

文章编号: 0258-7025(2008)01-0077-05

基于超连续谱和超结构光纤光栅的 波分复用/光码分复用系统

陈小刚¹ 黄德修² 元秀华² 夏 舸²

(¹ 三峡大学理学院, 湖北 宜昌 443002
² 武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 实验验证了基于超连续谱(SC)和超结构光纤光栅(SSFBG)的波分复用/光码分复用(WDM/OCDM)混合系统,超结构光纤光栅实现了对超连续谱光源的双波段同时相位编解码。由于波分复用/光码分复用系统中信道间干涉和噪声的影响,解码输出脉冲的信号波形出现劣化,自相关曲线旁瓣明显增大,自相关峰展宽至8.2 ps。在非线性放大环境(NALM)的阈值判决作用下,解码输出脉冲的信号波形质量有了明显的改善,自相关峰宽度压缩至4.8 ps,较好地抑制了自相关曲线的旁瓣和噪声。实验中非线性放大环境的输入信号峰值功率约为8 mW。

关键词 光通信;光码分复用;超连续谱;超结构光纤布拉格光栅;非线性放大环境

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Wavelength Division Multiplexing/Optical Code Division Multiplexing System Based on Supercontinuum and Superstructured Fiber Bragg Grating

Chen Xiaogang¹ Huang Dexiu² Yuan Xiuhua² Xia Ge²

(¹College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)
(²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing (WDM/OCDM) system based on supercontinuum (SC) and superstructured fiber Bragg grating (SSFBG) is experimentally demonstrated, simultaneous dual-wavelength optical encoding of a single supercontinuum source using SSFBG is achieved. Under the impact of the interchannel interference and noise of the WDM/OCDM system, the degradation of the pulse waveform is obvious, the width of the main peak is broadened to 8.2 ps and the sidelobe of the auto-correlation trace is increasing apparently. In the receiver, a nonlinear amplifying loop mirror (NALM) is introduced to improve the system performance, both the sidelobe and the pedestal are reduced, the waveform quality of decoded output signal is enhanced, and the auto-correlation peak of decoded output pulse is compressed to 4.8 ps. The peak power of the input signal in the NALM is about 8 mW.

Key words optical communication; optical code division multiplexing; supercontinuum; superstructured fiber Bragg grating; nonlinear amplifying loop mirror

1 引 言

波分复用(WDM)将光纤频谱分成不同的波长,而光码分复用(OCDM)是将光纤频谱划分成不同的码。波分复用的扩容要求单信道速率越来越高、信道间隔越来越窄、整个频谱越来越宽;而光码分复用的扩容只需能有越来越多互相正交的地址码序列就可以实现。在高速系统中采用多种复用技

术,可以提高系统资源利用率,弥补单一波分复用系统的不足^[1,2]。H. Sotobayashi等^[3]实现了基于超连续谱(SC)和平面光波回路(PLC)的波分复用/光码分复用系统,但是平面光波回路光编/解码器插入损耗大、器件成本高、体积大,并且和光纤系统兼容性也不够好。P. C. Teh等^[4]实验演示了4信道的基于超结构光纤光栅(SSFBG)的波分复用/光码分

收稿日期:2007-05-21;收到修改稿日期:2007-07-05

作者简介:陈小刚(1976—),男,湖北人,三峡大学讲师,博士,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;cxg826@sohu.com

复用系统,其中波分复用光源由一个锁模激光器(MLLD)和一个波长变换器产生。不过在该方案中编码光栅只能对分离的光源进行单波段的相位编码,因此需要4个编码光栅来实现2波分复用×2光码分复用实验。

本文对基于超连续谱^[5,6]和超结构光纤光栅^[7~9]的波分复用/光码分复用混合系统进行了实验验证。采用“等效相移”方法^[10]制作的2个超结构光纤光栅可以对超连续谱光源同时进行双波段相位编解码。另外,在接收端引入了非线性放大环境(NALM)^[11,12]来抑制波分复用/光码分复用系统中信道间的干涉和噪声。

2 超连续谱技术

目前,波分复用系统使用的成熟光源是不同波长的多个分离的半导体激光二极管,但随着信道数的增加,使系统出现了可靠性、成本等问题,而超连续谱超短光脉冲源能在很宽的光谱范围内同时产生超短光脉冲,所以它将在未来的密集波分复用(DWDM)系统中扮演重要角色^[5]。

超连续谱的产生是指强度较高的超短光脉冲在通过非线性介质后,其光谱中产生许多新的频率成分,光谱的宽度远大于入射光的光谱宽。自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、受激拉曼散射(SRS)和四波混频(FWM)等非线性效应均可导致光谱的展宽。利用对超连续谱进行频谱切割的方法,可以从中提取出任意线宽的多个中心波长短脉冲,实现脉冲光源的多波长扩展。

超短光脉冲超连续谱产生的实验装置图如图1所示。波长可调谐的锁模光纤激光器产生40 GHz, 1.3 ps的脉冲序列,经500 mW(约27 dBm)饱和输出功率的高功率掺铒光纤放大器(EDFA)放大,脉冲峰值功率增大到约9 W。再利用脉冲在具有大的正常色散值的高非线性光纤(HNLF)传播时的自相位调制效应来产生超连续谱。实验中用到的超连续谱光纤由三段构成:脉冲首先通过100 m的高非线性光纤,得到光谱展宽的线性正啁啾超连续谱脉冲,然后经过70 m的标准单模光纤(SMF)进行啁啾补

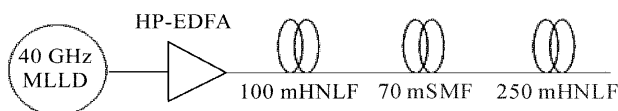


图1 超连续谱产生的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of supercontinuum generation

偿压缩,以再次提高脉冲的峰值功率,最后进入250 m的高非线性光纤实现脉冲光谱的进一步展宽。高非线性光纤参数为:非线性系数 $\gamma = 21.3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 1.55 μm 处损耗为0.53 dB/km,色散系数为 $12 \text{ ps}^2/\text{km}$,色散斜率为 $0.012 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ (在1550 nm波段)。

实验测得的40 GHz超短脉冲光源的光谱如图2所示,其光谱包络的10 dB带宽约为5.04 nm。产生

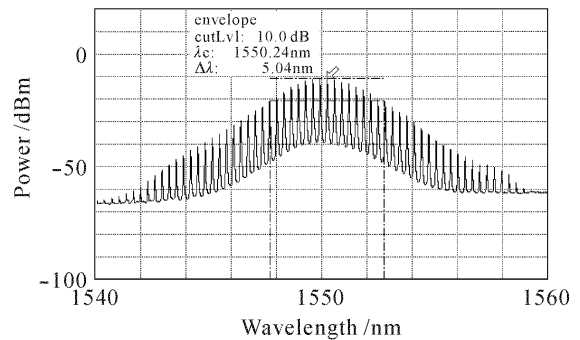


图2 40 GHz超短脉冲光源光谱形状

Fig. 2 Spectrum of 40 GHz ultrashort pulse source

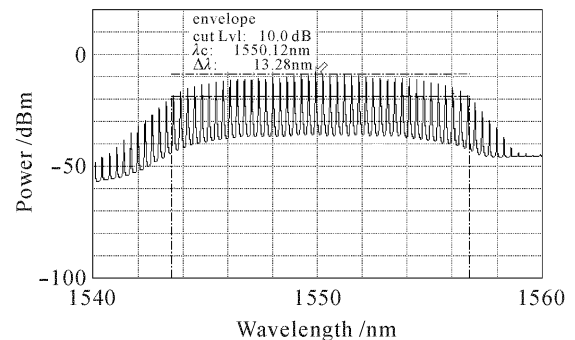


图3 脉冲传输100 m高非线性光纤+70 m单模光纤+250 m高非线性光纤后的光谱形状

Fig. 3 Spectrum after transmission fiber (100 m HNLF+70 m SMF+250 m HNLF)

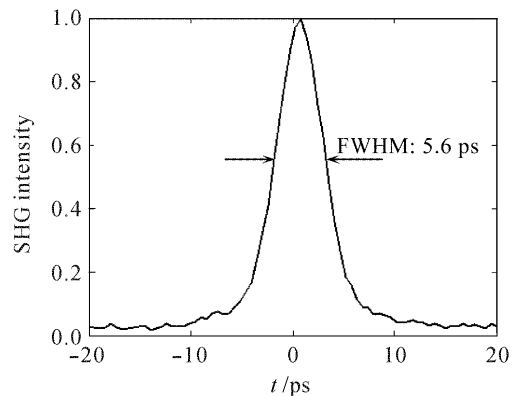


图4 超连续谱滤波输出脉冲的自相关迹

Fig. 4 Autocorrelation trace of output pulse filter out from SC source

的超连续谱如图 3 所示^[6],其光谱包络的 10 dB 带宽大约展宽为 13.28 nm。由图可知,所展光谱都具有良好的平滑性和相干性,可作为波分复用的宽带相干光源。

为了分析超连续谱光源的时域特性,利用二次谐波(SHG)自相关仪测量了超连续谱光源经过 1.6 nm 的可调滤波器后输出脉冲的自相关迹,如图 4 所示。可以看到超连续谱光源经滤波后输出清楚的单个脉冲,输出脉冲自相关迹的半峰全宽(FWHM)为 5.6 ps。

3 波分复用/光码分复用混合系统实验验证

3.1 光码分复用编/解码器设计

相移超结构光纤光栅编码光栅 Q_1 ($\pi, 0, 0, \pi, 0, \pi, \pi$) 和 Q_2 ($\pi/2, \pi/2, 0, 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) 是弱的布拉格光栅 (typical reflectivity $< 20\%$), 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 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$), 解码光栅 Q_1^* , Q_2^* 表示相应的空间反转的匹配滤波器。每个编解码器光栅包含 7 个码片(子光栅), 总长 2.59 mm, 单个码片(子光栅)长度为 0.37 mm, 这分别对应于整个码的周期为 25.1 ps, 单个码片周期为 3.6 ps。实验中用到的超结构光纤光栅编解码器是采用“等效相移”方法制作而成的,通过简单改变取样布拉格光栅(SBG)的取样周期就可以得到对应于一阶 ($m = \pm 1$) 信道的相移。图 5 给出了编码光栅 Q_1 的实验所得反射谱,其中 1552~1556 nm 波段的反射谱对应于取样布拉格光栅的负一阶 ($m = -1$) 信道,而 1543~1547 nm 波段的反射谱对应于取样布拉格光栅的正一阶 ($m = 1$) 信道,可以看到这两个波段的反射谱是大致相同的。由图 3 和图 5 可以

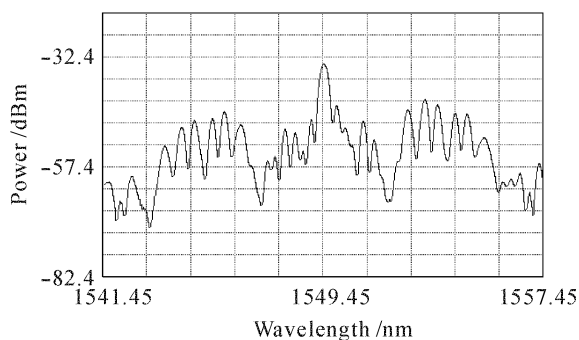


图 5 编码光栅 Q_1 的反射谱

Fig. 5 Spectral reflectivity profiles of encoder gratings Q_1

看到,超结构光纤光栅能同时对超连续谱光源的两个波段进行相位编解码。

3.2 实验系统

基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用混合系统实验系统如图 6 所示。本系统以 40 GHz 的锁模激光器作为超短脉冲光源,超短脉冲序列经过高功率掺铒光纤放大器(HP-EDFA)后再通过 100 m 高非线性光纤 + 70 m 单模光纤 + 250 m 高非线性光纤组成的光纤实现了超连续谱的 C 波段光谱展宽,并将它用作波分复用系统的光源,再经过编码光栅 Q_1 和 Q_2 产生两路光码分复用编码信号。在接收端,分别采用解码光栅 Q_1^* 和 4 nm 的光滤波器(OBPF)对复用的波分复用/光码分复用信号进行码域和波长域的分离。另外采用非线性放大环境对解码滤波输出的光脉冲进行整形、抑制旁瓣和基座噪声。非线性放大环境由 135 m 的低色散值高非线性光纤(在 1550 nm 波段非线性系数 γ 为 $20 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,色散 D 为 $-0.07 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,色散斜率为 $+0.031 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,损耗系数 α_{dB} 为 $0.51 \text{ dB}/\text{km}$)、放大器、偏振控制器和 50:50 耦合器构成。非线性放大环境中的放大器为双向掺铒光纤放大器,该放大器的饱和输出功率约 15 mW,实验中非线性放大环境的输入脉冲的峰值功率约 8 mW。最后用通信分析仪(高速光探测器/示波器)和自相关仪对输出信号脉冲进行测量和分析,在系统链路中用光放大器来补偿损耗。

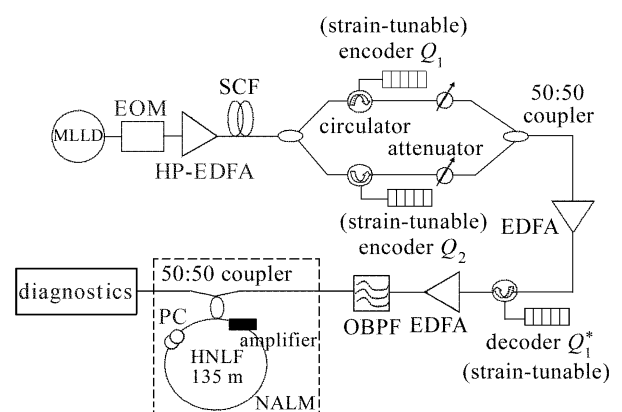


图 6 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用系统实验图

Fig. 6 Experimental setup of WDM/OCMDM system based on supercontinuum and SSFBG

3.3 实验结果与分析

进行了基于超连续谱和 7-chip 超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用混合系统实验,利用高速探测器和数字取样光示波器(带宽约为 65 GHz)测

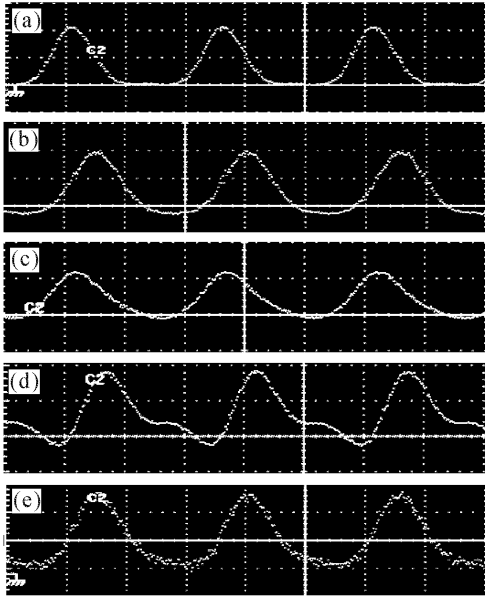


图 7 信号的示波器轨迹。(a) 1.3 ps 输入脉冲序列;(b) 超连续谱滤波输出信号;(c) 单信道时解码滤波输出 ($Q_1 : Q_1^*$); (d) 2 信道时解码滤波输出 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$); (e) 经过非线性放大环境后的解码滤波输出信号 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$)

Fig. 7 Oscilloscope traces. (a) incoming 1.3 ps pulse stream; (b) filtered SC pulse; (c) decoded pulse ($Q_1 : Q_1^*$); (d) decode pulses ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) before the NALM; (e) decode pulses ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) after the NALM

量了脉冲信号的波形轨迹,如图 7 所示。图 7(b)给出了超连续谱经滤波后输出信号的波形轨迹,可以看到波形对称且无基座噪声的初始输入脉冲(图 7(a))在超连续谱的作用下其滤波输出脉冲出现了较小的基座噪声。图 7(c)给出了超连续谱产生的波分复用光源经单信道编解码 ($Q_1 : Q_1^*$) 时其滤波输出信号的波形轨迹,可以看到一个超短脉冲序列重新形成,不过信号波形不再对称且有基座噪声,这是由于波分复用信道间的串扰引起的。图 7(d)给出了超连续谱产生的波分复用光源经两信道编解码 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) 时其滤波输出信号的波形轨迹,和图 7(c)比较可以清楚地看到输出信号波形出现明显畸变同时基座噪声增大,这是由于光码分复用信道间的串扰引起的系统性能下降。图 7(e)给出了超连续谱产生的波分复用光源经两信道编解码 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) 时其滤波输出再通过非线性放大环境阈值判决后的波形轨迹,比较图 7(e)和图 7(d)可以看到,解码输出脉冲经过非线性放大环境后信号波形质量有了明显的改善,波形轨迹重新对称且基座噪声明显减小。图 7(e)说明非线性放大环境能够很好地

抑制波分复用/光码分复用系统中信道间干涉和噪声的影响。

同时也用自相关仪测量了超连续谱产生的波分复用光源经两信道编解码 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) 时其滤波输出脉冲的强度自相关函数,如图 8 所示。由于波分复用/光码分复用系统中信道间干涉和噪声的影响,自相关峰的宽度展宽为 8.2 ps,并且自相关曲线旁瓣非常明显。图 8 也给出了超连续谱产生的波分复用光源经两信道编解码 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) 时其滤波输出再通过非线性放大环境后的自相关曲线,可以清楚地看到,在非线性放大环境的阈值判决作用下,自相关峰的宽度由 8.2 ps 压缩至 4.8 ps,并且自相关曲线的旁瓣也得到了很好的抑制。

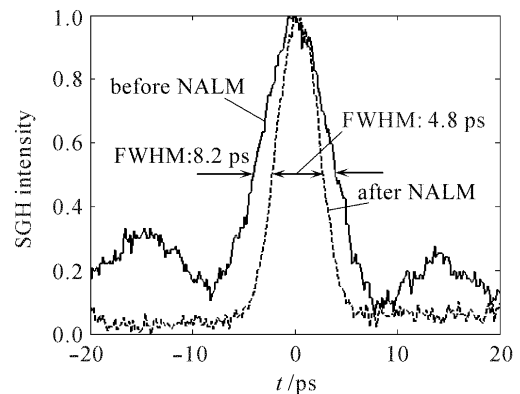


图 8 超连续谱作光源时 2 信道 ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) 解码信号的强度自相关迹

Fig. 8 Measured intensity autocorrelation of the decoded signals under 2-channel operation ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$)

4 结 论

利用脉冲在具有正常色散值的高非线性光纤传播时的自相位调制效应产生超连续谱,该超连续谱光源经滤波后能输出清楚的单个脉冲。实验验证了基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用混合系统,利用“等效相移”方法制作的超结构光纤光栅实现了对超连续谱光源的双波段同时相位编解码。实验结果表明,由于波分复用/光码分复用系统中信道间干涉和噪声的影响,解码滤波输出脉冲的信号波形出现劣化,自相关峰展宽并且旁瓣明显增大。在较低的输入脉冲峰值功率(10 mW 量级)条件下,非线性放大环境能对解码滤波输出的光脉冲进行整形、抑制旁瓣和基座噪声,进而提高系统性能。

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协助制作光纤光栅。

参 考 文 献

- 1 T. Pfeiffer, J. Kissing, J. P. Elbers *et al.*. Coarse WDM/CDM/TDM concept for optical packet transmission in metropolitan and access networks supporting 400 channels at 2.5 Gb/s peak rate [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(12):1928~1933
- 2 S. Shen, A. M. Weiner. Suppression of WDM interference for error-free detection of ultrashort-pulse CDMA signals in spectrally overlaid hybrid WDM-CDMA operation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(1):82~84
- 3 H. Sotobayashi, W. Chujo, K. Kitayama. 1.52 Tbit/s OCDM/WDM (4OCDM \times 19WDM \times 20 Gbit/s) transmission experiment [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(11):700~701
- 4 P. C. Teh, M. Ibsen, D. J. Richardson. Demonstration of a full-duplex bidirectional spectrally interleaved OCDMA/DWDM system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3):482~484
- 5 Jin Wei, Xu Wencheng, Chen Zhaoxi *et al.*. Effects of dispersion characteristics on supercontinuum generation in dispersion flattened-decreasing fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):6~10
金 伟,徐文成,陈昭喜 等. 色散平坦渐减光纤中色散特性对超连续谱的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):6~10
- 6 Ge Xia, Dexiu Huang, Xiaogang Chen *et al.*. Broadband 40 GHz coherent source based on supercontinuum generation in highly nonlinear fiber [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2005, **47**(1):73~76
- 7 Chen Xiaogang, Yuan Xiuhua, Huang Dexiu. Quaternary phase encoding and decoding of ultrashort pulses at 40 Gb/s [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):29~33
陈小刚,元秀华,黄德修. 40 Gb/s 超短光脉冲序列的四相编解码实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):29~33
- 8 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. 2 \times 40 Gb/s OCDM using superstructure fiber Bragg gratings en/decoder [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2):69~71
- 9 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
- 10 Y. Dai, X. Chen, D. 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
- 11 Xiaogang Chen, Dexiu Huang, Xiuhua Yuan *et al.*. Grating-based 40-Gbit/s optical code-division multiplexing system incorporating a nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(1):015006-1~015006-5
- 12 He Huiru, Yuan Xiuhua. Analysis of the characteristics of the all-optical switch based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):418~422
何慧茹,元秀华. 基于非线性放大环的全光开关特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):418~422