

文章编号 1004-924X(2008)09-1608-06

相移超结构光纤布拉格光栅 OCDMA 编/解码器及其相关特性

尹霄丽, 张琦, 余重秀, 刘小磊, 刘会师, 王 宇

(北京邮电大学 电子工程学院 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要:研究了基于相移超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)的光码分多址(OCDMA)编/解码器的结构及实现双极性编/解码的原理。利用传输矩阵法仿真了器件的相关特性,推导了因光栅周期不同而导致的编/解码器之间布拉格波长偏差对器件相关特性的影响。结果表明,随着码字长度的增加,器件的相关特性得到改善;但是当保持码片间隔不变而增加码字长度时,编/解码器的相关特性对布拉格波长偏差更加敏感,对于长度为 31 的 Gold 序列,当码片间隔为 6 ps,布拉格波长为 1.555 μm 时,布拉格波长偏差 <0.02 nm 方可得到编/解码器之间良好的相关特性;这表明同一码字可以在不同的布拉格波长下重复使用,此特性有望用于波分复用(WDM)型 OCDMA 系统中。

关键词:光通信;光码分多址;超结构光纤布拉格光栅;编/解码器相关特性

中图分类号:TN929.11;TN253 **文献标识码:**A

OCDMA encoder/decoder based on phase shifted superstructure fiber Bragg grating and its correlation property

YIN Xiao-li, ZHANG Qi, YU Chong-xiu, LIU Xiao-lei, LIU Hui-shi, WANG Yu

(Key Laboratory of Optical Communication & Lightwave Technologies, Ministry of Education, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on phase Shifted Superstructure Fiber Bragg Grating (SSFBG), the structure and bipolar encoding/decoding principles of an Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) system were researched and its correlation property was simulated by transmission matrix method. The effect of Bragg wavelength deviation due to the mismatch of the grating period between encoder and decoder on correlation property was analyzed theoretically. The results indicate that the correlation property is improved with the increasing of code length, but it is more sensitive to the deviation of Bragg wavelength between encoder and decoder when the code length is increased and the chip pulse width is fixed. To obtain desired correlation property, the deviation of Bragg wavelength between encoder and decoder must be less than 0.02 nm for the Gold sequences with length of 31 and chip duration of 6 ps at 1.555 μm . It is conclusion that a code can be used in different Bragg wavelengths to implement hybrid Wavelength Division Multiple (WDM) OCDMA system.

收稿日期:2008-02-13;**修订日期:**2008-03-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60577045);教育部高等学校博士学科点基金资助项目(No. 20050013002);电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室开放课题资助项目

Key words: optical communication; Optical Code Division Multiple Access(OCDMA); Superstructure Fiber Bragg Grating(SSFBG); encoder/decoder correlation property

1 引言

近年来,随着互联网业务的爆炸式增长,对宽带接入的需求与日俱增。光码分多址(Optical Code Division Multiple Access,OCDMA)技术由于具有适合异步接入、按需软容量、网络协议简单、网络扩展容易等优点,是未来宽带接入网的备选方案之一^[1-3]。

基于强度调制/直接检测技术的 OCDMA 系统采用单极性编/解码方案,利用素数码、光正交码等稀疏的码字来编码,编码效率低,系统支持的同时用户数有限。近年来,随着光源技术、光器件制作技术的进步,人们又致力于研究双极性 OCDMA 编/解码器。常用的编/解码器件有空间光调制器(SLM)、平面光波导(PLC)、阵列波导光栅(AWG)、光纤布拉格光栅(FBG)、超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)等^[1-2]。基于 SLM 的系统由于使用了大型的自由空间体光学器件,结构不紧凑,系统稳定性差,不适合大规模应用;AWG 和 PLC 编/解码器制作工艺复杂,无法满足现代光通信的要求。而基于 FBG 的 OCDMA 编/解码器是一种全光纤器件,具有制作工艺简单、成本低、体积小、插入损耗低、光纤参数易于调整可实现变址功能等优点^[4],特别是 SSFBG 具有产生超长光学码的能力,成为目前研究的热点^[2-3]。

在 OCDMA 系统中,编/解码器的相关特性是衡量系统的多用户接入特性的主要指标^[3]。由于光纤光栅的参数会随着温度、应力等外界因素的变化而变化,这对编/解码器的相关特性有一定的影响,但目前就编/解码器之间的布拉格波长偏差对器件相关特性的影响方面的研究尚未见报道。

本文研究了相移 SSFBG OCDMA 编/解码器的结构和原理,仿真分析了其相关特性,推导了因光栅周期不同而导致的编/解码器之间的布拉格波长偏差对器件相关特性的影响,并与用传输矩阵法得到的仿真结果进行了对比分析。

2 相移 SSFBG 的结构及其实现 OCDMA 双极性编/解码的原理

均匀 FBG 的折射率变化可以看作是对普通光纤附加的一种微扰^[5]:

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

其中, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z)$ 是纤芯折射率的平均变化量; Λ 为光栅周期; v 为条纹可见度,一般取 1, $\phi(z)$ 是光栅随着 z 轴变化的相移量。光栅的布拉格波长用 λ_B 表示, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, n_{eff} 为光栅有效折射率。

在弱光栅条件限制下(假设短光脉冲可以穿过整个光栅发生反射),SSFBG 的波矢响应 $F(\kappa)$ 可以简单地由其空间超结构折射率调制分布 $A(z)$ 的傅里叶变换给出^[6]:

$$F(\kappa) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(z) e^{i\kappa z} dz, \quad (2)$$

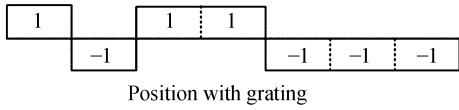
SSFBG 的冲激响应 $h(t)$ 可以由频率响应 $H(\omega)$ (振幅反射谱)的傅里叶反变换表示:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (3)$$

式(2)、(3)中波矢 κ 与光角频率 ω 成正比,这表明弱光栅的冲激响应的时域分布取决于 SSFBG 光栅折射率调制的空间分布,从空间域 z 到时间域 t 的转换因子为 $t = 2n_{\text{eff}}z/c$,其中 c 为光在真空中的传播速率。

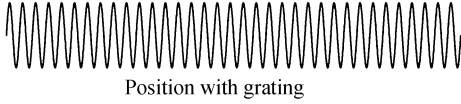
相移 SSFBG 是通过在均匀布拉格光纤光栅的不同段上将折射率调制附加 0 或 π 相移来实现相位调制的^[6],即将 SSFBG 折射率调制的空间分布映射为器件冲激响应的时间分布,实现了双极性的扩时编码^[6],如图 1 所示。图 1(a)为双极性码字的波形。图 1(c)的形状相当于图 1(a)与图 1(b)波形相乘的结果,即相应于图 1(a)的码字的跳变点图 1(c)中出现了折射率调制的不连续点,由此引入了 π 相移,实现了相位调制的双极性编码。使用全息技术可以制作出长的具有不同码字形状的 SSFBG^[7]。

取长度为 31 的 2 个 Gold 序列^[8],SSFBG 的设计参数为:有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.451$,布拉格波长



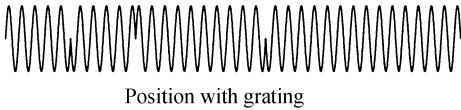
(a) 双极性编码序列

(a) Bipolar code sequence



(b) 均匀 FBG 的折射率调制分布

(b) For uniform FBG



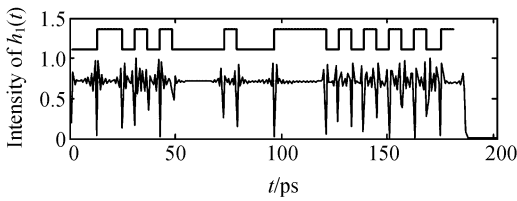
(c) 与(a)对应的相移 SSFBG 的折射率调制分布

(c) For phase shifted SSFBG corresponding to (a)

图 1 双极性码字及对应的 SSFBG 编/解码器的折射率调制分布

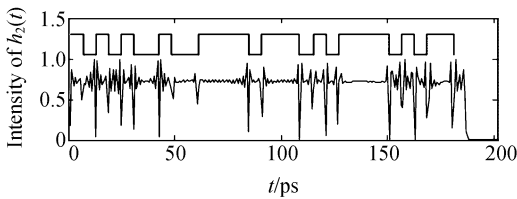
Fig. 1 Bipolar code and corresponding refractive index modulation profile along the SSFBG

$\lambda_B = 1.555 \mu\text{m}$, 纤芯折射率的平均变化量为 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 2 \times 10^{-5}$, 单个码片对应的光纤光栅长度为 $L_c = 0.62 \text{ mm}$, 对应的码片间隔为 $T_c = 6 \text{ ps}$. 图 2 给出了器件的超结构形状(码字)及其计算出的冲激响应。



(a) 编码器 1

(a) For encoder 1



(b) 编码器 2

(b) For encoder 2

图 2 码长为 31 的 Gold 码字及编码器的冲激响应的包络

Fig. 2 Codes and their impulse response envelopes of encoders using Gold sequences with length of 31

由图 2 可见,在弱光栅条件下,编/解码器单位冲激响应的波形随着码字形状的变化而变化,实现了码字由时间域到空间域的转化。

3 相移 SSFBG OCDMA 编/解码器的相关特性

若将短光脉冲输入相移 SSFBG,则会产生一系列相干的码片脉冲。解码器与编码器具有相反的空间排列顺序,即解码器与编码器是共轭匹配的。编码后分散开的信号经过匹配的解码器后得到压缩,重新生成一个强脉冲(自相关信号),而经过不匹配的解码器后,在时域上信号更加分散(互相关信号)。

设有两对编/解码器,编码器 1 和 2 的频谱分别用 $H_1(\omega)$, $H_2(\omega)$ 表示,对应的解码器分别用 $H_1^*(\omega)$ 和 $H_2^*(\omega)$ 表示。

编码器 1 和 2 之间的互功率谱为^[6]:

$$E(\omega) = H_1(\omega)H_2^*(\omega), \quad (4)$$

取其傅里叶反变换即为编码器 1 和解码器 2 的互相关函数 $R_{12}(t)$ ^[6]:

$$R_{12}(t) = h_1(t) * h_2(-t), \quad (5)$$

这里符号‘*’表示卷积。若用编码器 1 编码后再用解码器 1 解码,式(5)即为编码器 1 的自相关函数 $R_{11}(t)$ 。

编/解码器的频谱 $H_1(\omega)$, $H_2(\omega)$ 可以采用传输矩阵法^[5]来计算。如图 3 所示,设正向传输模式和反向传输模式的光场分别为 $R(z)$ 和 $S(z)$,将相移光栅看成是由 N 个均匀子光栅级联而成,子光栅之间存在着 0 或 π 的相移。将每个子光栅的传输矩阵和相移矩阵相乘即得到相移光栅的传输矩阵。

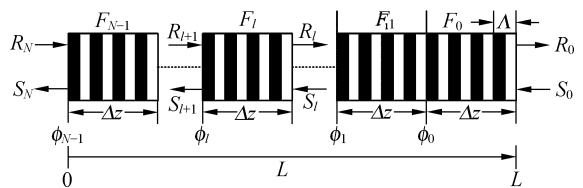


图 3 相移 SSFBG 传输矩阵模型

Fig. 3 Transmission matrix model of phase shifted SSFBG

设第 $l(l=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 段均匀 FBG 的传输表示为:

$$\begin{bmatrix} R_l \\ S_l \end{bmatrix} = \mathbf{F}_l \begin{bmatrix} R_{l-1} \\ S_{l-1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{F}_l = \begin{bmatrix} F_{l,11} & F_{l,12} \\ F_{l,21} & F_{l,22} \end{bmatrix}$, \mathbf{F}_l 可通过光栅参数计算得到, \mathbf{F}_l 和 \mathbf{F}_{l+1} 之间的相移矩阵为:

$$\mathbf{F}_{pl} = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-i\phi_l}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\phi_l}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

整个光纤光栅的传输矩阵为:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_{pN-1} \mathbf{F}_{N-1}) \cdots (\mathbf{F}_{pl} \mathbf{F}_l) \cdots (\mathbf{F}_{p0} \mathbf{F}_0), \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix},$$

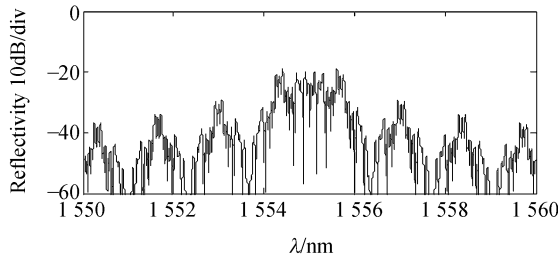
得到输出场为:

$$\begin{bmatrix} R_N \\ S_N \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

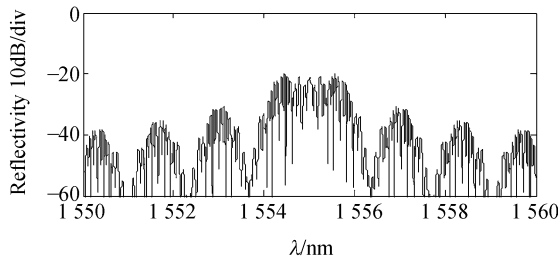
考虑到边界条件 $S_0 = S(L) = 0$, 则振幅反射率为:

$$\rho = \frac{S_N}{R_N} = \frac{F_{21}}{F_{11}}, \quad (10)$$

在布拉格波长附近改变波长的取值, 可计算出器件的反射谱。图 4 为第 2 节给出的码长为 31 的器件的功率反射谱。



(a) 编码器 1
(a) For encoder 1

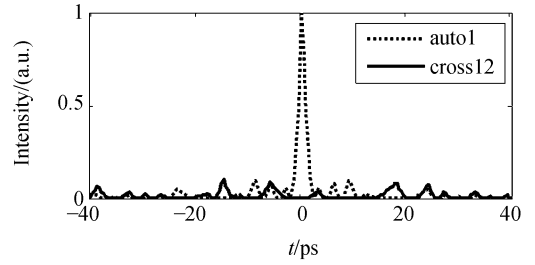


(b) 编码器 2
(b) For encoder 2

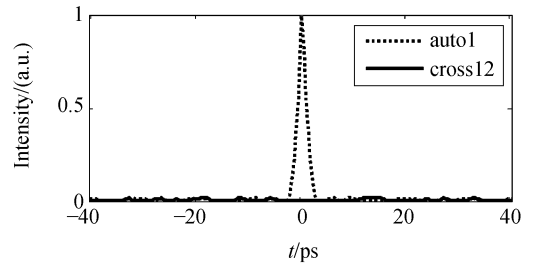
图 4 31 位 Gold 编码器的功率反射谱

Fig. 4 Reflect power spectra of encoders using Gold sequences with length of 31

图 5 给出了码长为 31(对应图 2 中的码字)和 127 的两个器件(设计参数同第 2 节)的自相关和互相关曲线。



(a) $N=31$



(b) $N=127$

图 5 编/解码器的相关曲线

Fig. 5 Correlation curves of encoder/decoder with length of 31 and 127

由图 5 可见, 匹配的编/解码器的自相关和不匹配的编/解码器之间的互相关对比度非常明显, 并且当码长由 31 增加到 127 后对比显著增强, 这有利于更有效地抑制多用户干扰。

4 布拉格波长偏差对编/解码器相关特性的影响

理想情况下, 要求编/解码器参数完全匹配, 但是由于制作工艺的限制, 编/解码器的参数可能存在着一定偏差, 这将影响器件的相关特性。这里仅假设解码器的光栅周期 Δ_D 与编码器的光栅周期 Δ_E 相比有一个小的偏差, 其他参数不变。设编/解码器使用的码字是共轭匹配的, 编码器的布拉格波长为 λ_E , 解码器的布拉格波长为 λ_D , 对应的光载波角频率分别为 ω_E, ω_D 。布拉格波长偏差 $\Delta\lambda = \lambda_D - \lambda_E$, 载波角频率偏差为 $\Delta\omega = \omega_D - \omega_E$ 。若 $h_1(t)$ 和 $h_2(-t)$ 分别表示编码器和解码器的冲

激响应:

$$h_1(t) = C(t) \cos(\omega_E t) \quad (0 \leq t \leq T), \quad (11)$$

$$h_2(t) = C(t) \cos(\omega_D t) \quad (0 \leq t \leq T), \quad (12)$$

其中, $C(t)$ 表示图 1(a) 中的双极性码字, T 表示冲激响应的时长。在编/解码器匹配时, 式(5)表示的自相关函数的峰值为:

$$R_{12}(0) = \int_0^T h_1(\tau) \cdot h_2(\tau) d\tau, \quad (13)$$

将式(11)和(12)带入式(13), 考虑到 $C^2(\tau) = 1$, 可得:

$$R_{12}(0) = \frac{1}{2} \int_0^T \cos[(\omega_E + \omega_D)\tau] d\tau + \frac{1}{2} \int_0^T \cos(\Delta\omega\tau) d\tau, \quad (14)$$

实际应用中 SSFBG 的长度为几个到几十毫米, 而光栅周期 $\Lambda = \lambda_B / 2n_{\text{eff}}$ 约为 $0.5 \mu\text{m}$, 二者的比值在 10^4 量级以上, 即 $T \gg 2\pi/\omega_E$, 故第一项积分后结果很小。假设布拉格波长偏差较小, 式(14)中的第二项的被积函数约为常数, 积分后的结果远远大于第一项, 故可将第一项忽略。考虑到 $\Delta\omega \approx$

$-\frac{2\pi c}{\lambda_E^2} \Delta\lambda$, 式(14)可简化为:

$$R_{12}(0) \approx \frac{T}{2} \text{sinc}\left(\frac{2cT}{\lambda_E^2} \Delta\lambda\right), \quad (15)$$

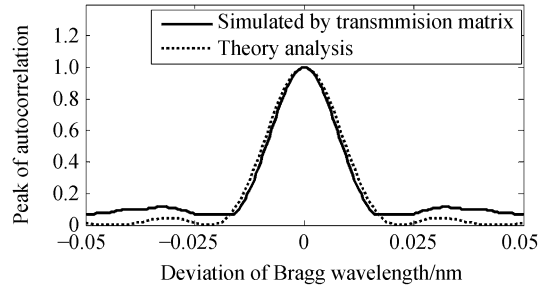
将 $T = 2n_{\text{eff}}NL_c/c$ 带入式(15), 得光强峰值比为:

$$\left| \frac{R_{12}(0)}{R_{11}(0)} \right|^2 = \text{sinc}^2\left(\frac{4n_{\text{eff}}NL_c}{\lambda_E^2} \Delta\lambda\right), \quad (16)$$

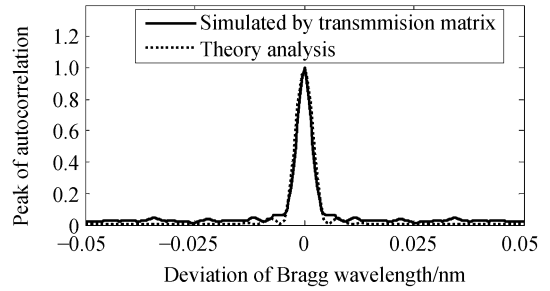
其中, $R_{11}(0)$ 表示布拉格波长偏差为 0 时的自相关峰值。式(16)的第一个零值点为 $\Delta\lambda = \frac{\lambda_E^2}{4n_{\text{eff}}NL_c}$, 说明在保持码片间隔不变的情况下, 增加码字长度 N , 达到第一个零值点的 $\Delta\lambda$ 变小, 编/解码器之间的布拉格波长偏差对器件相关特性的影响加大; 在其他参数不变的情况下, 仅增加码片间隔(即增加 L_c , 通信速率降低), 达到第一个零值点的 $\Delta\lambda$ 也会变小, 编/解码器之间的布拉格波长偏差对器件相关特性的影响也会加大。

图 6(a) 和 (b) 分别为码片长度为 31 和 127 (设计参数见第 2 节) 的编/解码器之间的布拉格波长偏差与器件自相关光强峰值比的关系曲线。其中虚线为由式(16)计算的结果, 实线为利用传输矩阵法仿真得到的相关函数的最大值之比。由图 6 可见, 利用本文提出的分析方法和用传输矩阵法仿真得到的结果吻合得非常好。

由图 6 可见, 当布拉格波长偏差较小时, 自



(a) $N=31$



(b) $N=127$

图 6 不同布拉格波长偏差下编/解码器的自相关光强峰值比

Fig. 6 Ratios of auto-correlation intensity versus deviation of Bragg wavelength between encoder and decoder

相关的峰值较大, 但随着 $|\Delta\lambda|$ 的增加, 曲线下降较快, 相应于第 2 节的设计参数, 当 $N=31$ 时, $|\Delta\lambda| \geq 0.02 \text{ nm}$ 或 $N=127$ 时, $|\Delta\lambda| \geq 0.005 \text{ nm}$ 即可以认为编/解码器已经不再相关。由此可见, 如果给定一个双极性二进制码字, 将其分别调制到不同的布拉格波长的 SSFBG 上, 例如 $\lambda_{B1} = 1.554 \mu\text{m}$, $\lambda_{B2} = 1.556 \mu\text{m}$, 两组器件的相关性很弱, 相互间的干扰很小, 即可实现波分复用型 OCDMA 编/解码。

5 结 论

本文推导的由于 SSFBG 编/解码器的光栅周期不同而导致的布拉格波长偏差对器件相关性能的影响的公式与用矩阵分析法仿真得到的结果吻合得非常好; 随着码字长度的增加器件的相关特性得到改善; 当保持码片间隔不变而增加码字长度时, 编/解码器的相关特性对布拉格波长偏差更加敏感, 对于 Gold 序列, 当码片间隔为 6 ps, 布

拉格波长为 $1.555\ \mu\text{m}$ 时,为了得到编/解码器之间良好的相关特性,当码长为 31 时布拉格波长偏差应 $<0.02\ \text{nm}$;为了达到稳定的输出,在实际中需要利用调谐的方法来调节器件的参数;同一双极性码字可以在不同的布拉格波长下重复使用,

此特点有望用于波分复用型 OCDMA 系统中。随着光纤光栅制作和封装技术的进步,器件的稳定性和可靠性将得到进一步的提高,SSFBG OCDMA 编/解码器将具有更大的实用价值。

参考文献:

- [1] 张琦,忻向军,余重秀,等. 基于超结构光纤光栅的新型 OCDMA 编解码方案[J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 197-199.
ZHANG Q, XIN X J, YU CH X, *et al.*. Novel en-de-coder scheme based on super-structure optical fiber grating for OCDMA system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(2): 197-199. (in Chinese)
- [2] 王旭,王旭华,孙燕斌,等. OCDMA 系统和相关器件研究进展[J]. 半导体光电, 2007, 28(2): 451-457.
WANG X, WANG X H, SUN Y B, *et al.*. Recent progresses of OCDMA networks and related devices [J]. *Journal of Semiconductor optoelectronics*, 2007, 28(2): 451-457. (in Chinese)
- [3] HAMANAKA T, WANG X, WADA N, *et al.*. Ten-user truly asynchronous gigabit OCDMA transmission experiment with a 511-chip SSFBG en/decoder [J]. *Journal of Lightwave Technolgy*, 2006, 24(1): 95-102.
- [4] 于志辉,余重秀,王葵如,等. 直流切趾对光纤光栅特性的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 935-938.
YU ZH H, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 935-938. (in Chinese)
- [5] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technolgy*, 1997, 15(8):1277-1294.
- [6] TEH P C, PETROPOULOS P, IBSEN M, *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]. *Journal of Lightwave Technolgy*, 2001, 19 (9): 1352-1365.
- [7] IBSEN M, DURKIN M K, COLE M J, *et al.*. Recent advances in long dispersion compensating fiber Bragg gratings [J]. *IEEE*, 1999,6:1-7.
- [8] GOLD R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing [J]. *IEEE*, 1967, 10: 154-156.

作者简介:尹霄丽(1970—),女,内蒙古海拉尔人,副教授,主要从事光通信及信号处理方面的教学和研究工作。E-mail: yinxl@bupt.edu.cn