

文章编号: 0258-7025(2008)03-0418-04

# 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

卢 麟 吴伟磊 方 涛 彭 晖 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** 稳定的窄脉冲光源、高性能编解码器和具有旁瓣/噪声抑制功能的接收机是光码分多址(OCDMA)系统设计实现的 3 个关键模块。实验中利用增益开关脉冲光源, 63 位等效相移超结构布拉格光栅(EPS-SSFBG)相位编解码器和接收机门限调整技术实现了 2.5 Gbit/s 60 km 传输并得到了相应的误码曲线, 系统在误码率(BER)等于  $10^{-9}$  时的灵敏度为  $-22.5$  dBm。实验结果表明, 等效相移超结构布拉格光栅编解码器兼具高性能和可实现性, 可用于实用化的光码分多址系统, 而综合利用光域和电域的手段抑制旁瓣和噪声的影响是提高系统性能的重要手段。

**关键词** 光通信; 光码分多址; 超结构光纤布拉格光栅; 等效相移

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## 2.5 Gbit/s 60 km Optical Code Division Multiple Access Transmission Experiment Based on Equivalent Phase Shift Super Structured Fiber Bragg grating En/Decoder

Lu Lin Wu Weilei Fang Tao Peng Hui Pu Tao Li Yuquan

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

**Abstract** There are three key modules in coherent optical code division multiple access (OCDMA) system: ultra-short optical pulse source, en/decoder and receiver. Equivalent phase shift super structured fiber Bragg grating (EPS-SSFBG) OCDMA en/decoders were experimentally demonstrated. 2.5 Gbit/s OCDMA experiment is shown to achieve 60 km error free transmission using gain switch laser diode, 63-chip EPS-SSFBG phase en/decoder and threshold adjustable receiver. The receiver sensitivity is  $-22.5$  dBm at  $10^{-9}$  bit error rate (BER). The experimental results prove that EPS-SSFBG en/decoder could be used in practical OCDMA system due to its high performance and realizability. It is a very important method to improve system performance by using optical and electrical processing to restrict noise and side lobe.

**Key words** optical communication; optical code division multiple access; superstructured fiber Bragg grating; equivalent phase shift

### 1 引 言

光码分多址(OCDMA)系统的码字选择、编解码方案和系统实现是决定系统性能的主要因素, 其中基于码字设计的编解码器是影响系统性能的核心。应用窄脉冲光源的相干光码分多址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而越来越受到关注<sup>[1~5]</sup>。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, 该编解码器采用金(GOLD)序列作为地址码, 码长为 511, 码片速率可达到 640 Gchip/s<sup>[1]</sup>。真实相移超结构光纤光栅需要纳米级的光栅制作设备, 因而工艺要求高, 而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相位编解码器, 采用亚微米精度的制作工艺可以达到与真实相移超结构光纤光栅相当的性能<sup>[6,7]</sup>, 码长为 1023 的等效相移超结构光纤光

收稿日期: 2007-08-14; 收到修改稿日期: 2007-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(60502003, 60472007)资助项目。

作者简介: 卢 麟(1975—), 男, 新疆人, 讲师, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: goodlulin\_163@163.com

栅(EPS-SSFBG)编解码器已有报道<sup>[8]</sup>。但以往的实验报道是通过测试编解码器反射谱的幅度和相位来计算性能或通过观测解码波形来判断编解码性能,并没有实际的传输系统验证。本文将阐述基于等效相移超结构光纤光栅编解码器的光码分多址传输系统设计中的关键问题,报道基于 63 位等效相移超结构光纤光栅编解码器的 2.5 Gbit/s 传输速率, 60 km 传输实验。

## 2 基于等效相移超结构光纤光栅编解码器的光码分多址传输系统

对于一个典型的光码分多址传输系统而言,窄脉冲相干光源、高性能编解码器和具有旁瓣/噪声抑制功能的接收机是其系统设计实现的 3 个关键模块。

应用于光码分多址系统的窄脉冲光源必须具备以下功能和相应性能:首先是为编解码器提供足够的编码谱,一般至少需要皮秒级的脉冲宽度才能满足纳米级的编解码器带宽要求;光源至少能保证单脉冲时间内的相干度,以保证编解码器的相关运算;必须能与外部时钟信号同步并满足一定的抖动指标以适应传输接口要求;必须具备较高的稳定性和可靠性以保证整个传输系统的稳定性和可靠性;光源的消光比、功率应尽量高;而实用化光源的成本必须在可接受的范围内。在众多的光源方案中,半导体锁模激光器在稳定性、可集成性、波长可调谐性等方面有较大的优势,光纤激光器在性能和成本上与半导体锁模激光器相当,但其稳定性和可集成性较差。这两种激光器是目前多数光码分多址实验系统的首选光源,但成本高,重复频率调节范围小,对不同速率系统兼容性不强,因而只能应用于实验环境中。而基于调制光载波的光源(如增益开关激光器)成本低、可集成性和稳定性也较好,但存在频率和相位啁啾。本实验的目的之一就是验证增益开关激光器用于传输系统的可行性。

光码分多址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。图 1 为自行设计制作用于实验的 63 位等效相移超结构光纤光栅编解码器的反射谱,其中心波长约为 1548.1 nm。等效相移光栅通常用其+1级或-1级反射谱实施编解码。图中所示为+1级编码谱,编码

带宽约为 2.2 nm。由于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。

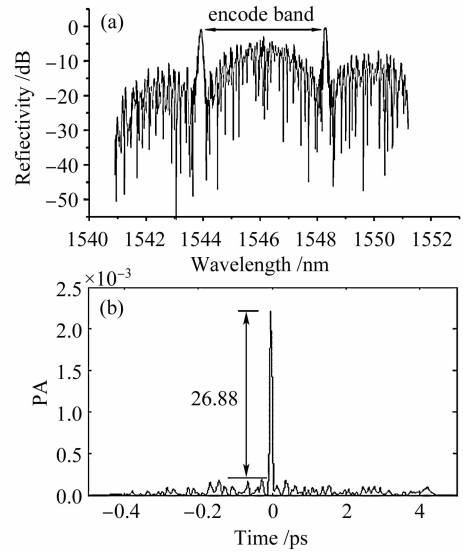


图 1 63 位等效相移超结构光纤光栅的(a)编码器反射谱和(b)最佳条件下的解码波形

Fig. 1 63-chip EPS-SSFBG en/decoder (a) amplitude spectra and (b) decode signal in matched condition

应用于相干光码分多址系统的编解码器是频率和相位敏感器件,在系统设计时必须考虑两个重要问题:一是光源与编解码器的匹配问题。由于等效相移超结构光纤光栅的编解码谱是其反射谱的一部分,因此光源的谱要与编码带宽重合,以保证编解码效率,抑制邻级干扰。二是必须抑制光源的频率和相位啁啾,同时也要补偿链路色散,并减少传输中偏振模色散(PMD)及非线性效应的影响。图 1(b)是光源无频率/相位啁啾,且光源与编解码器完全匹配条件下的解码波形,PA 为峰值功率,其理论自相关峰值旁瓣比( $P/W$ )值约为 26.88。

光码分多址系统对窄脉冲序列实施编解码,解码后的信号中不但有与编码序列相对应的自相关峰,也有基底噪声和旁瓣干扰。同时,由于光码分多址编解码需要纳米级的编码带宽,其对应的时域脉冲宽度约为皮秒级。如果要等带宽接收,接收机的带宽在 $10^2$  GHz 以上,目前多数光码分多址实验系统的接收带宽也在 30 GHz 以上,因此实用化的窄脉冲接收必须立足于窄带接收条件下的光电转换和非归零码恢复。在光码分多址系统中,存在多用户、差拍、码间串扰等干扰,使得解码后的光信号底噪较大,旁瓣现象严重。即使解码器输出能获得较好的

自相关峰值旁瓣比,但由于光电转化的过程是包络检测,在窄带接收的情况下,自相关峰的能量损失会大于干扰和噪声的能量损失,导致光电转换后的峰/瓣比和信噪比进一步降低。所以,实用化的光码分多址接收机的首要任务是窄带接收条件下抑制噪声和多用户干扰。

设计具有旁瓣和底噪抑制功能的窄脉冲接收机,可以从光域和电域两方面入手:光域处理的基本思路是利用有源光器件的非线性效应产生“门限”效应<sup>[9]</sup>,包括幅度门限效应和时间门限效应两种,前者是使功率相对高的自相关峰通过而噪声和旁瓣因低于门限被滤除,从而抑制旁瓣;后者是在时钟的控制下在确定的时间段让光通过从而抑制抖动。两种光域处理手段都能大大改善光电转换前的  $P/W$  和信噪比,但一般需要瓦级的光放大器和较为复杂的光信号处理器件;电域抑制旁瓣和噪声的措施包括:恒包络调制,如:差分相位调制。接收机门限调整,即:提高“1”码的判决门限电平,减少因旁瓣引起的误判以及高速纠错码、电域均衡等。但由于“电子速率瓶颈”和硬件复杂度的限制,电域处理只适用于低速和用户数较少的系统,而光域性能处理或光电混合处

理是提高接收机性能、支持多用户光码分多址系统的最有效方案。

### 3 传输实验及实验结果

图 2 是系统实验配置。误码仪伪随机序列产生单元(MP1763C)产生的 2.488 GHz 时钟信号经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,脉宽约为 20 ps,其中心波长为 1545.52 nm。MP1763C 产生的  $2^{31}-1$  的伪随机数据经驱动放大后,通过强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,送入 63 位等效相移超结构光纤光栅编码器(编码器反射谱和最佳条件下的解码波形见图 1)。编码信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后送入 60 km G.652 光纤传输并在解码前实施色散补偿。解码信号经光放大后,由 10 GHz 带宽的光电接收组件实施光电转换,经门限可调整的时钟数据恢复(CDR)模块实施数据恢复和时钟提取,送入误码仪(MP1764C)测试误码。应用光采样示波器 Lecroy NR9000(具备 30 GHz 带宽光探测器和 20 GHz 带宽电检测器)在图 2 所示的 A-E 观测点上监测波形和眼图。

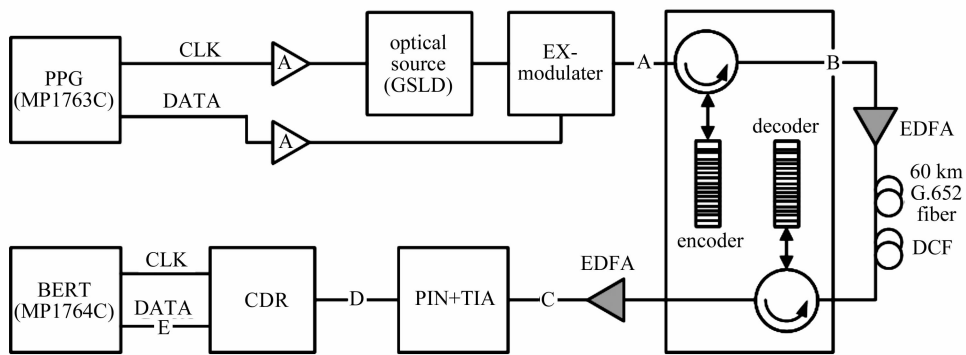


图 2 传输实验框图

Fig. 2 Experimental setup

图 3(a)所示的是经过调制的窄脉冲数据,其半峰全宽(FWHM)约为 20 ps,对应约 0.65 nm 的 3 dB 带宽。编码信号和眼图如图 3(b)所示,码片宽度约为 200 ps,对应约 2 cm 的编码器长度和约 300 Gchip/s 的码片速率,由于码片长度小于码元周期,因此可以消除码间串扰的影响。解码信号及其眼图如图 3(c)所示,解码信号的半峰全宽仍为 20 ps,与图 1(b)所示的仿真解码信号相比,  $P/W$  由 26.88 降低到 6。这主要是由于编码效率低(光源谱宽 0.65 nm 而编码带宽需要 2.2 nm)和增益开关激光器的频率/相位啁啾所致。解码信号经窄带光电转换后的信号波形和眼图如图 3(d)所示,图中可

以明显看出窄带接收所导致的性能劣化,  $P/W$  由 6 降低到 3 左右。经时钟数据恢复模块恢复的非归零(NRZ)码波形和眼图如图 3(e)所示,该信号与恢复时钟一起送入误码仪检测传输系统误码。

图 4 是该传输系统的误码曲线,误码率为  $10^{-9}$  时的灵敏度为 -22.5 dBm。与无编解码器的窄脉冲传输实验相比,该传输系统增加了约 1.7 dB 的编解码功率代价。与背靠背的编解码实验相比,该传输系统增加了约 1.1 dB 的传输功率代价,这主要是由于色散残留、偏振模色散及掺铒光纤放大器噪声累积引起。

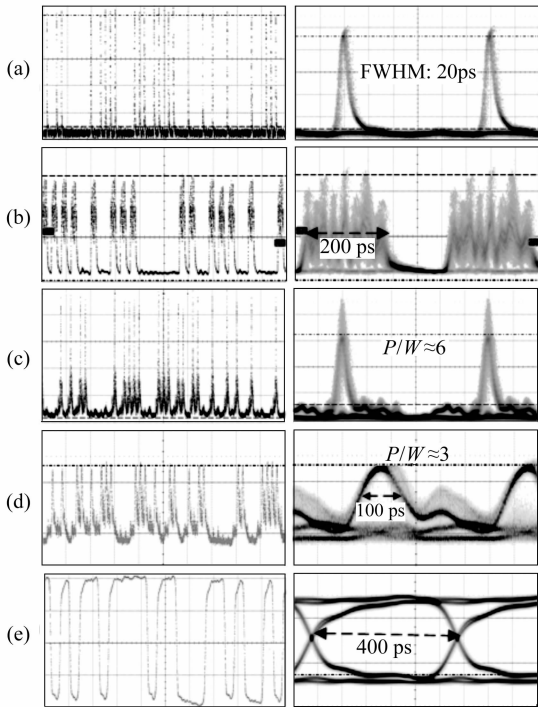


图 3 观测点的波形和眼图。(a) 已调信号；(b) 编码信号；(c) 解码信号；(d) 光电转换输出；(e) 时钟数据恢复输出数据

Fig. 3 Waveforms at measurement points. (a) modulated signal; (b) encoded signal; (c) decoded signal; (d) narrowband detector output; (e) CDR recovered data

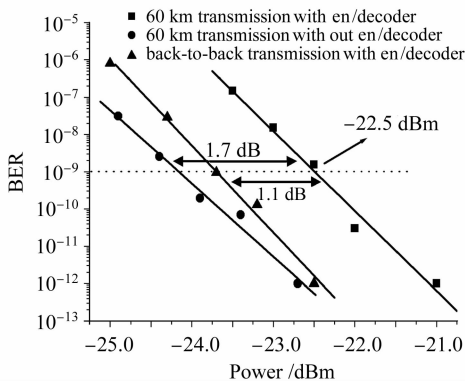


图 4 误码曲线

Fig. 4 BER curves

效相移超结构光纤光栅编解码器,增益开关脉冲光源和门限可调整的窄带接收机实现了 2.5 Gbit/s, 60 km 无误码传输。实验证明,基于自行设计制作的等效相移超结构光纤光栅编解码器可以满足光码分多址传输系统要求,利用增益开关光源和采用电域处理技术的窄带接收机满足用户较少的系统应用;如果改进光源和编解码器的设计以达到相互匹配的要求,采用长码长的编解码器,利用光域门限技术提高接收机的性能则可以使系统支持多用户和更长的传输距离。

致谢 感谢北京邮电大学伍剑教授提供增益开关脉冲源。

### 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 X. Wang, N. Wada, Tetsuya Miyazaki *et al.*. Field trial of 3-WDM×10-OCDMA×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- and 320 Gb/s SPECTS O-CDMA network testbeds [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
- 5 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
- 6 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
- 7 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, Shizhong Xie *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 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Yu Yao *et al.*. 511-chip, 500 Gchip/s OCDMA en/decoders based on equivalent phase-shift method [C]. OFC2006, OFF2
- 10 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Yejin Zhang *et al.*. Phase-error-free, 1023-chip OCDMA en/de-coders based on reconstruction-equivalent-chirp technology and error-correction method [C]. OFC2007, JWA28
- 11 H. Sotobayashi, W. Chujo, K. Kitayama. Highly spectral-efficient optical code-division multiplexing transmission system [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(2):250~258

## 4 结 论

利用 63 位码长,码片速率为 300 Gchip/s 的等