

균일한 대역폭을 갖는 광대역 분산 및 분산 경사 보상을 위한 순 위상 샘플링 광섬유 Bragg 격자

이호준[†]

호서대학교 전기정보통신공학부 광통신연구실
Ⓣ 336-795 충남 아산시 배방면 세출리 산 29-1

(2004년 8월 18일 받음, 2004년 11월 4일 수정본 받음)

색 분산과 색 분산 경사를 보상하기 위하여 결합 계수가 파장 축을 따라 첩 된 순 위상 샘플링 광섬유 Bragg 격자를 제안하였다. 기존의 샘플링 주기의 첩과 결합 계수의 첩을 동시에 이용하여 동일한 파장 다중 채널들의 대역폭들을 얻을 수 있었다.

주제어 : Gratings, Fiber optics communication, Fiber optic components, Dispersion.

I. 서 론

FBG(fiber Bragg grating)가 1978년에 발견된 이후로 광통신과 광섬유 센서분야에서 많이 사용되고 있다.^[1] Superstructure FBG는 다수의 등 간격 반사 채널을 갖기 때문에 WDM (wavelength-division multiplexing)에 유용하다.^[2] 진폭 샘플링 방법^[3]은 큰 굴절률 변조가 요구되는 다수의 다중 채널 시스템에서는 사용되기가 어렵기 때문에 다수의 다중 채널 반사가 가능한 위상 샘플링을 이용한 superstructure FBG가 보고 되었다. 위상 샘플링 기술은 동조 반도체 레이저를 만들기 위해 사용되어 왔고 모든 채널에 대하여 동일한 반사율을 갖는 다중 반사 채널을 제공할 수 있다.^[4] 최근에는 FBG를 제작하기 위하여 이 기술이 사용되었다.^[5,6] 요구되는 굴절률 변조 지수는 채널 수가 N 일때 진폭 샘플링일 때 N 에 비례하지만 위상 샘플링일 때는 \sqrt{N} 에 비례한다.^[7]

다중 채널 시스템의 색 분산과 색 분산 경사 보상을 위한 FBG의 사용이 주목 받아왔다. 비록 한 개의 첩(chirped) FBG가 상대적으로 소수의 다중 채널의 분산을 보상할 수 있으나 중첩 격자(superimposed grating)^[8]이나 superstructure FBG^[9-12]는 다수의 다중 채널의 분산 보상이 가능하다. 그러나 중첩 FBG는 제조 과정 중 다수의 레이저 조사를 요구한다. Superstructure FBG에 의한 방법으로 최근 분산 보상과 분산 경사 보상을 위한 순 위상 샘플링(purely phase-sampled) FBG에 대한 연구가 보고 되었다.^[10-12] 이 경우 샘플링 주기의 첩에 의해 분산 경사를 보상하였으나 이것으로 인하여 장파장 채널의 대역폭이 감소하는 경향이 있었다. 본 논문에서는 순 위상 샘플링 FBG의 결합계수 첩에 의한 색분산 경사 보상법을 제안하였으며 샘플링 주기의 첩과 결합계수 첩을 동시에 사용하여 일정한 대역폭을 갖는 다중 채널 분산 및 분산 경

사 보상을 설계할 수 있었다.

II. 순 위상 샘플링 FBG 이론 및 설계

그림 1은 위상 샘플링 FBG를 나타낸다. 푸리에 해석을 이용할 때 광섬유의 실효 모드 굴절률은

$$n(z) = n_0 + \Delta n_1 \operatorname{Re} \left\{ \exp[i(2\beta_0 z + \phi(z))] \right\} \\ = n_0 + \Delta n_1 \operatorname{Re} \left\{ \sum_m F_m \exp[2i(\beta_0 + m\beta_s)z] \right\} \quad (1)$$

으로 표시되며 여기서 n_0 는 평균 굴절률이고, Δn_1 는 변조 지수이며 $\beta_0 = \pi/\Lambda_0$, $\beta_s = \pi/\Lambda_s$, Λ_0 는 평균 격자 주기이고, Λ_s 는 샘플링 함수의 주기이며 샘플링 주기 첩이 없을 때는 $\delta\Lambda_s = 0$ cm이다.

위상 샘플링 함수 $\phi(z)$ 의 주기 Λ_s 는 주파수 영역에서 채널 간격 $\Delta\nu = c/2n_0\Lambda_s$ 으로 반복되는 반사 스펙트럼을 결정한다. 실제 $\phi(z)$ 의 모양은 각 채널의 최대 반사율 R_p 를 결정한다. 모든 WDM 채널들에 대하여 R_p 가 경사를 갖도록 위상

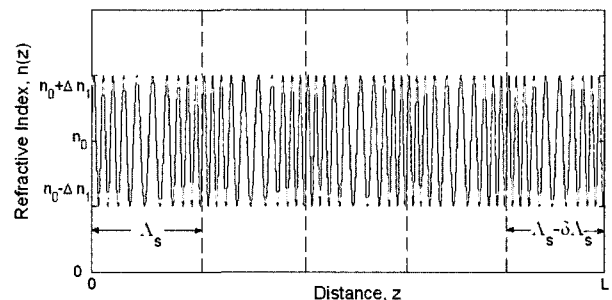


그림 1. 순 위상 샘플링 FBG의 구조. 격자 주기 Λ_s 는 격자의 끝에서 $\delta\Lambda_s$ 만큼 감소된다.

[†]E-mail: hojoon@office.hoseo.ac.kr

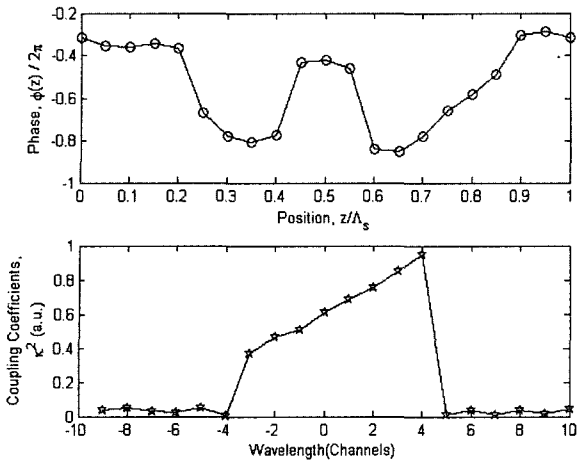


그림 2. 최적 위상 샘플링 함수 (상)와 대응되는 결합계수 (하) 별은 파장 다중 채널의 위치를 나타낸다.

샘플링 함수를 구하는 것이다. R_p 는 모드 결합 방정식을 사용하여 계산되며

$$R_p = \sum_m R_m = \sum_m \tanh^2(\kappa_m L) \quad (2)$$

에 의해 주어진다. 여기서 모드 결합 계수 κ_m 는 Eq. (1)의 푸리에 계수 F_m 에 비례한다.

WDM 채널들에 대하여 R_p 가 경사를 갖도록 설계하기 위하여 다차원 최소화 알고리즘을 사용하였다. 주기 Λ_s 는 $\phi(z)$ 의 시도 값을 불연속적으로 주기 위하여 많은 조각으로 나눴다. 식 (2)를 사용하여 식 (1)에서 각 푸리에 계수에 대응되는 반사율 R_m 을 계산하였다. 이상적인 R_0 값으로부터 평균 제곱 편차(mean-square deviation),

$$T = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M W_m (R_m - R_0)^2 \quad (3)$$

를 계산하였으며 여기서 W_m 는 가중치이다. 알고리즘은 T 를 최소화하기 위하여 반복하여 $\phi(z)$ 를 변화시킨다. 그림 2는 20개의 샘플을 사용하여 얻은 최적화된 위상 샘플링 함수와 대응되는 결합계수를 나타내며 8 채널의 결합계수가 첨을 갖는 것을 볼 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

우선 샘플링 주기의 첨이 없고 ($\delta\Lambda_s = 0$ cm), 결합 계수 첨만 존재할 때를 고려한다. 그림 2의 위상 샘플링 함수에 대해 전달 매트릭스 방법으로 계산된 반사율(실선)과 투과율(점선), 지연시간 τ 와 WDM 채널 파장에서 분산 $D = d\tau/d\lambda$ 는 그림 3과 같다. 격자의 파라미터는 $L = 10$ cm, $\Delta n_1 = 4 \times 10^{-4}$, 그리고 $\Lambda_s = 1$ mm이고 격자 주기의 첨은 $\delta\Lambda_0 = 0.08$ nm/cm이다. 여기서 투과율은 장파장 채널에서 감소하는 것을 볼 수 있고, 채널 대역폭은 장파장 채널 파장 채널에서 증가하

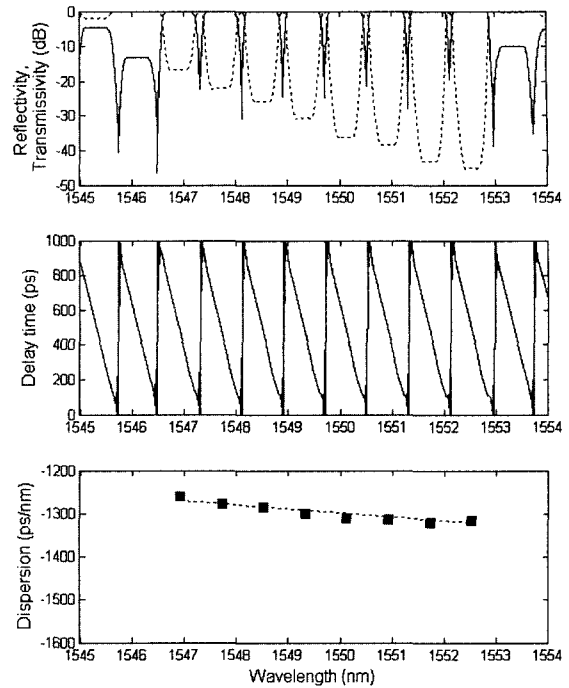


그림 3. 그림 1의 위상 샘플링 함수와 $\Delta n_1 = 4 \times 10^{-4}$ 일 때 얻어진 투과율 (점선)과 반사율 (실선) (상), 군속도 지연 (중)과 WDM 파장에서 분산 (하). 여기서 결합계수가 첨 되었으나 샘플링 주기는 일정하다.

는 것을 볼 수 있다. 그러나 음의 분산은 파장 증가에 따라 증가하여 분산 경사 $S = dD/d\lambda = 10.1$ ps/nm²의 보상이 가능하며 이것들은 결합 계수의 첨으로부터 발생한다.

그림 4의 결과는 $\Delta n_1 = 7 \times 10^{-4}$ 을 제외하고 그림 3과 같은 파라미터를 사용하여 계산한 결과이다. 이 결과에서는 투과율이 모든 WDM 채널에 대해 충분히 작아 결합계수 첨에 의한 영향이 없으며 분산 경사 값이 $S = 26.8$ ps/nm²이 된다. 그러나 이 경우에도 채널 대역폭은 채널에 따라 변화한다. 그림 5는 변조 지수 Δn_1 이 4×10^{-4} 에서 7×10^{-4} 까지 변화할 때 WDM 파장에서의 분산과 각 채널에 대한 대역폭을 나타낸다. 변조 지수가 증가할 때 음의 분산과 채널 대역폭이 증가한다. 여기서 WDM 채널들의 투과, 반사 그리고 분산 특성이 그림 2(하)의 결합계수 분포와 변조지수의 곱에 의해 결정되므로 분산 경사가 변화된다. 그리고 단파장 채널의 대역폭은 장파장 채널의 대역폭보다 좁다. 이것은 WDM 채널의 수의 증가를 제한하는 요인이 된다.

결합계수 첨에 의한 분산 경사 유도 방법에서 단파장 채널의 대역폭은 장파장 채널의 대역폭보다 좁다. 그러나 기존의 샘플링 주기 첨에 의한 분산 경사 유도 방법^[10-12]에서는 단파장 채널이 장파장 채널보다 대역폭이 더 넓다. 이 두 가지 첨을 모두 사용하였을 때 채널 대역폭을 일정하게 유지시킬 수 있다. 그림 6은 샘플링 주기 Λ_s 첨만 있을 때($\delta\Lambda_s/\Lambda_s = 0.9\%$), 결합계수 첨만 존재할 때와 두 가지 첨이 모두 존재할 때 WDM 채널 파장에서의 분산과 채널 대역폭을 나타낸다. 여기서 $\Delta n_1 = 5 \times 10^{-4}$ 이다. 분산 경사는 두 첨의 경우에

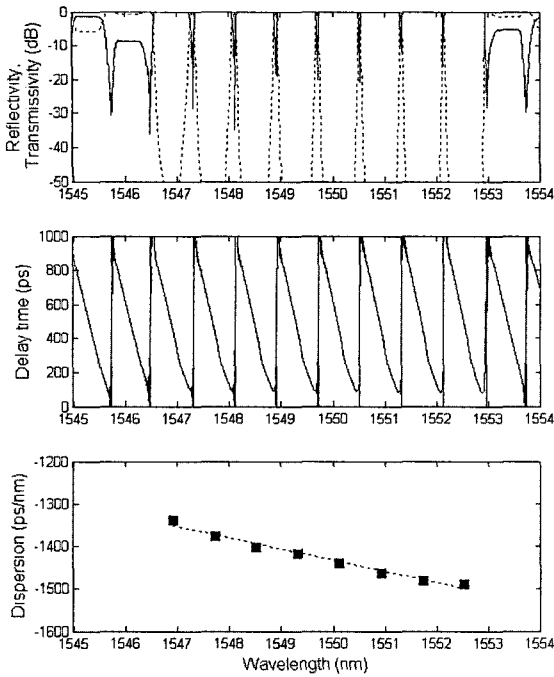


그림 4. $\Delta n_1 = 7 \times 10^{-4}$ 을 제외하고 그림 3과 같다.

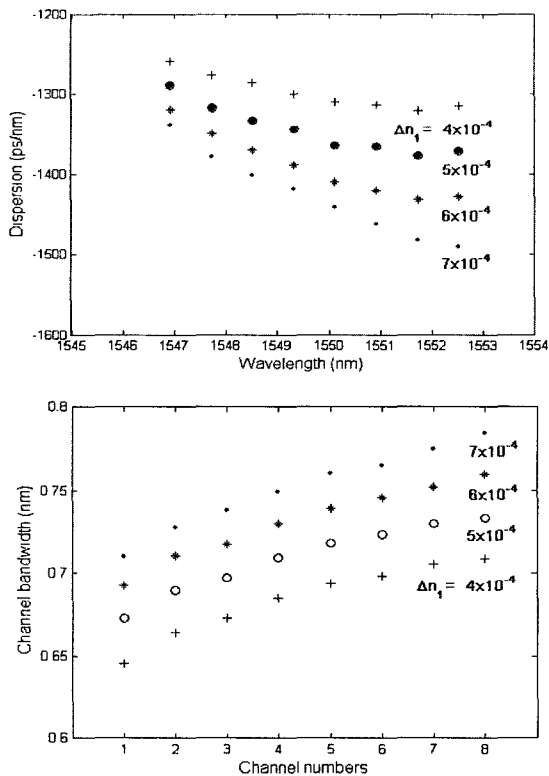


그림 5. $\Delta n_1 = 4 \times 10^{-4}$ 에서 7×10^{-4} 까지 변화 할 때 결합 계수 칩만 존재하는 위상 샘플링 FBG의 WDM 파장에서의 분산 (상)과 8 WDM 채널에 대한 대역폭 (하).

모두 음의 경사를 가지며 두 칩이 모두 존재할 때 경사가 증가한다. 그러나 채널 대역폭은 두 칩의 경우에 반대의 경사

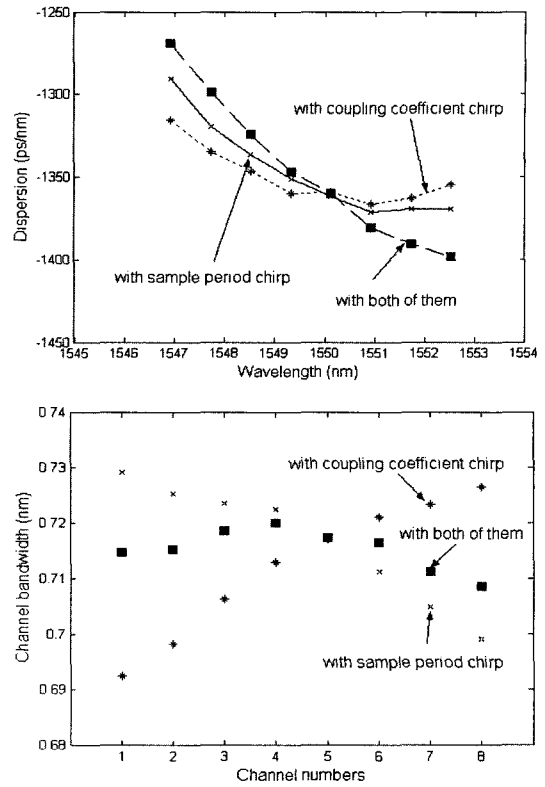


그림 6. $\Delta n_1 = 5 \times 10^{-4}$ 일때 결합 계수 칩, 샘플링 주기 칩 그리고 두 가지 칩이 모두 존재하는 위상 샘플링 FBG의 WDM 파장에서의 분산 (상)과 8 WDM 채널에 대한 대역폭 (하).

를 보여 두 칩이 모두 존재할 때 서로 상쇄되어 채널 대역폭은 일정하게 됨을 알 수 있다.

그림 7은 결합계수 칩과 샘플링 주기 칩을 갖는 순 위상 샘플링 FBG에서 변조지수가 4×10^{-4} 에서 7×10^{-4} 까지 변화할 때 WDM 파장에서의 분산과 각 채널에 대한 대역폭을 나타낸다. 그림 5의 결과와 비교하면 변조 지수가 증가할 때 음의 분산은 증가하나 모든 채널의 대역폭은 균일하여 WDM 채널의 수의 증가가 가능하다. 샘플링 주기 칩에 의해 음의 분산 경사가 증가한다. $\Delta n_1 = 6 \times 10^{-4}$ 인 FBG를 사용하면 같은 반사 대역폭을 제공하면서 100 GHz 간격을 갖는 8 채널 WDM 신호가 350 km의 Corning LEAF 광섬유로 전송될 때 발생하는 분산들을 보상할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 색 분산과 색 분산 경사를 보상하기 위하여 결합 계수가 파장 축을 따라 칩 된 순 위상 샘플링 FBG를 제안하였다. 그러나 본 연구의 결합계수 칩 FBG는 기존의 샘플링 주기 칩에 의한 분산 경사 유도 방법과 같이 채널에 따라 대역폭이 변화하는 특성을 보이기 때문에 채널 수의 증가에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 샘플링 주기 칩에 의한 분산 경사 유도 방법과 결합 계수가 파장 축을 따라 칩 된 방식을 혼합 사용하여 일정한 채널 대역폭을 갖는 색

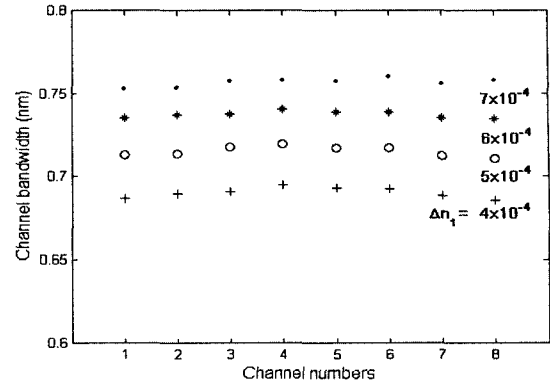
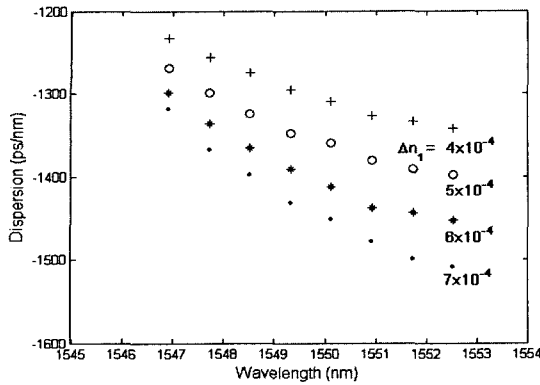


그림 7. $\Delta n_1 = 4 \times 10^{-4}$ 에서 7×10^{-4} 까지 변화 할 때 결합 계수 첩과 샘플링 주기 첩이 모두 존재하는 위상 샘플링 FBG의 WDM 파장에서의 분산 (상)과 8 WDM 채널에 대한 대역폭 (하).

분산과 색 분산 경사를 보상기를 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 호서대학교 벤처산업 컨소시엄 연구 지원 과제로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

[1] R. Kashyap, "Fiber Bragg Gratings," San Diego: Academic Press, 1999.
 [2] V. Jayaraman, Z. M. Chuang, and L. A. Coldereen, "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993.
 [3] M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole, and R. I. Laming, "Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operations," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 842-844, 1998.
 [4] H. Ishii, Y. Tohmori, T. Tamamura, and Y. Yoshikuni, "Super structure grating (SSG) for broadly tunable DBR lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 393-395, 1993.
 [5] A. V. Buryak, K. Y. Kolossovski, and D. Y. Stepanov, "Optimization of refractive index sampling for multichannel fiber Bragg gratings," *IEEE Quantum Electron.*, vol. 39, no. 1, pp. 91-98, 2003.
 [6] J. E. Rothenberg, H. Li, Y. Li, J. Popelek, Y. Sheng, Y. Wang, R. B. Wilcox, and J. Zweiback, "Dammann fiber Bragg gratings and phase-only sampling for high channel

counts," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 1309-1311, 2002.
 [7] W. H. Loh, F. Q. Zhou, and J. J. Pan, "Sampled fiber grating based-dispersion slope compensator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 10, pp. 1280-1282, 1999.
 [8] Y. Painchaud, A. Mailloux, H. Chotard, E. Pelletier, and M. Guy, "Multi-channel fiber Bragg gratings for dispersion and slope compensation," in *Proc. of Optical Fiber Communication Conference*, 2002, ThAA5, pp. 581-582.
 [9] Y. W. Song, S. M. R. Motaghian, D. Starodubov, J. E. Rothenberg, Z. Pan, H. Li, R. Wilcox, J. Popelek, R. Caldwell, V. Grubsky, and A. E. Willner, "Tunable dispersion slope compensation for WDM systems using a single non-channelized third-order-chirped FBG," in *Proc. of Optical Fiber Communication Conference*, 2002, ThAA4, pp. 580-581.
 [10] Hojoon Lee, Govind P. Agrawal, "Purely phase-sampled fiber Bragg gratings for broad-band dispersion and dispersion slope dispersion and dispersion slope compensation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 8, pp. 1091-1093, Aug. 2003.
 [11] Hojoon Lee, Govind P. Agrawal, "Add-drop multiplexers and interleavers wit broad-band chromatic dispersion compensation based on purely phase-sampled fiber Bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 635-637, Feb. 2004.
 [12] M. Morin, M. Poulin, A. Mailloux, F. Trepanier and Y. Painchaud, "Full C-band slope-matched dispersion compensation based on a phase sampled Bragg grating," in *Proc. of Optical Fiber Communication Conference*, 2004, WK1.

Purely Phase-Sampled Fiber Bragg Gratings with uniform bandwidth for Broadband Dispersion and Dispersion Slope Compensation

Hojoon Lee[†]

Dept. of Information Communication, Hoseo Univ., Mt. 29-1 Sechul-ri, Baebang-myun, Asan, 336-795, Korea

[†]*E-mail: hojoon@office.hoseo.ac.kr*

(Received August 18, 2004, Revised manuscript November 4, 2004)

We demonstrated numerically that both the chromatic dispersion and the dispersion slope could be compensated by using purely phase-sampled superstructure fiber Bragg gratings provided with chirp of coupling coefficient along the wavelength axis. Also, we propose a purely phase-sampled Bragg grating for dispersion and dispersion slope compensation by introducing a chirp in coupling coefficient and sampling function. The bandwidth of all reflected channels can be equalized.

OCIS Codes : 050.2770, 060.2330, 060.2340, 260.2030.