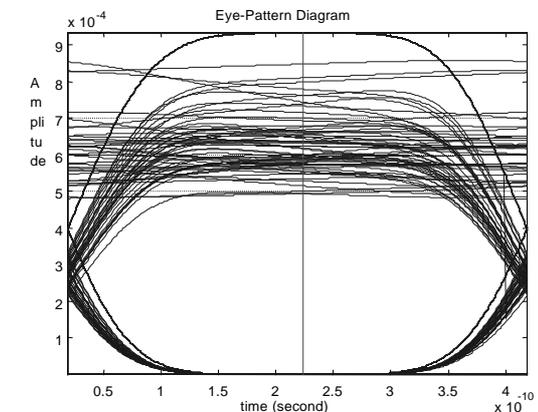


Figura 4b.2 Diagrama de Olho referente à figura anterior para canais posicionados à direita de λ_0 .

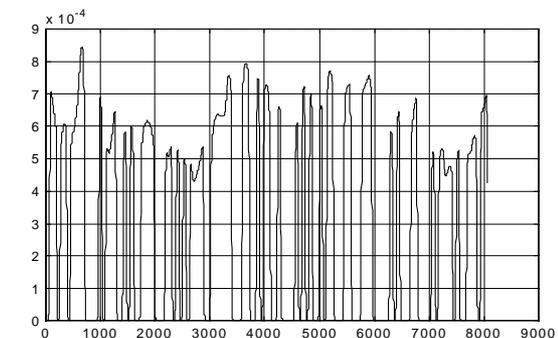


Figura 4c.1. Comportamento temporal para máxima separação entre os canais de 30nm e posicionados à esquerda de λ_0

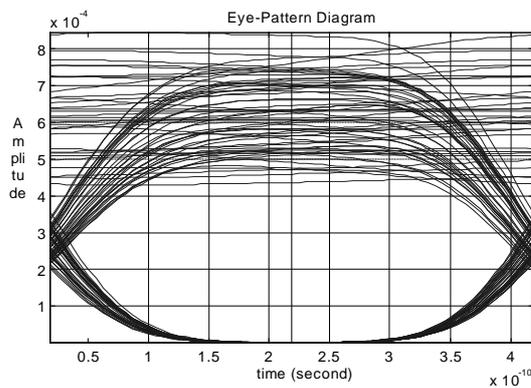


Figura 4c.2. Diagrama de Olho referente à figura anterior para canais posicionados à esquerda de λ_0 .

A Figura 5 apresenta a variação da depleção do bombeamento contra a potência de entrada para 2 e 3 canais WDM ocupando toda a janela de 30nm, para o conjunto dos posicionamentos a direita, esquerda e centralizados em torno de λ_0 .

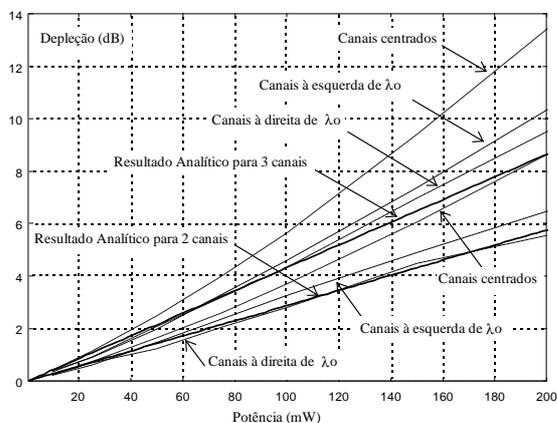


Figura 5. Comparação dos valores da depleção versus potência de pico transmitida para 2 ou 3 canais de ocupando toda a banda de 30nm.

Na figura 5 podemos verificar que a medida que o número de canais aumenta de 2 para 3, a depleção aumenta significativamente, e que a aproximação analítica se torna bastante imprecisa (da ordem de alguns decibéis) principalmente para o posicionamento dos canais centralizados em torno de λ_0 e para altas potências.

IV. CONCLUSÕES

Foi feita uma análise dinâmica rigorosa do espalhamento de Raman estimulado para 2 e 3 canais WDM excitados por sequências pseudo-randômicas de 128 bits. Verificou-se que a estimativa CW de [2] para a degradação do desempenho do sistema WDM é excessivamente imprecisa (e otimista) quando comparada com a formulação dinâmica, principalmente quando a separação, o número de canais, ou a potência ótica por canal é aumentada. A razão principal da diferença está na inclusão na nossa formulação do ganho obtido pelo canal de Stokes (que aumenta com a potência) causando uma maior

depleção do bombeamento, além do desgarramento entre os canais, que age como um supressor de depleção.

Verificou-se também que não há desgarramento significativo entre os canais WDM quando os mesmos são centralizados em torno de λ_0 , ao passo que quando os canais são posicionados à direita de λ_0 (região dispersão anômala), ou à esquerda (região de dispersão normal), os efeitos de desgarramento conduzem a uma menor degradação do sistema. Pelo presente estudo, infere-se que o sistema que apresenta uma maior penalidade é aquele que utiliza os canais centralizados em torno de λ_0 , e que o posicionamento dos canais na região anômala fornece consistentemente uma menor penalidade, embora em alguns casos a diferença seja marginal para pequenas separações entre os canais.

Embora no presente estudo algumas tendências de comportamento do desempenho dos sistemas WDM quanto à degradação pelo efeito Raman possam ser inferidas, faz-se necessário estender esta análise para um maior número de canais e estabelecer limites realistas de potência a serem observados por sistemas WDM com dado número de canais. Faz-se necessário também um estudo comparativo com expressões analíticas mais completas, como a apresentada recentemente em [5].

REFERÊNCIAS

- [1] A.R.Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp.1548-1557, 1990
- [2] A.R.Chraplyvy, "Optical power limits in multichannel wavelength-division multiplexed systems due to stimulated Raman scattering", *Electronics Letters*, vol. 20, pp. 58-59, 1984
- [3] D.N. Christodoulides and R. B. Jander, "Evolution of stimulated Raman crosstalk in wavelength division multiplexed systems", *IEEE Photon. Technol. Letters*, vol. 8, pp. 1722-1724, 1996
- [4] D. Cotter and A.M. Hill, "Stimulated Raman crosstalk in optical transmission: Effects of group velocity dispersion", *Electronics Letters*, vol. 20, pp. 185-187, 1984
- [5] J. Wang, X. Sun, and M. Zhang, "Effect of group velocity dispersion on stimulated Raman crosstalk in multichannel transmission systems", *IEEE Photonics Technol.*, vol.10, pp.540-542, 1998
- [6] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. 2nd Ed., San Diego, CA, Academic Press, 1995.

Shirley Peroni Neves é estudante de graduação do curso de Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), instituição em que iniciou como bolsista de Iniciação Científica financiada pelo CNPq, desde 1997, realizando

pesquisa na área de Sistemas Ópticos, mas especificamente na área de Efeitos Não Lineares e-mail: shirley@ele.ufes.br

Renato T.R. de Almeida graduou-se Bacharel em Engenharia Elétrica, em 1998, pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), instituição em que iniciou seu contato com pesquisas em Sistemas Ópticos. Desde 1994, realiza projetos na área de softwares educacionais para ensino de Eletromagnetismo. Iniciou seus estudos no programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela UFES, em 1997, como aluno especial, sendo efetivado, em 1998, como estudante de mestrado em dedicação exclusiva e bolsista do CNPq, estudando Sistemas Ópticos Multiamplificados.

Márcio Freitas graduou-se Bacharel em Engenharia Elétrica, em 1997, pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Iniciou seus estudos no programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica-UFES, em 1997, em dedicação exclusiva como bolsista da CAPES, estudando Efeitos Não Lineares em Sistemas Ópticos de Telecomunicações. Atualmente, está em processo de defesa de tese sob o título "Modulação Cruzada de Fase em Sistemas Ópticos".

Moisés R.N. Ribeiro é bacharel em Engenharia Elétrica-Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí, MG (INATEL), desde 1992. Em 1996, recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica-Telecomunicações pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (DEL-UFES), desde 1995. Atualmente, está se graduando PhD em Engenharia Elétrica pela Universidade de Essex, Inglaterra.

Luiz de Calazans Calmon graduou-se em Engenharia Elétrica-Telecomunicações, em 1976, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ). Em 1979, concluiu o Mestrado em Engenharia Elétrica-Telecomunicações no CETUC da PUC-RJ. Em 1985, concluiu o Doutorado em Engenharia Elétrica pelo University College London, Inglaterra. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), desde 1979. Atualmente desenvolve pesquisa na área de Comunicações Ópticas junto ao Mestrado em Engenharia Elétrica da UFES.