

Redes de Bragg para filtragem em sistemas WDM

Mário J. N. Lima, António L. J. Teixeira, J. R. Ferreira da Rocha

Resumo - Nesta contribuição demonstra-se a eficiência de redes de Bragg apodizadas, com variação negativa do índice de refração, como filtros ópticos em sistemas com multiplexagem no comprimento de onda (WDM), actuando simultaneamente como demultiplexadores e compensadores da dispersão da fibra de transmissão. Usando uma rede de Bragg com apodização negativa e de formato Gaussiano, é possível demultiplexar um sinal WDM de 160 Gbit/s (8x20 Gbit/s) compactado em aproximadamente 1.5 nm (≈ 0.85 bit/s/Hz de eficiência espectral).

Abstract - In this contribution it is demonstrated the efficiency of apodized Bragg gratings, with negative variation of the refractive index, as optical filters in wavelength division multiplexing (WDM) systems, acting simultaneously as demultiplexers and dispersion compensators. Using a negative apodized Bragg grating, with a Gaussian profile, it is possible to demultiplex a 160 Gbit/s (8x20 Gbit/s) WDM signal packed in approximately 1.5 nm (≈ 0.85 bit/s/Hz spectral efficiency).

I. INTRODUÇÃO

A fotosensibilidade em fibras ópticas induz uma mudança permanente do índice de refração do seu núcleo, quando este é exposto a uma radiação com comprimento de onda e intensidade apropriados. Este fenómeno tem sido largamente investigado nos últimos anos, uma vez que está na base da produção de redes de Bragg, utilizadas em larga escala nos sistemas de telecomunicações e em sensores. Na sequência de muitos anos de investigação, a fotosensibilidade tem sido observada através da foto-excitação com radiações UV de diferentes comprimentos de onda e potências, numa grande variedade de fibras, com dopagens distintas, resultando em diferentes crescimentos dinâmicos das redes de Bragg. Actualmente distinguem-se três tipos de regimes na produção de redes de Bragg [1].

O primeiro regime, observado na maior parte das experiências de escrita de redes, corresponde a um crescimento gradual da amplitude de variação do índice de refração, geralmente obtida por exposição da fibra a radiação UV de pouca duração e potência, e a rede de Bragg que se obtém é do tipo I. No segundo caso, resultante do prolongamento do tempo de exposição ou do aumento da potência que incide em fibras com elevada concentração de germânio, verifica-se que depois de um crescimento inicial na amplitude e valor médio da

variação do índice de refração, se segue um aumento da amplitude da variação e redução do seu valor médio, que poderá anular-se ou eventualmente ser negativo, dependendo da fibra e do tempo de exposição da radiação. A rede de Bragg formada é referida como sendo do tipo IIa. Se, no entanto, o nível de potência que incide na fibra for muito elevado, geram-se as redes de elevada variação do índice de refração devida a danos na matriz vítrea, e que são denominadas de redes de tipo II.

Um caso potencialmente interessante das redes de Bragg do tipo IIa é quando o valor médio da variação do índice de refração toma valores inferiores ao do índice de refração inicial da fibra, dizendo-se nesses casos que estamos na presença de uma variação de índice negativa [2]. Estas redes de Bragg possuem as vantagens das redes de tipo IIa sobre as redes mais usuais de tipo I, nomeadamente uma maior estabilidade da resposta espectral com a temperatura e maior temperatura de apagamento [2]. Adicionalmente, a sua resposta em termos de atraso introduzido em função do comprimento de onda pode resultar na compensação da dispersão cromática de uma fibra de transmissão. Este tipo de redes pode então ser vantajoso para ser utilizado em multiplexadores ou demultiplexadores em sistemas ópticos com multiplexagem no comprimento de onda (WDM: *Wavelength Division Multiplexing*), desempenhando simultaneamente a função de filtro de elevada rejeição fora da banda e compensador de dispersão.

No ponto seguinte caracteriza-se a resposta espectral de redes de Bragg apodizadas, identificando os parâmetros que podem ser optimizados para se obter a melhor *performance* do sistema WDM em que estão inseridos. Seguidamente, optimiza-se o espaçamento entre canais para um sistema WDM em particular, optimizando as características das redes de Bragg usadas como filtros ópticos.

II. CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DA RESPOSTA ESPECTRAL DE REDES DE BRAGG

Como foi referido, as redes de Bragg apresentam uma perturbação no índice de refração efectivo, n_{eff} , dada por [3]:

$$\delta n_{eff}(z) = \bar{\delta n}_{eff} f(z) \left\{ n_{th} + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

onde z representa a distância da entrada da rede, $\bar{\delta}n_{eff} f(z)$ é o formato da apodização, com $f(z)$ normalizada para um valor máximo de 1, ν é a visibilidade do índice de refração, Λ é o período da rede, $\phi(z)$ descreve o *chirp* (variação do período) da rede e n_{th} é o *offset* que determina o valor médio da perturbação do índice.

A resposta espectral da rede de Bragg resulta do acoplamento entre a luz viajando em ambos os sentidos dentro da rede, e pode ser obtida resolvendo a equação diferencial de *Ricatti* [4]:

$$\frac{dr(z)}{dz} = +j\{2\sigma(z)r(z) + k(z)[1 + r^2(z)]\} \quad (2)$$

considerando as condições fronteira apropriadas. Na eq. 2 $r(z)$ é o quociente entre as amplitudes das ondas propagando-se para trás e para a frente, e os parâmetros $\sigma(z)$ e $k(z)$ são dados respectivamente por [5]:

$$\sigma(z) = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda_B} n_{th} \bar{\delta}n_{eff} f(z) - \frac{1}{2} \frac{d\phi(z)}{dz} \quad (3)$$

$$k(z) = \frac{\pi}{\lambda_B} \nu \bar{\delta}n_{eff} f(z) \quad (4)$$

com o comprimento de onda de Bragg, λ_B , definido como $2n_{eff}\Lambda$. A máxima reflectividade ocorre para o comprimento de onda, λ_{max} , dado por:

$$\lambda_{max} = \lambda_B \left(1 + n_{th} \bar{\delta}n_{eff} / n_{eff} \right) \quad (5)$$

Para uma rede de Bragg de comprimento L , introduzindo a condição fronteira $r(L)=0$ [4] na eq. 2, obtemos $r(0)$, que corresponde ao coeficiente de reflexão da rede.

No estudo aqui apresentado consideramos os valores típicos para o índice efectivo, $n_{eff}=1.45$ e para a visibilidade, $\nu=1.0$. No que diz respeito à perturbação do índice de refração considerámo-la positiva ($n_{th}=1$), de média nula ($n_{th}=0$) e negativa ($n_{th}=-1$). Estes três casos correspondem a diferentes crescimentos dinâmicos experimentados pela fibra, uma do tipo I (positiva) e duas do tipo IIa com diferentes valores médios finais da variação do índice de refração, um nulo e o outro negativo. Na Fig. 1 apresenta-se a resposta espectral ($20\log|r(0)|$) e o atraso introduzido ($T_d = \partial\theta/\partial\omega$, $\theta_r = \text{fase}[r(0)]$) considerando os três tipos de variação do índice de refração referidos. O formato da apodização considerado é do tipo Gaussiano e é definido por [3]:

$$f(z) = \exp \left[-\frac{(4 \ln 2)(z - L/2)^2}{(L/3)^2} \right] \quad (6)$$

Para todos os casos apresentados a máxima reflectividade acontece para $\lambda_{max}=1.55 \mu\text{m}$, correspondendo a diferentes comprimentos de onda de Bragg, implicando diferentes períodos da rede.

Como se pode constatar observando a Fig. 1 a rede de Bragg com variação do índice de refração positiva, apesar de ser a mais usual, pode apresentar algumas limitações quando utilizada em sistemas ópticos WDM lineares onde a dispersão é determinante, uma vez que a

dispersão por ela introduzida se adiciona à dispersão introduzida pela fibra de transmissão. Para esses sistemas,

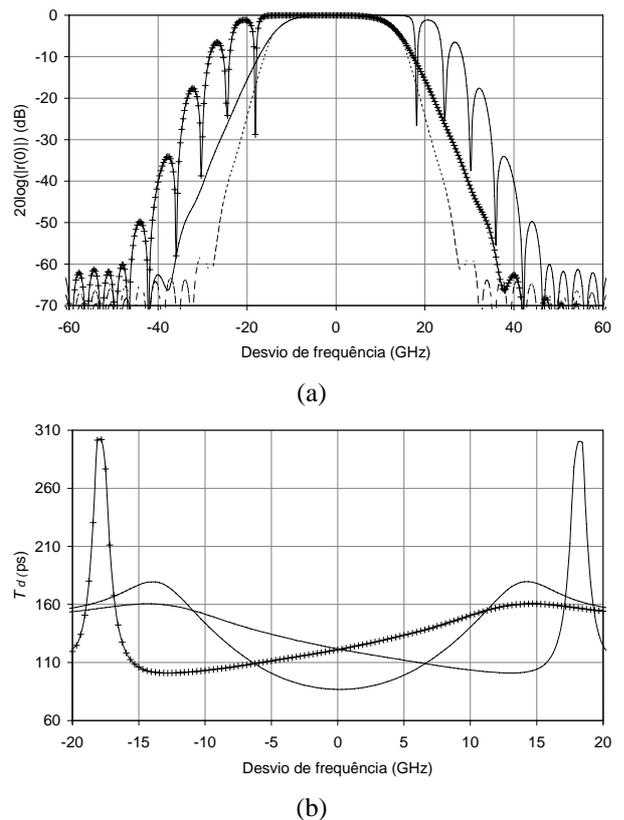


Fig. 1 - Resposta espectral (a) e atraso introduzido (b) por redes de Bragg com diferentes valores médios da variação do índice de refração: positivo (—), negativo (---) e nulo (- -); o formato da apodização é Gaussiano, $L=30 \text{ mm}$, $\bar{\delta}n_{eff}=2 \times 10^{-4}$, $n_{eff}=1.45$, $\nu=1.0$; o desvio de frequência é em torno de $f_{max}=c/\lambda_{max}$, com $\lambda_{max}=1.55 \mu\text{m}$.

a melhor opção, dos casos apresentados, é a rede de Bragg do tipo IIa com perturbação do índice de refração negativo, que apesar de apresentar uma rejeição fora da banda passante inferior ao caso da rede com valor médio da variação nulo, é capaz de compensar a dispersão, conduzindo a melhores desempenhos do sistema [6].

Apesar das redes de Bragg *chirped* se encontrarem mais divulgadas para as aplicações de compensação de dispersão, as redes de Bragg com variação de índice negativa são uma excelente opção, não necessitando de máscaras especiais (mais caras) como no caso das redes *chirped*. As suas únicas desvantagens são a necessidade de fibras especiais, dopadas com elevada concentração de Germânio e de maiores tempos de exposição à radiação UV para a sua formação. No ponto seguinte avalia-se o desempenho de um sistema WDM com filtragem óptica efectuada por redes de Bragg com apodização negativa, provando estas conclusões qualitativas.

III. OPTIMIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG PARA SISTEMAS WDM LINEARES

Usando as redes de Bragg referidas, com perturbação do índice de refração negativa e formato da apodização Gaussiano foi-se então otimizar o espaçamento entre canais de um sistema WDM linear.

O sistema WDM considerado utiliza a técnica de transmissão suportada pela dispersão (DST: *Dispersion Supported Transmission*) [7], permitindo a transmissão de dados além do limite de dispersão. Tendo em conta as limitações de distância do DST e o estado actual da electrónica de alta velocidade, escolhemos uma taxa de transmissão de 20 Gbit/s por canal.

Em particular, considerámos um sistema WDM-DST com 8 canais de 20 Gbit/s cada, sobre 65 Km de fibra monomodo. Em todas as simulações usámos sequências binárias pseudo-aleatórias de 20 Gbit/s e comprimento $2^{10}-1$ bits. A potência média de saída de cada Laser é 4.5 dBm. Os amplificadores usados antes e depois da fibra de transmissão, respectivamente o *booster* e o pré-amplificador são amplificadores ópticos dopados com Érbio, com ganho e figura de ruído constantes. O modelo da fibra monomodo considera a atenuação, a dispersão cromática e o coeficiente não-linear, usuais na janela de 1.55 μm , respectivamente, 0.21 dB/Km, 17 ps/(nm.Km) e $1.39 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ [8]. A equalização DST é efectuada por dois filtros passa-baixo em série, com frequências de corte optimizadas [9]. O desempenho do sistema é avaliado em termos de penalidade de potência óptica no receptor, relativamente à situação *back-to-back* com um único canal, para obter uma taxa de erro de 10^{-12} .

Para cada espaçamento entre canais, optimizámos as características da rede de Bragg, nomeadamente o seu comprimento L e o valor máximo do formato da perturbação $\overline{\delta n_{eff}}$ obtendo as penalidades de potência apresentadas na Fig. 2. Nessa figura apresenta-se também as penalidades de potência para as redes de Bragg equivalentes (mesmo L e $\overline{\delta n_{eff}}$) com apodização de média nula. Os resultados mostram que as redes com apodização negativa conduzem ao melhor desempenho do sistema, porque, apesar de a rejeição fora da banda ser inferior ao caso de média nula, o atraso por elas introduzido compensa a dispersão da fibra de transmissão.

A penalidade de potência para um canal é de aproximadamente 5.1 dB. Utilizando uma rede com apodização negativa e de formato Gaussiano como desmultiplexador, e considerando um incremento de 2 dB relativamente ao caso do canal único, é possível atingir-se um espaçamento entre canais de 27 GHz, correspondendo a uma eficiência espectral de aproximadamente 0.85 bit/s/Hz.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo provou-se a eficiência das redes de Bragg apodizadas do tipo IIa, com variação de índice negativa, quando usadas como filtros ópticos em sistemas WDM, actuando como desmultiplexadores e compensadores da dispersão da fibra de transmissão. Apesar das redes de Bragg do tipo I com *chirp* serem mais divulgadas como

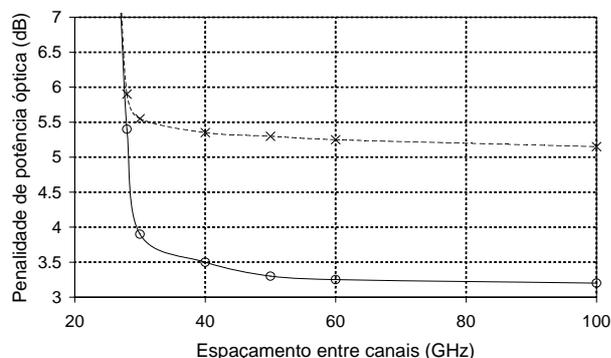


Fig. 2 - Penalidades de potência óptica do sistema WDM-DST estudado (8x20 Gbit/s, 65 Km) em função do espaçamento entre canais, considerando redes de Bragg optimizadas com apodização negativa (-o-) e de média nula (-x-).

compensadores de dispersão, as redes do tipo IIa com índice negativo estudadas demonstraram ser uma excelente opção. Usando este tipo de filtros, com apodização Gaussiana, foi possível desmultiplexar um sinal WDM de 160 Gbit/s (8x20 Gbit/s) compactado em aproximadamente 1.5 nm (≈ 0.85 bit/s/Hz).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo projecto DAWN.

REFERÊNCIAS

- [1] Andreas Othonos and Kyriacos Kalli, *Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, 1999 Artech House, Inc.
- [2] M. V. Bazylenko, D. Moss, and J. Canning, "Complex photosensitivity observed in germanosilica planar waveguides", *Optics Letters*, v. 23, n. 9, 1998, pp. 697- 699.
- [3] T. Erdogan, "Fiber grating spectra", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, v. 15, 1997, pp.1277-1294.
- [4] K. Ennser, M. N. Zervas and R. I. Laming, "Optimization of apodized linearly chirped fiber gratings for optical communications", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, v. 34, 1998, pp.770-778.
- [5] M. J. N. Lima, A. L. J. Teixeira, J. R. F. da Rocha, "Simultaneous filtering and dispersion compensation in WDM systems using apodized fiber gratings", aceite para publicação na *Electronics Letters*, 2000.
- [6] M. J. N. Lima, A. L. J. Teixeira, J. R. F. da Rocha, "Impact of optical filtering on the channel density of WDM systems", in *Proceedings of WFOPC 2000*, Pavia, Italy, 2000, pp. 204-209.
- [7] B. Wedding, K. Koeflers, B. Franz, D. Mathoosing, Ch. Kazmierski, P. Monteiro, J. Matos, "Dispersion-supported transmission of 20

- Gbit/s over 53 Km standard single mode fibre", *Electronics Letters*, v. 31, 1995, pp. 566-568.
- [8] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed. New York, CA: John Wiley & Sons, 1997.
- [9] A. L. J. Teixeira, R. F. S. Ribeiro, J. R. F. da Rocha, "Equaliser optimisation for multi-level dispersion supported transmission systems", in *Proceedings of TRS 97*, London, UK, 1997, pp. 88-91.