

Simulação em Cascata de Redes de Bragg em Fibra para Compensação de Dispersão em Enlaces WDM

Luiz Fernando Henning^{1,2}, Paulo de Tarso Neves Jr.¹ e Alexandre de Almeida Prado Pohl¹

Resumo—As plataformas para simulação de enlaces ópticos atualmente existentes são limitadas por dispositivos, os quais não permitem muita flexibilidade de configuração. Este trabalho apresenta um modelo para simulação de redes de Bragg que pode ser utilizado com a plataforma VPI (*Virtual Photonics*). Tal modelo permite a configuração de diversos parâmetros de uma rede de Bragg, possibilitando calcular sua resposta espectral e em fase. Este modelo foi utilizado para simular redes de Bragg em cascata para compensação de dispersão em enlaces WDM.

Palavras-Chave—Compensação da dispersão cromática, multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), redes de Bragg.

Abstract—The existing software platforms for simulation of optical links are limited by employment of devices that present a low-level configuration flexibility. This work presents a model for simulation of fiber Bragg gratings, which can be used with the VPI software package. Such model allows the user to set up several grating parameters, making it possible to calculate its spectral and phase response. The model was employed to simulate a cascade of Bragg gratings with the purpose of dispersion compensation in WDM links.

Keywords—chromatic dispersion (CD), wavelength division multiplexing (WDM), Fiber Bragg Grating (FBG).

I. INTRODUÇÃO

A fibra DCF (*Dispersion-Compensating Fiber*) é atualmente utilizada como solução padrão para compensação da dispersão na transmissão de longa distância uma vez que sua curva de dispersão se contrapõe à inclinação da curva de dispersão da fibra monomodo usada nos enlaces de comunicação. No entanto, o uso da DCFs é limitado pela necessidade de controle da potência óptica em sua entrada, devido ao surgimento de efeitos não lineares, particularmente em enlaces WDM (Wavelength Division Multiplexing). Além disso, apresentam perda de inserção relativamente elevada e são volumosas, ocupando mais espaço nos bastidores das estações de transmissão e recepção [1].

As redes de Bragg em fibra óptica (FBG, *Fiber Bragg Gratings*) com gorjeio podem substituir as DCFs como a solução padrão para compensação de dispersão. As FBGs com gorjeio têm uma não-linearidade desprezível, baixa perda de inserção e pequeno comprimento [2–8]. Isso permite que amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA) possam ser colocados em cascata com FBGs e a fibra de transmissão, sem a necessidade de amplificadores intermediários, o que

resulta em uma redução significativa de custos. A principal desvantagem das FBGs é que elas sofrem de distorções em sua resposta de fase, mais conhecido como a ondulação no atraso de grupo (GDR). Isso é causado por imperfeições no processo de fabricação das redes de Bragg e limita o número de FBGs que podem ser colocadas em cascata [9–11]. Os processos de fabricação melhoraram com o tempo e reduziram gradualmente o valor de GDR, o que aumenta significativamente o número de FBGs que podem ser colocadas em cascata.

A simulação em cascata de FBGs com gorjeio e seu respectivo emprego em enlaces de comunicação óptica constitui ainda um importante problema de projeto. Softwares de simulação permitem realizar simulações de redes de Bragg (uniformes e com gorjeio) em cascata. Entretanto, os blocos disponíveis impõem algumas limitações, pois apresentam parâmetros fixos (como, por exemplo, o índice de refração efetivo do modo propagante no núcleo da fibra). Estas imposições limitam seu emprego em situações de simulação, nas quais se deseja maior flexibilidade de escolha dos parâmetros do dispositivo. Uma alternativa para este problema passa pelo desenvolvimento de um algoritmo em outro ambiente de simulação e que pode então ser usado, em regime de cossimulação, na plataforma que representa todo o enlace a ser estudado. Baseado nesta premissa, este trabalho apresenta resultados de simulação de redes de Bragg em cascata obtidos com a plataforma de simulação de dispositivos e enlaces ópticos conhecida como VPI Photonics [12], na qual um algoritmo escrito em Matlab [13] permite que todas as variáveis que descrevem o comportamento espectral de uma rede de Bragg sejam acessadas. Graças a utilização desse algoritmo são criadas condições para simulação de FBGs mais complexas.

II. MODELO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA

O VPI apresenta blocos padrões para fazer as suas simulações. O bloco padrão da FBG que é usado para fazer a compensação da dispersão permite modificar apenas 3 parâmetros: *frequência de Bragg*, *dispersão em segundos* e *largura da banda*. Se for desejável mais de uma rede basta ir colocando novas frequências, mas parâmetros importantes (*distância entre as redes*, por exemplo) não são inseridos.

Este módulo (caixa preta do VPI) é uma especialização do módulo Fiber Bragg projetado com características adequadas para aplicação em compensação de dispersão. O *perfil de gorjeio* deste módulo está definido como "linear" (não permite outra configuração) e o *índice de modulação* é calculado internamente pelo bloco. A rejeição de banda deste tipo rede é fixada em 15dB. Os parâmetros *apodização*, *comprimento*,

Luiz Fernando Henning, Paulo de Tarso Neves Jr. e Alexandre de Almeida Prado Pohl 1)CPGEI – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba-PR, Brasil, 2) Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Jaraguá do Sul-SC, Brasil, E-mails: luizh@ifsc.edu.br, pneves@utfpr.edu.br, pohl@utfpr.edu.br.

gorjeio e índice de modulação são calculados automaticamente com base na largura de banda especificada e dispersão. A dispersão de uma FBG com gorjeio necessária para uma distância D é calculada como:

$$\beta_2 = -\beta_{fibra}D \quad (1)$$

onde β_2 é o valor da dispersão da FBG, β_{fibra} é o valor da dispersão da fibra óptica e D é a distância em km do trecho a ser compensado. Nota-se que a dispersão da FBG deve ser necessariamente negativa. Fisicamente isto significa que o período mais longo da estrutura da rede deve estar na extremidade de entrada. Por exemplo, o valor para a dispersão de $-0,8s/m$ permite a compensação da dispersão em um enlace de $50km$ de comprimento, cuja fibra apresente uma dispersão de $16ps/(nm.km)$.

A. O Método da Matriz de Transferência

Para casos onde o campo de deformação varia espacialmente o espectro óptico resultante pode ser obtido através do Método da Matriz de Transferência baseado na Teoria dos Modos Acoplados [2, 14, 15].

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

em que $\delta \bar{n}_{eff}$, denominado *índice de modulação*, é a mudança do *índice de refração médio* em um período da rede, ν é a *visibilidade das franjas*, Λ o *período da rede* e $\phi(z)$ a *função de gorjeio da rede*.

As soluções para as equações dos modos acoplados devido às perturbações de índice ocasionadas pela presença da rede de Bragg são encontradas através da “aproximação síncrona” relatada em [14, 15].

Sendo um dispositivo passivo, uma rede de comprimento L_r pode ser tratada como um quadripolo, podendo ser modelada matricialmente. Arbitrando a origem espacial no ponto de incidência da onda na rede, como mostra a Fig. 1, em que $R(z)$ e $S(z)$ estão relacionados com as amplitudes do campo propagante e contrapropagante, respectivamente. Por conveniência normaliza-se a amplitude do campo incidente $R(0)$ de forma tal que seu valor máximo seja igual a unidade.

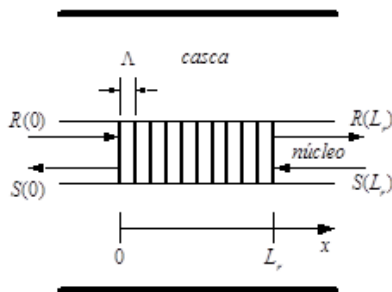


Fig. 1. Esquema da rede de Bragg como um quadripolo.

Para encontrar as condições de contorno assume-se uma onda incidente proveniente de $x = -\infty$; no início da rede a transmissão normalizada será máxima ($R(0) = 1$) e como não há reflexão além da rede, ou seja, para $x \geq L_r$, isso implicará

em $S(L_r) = 0$. Discretizando a rede em M seções uniformes e definindo R_j e S_j , respectivamente, como as amplitudes do campo após atravessar cada seção j , a propagação em cada seção é obtida através da expressão

$$\begin{bmatrix} R_j \\ S_j \end{bmatrix} = F_j^B \begin{bmatrix} R_{j-1} \\ S_{j-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

sendo a matriz F_j^B dada pela Equação (4), em que Δx é o comprimento da j -ésima seção e $\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2}$, sendo κ o coeficiente de acoplamento “ac” e $\hat{\sigma}$ o coeficiente de auto-acoplamento.

Conhecendo as matrizes para cada seção, aplica-se as condições de contorno ($R(0) = 1$ e $S(L_r) = 0$) chegando a solução final através de

$$\begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} = F^B \begin{bmatrix} R(L_r) \\ S(L_r) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Substituindo chega-se a

$$\begin{bmatrix} 1 \\ S(0) \end{bmatrix} = F^B \begin{bmatrix} R(L_r) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

sendo

$$F^B = \prod_{j=1}^M F_j^B \quad (7)$$

Escrevendo F^B na forma

$$F^B = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

e substituindo na equação (6), resultará em

$$\begin{bmatrix} 1 \\ S(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}R(L_r) \\ f_{21}R(L_r) \end{bmatrix} \quad (9)$$

De (9) conclui-se que $R(L_r) = 1/f_{11}$. Portanto, a amplitude refletida para cada comprimento de onda é encontrada através de

$$r(\lambda) = \frac{S(0)}{R(0)} = \frac{S(0)}{1} = \frac{f_{21}}{f_{11}} \quad (10)$$

sendo a potência refletida dada por $P_\gamma = |r(\lambda)|^2$. Dessa forma, é possível obter a reflexão para cada comprimento de onda em um intervalo de interesse, obtendo-se assim o espectro de transmissão e reflexão da rede de Bragg.

Para redes em cascata, caso que está sendo tratado neste trabalho, é necessário conhecer a distância entre as mesmas para definir a matriz de fase dada por:

$$F^f = \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\phi_f}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\phi_f}{2}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

em que

$$\phi_f = \frac{4\pi n_{eff} \Delta Z_f}{\lambda} \quad (12)$$

em que n_{eff} o *índice efetivo* do modo fundamental que se propaga no núcleo, λ o *comprimento de onda* e ΔZ_f a

$$F_j^B = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta x) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta x) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta x) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta x) & \cosh(\gamma_B \Delta x) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

distância entre as redes. Assim, para simulação de FBGs em cascata, cada matriz de fase é inserida entre as matrizes F^B de redes adjacentes, formando um novo produto entre todas as matrizes de fase e todas as matrizes F^B .

Como o VPI permite uma cossimulação com o MatLab, o algoritmo foi implementado como um novo bloco. Para testar tal bloco no VPI foi levado em conta que as equações estão representadas no domínio da frequência e o VPI trabalha no domínio do tempo. Por isso o algoritmo primeiramente lê os dados do VPI, executa funções de transformada rápida de Fourier (FFT), transformando do domínio do tempo para o da frequência, executa as equações que simulam a resposta espectral das redes de Bragg e, posteriormente, executa uma transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), retornando ao domínio do tempo, devolvendo os dados para o VPI.

III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os blocos padrões do VPI não permitem modificações na maioria dos parâmetros (como exemplo, n_{eff} é fixado em 1.45 e v é fixado como 1). O algoritmo do Matlab foi criado para permitir configurar todas as variáveis mostradas na tabela I.

TABELA I
VARIÁVEIS DA FBG SUSCETÍVEIS DE MODIFICAÇÃO NO BLOCO PROPOSTO.

Nome
Comprimento da Rede (l)
Índice efetivo de refração do núcleo (n_{eff})
Comprimento de onda de Bragg (λ_B) da primeira rede
Índice de modulação ($indmod$)
Visibilidade das franjas (v)
Número de redes
Incremento de cada rede em nm (nano metro)
Distância física entre cada rede em metros
Valor da dispersão

Como exemplo, as seções seguintes ilustram algumas configurações possíveis.

A. Simulação com apenas uma rede de Bragg

Considerando os seguintes parâmetros para a FBG: $v = 1$; $l = 50e - 3m$; $n_{eff} = 1.45$; $\lambda_B = 1551e - 9m$; Valor da $disperso = 800e - 12s$, $indmod = 1.0e - 4$, a resposta espectral da rede é mostrada na Figura 2.

Nota-se que o gorjeio linear da resposta em fase desta FBG é o responsável pela compensação da dispersão cromática de um enlace de fibra óptica. Neste caso, o gorjeio de $800e - 12s$ é suficiente para compensar um enlace de $50km$ de fibra tipo SMF, que possui uma dispersão de $16ps/(km.nm)$.

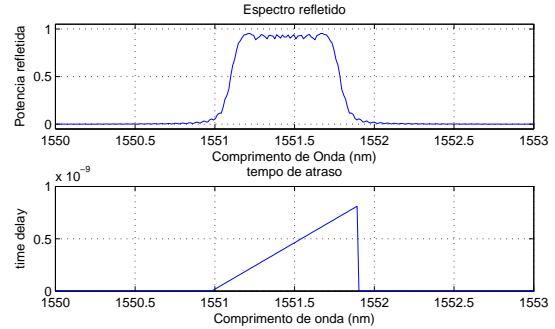


Fig. 2. Resposta espectral e de fase da FBG com gorjeio linear.

B. Alteração da visibilidade das franjas (parâmetro v)

Alterando-se o parâmetro v de 1.0 para 0.7, a nova resposta espectral da FBG simulada na seção A, é mostrada na Figura 3.

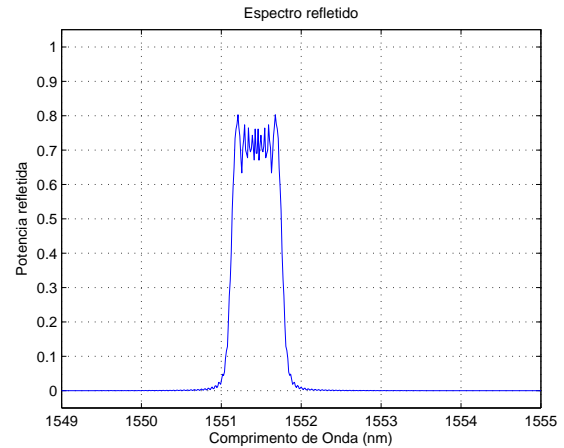


Fig. 3. Espectro da FBG com parâmetro de visibilidade das franjas $v = 0.7$.

C. Modificando o comprimento da rede (parâmetro l)

Considerando-se ainda os parâmetros da rede descritos na seção A e alterando-se o comprimento da rede (parâmetro l) de $50e - 3m$ para $250e - 3m$, a resposta espectral dessa FBG é mostrada na Figura 4.

Assim, a flexibilidade de configuração introduzida pelo novo módulo no VPI possibilita a simulação de diversos tipos de redes. Com o objetivo de simular a resposta de redes em cascata para compensação de dispersão em enlaces WDM, utilizou-se um arranjo com 16 redes, cada qual apresentando o mesmo gorjeio. Os parâmetros de configuração dessas FBG são: $v = 1$; $l = 50e - 3m$; $n_{eff} = 1.45$; $\lambda_B = 1532.4e - 9m$; Valor da $disperso = 800e - 12s$; $indmod =$

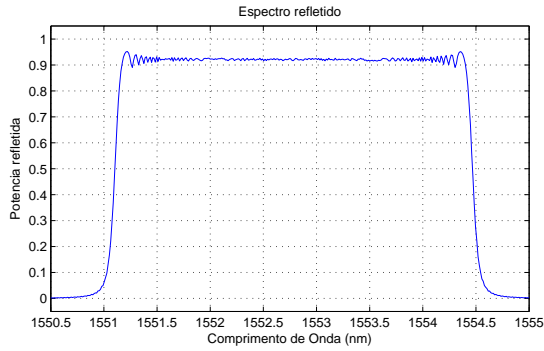


Fig. 4. Reposta espectral de FBG com comprimento $l = 250e-3m$.

$1.3e - 4$; Número de redes=16; Incremento de cada rede em nm (nanometro) = 1.6 e Distância física entre cada rede (em metros) = $1.0e - 2$. A resposta conjunta desse filtro é mostrada na Fig. 5. A configuração foi montada para compensar canais WDM separados em $200GHz$. Nota-se que o atraso de fase de uma determinada FBG é maior que o da rede anterior, visto que a luz demora mais tempo para chegar as últimas redes e ser refletida.

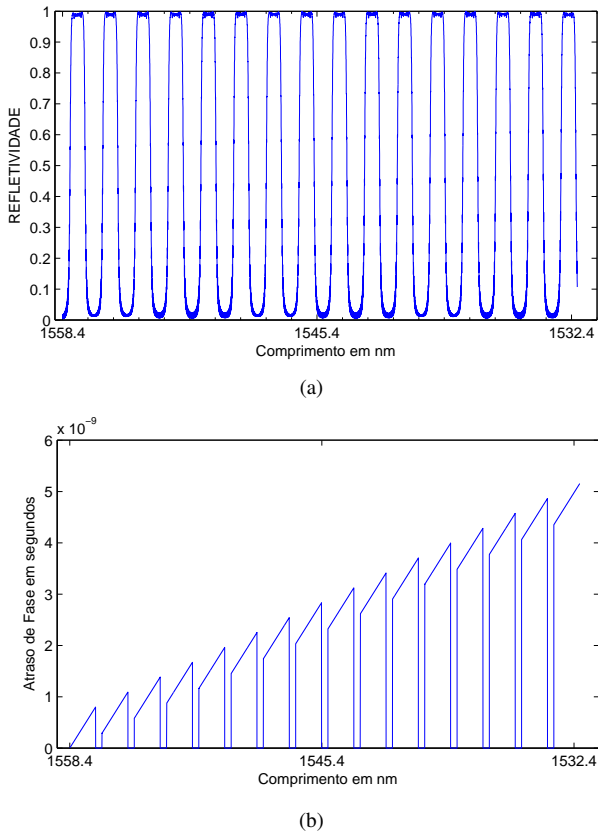


Fig. 5. Resposta espectral de um conjunto de 16 FBGs. (a) Refletividade e (b) Atraso de fase em segundos.

Esse conjunto de redes para compensação da dispersão foi inserido em uma configuração que representa um anel óptico de recirculação (ver Fig. 6).

Neste ensaio, um sinal WDM (16 canais separados de $200GHz$ cada um) são lançados dentro de um anel a uma taxa

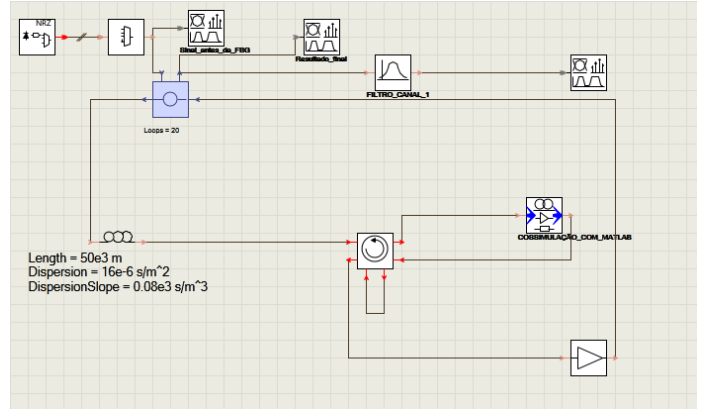


Fig. 6. Esquemático do VPI com novo bloco para testar o desempenho de um conjunto de FBGs com gorjeio colocadas em cascata dentro de um laço óptico.

de $10Gbps$. A potência óptica em cada canal é de $0dBm$ (Ver Fig. 7). Em cada canal um gerador PRBS (*Pseudo Random binary Sequence*) acionará um modulador do tipo Mach-Zehnder que possui em sua entrada um laser CW sintonizável. Os 16 canais são lançados em um Mux, cuja saída é conectada a uma única fibra. Este sinal WDM é então introduzido dentro do anel.

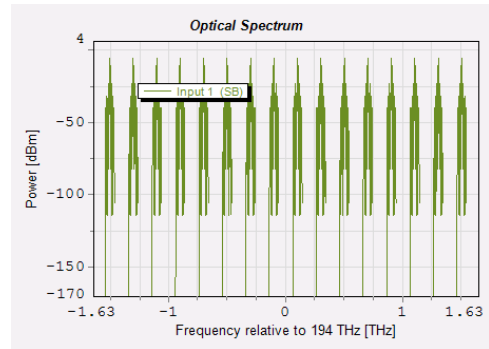


Fig. 7. Sinal gerado na entrada do enlace para testar o módulo matemático.

O anel é constituído por $50km$ de fibra padrão SMF, um bloco que fará a compensação da dispersão cromática com as redes em cascata e um amplificador óptico EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) com ganho de $10dB$ para reduzir as perdas ópticas no enlace. Após 20 voltas no anel ($1000km$ de fibra), o sinal é retirado. Um analisador óptico mostrará o espectro total da saída e um filtro óptico selecionará, neste caso, o canal 8. Um outro analisador mostrará o diagrama do olho desse canal. O bloco da compensação da dispersão chamará o algoritmo elaborado no Matlab. O sinal da saída do anel após as 20 voltas ($1000km$) é mostrada na Fig. 8, verificando-se que o sinal na saída do anel foi recuperado. As diferenças nas potências ópticas na saída devem-se à resposta de ganho não linear do amplificador EDFA utilizado.

O diagrama de olho mostrado na Fig. 9 corresponde a saída do canal 8. Como o olho está aberto, verifica-se que o canal foi recuperado.

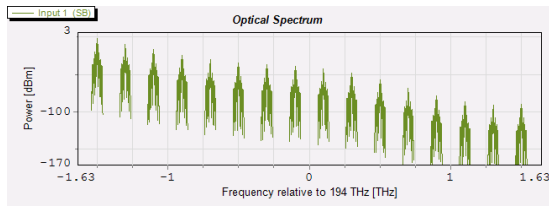


Fig. 8. Resposta da rede após 20 voltas no enlace (1000km).

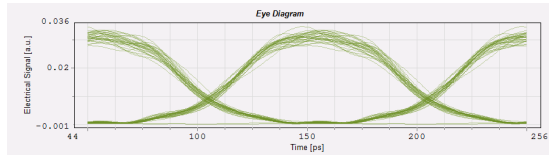


Fig. 9. diagrama de olho do sinal recebido no canal 8.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo demonstrou-se uma forma de simular redes de Bragg em cascata utilizando o software VPI, mas não ficando limitado aos blocos padrões que este oferece. Usando uma cossimulação entre o algoritmo matemático criado no Matlab e o VPI conseguiu-se testar as redes de Bragg em cascata, utilizando variáveis não disponíveis na plataforma de simulação e permitindo diversas simulações que antes não eram possíveis de serem realizadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), no âmbito do projeto INCT FOTONICOM, pelo suporte financeiro recebido.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Gruner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C. Jorgensen, L. Jorgensen, B. Edvold, B. Palsdottir, and D. Jakobsen, "Dispersion-compensating fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 11, pp. 3566–3579, 2005.
- [2] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
- [3] D. van den Borne, V. Veljanovski, E. De Man, U. Gaubatz, C. Zuccaro, C. Paquet, Y. Painchaud, S. Jansen, E. Gottwald, G.-D. Khoe, and H. de Waardt, "Cost-effective 10.7-Gbit/s Long-Haul Transmission using Fiber Bragg Gratings for In-line Dispersion Compensation," in *Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC: IEEE, 2007*, pp. 1–3.
- [4] M. Sumetsky, N. Litchinitser, P. Westbrook, P. Reyes, B. Eggleton, Y. Li, R. Deshmukh, C. Socolich, F. Rosca, J. Bennike, F. Liu, and S. Dey, "High-performance 40 Gbit/s fibre Bragg grating tunable dispersion compensator fabricated using group delay ripple correction technique," *Electronics Letters*, vol. 39, no. 16, pp. 1196–1198, 2003.
- [5] R.Oliveira, P. Neves, and A.Pohl, "Numerical approach for designing a bragg grating acoustico-optic modulator using the finit elemento and the transfer matrix methods," *Optics Communications*, vol. 281, pp. 4899–4905, 2008.
- [6] F.Marques, R.oliveira, A.Pohl, J.Canning, and R.Nogueira, "Dynamics control of a phase-shifted FBG through acousto-optic modulation," *Optics Communication*, vol. 284, pp. 1228–1231, 2011.
- [7] K.Wen, L.Yan, W.Pan, B.Luo, X.Zou, J.Ye, and Y.Ma, "Analisis for reflection peaks of multiple-phase-shift based sampled fiber bragg gratings and application in high channel-count filter design," *Applied Optics*, vol. 48, no. 29, October 2009.
- [8] C.Sun, C.Li, and X.Yu, "Study on sampled chirped fiber gratings," *Optics Communications*, vol. 218, pp. 297–302, 2003.
- [9] Y. Painchaud, "Low-penalty cascade of low-ripple FBG-based dispersion compensators," in *paper Th4.2.7. Cannes - France: ECOC, 2006*.
- [10] J. Castro, J. Castillo, R. Kostuk, C. Greiner, D. Iazikov, T. Mossberg, and D. Geraghty, "Interleaved sampled bragg gratings with concatenated spectrum," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 15, pp. 1615–1617, 2006.
- [11] H. Lee and G. Agrawal, "Purely phase-sampled fiber bragg gratings for broadband dispersion and dispersion slope compensation based on the coupling coefficient chirp," in *Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2005. QELS '05*, vol. 2, 2005, pp. 1340–1342 Vol. 2.
- [12] VPIPhotonics, *VPI Optical Systems Users Manual*, Norwood, USA, 2011.
- [13] MATLAB, "Matlab – MATrix LABoratory," 2012. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com>
- [14] H. Kogelnick, *Theory of optical waveguides in Guided-Wave Optoelectronics*, E. N. York, Ed. Springer-Verlag, 1990.
- [15] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. S.Diego, USA: Academic, 1999.