

文章编号: 0253-2239(2006)01-0029-5

40 Gb/s 超短光脉冲序列的四相编解码实验研究*

陈小刚 元秀华** 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 采用 3 码片的超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)作为编/解码器,该编/解码器光栅包含 3 段子光栅(空间码片),在相邻的空间码片的边界处存在离散的四相相移($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)。利用四相编解码所具有的良好自相关和互相关特性,成功实现了单信道速率高达 40 Gb/s,码片速率高达 240 Gchip/s 的全光编解码实验。据我们所知,这是利用光纤布拉格光栅作为编/解码器的全光码分复用(OCDM)系统所达到的最高单信道传输速率。理论计算和实验结果表明了利用超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)实现多相高速全光编解码的可行性。这样高速的全光编解码可以应用于光码分复用系统和分组交换网络。

关键词: 光纤通信技术; 光码分复用; 编/解码器; 超结构光纤布拉格光栅; 全光编解码

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Quaternary Phase Encoding and Decoding of Ultrashort Pulses at 40 Gb/s

Chen Xiaogang Yuan Xiuhua Huang Dexiu

(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Encoders and decoders using 3-chip superstructured fiber Bragg gratings(SSFBGs) are designed, in which every encoder/decoder grating consists of three subgratings. The grating has a uniform amplitude refractive index level along its length, in which discrete ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) jumps in phase are written into the grating at the boundaries of adjacent spatial chips. Quaternary encoding and uncoding can provide codes with desirable auto and cross-correlation characteristics with which the three-chip, 240-Gchip/s all optical encoding and decoding is achieved. As much as we know, this is the highest single channel rate obtained from fiber Bragg grating (FBG) based OCDM system. The agreement between experimental and calculated results indicates the feasibility of multi-phase all optical encoding and decoding using SSFBG. And such all optical encoding and decoding is required in optical code division multiplexing (OCDM) systems and packet-switched networks.

Key words: optical fiber communication technology; optical code division multiplexing; encoder/decoder; superstructured fiber Bragg grating; all-optical encoding and decoding

1 引 言

近年来因特网的爆炸性增长对光传输系统和网络的容量及功能提出了越来越高的要求。波分复用(WDM)技术极大地提高了通信容量。同时光码分复用(OCDM)技术被认为是进一步提高通信容量的有效手段而受到越来越广泛的重视。相对于波分复用等复用技术,光码分复用具有随机接入,异步传输和保密性强,组网灵活,协议简单,可高速光处理等

特点^[1,2]。

光码分复用的核心问题是全光编解码过程的实现,到目前为止,有多种实现光编解码的方案:1)光纤延时线阵列^[3],2)平面光波回路(PLCs)^[4],3)阵列波导光栅^[5]以及基于光纤布拉格光栅(FBGs)的全光编解码器件^[6~8]。以上方案中只有平面光波回路通过实验验证可实现高达 40 Gbit/s 单信道速率通信,但其价格较高,结构也不够紧凑,体积大。近

* 国家 863 计划(2002AA122035)资助课题。

作者简介: 陈小刚(1976~),男,湖北江夏人,华中科技大学光电子工程系博士研究生,主要从事高速光通信及光码分多址等方面的研究。E-mail: cxg826@yahoo.com.cn

** 通信联系人。E-mail: yuanxh@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-02-21; 收到修改稿日期: 2005-05-10

年来,由于超结构光纤布拉格光栅能实现性能良好的编解码过程,以及其潜在的低价格,结构紧凑而倍受青睐^[9]。另外,利用四相编解码所具有的良好自相关和互相关特性^[10],可以使全光码分复用系统的性能得到进一步优化。

本文设计并制作了 3 码片的超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)作为光编/解码器,同时采用四相编解码方案,成功实现了单信道速率高达 40 Gb/s 的全光编解码实验。

2 理论分析

在时域直接扩频光码分复用(DS-OCDM)系统中,每个信号数据比特经扩频为包含 N 个二进制码片的码字序列传输,码片速率 C 和数据传输速率 B 之间满足 $B \leq C/N$ 的关系,这样的码字序列可以由取样光栅产生。

超结构光纤布拉格光栅就是一种取样光栅结构,它只是在快速周期变化的均匀折射率调制的基础上另外加入了沿光栅长度方向缓慢变化的相位或振幅周期调制(即超结构),相当于形成了一些相位或振幅不同的子光栅,故称之为超结构光纤布拉格光栅。在弱光栅条件限制即反射率小于 20% 情况下,满足布拉格条件波长 $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 的光将穿透整个光栅长度,其中 n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率, Λ 为光栅周期。光栅的每一部分对入射光的反射作用大致相同,其脉冲响应波形与该光栅的折射率调制的空间结构一致^[9,11]。例如长为 L 的均匀光纤光栅的脉冲响应为脉宽 $2nL/c$ 的矩形脉冲, n 为光栅的折射率, c 为真空中的光速。因此光码分复用的码字信息能直接写入超结构光纤布拉格光栅。

解码基于光域的匹配滤波,解码器实质就是一个匹配滤波器,其传输特性 $H_d(\omega)$ 是编码器频域响应 $H_e(\omega)$ 的复共轭,而冲激响应 $h_d(t)$ 是编码器冲激响应 $h_e(t)$ 的镜像在时间上的平移:

$$H_d(\omega) = H_e^*(\omega)\exp(-j\omega t_0), \quad (1)$$

$$h_d(t) = h_e(t_0 - t), \quad (2)$$

其中 ω, t 分别代表频率和时间。这样,解码器的输出信号 $S_d(t)$ 为编码器和解码器的冲激响应的卷积,即

$$S_d(t) = h_e(t) * h_d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_e(t-\tau)h_d(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h_e(t-\tau)h_e(t_0-\tau)d\tau = R(t-t_0), \quad (3)$$

$R(t)$ 代表编码器冲激响应 $h_e(t)$ 的自相关函数,由(3)式可见,匹配滤波器实质是一个相关器。

因此在光码分复用系统中,脉冲经编码器编码后,经相应解码器解码,要想获得自相关(峰)输出,则光码分复用编、解码器必须匹配,即编码器与解码器的传输函数互为复共轭,冲激响应互为镜像。否则解码器输出的是互相关函数。

在光码分复用通信系统中,为了尽量减少其它用户的干扰,获得较高的信噪比,不同用户的地址码序列之间应有良好的自相关和互相关特性。而相对于常用的双极性光编码,四相光编码具有更好的自相关和互相关特性。

3 光码分复用编 / 解码器设计

四相相移的超结构光纤布拉格光栅编解码器分别用 Q_1, Q_2 和 Q_1^* 表示,下标 1,2 表示某一特定的码,而右上角标 * 表示相应的空间反转的匹配滤波器。图 1(a)给出了编码光栅 $Q_1(0, \pi/2, 0)$ 和 $Q_2(0, 0, \pi)$ 的空间相移超结构。该超结构光纤布拉格光栅是弱的布拉格光栅(典型反射率 $R < 20\%$),具有均匀的折射率调制振幅,但在相邻的空间码片(子光栅)的边界处存在离散的四相相移 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 。每个编解码器光栅包含三个码片(子光栅)总长 1.29 mm,单个码片(子光栅)长度为 0.43 mm,这分别对应于整个码的周期为 12.6 ps,单个码片的周期为 4.2 ps。解码器 $Q_1^*(0, 3\pi/2, 0)$ 实际就相当于一个匹配滤波器,是用来识别编码序列的。在输入光为 1.3 ps 的双曲正割脉冲情况下,理论计算得到的编解码器匹配 ($Q_1 : Q_1^*$) 时的自相关输出及不匹配 ($Q_2 : Q_1^*$) 时的互相关输出如图 1(b)所示。注意到相关输出的时域宽度是整个编码周期的 2 倍约为 25 ps,正好和 40 G 信号的比特周期相当,这样刚好可以避免信号比特之间的干扰。

图 2 分别给出了编码器光栅 Q_1 和 Q_2 的实验所得反射谱,峰值反射率约为 12.8%,中心波长 1554.7 nm。并和理论模拟的反射谱进行了比较,两者间良好的一致性说明了使用逐点写入技术制作编解码光栅的精确性,这表明使用超结构光纤布拉格光栅实现全光编解码是完全可行的。同时为了使编码器和解码器之间实现良好的匹配,构成光编/解码器的超结构光纤光栅是应力可调的,这样可以使编码器光栅和解码器光栅的工作波长达到一致。

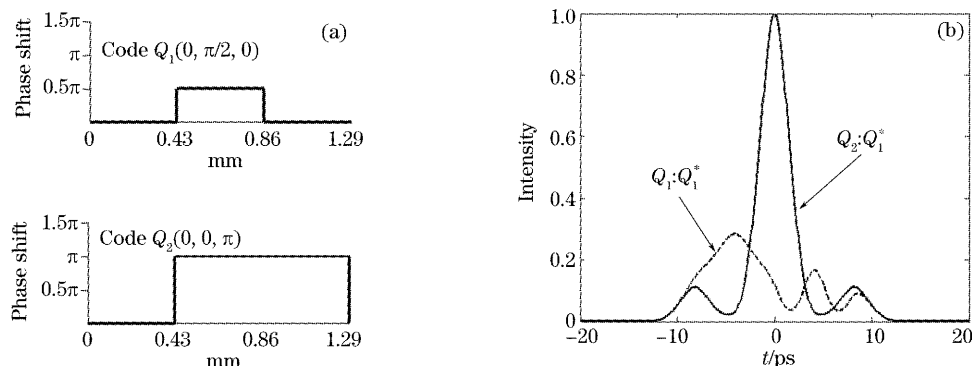


图 1 (a) 四相编码光栅 Q_1 和 Q_2 的空间相移超结构, (b) 输入信号为 1.3 ps 脉冲序列时模拟所得的解码输出信号波形

Fig. 1 (a) Phase-shift profile of the quaternary phase encoder grating Q_1 and Q_2 , (b) calculated traces of the decoded signals for 1.3 ps input pulses

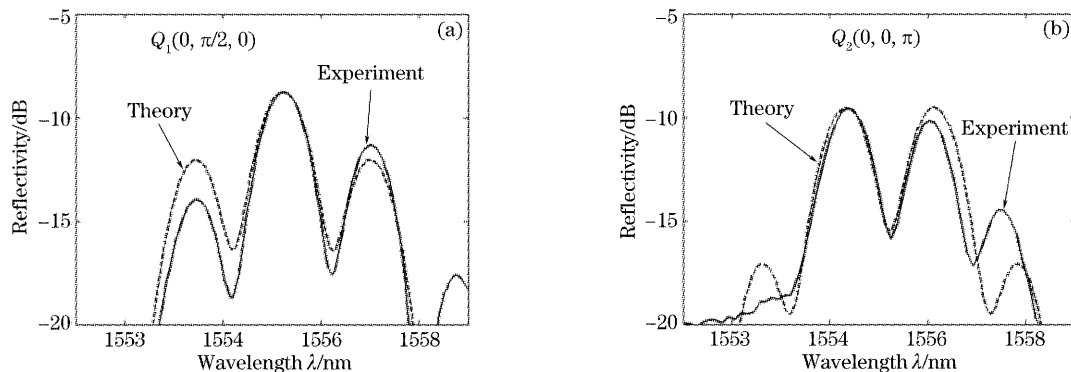


图 2 编码光栅的码字及其反射谱(a) Q_1 和(b) Q_2

Fig. 2 Spectral reflectivity profiles and phase encoded with 3-chip codes of encoder grating (a) Q_1 and (b) Q_2

4 实验原理及装置

实验装置如图 3 所示,包括一个 40 GHz 的波长可调主动锁模激光器 (MLLD), 铌酸锂调制器 (EOM) 和一对级联的超结构光纤布拉格光栅编/解码器。锁模激光器产生 40 GHz, 1.3 ps 的脉冲序列(中心波长

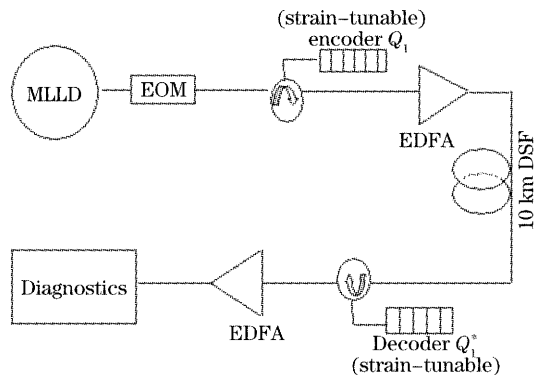


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup. MLLD: mode-locked laser diode, EOM: electrooptic modulator, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, DSF: dispersion shift fiber

为 1554.72 nm)。该脉冲流经调制后通过环形器 C 被编码器光栅反射后形成编码信号进入传输光纤, 实验中用到的传输光纤为 10km 的色散位移光纤 (DSF), 该光纤总的传输损耗为 2.3 dB, 零色散波长为 1554.5 nm, 色散斜率为 0.073 ps/nm²/km。如果用普通的标准单模光纤 (SMF) 传输, 则需要进行相应的色散补偿^[9]。编码信号经传输后再经掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行信号放大, 然后通过环形器 C 进入解码器光栅 Q_1^* 后得到光解码输出信号。解码器 Q_1^* 的输出光解码信号可分别用高速 PD/Scope (~55 GHz 带宽) 和自相关仪 (Autocorrelator) (resolution < 100 fs) 来加以观测和分析。实验中用到带有光模块的通信分析仪为 Tektronix CSA8000B, 自相关仪为 APE Auto Correlator。

5 实验结果及分析

图 4(b) 给出了编码脉冲的波形轨迹, 由高速探测器和数字取样光示波器(带宽: ~55 GHz) 测量所

得。显然,由于采用平方律探测不可能得到编码脉冲的相位特征,但是可以观测到初始光源输出脉冲[图 4(a)]经编码整形后脉冲宽度和所设计的整个码的周期相当,可是由于光示波器的带宽限制不能分辨出编码脉冲每个码片。图 4(c)给出了编码器与解码器匹配时($Q_1:Q_1^*$)解码输出脉冲的波形轨迹,与图 4(a)相比较,可以看到一个清楚的超短脉冲序列重新形成。图 4(d)给出了当编码器和解码器不匹配时($Q_2:Q_1^*$)解码输出脉冲的波形,可以看到无法重新形成超短脉冲序列。

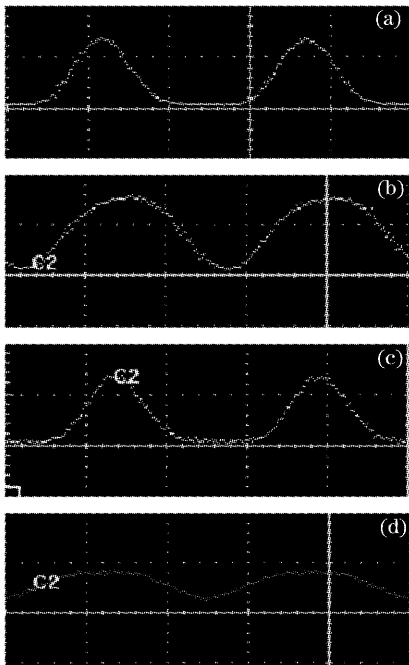


图 4 信号的示波器轨迹。(a) 1.3 ps 输入脉冲序列, (b) 编码脉冲序列, (c) 匹配解码输出脉冲序列($Q_1:Q_1^*$), (d) 不匹配解码输出脉冲序列($Q_2:Q_1^*$)

Fig. 4 Oscilloscope traces of (a) incoming 1.3 ps pulse stream, (b) encoded pulse, (c) decoded pulse (matched case; $Q_1:Q_1^*$), and (d) decode pulses (unmatched case; $Q_2:Q_1^*$) (detection bandwidth: ~ 55 GHz, 10 ps/div)

同时也用自相关仪对编码器与解码器匹配时($Q_1:Q_1^*$)解码输出脉冲的强度自相关函数进行了测量,图 5 给出了测量结果并和理论计算的结果进行了比较,两者之间具有良好的一致性。实验测得的 $Q_1:Q_1^*$ 编解码输出脉冲的强度自相关曲线宽度为 5.1 ps,而理论计算得到的强度自相关曲线宽度为 4.8 ps。理论分析表明,当编/解码光栅相互匹配时,解码输出信号的强度相关函数曲线将会有单个明显的相关峰出现,并且相关峰宽度和码片周期 4.2 ps 相近。同时实验结果验证了利用 3 码片超结

构光纤布拉格光栅进行编解码的有效性。

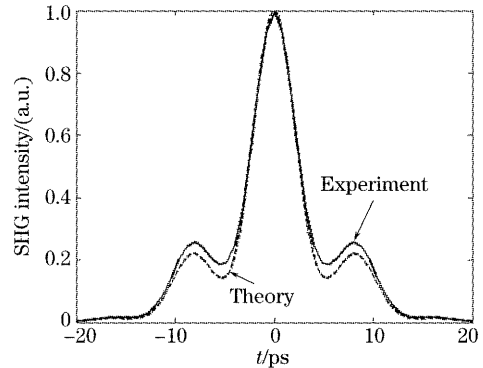


图 5 编码器和解码器互相匹配时($Q_1:Q_1^*$)解码输出信号的强度(二次谐波)自相关迹

Fig. 5 Intensity (SHG) autocorrelation traces of the output decoded signal. (matched case; $Q_1:Q_1^*$)

6 结 论

采用超结构光纤布拉格光栅作为编解码器,并利用具有良好自相关和互相关特性的四相编解码方案,成功实现了信道速率高达 40 Gb/s 的全光编解码。并将理论计算和实验结果进行了比较,两者之间具有良好的一致性。我们的结果表明了利用超结构光纤布拉格光栅不仅可以实现光码分复用,而且可以应用于光脉冲整形类的全光信号处理。

致谢 感谢清华大学电子工程系宽带光网络中心的陈向飞和戴一堂等为制作光纤光栅提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 Kitayama K., H. Sotobayashi, Wana N. Optical code division multiplexing (OCDM) and its application to photonic networks [J]. *IEICE Trans. Fundam.*, 1999, **E82-A**(12): 2616~2626
- 2 Zuo Chao, Ma Wenhua, Gao Yiran *et al.*. Experimental research on optical code division multiplex access system based on spectral slicing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 41~44 (in Chinese) 左超,马文华,高屹然等. 基于频谱分割的码分多址接入系统实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 41~44
- 3 Jackson K. P., Newton S. A., Moslehi B. *et al.*. Optical fiber delay-line signal processing[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1985, **33**: 193~209
- 4 Wana N., Kitayama K.. A 10 Gb/s optical code division multiplexing using 8-chip optical bipolar code and coherent detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1758~1765
- 5 Tsuda H., Takenouchi H., Ishii T. *et al.*. Spectral encoding and decoding of 10 Gb/s femtosecond pulses using high resolution arrayed-waveguide grating[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1186~1187
- 6 Jepson A. J., Johnson A., Maniloff E. *et al.*. Spectral phase encoding and decoding using fiber Bragg grating [C]. *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC '99)*, 1999.

- PD33-1-3
- 7 Tech P. C. , Petropoulos P. , Ibsen M. *et al.*. The generation, recognition and recoding of 64-bit, 160 Gb/s optical code sequences using superstructured fiber Bragg gratings[C]. *Proc. Optoelectronics & Communication Conference (OECC '2000)*, 2000. PD1-3
- 8 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 (in Chinese)
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研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 961~964
- 9 Tech 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]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9): 1352~1365
- 10 Boztas S. , Hammons R. , Kumar P. V. . 4-phase sequences with near-optimum correlation properties [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1992, **38**(3): 1101~1113
- 11 Geiger H. , Fu A. , Petropoulos P. *et al.*. Demonstration of a simple CDMA transmitter and receiver using sampled fiber gratings[C]. *Technol. Proc. ECOC '98*, 1998, **1**: 337~338