

文章编号: 0258-7025(2009)11-2939-06

超结构光纤光栅时域相位编解码器的半边带应用

卢 麟 郑吉林 韦毅梅 陈 鹏 蒲 涛 李玉权

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 光源与编解码器的匹配关系是光码分多址(OCDMA)系统设计的重要内容。提出了时域相位编解码器的半边带应用问题,即:等效相移超结构光纤光栅(EPS-SSFBG)编解码器反射谱的半边带已包含了编解码器结构的所有信息,光源只需要覆盖半边带就能完成编解码功能。仿真分析了光源脉宽与编解码器反射谱的对应关系对编解码性能的影响,仿真结果验证了半边带应用的可行性。在应用等效相移光栅编解码器的实验中验证了半边带应用的编解码性能,实验结果与半边带应用的理论规律相符。

关键词 光通信;光码分多址;超结构光纤布拉格光栅;半边带

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2939

Half Band Application for EPS-SSFBG En/Decoder in OCDMA System

Lu Lin Zheng Jilin Wei Yimei Chen Peng Pu Tao Li Yuquan

(Institute of Communication Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract The match between optical pulse source and en/decoders is an important issue in optical code division multiple access (OCDMA) system design. Half band application for equivalent phase shift superstructured fiber Bragg grating (EPS-SSFBG) en/decoder is proposed in this paper. The decode performance is fairly well when the source spectrum just cover half of the encode band which is decided by the SSFBG structure. The possibility of half band application is testified by both simulation and experiment.

Key words optical communication; optical code division multiple access; superstructured fiber Bragg grating; half band

1 引 言

应用窄脉冲光源的相干光码分多址(OCDMA)系统因其集成化的编解码器、高速、长码长、大容量以及较高的安全性能,越来越受到关注^[1~5]。代表这一领域最高水平的是基于真实相移超结构光纤光栅(RPS-SSFBG)的时域相位编解码器^[1]。通过对取样光栅周期进行啁啾,就可以利用等效相移制作超结构光纤光栅(EPS-SSFBG)相位编解码器,采用亚微米精度的制作工艺可以达到与 RPS-SSFBG 相当的性能^[6,7]。在时域相位编解码的 OCDMA 系统中,光源与编解码器间的匹配关系是影响系统性能的重要因素。第一,光源谱与编解码谱的匹配关系决定了编解码性能^[8],已有的系统中均要求光源的

谱完全覆盖编解码谱以获得最佳的编解码效果。然而,目前的相位编解码器有几个纳米的编码带宽,意味着需要皮秒量级的高速脉冲光源,这给 OCDMA 系统的实用化带来了困难;第二,光源与编解码器谱的匹配关系又直接决定了给定码长条件下的编码长度。扩时系统中的编码长度的增加会直接导致码间串扰,从而成倍地引入干扰和差拍噪声。从实用化的角度出发,扩时 OCDMA 系统既希望编解码系统具有更窄的编解码谱从而降低对光源的要求,又希望在保证码长的条件下具有更短编码的长度。针对这一需求,本文在深入研究光源与编解码器匹配关系的基础上,提出了时域相位编解码器的半边带应用方案,并进行了实验验证。

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2009-04-27

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z274)和江苏省自然科学基金创新人才(BK2007501)资助项目。

作者简介: 卢 麟(1975-),男,讲师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: goodlulin_163@163.com

2 半边带应用的理论和仿真分析

2.1 理论基础

基于 SSFBG 的 OCDMA 编解码器的实质是在光域实施信号映射(编码)和相关运算(解码)的物理器件。一般可将其等效为一个线性时不变系统,其冲击响应由编解码器的物理结构和折射率分布等参数决定。在弱反射条件下(反射率小于 20%),采样光栅的冲击响应与采样光栅的结构相同,因此可以采用傅氏分析法进行定性分析。对于低反射的 SSFBG 时域相位编解码器,光脉冲可以穿透整个光栅,其频域响应 $H(\omega)$ 可简单表示为空间超结构折射率调制分布函数 $\Delta n(z)$ 的傅里叶(Fourier)变换^[9]

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta n(z) e^{j\omega z} dz = |H(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}. \quad (1)$$

对于双极性的 EPS/RPS-SSFBG 的编解码器,其折射率分布函数分别为

$$\Delta n(z) = \Delta n [1 + (0.5) P_s(C)] \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) A\left(\frac{z}{l}\right), \quad (2)$$

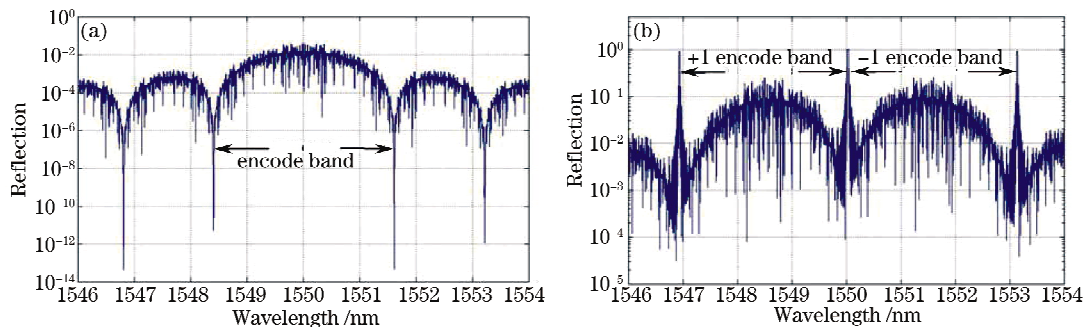


图 1 (a)真实相移编码谱;(b)等效相移编码谱

Fig. 1 (a)Encode band for RPS-SSFBG;(b)encode band for EPS-SSFBG

但由于编解码器本身是一个物理实器件,其折射率分布都是关于空间/时间的实函数。根据傅氏变换的奇偶虚实性可知,

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta n(z) \cos \omega z dz - j \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta n(z) \sin \omega z dz = R(\omega) + jX(\omega), \quad (4)$$

式中 $R(\omega)$ 为反射谱的实部,因积分表达式中余弦信号的作用而为偶函数;而 $X(\omega)$ 为反射谱的虚部,因积分表达式中正弦信号的作用而为奇函数。根据复数性质有

$$|H(\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)}, \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{X(\omega)}{R(\omega)}.$$

显然,编码谱的幅度是偶对称函数而相位谱为奇对称函数。无论采用什么方式折射率变化结构,以给

$$\Delta n(z) = \Delta n \left[1 + (-1)^{P_s(C)} \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right] \cdot A\left(\frac{z}{l}\right), \quad (3)$$

其中 $A\left(\frac{z}{l}\right)$ 为切趾函数, $l = N \cdot L_{\text{chip}}$ 为光栅长度, N 为码长(取样个数), L_{chip} 为码片长度, Λ 为 Bragg 波长。 C 为所采用的地址码, $P_s(C)$ 为与地址码相关的函数,取值为 0 和 1,它决定了折射率调制的相移。

对于时域相位编解码系统,解码器是编码器的匹配滤波器,即:解码器是编码器的空间反向应用,因此解码器与编码器的幅度反射谱相同,但具有完全共轭的相位谱。图 1(a)和(b)分别是编码带宽约为 3.2 nm 的 RPS/EPS-SSFBG 编解码器的幅度反射谱。传统的编解码系统应用中都要求光源谱要完全覆盖编解码器的编码带宽, RPS-SSFBG 编解码器要求光源覆盖其 0 级谱,如图 1(a)所示;对于 EPS-SSFBG 编解码器,要求光源完全覆盖其编解码谱的某一级,如图 1(b)所示。

定的布拉格波长为中心,其反射谱的半边带中已包含了编解码器的所有结构信息。对于 SSFBG 的相位编解码器而言,其结构就对应着所使用的码字。因此对于图 1 所示的编解码谱,其编码带宽的一半已经包含了所有码字信息。理论上,光源的谱只要覆盖原编解码带宽的一半就能完成编解码功能。

2.2 仿真分析

利用耦合模理论,仿真分析不同半峰全宽脉冲(即光源谱宽不同)与 EPS-SSFBG 编解码谱的对应关系(偏移步长为 50 pm),从而得出光源谱宽及谱覆盖的范围对编解码性能的影响。仿真中脉冲光源为高斯型, $n_{\text{eff}} = 1.45$, Bragg 中心波长为 1550 nm, $L_{\text{chip}} = 533 \mu\text{m}$ 。光栅采用矩形采样,无切趾,码字采用码长为 127 的两个性能较好的戈尔德(GOLD)码,其理论自相关峰值旁瓣比 $(P/W) = 112$,自互

相关峰值比(P/C) = 36, 编码带宽为 3.6 nm。衡量编解码性能的主要指标有 3 个: 归一化自相关峰值 P_a , P/W 和 P/C , 其中 P_a 是输入脉冲峰值为 1 时经过编解码器后的自相关峰值的大小, 该指标衡量编解码器的峰值衰减。

当曝光区为 150 μm , 弱反射条件下(相对折射率调制深度为 1×10^{-5}), 光源谱宽及其覆盖位置对

编解码性能的影响如图 2 所示; 强反射条件下(相对折射率调制深度为 1×10^{-4}), 光源谱宽及其覆盖位置对编解码性能的影响如图 3 所示。其中(a)为 P/W 与脉冲宽度及覆盖范围间的关系, (b) 为 P/C 与脉冲宽度及覆盖范围间的关系, (c) 为峰值反射率与脉冲宽度及覆盖范围间的关系。

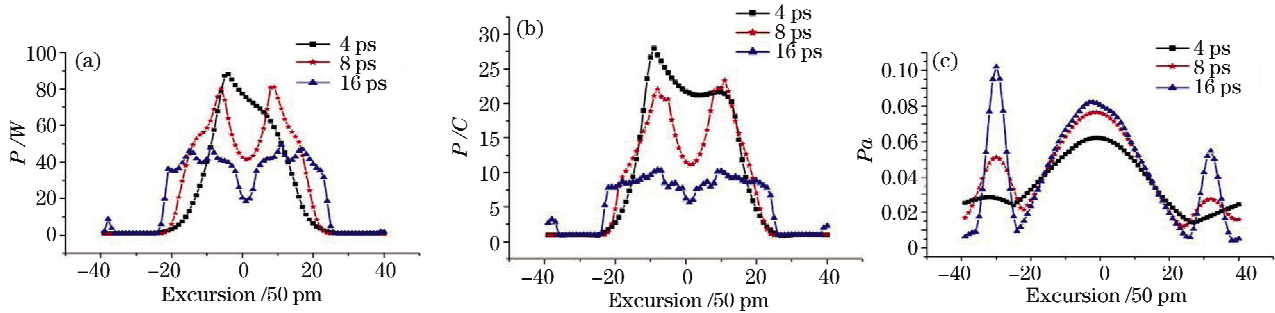


图 2 低反射率编解码器半边带应用性能

Fig. 2 Half band performance for low reflection EPS-SSFBG en/decoder

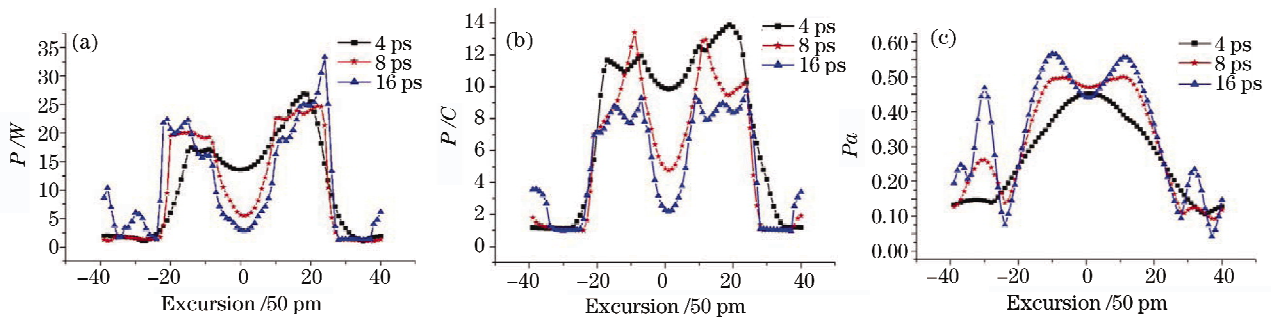


图 3 高反射率编解码器半边带应用性能

Fig. 3 Half band performance for high reflection EPS-SSFBG en/decoder

由低反射率编解码器的半边带应用性能图 2 可以看出, 光源脉宽为 4 ps 时, 光源谱完全覆盖编码谱, 能达到的最大 P/W 约为 92, 最大 P/C 约为 27, 最大峰值反射率为 0.08。随脉宽的增加(谱宽的减少), P/W 和 P/C 在覆盖位置偏移至 ± 500 pm 出现极大值, 当脉宽为 8 ps(即光源谱宽减少为原来的一半)时, P/W 最大为 80, 而 P/C 最大为 23, 峰值功率随偏移成下降趋势, 在 ± 500 pm 下降约 10%。说明当光源谱宽减少一半并覆盖编码带宽的半边带时, 其编解码性能并没有大的下降, 约为完全覆盖时的 90%。光源为 4 ps 的性能略优于 8 ps 的性能, 这是由于虽然 8 ps 脉宽偏移后覆盖半边编码带宽但反射谱的幅度不均衡, 使编解码性能略有下降。随着脉宽的进一步增加, 自/互相关性能下降但对光源波长的漂移不敏感, 即在部分覆盖的条件下, 光源谱范围发生漂移不会影响编解码性能。如当输入脉宽为 16 ps 时, 光

源谱中心偏移在 350 pm \sim 1.2 nm 之间, 其 P/W 约为 40, P/C 约为 7。

由应用高反射率编解码器的图 3 可以看出, 高反条件下中心对准的性能明显下降, 这是由于高反射率引起的法布里-珀罗腔效应和时域编码信号幅度不均匀所致, 等效于时域相位编码信号的幅度不等且相位并不是严格的 0 和 π , 所以自互相关性能下降。但半边带应用的规律性依然存在, 即 P/W 和 P/C 在光源中心偏移 ± 750 pm 出现峰值, 且 4 ps 的性能与 8 ps 的性能相当, 且随着输入脉宽的增加编解码性能下降不大。高反射率编解码器的性能平坦区域更宽, 表明对光源中心波长漂移的不敏感性增强, 且高反射率条件下对编解码性能脉宽也不敏感, 即在高反射率编解码器的半边带应用条件下, 对光源严格对准的要求降低, 且宽脉冲和窄脉冲的性能相差不大。

由仿真结果可以看出,对于基于 SSFBG 的时域相位编解码器,由于其反射谱的半边已包含了所有编解码信息,光源无需覆盖所有的编解码带宽就能完成编解码功能。且半边带应用对光源谱中心漂移不敏感。

3 半边带应用的实验研究

图 4 是 EPS-SSFBG 编解码器半边带应用的系统实验配置。误码仪伪随机序列产生单元(MP1763C)产生的 2.5 GHz 时钟信号经微波放大后驱动增益开关脉冲激光器(GSLD)产生相应速率的光窄脉冲。与成本高、尚处于实验室应用的半导体锁模和环腔锁模的脉冲激光器相比,GSLD 重复速率可调范围大,易于实现与通信系统中其他设备的同步操作,稳定性和可集成性强,成本低,可靠性高,是实用化 OCDMA 系统的可用光源。MP1763C 产生的 2^7-1 的伪随机数据经驱动放大后,通过强

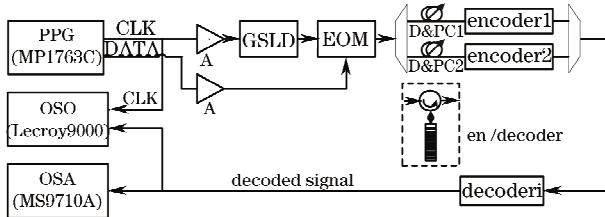


图 4 编解码实验框图

Fig. 4 Experiment setup

度调制器对光脉冲序列进行外调制得到与数据相对应的光窄脉冲序列,经分路器、延时和偏振控制送入两个 EPS-SSFBG 编码器,两路编码数据间的时延应足够大以保证对同一解码器而言数据不相关与光

源脉冲不相干。解码信号送入光采样示波器(Optic Sample Oscilloscope, Lecroy NR9000) (具备 30 GHz 带宽光探测器和 20 GHz 带宽电检测器)。如系统中仅有 1 号编解码器对则可以观测自相关特性;如系统中采用 1 号编码器和 2 号解码器则可观测互相关特性;如系统中同时应用两个编码器和 1 个解码器,则可观测 OCDMA 方式的编解码结果。

在 2.5 Gb/s 的速率条件下,保证最佳抖动特性的 GSLD 最小脉宽约为 20 ps,其中心波长为 1545.8 nm,对应约 0.65 nm 的 3 dB 带宽和 1.5 nm 左右的 20 dB 带宽。实验中采用 63 位 EPS-SSFBG 编解码器,为消除码间串扰对系统性能的影响,编解码器的长度控制在 2.3 cm,其反射谱形状如图 1(b) 所示,其 0 级反射峰由于光栅退火作用下降到 1547.8 nm 左右,编码带宽约为 4.3 nm,因此光源可覆盖在编解码器的 +1 级编码带宽内。为保证编解码性能对光源中心波长的敏感度,制作时控制曝光时间保持低反射率。当观测编解码器的部分边带应用时,由于光源的中心波长不易调整,转而调节编解码谱与光源谱的对准关系。编解码谱的中心位置与光栅周期有关,当光栅周期增加时,编解码谱的中心位置向长波长方向移动,反之则向短波长方向移动。调节过程中利用光谱仪(Amrsttu MS9710A) 监测编解码器反射谱的对应关系和光源与编解码器谱的偏移情况。图 5 和图 6 分别为中心对准和半边带应用条件下的编解码性能。其中(a)为光谱仪测出的光源与编解码谱的对准关系,(b)和(c)分别为自相关信号的波形和眼图,(d)和(e)分别为同时有自/互相关信号的波形和眼图。

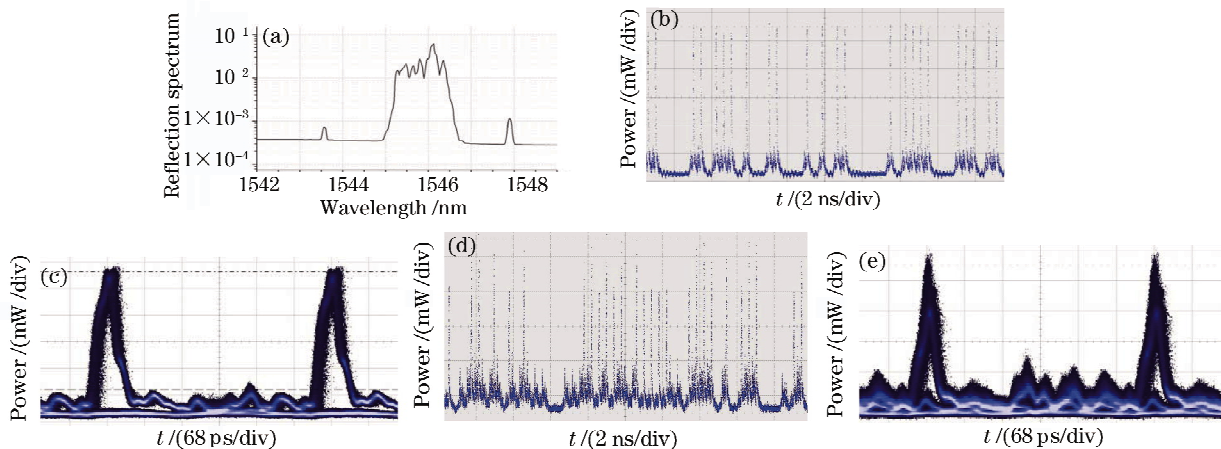


图 5 中心对准编解码性能

Fig. 5 Performance of centre cover application

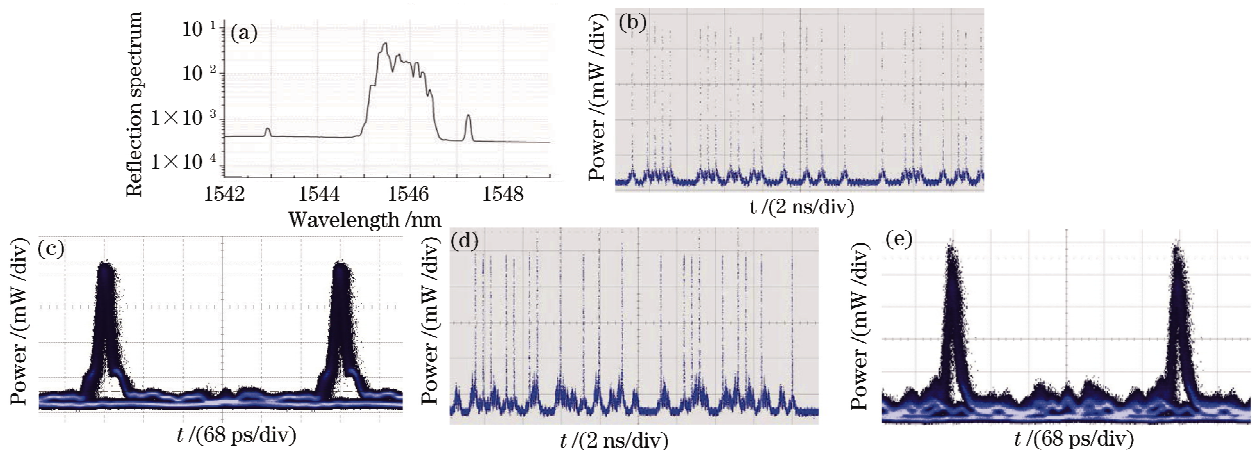


图 6 偏 0 级的半边带应用编解码性能

Fig. 6 Performance of adjacent 0 grade half band cover application

图 5(a)是在中心对准条件下,最佳解码效果时的解码反射谱,其右侧峰为编解码器的 0 级反射峰,左侧为编解码器的+2 级反射峰。此时编解码器的反射谱中心位置为 1545.78 nm,该结果符合仿真结论,即由于直流失谐量的作用,中心对准条件下的最佳位置是中心略微偏向零级。由图 5 的自/互相关眼图和波形可以看出,中心对准条件下的自相关 $P/W \approx 5$,互相关 $P/C \approx 3$ 。编解码性能较低是因为光源谱宽远小于编码带宽,并且增益开关光源的啁啾对编解码性能也有较大的影响。

由图 6(a)可以看出在半边带应用条件下,最佳解码效果时的解码反射谱中心位置为 1545.09 nm,相当于光源谱中心向 0 级方向偏移了 0.69 nm。由于该组编解码器的反射谱半边带约为 1.65 nm,因此该实验结果与仿真结论相符,即在弱反射条件下,半边带应用的光源中心最佳位置略微偏向短波长。由图 6 的自/互相关眼图和波形可以看出,偏向 0 级半边带应用条件下的自相关 $P/W \approx 8$,互相关 $P/C \approx 5$,优于中心对准应用时的解码性能。

由编解码实验结果可以得出结论,第一,在光源的谱宽远小于编解码带宽的条件下,半边带应用的编解码性能要优于传统的中心对准方式,该现象与仿真结论相符,可理解为半边带应用条件下的光源覆盖有效码字多于中心对准应用;第二,由于编解码带宽内反射谱的幅度不均衡,半边带应用条件下的插损要大于中心对准方式;第三,综合考虑编解码性能的 3 个指标,EPS-SSFBG 编解码器的半边带应用应选择偏向 0 级的一半编解码谱,既保证编解码的自互相关性又尽量减少了插损。

4 结 论

提出了基于 SSFBG 的时域相位编解码器的半边带应用方案,并利用仿真分析和编解码实验进行了验证。在系统中实施半边带编解码的优点有两个方面:一方面,针对给定光源和码字设计的编解码器可以更短。在半边带应用条件下编码长度可以缩短一半,减少码间串扰及其导致的差拍噪声对系统性能的影响;另一方面,可以采用脉宽较宽的增益开关或外调制方式的脉冲光源方案,降低光源成本,提高系统的稳定性和实用化水平。对整体系统而言,光源脉宽的增加又降低了接收机带宽需求,提高信道带宽利用效率,降低色散补偿代价。但超结构光纤光栅时域相位编解码器的半边带应用与完全匹配应用相比,编解码性能会有所下降。因此需要在系统设计时统筹考虑编码长度、功率预算、成本、复杂度等因素,此外还应该改进编解码器的设计使其适合于半边带应用。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Xu Wang, Naoya Wada, Tetsuya Miyazaki *et al.*. Field trial of 3-WDM \times 10-OCDMA \times 10.71 Gbps, truly asynchronous, WDM/DPSK-OCDMA using hybrid E/D without FEC and optical threshold[C]. *OFC*, 2006, PDP 44
- 3 W. Cong, C. Yang, R. P. Scott *et al.*. Demonstration of 160-320Gb/s SPECTS O-CDMA network testbed[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15): 1567~1569
- 4 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

- 5 Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5Gbit/s 60 km optical code division multiple access transmission experiment based 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
- 6 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Shizhong Xie. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2004, **16**(10): 2284~2286
- 7 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Yu Yao *et al.*. 511-chip, 500 Gchip/s OCDMA en/decoders based on equivalent phase-shift method[C]. *OFC 2006*, OFF2
- 8 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): 1939~1944
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): 1939~1944
- 9 H. Sotobayashi, W. Chujo, K. Kitayama. Highly spectral-efficient optical code-division multiplexing transmission system [J]. *IEEE J. Quantum Electr.*, 2004, **QE-10**(2): 250~258