

# 光纤光栅阵列编解码器反射谱性能研究

李传起<sup>1,3</sup> 周 谡<sup>2</sup> 朱迎春<sup>2</sup> 孙婷婷<sup>1</sup> 赵立龙<sup>1</sup> 宋 标<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044; <sup>2</sup> 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044

<sup>3</sup> 广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 阵列布拉格光栅(FBG)编解码器是二维混合扩时跳频光码分多址(OCDMA)系统的关键部件。运用高斯切趾光纤布拉格光栅阵列作为光编解码器,抑制了编码波长间的串扰,提高了编解码器的抗干扰能力。分析了二维扩时跳频 OCDMA 系统的原理及编解码信号模型,并对 FBG 阵列二维编解码器的时域编解码性能进行仿真研究。给出了编解码器中波长不匹配分析的数学模型,采用解码信号的自相关峰值作为衡量编解码器性能的指标,分析了各种波长不匹配情况下的编解码器性能。理论分析和仿真结果表明,更多的子光栅数具有更强的抗干扰能力,但要以误码率提高、传输速率下降为代价。

**关键词** 光纤通信;波长不匹配;高斯切趾光纤光栅;可调谐编解码器;自相关峰值

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3277

## The Spectral Analysis of the Fiber Grating Arrays Encoder/Decoder

Li Chuanqi<sup>1,3</sup> Zhou Xu<sup>2</sup> Zhu Yingchun<sup>2</sup> Sun Tingting<sup>1</sup> Zhao Lilong<sup>1</sup> Song Biao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Math & Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

<sup>2</sup> College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

<sup>3</sup> College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** Optical en/decoder, based on fiber Bragg grating (FBG) arrays plays as a key role in a 2-dimension hybrid time-spreading and wavelength hopping optical code division multiple-access (OCDMA) system. Suppressing the interference between the wavelengths of the encoder is investigated, and the performance of the encoder with the Gaussian apodized FBG is improved. The theory and the model of the encoder/decoder in 2-dimension hybrid time-spreading and wavelength hopping OCDMA system are given, and the performance of the FBG encoder/decoder in time domain is analyzed. The mathematic models of the wavelength mismatch in FBG are presented. The auto-correlation peak of the decoding signal is used to quantitatively evaluate the encoder/decoder performance, analyse some kinds of encoder/decoder wavelength mismatch. According to the analysis and simulation, it can be pointed out that large number of son-arrays will improves the system's capacity for anti-interference, but the biterror rate (BER) performance and data speed will degrade.

**Key words** optical communication; wavelength mismatch; Gaussian-apodized fiber Bragg grating; tunable encoder/decoder; the auto-correlation peak

## 1 引 言

随着光学器件制作技术的不断发展和光纤入户服务的推广,光码分多址(OCDMA)技术受到越来越多的关注,被认为是下一代宽带接入网的解决方案之一。OCDMA 具有支持完全异步传输、网络容量有弹性、用户接入方便、信息安全性高、抗干扰性

强等优点。二维混合扩时跳频 OCDMA 系统是利用时间和波长二维分割实现混合编码。二维编码方式在选择光地址码的灵活性和增大系统用户容量上有较大优势,能更有效地抑制 OCDMA 系统中的多用户干扰。因此二维非相干系统更适合于高性能、多用户、接入灵活的全光接入网。

收稿日期: 2008-11-04; 收到修改稿日期: 2009-04-03

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008437)和江苏省高校自然科学基金(07KJB510066)资助课题。

作者简介: 李传起(1964—),男,教授,主要从事光纤通信 OCDMA 网络技术方面的研究。E-mail: leecq@nuist.edu.cn

光编解码器是 OCDMA 系统中的关键部分,目前二维编解码器的实现主要有阵列波导光栅加光纤延时线(AWG + FDL)<sup>[1,2]</sup>和布拉格光栅(FBG)阵列<sup>[3~6]</sup>等。FBG 具有体积小、插入损耗低、成本低、易集成等优点。光纤光栅可以通过压电陶瓷(PZT)改变电压大小,产生调谐应力,改变布拉格反射波长<sup>[7]</sup>。FBG 中心波长的易调谐性使得编解码器具有动态变址能力并且增强了系统配置的灵活性。目前国内在时域相位编解码器的性能方面有着深入的研究,如光源脉宽,多级性编解码器,波长漂移等方面,但是对二维 FBG 编解码器的编解码性能或波长不匹配等方面研究很少<sup>[8~11]</sup>。

在级联可调谐 FBG 编解码器中,子光栅的反射性能和编解码器波长匹配是影响编解码效果的重要因素。本文对子光栅的性能进行了分析研究,运用高斯函数进行切趾,得到了更好的反射性能。由于波长调谐的精确控制比较难,编解码器的相应波长存在不匹配的情况,会使得编解码器的性能下降。故对波长不匹配的情况进行了详细分析和研究,仿真结果表明编解码器由更多的子光栅组成,抗波长不匹配的能力更强。

## 2 切趾光栅对波长间串扰的抑制

FBG 编解码器中单个 FBG 对特定波长的光进行反射,实现了对频率的选择性,反射波长的选择主要依赖于 OCDMA 系统所采用的地址码。布拉格光栅的间距使得各反射脉冲在时域上扩展,间距的变化可实现时域上的编码。因而能同时在时域和频域上进行混合编码,实现了二维 OCDMA 编解码方案。图 1 为可调谐 FBG 编解码器示意图。其中的压电陶瓷(PZT)装置以电磁调谐的方式,改变电压并产生调谐应力,通过拉伸作用逐个改变子光栅的布拉格波长,实现对地址码的可调。

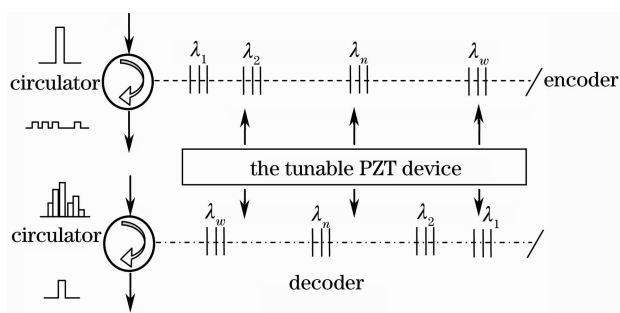


图 1 可调谐 FBG 编解码器结构图

Fig. 1 Schematic of the tunable FBG encoder and decoder

光纤布拉格光栅形成的原因,一般可近似认为紫外线照射导致在原来光纤纤芯折射率基础上引入了一个周期性的微扰。该微扰可表示为<sup>[12]</sup>

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \{1 + v \cos[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \Phi(z)]\}, \quad (1)$$

式中  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  为光致折射率变化的直流分量; $\overline{\delta n_{\text{eff}}}v$  为光致折射率变化的幅度; $\Lambda$  为光栅周期; $\Phi(z)$  描述光栅的啁啾变化。通过耦合模理论的推导,可得均匀 FBG 的反射谱方程<sup>[9]</sup>

$$r = \frac{\sinh^2(\sqrt{k^2 - \sigma^2}L)}{\cosh^2(\sqrt{k^2 - \sigma^2}L) - \sigma^2/k^2}, \quad (2)$$

式中  $\sigma = 2\pi n_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}} - \frac{1}{2} \frac{d\Phi}{dz}$ ,

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}}$$

根据光栅理论可知,对折射率微扰的周期变化附加一个高斯切趾函数,可以抑制反射谱旁瓣。高斯切趾函数可表示为

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{4 \ln 2 z^2}{L_{\text{FWHM}}^2}\right), \quad (3)$$

式中  $L_{\text{FWHM}}$  为反射谱的半高全宽。图 2,3 分别为均匀光栅阵列和高斯切趾光栅阵列编解码器的反射谱

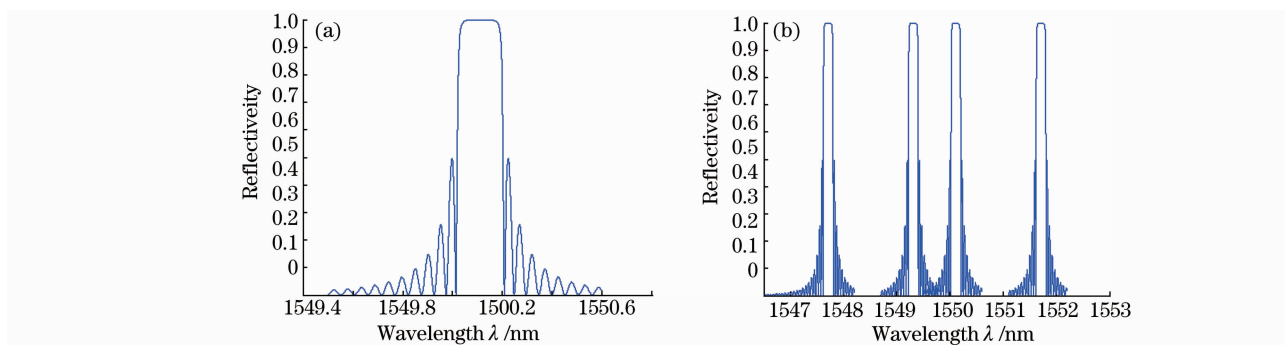


图 2 均匀 FBG(a)及编解码器(b)的反射谱

Fig. 2 Reflected spectrum of the uniform FBG (a) and the en/decoder (b)

(设编解码器由 4 个光纤光栅组成)。均匀布拉格光栅具有极大的反射谱旁瓣,会产生编码波长间的串扰,使得编码信号的相关性下降。在此,使用高斯型切趾光栅可以良好的抑制反射谱旁瓣,减少了编码

波长间的干扰,提高了编解码器的性能,从而得到更好的系统性能。可以清楚地看出高斯切趾光栅阵列对旁瓣的抑制。

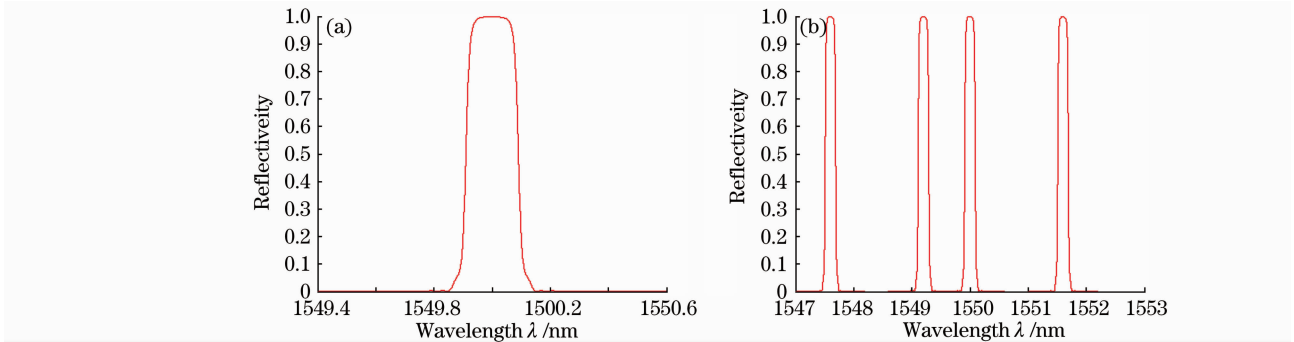


图 3 高斯切趾 FBG(a)及编解码器(b)的反射谱

Fig. 3 Reflected spectrum of the Gaussian-apodized FBG (a) and the en/decoder (b)

### 3 切趾光栅时域编解码性能

在二维混合扩时跳频 OCDMA 系统中,一般采用光谱平坦,功率均匀的宽带光源,如放大自发辐射(ASE),发光二极管(LED)等,这是为了使得整个编码光谱范围内光源的功率基本相等。光源进入编码器后,经不同中心波长的 FBG 反射,产生一串光脉冲序列,即为编码信号。其中每个子脉冲光功率相同,但光波长不同。

假设要进行编码的光信号为  $\delta(t)$ ,并定义光纤布拉格光栅的反射率函数为  $\gamma(\lambda_n)$  ( $1 \leq n \leq w$ ),经光栅反射后的信号从编码器射出的时间与进入编码器的时间之差为  $\tau_n$ ,此时编码器的输出信号和传输函数分别为<sup>[13]</sup>

$$i_E = \sum_{n=1}^w \gamma(\lambda_n) \delta(t - \tau_n)$$

$$H_E(\omega) = \int i_E \exp(-j\omega t) dt, \quad (4)$$

如果解码器中存在着与编码器中相同的光纤布

拉格光栅,并且对同一波长的信号经编码器和解码器后的时间延迟之和为  $T$ ,则解码器的输出信号和传输函数可分别表示为

$$i_D = \sum_{n=1}^w \gamma(\lambda_n) \delta(t - T + \tau_n)$$

$$H_D(\omega) = \int i_D \exp(-j\omega t) dt = H_E^* \exp(-j\omega T), \quad (5)$$

可见解码器的传输函数与相应编码器传输函数的复共轭成线性关系,解码器能够对相应编码器的输出信号进行信号重构,实现解码功能。式中的  $\lambda_n, \tau_n$  和  $T$  等参数则由具体的系统扩频码决定。

以高斯切趾光栅为例,FBG 反射率函数遵循高斯分布,反射谱宽为 0.2 nm,相邻光栅波长间隔为 1 nm。不妨设编解码器由 4 个光栅组成,子光栅间距均为  $L$ ,中心波长分别为  $\lambda_1 = 1549$  nm,  $\lambda_2 = 1550$  nm,  $\lambda_3 = 1551$  nm 和  $\lambda_4 = 1552$  nm。假设光信号是幅度为 1,周期为 20 的方波脉冲,编码器的输出信号直接输入到解码器,通过(4)式、(5)式建立的数学得出编码器和解码

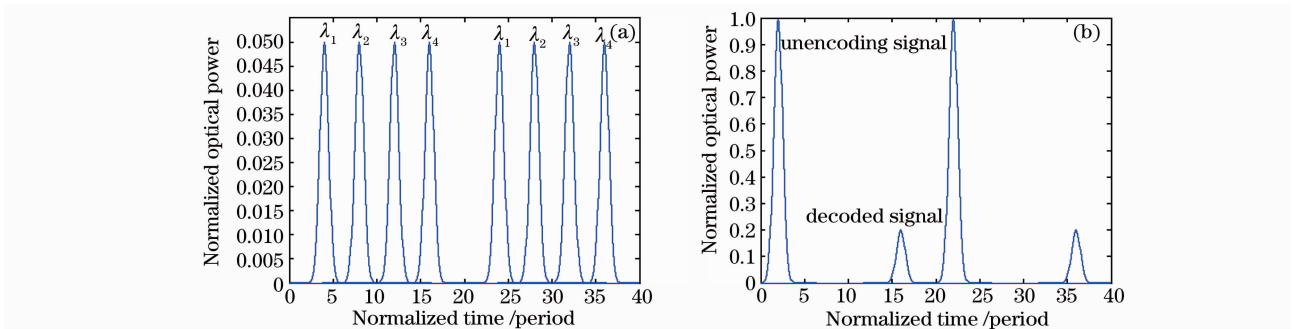


图 4 编码信号(a)和解码信号(b)的时域图

Fig. 4 Encoded signal (a) and decoded (b) signal in time domain (b)

器的输出脉冲序列波形,由图 4 表示。此处不考虑编解码器波长不匹配,位置不匹配等因素。

#### 4 模型就可编码器中心波长变化对编解码性能的影响研究

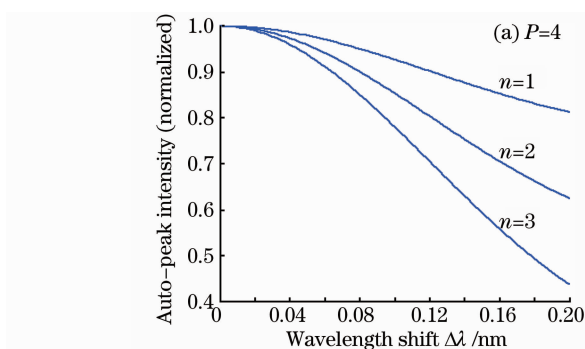
受到光纤光栅制作的精确度以及光栅的布拉格波长调谐精度等因素影响,编码器和解码器中对应的布拉格光栅中心波长存在不严格匹配的现象。编解码器波长的不匹配会导致解码信号自相关峰值以及强度的下降,进而使得系统的误码率性能恶化。

根据光纤布拉格光栅反射谱特性可知,光脉冲通过光纤光栅后反射回来的信号功率谱可以用高斯函数近似表示。并且假设编解码器中的所有光纤光栅具有相同的反射谱形状。则通过编码器后的总体光功率谱可以被描述为<sup>[14]</sup>

$$P_e(\lambda) = \sum_{i=1}^P R_{ei} \exp[-(4\ln 2/B_G^2)(\lambda - \lambda_{ei})^2], \quad (6)$$

式中  $P$  为编码器中光纤光栅的个数,  $R_{ei}$  和  $\lambda_{ei}$  分别为编码器中第  $i$  个光纤光栅的峰值反射率和布拉格波长。假设所有光纤光栅反射谱的半高全宽(FWHM)相同并用  $B_G$  表示。进而可以得出在匹配解码器端的自相关峰值功率强度

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) P_e(\lambda) P_d(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^P \frac{S_\lambda R_{ei} R_{di} B_G \sqrt{\pi}}{\sqrt{8\ln 2}} \exp[-\frac{2\ln 2}{B_G^2}(\delta\lambda_i)^2], \quad (7)$$



式中  $P(\lambda)$  和  $P_d(\lambda)$  分别光源的功率谱和解码器的总功率谱,  $S_\lambda$  为光源的功率谱密度并且是平坦的,  $R_{di}$  为解码器中第  $i$  个光纤光栅的峰值反射率,  $\delta\lambda_i$  为第  $i$  个光纤光栅的编码器与解码器之间的中心波长偏移量。为了方便计算,对自相关峰值功率强度进行归一化处理,得到

$$I_n = \frac{1}{P} \times \sum_{i=1}^P \exp[-\frac{2\ln 2}{B_G^2}(\delta\lambda_i)^2], \quad (8)$$

从(8)式可知,编解码器中波长不匹配的光纤光栅个数  $n$  及编解码器中光纤光栅的总个数  $P$  对应着不同的  $I_n$ , 同时影响编解码器的性能。  $B_G$  为 0.2 nm。以上分析的前提是任一个光栅中心波长的漂移不会影响其他光栅的信道解码输出。讨论编解码器中光纤光栅部分波长不匹配的情况,此时  $n < P$ 。归一化自相关峰值功率强度随不匹配光栅的平均波长偏移量的变化。

从图 5~图 6 可以看出,对确定的编解码器,即确定的光纤光栅数  $P$ ,随着其中波长不匹配的光栅数越多,编解码器的性能逐渐下降。主要是因为中心波长偏移的总量在增加。当编解码器中波长不匹配的光栅数  $n$  确定时,随着总光栅数  $P$  的增加,系统的性能得到了改善。但与此同时,编解码器中更多的光纤光栅数,使得光栅制作中出现误差的几率更加大,会导致更长的编解码器长度,使得系统传输速度下降,所以应该选择适当的总光栅数  $P$ 。

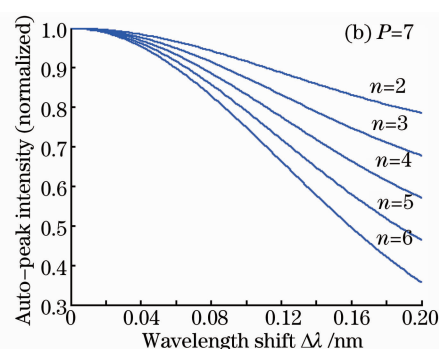


图 5 不同的  $n$  值对应的归一化自相关峰值变化

Fig. 5 Normalized autocorrelation peak intensity versus  $n$

当编解码器中所有光栅的中心波长均出现偏移时,即最坏情况下  $n = P$ ,编解码器的性能下降如图 7 所示。因为对自相关峰值功率强度进行了归一化处理,可以看出在  $n = P$  时,对任何  $P$  值,随着平均波长偏移量的增加,编解码器性能的下

降速度是相同的。这种情况主要是因编解码器受到应力或温度等影响,需要对编解码器进行良好的封装。当偏移量小于  $B_G$  的 20% 时,自相关峰值仍然维持在 90% 以上,说明编解码器是具备一定的抗偏移能力的。

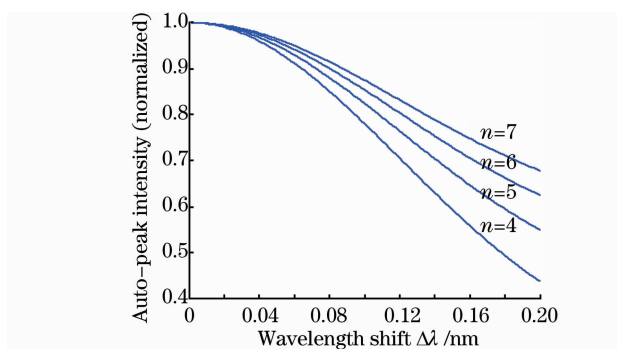


图 6 不同的  $P$  值对应的归一化自相关峰值变化

Fig. 6 Normalized autocorrelation peak intensity versus  $P$

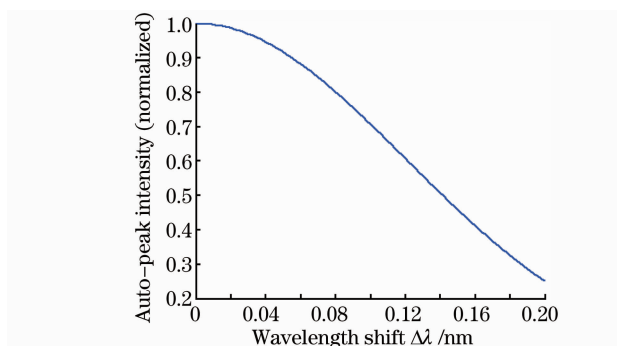


图 7  $n=P$  时, 归一化自相关峰值对应于平均波长偏移量的变化

Fig. 7 normalized autocorrelation peak intensity versus average wavelength shift, when  $n=P$

## 5 结 论

在 OCDMA 系统中, 可调谐的编解码器增强了系统配置的灵活性和变址能力, 成为系统实用化的优势之一。研究了可调谐 FBG 编解码器的调谐原理及编解码性能。利用高斯切趾可以极大地减小均匀光纤光栅的反射谱旁瓣, 减少编码波长间的串扰, 可以容许更短的编码波长间隔, 以及更多的可用编码波长数。对波长不匹配的情况进行了详细的分析研究。结果表明: 更多的子光栅数具有更强的抗波长偏移能力, 但要以误码率增加, 传输速率下降为代价。对编解码器调谐精度的性能研究, 有助于对编解码器更深刻的掌握, 更加明确在光纤光栅编解码器实际应用过程中所需控制的误差范围。

## 参 考 文 献

- 1 P. Niewczas, A. J. Willshire, L. D. Ziuda *et al.*. Performance analysis of the fiber Bragg grating interrogation system based on an arrayed waveguide grating [J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 2004, **53**(4): 1192~1196
- 2 K. Yum, J. Shin, N. Park. Wavelength-time spreading optical CDMA system using wavelength multiplexers and mirrors fiber delay lines [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9): 1278~1280
- 3 C. Michiel, R. Atkinson, I. Andonovic *et al.*. Interferometric noise characterisation of a 2-D time spreading wavelength hopping OCDMA networks using FBG encoding/decoding [C]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2007, Tu. B1(2): 114~117
- 4 X. Wang, K. T. Chan. A sequentially self-seeded Fabry-Perot laser for two-dimensional encoding/decoding of optical pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(1): 83~90
- 5 Ji Jianhua, Xu Ming, Yang Shuwen *et al.*. Experiment on 2.5 Gb/s symbol overlapping optical fast frequency-hopping code division multiple access system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 779~782  
吉建华, 徐 铭, 杨淑雯 等. 2.5 Gbit/s 码位重叠快跳频光码分多址实验系统 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 779~782
- 6 Fu Xiaomei, Yu Jinlong, Li Enbang *et al.*. The study of time/frequency encoding optical code division multi-access communication with bragg grating arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 961~964  
付晓梅, 于晋龙, 李恩邦 等. 利用布拉格光栅阵列实现二维光码分多址的研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 961~964
- 7 N. Q. Ngo, S. Y. Li, R. T. Zheng. Electrically tunable dispersion compensator with fixed center wavelength using fiber bragg grating [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(6): 1568~1575
- 8 Zheng Jilin, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Effects of wavelength deviation on performance of temporal phase optical code-division multiple-access en/ decoder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1872~1877  
郑吉林, 王 荣, 蒲 涛 等. 波长漂移对时域相位光码分多址编解码器性能的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1872~1877
- 9 Fang Tao, Li Yuquan, Wang Rong. Study of pulse width effect on performance of optical code-division-multiple-access en/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1939~1943  
方 涛, 李玉权, 王 荣. 脉宽对光码分多址编解码器性能的影响 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1939~1943
- 10 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Orthogonal quaternary phase OCDMA en/ decoder based on superstructured fiber bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 653~658  
朱英勋, 王 荣, 蒲 涛 等. 基于超结构光纤光栅的正交四相光码分多址编/解码器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 653~658
- 11 Li Chuanqi, Zhu Yingchun, Zhou Xu. Tunable encoder/decoder for optical code division multiple access networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1901~1905  
李传起, 朱迎春, 周 谔. 光码分多址系统可调谐编/解码器研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1901~1905
- 12 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1293
- 13 Ding Meiling, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng. The hybrid direct sequence/frequency hopping optical CDMA system with FBGs based encoder/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 842~846  
丁美玲, 章献民, 陈抗生. 基于光纤布拉格光栅编解码器的直接序列扩频跳频光码分多址系统 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 842~846
- 14 T. I. Chane, H. Yoo, S. S. Min *et al.*. Wavelength mismatch tolerance in wavelength-hopping and time-spreading optical CDMA systems [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2003, **E86**-B(6): 2015~2018