

文章编号: 0253-2239(2008)04-0653-06

基于超结构光纤光栅的正交四相光码分多址编/解码器

朱英勋¹ 王 荣¹ 陈 鹏¹ 谢佳麟² 蒲 涛¹ 卢 麟¹ 郑吉林¹

(¹ 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; ² 沈阳军区通信资源办公室, 辽宁 沈阳 110035)

摘要 正交四相序列编码相比于二相序列具有更大的码字容量和更好的互相关特性, 因此更适用于光码分多址(OCDMA)无源光接入网。提出并实现了一种基于超结构光纤光栅的正交四相光码分多址编/解码器。该编/解码器采用 A 族四相序列作为地址码, 在制作的过程中仅需一个均匀相位掩模板即可实现编码功能, 并且在性能上与传统工艺制作的编码器相当。为了与不同波长信道相匹配, 提出了变信道编码技术, 仿真结果表明采用该技术的编码器具有更高频谱效率, 因此得到更好的编/解码性能。对一个码长 63, 长度 4.1 cm 的正交四相编/解码器进行了信息速率为 2.5 Gb/s, 码片速率为 156 Gchip/s 的编/解码实验, 取得了较好的编/解码效果。

关键词 光通信; 光码分多址; 超结构光纤光栅; 正交四相编码

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

Orthogonal Quaternary Phase OCDMA En/Decoder Based on Super Structured Fiber Bragg Gratings

Zhu Yingxun Wang Rong Pu Tao Xie Jialin Chen Peng Zheng Jilin

(¹ Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)
(² Communication Resource Office, Shenyang Military Command, Shenyang, Liaoning 110035, China)

Abstract Compared to bipolar sequences, orthogonal quaternary phase sequences are more suitable for optical code division multiple access (OCDMA) passive optical network (PON) with multi-users for its larger capacity and better cross-correlation character. A orthogonal quaternary phase OCDMA en/decoder based on superstructured fiber Bragg grating is proposed and realized. The proposed en/decoder adopts family A four phase sequences as its address codes and obtain equivalent performance compared to the traditional en-decoder while it needs only one uniform phase board during its fabrication. In order to be compatible to different channels, a novel coding technology is proposed which can encode the user's data with a changed channel. Simulation results show that the en/decoders have higher frequency spectrum efficiency and therefore better en/decoding performance. A 2.5 Gb/s, 156 Gchip/s en-decoding experiment is performed using an en-decoder with its code length 63 and length 4.1 cm, and good en/decoding results are achieved.

Key words optical communication; optical code division multiple access; superstructured fiber Bragg grating; orthogonal quaternary phase en/decoding

1 引 言

光码分多址(OCDMA)技术结合了光纤巨大的带宽资源和传统电域码分多址技术的诸多优点, 成为实现未来全光接入网的主要技术之一。基于超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)的时域相位编/解码器以及较好的自互相关特性, 较大的码字容量、高安

全性以及低成本等诸多优点成为光码分多址编/解码领域中的一个重要的分支^[1~3]。时域相位编码器将含有地址码的相位信息引入光载波中, 在解码端利用相反相位变化将同相光场分量累积, 异相分量相消, 形成较高的自相关峰和较低的旁瓣。由于时域相位编码具有这一特性, 广泛应用于电域系统的

收稿日期: 2007-07-18; 收到修改稿日期: 2007-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(60502003)资助课题。

作者简介: 朱英勋(1978-), 男, 山东宁阳人, 博士研究生, 主要从事集成光码分多址编/解码技术、光码分多址网络等方面的研究。E-mail: ying_xun319@163.com

导师简介: 王 荣(1962-), 男, 江苏南京人, 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

Gold 序列、M 序列、Walsh 码等双极性码甚至多项序列都可以应用于光码分多址系统中,从而使系统性能得到大幅的提升。

相对于双极性编码,四相移键控(QPSK)编码具有更大的码字容量以及更好的互相关特性,因此更适用于多用户环境下的无源光接入网^[1,4]。本文根据等效相移(EPS)原理^[5],提出并实现了一种新的四相移键控编/解码器,该编/解码器的制作仅需一块均匀相位掩模板和亚微米级控制精度即可实现四相移键控编码功能,同时保证了编码频谱与指定信道匹配。对该编/解码器性能做了计算机仿真,结果表明该编/解码器具有与传统方法制作的编/解码器相近的性能。用一对+2 级编码的四相移键控编解码器进行了编/解码验证实验,取得了较为满意的效果。

2 可用于光码分多址系统的正交四相序列

根据 Welch 和 Sidelnikov 边界^[6],多相序列与二相序列相比,最大非零相关值减小了 $\sqrt{2}$ 倍,由此可以获得 3 dB 的信噪比增量。Serdar Boztas 等构造了两类四相序列—A 族和 B 族四相序列,它们的

表 1 码长为 63、127 和 255 的三组 A 族四相序列的性能

Table 1 Performance of three family A codes with their code length of 63, 127 and 255

63 bits four-phase sequences of family A	$P/C >$	7.8				13		
	$P/W >$	10.5	22	25	30	25	27	30
	Code number	65	43	32	10	20	15	10
127 bits four-phase sequences of family A	$P/C >$	17.9				20.5		
	$P/W >$	17.3	31.9	40	50	37.9	43	50
	Code number	129	96	55	24	62	47	24
255 bits four-phase sequences of family A	$P/C >$	20	35			40		
	$P/W >$	27	70	84	90	70	85	90
	Code number	257	108	44	25	56	44	25

3 基于超结构光纤布拉格光栅的四相移键控编/解码器

传统的基于超结构光纤布拉格光栅的四相移键控编/解码器通常采用直接光栅写入技术制作,这种技术在用于编码的相邻子光栅之间预留长度为 ΔL 的一段非光栅区,使得入射光的载波相位在该区域发生大小为 $\varphi = (4\pi/\lambda_B)n_{\text{eff}}\Delta L$ 的相移, λ_B 为布拉格波长, n_{eff} 为光栅等效折射率。由于 ΔL 仅为光栅布拉格波长的几分之一,因此编解码器的制作和测量设备需要具备纳米精度,包括 10 nm 精度的长程位移台和亚纳米精度的干涉测量仪,而国内尚无此条件。

最大非零相关值分别小于 $1 + \sqrt{L+1}$ 和 $2 + \sqrt{L+2}$ (L 为码长),性能较佳。文献[6]中所讨论的码字性能研究方法都是服务于电域码分多址(CDMA)的,码字的特性用周期相关来描述:

$$\xi_{i,j}(\tau) = \sum_{t=0}^{L-1} \omega^{S_i(t+\tau) - S_j(t)}, \quad (1)$$

其中 $\omega \equiv \sqrt{-1}$, $S_i(\tau)$ 代表第 i 个序列。然而在光码分多址系统中,相邻脉冲并不是相干的,地址码的识别需要进行非周期相关计算,因此需要对 A 族与 B 族四相序列重新进行筛选,寻找出具有良好非周期相关特性的码字。码字的非周期相关特性用自相关峰值旁瓣比(P/W)和自互相关峰值比(P/C)来衡量。为此,文献[7]所提供的方法,当 $t > L$ 时令式(1)中 $S_i(\tau) = 0$,由此寻找具有较大 P/W 与 P/C 的四相序列。表 1 是生成多项式系数为 10020013 的一组 A 族四相序列集的性能统计。表中可见,A 族四相序列具有较为优异的自互相关性能。以 127 位序列为例, $P/W > 37.5$, $P/C > 20.5$ 的码字有 62 个,而文献[7]中表 1 所示的 127 位 Gold 序列 $P/W > 35$, $P/C > 20.5$ 的码字仅有 22 个,由此可见,A 族四相序列具有优于 Gold 序列的自互相关性能。

采用等效相移(EPS)技术^[5,8]实现四相位编码可以大大降低编/解码器制作精度。均匀采样的布拉格光栅可以看作是大量等间隔的子光栅的叠加,它的反射谱具有多峰结构,其中每一个反射峰对应于采样光栅的一级鬼栅。由等效相移原理,若将采样光栅某个位置的采样周期增加 ΔP ,即可在第 m 级鬼栅上形成大小为 $2m\pi\Delta P/P$ 的相移量。如果令周期增量 $\Delta P = \{0, P/4, P/2, 3P/4\}$,可以在 ± 1 级鬼栅上获得 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ 的相移,进一步可以将第 2 节中所讨论的四相序列用等效相移的方法引入到编码鬼栅中形成基于超结构光纤布拉格光栅的四相移键控编解码器。取码片长度 $L_{\text{chip}} = P$,各个采样点

的位置可由下式得到^[2]：

$$z_k = \left(k + \frac{\varphi_k}{2\pi}\right) \times L_{\text{chip}}, \quad (2)$$

式中 $\{\varphi_k\}$ 为四相序列。由于编码器码片长度在数百微米，因此制作 EPS-QPSK 编/解码器仅需亚微米精度的位移台和一块均匀的相位掩模板即可。图 1 给出采用连续光栅写入技术的四相移键控编码器(称之为 TPS-QPSK 编码器)和 EPS-QPSK 编码器的反射谱。图 1(a)为 TPS-QPSK 编码器反射谱，它的布拉格波长在 1543.46 nm，折射率调制幅度为 1.4×10^{-5} ，码片长度 413 μm 。图 1(b)为采用 +1 级鬼栅进行编码的 EPS-QPSK 编码器，它的布拉格波长为 1547.5 nm。为了方便对比，两种编码器选择了相同的码字，相同的码片长度。等效相移编码器的 +1 级鬼栅中心波长为 1543.5 nm，折射率调制幅度为 1×10^{-4} 。反射谱下方的小图是对中心波长附近 2 nm 范围反射谱的放大，由此可见两者具有相似的反射谱。为了比较两种编/解码器的性能，取中心波长为 1543.46 nm，半峰全宽从 1~20 ps 变

化的高斯脉冲作为编码器输入信号，分别对码长为 31、63、127 的编/解码器进行编/解码仿真计算，得到 P/W 、 P/C 与输入脉宽的关系如图 2(a)、图 2(b)所示。图中可见，当脉冲宽度超过 5 ps 后，EPS-QPSK 编码器与 TPS-QPSK 编码器具有相似的性能，因此在实际应用中 EPS-QPSK 编码器完全可以替代 TPS-QPSK 编码器。

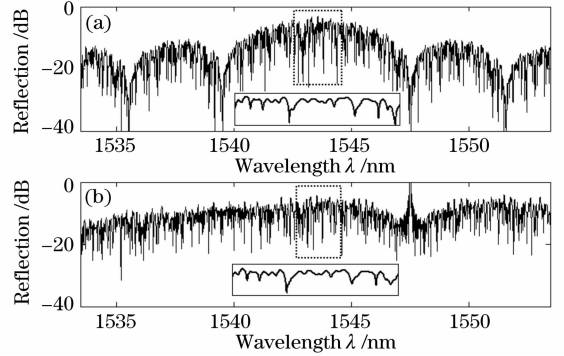


图 1 (a) TPS-QPSK 与 (b) EPS-QPSK 编码器反射谱
Fig. 1 Reflection spectrum of TPS-QPSK (a) and EPS-QPSK (b) en-decoder

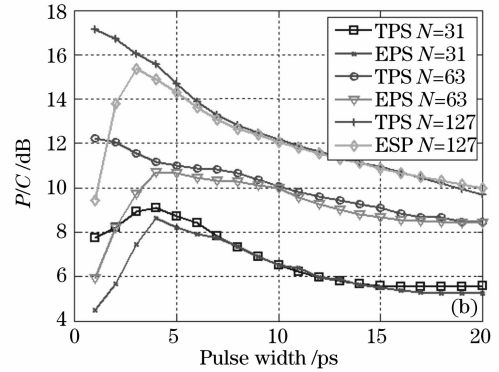
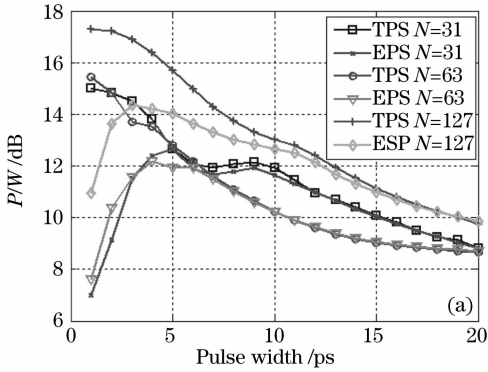


图 2 TPS-QPSK 编码器与 EPS-QPSK 编码器的性能对比。(a) P/W ，(b) P/C

Fig. 2 Performance comparison of TPS-QPSK and EPS-QPSK en-decoder. (a) P/W ，(b) P/C

4 采用 m 级鬼栅编码的 EPS-QPSK 编/解码器

由于相邻采样点之间的距离受子光栅长度 L 的限制，两个相邻采样点之间的距离应不小于 L 。由(1)式可知，两个相邻采样点之间的距离为 $\Delta z =$

$$z_k - z_{k-1} = L_{\text{chip}} + \frac{(\varphi_k - \varphi_{k-1})}{2\pi} \times L_{\text{chip}}, \Delta z \text{ 的最小取值为 } P/4, \text{ 因此, } P \text{ 的取值必须大于 } 4L. \text{ 然而随着 } P$$

值的增大又产生了新的问题，根据采样光栅各级反射峰波长间隔计算式 $\Delta \lambda = \lambda_D^2 / (2n_{\text{eff}} P)$ ，反射峰波长间隔 $\Delta \lambda$ 与采样周期 P 成反比，这样，如果目标编码信道的中心波长 λ_D 距离采样光栅 0 级布拉格波长

λ_0 大于 $\Delta \lambda$ ，编码器编码频谱则不能够覆盖目标信道从而导致编码器对该信道失效。

解决办法是在(1)式的基础上增加一个信道控制参量 L ， L 取非零正整数，其值大小由目标信道中心波长、采样周期 P 以及采样光栅的布拉格波长共同决定：

$$L = \left\lfloor \frac{2n_{\text{eff}} |\lambda_D - \lambda_0| P}{\lambda_D^2} \right\rfloor, \quad (3)$$

将(1)式改写为

$$z'_k = \left(k + \frac{\varphi_k}{2L\pi}\right) \times L_{\text{chip}}, \quad (4)$$

由(3)式可得采样周期增量 $\Delta P = \varphi_k P / 2L\pi$ ，该增量所形成等效相移量为 $\theta = 2m\pi \Delta P / P = m\varphi_k / L$ 。当鬼栅

的级数 $m=L$ 时,等效相移量与 φ_k 相同,因此 L 表示编码器用哪一级鬼栅编码。文献[2]中二相等效相移编码器即为 $\{\varphi_k\}$ 为二相序列, $L=1$ 时的情形。

采用+2级鬼栅进行编码的编码器具有优于+1级编码的性能。图3为分别采用+1级和+2级鬼栅进行编码的EPS-QPSK编码器反射谱,两者编码带宽的中心波长均为1543.46 nm。从(3)式可以看出,当目标编码信道的中心波长一定时,采用+2级鬼栅编码的EPS-QPSK编码器的采样周期与+1级编码相比增加了一倍,由采样光栅的信道间隔计算式 $\Delta\lambda = \lambda_b^2/2n_{eff}P$ 可知,其编码带宽仅为+1级编码器的一半,这意味着将相同的编码信息集中于一半的带宽内,因此,在相同入射脉冲宽度条件下,采用+2级编码具有更高的频带利用率。图4为采用+1级与+2级鬼栅编码的63位EPS-QPSK

编码器的性能仿真,图4(a)和图4(b)分别为 P/W 、 P/C 随入射脉冲宽度变化的情况。图中可以清楚地看到两者在性能上的差异。

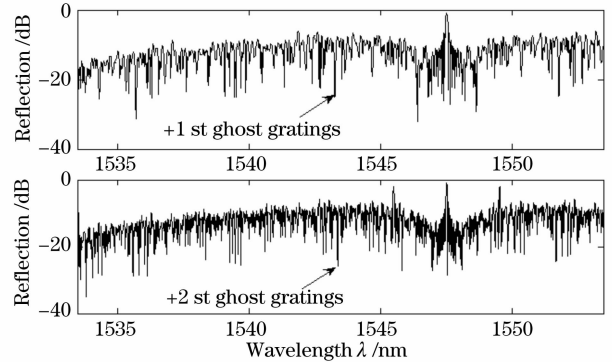


图3 采用+1级与+2级编码的EPS-QPSK编码器反射谱
Fig.3 Reflection spectrum of EPS-QPSK encoder encoded with +1st and +2nd-order ghost gratings

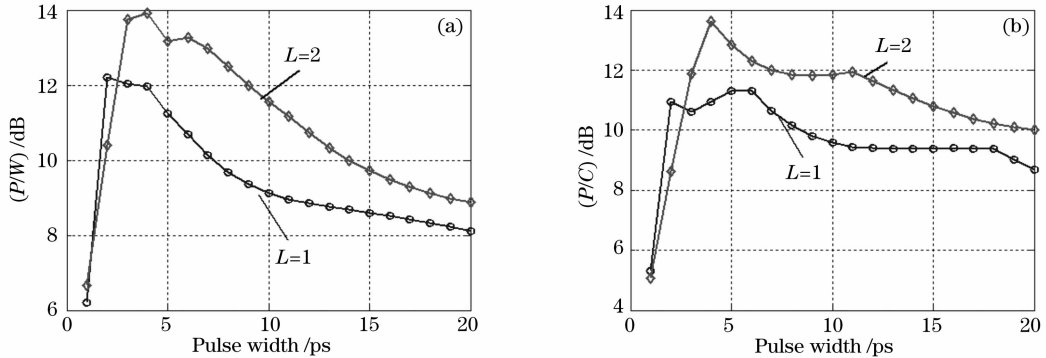


图4 采用+1级与+2级编码的63位EPS-QPSK编码器的性能仿真。(a) P/W , (b) P/C

Fig.4 Simulated performance of 63-bit EPS-QPSK encoder encoded with +1st and +2nd-order ghost gratings.
(a) P/W , (b) P/C

5 原理验证实验

为了验证所提出的编/解码器的可行性,设计并制作了一对QPS-EPSK编/解码器。编/解码器长度为3.68 cm,布拉格波长为1548.12 nm,地址码为

63位A族序列,采用+2级鬼栅进行编码。编码光栅的制作采用相位掩模法,制作原理如图5所示。主控计算机按照(4)式所得的采样点位置联动控制光快门和电控位移台,使得氩离子倍频激光器发出

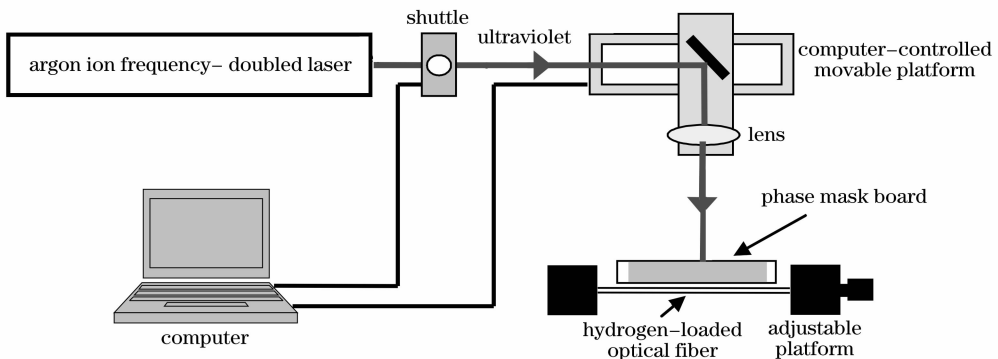


图5 EPS-QPSK编/解码器制作原理

Fig.5 Fabrication principle of the EPS-QPSK en-decoder

的紫外光束透过掩模板按照指定位置和时长照射到载氢光纤上,形成一定的折射率分布,如图 6 所示。改变采样点位置分布,即可形成不同的编/解码器。为了与脉冲光源的中心波长相匹配,在设计过程中取采样周期为 $650 \mu\text{m}$,这样由(2)式、(3)式可得+2 级鬼栅的中心波长恰好为 1545.62 nm 。利用光矢量分析仪对该编/解码器的反射谱进行测量,得到如图 7(b)所示结果,与仿真得到的反射谱图 7(a)具有较好的一致性。

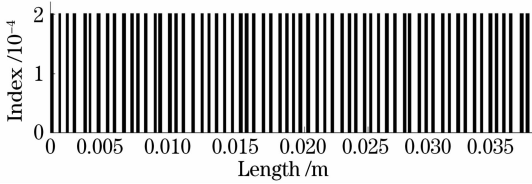


图 6 EPS-QPSK 编码器的折射率分布

Fig. 6 Refraction-index distribution of the EPS-QPSK encoder used in experiment

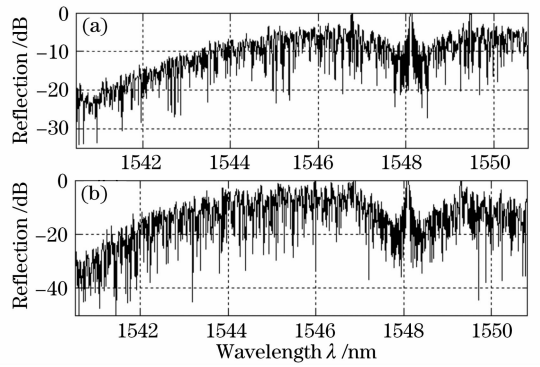


图 7 实验中所使用的编码器的反射谱。(a)仿真,(b)实测

Fig. 7 Reflection spectrum of the encoder used in experiment. (a) Simulated, (b) measured

对所制作的 EPS-QPSK 编/解码器进行了单用户原理验证实验,图 8 为实验系统的配置。脉冲光源为一个中心波长为 1545.62 nm ,脉冲宽度为 25 ps ,脉冲重复频率为 2.5 Gbit/s 的增益开关激光器。由伪随机脉冲发生器(PPG)产生的 2.5 Gbit/s

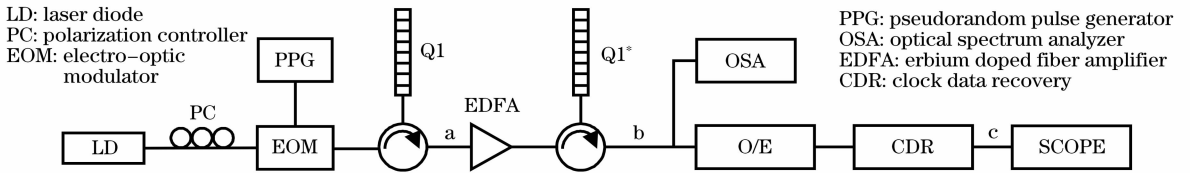


图 8 编/解码器验证实验的系统配置

Fig. 8 System configuration of en-decoding verification experiment

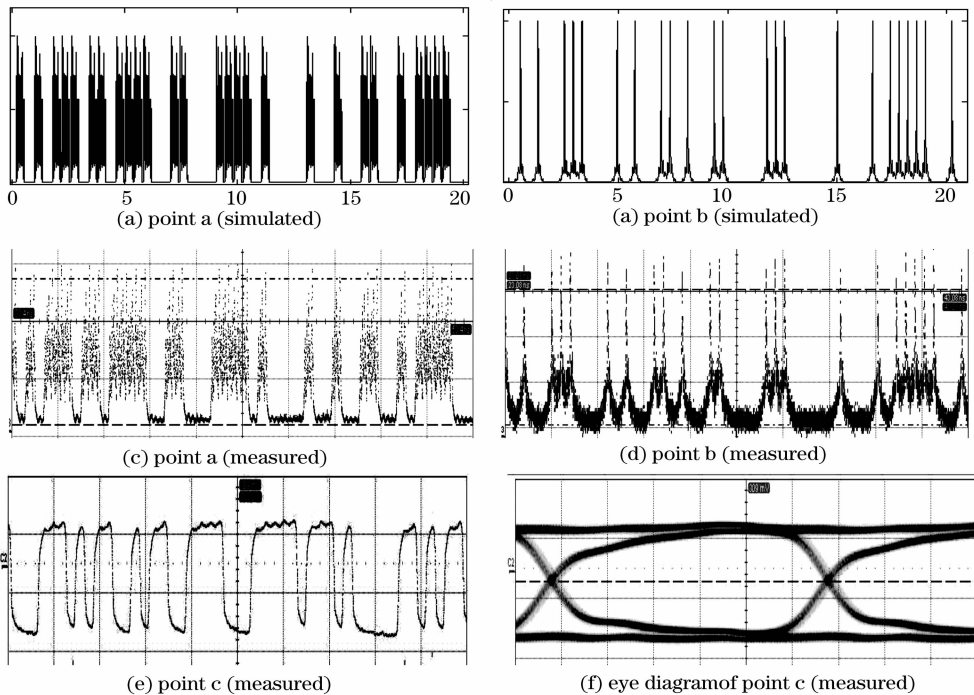


图 9 图 8 中各点处的信号波形

Fig. 9 Signal profile of different points in Fig. 8

的准随机信号通过一个外调制器对脉冲源进行调制。调制后的光信号通过环形器进入编码器 Q1, 编码后经掺铒光纤放大器(EDFA)放大进入与 Q1 相匹配的解码器 Q1* 形成自相关输出。自相关输出信号经过光电转换, 由时钟数据(CDR)模块进行电波形恢复。图 9 为系统中各关键点处的仿真和实测信号波形。图 9(a)和图 9(c)分别为 a 点处编码信号的仿真和实测波形, 由于实验中采用的光纤光栅长度为 4.1 cm, 根据编码时长与光栅长度的对应关系 $T=2Ln_{\text{eff}}/c^{[9]}$, 图中的编码时长为 396 ps, 小于 2.5 Gbit/s 的信息比特周期, 相邻编码比特间无串扰。图 9(b)和图 9(d)为 b 点处的仿真和实测的自相关输出信号, 图 9(b)中信号的 P/W 为 7.5, 图 9(c)中实测信号 P/W 为 4.5。由于解码时长为编码时长的 2 倍, 因此解码输出信号存在旁瓣串扰, 并且图 9(d)中由于掺铒光纤放大器中放大自发辐射(ASE)噪声的加入, 解码信号出现了基底, 因此自相关信号的 P/W 值与仿真信号有一定的差异, 然而这并不影响信号的正确接收。图 9(e)为经过时钟数据恢复后的输出非归零(NRZ)信号, 图 9(f)为相应非归零信号的眼图, 图中可见眼图的张开度良好。当 b 点光功率达到 -21.5 dBm 时测得误码率达到了 10^{-9} 。

6 结 论

根据等效相移原理提出了基于超结构光纤光栅的正交四相光码分多址编/解码器, 该编/解码器的优势在于将传统 TPS-QPSK 编码器的纳米级制作工艺降低到了亚微米级, 并且取得了与传统工艺制作的编码器相近的性能。为了突破子光栅长度对编码谱中心波长的限制, 提出了利用采样光栅的第 m 级信道进行编/解码的方法, 采用该方法可提高编码器的频谱利用率并实现编码频谱与光源相匹配, 因此, 无需更换相位掩模板即可实现对不同波长的信号进行编/

解码。对所制作的 63 位 EPS-QPSK 编/解码器进行了原理验证实验, 所得结果与仿真所得较为一致。

致谢 感谢北京邮电大学武剑老师提供增益开关激光器。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **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*, 2006, **27**(1): 10~14
- 4 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
- 5 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
- 6 S. Boztas, R. Hammons, P. V. Kumar. 4-phase sequences with near optimum correlation properties[J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1992, **38**(3): 1101~1113
- 7 Xu Wang, Koji Matsushima, Akihiko Nishiki *et al.*. High reflectivity superstructured FBG for coherent optical code generation and recognition [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(22): 5457~5468
- 8 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift[J]. *Chin. 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
- 9 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