

# Sistemas Ópticos Amplificados Solitônicos

Crisluci Karina S. Santos e Humberto C. Chaves Fernandes

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Departamento de Engenharia Elétrica  
Caixa Postal 1583, CEP:59.072-970, Natal RN - Brasil

**Resumo** — Este trabalho apresenta uma análise do comportamento de sólitons em sistemas de transmissão de longa distância. Um dos principais fatores limitantes do desempenho destes sistemas é o ruído de emissão espontânea amplificada – ASE, introduzido pelos amplificadores presentes na transmissão. Os efeitos do ruído ASE e sua interação com os sólitons são analisados graficamente em curvas de 2 e 3D.

## I. INTRODUÇÃO

As ondas solitárias ortogonais, ou sólitons, têm suas configurações de intensidade inalteradas quando se propagam. Estes pulsos ópticos podem se propagar em um meio dispersivo não-linear sem qualquer alteração na sua forma. Isto ocorre quando a dispersão na velocidade de grupo compensa completamente o efeito da auto-modulação de fase [1]-[2].

Em transmissões de longo alcance, os sólitons merecem especial atenção. Na propagação de pulsos por longa distância é necessária a inserção de amplificadores ópticos periodicamente, de modo a compensar as perdas de transmissão, como as perdas intrínsecas da fibra óptica. Os próprios amplificadores geram ruído(ASE).

Em um sistema solitônico amplificado, a geração do ruído ASE pelos amplificadores é o principal fator limitante de desempenho [3]. Observa-se que o pulso na saída sofre um deslocamento no tempo devido ao ruído introduzido pelos amplificadores como mostrado na Fig. 1.

Parte deste ruído interage com o sóliton, provocando uma descontinuidade no tempo de chegada dos pulsos, conhecido como *Efeito Gordon-Haus*.

Crisluci Karina S. Santos, [cris.kss@bol.com.br](mailto:cris.kss@bol.com.br), H.C.C. Fernandes, [humbeccf@ct.ufrn.br](mailto:humbeccf@ct.ufrn.br), Tel/Fax +55-84-2153731. Este trabalho foi financiado pela CNPq.

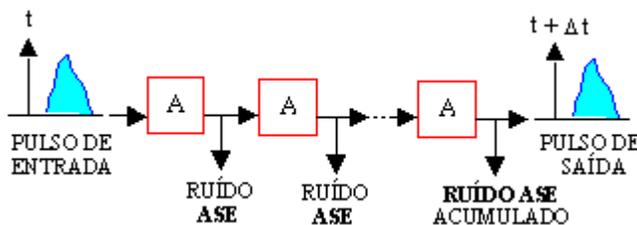


Fig.1. Pulso solitônico submetido ao efeito Gordon-Haus.

Este trabalho apresenta análises do efeito Gordon-Haus, do acúmulo de ruído ASE da fibra, e a interação entre sólitons adjacentes. Estes fatores são importantes no dimensionamento dos sistemas solitônicos, que usam em frequências ópticas.

## II. USO DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS

No início dos anos 90 tornaram-se disponíveis comercialmente os amplificadores ópticos à base de fibras dopadas com Érbio [7]. Esses Amplificadores Ópticos à Fibra Dopada com Érbio (AFDE) apresentam ganho na faixa de 1530-1560nm.

O uso do AFDE compensa a atenuação e aumenta a capacidade de transmissão dos sistemas, através do maior alcance do enlace.

O AFDE ao amplificar o sinal possibilita um maior alcance e assim aumenta a distância entre repetidores ópticos. Através de uma cascata de amplificadores o sinal continua propagando por centenas de quilômetros. Surgem duas novas questões:

1) Ao permanecer em sua forma ótica, por centenas de quilômetros, os efeitos das dispersões cromática e de polarização se acumulam com a distância, causando o alargamento temporal do pulso com a conseqüente sobreposição de pulsos adjacentes. Isso pode comprometer o desempenho do sistema através da degradação da taxa de erro de bit, *BER*.

2) Existe um nível de ruído associado a todo AFDE: ruído de emissão espontânea; o ruído gerado pelo primeiro amplificador será, juntamente com o sinal, amplificado pelo segundo AFDE da cascata e assim sucessivamente caracterizando o ASE. Em consequência o desempenho do enlace poderá ficar comprometido com a diminuição da relação sinal/ruído (S/R).

### III. EFEITO GORDON-HAUSS

O efeito Gordon-Haus representa um dos fatores limitantes em um sistema solitônico, devido às mudanças na posição, no tempo e na frequência central destes pulsos solitônicos. A mudança na frequência é o efeito mais significativo, pois acarreta mudanças na velocidade de grupo, e uma consequente incerteza no tempo de chegada dos pulsos solitônicos, considerando que os efeitos de cada amplificador na velocidade de grupo são independentes.

Pode-se estabelecer a variância do deslocamento temporal, após uma cascata de N amplificadores como sendo [4],

$$\langle \delta t^2 \rangle = \sum_{n=1}^N \langle (\delta v_g)_n^2 \rangle (L_{tot} - nL_{amp})^2 \quad (1)$$

onde  $\langle (\delta v_g)_n^2 \rangle$  é a variância do deslocamento na velocidade de grupo do pulso ao passar pelo n-ésimo amplificador,  $L_{amp}$  é o espaçamento entre amplificadores e  $L_{tot}$  o comprimento total da fibra.

Ao se estabelecer uma variância máxima permitida no receptor,  $\sigma_{max}^2 = \langle \delta t^2 \rangle_{max}$ , o limite inferior para a largura de pulso é dado por [5],

$$\tau \geq \frac{(G-1) \eta_{sp} D h n_2}{\sigma_{max}^2 9 L_{amp} A_{eff}} \cdot L_{tot}^3 \quad (2)$$

onde, G é o ganho do amplificador, h é a constante de Planck,  $\eta_{sp}$  é o fator de emissão espontânea,  $n_2$  é o índice de refração não linear da fibra e  $A_{eff}$  é a área efetiva do núcleo da fibra. D é o parâmetro de dispersão e relaciona-se com  $\beta_2$  através de

$$D = -\frac{2\pi c \beta_2}{\lambda^2} \quad (3)$$

### IV- RUÍDO ASE

O ruído ASE de emissão espontânea amplificado possui baixa intensidade, podendo ser tratado no regime linear, ao longo da propagação da fibra. A potência total deste ruído após uma cascata de N amplificadores é dada por [3],

$$P_{ASE} = N \cdot B_F \cdot h \cdot \nu \cdot \eta_{sp} \cdot (G-1) \quad (4)$$

onde  $B_F$  é a banda do filtro colocado na entrada do receptor e  $\nu$  é a frequência óptica do sinal.

É possível estabelecer um limite superior para a largura de pulso  $\tau$ , dada por [5],

$$\tau \leq \frac{R \beta_2 (\nu A_{eff} / 2\pi n_2) 10^{-SNR/10}}{P_{ASE}} \quad (5)$$

onde SNR é a relação sinal ruído, definida como:

$$SNR = P_m / P_{ASE} \quad (6)$$

sendo  $P_m$  a potência média do sinal no receptor.

### V. ACOPLAMENTO ENTRE SÓLITONS

A capacidade de um sistema pode ser determinada pelo intervalo de separação entre pulsos adjacentes,  $T_B$ , e a redução do espaçamento temporal entre os pulsos aumentará a taxa de transmissão. No entanto, diminuir  $T_B$ , implica em reduzir significativamente a velocidade de transmissão, devido à interação periódica entre sólitons adjacentes. É necessário, estabelecer um intervalo de separação mínima entre os sólitons, de modo a garantir que não ocorram colisões. Um procedimento é fazer o comprimento total da fibra  $L_{tot}$  menor do que a metade do comprimento  $L_{col}$  no qual ocorre a primeira colisão,

$$L_{tot} < L_{col} / 2 = z_0 \exp(T_B / 2\tau) \quad (6)$$

onde,  $z_0$  é o período do sóliton, ou seja, a distância ao longo da qual os efeitos dispersivos são observados.

### VI. SISTEMAS BASEADOS EM SÓLITONS

A evolução dos sistemas ópticos busca uma maior capacidade de transmissão, no projeto que explore a largura de banda das fibras óticas. Paralelamente à pesquisa de fibras que minimizam a dispersão, são desenvolvidos pesquisas relacionadas ao Sóliton óptico, no qual a dispersão cromática é naturalmente compensada pelo efeito não linear de auto modulação de fase, na fibra óptica. Sólitons ópticos existem em meios óticos não lineares, embora o fenômeno de Sóliton não seja limitado a meios óticos.

A viabilização prática dos sistemas ópticos baseados em Sólitons depende da solução de problemas relacionados a estabilidade do sóliton na fibra. Ao se propagar numa fibra as perdas impostas pela mesma atenuam o nível do sinal e levam o sistema a operar na região linear; consequentemente a auto modulação de fase deixa de ocorrer. Nesse caso para

manter o Sóliton na fibra, é necessário que ocorra amplificação periódica do mesmo. Ao ser amplificado por AFDE's adiciona-se ruído (ASE) ao sinal o qual é uma das causas da desestabilização do Sóliton na fibra.

Considerável progresso vem sendo obtido na década de 90 com relação ao entendimento e combate dos efeitos responsáveis pela degradação do Sóliton na fibra advindos do ruído ASE, da interação entre Sólitons, etc. Assim laboratórios de pesquisa, em todo o mundo, buscam a viabilização prática e a disponibilidade comercial dos enlaces ultra longos (milhares de quilômetros) sem regeneradores eletrônicos: enlaces nos quais Sólitons ópticos desempenham o papel de "bits naturais".

## VII. RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados numérico computacionais obtidos em microcomputadores Pentium 500 MHz , usando programas desenvolvidos em Fortran Power Station e Matlab 5.0, são apresentados em 2 e 3D.

Resultados em 3D da largura de pulso em função da distância entre os amplificadores e do índice de refração não-linear da fibra são apresentados na Fig. 2.

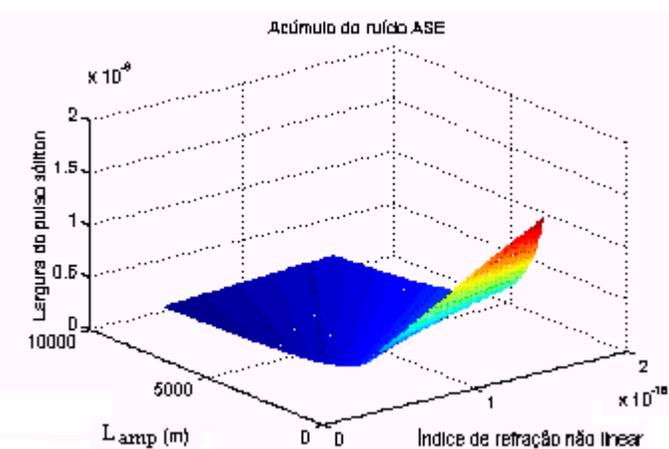


Fig. 2 Largura de pulso em função da distância entre os amplificadores e do índice de refração não-linear da fibra.

Os parâmetros utilizados nesta Fig. 2 são:  $L_{tot}=1000$  Km,  $h=6,63 \times 10^{-34}$  J/S,  $\eta_{sp} = 1$  (amplificador ideal),  $\eta_2 = 1,47$ ,  $A_{eff}=1,9625$  nm<sup>2</sup>,  $D=50$   $\mu$ m,  $\beta_2=0.9$ ,  $c = 3 \times 10^8$  m/s, e  $z = 1,55 \times 10^{-6}$  m.

Observa-se na Fig. 2 que a largura do pulso solitônico aumenta com o aumento do índice de refração e diminui com o aumento da distância entre os amplificadores. Existe portanto um compromisso entre os valores de  $L_{AMP}$  e  $\eta_2$ .

A Fig. 3 ilustra graficamente a largura de pulso em função da potência total de ruído e do índice de refração não-linear da fibra, onde os parâmetros utilizados são,  $\nu = 193 \times 10^{12}$  Hz,  $R = 10 ; 5 ; 2,5$  Gb/s;  $\beta_2= 0,9$ ;  $A_{eff} = 1,9625$  nm<sup>2</sup>;  $n_2 = 1,470$ , e  $SNR = 23$  dB. Nesta fig. 3, o pulso sofre um estreitamento com o aumento da potência ASE e com o aumento do índice de refração

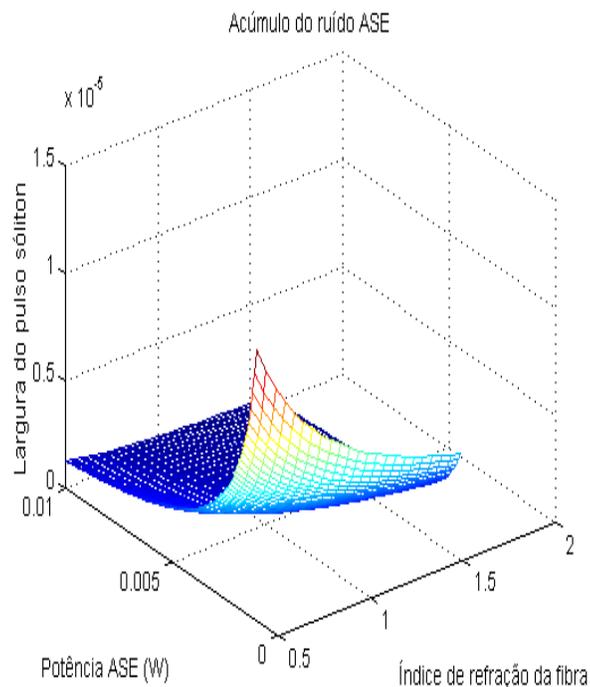


Fig. 3 Largura de pulso em função da potência total de ruído e do índice de refração não-linear da fibra.

Na Fig. 4 é mostrada a análise bidimensional, sendo utilizados os parâmetros  $z_0 = 1,55$   $\mu$ m;  $L_{tot} = 200, 800$  e  $1400$  Km. Nesta fig. 4 a largura do pulso solitônico é função do intervalo de separação entre pulsos adjacentes ( $T_B$ ).

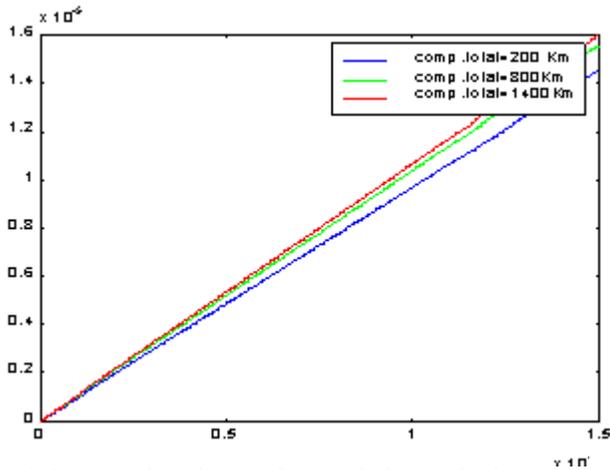


Fig.4 Largura de pulso em função do intervalo de separação entre pulsos adjacentes e do período do sóliton.

No caso dos Sólitons os efeitos de alargamento temporal do pulso, pela dispersão no regime anômalo, e o alargamento espectral, pela auto modulação de fase, cancelam-se mutuamente. Em conseqüência o Sóliton óptico é um pulso que não varia sua forma nem seu espectro ao se propagar. A Fig. 5 ilustra esse fenômeno.

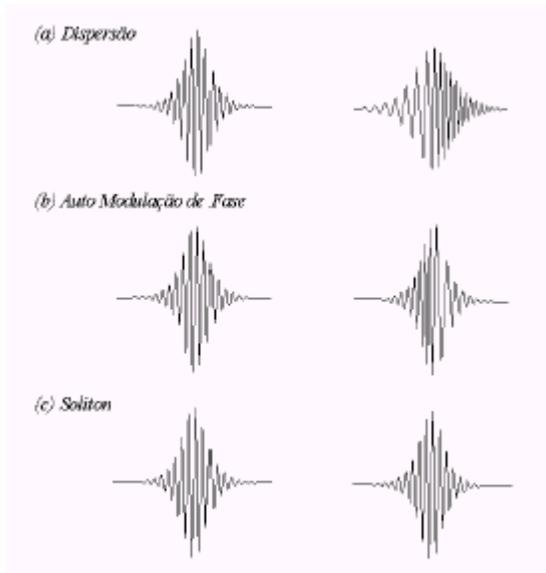


Fig. 5 (a) Dispersão, (b) automodulação de fase durante a propagação do pulso, e (c) sem alteração da largura temporal e do espectro.

A Fig 6 mostra a propagação de pulso solitônico secante-hiperbólico de ordem superior. São usados  $\lambda_0=1,55\mu\text{m}$ ,  $\alpha=0\text{dB/km}$ ,  $A_0=0,126\text{W}$ ,  $z_0=0,5\text{mm}$ ,  $N=3$  (ordem do sóliton) e  $T_0=4\text{ps}$ , e  $U(0, \tau) = \text{sech}(\tau)$ .

$A(z,t)$

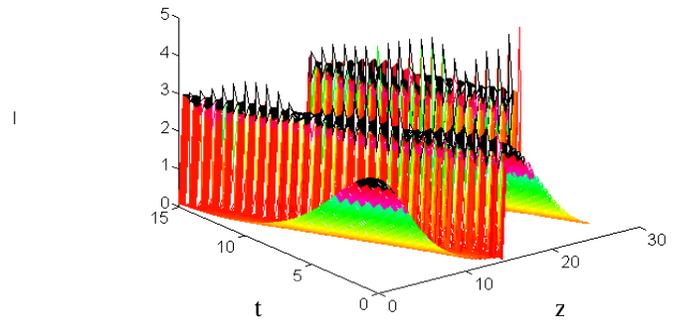


Fig. 9. Propagation of high-order secant-hyperbolic sóliton pulse.

## VIII. CONCLUSÕES

Foram apresentados estudos sobre os sistemas solitônicos amplificados, com o objetivo de aplicação para transmissão a longas taxas de bits e por longas distâncias. Foram obtidas curvas em 2 e 3D para representar os efeitos do ruído de emissão espontânea, maior limitação na operação dos sistemas solitônicos amplificados. Também foram analisados os efeitos do acúmulo do ruído ASE e da interação entre sólitons adjacentes, sendo obtidas resultados em 2D e 3D usando-se microcomputadores Pentium 500 MHz.

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] B.E.A. Saleh e M.C. Teich, "Fundamentals of photonics", Photon-number statistics, capítulo 11, pp.403-407, 1991.
- [2] H. Alde, "Molding light into solitons", **IEEE Spectrum**, pp 48-53, 1993.
- [3] N. A. Olsson, "Lightwave systems with optical amplifiers", **J. Light.Tech.**, vol 7, pp 1071-1082, 1989.
- [4] J.P. Gordon e H. A. Haus, "Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission", **Opt. Lett.**, vol 11, no 10, pp 665-667, 1986.
- [5] N.J. Smith e N.J. Doran, "Evaluating the Capacity of phase Modulator – Controlled Long-Haul Soliton Transmission", **Opt. Fiber Tech.**, vol 1, pp 218-235, 1995.
- [6] P. Brandão e J. R. Souza, "Técnica de Controle de Sólitons", **17º SBT –Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, Vila Velha - ES, pp. 301-306, set. de 1999.
- [7] M. R. C. Caputo, M. E. Gouvêa, "Fatores que influenciam a capacidade e o desempenho dos Sistemas com Amplificadores Óticos", Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Revista Telecomunicações, vol. 02, nº 02, Março de 1999.
- [8] H. C. C. Fernandes, Robson L. M. Lima, Wellton P. Pereira e Luiz C. Freitas Jr., "A New Cad Package in Photonics Study - PACFOTON I", **ITS'98 - International Telecommunications Symposium**, São Paulo-SP, Conf. Proc. pp. 619-622, Agosto de 1998.
- [9] H. C. C. Fernandes, F. J. T. Vidal, I. M. Araújo e S. J. F. Oliveira, "A New CAD Package in Photonic Study - PACFOTON II", **1999 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave And Optoelectronics Conference**, Rio de Janeiro-RJ, Conf. Proc pp 541.1-541.4, Ago. 1999.