

Amplificação e clonagem de pulsos curtos em amplificadores ópticos paramétricos a fibra óptica.

A. V. Nascimento

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
allisson_veira@hotmail.com

João F. L. de Freitas

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
joaoff@poli.br

Resumo *Pulsos curtos são amplamente utilizados nas telecomunicações ópticas por suas características essenciais para sistema de comunicações ópticas em taxas de transmissão de Gbits/s. Assim, estudamos a amplificação de pulsos de 5 ps em um amplificador óptico paramétrico via simulação computacional.*

Abstract *Short pulses are widely used in optical telecommunications for their essential characteristics to optical communication system at data rates of Gbits/s. Thus, we have studied the amplification of pulses of 5 ps in an optical parametric amplifier through computer simulation.*

1 Introdução

O texto começa aqui. Títulos de seções devem usar o estilo “**Titulo**” do menu de estilos. Para o texto use o estilo “**Body Text**” (Times 10). Referências devem ser chamadas no texto usando números [2,3], e, caso os autores assim desejarem, por exemplo, de acordo com Freire [4].

O desenvolvimento das modernas telecomunicações ópticas (CO) deve-se principalmente aos estudos de efeitos de propagação de luz em fibras ópticas, os quais podem ser classificados como lineares (EL) e não lineares (ENL) [1,2,3,4,5].

A resposta de um meio a passagem de uma onda eletromagnética é representada pela polarização elétrica. Esta resposta se processa em vários níveis. Quando a polarização elétrica for linear com a amplitude do campo eletromagnético dizemos que esta resposta é um efeito linear, e quando a polarização é proporcional ao quadrático ou de ordem maior com a amplitude do campo podemos dizer que o efeito é não linear [1,2,3]. A principal consequência desta definição é que os EL não geram novas frequências ópticas durante a propagação, enquanto os ENL são caracterizados pela geração de novas componentes de frequência durante a propagação do campo eletromagnético no guia de onda. Os ENL ocorrem por uma resposta não linear da polarização eletromagnética, isto se deve a dois fatores ou sua combinação:

1. O campo tem intensidade alta;
 2. O meio é composto por materiais que possuem alta resposta não linear, Por exemplo, fibras ópticas de sílica dopadas com germânio; fibras ópticas dopadas com Érbio.
- De um modo geral, podemos observar ENL como uma mudança no índice de refração do meio como uma função da intensidade óptica.

Dentre os principais EL: atenuação, dispersão de modos de propagação, dispersão de modos de polarização e cromática [1].

Dentre os principais ENL: auto-modulação de fase AMF, modulação de fase cruzada MFC, espalhamento Brillouin estimulado, espalhamento Raman estimulado, mistura de quatro ondas FWM. Instabilidade modulacional, conversão ascendente de frequência [1,2].

ENL são os principais limitadores das taxas de comunicação e do tamanho dos enlaces totalmente ópticos, bem como, podem ser usados no desenvolvimento de dispositivos ópticos, como por exemplo: Amplificadores ópticos, conversores de comprimento de onda, lasers pulsados e CW e etc [3,4].

Dentro dos ENL nos chama a atenção o efeito de mistura de quatro ondas que é a base para construção e desenvolvimento de amplificadores ópticos paramétricos a fibra (FOPA) [1,2,3]. Veja na figura 1 um diagrama idealizado de um FOPA. Estudos de amplificadores ópticos são abundantes na literatura [6-13], estes amplificadores são amplamente utilizados em diversas situações em comunicações ópticas [1].

Pulsos curtos (1-50 ps) são essenciais em sistemas de comunicações ópticas de alto desempenho (Gbits/s), por exemplo para pulsos com *bit slots* de 10 ps (~100 Gbits/s) temos que ter pulsos de no máximo 5 ps. Assim estudarmos as mudanças do seu perfil temporal ao longo de um meio ganho é essencial para uma definição da qualidade do amplificador.



Fig.1: Montagem experimental de um FOPA, WDM1 acoplada ao bombeamento e sinal de entrada, WDM2 desacopla o sinal e o idler e remove o bombeamento residual, ISO são isoladores ópticos.

Neste trabalho, desenvolvemos, via simulação computacional estudos sobre amplificação e clonagem de pulsos de 5 ps em FOPA.

2. Modelagem computacional

A simulação computacional da amplificação e clonagem de pulsos em amplificadores ópticos paramétricos a fibra óptica pode ser obtida mediante a resolução da equação não linear de Schrödinger. Esta equação se caracteriza por traduzir perfeitamente os efeitos lineares e não lineares presentes na propagação da luz na fibra óptica e é definida como:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha A}{2} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

onde: A - é a amplitude transversal do campo elétrico (envoltória do pulso), γ - é o parâmetro de não linearidade, β_i - é a intensidade dos osciladores que participam da i -ésima ressonância (parâmetro responsável pela dispersão cromática) e α - parâmetro de atenuação.

Analisamos o comportamento dos sinais no meio, resolvendo numericamente a equação de propagação utilizando técnicas numéricas tais como, Split-Step Fourier [1,4] e Diferenças finitas.

O Split-Step (Fourier), em análise numérica, é um método pseudo-espectral. Tal método numérico é utilizado para resolver equações diferenciais parciais, a exemplo da equação não-linear de Schrödinger. Utilizamos esse método, haja vista que nas equações de propagação de luz em fibras ópticas ocorre a interação de mecanismos lineares e não lineares, o que dificulta encontrar soluções analíticas gerais.

Tanto a parte linear como a não linear, isoladas, têm soluções analíticas. Todavia, a equação não linear de Schrödinger composta desses dois termos não tem uma solução analítica geral. Assim, se apenas um pequeno passo “h” é tomado ao longo de “z”, as duas partes podem ser tratadas separadamente com apenas um pequeno erro “numérico”.

Após a aplicação desse método numérico à equação não linear de Schrödinger (1) encontramos uma equação referente aos mecanismos lineares (Parte Linear) e outra aos não lineares (Parte Não Linear), são elas:

1. Parte Linear: equação complexa que pode ser desmembrada em sua parte real e imaginária da seguinte forma:

- Parte real:

$$R[\tilde{A}(z+h, \omega')] = R[\tilde{A}_j(z)] e^{-\frac{\alpha h}{2} \cos(\phi)} + I[\tilde{A}_j(z)] e^{-\frac{\alpha h}{2} \sin(\phi)}$$

- Parte imaginária:

$$I[\tilde{A}(z+h, \omega')] = I[\tilde{A}_j(z)] e^{-\frac{\alpha h}{2} \cos(\phi)} - R[\tilde{A}_j(z)] e^{-\frac{\alpha h}{2} \sin(\phi)}$$

onde: \square - é definido como:

$$\phi = \left[\frac{-\beta_{2j}}{2} (\omega_j'^2 + \omega^2) + \frac{\beta_{3j}}{6} (\omega^3 + 3\omega_j' \omega^2 + 3\omega_j'^2 \omega + \omega_j'^3) \right] h$$

2. Parte Não linear: Também é uma equação complexa que pode ser separada em sua parte real e imaginária da seguinte forma:

- Parte real:

$$R[A_j(z+h)] = R[A_j(z)] e^{\Phi_1} \cos(\Phi_2) - I[A_j(z)] e^{\Phi_1} \sin(\Phi_2)$$

- Parte imaginária:

$$I[A_j(z+h)] = R[A_j(z)] e^{\Phi_1} \sin(\Phi_2) + I[A_j(z)] e^{\Phi_1} \cos(\Phi_2)$$

onde: Φ_1 e Φ_2 - são definidos como:

$$\Phi_1 = \frac{\gamma P_B e^{-\alpha z} h \cos(2\gamma P_B z) [R(A_m)I(A_j) + R(A_j)I(A_m)]}{|A_j|^2}$$

$$+ \frac{\gamma P_B e^{-\alpha z} h \sin(2\gamma P_B z) [I(A_m)I(A_j) - R(A_m)R(A_j)]}{|A_j|^2}$$

$$\Phi_2 = \gamma h (2P_B e^{-\alpha z} + 2|A_m|^2 + |A_j|^2)$$

$$+ \frac{\gamma P_B e^{-\alpha z} h \cos(2\gamma P_B z) [R(A_m)R(A_j) - I(A_m)I(A_j)]}{|A_j|^2}$$

$$+ \frac{\gamma P_B e^{-\alpha z} h \sin(2\gamma P_B z) [R(A_m)I(A_j) + R(A_j)I(A_m)]}{|A_j|^2}$$

O delineamento mostrado acima exhibe os passos algébricos necessários para obtermos as equações base para criação do algoritmo de simulação de pulsos curtos. Em nosso caso, optamos por programação em linguagem C/C++.

3. Pulsos Curtos

As atuais pesquisas técnicas e científicas das diversas áreas das telecomunicações têm em comum o objetivo de transmitir um maior número de informações com menor perda de dados. Os resultados obtidos da propagação de pulsos curtos em FOPA mostraram-se uma medida eficaz e muito vantajosa para tal finalidade.

Definem-se pulsos curtos como aqueles cuja largura a meia altura do pulso encontra-se na faixa de 1-50 ps. Essa característica em telecomunicações ópticas promove uma maior transmissão de dados em um menor 'bit-slot' e isso significa um grande avanço nas comunicações.

As figuras 3.1 e 3.2 mostram a amplificação do sinal e do “idler” em guias de ondas cilíndricos com uma largura a meia altura igual a 5 ps. Assim, podemos por exemplo criar bit slots de 10 ps (taxas de transmissão de 100 Ghz por canal óptico) o que nos fornece possibilidades de taxas de transmissão de bits maiores que o atual estado da arte (40 a 80 Ghz). Na figura 3.1 exhibe-se a amplificação de aproximadamente 21 dB de um pulso curto de 5 ps com perfil de entrada sech e comprimento de onda em 1549 nm ao longo de uma fibra de 500 m de alta não linearidade.

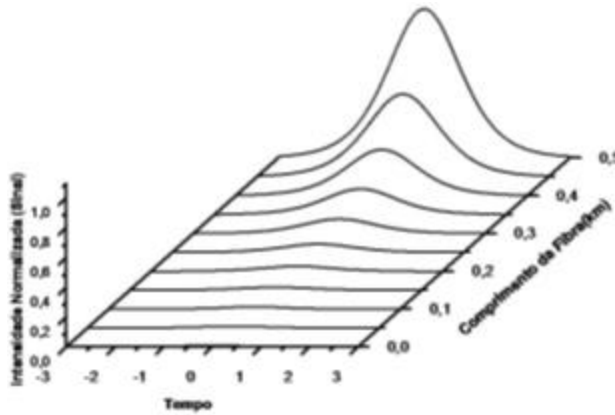


Fig. 3.1: Sinal amplificado através de um amplificador óptico paramétrico (FOPA).

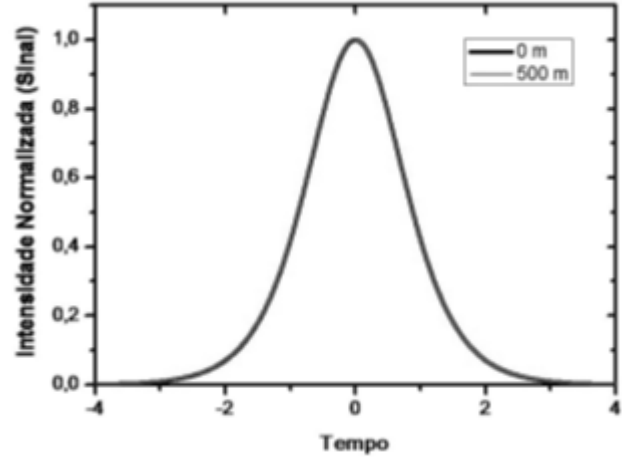


Fig. 3.3: Amplificação do Sinal (5ps)-Potência Normalizada.

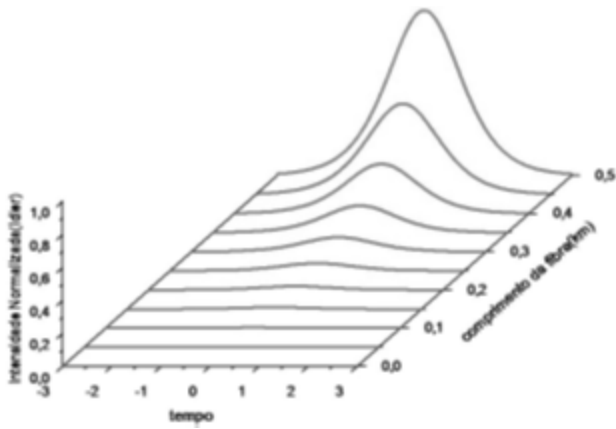


Fig. 3.2: Idler amplificado através da clonagem de pulsos.

A figura 3.3 mostra a intensidade do pulso amplificado de forma normalizada. Percebe-se, portanto, que não há geração de novas frequências, o que é um excelente resultado pois dessa forma não existe distorção no perfil temporal do pulso original ao longo da linha de amplificação.

3.1 Clonagem de Pulsos

Os resultados mostram também o perfeito casamento de fase ocorrido na propagação, o qual proporcionou o surgimento de um pulso de luz em um outro comprimento de onda (*idler*), ou seja, ocorreu uma clonagem do sinal. Para as telecomunicações ópticas, tal fato é extremamente desejável, tendo em vista que dessa forma é possível a conversão de sinais em comprimentos de onda distintos.

A figura 3.2 exibe a clonagem do pulso curto de 1549 nm em um pulso amplificado de 1521 nm com uma eficiência de conversão de aproximadamente 21 dB. As figuras 3.3 e 3.4, mostram a amplificação do sinal e do *idler*, respectivamente, durante a propagação do sinal na fibra. Comparando-as percebe-se que o *idler* inicialmente tem uma potência constante muito baixa da ordem de 10–12 (curva azul da figura 3.4) e esta é amplificada juntamente com o sinal (figura 3.3).

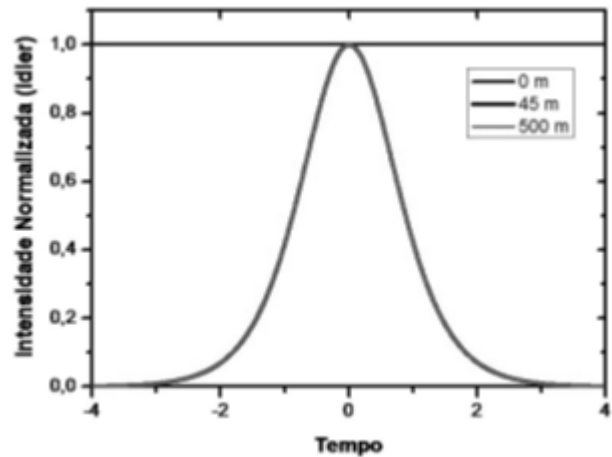


Fig. 3.4: Amplificação do Idler (5ps)-Potência Normalizada.

4. Conclusões

O desenvolvimento desse trabalho proporcionou o conhecimento do comportamento de ENL em sinais ópticos em diversos tipos de guias de onda, mais especificamente, a propagação de pulsos curtos em sistemas WDM [5]. Além disso, observamos que com a utilização e o desenvolvimento de pulsos curtos ampliam-se as possibilidades de pesquisa não somente nessa direção, como também para outros dispositivos e efeitos não lineares. Mediante o exposto, percebemos que investimentos nesse ramo das telecomunicações trarão uma melhoria significativa nos sistemas de comunicações.

6. Agradecimentos

Agradecemos ao programa PIBIC-POLI pelo apoio financeiro essencial para realização desse trabalho.

Referências

- [1] Govind P. Agawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 3^a ed., San Diego, 2001
- [2] Robert W. Boyd. *Nonlinear Optics*. Academic Press, San Diego, 1992.
- [3] João F. L. Freitas, *Amplificadores Ópticos, Estudos de Polarização e Geração de Pulsos Usando Processos Paramétricos em Fibras Ópticas*. Tese de Doutorado, Departamento de Física – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/Pe, 2007.
- [4] Govind P. Agawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, San Diego, 2001.
- [5] Govind P. Agawal, *Lightwave Technology, Telecommunication Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [6] I. Tomkos, I. Zacharopoulos, E. Roditi, D. Syvridis, and A. Uskov. *Mechanisms of wave mixing and polarization sensitivity of the wavelength conversion in semiconductor optical amplifiers using two parallel polarized pumps*. Opt. Commun., 163(1):49–54, 1999.
- [7] Qiang Lin and Govind P. Agrawal. *Vector theory of four wave mixing: polarization effects in fiber-optic parametric amplifiers*. J. Opt. Soc. Am. B, 21(6):1216–1224, 2004.
- [8] R. H. Stolen, E. P. Ippen, and A. R. Tynes. *Vector theory of four wave mixing: polarization effects in fiber-optic parametric amplifiers*. Appl. Phys. Lett., 20:62, 1972.
- [9] Thomas Torounidis. *Fiber Optic Parametric Amplifiers in Single and Multi Wavelength Applications*. PhD thesis, Department of Micro technology and Nanoscience, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006.
- [10] Jonas Hansryd, Peter A. Andrekson, Mathias Westlund, Jie Li, and Per-Olof Hedekvist. *Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 8(3):506–520, 2002.
- [11] João F. L. Freitas, M. B. Costa e Silva, S. R. Lüthi, and A. S. L. Gomes. *Raman enhanced parametric amplifier based S-C band wavelength converter: Experiment and simulations*. Opt. Commun., 255:314–318, 2005.
- [12] S. R. Lüthi, G. F. Guimarães, B.B. C. Kyotoku, J. F. L. de Freitas, M. B. Costa e Silva, A. S. L. Gomes, B. H. Thomas, and J-P von der Weid. *Optical Amplifier Hybrid Devices for S-band Telecommunications - A Comparison*. Optical Amplifiers and Their Applications Conference, page JWB33, 2006.
- [13] G. F. Guimarães, S. R. Lüthi, J. F. L. Freitas, and A. S. L. Gomes. *TDFFA/FOPA hybrid of broadband amplification and frequency conversion in optical communications*. Elet. Lett., 42(17):997–998, 2006.