

文章编号: 0253-2239(2010)05-1238-07

低成本啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的优化改进

郑吉林 王荣 方涛 卢麟 蒲涛

(中国人民解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 低成本脉冲光源应用于光码分多址系统,有助于光码分多址系统的实用化进程。对实用化的啁啾脉冲光源应用于光码分多址系统进行了优化改进。研究啁啾脉冲光源本身啁啾的消除即压缩啁啾脉冲对编解码性能的提升作用。针对通常实用的啁啾脉冲光源的谱宽相对较窄而不能充分覆盖编解码频谱的现实,研究利用编解码器频谱的半边带进行编解码以改善解码性能的效果。仿真和实测数据表明,对啁啾脉冲进行消啁啾、压缩脉宽有助于提高编解码性能;利用编解码频谱的半边带进行编解码能够更加充分利用光源频谱,编解码性能进一步得到优化。研究结果表明消啁啾和半边带能够改进啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的有效性。

关键词 光通信;光码分多址;时域相位编解码器;增益开关激光器;啁啾;半边带

中图分类号 TN914.53 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1238

Improvement of Application of Low-Cost Chirped Optical Pulse Source in Optical Code-Division Multiple-Access System

Zheng Jilin Wang Rong Fang Tao Lu Lin Pu Tao

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

Abstract The application of low-cost optical pulse source will redound to the practical development of optical code-division multiple-access (OCDMA) system. The application of practical chirped optical pulse source in OCDMA system is improved. The effect of chirp elimination on decoding performance is investigated; The half-side bandwidth of encoding spectrum is utilized for encoding and decoding in order to improve the decoding performance in terms of the fact that the spectrum of common practical chirped pulse source is not wide enough to cover the whole encoding spectrum. The simulation and experimental measured data show that the decoding performance can be improved via chirp elimination and further optimized by the full utilization of laser source spectrum due to the half-side bandwidth encoding and decoding. The results indicate that the application of chirped optical pulse source in OCDM can be optimized and improved effectively by chirp elimination and half-side bandwidth.

Key words optical communication; optical code-division multiple-access (OCDMA); temporal phase encoder and decoder; gain-switched laser; chirp; half-side bandwidth

1 引言

光码分多址(OCDMA)作为光域一种重要的复用技术,在时间维和频率维外增加了码字维,可以在现有系统上进行拓展,提升系统的频带利用率,增大系统容量,此外还具有支持异步通信和突发业务、软切换和软容量、抗干扰和保密性好等优点^[1~5],因此

OCDMA 系统已成为未来高速全光接入网极有竞争力的方案之一。随着相关器件制造工艺的不断发展,国外的研究报道已进行了现场网络级的测试^[6~9],这预示着 OCDMA 技术已接近实用化的边缘。实用化的光源是 OCDMA 系统实用化的一个重要方面,在已有的实验报道中,二维编码通常采用

收稿日期: 2009-04-22; 收到修改稿日期: 2009-07-03

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

作者简介: 郑吉林(1982—),男,博士研究生,主要从事光码分多址技术方面的研究。E-mail: zhengjilinjs@126.com

导师简介: 王荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光电子学和光网络等方面的研究。

E-mail: wr-njice@163.com

宽谱光源,相位编码则通常采用高性能的锁模激光器。锁模激光器产生的光脉冲具有抖动低、啁啾小、接近变换极限和脉宽窄等优点,但其使用成本高,可调谐范围较小,对不同速率系统的兼容性不强。

文献[10]详细分析了光脉冲的啁啾对时域相位编解码器性能的影响,验证了啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的可行性。低成本的增益开关(G-S)半导体激光器(LD)就是这样一类啁啾脉冲光源。这种激光器具有结构紧凑、性能稳定的特点,在高速正弦电信号调制下工作在增益开关状态时即可产生超短光脉冲,且重复速率可调范围大,易于同步,将其用于 OCDMA 可大大降低系统成本,增强灵活性。以此为出发点,采用自主研发的 GS-LD,基于等效相移超结构光纤光栅(EPS-SFBG)时域相位编解码器成功进行了 2.5 Gb/s 双用户 60 km 的系统传输实验^[11]。

在前面研究的基础上,进一步研究这类实用化的啁啾脉冲光源应用于 OCDMA 系统的优化改进问题。研究啁啾脉冲光源本身啁啾的消除,即对啁啾脉冲进行压缩以后,对编解码性能的影响。文献[12]中详细报道了一种新型的基于重构等效啁啾光纤光栅的消除脉冲啁啾的方法,这种方法可以消除脉冲任意模型的频率啁啾。基于这种方法,本文研究证明了脉冲消啁啾对解码性能的提升作用。针对这种实用啁啾脉冲光源的谱宽相对较窄而不能充分覆盖编解码频谱的现实,利用编解码频谱的半边带进行编解码以改善解码的性能。联合采用上述的消啁啾和半边带两种方法将会进一步优化实用的啁啾脉冲光源在光码分多址系统中的应用,进而使光码分多址系统更具实用化。

2 啁啾消除对解码性能的提高

2.1 压缩啁啾脉冲对于提高解码性能的必要性

由于啁啾的作用展宽了脉冲的频谱范围,因而使得编码器编码带宽资源的利用率有所增加,与同等脉宽条件下不带啁啾的脉冲相比,这种啁啾展宽频谱的结果是有利于提高解码性能的^[10]。然而,与同等谱宽条件下不带啁啾的脉冲相比,啁啾脉冲的解码效果是劣化了的,原因在于啁啾脉冲的脉宽太宽也会影响解码性能。因此结论认为,只有脉宽较窄与频谱较宽这两个条件同时满足,才能获得最优的解码性能。为了更加直观理解上述结论,进行仿真分析对比。共涉及的三种比较典型的啁啾模型为线性模型、高斯模型和洛仑兹模型,并假设其包络均

为高斯型的。其数学一般表达式为

$$x(t) = \exp\left[-\frac{\ln 2}{2}\left(\frac{2t}{T_{\text{FWHM}}}\right)^2\right] \exp[j\varphi(t)],$$

式中 T_{FWHM} 为脉冲强度的半峰全宽。线性啁啾可表示为 $\delta\omega = -d\varphi/dt = Ct$, 高斯型啁啾表示为 $\delta\omega = -d\varphi/dt = Ct \exp(-t^2/8)$, 洛仑兹型啁啾表示为 $\delta\omega = -d\varphi/dt = 4Ct/(t^2 + 4)$, C 为啁啾系数。

仿真模型为:采用基于 EPS-SFBG 的时域相位编解码器,采用的码字为 63 bit 的 Gold 序列,编码带宽为 5 nm,入射光脉冲假设为线性啁啾高斯脉冲, T_{FWHM} 为 ΔT ,脉冲功率谱的 20 dB 带宽为 $\Delta\Omega$ 。自相关峰瓣比(PWR)和自互相关峰值比(PCR)作为衡量解码性能的主要指标。分析在限定脉冲的谱宽 $\Delta\Omega$ 不变的前提下,解码性能随 ΔT 的变化情况。

图 1 为仿真所用的编解码器的反射谱,对于这种基于 EPS-SFBG 的编解码器而言,0 级峰和 -2 级峰之间的部分为编码谱。图 2 是不同脉宽 ΔT 、不同啁啾系数 C 下的脉冲频谱。啁啾的引入能够

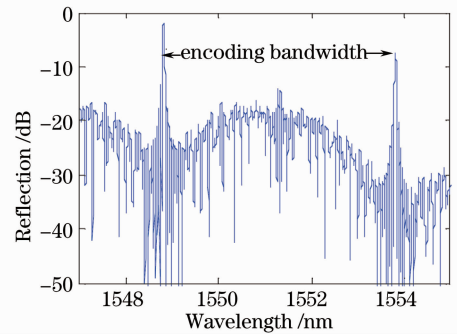


图 1 编码器反射谱

Fig. 1 Reflection spectrum of encoder

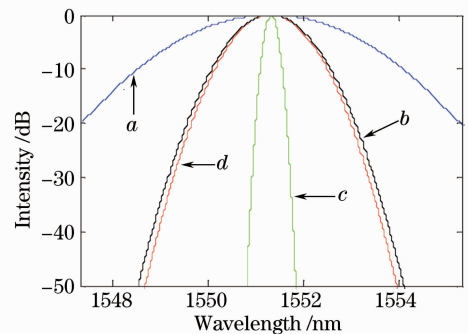


图 2 不同 ΔT 、不同 C 时脉冲频谱对比。a: $\Delta T=2.5$ ps, $C=-2$; b: $\Delta T=2.5$ ps, $C=0$; c: $\Delta T=14$ ps, $C=0$; d: $\Delta T=14$ ps, $C=-5$

Fig. 2 Comparison of spectrum of pulse with different ΔT and C . a: $\Delta T=2.5$ ps, $C=-2$; b: $\Delta T=2.5$ ps, $C=0$; c: $\Delta T=14$ ps, $C=0$; d: $\Delta T=14$ ps, $C=-5$

很大程度上扩大频谱宽度。脉宽 2.5 ps 无啾啾脉冲和脉宽 14 ps 啾啾为一 5 的啾啾脉冲有着非常接近的功率谱。图 3 是在三组不同的限定谱宽情况下,解码性能随 ΔT 变化的结果。从图中可以看出两个特点,1)当脉冲谱宽固定时,解码性能随着脉宽的

的增大而降低;2)对于相同的脉宽,与编码谱宽较为匹配的脉冲谱宽($\Delta\Omega = 4$ nm)要优于过宽($\Delta\Omega = 7$ nm)或过窄($\Delta\Omega = 2$ nm)的性能,这个特点是由光源与基于 EPS-SFBG 的时域相位编解码器的匹配关系^[13~15]所决定的。

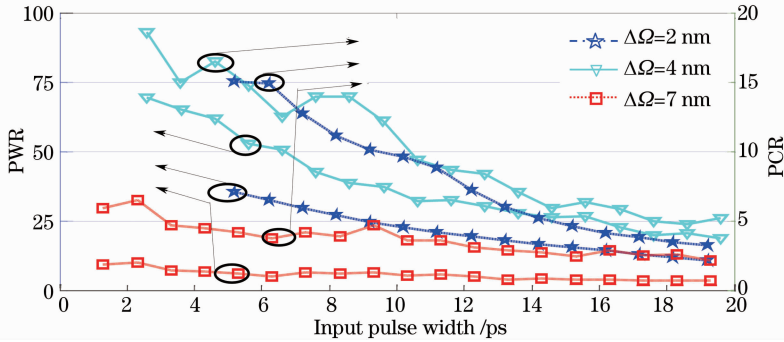


图 3 在三组不同的限定谱宽情况下,解码性能随 ΔT 变化的结果

Fig. 3 Decoding performance versus ΔT with three fixed $\Delta\Omega$

因此对于啾啾脉冲,在保持谱宽不变的情况下对脉宽进行压缩将会有助于提升解码性能。一种行之有效的办法就是对频率啾啾进行消除,使压缩后的脉冲接近变换限制脉冲。利用文献[12]提出的新型消啾啾的方法,考察脉宽压缩后对解码性能的影响。

2.2 消啾啾对于脉冲压缩的可行性

与无啾啾脉冲相比,啾啾脉冲脉宽不变而谱宽得以增加,是因为脉冲的频谱分量进行了重新的分配^[16],如果采用色散器件对啾啾脉冲的频谱再进行一次逆分布,将会实现在保持谱宽不变的前提下压缩脉宽^[16]。目前压缩啾啾脉冲的方法有法布里-珀罗(F-P)光谱窗法^[17]、正常色散光纤法^[18,19]、啾啾光栅法^[20,21]、三级压缩技术^[22]以及文献[12]提出的利用重构等效啾啾超结构光纤光栅压缩任意啾啾模型的方法。本文利用上述的最后一种方法研究啾啾脉冲被压缩后对解码性能的提升作用。基于重构等效啾啾超结构光纤光栅消除脉冲啾啾的基本原理如图 4 和图 5,分别是重构等效啾啾(REC)技术和利用 REC 技术消啾啾^[12]的原理示意框图。其原理可归纳表述为:通过实测或拟和,得出啾啾脉冲模

型,对啾啾脉冲进行傅里叶变换得到其频谱信息,对相位谱取反就得到了 REC 中的目标响应,只要重构出来光栅的某一级反射谱与目标相应是等效的,就能够起到消除啾啾的效果。由于 REC 技术本身可实现具有任意物理可实现滤波特性的光纤光栅,因此这种技术保证了其对任意啾啾模型的脉冲都能够消除啾啾、压缩脉宽。图 6 为线性啾啾脉冲的时域波形和频谱在消啾啾前后的对比。初始脉冲脉宽为 20 ps,啾啾系数为 -5,在消啾啾后,脉宽被压缩至 5 ps 左右,而脉冲频谱几乎保持不变。

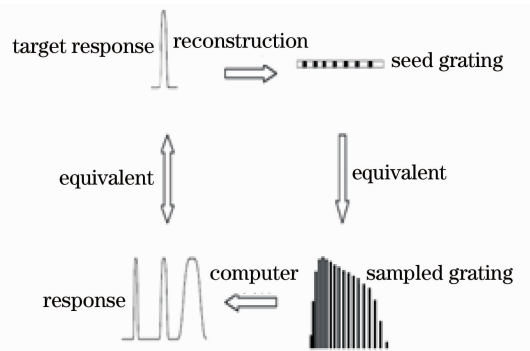


图 4 重构等效啾啾过程

Fig. 4 Process of REC

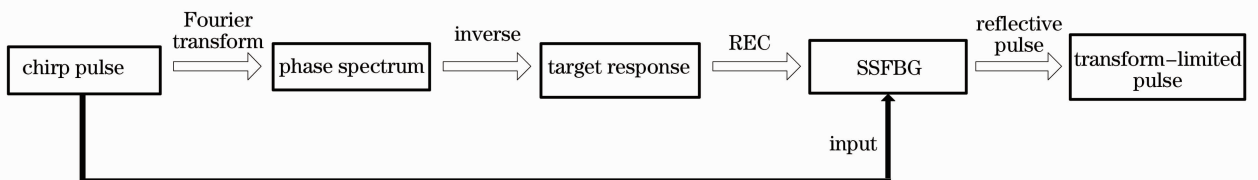


图 5 利用 REC 技术消啾啾过程

Fig. 5 Process of chirp-elimination using REC technology

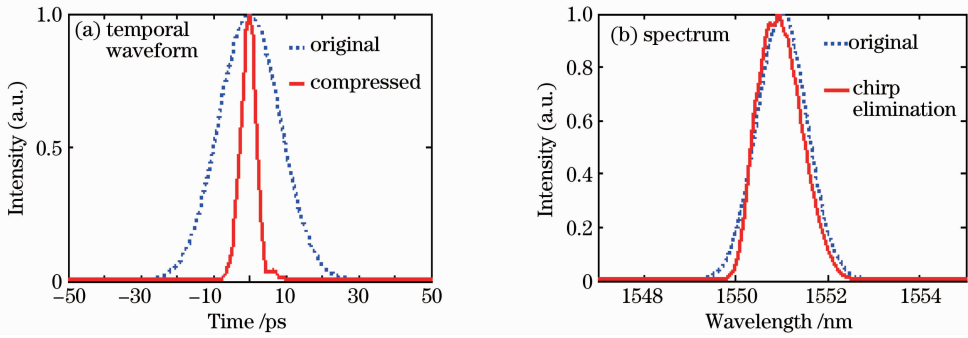


图 6 脉冲在消啁啾前后的比较

Fig. 6 Comparison between original and chirp-eliminated pulses

2.3 消啁啾、压缩脉宽对于提高解码性能的有效性

基于前面所述的消啁啾方法, 仿真研究啁啾脉冲在消啁啾前后对于解码性能的影响。仍然采用 2.1 节所用的编解码器, PWR, PCR 用来衡量解码的自互相关性能。选取的啁啾模型为线性和非线性, 非线性模型采用常见的高斯型、洛仑兹型, 啁啾系数均为 -5 。图 7 所示为这三种模型消啁啾前后

的解码效果。从图中发现以下两个特点

- 1) 啁啾脉冲未被消啁啾前, 解码性能整体是偏低的, 相对最佳的解码性能出现在脉宽为中等值的位置;
- 2) 啁啾脉冲被消啁啾压缩后, 解码性能整体得到很大的提高, 在初始脉宽大约处于 10 ps 与 20 ps 之间的情况下, 解码性能处于一个相对较高的水平。

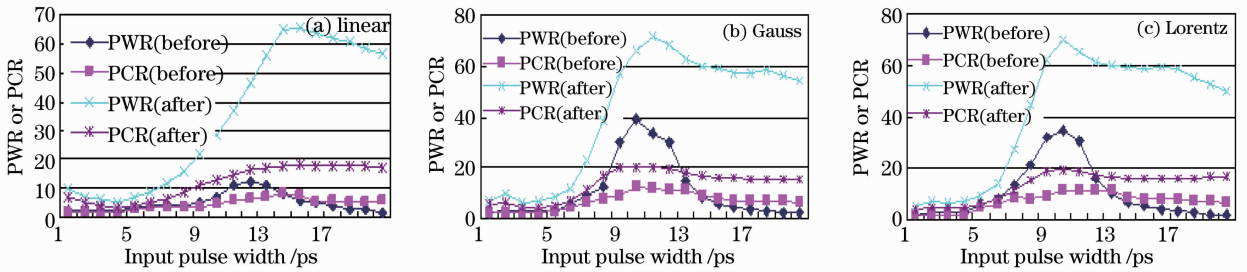


图 7 三种啁啾模型消啁啾前后的解码性能

Fig. 7 Decoding performance before and after chirp-elimination with three chirp models

对于特点 1), 虽然啁啾的引入增加了脉冲的频谱宽度, 提高了编码器编码带宽资源的利用率, 但不能同时满足脉冲的时域宽度要窄这一要求, 因此整体的解码性能不是很高, 当脉宽处于中等值 (11 ps) 左右时, 出现了一个折中的状态, 达到了相对最佳的解码性能。

好。虽然只有变换限制的脉冲即 2.5 ps 脉冲才能达到最优的性能, 但是消啁啾就是在不改变频谱宽度的前提下进一步压缩脉宽, 力求压缩成变换限制脉冲的, 这样就同时达到了脉宽较窄、频谱较宽的要求。

对于特点 2), 是啁啾得到消除、脉宽得到压缩的结果, 达到预期。之所以在脉宽较窄的时候解码性能很低是因为, 窄脉冲再加上一 5 的啁啾系数将会导致过大的脉冲频谱宽度, 这会违背等效相移超结构光栅编解码器与光源的匹配性要求。相反, 相对较宽的脉冲再结合啁啾的作用正好将频谱扩展到与编解码谱匹配到较好的程度。对于线性啁啾脉冲而言, 脉宽为 14 ps 啁啾系数为 -5 的脉冲频谱宽度约为 4 nm, 正如图 2 所示, 这个频谱宽度与脉宽为 2.5 ps 无啁啾脉冲的谱宽是很接近的, 而图 3 已经证明, 这个光源谱宽与 5 nm 的编解码谱匹配性较

因此对啁啾脉冲进行消啁啾、压缩脉宽将会提高解码性能。

3 半边带方法对性能的进一步优化

OCDMA 作为一种扩频机制, 利用的带宽越宽性能就越优。而通常实用的啁啾脉冲源, 如增益开关半导体激光器和基于外调制产生的脉冲, 其谱宽通常相对较窄。使用的增益开关激光器谱宽约为 1.8 nm, 而通常半导体锁模激光器的谱宽为 4 nm, 但二者的成本和实用性不成正比。如何有效利用这种低成本的相对较窄频谱的光源是 OCDMA 走向实用化不可回避的问题。文献[24]里针对这个问题

经过研究得出了一个有益的结论:在编码带宽内,编码谱是对称的,即中心波长任何一侧的反射谱已经能够包含所有的编码信息,那么当采用较窄的光源频谱时,使光源的频谱偏移编码谱的中心波长而覆盖编码谱的半边带,解码性能将会得到提高,称之为“半边带编码”方法。

脉宽为 20 ps,啁啾模型为 Lorentz 型,啁啾系数为 -5 的啁啾脉冲,其谱宽(20 dB)约为 1.8 nm,在啁啾被消除后,仿真解码性能随光源中心波长偏移的变化情况,以验证半边带方法的有效性,编解码器仍然采用基于 EPS-SFBG 的时域相位编解码器。仿真结果如图 8 所示。图中的阴影部分即半边带区域。结果显示,当光源偏移编码谱中心波长而覆盖半边带时解码性能得到提升。实验表明,半边带方法可充分利用频谱相对较窄的光源,提升解码性能。值得注意的是,左边性能较好的半边带区域比右边半边带区域要宽,本文认为这是由于编码谱偏向零级峰的左半部分幅度比偏向 -2 级峰的右半部分相对均衡一些。在具体实际运用半边带时需考虑这个特点。

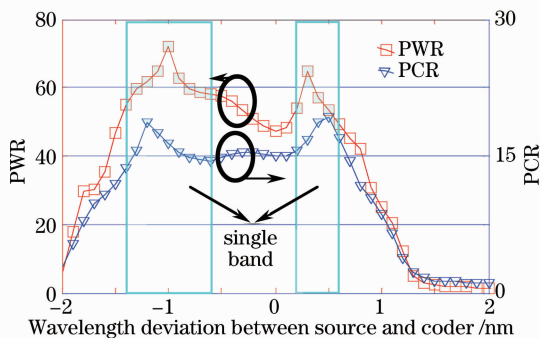


图 8 光源与编解码器之间的波长偏移对解码性能的影响

Fig. 8 Effect of wavelength deviation between source and coder on decoding performance

因此,对于通常实用化的啁啾脉冲光源,可以通过半边带方法进一步提高解码性能。

4 实测数据验证

为了验证前面的仿真结论,以增益开关分布反馈半导体激光器输出的啁啾脉冲为例,进行了实测数据验证。根据商业软件给出的 GS-DFB LD 模型,实际制作了用于消啁啾的重构等效啁啾超结构光纤光栅。采用 63 bit 的 Gold 码字,制作了 5 对编解码器以考察结果的一致性。通过光矢量分析仪(OVA, LUNA 公司生产)实测这些光纤光栅的反射谱,将这些实测的用来消啁啾的反射谱数据和编解

码谱数据代入计算机程序中以检验消啁啾和半边带联合优化应用啁啾脉冲的效果。图 9 是实测的用来消啁啾的光栅反射谱,图中的阴影部分即为用来消啁啾的频谱段。图 10 是实测的编码谱数据。图 11 是消啁啾前后啁啾脉冲时域波形和频率啁啾的对比^[12],可以看到消啁啾后,脉冲得到极大的压缩,由初始的 25 ps 压缩至约 5 ps。值得注意的是,在消啁啾后,距脉冲中心部分较远的两边啁啾的波动非常大,这有两方面的原因:1)经过重构的光栅反射幅度谱的幅值在所需的通带范围不恒为常数,这与理想的能够完全消啁啾的目标响应不一致;2)光栅反射的时延谱存在着一定的细小的抖动,这也是采样光栅通常所具有的特性,这样就导致了不能对每一处的频率啁啾都精准地消除掉,尤其对于距离脉冲中心部分较远的原本波动较大的初始啁啾。然而,由于距脉冲中心部分较远的那部分波形的能量已经相当弱了,绝大部分能量处所对应的初始啁啾已被消除,以至于仍然存在的距脉冲中心部分较远的两边的啁啾可以被忽略掉。图 12 是根据实测数据计算出来的消啁啾前后联合应用半边带方法解码性能的变化情况。从图中可以发现,消啁啾后,解码性

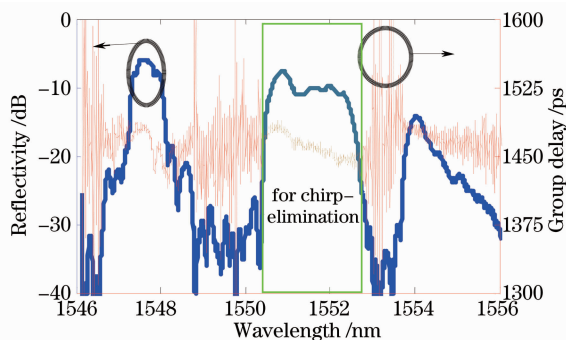


图 9 实测用来消啁啾的光栅反射谱

Fig. 9 Measured reflection spectrum for chirp elimination

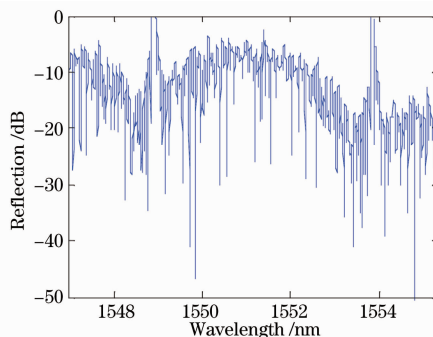


图 10 实测编码器反射谱

Fig. 10 Measured reflection spectrum of encoder

能整体得到很大的提高,当光源中心波长偏移编码谱中心波长而覆盖其半边带时,解码性能出现提升,当偏移一定程度时能得到最佳的解码性能。这些实

验结果证明了消啁啾联合半边带方法提高解码性能的有效性。

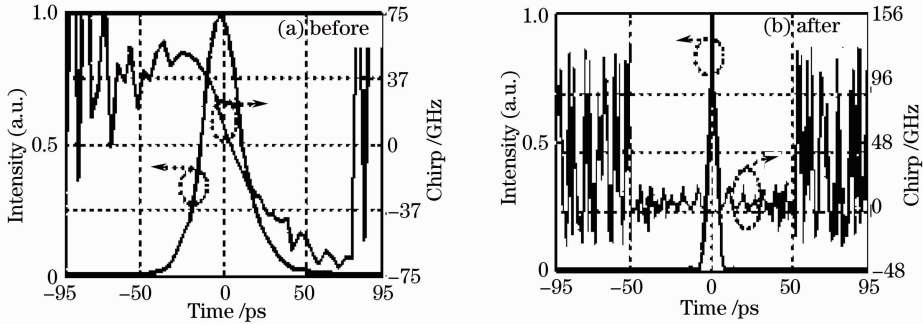


图 11 根据实测数据消啁啾前后的对比

Fig. 11 Comparison between pulses before and after chirp elimination based on measured data

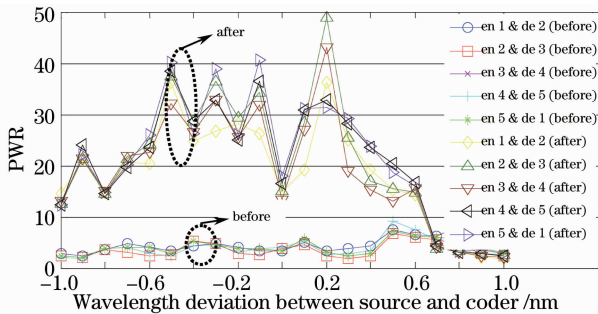


图 12 根据实测数据计算出来的消啁啾前后解码性能随波长偏移的变化情况

Fig. 12 Comparison between decoding performances before and after chirp elimination versus wavelength deviation based on measured data

5 结 论

在前期研究的基础上,对啁啾脉冲应用于 OCDMA 系统的优化改进问题进行了进一步的研究探讨。仿真结果表明,对啁啾脉冲进行消啁啾、压缩脉宽将会提高编解码性能;对于谱宽相对较窄的光源,通过半边带编解码的方法将会有效利用光源的频谱资源从而进一步优化解码性能。针对目前通常实用的啁啾脉冲光源,即 GS-DFB LD,实测数据结果验证了消啁啾联合单边带方法能够显著改善解码性能的有效性。仿真和实测结果进一步验证了低成本啁啾脉冲光源用于 OCDMA 系统的可行性及有效性,对 OCDMA 技术的实用化发展具有较为重要的指导意义。

参 考 文 献

1 Wei Huang, Mohamed H. M. Nizam, Ivan Andonovic *et al.*. Coherent optical CDMA (OCDMA) systems used for high-capacity optical fiber networks-system description, OTDM

comparison, and OCDMA/WDMA networking [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 765~778

2 Jawad A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part I: fundamental principles [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 824~833

3 Jawad A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part II: system performance analysis [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 834~842

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 Yang Shuwen, Pu Tao, Xu Ming *et al.*. Research of algebraic congruent codes used in two-dimensional code division mutiaddress system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 225~229

杨淑雯,蒲涛,徐铭等. 用于二维光址分多址系统的代数同余码研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 225~229

6 Richer, W. Rischler, A. Buchwieser *et al.*. Field trial of a ASON in the metropolitan area[C]. OFC2002, ThH3

7 X. Wang, N. Wada, T. Miyazaki. Field trial of 3-WDM×10-OCDMA×10. 71-Gb/s asynchronous WDM/DPSK-OCDMA using hybrid E/D without FEC and optical thresholding[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 207~215

8 V. J. Hernandez1, R. P. Scott1, N. K. Fontaine *et al.*. SpectS O-CDMA 80. 8-km bossent field trial using a compact, fully integrated, AWG-based encoder/decoder [C]. OFC2007, 2007, OMO7

9 Hideaki Tamai, Masahiro Sarashina, Hideyuki Iwamura *et al.*. First demonstration of coexistence of standard gigabit TDM-PON and code division multiplexed PON architectures toward next generation access network [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 292~298

10 Fang Tao, Lu Lin, Li Yuquan *et al.*. Application of optical pulse source with frequency chirp in OCDMA system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 623~628

方涛,卢麟,李玉权等. 啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 623~628

11 Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5 Gb/s 60 km optical code division multiple access transmission experiment base on equivalent phase shift superstructured fiber Bragg graing en/decoer [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 Gb/s 60 km 光码分多址传输实验[J]. *中国激光*,

- 2008, **35**(3): 418~421
- 12 Zheng Jilin, Wang Rong, Fang Tao *et al.*. A novel method of chirp elimination using reconstruction equivalent chirp superstructured fiber Bragg grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 7017~7024
郑吉林, 王 荣, 方 涛等. 一种新型的利用重构等效啁啾超结构光纤光栅消啁啾技术研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(10): 7017~7024
- 13 Zheng Jilin, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Effects of source duty ratio on performance of OCDMA encoders/decoders [J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(1): 8~11
郑吉林, 王 荣, 蒲 涛等. 光源占空比对 OCDMA 编解码器性能的影响[J]. *光电子技术*, 2007, **27**(1): 8~11
- 14 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao. Fiber Bragg grating based time phase en-decoder with multiple wavelength channels [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1522~1526
朱英勋, 王 荣, 蒲 涛. 具有多个波长通道的光纤光栅相位编/解码器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1522~1526
- 15 Tao Pu, Yingxun Zhu, Peng Chen *et al.*. Novel encoder/decoder using subsampled Bragg grating for a WDM-compatible OCDMA system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(22): 1807~1809
- 16 Amnon Yariv. *Optical Electronics in Modern Communications* [M]. Chen Heming *et al.*. Transl., Bei Jing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 167~170
Amnon Yariv. *现代通信光电子学* [M]. 陈鹤鸣等译, 北京: 电子工业出版社, 2004. 167~170
- 17 Xu Baoxi, Gao Yizhi, Li Yanhe *et al.*. Function of F-P spectral window on semiconductor optical soliton sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10): 1063~1067
许宝西, 高以智, 李艳和等. F-P 滤波窗在半导体光孤子源中的作用[J]. *光学学报*, 1994, **14**(10): 1063~1067
- 18 Wu Jian, Lou Caiyun, Li Yuhua *et al.*. Theoretical and experimental study on compression of chirped optical pulses utilizing dispersion-compensation and high-order soliton effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(4): 619~624
伍 剑, 娄采云, 李玉华等. 色散补偿及高阶孤子压缩啁啾光脉冲的理论及实验研究[J]. *物理学报*, 1998, **47**(4): 619~624
- 19 K. Taira, K. Kikuchi. Picosecond pulse generation with high extinction ratio employing electroabsorption modulator, fibre compressor, and self-phase-modulation-based pulse reshaper [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(1): 15~16
- 20 Tetsuro Komukai, Takashi Yamamoto, Satoki Kawanishi. Optical pulse generator using phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1746~1748
- 21 A. Clarke, P. M. Anandarajah, D. Reid *et al.*. Optimized pulse source for 40-Gb/s systems based on a gain switched-laser diode in conjunction with a nonlinearly chirped grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 196~198
- 22 Ma Xiaohong, Yu Jinlong, Dai Jufeng *et al.*. Experimental research on three-stage compressing of 10 GHz gain-switch DFB laser output pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1478~1481
马晓红, 于晋龙, 戴居丰等. 10 GHz 增益开关激光器输出脉冲的三级压缩实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1478~1481
- 23 Y. T. Dai, X. F. Chen, L. Xia *et al.*. Sampled Bragg grating with desired response in one channel by use of a reconstruction algorithm and equivalent chirp [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1333~1335
- 24 Zheng Jilin, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Effects of wavelength deviation on performance of temporal phase optical code-division multiple-access en/decoder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1872~1877
郑吉林, 王 荣, 蒲 涛等. 波长漂移对时域相位光码分多址编解码器性能的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1872~1877