

文章编号: 0258-7025(2007)11-1522-05

# 具有多个波长通道的光纤光栅相位编/解码器

朱英勋, 王 荣, 蒲 涛

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 光码分多址(OCDMA)技术是实现未来宽带全光接入网的最佳技术之一。提出了一种基于超结构光纤光栅(SSFBG)的光码分多址时域相位编/解码器。编/解码器根据等效相移原理,采用 Sinc 函数作为采样函数,仅仅利用一块均匀的相位掩模板即实现了多个性能一致的编/解码信道,可以并行对不同波长通道的用户同时进行编/解码,既节省了成本又提高了系统容量。对该编/解码器的结构和性能进行了分析,并进行了计算机仿真。结果表明,对于使用 127 位 Gold 序列的编/解码器,各通道自相关峰瓣比(P/W)大于 16.3 dB,峰瓣比波动小于 0.4 dB,归一化自相关峰值波动小于 0.04,各个编码通道取得了与纯相移编/解码器相近的性能,可用于光码分多址/波分复用(WDM)混合系统。

**关键词** 光通信;光码分多址;编/解码器;超结构光纤光栅;多编码信道

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Fiber Bragg Grating Based Time Phase En-Decoder with Multiple Wavelength Channels

ZHU Ying-xun, WANG Rong, PU Tao

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** Optical code-division multi-access (OCDMA) is one of the most attractive techniques to realize all optical access network. A new OCDMA en-decoder based on super structure fiber Bragg grating (SSFBG) is proposed. Based on the equivalent phase shift theory, the proposed en-decoder adopts Sinc function as its sampling function and needs only one phase mask plate to achieve multiple en-decoding channels with similar performance. Users with different wavelength channels can be encoded (decoded) simultaneously by the proposed multi-channel en-decoder, and the capacity and compatibility of the system with wavelength division multiple (WDM) are improved. Analysis and computer simulation are made on the structure and performance of the encoder-decoder. Result shows that each channel achieves equivalent performance with the pure phase-shift en-decoder, the auto correlative P/W rates of each channel is more than 16.3 dB, the fluctuation of P/W rates is less than 0.4 dB, and the fluctuation of auto-correlation peak is less than 0.04 for the endecoder of 127 bit Gold-series. This multi-channel en-decoder can be used in OCDMA/WDM hybrid system.

**Key words** optical communication; optical code-division multi-access; en-decoder; super structure fiber Bragg grating; multi-coding channel

## 1 引 言

光编/解码器作为光码分多址(OCDMA)系统的关键器件近年来得到不断发展<sup>[1~5]</sup>。在众多可实

现的编/解码方案中,基于超结构光纤光栅(SSFBG)的时域相位编码器以其较高的安全性能、较大的用户容量以及低廉的价格越来越受到关注<sup>[1,4~7]</sup>。代表这一领域最高水平的是文献[4]中所

收稿日期:2007-01-11;收到修改稿日期:2007-06-18

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(60502003)资助项目。

作者简介:朱英勋(1978—),男,山东人,博士研究生。主要从事集成光码分多址编/解码技术、光码分多址网络方面的研究。E-mail:ying\_xun319@163.com

导师简介:王 荣(1962—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事集成光电子学、光网络方面的研究。

E-mail:wr\_163@163.com

报道的时域相位编/解码器,该编/解码器采用 Gold 序列作为地址码,码长为 511,码片速率可达到 640 Gchip/s。然而,大多编/解码器仅能够对单个波长进行编/解码,针对具有多个波长信道的光码分多址/波分复用(WDM)混合系统,只能通过更换相位掩模板来制作不同波长信道的编/解码器。随着用户数量的增加编码器数量也随之增加,这样需要大量的具有不同周期的相位掩模板,不仅增加了编码器的制作成本,还增加了系统的复杂性,因此不利于编/解码器的实用化。本文从采样光栅的原理出发,提出了一种可对多个波长信道同时进行编/解码的时域相位编码器。该编码器在设计的过程中可根据系统对不同波长信道的要求调整中心波长和信道间隔,并且使各个编码信道具有一致的编/解码性能。

## 2 采样光纤光栅实现相位编/解码原理

对于均匀采样的布拉格光纤光栅,沿  $z$  方向的折射率调制函数可以表示为

$$\Delta n(z) = A(z)S(z)\exp(j2\pi z/\Lambda) + c. c, \quad (1)$$

式中  $\Lambda$  为光栅周期,  $A(z)$  为沿  $z$  方向慢变化的切趾函数,  $S(z)$  为以  $P$  为周期的采样函数,  $c. c$  表示复共轭。根据傅里叶级数理论,采样函数可以展开为傅里叶级数形式

$$S(z) = \sum_m F_m \exp(j2m\pi z/P), \quad (2)$$

$F_m$  为第  $m$  级傅里叶系数。将(2)式代入(1)式中可以得到

$$\Delta n(z) = A(z) \sum_m F_m \exp(j2m\pi z/P) \times \exp(j2\pi z/\Lambda) + c. c, \quad (3)$$

从(3)式可以看到,均匀采样布拉格光纤光栅可以等效为无穷多个鬼栅的叠加,第  $m$  级鬼栅的折射率调制为

$$\Delta n_m(z) = A(z)F_m \exp(j2\pi z/\Lambda + j2m\pi z/P), \quad (4)$$

如果在采样光栅的某个位置  $z_0$  处光栅采样周期增加了  $\Delta P$ ,则采样函数变为  $S(z - \Delta P)$ ,  $m$  级鬼栅的折射率调制函数变为<sup>[8]</sup>

$$\Delta n_m(z) = \begin{cases} F_m [\exp(j2\pi z/\Lambda) + j2m\pi z/P] & z \leq z_0 \\ F_m [\exp(j2\pi z/\Lambda) + j2m\pi z/P - j\theta] & z > z_0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\theta = 2m\pi\Delta P/P$ 。当  $\Delta P = \pm P/2$  且  $m$  为奇数时即可在鬼栅中引入  $\pi$  相移。如果将  $z$  方向上相位变化  $\varphi(z)$  引起的啁啾代入光栅的采样函数,则  $S(z)$  变为  $S[f(z)]$ ,并有  $f(z) = z - \frac{\varphi(z)}{2\pi}P$ 。由  $f(z)$  的表达式可以看到,带有码字信息的相位变化  $\varphi(z)$  可以通过改变光栅取样函数的周期  $P$  来实现,从而达到与相移光栅编/解码器<sup>[5]</sup>等效的效果。

## 3 Sinc 采样光纤光栅编/解码的理论分析

根据光纤光栅的弱反射假设,采样光栅的反射谱可以近似为光栅折射率调制包络的傅里叶变换<sup>[6]</sup>,因此,对于均匀采样光栅,反射谱的包络由采样函数的傅里叶系数决定。设光栅的采样长度为  $b$ ,采样占空比为  $\gamma = b/P$ ,当采样函数为矩形时,其傅里叶系数为  $|F_m| = \frac{\gamma \sin(m\pi\gamma)}{m\pi\gamma} = \gamma \text{sinc}(m\gamma)$ ,由此可知,矩形采样光栅的反射谱包络呈 Sinc 函数形式。图 1 为一个占空比为 0.4 的矩形采样等效相移编码器反射谱,图中可以清楚地看到 1542.5 nm 和 1547.5 nm 附近由于处于 Sinc 函数的零点而形成的“凹陷”。由于反射谱包络的限制,具有编码信息的  $\pm 3$  级信道与  $\pm 1$  级相比,反射峰值下降了 7 dB 左右,因而很难用作编码信道。这样编码带宽仅为整个等效相移编/解码器带宽的几分之一,造成了编码器带宽资源的浪费。

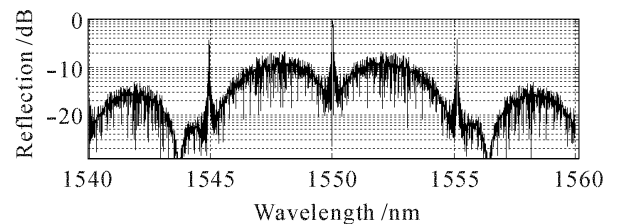


图 1 占空比为 0.4 的矩形采样等效相移编码器反射谱  
Fig. 1 Reflection spectrum of rectangular sampling equivalent phase-shift encoder at 0.4 duty cycle

提高编码器带宽的利用率可以从提高奇数级编码信道的峰值反射率着手考虑。若将采样函数变为 Sinc 函数形式,则根据折射率调制包络与反射谱之间的傅里叶变换关系,采样光栅各级反射峰将具有矩形包络<sup>[7]</sup>,从而使各个信道的反射峰值保持一致。同理,如果将 Sinc 函数应用在等效相移光栅中,就可以在一定波长范围内使各个编码信道的反

射峰值达到一致。

设(1)式切趾函数是周期为  $b$  的 Sinc 函数的叠加,表示式为<sup>[9]</sup>

$$A(z) = \sin\left\{N \frac{L}{b} \pi \left(\frac{z}{L} + \frac{b}{2L}\right)\right\} / N \sin\left[\frac{L}{b} \pi \left(\frac{z}{L} + \frac{b}{2L}\right)\right], \quad (N = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中  $N$  为正整数,  $L$  为光栅长度,  $b$  的取值满足  $P/b$  为一大于 2 的偶数。设  $A_s(z) = \sum_{i=0}^M A(z) S_i(z - iP_i)$

$= \sum_{i=0}^M A_{si}(z - iP_i)$ ,  $M$  为编码长度,  $P_i$  为第  $i$  个码片的周期,  $P_i = P - \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2\pi} P$ ,  $\varphi_i$  为第  $i$  个码片的相位。

由于弱反射条件下光栅的反射谱形状等效于折射率调制包络  $A_s(z)$  的傅里叶变换,再由光栅的空间位置  $z$  与时间  $t$  存在  $t = 2zn_{\text{eff}}/c$  的空时变化关系<sup>[10]</sup> ( $c$  为真空中光速,  $n_{\text{eff}}$  为媒质有效折射率),  $A_s(z)$  可以等效为时域函数:  $A_s(t) = \sum_{i=0}^M A_{si}(t - iT_i)$ , ( $T_i = 2P_i n_{\text{eff}}/c$ ), 光栅的反射谱可以表示为(Fourier[ ] 为傅里叶变换)

$$A_s(f) = \text{Fourier}[A_s(t)] = \text{Fourier}\left[\sum_{i=0}^M A_{si}(t - iT_i)\right] = \sum_{i=0}^M A_{si}(f) \exp(-j2\pi f iT_i), \quad (7)$$

由(7)式可以看出,光栅反射谱包络仅仅与  $A_{si}(f)$  有关。Sinc 形状的  $A_{si}(t)$  函数具有近似矩形的频谱,谱宽为  $\frac{N \cdot c}{2bn_{\text{eff}}}$ , 而采样光栅的信道间隔为  $\frac{\lambda_D^2}{2n_{\text{eff}}P}$ , 因此具有 Sinc 采样函数的采样光栅反射谱具有  $NP/b + 1$  个一致信道。若取  $P = 2b$ , 则用于编码的奇数信道数为  $N$ 。

### 4 数值仿真

上述多信道编/解码器在设计上具有很大的灵活性,编码器的编码信道带宽、编码信道中心波长以及信道间隔可通过改变  $N, P$  等参数实现,因此在编码器设计过程中可根据系统对不同波长的要求适当调整  $N, P$  的大小。

图 2(a), (b) 分别是针对光码分多址/波分复用系统设计的四信道和八信道编/解码器的反射谱。图中较窄的反射峰为偶数级鬼栅形成的非编码反射峰,偶数级之间的部分为奇数级鬼栅形成的编码信道反射谱。为了满足国际电信联盟(ITU-T)对波分

复用系统各信道中心波长以及信道间隔的要求,仿真中光栅的布拉格波长设为 1551.72 nm (对应于 193.2 THz), 采样周期分别为  $P = 5.1406 \times 10^{-4}$  m 和  $P = 1.0281 \times 10^{-3}$  m。光栅的其他参数为: 折射率调制强度  $\bar{\delta}n = 3 \times 10^{-4}$ , 有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.4476$ , 采样占空比  $\gamma = 0.5$ , 编码码字采用 127 位 Gold 序列。反射谱的计算采用传输矩阵方法<sup>[11]</sup>。由(5)式可知,各编码信道具有相同的码字信息,可以同时用作编/解码器。根据前面的分析, Sinc 取样函数的两个过零点之间的间隔为  $\gamma P/2$ , 当  $N = 4$  时可以得到反射谱的矩形包络宽度为:  $\frac{\lambda_D^2 N}{2bn_{\text{eff}}} = 12.94 \times 10^{-9}$  m, 由取样光栅波长间隔计算公式:  $\Delta\lambda = \frac{\lambda_D^2}{2n_{\text{eff}}P} = 1.618 \times 10^{-9}$  m, 因此与反射谱矩形包络可以容纳 4 个编码信道,这与图 2 所示的情形是一致的。对于  $N = 8$  时编/解码器的分析类似。

表 1 图 2 中各编码信道的中心波长

Table 1 Center wavelength of each encoding channel in Fig. 2

	CW /nm	
	4 channels	8 channels
-7	—	1557.36
-5	—	1555.75
-3	1556.55	1554.13
-1	1553.32	1552.52
1	1550.11	1550.92
3	1546.91	1549.31
5	—	1547.71
7	—	1546.11

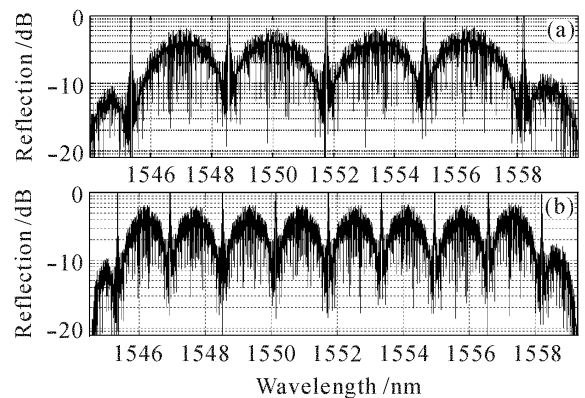


图 2 多编码信道光码分多址编/解码器的反射谱 (a) 4 信道; (b) 8 信道

Fig. 2 Reflection spectrum of multi-channel OCDMA en-decoder

(a) 4 channels; (b) 8 channels

各个编码信道的中心波长可由(4)式推导得到。由(4)式可知第  $m$  级鬼栅的光栅周期为  $\Lambda_m = \frac{1}{1/\Lambda + m/P}$ , 中心波长为  $\lambda_m = 2n_{\text{eff}}\Lambda_m$ 。图 2 所示的信道的中心波长(CW)如表 1 所示。

表 1 中, 4 信道编码器的信道间隔为 3.2 nm, 而 8 信道编码器的信道间隔为 1.6 nm, 符合 ITU-T 对波分复用系统波长间隔的要求。

为了验证表 1 中各信道的编/解码性能, 利用高斯脉冲作为编码器输入信号, 对编/解码器性能进行仿真分析。编/解码性能用自相关输出信号的峰值功率(PA)及峰值旁瓣比(P/W)衡量, 高斯脉冲半峰全宽值为 10 ps, 强度为 1 mW, 中心波长取表 1 中值。经计算, 解码端解码器自相关输出信号的峰值旁瓣比和峰值功率值分别如表 2 所示。从表 2 可以看到, 各个编/解码信道具有较为相似的性能。4 信道编/解码器的输出自相关信号峰值旁瓣比值大于 14.5 dB, 8 信道编/解码器的峰值旁瓣比值大于 17.6 dB。各峰值旁瓣比值具有一定的波动, 这是由于对 Sinc 函数切尾导致的, 但波动的幅度很小。4 信道编/解码器波动幅度小于 0.213 dB, 8 信道编/解码器波动小于 0.352 dB, 因此对多波长同时编/解码影响不大。

表 2 各编码信道性能

Table 2 Performance of each encoding channel

	4 channels		8 channels	
	PA /mW	(P/W) /dB	PA /mW	(P/W) /dB
-7	—	—	0.13773	17.945
-5	—	—	0.12860	17.936
-3	0.15378	14.747	0.13664	17.784
-1	0.15309	14.669	0.13217	17.674
1	0.15188	14.564	0.13539	17.701
3	0.17087	14.534	0.14238	17.795
5	—	—	0.13796	18.026
7	—	—	0.16024	17.695

由于采样函数变为 Sinc 形式, 其等效的折射率调制强度仅为矩形采样的 1/3, 为相移光栅的 1/6 (1/2 占空比),  $N$  值更大时, 折射率强度调制变得更小。分别对峰值折射率调制强度  $\bar{\delta}n = 5 \times 10^{-5}$ , 其余参数与图 1 相同的相移光栅、矩形采样光栅和 Sinc 采样光栅编/解码器进行仿真, 得到反射谱如图 3 所示。图 3 中(a)为相移光栅反射谱, (b)为矩形等效相移光栅-1 级反射谱, (c)为 4 信道 Sinc 采样光栅编/解码器-1 级信道反射谱。图中可以看到 Sinc

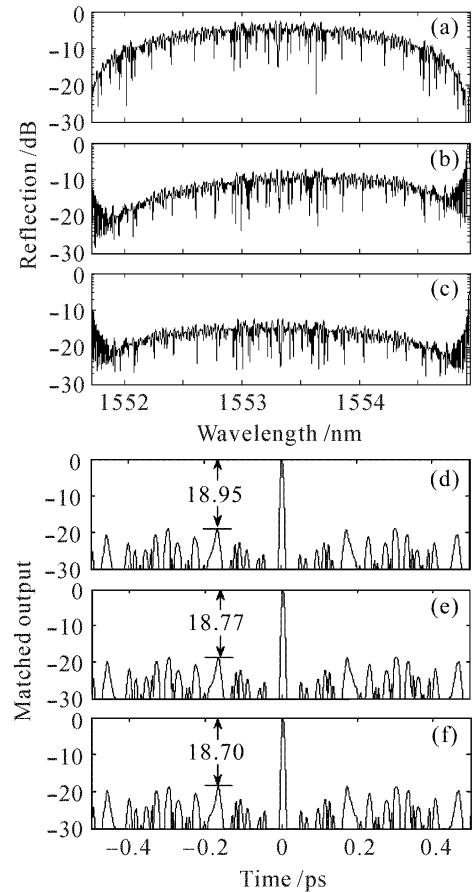


图 3 编/解码器反射谱和自相关输出信号波形

(a) 相移光栅编/解码器; (b) 矩形采样编/解码器; (c) Sinc 采样编/解码器; (d) 相移光栅编/解码器输出自相关信号; (e) 矩形采样编/解码器输出自相关信号; (f) Sinc 采样编/解码器输出自相关信号

Fig. 3 Reflection spectrum of en-decoder and auto-correlation output signal

(a) phase shift en-decoder; (b) rectangular sampling en-decoder; (c) Sinc sampling en-decoder; (d) auto-correlation output of phase shift en-decoder; (e) auto-correlation output of rectangular sampling en-decoder; (f) auto-correlation of Sinc sampling en-decoder

取样光栅编/解码器反射谱的峰值反射率与相移光栅和矩形采样光栅具有较大差别, 这是由于 Sinc 采样的等效折射率调制强度过小造成的。可以通过增加码片长度或者提高氩离子倍频激光器功率及照射时间来提高 Sinc 取样光栅编/解码器峰值反射率。对于 Sinc 采样光栅编/解码器, 当峰值折射率调制强度增加到纯相移光栅的 6 倍时, 即可达到与纯相移光栅相近的峰值反射率。即使反射谱峰值存在较大的差别, Sinc 采样光栅编/解码器仍具有较好的性能。从图 3(f) 可以看到 Sinc 取样光栅编/解码器输出信号峰值旁瓣比值仅比矩形取样光栅编/解码器(图(e))下降 0.07 dB, 比相移光栅编/解码器(图 3(d))下降 0.25 dB。

## 5 结 论

编/解码器的设计具有较大的灵活性,设计过程中可根据目标系统对信道参数的不同要求调整采样周期的大小,使得编/解码器编/解码信道与目标系统相匹配。对 4 信道和 8 信道编/解码器的编/解码性能进行了仿真分析,结果表明,对于使用 127 位 Gold 序列的编/解码器,各编/解码信道输出自相关峰瓣比波动小于 0.4 dB,输出峰值波动小于 0.04,各信道取得了较为一致的性能。该编/解码器为光码分多址与波分复用系统的结合创造了极大的便利,可以广泛应用于波分复用保密系统,波分复用/CDMA PON 接入网,以及广播局域网,具有较高的实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 P. C. Teh, M. Ibsen, J. H. Lee *et al.*. Demonstration of a four-channel WDM/OCDMA system using 255-chip 320-Gchip/s quaternary phase coding gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2):227~229
- 2 H. Ben Jaafar, S. LaRochelle, P. Y. Cortes *et al.*. 1.25 Gbit/s transmission of optical FFH-OCDMA signals over 80 km with 16 users [C]. OFC 2000, 2000. TuV3-1~TuV3-3
- 3 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
- 4 Taro Hamanaka, Xu Wang, Naoya Wada *et al.*. Ten-user truly asynchronous gigabit OCDMA transmission experiment with a 511-chip SSFBG en/decoder [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1):95~102
- 5 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Jie Sun *et al.*. High-performance, high-chip-count optical code division multiple access encoders-decoders based on a reconstruction equivalent-chirp technique [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11):1618~1620
- 6 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):10~14  
蒲涛,王荣,李玉权. 相位编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):10~14
- 7 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):221~224  
燕萌,姚敏玉,张洪明等. 基于等效相移光栅的光码分多址编/解码实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):221~224
- 8 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
- 9 Morten Ibsen, Michael K. Durkin, Martin J. Cole *et al.*. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6):842~844
- 10 P. Chiong Teh, Periklis Petropoulos, Morten 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**(9):1352~1365
- 11 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294