

Modelamento de Amplificação Óptica Baseado em Fibra Dopada com Érbio para Memórias de Sistemas Interferidores de Guerra Eletrônica

Renan Richter¹, Thiago de Souza M. Pereira², André P. Gonçalves³, Olympio L. Coutinho⁴ e Felipe S. Ivo⁵

^{1,3,4,5}Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/Brasil - Brasil

²Ghent University, Ghent - Bélgica

Resumo—O artigo apresenta um modelo matemático de amplificação óptica baseado em fibra dopada com érbio para aplicações em Medidas de Ataque Eletrônico (MAE). Estes dispositivos se apresentam como memórias capazes de armazenar e retransmitir pulsos de radar para que os sítios oponentes sejam despistados. O conceito reside em uma arquitetura de anel recirculante com amplificação em fibra óptica dopada com érbio para investigação de tempo de armazenamento bem como da fidedignidade do pulso. Os resultados demonstraram uma boa capacidade de memória aliada a elevada coerência do sinal ao final da recirculação, características altamente alinhadas para os propósitos investigados.

Palavras-Chave—Amplificação óptica, guerra eletrônica, memórias de radiofrequência.

I. INTRODUÇÃO

Radares de compressão de pulso (PC) empregam complexas formas de onda que se caracterizam pela baixa probabilidade de detecção e pelo processamento coerente, o que torna a interferência hostil sobre estes equipamentos uma ação de elevada dificuldade [1]. Os radares *Low Probability of Intercept* (LPI) são os principais clientes de tais potencialidades e representam o estado-da-arte em detecção furtiva no cerne da Guerra Eletrônica. Neste contexto deu-se o surgimento do aparato denominado *Digital Radio Frequency Memory* (DRFM), uma contramedida eletrônica dirigida a radares que apresentam estes conceitos de processamento [2].

Memórias de radiofrequência (RF) são componentes essenciais para determinadas táticas de ataque eletrônico, especialmente aquelas que criam alvos falsos para os radares inimigos [3]. Elas armazenam e retransmitem o sinal em intervalos de tempo bem definidos para que o controle de ganho do radar oponente seja capturado e conseqüentemente o oponente perca a fidedignidade da informação [4].

No entanto, mesmo o estado-da-arte dos DRFM vive desafios em lidar com sinais de radar PC que comumente empregam bandas da ordem de dezenas giga-hertz e por isso limitam as memórias e principalmente afetam a qualidade da reconstrução dos sinais captados [2].

O desenvolvimento das transmissões de dados de comunicação por fibra óptica a longas distâncias e a criação da tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM) estão atrelados ao advento da amplificação óptica em fibra dopada com érbio (EDFA). Este tipo de amplificador é obtido a partir da dopagem da estrutura da fibra com o íon Er^{3+} o qual possui características ótimas na banda de 1530 a 1565 nm, faixa ideal para a modulação

simultânea de canais com mínima interferência, alto ganho, elevada linearidade, ampla banda-passante, baixo ruído e extrema reconfigurabilidade [5][6].

É neste íterim que o presente trabalho atua: na investigação da aplicação de EDFA em Guerra Eletrônica. O artigo propõe o modelamento matemático de uma linha de atraso recirculante baseada em EDFA que emula uma linha de amplificadores para implementação em Medidas de Ataque Eletrônico (MAE) direcionada para a cumprimento de dois objetivos principais: a busca por um maior tempo de armazenagem (memória) e a fidedignidade do sinal.

O trabalho está dividido em quatro seções. A Seção II trata do modelo de níveis de energia de um *laser* e como se dá a distribuição das emissões radiativas e não-radiativas. A Seção III apresenta o modelamento de uma linha de atraso baseada em EDFA. São feitas considerações acerca do ruído ASE (*amplified spontaneous emission*), o que predomina neste dispositivo bem como sobre o efeito de auto filtragem (*self-filtering effect*) que altera o ganho da EDFA para diferentes frequências. Nesta seção ainda é abarcado o modelo de ganho de uma EDFA baseada em um perfil Lorentziano para diferentes frequências. Ao final, um gráfico com os perfis de potência de sinal e ruído mostra o resultado dos equacionamentos desenvolvidos, demonstrando bom perfil de tempo de armazenamento do *loop* recirculante. A Seção IV traz as considerações finais acerca da excelente aplicabilidade do modelo para atividades de ataque eletrônico.

II. MODELO DE NÍVEIS DE ENERGIA

Uma fibra dopada com érbio é um dispositivo que alia as aplicabilidades de um guia de onda monomodo e de um laser, no entanto, que apresenta características físicas bastante singulares [7][8]. A Fig. 1 ilustra um sistema laser de três níveis de energia:

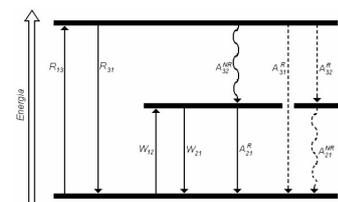


Fig. 1. Modelo de três níveis de energia. Os símbolos R, W e A correspondem, respectivamente, às taxas de bombeio, emissão e absorção estimuladas e decaimento espontâneo entre os níveis. Os sobrescritos R e NR, nesta ordem, fazem referência a emissões radiativas e não-radiativas [4].

Por definição o nível 1 é o fundamental, o nível 2 é o metaestável e o nível 3 é o de bombeio. Vale destacar que as transições mais importantes se dão do nível 1 para o nível 2 e que, para efeitos deste estudo, com vistas à disponibilidade de implementação experimental, o nível final de transição considerado é o nível 1 [9].

Assim, a taxa de bombeio do nível 1 para o nível 3 é representada por R_{13} bem como a taxa de emissão espontânea do nível 3 para o nível 1 é representada por R_{31} . Partindo-se do nível 3 existem duas possibilidades de transição: uma radiativa ($A_3^R = A_{31}^R + A_{32}^R$) e uma não-radiativa (A_{32}^{NR}). Há de se destacar que o decaimento espontâneo do nível 3 é considerado predominantemente não-radiativo ($A_{32}^{NR} \geq A_{32}^R$). As taxas de absorção e emissão estimuladas entre os níveis 1 e 2 são representadas respectivamente por W_{12} e W_{21} . O nível 2 apresenta as possibilidades de decaimento radiativo e não-radiativo ($A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR}$), sendo que A_{21} é definido pelo inverso do tempo de vida (τ) do íon Er^{3+} , daí a importância das transições entre estes dois níveis. Neste caso a emissão radiativa prevalece sobre a emissão não-radiativa ($A_{21}^R \geq A_{21}^{NR}$) [10][11].

Delimitadas e descritas todas as possibilidades de transição entre os três níveis, pode-se definir as equações de taxa de população (1), (2) e (3). Sendo (ρ) a densidade total dos íons do laser e N_1 , N_2 e N_3 as densidades parciais dos níveis de energia ($\rho = N_1 + N_2 + N_3$) têm-se [12][13]:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + R_{31}N_3 + W_{21}N_2 + A_{21}N_2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1 + A_{32}N_3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = -R_{31}N_3 - A_{32}N_3 + R_{13}N_1 \quad (3)$$

Após algumas transformações algébricas, no regime estacionário e considerando que a taxa de decaimento não-radiativa A_{32} é dominante sobre as taxas de bombeio R_{13} e R_{31} ($A_{32} \gg R_{13,31}$) as populações dos níveis 1 e 2 podem ser dadas respectivamente por (4) e (5) [14][15]:

$$N_1 = \frac{\rho(1 + W_{21}\tau)}{1 + R_{13}\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau} \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{\rho(R_{13}\tau + W_{12}\tau)}{1 + R_{13}\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau} \quad (5)$$

Desta forma, conclui-se que a população do nível 3 é negligenciável para o caso em estudo já que $N_3 = -N_1 - N_2 + \rho$. As equações (4) e (5) são de suma importância para o delineamento do comportamento dinâmico das fibras dopadas com érbio submetidas à formas de onda características de radar [16].

III. MODELAMENTO DE LINHA DE ATRASO BASEADA EM AMPLIFICADORES EM CASCATA

Os principais parâmetros que ditam a operabilidade de uma EDFA são seu ganho, sua potência de saturação e seu ruído. Este artigo trata da operação de EDFA em regime de amplificação linear onde a emissão espontânea amplificada (ASE) e o efeito de auto-filtragem (*self-filtering effect*) são

as principais fontes de degradação da relação sinal-ruído para o sistema [4]. As demais fontes como ruído de intensidade do *laser*, ruído *shot* e ruído térmico são muitas ordens de grandeza menores, portanto, podem ser desconsiderados [17].

Logo, o modelamento teórico repousa sobre três pilares: a potência do sinal, a emissão espontânea amplificada (ASE) e o efeito de auto-filtragem (*self-filtering effect*). A Fig. 2 exemplifica a arquitetura que emula uma linha de atraso baseada em amplificadores em cascata [18]:

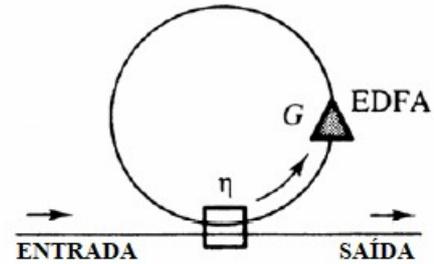


Fig. 2. Linha de atraso baseada em amplificadores em cascata. O sinal é aprisionado no loop e posto a circular o maior número de voltas possível até certo nível de degradação. Os parâmetros G e η , nesta ordem, se referem ao ganho da EDFA e a razão de acoplamento óptico.

A. Modelo do ganho de uma EDFA considerando o efeito de auto-filtragem (*self-filtering effect*) com deslocamento de frequência

O efeito de auto-filtragem (*self-filtering effect*) causa o estreitamento da largura de banda do ganho de uma EDFA [6]. Este fato por um lado é benéfico por filtrar o ruído ASE, no entanto, faz com que diferentes comprimentos de onda observem diferentes ganhos. O estudo propõe um modelo analítico baseado no desvio de frequência óptica de forma a evitar oscilações laser no interior do loop as quais limitam o número de voltas do sinal aprisionado [10].

A Fig. 3 elucida o comportamento do ganho para diferentes frequências de acordo com uma modelagem Lorentziana em que a frequência óptica do sinal está centralizada com o pico do ganho [7].

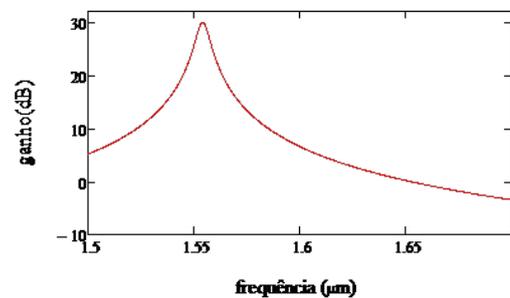


Fig. 3. Comportamento do ganho da EDFA para diferentes frequências.

A equação (6) descreve o comportamento do sinal, considerando o efeito de auto filtragem (*self-filtering effect*) bem como os deslocamentos de frequência, em que n (natural) é o número de voltas do *loop*, P_{s0} é a potência inicial do sinal, $G(i)$ é a função do ganho Lorentziana e L são as perdas do sistema:

$$P_s(n, P_{s0}) = \begin{cases} P_{s0} & \text{se } n = 0 \\ P_{s0} \cdot 10^{0,1[\sum_{i=1}^n G(i) - nL]} & \text{se } n > 0 \end{cases} \quad (6)$$

B. Emissão espontânea amplificada (ASE)

O espectro do ganho de uma EDFA está relacionado diretamente com a distribuição de potência ASE no amplificador [8]. Assim, considerando elevada a razão de extinção da chave óptica do circuito, de forma que o sinal possa ser bem selecionado em sua saída, a amplificação em cascata proporciona uma amplificação linear do ruído ASE.

Desta maneira, após a *enésima* volta no *loop*, a potência ASE é dada por (7), em que n_{sp} é o fator de emissão espontânea, $h\nu$ é a energia do fóton, B é a banda do efeito de auto filtragem e $g(n)$ é o ganho percebido por cada estágio de amplificação do ruído [9]:

$$P_{ASE}(n, P_{ASE0}) = \begin{cases} P_{ASE0} & \text{se } n = 0 \\ P_{ASE0} \cdot 10^{0,1[\sum_{i=1}^n G(i) - nL]} + 2n_{sp}h\nu B[g(n) - 1] & \text{se } n > 0 \end{cases} \quad (7)$$

C. Gráfico do sinal e do ruído ASE

Este estágio visa a representação gráfica do equacionamento das subseções A e B. A Fig. 4 apresenta o comportamento do sinal e do ruído ASE de acordo com o número de voltas no *loop*:

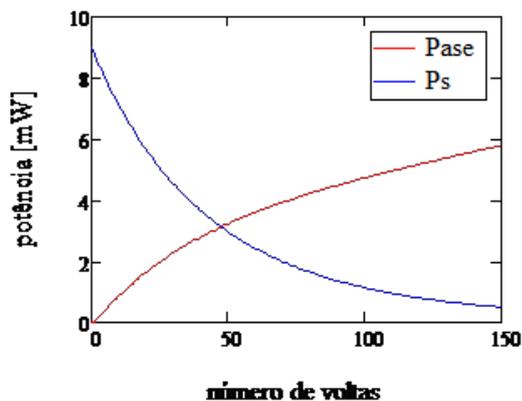


Fig. 4. Evolução das potências de sinal e de ruído de acordo com o número de voltas no loop.

IV. ANÁLISE E CONCLUSÕES

O artigo apresentou um modelamento matemático de amplificação óptica baseado em EDFA para emprego em memórias com vistas à investigação da aplicabilidade para atividades de Guerra Eletrônica.

Em um primeiro instante, o modelo demonstrou que pulsos ópticos podem ser armazenados em *loops* recirculantes, o que por definição garante uma excelente fidelidade do sinal ao final do percurso (processo totalmente analógico, característico de atividades de fotônica).

Em segunda instância, a recirculação do pulso apresentou bom tempo de armazenagem (50 voltas até a extinção do sinal) o que abre precedentes para implementação de componentes mais robustos nestas linhas para que a capacidade da memória seja ainda mais incrementada. Ademais, os equacionamentos permitem a análise pormenorizada de cada parâmetro na contribuição das amplificações tanto do ruído quanto do sinal.

Desta forma, conclui-se que linhas de atraso baseadas em EDFA são uma excelente alternativa de ruptura frente aos óbices enfrentados pelos DRFM, principalmente àqueles inerentes aos processos de digitalização, *up/down-conversion* e capacidade de memória.

REFERÊNCIAS

- [1] M. E. Belkin, "Design principles of long-term analog rf memory based on fiber-optics and rf photonics techniques," in *2016 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP)*, Oct 2016, pp. 21–22.
- [2] D. C. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, 1st ed. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 1999.
- [3] E. Chan and R. Minasian, "Single sideband suppressed carrier modulator based frequency shifting recirculating delay line microwave photonic filter," *Optics & Laser Technology*, vol. 45, pp. 160 – 167, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399212003258>
- [4] C. R. Giles and E. Desurvire, "Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 147–154, Feb 1991.
- [5] M. Tur and B. Moselehi, "Laser phase noise effects in fiber-optic signal processors with recirculating loops," *Opt. Lett.*, vol. 8, no. 4, pp. 229–231, Apr 1983. [Online]. Available: <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-8-4-229>
- [6] B. M. Desthieux, M. Suyama, and T. Chikama, "Theoretical and experimental study of self-filtering effect in concatenated erbium-doped fiber amplifiers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 8, pp. 1405–1411, Aug 1994.
- [7] K. Rottwitz, J. H. Povlsen, and A. Bjarklev, "Long distance transmission through distributed erbium-doped fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 12, pp. 2105–2115, Dec 1993.
- [8] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications*, ser. Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing. Wiley-Interscience, 2002. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=6UJGAAAAYAAJ>
- [9] N. S. Bergano and C. R. Davidson, "Circulating loop transmission experiments for the study of long-haul transmission systems using erbium-doped fiber amplifiers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 879–888, May 1995.
- [10] R. J. Wiegand, *Radar Electronic Countermeasures System Design*, ser. Artech House radar library. Artech House, 1991. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=Zt.pAAAAAMAAJ>
- [11] M. Movassaghi and M. K. Jackson, "Design and modelling of saturated erbium-doped fiber amplifiers," in *1999 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings: Nanostructures and Quantum Dots/WDM Components/VCSSELS and Microcavities/RF Photonics for CATV and HFC Systems (Cat. No.99TH8455)*, July 1999, pp. IV21–IV22.
- [12] S. Selvakennedy, M. A. Mahdi, P. Poopalan, and H. Ahmad, "Pump wavelength's influence in erbium-doped fibre amplifier performance," in *ICSE'98. 1998 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. Proceedings (Cat. No.98EX187)*, Nov 1998, pp. 124–128.
- [13] M. Peroni and M. Tamburrini, "Gain in erbium-doped fiber amplifiers: A simple analytical solution for the rate equations," *Optics letters*, vol. 15, pp. 842–4, 08 1990.
- [14] S. Novak and A. Moesle, "Analytic model for gain modulation in edfas," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 975–985, June 2002.
- [15] M. K. Dutta, "Design and performance analysis of edfa and soa for optical wdm networks: A comparative study," in *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, Dec 2017, pp. 1–6.
- [16] D. H. Richards, J. L. Jackel, and M. A. Ali, "A theoretical investigation of dynamic all-optical automatic gain control in multichannel edfa's and edfa cascades," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1027–1036, Aug 1997.
- [17] M. E. Belkin, T. N. Bakhvalova, I. V. Gladyshev, O. N. Egorova, and S. L. Semenov, "Continuously accessible long-term fiber optic memory of microwave signal," in *2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, Oct 2017, pp. 1–3.

- [18] T. A. Nguyen, E. H. W. Chan, and R. A. Minasian, "Photonic radio frequency memory using frequency shifting recirculating delay line structure," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 99–106, Jan 2014.