

## Ferramenta de Simulação para Análise Espectral de Redes de Bragg

Rogério P. Dionísio <sup>(1,3)</sup>, Mário J. Lima <sup>(2,3)</sup>, J. R. Ferreira da Rocha <sup>(2,3)</sup>, J. L. Pinto <sup>(4,3)</sup>, António J. Teixeira <sup>(2,3)</sup>

<sup>1</sup>Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco, 6000-767 Castelo Branco

<sup>2</sup>GCO, Dep. de Electrónica e Telecomunicações, U. de Aveiro, 3810-193 Aveiro

<sup>3</sup>Instituto de Telecomunicações, U. de Aveiro, 3810-193 Aveiro

<sup>4</sup>Dep. de Física, U. de Aveiro, 3810-193 Aveiro

**Resumo** – As redes de Bragg (FBG) tornaram-se componentes importantes na redes de comunicações ópticas, pois permitem a realização de várias operações sem a necessidade de conversão opto-electrónica. Este artigo descreve uma ferramenta de software para simulação e caracterização de redes de Bragg por nós inteiramente concebida. A interface gráfica foi programada utilizando o ambiente GUIDE do Matlab. É assim possível analisar um leque variado de FBGs, tendo em consideração os efeitos secundários provocados pela variação do índice de refração médio, durante o processo de fabrico.

**Abstract** - Fiber Bragg gratings are becoming important components for optical communication networks, allowing many operations to be realized without the need of conversion between electrical and optical domain. This paper presents a simulation and design tool for spectral characterization of Bragg gratings, based on Matlab, together with a graphical user interface created from GUIDE toolbox, and entirely developed by us. A wide selection of fiber gratings can be analyzed, taking into account the undesirable effects of fabrication process on the averaged refractive index of the expected grating.

### I. INTRODUÇÃO

As redes de Bragg inscritas em fibra óptica resultam da modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra, ao longo de um comprimento relativamente pequeno, podendo variar entre alguns milímetros e vários centímetros. Dadas as suas características, as utilizações das FBGs têm-se verificado em campos muito diversos que vão desde a compensação da dispersão em *links* de fibra óptica [1], aos multiplexadores ópticos (OADM) [2] e mais recentemente, nos módulos de codificação e descodificação CDMA ópticos [3] e em correladores para reconhecimento de pacotes [4].

Este artigo descreve uma ferramenta de software para análise e simulação de FBGs, e está dividido em quatro

secções. Na secção II será abordada o método para a caracterização física das redes de reflexão, sendo observada a formulação necessária, assim como os processos numéricos envolvidos no cálculo do espectro. Os parâmetros mais importantes serão descritos e analisados. A secção III mostra os resultados alcançados com esta ferramenta, sendo estes comparados com outros métodos de análise. Por fim, as principais conclusões são apresentadas na secção IV.

### II. CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

A variação do índice de refração ao longo da rede de Bragg é, tipicamente, sinusoidal,

$$n(z) = n_{eff} + \Delta n_{eff} = n_{eff} + \overline{\delta n_{eff}} f(z) \left\{ n_{th}(z) + v \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad 0 < z < L \quad (1)$$

onde a distância  $z$  varia entre 0 e  $L$ , sendo 0 a entrada do grating,  $n_{eff}$  o índice de refração efectivo antes da irradiação,  $\overline{\delta n_{eff}} f(z)$  é o formato da perturbação do índice, em que  $f(z)$  é a apodização normalizada e  $\overline{\delta n_{eff}}$  é a profundidade da modulação;  $v$  é o factor de visibilidade da modulação,  $\Lambda$  é o período de modulação da rede e  $\phi(z)$  descreve a variação do período  $\Lambda$ . O parâmetro  $n_{th}(z)$  descreve a variação do valor médio da perturbação ao longo da rede:

$$n_{th}(z) = n_{DC} + n_{AC} f'(z) \quad (2)$$

sendo neste caso  $n_{DC}$  o valor médio normalizado,  $n_{AC}$  a sua amplitude normalizada e  $f'(z)$  a função de variação deste parâmetro. Este parâmetro deve ser incluído para permitir maior liberdade na definição dos gratings e assim poder aproximar melhor casos de gratings mais complexos fruto

de processos de fabrico que podem por vezes produzir FBG com valor médio variável.

No software implementado, o utilizador tem a possibilidade de definir, por intermédio da interface gráfica, todos os parâmetros associados à rede de Bragg. Esses parâmetros dividem-se em 5 grupos específicos. 1º- as opções numéricas definem o número de pontos simulados, e o campo das propriedades do espectro define o comprimento de onda  $\lambda_{max}$  onde se pretende máxima reflectividade além da gama espectral. 2º-o campo *Grating Properties* permite ajustar os parâmetros do perfil. A variação do período da FBG vem caracterizado pelo termo de fase  $\phi(z)$ , e depende do coeficiente de aperiodicidade  $d\lambda_B/dz$ :

$$\phi(z) = -\frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_B^2} \frac{d\lambda_B}{dz} z^2 \quad (3)$$

onde  $\lambda_B$  é o comprimento de onda que verifica a condição de Bragg:

$$\lambda_B = \frac{n_{eff}\lambda_{max} + \sqrt{(n_{eff}\lambda_{max})^2 - 4(n_{eff} + \langle n_{th} \rangle \bar{\delta}_{neff}) \left( n_{eff} L \frac{d\lambda_B}{dz} \lambda_{max} \right)}}{2(n_{eff} + \langle n_{th} \rangle \bar{\delta}_{neff})} \quad (4)$$

em que  $\langle n_{th} \rangle$  é o valor médio de  $n_{th}(z)$ :

$$\langle n_{th} \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L n_{th}(z) dz \quad (5)$$

Estão disponíveis diversos formatos de apodização  $f(z)$  e  $f'(z)$ , com parâmetros variáveis:

- Perfil tanh, com parâmetro  $\eta$ :

$$f(z) = \frac{\tanh\left\{\eta\left[1 - 2|(z - L/2)/L|\right]\right\}}{\tanh(\eta)} \quad (6)$$

- Perfil Blackman, com parâmetro  $\alpha$ :

$$f(z) = \frac{1 + (1 + \alpha)\cos(x) + \alpha\cos(2x)}{2(1 + \alpha)}, x = \frac{2\pi(z - L/2)}{L} \quad (7)$$

- Perfil gaussiano, com largura a meia altura  $L/\beta$ :

$$f(z) = \exp\left[-\frac{4\ln(2)(z - L/2)^2}{(L/\beta)^2}\right] \quad (8)$$

- Perfil sinc, com o parâmetro  $M$  definindo o número de lobos:

$$f(z) = \frac{\sin((M + 1)\pi(z - L/2)/L)}{(M + 1)\pi(z - L/2)/L}, M > 0 \quad (9)$$

- Perfil seno elevado, com ordem  $n$ :

$$f(z) = \sin^n(\pi z / L), n \geq 0 \quad (10)$$

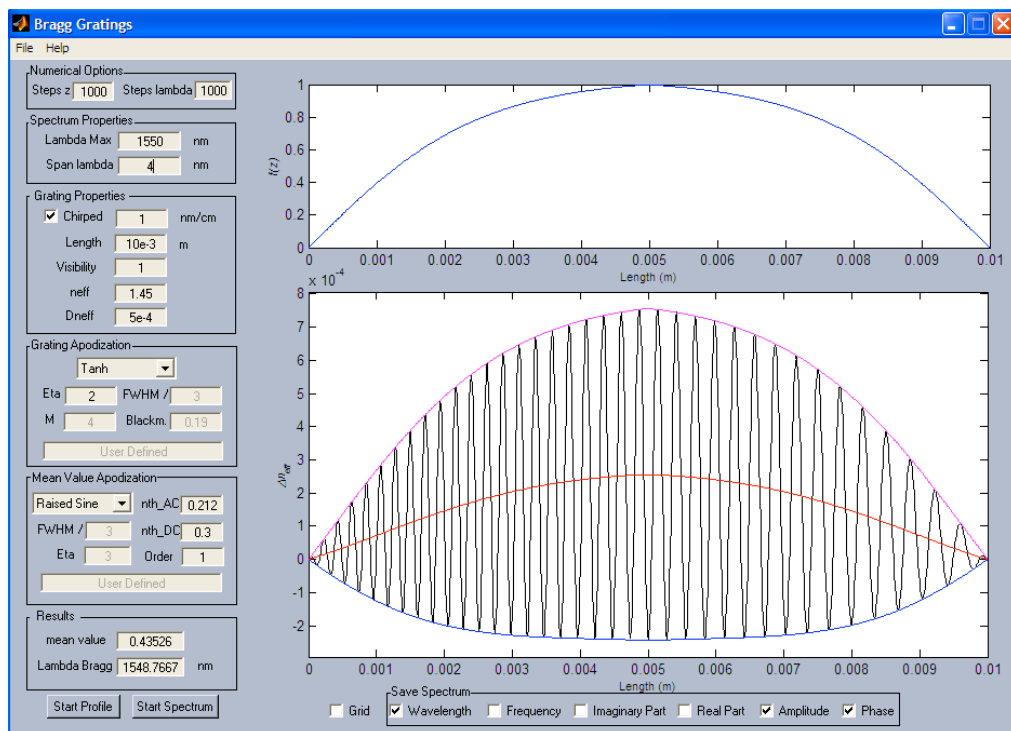


Figura 1 Interface gráfica para caracterização da rede.

O utilizador pode definir outros formatos de apodização, mediante a escrita de uma função.

O perfil da fibra definido após a escolha de todos os parâmetros é obtido usando o botão *Start Profile*. A Figura 1 mostra a interface gráfica na fase de definição do perfil, mostrando no gráfico superior o formato da apodização  $f(z)$ , e no outro gráfico o perfil resultante da simulação em conjunto com os limites máximo, mínimo e o valor médio. O período da rede representada foi propositadamente aumentado para efeitos de visualização. Além dos gráficos, o utilizador pode consultar o valor médio do índice de refração e o comprimento de onda de Bragg.

O modelo teórico da rede de Bragg foi baseado na teoria dos modos acoplados (CMT), onde dois modos de propagação de sentidos opostos interagem mutuamente [5], e cujo resultado pode ser formulado por uma equação diferencial única, conhecida por equação de Riccati:

$$\frac{dr(z)}{dz} = i \left\{ \hat{\sigma}(z)r(z) + k(z) \left[ 1 + r^2(z) \right] \right\} \quad (11)$$

$r(z)$  é o coeficiente de reflexão,  $k(z)$  está associado à apodização da FBG:

$$k(z) = \pi \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{\lambda} v f(z) \quad (12)$$

E  $\hat{\sigma}(z)$  é o factor de dessintonia da rede:

$$\hat{\sigma}(z) = 2\pi n_{eff} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + 2\pi \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{\lambda} f(z) n_{th}(z) - \frac{1}{2} \frac{d\phi(z)}{dz} \quad (13)$$

A equação diferencial (11) é não linear, de coeficientes variáveis, e tem solução fechada quando a apodização é uniforme, com valor médio constante e sem variação do período  $\Lambda$  [5]:

$$r = \frac{-k \sinh(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} L) + i \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} L)} \quad (14)$$

Para as simulações com apodizações não uniformes, são necessários métodos de cálculo numéricos para a obtenção de uma solução. Existem diversos processos como o método das Matrizes [11], a solução iterativa das equações acopladas de Gel'Fand-Levitan-Marchenko [8], o método de Rouard [10], os algoritmos genéticos [9] ou mesmo a transformada de Fourier [6][7].

Esta aplicação utiliza a integração numérica directa da equação diferencial (11) pelo método de Euler modificado [12]:

$$r_{n+1} = -\frac{\Delta z}{2} \left( \frac{dr_n}{dz} + \frac{dr_{n+1}}{dz} \right) + r_n \quad (15)$$

Sendo  $\Delta z$  a largura de cada secção da fibra, e  $r_{n+1}$  a solução. É uma equação em geral não linear em  $r_{n+1}$ , que aparece em ambos os membros da equação. Introduzindo a condição fronteira  $r_n = r(L) = 0$  para uma rede de Bragg de comprimento  $L$ , a equação (15) é resolvida iterativamente, utilizando como primeira estimativa para  $r_{n+1}$ :

$$r_{n+1} = -\Delta z \frac{dr_n}{dz} + r_n \quad (16)$$

O processo é repetido para cada secção  $\Delta z$ , e termina quando  $r_{n+1} = r(0)$ .

O erro global de truncatura para este método é da ordem de  $(\Delta z)^2$ .

### III. RESULTADOS

Após a escolha do perfil do índice de refração, a resposta espectral é simulada pelo uso do botão "*Start Spectrum*". Foi realizada uma simulação para uma rede de Bragg com máxima reflectividade para 1550 nm, apodização tangente hiperbólica ( $\eta=2$ ) e valor médio definido pela expressão  $n_{th}(z) = 0.3 + 0.212 \sin(2\pi/L)$ ; O comprimento definido foi 10 mm e a variação máxima do índice de refração  $5 \times 10^{-3}$ . O resultado apresentado na figura 2(a) mostra o espectro de reflexão  $R = 10 \log(|r^2|)$  e o atraso de grupo  $\tau_p$  em função do comprimento de onda. Este último parâmetro reflecte a dependência da fase  $\theta_p$  com o comprimento de onda:

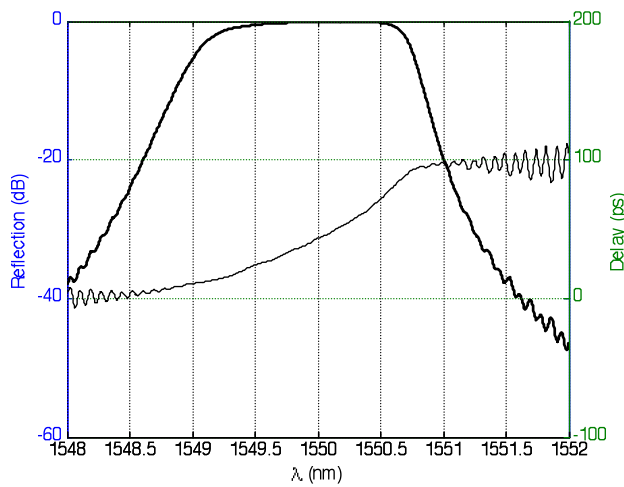
$$\tau_p = \frac{d\theta_p}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_p}{d\lambda} \quad (17)$$

A dispersão quantifica a variação do atraso de grupo em função de  $\lambda$ :

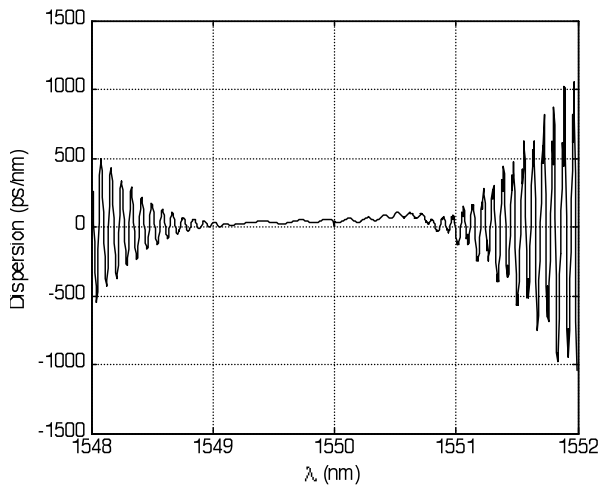
$$d_p = \frac{d\tau_p}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\theta_p}{d\omega^2} \quad (18)$$

e está representada na figura 2(b).

Os valores do espectro obtidos por simulação podem ser armazenados em ficheiro, quer na forma cartesiana ou polar, em conjunto com a gama de frequências ou comprimentos de onda definidos na interface gráfica. É assim possível comparar ou utilizar os resultados desta aplicação noutras ferramentas de simulação de FBGs.



(a)



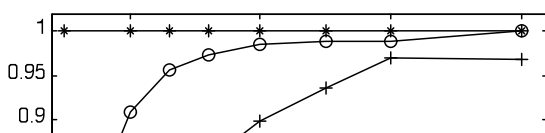
(b)

Figura 2 Espectro de reflexão e atraso de grupo (a) e dispersão (b) em função do comprimento de onda

Foram realizadas várias simulações no sentido de comprovar a validade dos dados obtidos, para o caso concreto de uma rede uniforme com valor médio nulo e de período  $\Lambda$  constante.

O processo utilizado tem por base a medida do coeficiente de correlação máximo entre o espectro de reflexão obtido por simulação, e aquele que resulta da solução fechada com a equação (14), para redes com  $L$  igual a 2, 30 e 50mm.

Da análise da figura 3 verifica-se que a aproximação melhora proporcionalmente com o número de pontos, e que redes de menores dimensões convergem para a solução exacta mais rapidamente. Por outro lado, a figura 4 mostra que uma correlação cruzada superior a 0.99 para os três casos analisados se atinge com secções de dimensão inferior a 13  $\mu\text{m}$ .



#### IV CONCLUSÕES

Foi apresentada uma ferramenta simulação para caracterização do índice de refração da rede de Bragg, e caracterização da sua resposta espectral. É de fácil utilização, permitindo uma análise sistemática das redes de Bragg. O processo numérico adoptado produz resultados coerentes, quando comparado com a solução fechada, para o caso de uma rede uniforme de período constante.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT pelo projecto WO-Net (POSI/2001/CPS/40009).

#### REFERÊNCIAS

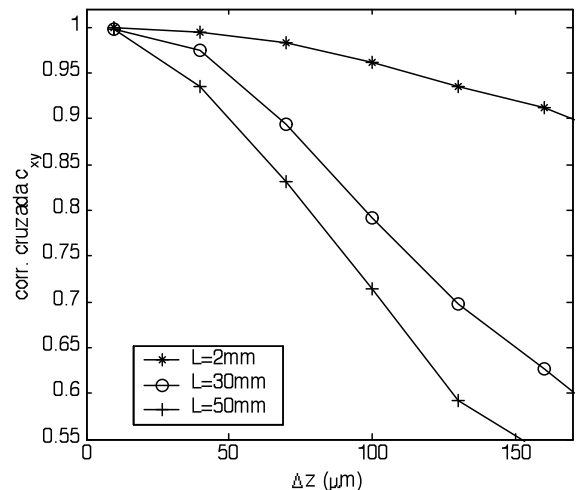


Figura 4 Correlação cruzada entre a curva de simulação e a solução exacta em função da largura do passo.

[1] A. Othonos, K. Kalli, "applications of Bragg Gratings in Communications," *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Artech House, 1999.

[2] D. Pastor, J. Capmany, D. Ortega, V. Tatay, J. Martí, "Design of apodized linearly chirped Bragg gratings for dispersion compensation," *J. Lightwave Tech.*, vol. 14, 1996.

[3] L. R. Chen, "Flexible Fiber Bragg Grating Encoder/Decoder for Hybrid Wavelength-Time Optical CDMA", *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol. 13, pp. 1233-1235, 2001.

[4] J. E. McGeehan, M. C. Hauer, A. E. Willner, "Optical header recognition using fiber Bragg grating correlators," *IEEE LEOS Newsletter*, vol. 16, pp.29-33, 2002.

[5] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Lightwave Tech.*, vol.15, pp. 1277-1294, 1997.

[6] J. C. Aguado, P. Fernandez, I. Miguel, F. González, j. Blas, R. M. Lorenzo, E. J. Abril, M. López, "A Fourier transform approximation for Bragg grating reflection filters," *Proceedings of Network and Optical*

Communications Conferences, Long-Haul and Access Networks, Optical and WDM, pp. 298-304, IOS Press, 2001.

[7] M. C. Parker, R. J. Mears, S. D. Walker, "High refractive index contrast Bragg gratings: An accurate transform theory," Fourth Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguide Meeting, paper BThC10-1, 2001.

[8] E. Peral, J. Capmany, J. Marti, "Iterative solution to the Gel'Fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, pp. 2078-2084, 1996.

[9] J. Skaar and K. M. Risvik, "A genetic algorithm for the inverse problem in synthesis of fiber gratings," *J. Lightwave Tech.*, vol.16, pp. 1928-1932, 1998.

[10] R. Kashyap, "Theory of fiber Bragg gratings," *Fiber Bragg gratings*, Academic Press, 1999.

[11] A. Othonos, K. Kalli, "Fiber Bragg grating theory," *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Artech House, 1999.

[12] M. Rosa, M. M. Graça, "Tópicos de Análise Numérica – Método Numéricos," pp. 188-198, Universidade de Aveiro, 1992.