

文章编号: 0253-2239(2009)03-0617-06

相移超结构光纤布拉格光栅相位编/解码器的 分析与设计

马 乐¹ 殷洪玺² 朱立新¹

(¹ 北京大学信息科学技术学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

² 大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 详细给出了采用传输矩阵法(TMM)分析的基于相移超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)的相位编/解码器的理论,提出了设计方法。以长度为 127 切普(chip)的二相位和四相位编/解码对为例,对设计结果进行了仿真验证,通过与文献中的结果对比,进一步说明了分析方法和设计方法的正确性。仿真还比较了四相位码的 A 族序列和二相位码的 Gold 序列对光栅写入精度的灵敏度,发现在相同码长条件下,四相位码对光栅相移制作控制精度的要求要高于二相位码。

关键词 光通信; 光码分多址; 相移超结构光纤布拉格光栅; 时间相位编/解码器; 传输矩阵法

中图分类号 TN919.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0617

Analysis and Design of the Encoder/Decoder Based on Phase-Shifted Superstructured Fiber Bragg Grating

Ma Le¹ Yin Hongxi² Zhu Lixin¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

² School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract The analysis theory of phase-shifted superstructured fiber Bragg grating (SSFBG) encoder/decoder is detailed, in the basis of transfer matrix method (TMM), and the design methodology of such the encoder/decoder is developed, which is validated by the simulation results of the 127-chip 2-phase and 4-phase encode/decoder. The design methodology and results possesses guidance as well as reference value for the analysis of phase-shifted SSFBG. Meanwhile, the sensitivity difference between 4-phase family A code and 2-phase Gold code are also discussed, and the results reveal that the former codes require much higher precision of fabrication technology of gratings, than the latter ones under the scenario of the same code length.

Key words optical communications; optical code division multiple access (OCDMA); phase-shifted supersutructured fiber Bragg grating (SSFBG); temporal phase encoder/decoder; transfer matrix method

1 引 言

作为一种新的多址技术,光码分多址(OCDMA)与传统的光时分多址(OTDM)和波分多址(WDMA)技术相比具有多方面的优势,如异步随机接入、动态分配带宽、软容量、支持可变速率 and 区分服务质量等^[1]。目前已提出多种用于光码分多址的编/解码方案,如时域编码、谱域编码和二

维时/谱域编码等^[2,3]。光编/解码器是光码分多址系统中的关键器件之一,目前的光编/解码器实现方案主要分为两大类,一是基于光纤延迟线的一维非相干时域编/解码和基于光纤延时线及波分复用/解复用器的二维跳波长/扩时非相干编/解码;二是基于空间相位调制器(相位掩模板)的谱域编/解码和基于超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)的时间相位

收稿日期: 2008-08-06; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60772001)资助课题。

作者简介: 马 乐(1984—),女,硕士研究生,主要从事光码分多址接入网方面的研究。E-mail: lema@pku.edu.cn

导师简介: 殷洪玺(1959—),男,博士后,教授,主要从事光纤通信系统与网络、光信号处理和光载无线等方面的教学和科研工作。E-mail: hxyin@pku.edu.cn (通信联系人)

编/解码^[4~6]。对于时间相位光编/解码,可以通过相移超结构光纤布拉格光栅^[7],重构等效啁啾光纤布拉格光栅(REC-FBG)^[8,9]、采样光纤布拉格光栅^[10]和集成光波导等方案来实现。

采用光纤布拉格光栅的时间相位编/解码器,由于实现简单、成本低,能实现的光码长度大,容纳的网络用户数多,性能好,而倍受人们的青睐。本文详细给出了采用传输矩阵法分析基于相移超结构光纤布拉格光栅相位编/解码器的理论,提出了设计方法,并以长度为127切普(chip)的二相位和四相位编/解码对为例,对设计结果进行了仿真验证,通过与文献中结果的对比,进一步说明了分析和设计方法的正确性。

2 理论分析

SSFBG是一种折射率调制函数随长度缓慢变化的光纤布拉格光栅,对于相移超结构光纤布拉格光栅,在SSFBG两相邻子区中间插入一个相移。其示意图如图1所示。利用传输矩阵法^[11,12]将相移SSFBG分为 N 个子区,每个子区对于相移SSFBG反射谱的贡献大致相同。在实际应用中,相移SSFBG的子区长度通常相等,记为 L_{chip} ,相邻子

区之间相对相位变化用 φ_j 来表示,下标 j 代表第 $j+1$ 个子区相对于第 j 个子区的相移,则光经过每个子区的传输矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} T_{(j+1)L_{\text{chip}}} \\ R_{(j+1)L_{\text{chip}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21}^* \exp(-i\varphi_j) \\ S_{21} \exp(i\varphi_j) & S_{11}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{jL_{\text{chip}}} \\ R_{jL_{\text{chip}}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 T 和 R 分别为前向和后向传输模式的振幅,*为复共轭符号,

$$S_{11} = \cosh(\gamma L_{\text{chip}}) - i \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma L_{\text{chip}}), \quad (2)$$

$$S_{21} = i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L_{\text{chip}}), \quad (3)$$

$\gamma^2 = \kappa^2 - (\Delta\beta)^2$, $\Delta\beta = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B)$ 为布拉格波长失调量, n_{eff} 为有效折射率, $\kappa = \pi\delta n/\lambda_B$, δn 表示折射率调制深度, λ_B 表示布拉格波长。

有了每个子区的传输矩阵,可以简单快速地得到整个光栅的反射谱。以一个折射率调制函数为 $\varphi(z) = [0 \ \pi \ \pi]$ 的相移SSFBG为例,其相邻子区相对相移为: $[\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2] = [0, \pi, 0]$,则对应的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} T_{3L_{\text{chip}}} \\ R_{3L_{\text{chip}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21}^* \exp(-i\varphi_2) \\ S_{21} \exp(i\varphi_2) & S_{11}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21}^* \exp(-i\varphi_1) \\ S_{21} \exp(i\varphi_1) & S_{11}^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21}^* \exp(-i\varphi_0) \\ S_{21} \exp(i\varphi_0) & S_{11}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ R_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

结合边界条件 $R_{3L_{\text{chip}}} = 0$,易知该光栅的反射系数为

$$r = \frac{R_0}{T_0} = - \frac{S_{11}^2 S_{21} - |S_{11}|^2 S_{21} - |S_{21}|^2 S_{21} + (S_{11}^*)^2 S_{21}}{S_{11} |S_{21}|^2 - 2S_{11}^* |S_{21}|^2 + (S_{11}^*)^3}. \quad (5)$$

反射系数,依次为 $H_{\text{en}}(\omega) = r_{\text{en}}(\omega)$ 和 $H_{\text{de}}(\omega) = r_{\text{de}}(\omega)$ 。

假设一束理想激光脉冲 $\delta(t)$ 先后经过编码器光栅和解码器光栅,经反射后其频域输出为 $R(\omega) = H_{\text{en}}(\omega)H_{\text{de}}(\omega)$,对应的时域表达式为 $r(t) = h_{\text{en}}(t)h_{\text{de}}(t)$, $h_{\text{en}}(t)$ 和 $h_{\text{de}}(t)$ 分别为编码器的冲激响应和解码器的冲激响应。根据匹配滤波理论,当解码器的频域输出特性与编码器频谱的复共轭一致时,将能获得最大的信噪比。因此,当解码器光栅和编码器光栅满足

$$H_{\text{de}}(\omega) = CH_{\text{en}}^*(\omega), \quad (6)$$

式中 C 为常实数时,解码后信号具有最佳信噪比。对应到时域中,相当于解码器冲激响应与编码器冲激

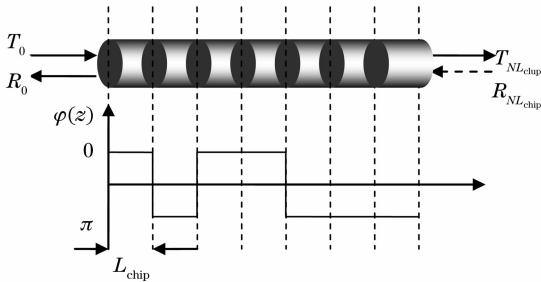


图1 相移超结构光纤布拉格光栅相位变化示意图

Fig. 1 Scheme of phase variation of the Phase-shifted SSFBG

在光编码和解码过程中,将编码器光栅和解码器光栅看作两个滤波器,则其频率响应函数就是光栅的

响应波形相同,但时间反转,即 $h_{de}(t) = Ch_{en}(-t)$ 。在满足匹配条件(6)式后,解码器光栅相当于自相关接收机,此时能够正确识别出输入的光脉冲信号。若解码器光栅不满足匹配条件,则解码器充当一个互相关接收机,无法正确识别出输入的光脉冲信号。

已知解码光栅的频响函数,反过来设计它的空间结构。一种简单可行的方案是将光栅反方向放置,且解码器折射率调制函数 $\varphi'(z)$ 与编码器折射

率调制函数 $\varphi(z)$ 满足

$$\varphi'(z) = [2\pi - \varphi(-z)]_{\text{mod}2\pi}, \quad (7)$$

下面以(4)式代表的相移 SSFBG 编码器($\varphi(z) = [0 \ \pi]$)为例,按照上述方法设计与之对应的解码器,以此来证明该方法的合理性。

这里需要强调的是,由于反相放置了光栅,因此传输矩阵(1)中的参数 L_{chip} 需要变为 $-L_{\text{chip}}$,由(7)式得到折射率调制函数为 $\varphi'(z) = [\pi, \pi, 0]$ 。由此可以推导出,该解码光栅对应的频域输出为

$$H_{de}(\omega) = -\frac{-(S_{11}^*)^2 S_{21}^* + |S_{11}|^2 S_{21}^* + |S_{21}|^2 S_{21}^* - (S_{11})^2 S_{21}^*}{S_{11}^* |S_{21}|^2 - 2S_{11} |S_{21}|^2 + (S_{11})^3}, \quad (8)$$

将(8)式与(5)式相比较,可见(9)式结果与(6)式一致

$$H_{de}(\omega) = -r_{en}^*(\omega) = -H_{en}^*(\omega). \quad (9)$$

3 设计结果仿真验证

图 2 和图 3 分别给出了 127 切普的二相位编/解码光栅 G127:G127* 和四相位编/解码光栅 A127:A127* 的反射谱。图 2 选用的是 127 切普的 Gold 码,图 3 选用的是 127 切普的 A 族码^[13]。光栅参数的选择:光栅周期 $\Lambda = 518 \text{ nm}$,折射率调制深度 $\delta n = 4 \times 10^{-5}$,切普对应的光栅长度为 0.31 mm 。可见,在很长的波长范围内编码器和解码器具有相似的反射谱,这从一个方面证明了编码光栅和解码光

栅的共轭性。

另一方面,根据弱反射光栅理论(峰值反射率小于 20%),输入超短光脉冲,其反射波形与光栅的折射率调制函数一致^[14]。在输入光脉冲是 2.5 ps 的高斯脉冲信号时,仿真得到的编/解码器匹配自相关输出和不匹配互相关输出分别如图 4 和图 5 所示。

仿真结果表明,当解码器光栅与编码器光栅相匹配时,解码得到的信号具有较好的脉冲波形,脉冲宽度 $\Delta\tau$ 基本等于单级光栅的延时 $2n_{\text{eff}}L_{\text{chip}}/c$ (c 为真空中的光速);当解码器光栅与编码器光栅不匹配时,解码得到的信号类似于白噪声。由此可见,设计出的相移 SSFBG 编/解码器能够实现正确的编/解码。

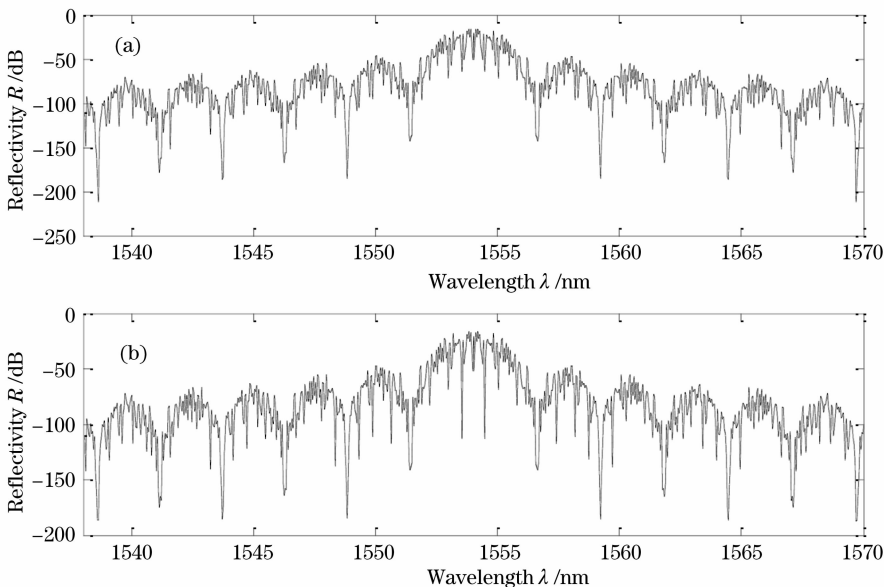


图 2 127 切普二相位编/解码光栅反射谱。(a)编码光栅 G127; (b)解码光栅 G127*

Fig. 2 Reflection spectrums for 127-chip two-phase en/decoding gratings. (a) encoder G127; (b) decoder G127*

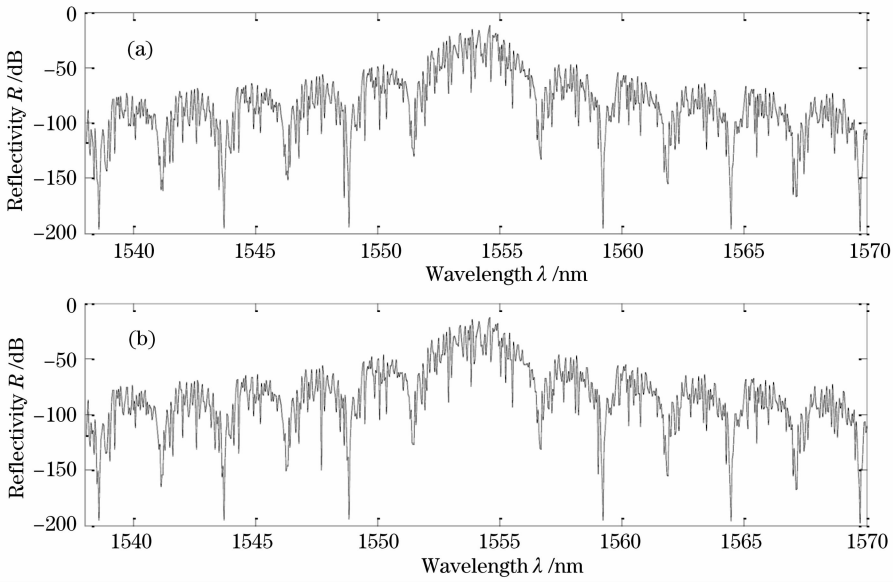


图 3 127 切普四相位编/解码光栅反射谱。(a)编码光栅 A127; (b)解码光栅 A127*

Fig. 3 Reflection spectrums for 127-chip four-phase en/decoding gratings: (a) encoder A127; (b) decoder A127*

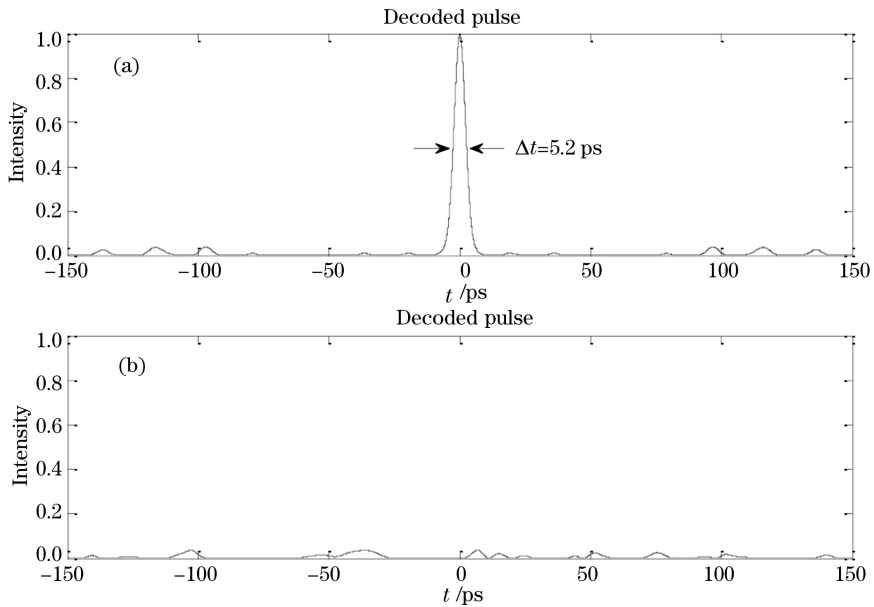


图 4 127 切普 Gold 码字解码输出。(a) 匹配解码; (b) 非匹配解码

Fig. 4 Decoding output for 127-chip Gold code and 2.5-ps input pulses. (a) matched decoder; (b) mismatched decoder

4 光栅写入精度讨论

仿真过程中还发现,四相位相移 SSFBG 编/解码器在光栅写入相移过程中,对精度的要求高于二相位相移 SSFBG 编/解码器。图 6 仿真了输入 2.5 ps 高斯脉冲的二相位编码和四相位编码对应不同精度误差范围下性能的改变趋势。可见,四相位码对光栅相移制作控制精度的要求要高于二相位

码。随着误差范围加大,A 族序列的自相关性能和互相关性能均下降得比 Gold 序列快,具体地,对于自相关峰值旁瓣比,当误差大于 7.5% 时,A 族序列的性能已经劣于 Gold 序列。对于互相关峰值比,当误差大于 15% 时,A 族序列的性能即劣于 Gold 序列。

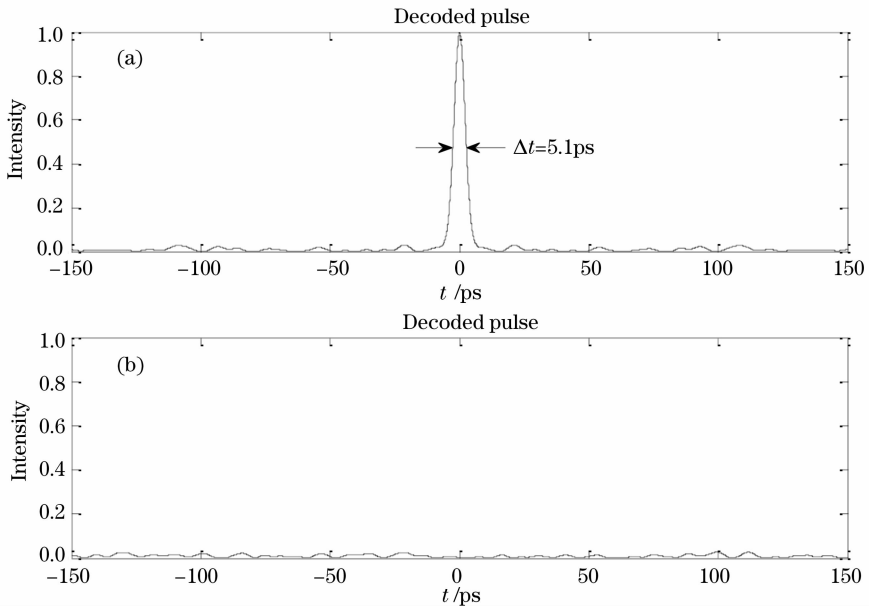


图 5 127 切普 A 族码字解码输出。(a) 匹配解码；(b) 非匹配解码

Fig. 5 Decoding output for 127-chip A codes and 2.5-ps input pulses. (a) matched decoder; (b) mismatched decoder

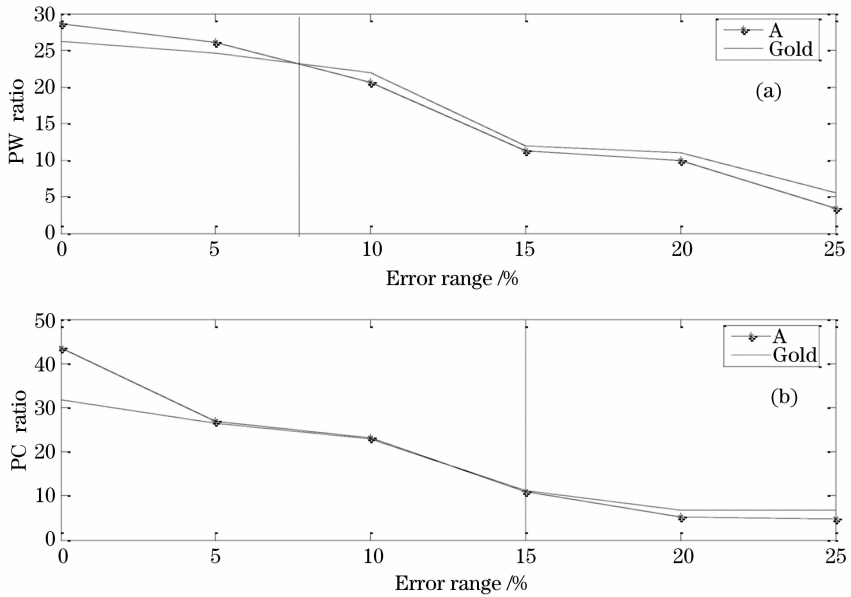


图 6 127 切普 Gold 序列和 A 族序列误差容忍。(a) PW 值；(b) PC 值

Fig. 6 Tolerance of fabrication technology: 127-chip Gold code versus 127-chip family A code. (a) PW ratio; (b) PC ratio

5 结 论

根据传输矩阵原理分析了多级相移 SSFBG 的反射传递函数和编/解码器设计方法,以长度 127 切普的二相位和四相位编/解码为例,对设计结果进行了仿真验证。仿真证明了设计的编/解码器具有较好的编/解码效果。仿真比较了四相位码的 A 族序列和二相位码的 Gold 序列对光栅写入精度的灵敏度,发现相同码长条件下,四相位码对光栅相移制作控制精度的要求高于二相位码。

参 考 文 献

- 1 Xu Wang, Ken-ichi Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA [J]. *J. Lightwave Technology*, 2004, **22**(10): 2226~2235
- 2 E. Park, A. J. Mendez, E. M. Gasmeriere. Temporal/spatial CDMA networks; Design, demonstration and comparison with temporal network [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(10): 1160~1162
- 3 G. C. Yang, C. Kwong. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WCDMA + CDMA for fiber-optic networks [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, **45**(11): 1426~1436
- 4 P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen *et al.*. Phase encoding and

- decoding of short pulses at 10 Gb/s using superstructured fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(2): 154~156
- 5 R. P. Scott, W. Cong, K. Li *et al.*. Demonstration of an error-free 4×10 -Gb/s multi-user SPECTS O-CDMA network testbed [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2186~2188
- 6 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao. Fiber Bragg grating based time phase en-decoder with multiple wavelength channels [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1522~1526
朱英勋,王 荣,蒲 涛. 具有多个波长通道的光纤光栅相位编/解码器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1522~1526
- 7 P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen *et al.*. Generation, recognition and recoding of 64-chip bipolar optical code sequences using superstructured fibre Bragg gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(3): 190~191
- 8 Zhang Ye, Dai Yitang, Sun Jie *et al.*. Encoder and decoder of fiber Bragg gratings in optical code division multiple access system based on reconstruction-equivalent-chirp [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7034~7038
张 邺,戴一堂,孙 杰等. 基于重构等效啁啾制作光纤光栅编解码器的光码分多址系统实现[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 7034~7038
- 9 Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5 Gbit/s 60 km optical code division multiple access transmission experiment based on equivalent phase shift super structured fiber Bragg grating en/decoder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 418~421
卢 麟,吴伟磊,方 涛等. 基于等效相移超结构光纤光栅编解码器的2.5 Gbit/s 60 km光码分多址传输实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 418~421
- 10 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Dianjie Jiang *et al.*. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2284~2286
- 11 V. C. Lauridsen, T. Sondergaard, P. Varming *et al.*. Design of distributed feedback fibre lasers [J]. *Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23 European Conference on Optical Communications*, 1997, **3**: 39~42
- 12 Lu Shaohua, Xu Ou, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1675~1680
鲁韶华,许 鸥,冯素春等. 基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1675~1680
- 13 Serdar Boztas, Roger Hammons, P. Vijay Kumar. 4-phase sequences with near-optimum correlation properties[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, **38**(3): 1101~1113
- 14 P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen *et al.*. A comparative study of the performance of seven and 63-chip optical code-division multiple-access encoders and decoders based on superstructured fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**: 1352~1365