

啁啾 sinc 取样光纤光栅研究*

吴强 余重秀 王葵如 忻向军 王旭 于志辉 张琦

(北京邮电大学电子工程学院 163#, 北京 100876)

摘要 提出了一种特殊的取样光纤光栅:啁啾 sinc 取样光纤光栅. 研究表明,对于均匀光纤光栅进行啁啾 sinc 取样,可以实现色散斜率补偿和获得精确的反射波长数控制;对啁啾光纤光栅进行啁啾 sinc 取样,则能够实现色散和色散斜率的同时补偿,并且可以进行精确的波长数控制及获得各信道一致的反射率. 利用啁啾 sinc 取样光纤光栅,可以对各种传输光纤进行色散和色散斜率的补偿.

关键词 光纤光栅;啁啾 sinc 取样;色散补偿;色散斜率补偿

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

光纤光栅可用于单通道滤波及色散补偿,关于这方面的应用已有很多报道^[1-3]. 取样光纤光栅则是一种用于多通道滤波和色散补偿的非常重要的无源光器件. 随着密集波分复用系统向着大容量、高速率方向的快速发展,复用信道数越来越多,色散斜率补偿的问题日益突出. 最近,利用啁啾取样光纤光栅进行色散斜率补偿成为人们研究的热点,有关这方面的详细分析也有报道^[4-7]. 然而这些方面的研究都是基于矩形取样函数的分析,由于矩形取样会使得整个波长信道范围内的各信道反射率及反射带宽差别很大,对于实际应用系统而言矩形取样光纤光栅不是理想的器件. 为获得各通道一致的反射率和反射带宽,人们引入并且制作出 sinc 取样光纤光栅,它能够实现多通道的色散补偿,但不能用于色散斜率补偿^[8]. 为同时获得色散斜率补偿和各通道一致的反射率及反射带宽,本文提出了一种特殊的啁啾取样函数:啁啾 sinc 取样函数. 利用这种取样函数调制的光纤光栅,既可以获得各信道一致的反射率,又可以实现色散和色散斜率的同时补偿.

1 理论背景

文献[8]所提出的 sinc 取样函数为

$$f(z) = \sin \left[\frac{N_c \pi L}{p} \left(z + \frac{p}{2L} \right) \right] / N_c \cdot \sin \left[\frac{\pi L}{p} \left(z + \frac{p}{2L} \right) \right] \quad (0 \leq z \leq 1) \quad (1)$$

式中 N_c 是信道数, L 是整个光栅的长度, p 是取样周期.

由式(1)无法进行 sinc 函数啁啾取样的数值模拟研究. 因此,我们作变换如下:设 $z = x/L$, 式(1)可以写成

$$f(x) = \sin \left[\frac{N_c \pi}{p} \left(x + \frac{p}{2} \right) \right] / N_c \cdot \sin \left[\frac{\pi}{p} \left(x + \frac{p}{2} \right) \right] = \sin \left[\frac{N_c \pi}{p} x + \frac{N_c \pi}{2} \right] / N_c \cdot \sin \left[\frac{\pi}{p} x + \frac{\pi}{2} \right] \quad (0 \leq x \leq L) \quad (2)$$

假设

$$x = mP + y \quad m = 0, 1, 2, \dots, L/P - 1 \\ 0 \leq m \leq L/P - 1 \quad 0 \leq y < P \quad (3)$$

式中 L/P 是整数,则 $f(x)$ 表示为

$$f(x) = \sum_{m=0}^{L/P} \sin \left(N_c \pi m + \frac{N_c \pi}{2} + \frac{N_c \pi}{p} y \right) / N_c \sin \left(\pi m + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{p} y \right) \quad (x = mP + y \quad 0 \leq y < P) \quad (4)$$

$$f(x) = \sum_{m=0}^{L/P} \sin \left(N_c \pi m + \frac{N_c \pi}{p} y' \right) / N_c \sin \left(\pi m + \frac{\pi}{p} y' \right) \quad (x = mP + y \quad y' = P/2 + y \quad 0 \leq y' < P) \quad (5)$$

$$f(x) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{L/p} \sin \left(\frac{N_c \pi}{p} y' \right) / N_c \sin \left(\frac{\pi}{p} y' \right) & (N_c = 1, 3, 5, 7, \dots) \\ \sum_{m=0}^{L/p} (-1)^m \sin \left(\frac{N_c \pi}{p} y' \right) / N_c \sin \left(\frac{\pi}{p} y' \right) & (N_c = 2, 4, 6, 8, \dots) \end{cases} \quad (x = mP + y \quad y' = P/2 + y \quad 0 \leq y' < P) \quad (6)$$

把式(6)写成相关的形式,则

*国家 863 (No. 2001AA312240) 和自然科学基金 (No. 60177018) 资助项目
Tel: 010-62282040 Email: blueski_w@sohu.com
收稿日期: 2004-01-09

$$f(z) = \begin{cases} \sum_{m=0}^N \left[\frac{\sin(N_c \pi \frac{z}{P})}{N_c \sin(\pi \frac{z}{P})} \text{rect}(\frac{z}{P}) * \delta(z - mP) \right] & (N_c = 3, 5, 7, 9, \dots) \\ \sum_{m=0}^N \left[\frac{\sin(N_c \pi \frac{z}{P} + m\pi)}{N_c \sin(\pi \frac{z}{P})} \text{rect}(\frac{z}{P}) * \delta(z - mP) \right] & (N_c = 2, 4, 6, 8, \dots) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $N + 1$ 是总的取样个数, $\delta(z)$ 是冲激函数, $*$ 是相关符号. 显然, 式(7)可以很方便地进行啁啾取样的研究. 此时我们所提出的啁啾 sinc 取样光纤光栅有效折射率调制系数可以表示成

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \bar{\delta} n_{\text{eff}}(z) \sum_{i=0}^N \left\{ \left[F(z) \text{rect}(\frac{z}{P_i}) \right] * \delta(z - \sum_{k=0}^{i-1} P_k) \right\} \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda(z)} z \right] \right\} \quad (8)$$

式(8)中 $\bar{\delta} n_{\text{eff}}$ 是平均折射率调制系数, ν 是表示折射率变化条纹的可见度, $i = 0, 1, 2, \dots, N$ 指的是第 i 个取样, $N + 1$ 是总的取样个数. $P_i, \Lambda(z)$ 分别是取样周期和光栅周期, 它们可以表示为

$$P_i = P_0(1 + iC_s) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

$$\Lambda(z) = \Lambda_0(1 + c_p z + c_{pl} z^2) \quad (10)$$

式(9)、(10)中 P_0 是初始取样周期, 对于 $i = 0, \sum_{k=0}^{i-1} P_k = 0$. c_s 是取样周期啁啾系数, Λ_0 为初始光栅周期, c_p, c_{pl} 分别是线性和一阶非线性光栅周期啁啾系数.

函数 $F(z)$ 由下式给出

$$F(z) = \begin{cases} \frac{\sin(N_c \pi \frac{z}{P_i})}{N_c \sin(\pi \frac{z}{P_i})} & (N_c = 1, 3, 5, 7, \dots) \\ \frac{\sin(N_c \pi \frac{z}{P_i} + i\pi)}{N_c \sin(\pi \frac{z}{P_i})} & (N_c = 2, 4, 6, 8, \dots) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中 N_c 是总信道数. 函数 $F(z)$ 中符号的改变可以通过在相邻的折射率系数包络间插入 π

相移来实现^[8]. 图 1 是啁啾 sinc 取样光纤光栅折射率调制系数及插入相移位置的示意图.

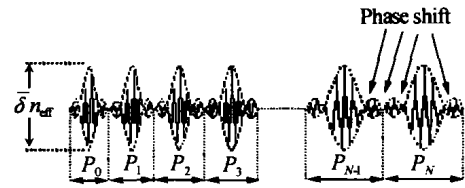


图 1 啁啾 sinc 取样光纤光栅折射率调制系数及插入相移位置

Fig. 1 Refractive index and phase profile of chirped-sinc-sampled fiber gratings

2 数值模拟

图 2(a)、(b)、(c) 分别示出了对 5 cm 长均匀光纤光栅进行均匀和啁啾 sinc 取样的反射率和时延数值模拟曲线. 光栅参数: $\Lambda_0 = 521.8855 \text{ nm}$, $\bar{\delta} n_{\text{eff}} = 4 \times 10^{-4}$, $c_p = 0 \text{ mm}^{-1}$, $P_0 = 1 \text{ mm}$, $N = 50$, $N_c = 5$, 这些结果是利用传输矩阵法运算得出的, 模拟中用余弦函数作为变迹函数对旁瓣进行了抑制. 以下所有模拟中, 各参数设定为 $n_{\text{eff}} = 1.485$, $\Lambda_0 = 521.8855 \text{ nm}$ (布喇格波长, $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$), $P_0 = 1 \text{ mm}$, $c_{pl} = 0$.

参考图 2, 定义从短波长到长波长各个反射谱响应依次为信道 1、2、3、4、5. 比较图 2(a)、(b)、(c) 可知, 当均匀 sinc 取样时, 各信道的反射率和带宽保持一致, 时延曲线表现为均匀光纤光栅滤波器的时延特点. 由此可见, 均匀取样不能进行色散斜率补偿. 啁啾 sinc 取样时, 各信道反射率基本一致, 但是反射带宽差别较大, 时延响应也不一致: 第 1 信道和第 5 信道带宽最大, 第 2 和第 4 信道次之, 第 3

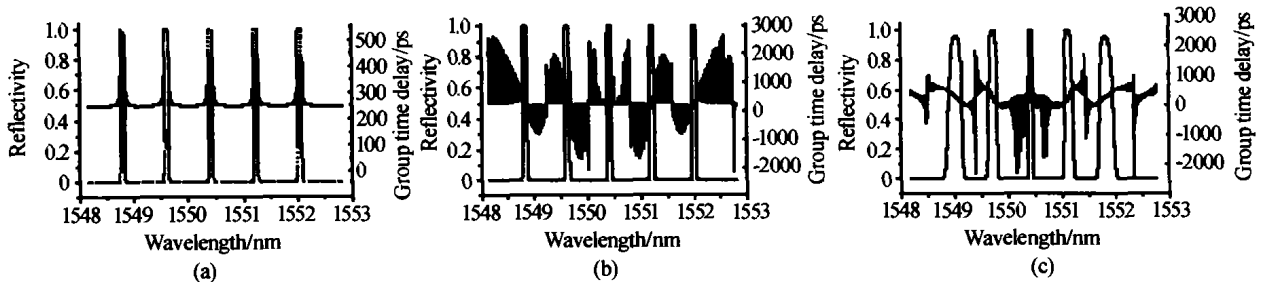


图 2 (a) 均匀 ($c_s = 0$), (b) 啁啾 ($c_s = 6 \times 10^{-4}$), (c) 啁啾 ($c_s = 6 \times 10^{-3}$) sinc 取样光纤光栅 (均匀光栅周期) 反射谱及时延相应曲线

Fig. 2 Reflective spectrum and time delay response of (a) uniform- ($c_s = 0$), (b) chirped- ($c_s = 6 \times 10^{-4}$) and (c) chirped- ($c_s = 6 \times 10^{-3}$) sinc-sampled FBG

信道最小;第 1 信道的色散量为负值,从第 1 到第 5 信道色散量依次增加,第 5 信道色散量为正值,因而可用于色散斜率补偿. 产生这种现象的原因是:对于啁啾取样,不同的信道对应于不同的傅里叶级数,从而等效于不同的光栅啁啾系数,因而会有不同的带宽和色散量^[9]. 比较图 2(b)、(c),当取样啁啾系数较大时,时延曲线比较适合于色散补偿,利用这一特性即可进行多通道的色散斜率补偿,但此时各个信道的带宽差别很大,这一点不利于多通道的色散斜率补偿;当取样啁啾系数较小时,各信道的带宽差别较小,但是时延曲线不利于色散补偿,因而无法进行色散斜率补偿.

如果光栅周期本身是线性啁啾变化的,它就可以用来进行色散补偿;对这种光栅进行均匀取样,则可以实现多通道色散补偿^[8]. 如果是对啁啾光纤光栅进行啁啾 sinc 取样,就可以实现多通道的色散和色散斜率的同时补偿,而且能够使各个波长信道具有非常好的一致性的反射率和反射带宽. 图 3(a)、(b)分别示出了对 10 cm 长啁啾光纤光栅进行均匀和啁啾 sinc 取样的反射率和时延的数值模拟曲线. 光栅参数: $\Lambda_0 = 521.8855 \text{ nm}$, $\bar{\delta}n_{\text{eff}} = 4 \times 10^{-4}$, $c_p = 2.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$, $P_0 = 1 \text{ mm}$, $N = 100$, $N_c = 5$.

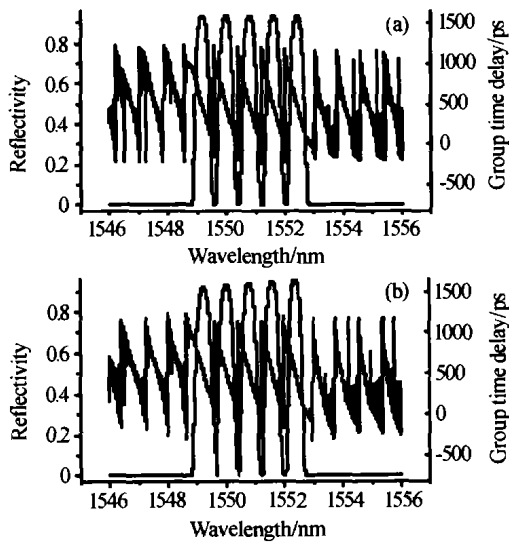


图 3 (a) 均匀 ($c_s = 6 \times 10^{-4}$), (b) 啁啾 ($c_s = 6 \times 10^{-4}$) sinc 取样光纤光栅 (啁啾光栅周期) 反射谱及时延相应曲线

Fig. 3 Reflective spectrum and time delay response of (a) chirped- ($c_s = 6 \times 10^{-4}$) and (b) uniform- ($c_s = 0$) sinc-sampled FBG.

由图 3 可以看出,对于均匀 sinc 取样,各个信道的反射率和 3 dB 带宽基本是一致的,其时延曲线也大致相同,即所有信道的色散补偿量基本相同;对于啁啾 sinc 取样,各个信道的反射率沿波长方向递增,3 dB 带宽则沿波长方向递减,但差别都不大,而各信道的色散补偿量是沿波长方向递增的(表现为

时延曲线坡度变陡),显然,这对于实际系统来说进行色散和色散斜率补偿是很有意义的. 产生上述现象的原因是:由于啁啾取样,每个信道都对应于一个啁啾系数,而这个啁啾系数和光栅本身的啁啾系数之和才是该信道实际的等效光栅啁啾系数^[9].

通过以上分析可知,对啁啾光纤光栅进行 sinc 啁啾取样能够实现色散和色散斜率的同时补偿. 图 4(a)、(b)示出了反射谱各信道 3 dB 带宽和色散随取样周期啁啾系数变化 c_s 的关系曲线. 光栅参数为: $\Lambda_0 = 521.8855 \text{ nm}$, $\bar{\delta}n_{\text{eff}} = 4 \times 10^{-4}$, $c_p = 2.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$, $P_0 = 1 \text{ mm}$, $N = 100$, $N_c = 5$.

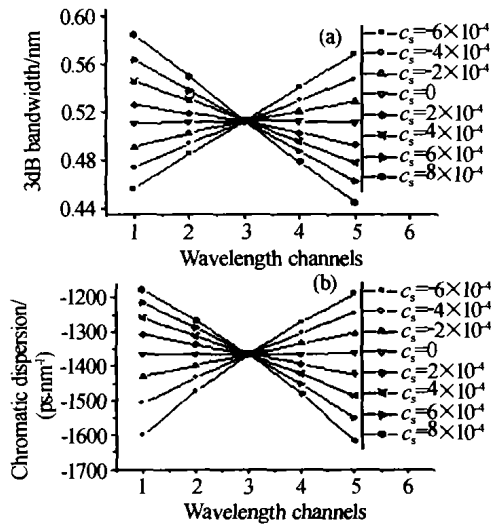


图 4 啁啾 sinc 取样啁啾光纤光栅各信道 (a) 3 dB 带宽和 (b) 色散补偿量随取样周期啁啾系数 c_s 的变化曲线
Fig. 4 (a) 3 dB Bandwidth and (b) chromatic dispersion for different channels of the chirped-sinc-sampled chirped FBG. The chirped coefficient c_s varies from -6 to 8×10^{-4}

如图 4(a),当取样周期啁啾系数 c_s 一定且为正数时,从信道 1 到信道 5,3 dB 带宽线性减小;当取样周期啁啾系数 c_s 一定且为负数时,从信道 1 到信道 5,3 dB 带宽线性增加. 取样周期啁啾系数越大,各个信道之间 3 dB 带宽差别也越大. 图 4(b)是各信道色散随取样周期啁啾系数 c_s 变化的关系曲线. 当 c_s 一定且较小时,从信道 1 到 5,各信道内色散沿波长方向均匀地减小,利用这一特性,即可用于多通道色散和色散斜率的同时补偿. 当 c_s 一定且较大时,各信道内色散沿波长方向表现为非线性地减小. 产生以上现象的原因是:由于啁啾取样,每个信道都对应于一个啁啾系数,而这个啁啾系数和光栅本身的啁啾系数之和才是该信道实际的等效光栅啁啾系数^[9],它的各个信道对应布喇格波长和等效光栅周期啁啾系数可以由以下各式表示

$$\lambda_{\text{Bragg}}(m) = \lambda_{\text{Bragg}} \left(1 - \frac{m}{P_0}\right) \quad (12)$$

$$c_p(m) = c_p + \frac{mc_s \Lambda_0}{2P_0^2} \quad (13)$$

$$c_{pl}(m) = c_{pl} + \frac{mc_s^2 A_0}{2P_0^3} \quad (14)$$

式中 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 代表不同的傅里叶级数.

由式(12)~(14)可知,信道 1-5 分别对应于傅里叶级数 2, 1, 0, -1, -2, 当取样周期啁啾系数 c_s 一定且为正数时,它们的等效光栅啁啾系数逐渐减小,因此 3 dB 带宽逐渐减小,反之则逐渐增大. 对于较小的 c_s , 仅仅需要考虑一阶啁啾系数,因而各信道内色散沿波长方向近似为线性减小;当 c_s 较大时,我们还需考虑高阶啁啾系数,它等效于一阶非线性光栅周期啁啾系数 c_{pl} , 从而使得各信道内色散沿波长方向表现为非线性地减小.

对于一个以某种传输光纤组成的通信系统,要在它的工作波长上获得零色散,即进行色散和色散斜率的完全补偿,就必须使得取样光线光栅的相对色散斜率(RDS)等于光纤的 RDS^[10]. 一般来说,各种传输光纤在 1550 nm 波段的 RDS 是在 0.0033 到 0.02 nm⁻¹ 之间变化^[11].

图 5 示出了啁啾 sinc 取样光纤光栅的相对色散斜率随取样周期啁啾系数 c_s 变化的曲线. 光栅参数: $A_0 = 521.8855$ nm, $\delta n_{\text{eff}} = 4 \times 10^{-4}$, $c_p = 2.5 \times 10^{-6}$ mm⁻¹, $P_0 = 1$ mm, $N = 100$, $N_c = 5$.

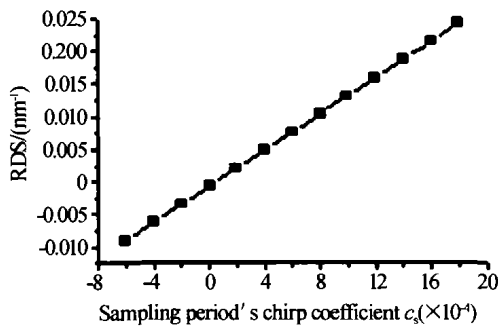


图 5 相对色散斜率随取样周期啁啾系数 c_s 变化的曲线

Fig. 5 RDS vs. sampling period's chirp coefficient c_s of the chirped-sinc-sampled FBG with chirped grating period c_s

如图 5, 取样光栅的 RDS 随取样周期啁啾系数的增大(从 -6×10^{-5} 增大到 1.8×10^{-4}) 而线性地增加(从 -0.009 增加到 0.024). 由于各种传输光纤在 1550 nm 波段的 RDS 是在 0.0033 到 0.02 nm⁻¹ 之间变化(对应的取样周期啁啾系数从 1×10^{-5} 变化到 1.8×10^{-4}), 而与之相对应的 3 dB 带宽变化范围是 0.49 到 0.53 nm, 差别很小, 因此这种取样光纤光栅可以用于各种传输光纤的色散和色散斜率的补偿, 而且还能获得精确的反射波长数及各信道近乎一致的反射率和 3 dB 带宽.

3 结论

综上所述表明, 取样周期啁啾变化的 sinc 取样

均匀光纤光栅可以实现多通道色散斜率补偿, 并且可以获得各信道一致的反射率; 取样周期啁啾变化的 sinc 取样啁啾光纤光栅, 则能够同时补偿多通道色散和色散斜率, 同时各信道的反射率一致. 通过合理地设计取样周期啁啾系数和光栅周期啁啾系数, 可以精确地控制反射波长数, 实现不同色散和色散斜率的同时补偿. 对于我们所使用的各种传输光纤(它们在 1550 nm 波段的 RDS 是在 0.0033 到 0.02 nm⁻¹ 之间变化), 由于它所对应的取样周期啁啾系数变化范围很小(相应的 3 dB 带宽变化也很小), 因此只要合理设计参数, 啁啾 sinc 取样光纤光栅均可以对它们进行色散和色散斜率的同时补偿, 并且还能获得各信道近乎一致的反射率和 3 dB 带宽.

参考文献

- 1 张银英, 王德翔, 戴恩光, 等. 基于非线性啁啾光纤光栅实现的色散可调谐. 光子学报, 2002, 31(12): 1505 ~ 1509
Zhang Y Y, Wang D X, Dai E G, et al. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(12): 1505 ~ 1509
- 2 吴强, 余重秀, 辛雨, 等. 16 × 16 Gb/S 啁啾光纤光栅色散补偿系统性能研究. 光子学报, 2003, 32(4): 451 ~ 454
Wu Q, Yu C X, Xin Y, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 451 ~ 454
- 3 胡贵军, 潘玉寨, 郭玉彬. 基于光纤光栅的高功率激光器. 光子学报, 2004, 33(4): 405 ~ 408
Hu G J, Pan Y Z, Guo Y B. Acta Photonica Sinica, 33(4): 405 ~ 408
- 4 Xie Y, Lee S, Pan J. et al. Tunable compensation of the dispersion slope mismatch in dispersion-managed systems using a sampled nonlinearly chirped FBG. Photon Technol Lett, 2000, 12(10): 1417 ~ 1419
- 5 Wang Chinghua, Chen L R, Smith P W E. Analysis of chirped-sampled and sampled-chirped fiber Bragg gratings. Applied Optics, 2002, 41(9): 1654 ~ 1660
- 6 Ouellette F, Krug P A, Stephens T, et al. Broadband and WDM dispersion compensation using chirped sampled fiber Bragg gratings. Electron Lett, 1995, 31(11): 899 ~ 901
- 7 Feng Jia, Chen Xiangfei, Fan Chongcheng, et al. A novel method to achieve various equivalent chirp profiles in sampled Bragg gratings using uniform-period phase masks. Optics Communications, 2002, 205(1): 71 ~ 75
- 8 Ibsen M, Durkin M K, Cole M J, et al. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation. Photon Technol Lett, 1998, 10(6): 842 ~ 844
- 9 Chen Xiangfei, Luo Yi, Fan Chongcheng, et al. Analytical expression of sampled Bragg gratings with chirp in the sampling period and its application in dispersion management design in a WDM system. Photon Technol Lett, 2000, 12(8): 1013 ~ 1015

- 10 Gruner-Nielsen L, Knudsen S N, Veng T, *et al.* Design and Manufacture of dispersion compensating fibre for simultaneous compensation of dispersion and dispersion slope. in Optical Fiber Communication Conf. 1999. WM13, 232 ~ 234
- 11 Tur M, Levy U, Danziger Y. Modules for chromatic dispersion and dispersion slope management. in Optical Fiber Communication Conf. 2002. TuT4, 135 ~ 136

Research of Chirped-sinc-sampled Fiber Bragg Gratings

Wu Qiang, Yu Chongxiu, Wang Kuiru, Xin Xiangjun, Wang Xu, Yu Zhihui, Zhang Qi
Beijing University of Posts & Telecommunications, P. O. Box 163#, Beijing 100876

Received date: 2004-01-09

Abstract A special kind of sampled fiber Bragg grating (FBG) was proposed and researched: chirped-sinc-sampled FBG. By chirping the sampling period of sinc-sampled FBG with uniform grating period, both the accurate number of reflective wavelength channels and chromatic dispersion slope compensation can be obtained. By chirping the sampling period of sinc-sampled FBG with chirped grating period, the number of wavelength channels we needed and compensate both the dispersion and dispersion slope can be controlled simultaneously. Meanwhile, nearly identical reflectivity in all wavelength channels is also obtained. By utilizing chirped-sinc-sampled FBG, both the dispersion and dispersion slope can be simultaneously compensated for various transmission fibers.

Keywords Fiber Bragg grating; Chirped-sinc-sampled; Dispersion compensation; Dispersion slope compensation



Wu Qiang was born in 1974, Ph. D. student of School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications. Main research interests focus on optical fiber Bragg gratings, OCDMA, and all optical communication system.