

Optimização eficiente do ganho espectral de amplificadores de Raman com bombagem distribuída por recurso a uma forma híbrida do Algoritmo Genético com o método de Nelder Mead

B. Neto, S. Stevan Jr, R. Nogueira, A. L. J. Teixeira, M. J. N. Lima, P. S. André

Resumo – Neste artigo, reportamos o uso do Algoritmo Genético (AG) na optimização espectral de um amplificador distribuído de Raman. A metodologia usada baseia-se na integração directa das equações de propagação de Raman usando o método da matriz de transferência, de que resulta uma considerável redução do tempo de computação. Apontando para um ganho on/off de 10 dB, desenvolveu-se uma metodologia baseada na combinação do AG com o método de Nelder-Mead que permite a determinação dos valores apropriados para a potência e para o comprimento de onda a ser usados nos lasers de bombeamento. Recorrendo a esta metodologia, optimizou-se um sistema com 5 lasers de bombeamento sobre uma largura espectral de 50 nm.

Abstract – We report the use of the Genetic Algorithm (GA) in the optimization of a distributed Raman amplifier spectral gain. The used methodology is based on the direct integration of Raman propagation equations making use of the transfer matrix method, which ensure into a considerable reduction of the computation time. Pointing out an on/off Raman gain of 10 dB, we develop a technique based in a combination of the GA with the Nelder Mead simplex method that selects the appropriate power level values as well as the operating wavelengths for the pumping lasers. By this way, we optimize a system with 5 pumping lasers the gain of 16 signals over a bandwidth of 50 nm.

I. INTRODUÇÃO

Os amplificadores distribuídos de Raman em fibra óptica (DRFA) surgem como uma promissora tecnologia a ser utilizada nos sistemas de comunicações ópticas de próxima geração, especialmente nos sistemas multicomprimento de onda (WDM) onde é requerida a amplificação simultânea de vários canais. Em sistemas completamente ópticos, onde foi suprimido o uso de repetidores, a necessidade de amplificação deve-se à atenuação da fibra. No caso da amplificação de Raman existe transferência de potência entre os sinais de bombeamento e os sinais de dados em consequência do espalhamento de Raman dos sinais ópticos induzido pelos modos vibracionais da Sílica. Apesar das convencionais fibras monomodo possuírem um espectro de ganho efectivo de Raman superior a 40 THz., este apresenta um valor relevante plano numa estreita gama (ver figura 1). Desta forma, para operar em maiores largura espectrais, é

necessário utilizar adequadamente vários lasers de bombeamento cujas potências e comprimentos de onda estão devidamente dimensionados [1]. A figura 1 representa o ganho de Raman normalizado para a área de uma fibra de Sílica monomodo.

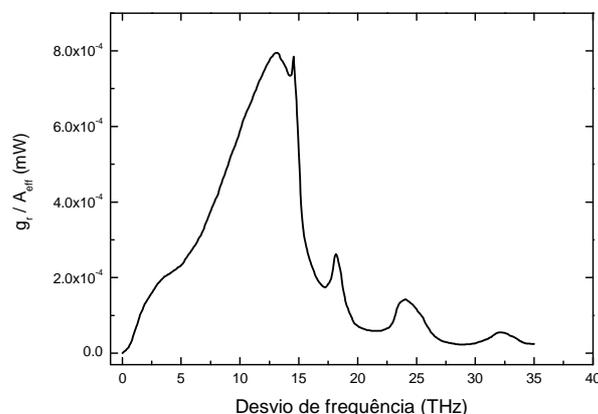


Figura 1 - Espectro do ganho de Raman para uma fibra de Sílica monomodo.

Entre as várias vantagens que os DRFA apresentam é possível destacar:

1. Simplicidade da sua arquitectura: é possível obter ganho de Raman sobre qualquer fibra óptica, desde que as potências dos lasers de bombeamento sejam suficientemente elevadas.
2. Baixo ruído: os DRFA apresentam figuras de ruído inferiores às dos EDFA.
3. Espectro de ganho com elevada largura espectral: desde que os lasers de bombeamento estejam devidamente dimensionados em termos de potência e comprimento de onda.
4. Flexibilidade na janela de transmissão: uma vez que é o comprimento de onda do laser de bombeamento que determina o espectro de ganho, este pode ser ajustado. Assim, as arquitecturas com vários desses lasers permitem tanto o alargamento do espectro de ganho como a sua equalização.
5. Elevada potência de saturação: definida pela potência do sinal de bombeamento e usualmente maior que a dos EDFA.

O desenvolvimento de um simulador que dimensione

de forma eficiente os lasers de bombeamento sobre um dado espectro compreende normalmente duas fases: a integração das equações de Raman e o cálculo do ganho, seguido da optimização dos parâmetros relativos aos lasers de bombeamento (potências e comprimentos de onda).

Atendendo a que o processo numérico de optimização (qualquer que ele seja) é sempre mais ou menos computacionalmente moroso, é importante que a primeira fase seja o mais rápida possível, pelo que é recomendável o recurso a métodos semi-analíticos ao invés de métodos puramente numéricos.

Quanto ao processo de optimização, as características do problema em estudo reforçam a necessidade do uso de um método de procura global suficientemente robusto, como é o caso do Algoritmo Genético (AG), contudo a morosidade deste algoritmo na sua forma simples pode constituir um problema no desenvolvimento de um simulador eficiente, pelo que se mostrou vantajoso associá-lo ao método de Nelder-Mead (um método de procura local). Assim sendo, este artigo apresenta a metodologia usada para optimizar de forma eficiente o espectro de ganho de um DRFA recorrendo a uma metodologia de optimização híbrida [2].

O artigo encontra-se estruturado da seguinte forma: na secção II apresentam-se as equações de propagação de Raman para sinais e bombas assim como uma abordagem semi-analítica para a sua implementação. Na secção III apresenta-se o método de optimização usado (uma forma híbrida AG com o método de Nelder-Mead). Na secção IV mostra-se a metodologia usada assim como a discussão de resultados obtidos. Finalmente, na secção V apresentam-se as conclusões finais do artigo.

II. EQUAÇÕES DE RAMAN

A descrição da propagação de sinais e bombas num amplificador de Raman com bombeamento distribuído e bidireccional implica a contabilização de um número elevado de efeitos. Para a simulação da evolução da potência óptica com o comprimento da fibra, é razoável considerar apenas as interacções bomba-bomba, bomba-sinal e a atenuação na fibra, do que resulta no seguinte sistema não linear de equações diferenciais ordinárias acopladas [3].

$$\pm \frac{dP_i}{dz} = \left[-\alpha_i + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{g_R(v_i - v_j)}{\Gamma A_{eff}} P_j - \sum_{j=i+1}^m \frac{v_i g_R(v_i - v_j)}{v_j \Gamma A_{eff}} P_j \right] P_i \quad (1)$$

Os sinais \pm referem-se respectivamente aos sentidos co e contrapropagante. P_i , v_i e α_i designam respectivamente a potência, a frequência e a atenuação do sinal de índice i . A_{eff} representa a área efectiva da fibra óptica, sendo que Γ é uma grandeza adimensional relacionada com efeitos de polarização aleatórios e assume valores entre 1 e 2.

$g_R(v_j - v_i)$ é o coeficiente do ganho de Raman entre a onda j e a onda i . As frequências estão numeradas numa ordem decrescente ($i=1, 2, \dots, m$). De referir que os termos do somatório de $j=1$ a $j=i-1$ representam amplificação enquanto que os termos do somatório de $j=i+1$ a $j=m$ são responsáveis pela depleção do sinal. Também é de referir que o modelo descrito pelo sistema de equações (1) não tem em consideração os efeitos relacionados com a dispersão espontânea de Raman nem a retrodispersão de Rayleigh, uma vez que estes não afectam o perfil do espectro do ganho.

Numa abordagem semi-analítica, o sistema de equações diferenciais (1) pode ser simplificado na seguinte forma [4]:

$$\pm \frac{dP_i}{dz} = [-\alpha_i + A_i - B_i] P_i^\pm \quad (2)$$

Onde A_i e B_i são dados por:

$$A_i = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{g_R(v_i - v_j)}{\Gamma A_{eff}} [P_j^\pm + P_j^\mp] \quad (3)$$

$$B_i = \sum_{j=i+1}^m \frac{g_R(v_i - v_j)}{\Gamma A_{eff}} [P_j^\pm + P_j^\mp]$$

Numa secção elementar de fibra de extensão Δz , a solução obtém-se analiticamente será:

$$P_{i+1}^\pm = P_i^\pm G_i \quad (4)$$

Sendo que G é definido por:

$$G_i = \exp[(-\alpha_i + A_i - B_i)\Delta z] \quad (5)$$

O termo entre parêntesis rectos das expressões A e B pode ser substituído pelo valor médio em cada secção definido por:

$$\langle P_i \rangle = P_i^\pm \frac{G_i - 1}{\ln(G_i)} \quad (6)$$

De referir que as dificuldades numéricas inerentes à integração de um sistema de equações diferenciais não lineares e acopladas são ultrapassadas, uma vez que na nova abordagem os valores de entrada são calculados usando uma média de potências e os valores de saída são calculados directamente a partir dos valores de entrada usando uma matriz de transferência, de forma iterativa até à outra extremidade da fibra óptica. Este procedimento apresenta como vantagens uma considerável redução do tempo de computação visto que substituiu-se o cálculo de integrações numéricas por formas algébricas mais simples.

III. ALGORITMO HÍBRIDO

O algoritmo híbrido apresentado neste artigo consiste numa combinação do AG com o método de Nelder-Mead. O uso do AG tornou-se imperativo devido à necessidade de usar um método de procura global na optimização espectral do ganho que fosse também suficientemente robusto. Contudo, devido à natureza estocástica deste

algoritmo, os tempos de computação necessários até se encontrar convergência podem ser bastante elevados entravando assim a sua aplicação em situações mais práticas [5-6]. Assim sendo, decidimos combinar o AG com um método de procura local numa fase da procura em que este consegue alcançar soluções óptimas mais rapidamente que o AG. Escolheu-se o método de Nelder-Mead

A. Algoritmo Genético

Os AG são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução. Estes algoritmos modelam uma solução para um problema específico numa estrutura de dados como a de um cromossoma e aplicam operadores que recombinam estas estruturas preservando informações críticas. Uma implementação do AG começa com uma população (geralmente aleatória) de cromossomas. Estas estruturas são então avaliadas para gerar oportunidades reprodutivas de forma que, cromossomas que representam uma solução "melhor" tenham maiores hipóteses de se reproduzirem do que os que representam uma solução "pior" [7-8]. Numa utilização mais abrangente, um algoritmo genético é qualquer modelo baseado em populações que utiliza operadores de selecção e recombinação para gerar novos pontos amostrais num espaço de busca. Esta abordagem apresenta grande vantagem na optimização de funções.

B. Método de Nelder Mead

O algoritmo de Nelder-Mead é um método de procura directa (apenas usa informação da função objectivo) que se destina a problemas de optimização multidimensional. Para um problema de dimensão n , o algoritmo usa um conjunto $n+1$ de pontos no início de cada iteração, considerados os vértices de um simplex de dimensão n ordenados por ordem crescente da função objectivo [9-10]. O algoritmo consiste em determinar um novo simplex por substituição do ponto X_{n+1} por outro com um valor menor da função objectivo ou encolhendo o simplex. A determinação de um novo ponto pode ser feita através de pontos auxiliares que podem definir vértices reflectidos, expandidos e contraídos.

IV. METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A configuração de teste utilizada encontra-se esquematizada na figura 2 com 16 sinais (com espaçamento de 400 GHz) e 5 lasers de bombeamento contrapropagantes. Os sinais de bombeamento são injectados na fibra óptica através de um acoplador multiplexador, combinando-se seguidamente com os 16 sinais inicialmente com potência óptica de 1 μ W num troço de fibra monomodo padrão (SMF) com 25 km de extensão. Depois da implementação das equações (1-6)

procedeu-se à optimização das potências dos lasers de bombeamento por forma a minimizar o "ripple" do espectro de ganho usando a metodologia híbrida (AG com o método de Nelder-Mead). Para ultrapassar o problema de valor de fronteira que decorre das existências de condições fronteira em ambas as extremidades da fibra (sinais de um lado e bombas do outro), implementou-se a solução de outra forma multiplicando as equações das bombas por (-1) e integrando-se no sentido contrário. Como se pretende optimizar o ganho, é irrelevante se o algoritmo calcula as potências das bombas no extremo inicial, uma vez que o cálculo dos valores de potência no extremo oposto é trivial. As implementações computacionais foram levadas a cabo usando o Matlab®, através de um processador Pentium IV a 2.4 GHz.

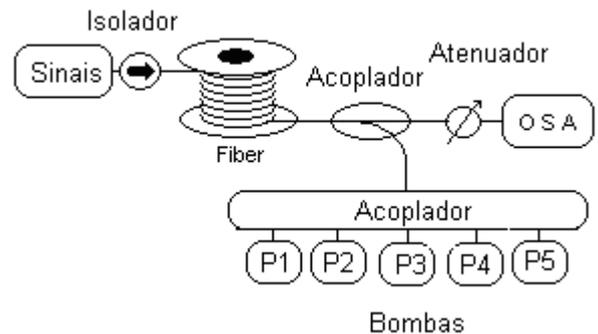


Figura 2 – Esquema da metodologia usada na simulação de 16 sinais copropagantes e 5 bombas contrapropagantes.

Na implementação do AG foi usada uma população com 20 indivíduos, tendo-se previamente definido um número de gerações igual a 100 antes de transitar para o método de Nelder-Mead. Assim sendo, conseguiu-se um "ripple" de 0.23 dB calculado num tempo de aproximadamente 33 minutos. Os valores obtidos para as potências das bombas depois da optimização assim como os seus comprimentos de onda, encontram-se listados na tabela 1.

Bombas	Comprimento de onda (nm)	Potência (mW)
1	1424.31	134.78
2	1433.37	105.47
3	1441.42	209.21
4	1464.96	209.21
5	1481.65	104.04

Tabela1 – Comprimentos de onda e potências das 5 bombas usadas.

Os resultados relativos ao espectro do ganho encontram-se ilustrados na figura 3, onde é possível visualizar a redução de "ripple" do ganho numa largura espectral de 50 nm.

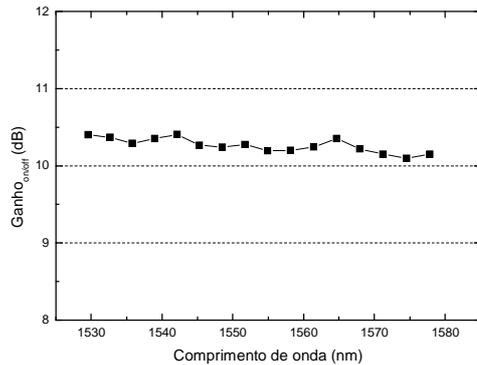


Figura 3 – Espectro otimizado do ganho.

A figura 4 apresenta a evolução das potências das bombas e dos sinais ao longo da fibra óptica. Note-se que é possível visualizar o efeito de amplificação nos sinais assim como a depleção das bombas.

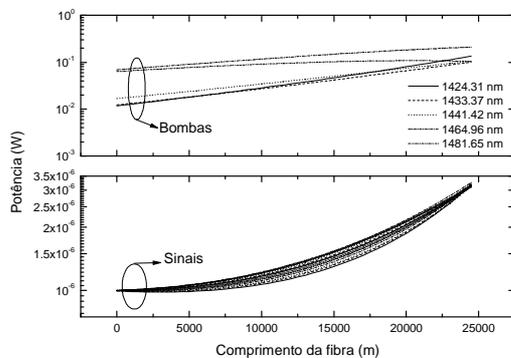


Figura 4 – Evolução espacial das potências dos sinais e bombas ao longo da fibra óptica.

V. CONCLUSÕES

Apresentou-se um modelo eficiente para optimização espectral do ganho de amplificadores distribuídos de Raman em fibra óptica baseado numa configuração híbrida do AG com o método de Nelder-Mead. Para uma situação prática relativa à propagação de 16 sinais numa largura de 50 nm bombeados por 5 lasers contrapropagantes com comprimentos de onda definidos e apontando para um ganho on/off de 10 dB, obteve-se um “ripple” de aproximadamente 0,23dB num tempo de simulação de aproximadamente 33 minutos. De relevar que a combinação da metodologia semi-analítica para integrar o sistema de equações de Raman com a optimização híbrida AG e Nelder-Mead permite uma considerável redução do tempo computacional necessário, viabilizando a sua aplicação em situações práticas.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Headley, G. P. Agrawal, *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*, San Diego, CA: Academic, 2005, ch3
- [2] X. Liu, “Optimization for various schemes of distributed fibre Raman amplifiers”, *J. Opt A: Pure Appl Opt*, vol. 6, pp. 1017-1026, Sep. 2004
- [3] H. Kirdov, K. Rottwitz, M. Nissov, M. Ma, E. Ribarijaona, “Pump interaction in a 100-nm bandwidth Raman amplifier”, *IEEE Photon Technol. Lett*, vol.4, pp. 1273-1275, Nov. 1992
- [4] B. Min, W. J. Lee, N. Park, “Efficient formulation of Raman amplifier propagation equation with average power analysis”, *IEEE Photon. Technol Lett.*, vol.12, nº11, pp. 1486-1488, Nov. 2000
- [5] [C. R. Houck, J. A. Joines, M. G. Kay, “A Genetic Algorithm for Function Optimisation: A Matlab Implementation”, NSCU-IE Technical Report 95-09, 1995
- [6] Berta Neto, Sergio Stevan Jr, António Teixeira, Paulo S. André, “Efficient Gain Optimization of Raman Amplifiers: Genetic Algorithm Approach”, 13th International Conference on Telecommunications 9-12 May, Funchal, 2006.
- [7] B. Neto, S. Stevan Jr, A. Teixeira, P. André, Efficient Simulation of Raman Amplifiers Propagation Equations and Spectral Gain with Optimization Techniques, Proc European Conf. on Networks and Optical Communications - NOC, Berlin, Germany, Vol. 1, July 2006.
- [8] [D. E., Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning*, Massachusetts: Addison-Wesley co, 1989
- [9] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wrigth, P. E. Wrigth, “Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions”, *SIAM J. Optim*, vol. 9, n. 1, pp. 112-147, 1998
- [10] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. (1986), *Numerical Recipes*, Cambridge University Press.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo programa POSC, financiado pelo fundo FEDER da União Europeia e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através dos projectos ARPA (POSI/EEA-CPS/55781/2004) e TECLAR (POCI/A072/2005).