

# 啾啾脉冲光源用于光码分多址系统的研究

方 涛<sup>1</sup> 卢 麟<sup>1</sup> 李玉权<sup>1</sup> 王红传<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; <sup>2</sup> 通信指挥学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要** 脉冲光源是光码分多址的关键技术之一,光源的性能直接决定了系统的性能。深入研究了光脉冲的啾啾对时域相位光码分多址编解码器性能的影响,分析了啾啾脉冲光源用于光码分多址系统的可行性。基于增益开关分布反馈式脉冲激光器和等效相移光纤光栅编解码器进行了 2.5 Gb/s 数据速率的 60 km 光码分多址系统传输实验,得到了误码率低于  $10^{-9}$  的实验结果。理论和实验研究结果表明,啾啾脉冲光源可用于光码分多址系统,这对于降低系统的成本,增强光码分多址技术的可实现性有重要意义。

**关键词** 光通信; 光码分多址; 啾啾; 时域相位编解码器; 增益开关激光器

**中图分类号** TN914.53 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0623

## Application of Optical Pulse Source with Frequency Chirp in OCDMA System

Fang Tao<sup>1</sup> Lu Lin<sup>1</sup> Li Yuquan<sup>1</sup> Wang Hongchuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*  
<sup>2</sup> *Commanding Communication Academy, Wuhan, Hubei 430010, China*

**Abstract** Optical pulse source is one of the key techniques in optical code-division multiple access (OCDMA), and optical source affects the performance of the OCDMA system directly. The pulse chirp's effect on performance of OCDMA temporal phase en/decoder is researched, and the feasibility of employing optical pulse source with frequency chirp in OCDMA is analyzed. Based on gain-switched distributed feedback (DFB) laser and equivalent phase-shifted superstructured fiber Bragg grating en/decoder, a 60 km OCDMA transmission at the rate of 2.5 Gb/s with bit error rate lower than  $10^{-9}$  is experimentally demonstrated. The of theoretical analysis and experimental results indicate that the optical pulse source with frequency chirp can be applied in OCDMA system, which is significant for reducing the system cost and enhancing the practicality of OCDMA technology.

**Key words** optical communication; optical code-division multiple access; chirp; temporal phase en/decoder; gain-switched laser

## 1 引 言

光码分多址(OCDMA)技术作为未来高速全光接入的备选方案之一,具有随机异步接入能力、可采用高速光信号处理、网络控制和管理简单、公平灵活、抗干扰能力强和具有一定保密安全性等特点<sup>[1~5]</sup>。目前 OCDMA 的研究热点主要集中在编解码方案和技术上,包括时频域二维编解码,时域相位编解码,频谱相位编码等。在已有的实验的报道中,二维编码通常采用宽谱光源,相位编码则采用高

性能的锁模激光器。锁模激光器产生的光脉冲具有抖动低、啾啾小、接近变换极限、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。增益开关(Gain-Switched, G-S)半导体激光器(LD)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。

在文献[6]中,分析了无啾啾高斯光脉冲的宽度

收稿日期: 2008-05-05; 收到修改稿日期: 2008-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(60502003)资助课题。

作者简介: 方 涛(1978—),男,讲师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: juence@163.com

对时域相位 OCDMA 编解码器性能的影响,其光源模型可作为锁模光纤激光器这类光源的近似。而低成本的 G-S LD 产生的光脉冲啁啾较大,脉宽较宽,不满足变换极限条件,基于外调制技术的脉冲光源亦有类似问题。脉冲在光纤中传输时,由于光纤的色散,啁啾会带来较大影响,它可能会加剧脉冲展宽和波形畸变,也可能使脉冲变窄,即在传输中,可预见啁啾的正面或负面效应,从而采用相关技术应对,如色散补偿,以达到更好的系统性能;同样在编解码过程,啁啾对编解码有多大的影响,带啁啾的光源是否适用于 OCDMA 系统,有待进一步研究。另外这类光脉冲宽度较大,能否满足实际系统要求,也需进行研究和验证。本文主要讨论啁啾对 OCDMA 编解码器性的影响,并采用 G-S LD 进行实验验证和系统研究。

## 2 理论模型

与文献[6]类似,这里仍然基于时域相位超结构光纤光栅(SSFBG)编解码器进行相关研究。时域相位 SSFBG 编解码器的结构如图 1 所示,当光脉冲注入后,SSFBG 反射产生一系列相干光脉冲形成编码信号,解码器是编码器的匹配滤波器,即编码器的空间反向应用。

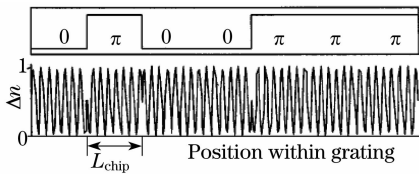
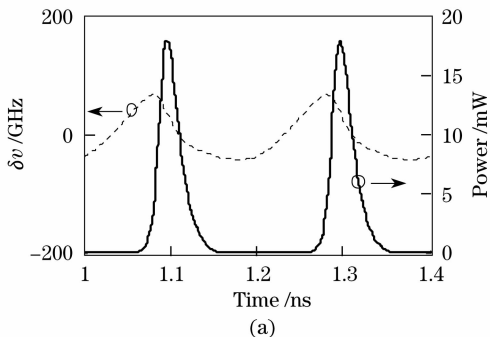


图 1 相移 SSFBG 的结构

Fig. 1 Structure of SSFBG with phase shifts

低反射率 SSFBG 编解码器波矢量响应  $F(k)$  可简单表示为空间超结构折射率调制分布函数  $A(x)$  的傅里叶变换<sup>[7~8]</sup>:

$$F(k) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} A(x) e^{jkx} dx, \quad (1)$$



$A(x)$  由光栅的结构决定,而波矢量  $k$  正比于光频率  $\omega$ ,即  $k = N_{\text{eff}}\omega/c$ ,  $N_{\text{eff}}$  为光栅的等效折射率。由(1)式可以得到光栅的频率响应  $H(\omega)$ ,则光栅的冲激响应为频率响应傅里叶反变换

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{-j\omega t} d\omega. \quad (2)$$

当光脉冲  $x(t)$  由光栅反射(编解码)后,其时域及频域结果分别为  $y(t) = x(t) * h(t)$  和  $Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)$ ,  $Y(\omega)$ ,  $X(\omega)$  和  $H(\omega)$  分别对应于  $y(t)$ ,  $x(t)$  和  $h(t)$  的 Fourier 变换 \* 表示卷积。假设解码器的冲激响应  $h'_1(t)$ ,相应的频响为  $H'_1(\omega)$ ,经编解码器后自相关解码结果为  $r_{\text{auto}}(t) = x(t) * h_1(t) * h'_1(t)$ 。对于带啁啾的高斯光脉冲,可表示为

$$x(t) = S_{\text{pulse}} = \exp\left[-\frac{\ln 2}{2} \left(\frac{2t}{T_{\text{FWHM}}}\right)^2\right] \exp[j\phi(t)], \quad (3)$$

其中  $T_{\text{FWHM}}$  是脉冲的半峰全宽,表示脉冲的有效持续时间,在  $t = \pm T_{\text{FWHM}}/2$  处,功率是脉冲最大功率的一半。式中  $\phi(t)$  为光脉冲的相位,反映了脉冲的啁啾情况,光脉冲的频率啁啾可表示为

$$\delta\omega = \frac{d\phi(t)}{dt}. \quad (4)$$

啁啾特性不同将对应不同的编解码结果和系统性能。由增益开关激光器产生的光脉冲由于啁啾存在,其谱宽相对于相同脉宽的无啁啾脉冲更宽,如果啁啾不会带来其它的影响,则由文献[4]的结论可知这在一定程度可能提高编码效率,因此有可能部分抵消由于脉宽较宽而导致编解码性能的劣化。由半导体激光器的速率方程<sup>[9]</sup>计算得到的增益开关光脉冲的波形与频率啁啾的对应关系如图 2(a)所示,总体来说表现为非线性啁啾,在脉冲主体部分近似呈线性红移啁啾。这种啁啾特性可以采用正弦频率啁啾来近似,图 2(b)图中实线为商用软件模拟多量子阱 DFB 激光器工作于增益开关状态时得到的频率啁啾特性曲线,虚线是对啁啾曲线的正弦拟合,两者比较一致。

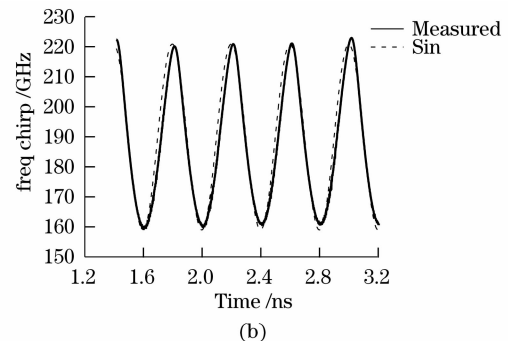


图 2 增益开关激光器产生的光脉冲波形及频率啁啾

Fig. 2 The pulse waveform and frequency chirp of gain-switched laser

对于理想的线性啁啾,可将(3)式中的 $\phi(t)$ 表示为

$$\phi(t) = \frac{\ln 2}{2} C \left( \frac{2t}{T_{\text{FWHM}}} \right)^2, \quad (5)$$

其中 $C$ 为线性啁啾因子。若为正弦啁啾,(3)式中相位啁啾项可表示为

$$\phi(t) = \Delta\theta \cos \omega_m t \quad (6)$$

$\Delta\theta$ 为啁啾系数, $\omega_m$ 为正弦啁啾的角频率,与光脉冲的重复频率相等。这里主要研究考虑这两种啁啾对编解码性能及系统的影响。

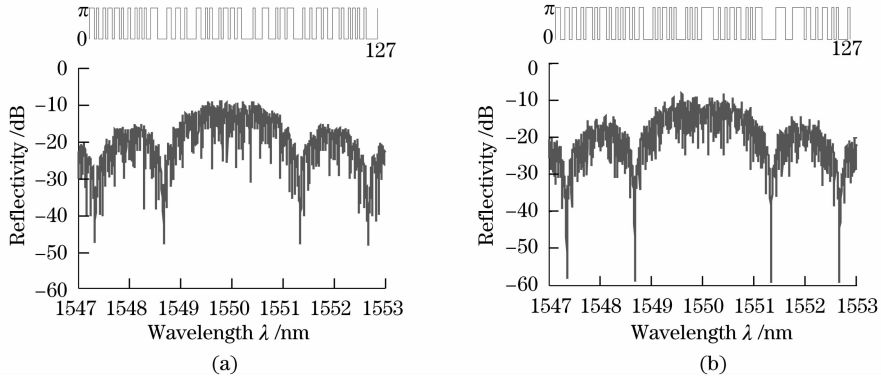


图 3 127 位 Gold 序列及所对应的 SSFBG 编码器反射谱

Fig. 3 Superstructure profiles (upper traces) and corresponding calculated reflectivity spectra (lower traces) for selected 127-chip Gold codes

对线性啁啾高斯脉冲作为光源进行编解码的性能仿真结果如图 4 所示,图中(a)、(b)分别对应图 3 中(a)、(b)所示编解码器的  $P/W$  值在不同啁啾条件下随光脉冲宽度变化的情况,(b)图对应码字的自相关特性较(a)更好。 $C=0$ 即对应无啁啾时的情况,从图可以看出,当光脉冲带有啁啾时,经编解码后  $P/W$  总的变化趋势与无啁啾情形类似,即随脉冲宽度的增加, $P/W$  值逐渐减小。当啁啾较小

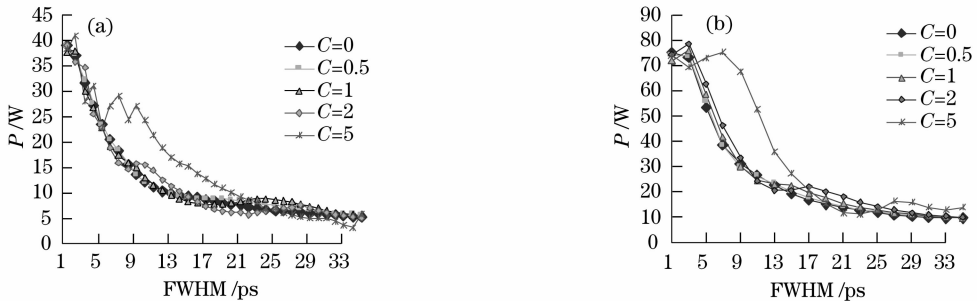


图 4 不同线性啁啾条件下编解码器的  $P/W$

Fig. 4 Performance of en/decoder with different linear chirps

图 5(a)显示了不同正弦啁啾时  $P/W$  随脉冲宽度的变化的情况, $\Delta\theta=0$ 即对应无啁啾时的情形。可以看出在光脉冲带有正弦频率啁啾时,编解码器的性能变化不明显,特别是脉冲较窄时,几乎无变化。图 5(b)为不同脉宽时  $P/W$  随啁啾大小的变化,结果表

### 3 仿真分析

仿真中采用码长为 127 位编解码器,码字为 Gold 序列,码字选取原则参照文献[7]所述,主要考虑码字非周期自互相关特性。以自相关与傍瓣之比( $P/W$ )作为衡量编解码性能的主要指标,用于仿真的两组编解码结构及反射谱如图 3 所示。等效折射率  $n = 1.45$ ,码片长度  $L_{\text{chip}} = 0.62 \text{ mm}$ ,折射率调制系数  $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$ 。

时,编解码的性能变化不大,与无啁啾时性能基本一致,如图中 $C=0, 0.5, 1, 2$ 的情况;当啁啾较大时,啁啾对编解码的性能有一定的影响,表现为脉宽较大或较小时,变化不大,而当脉冲宽度比较接近无啁啾情形时编解码器对应最佳值时<sup>[6]</sup>, $P/W$ 性能有所提高,这是因为啁啾带来的脉冲谱的展宽使得编码器的编码带宽资源的利用率有所增加,这个影响对编解码来说是有利的。

明当啁啾不大时, $P/W$  的值与无啁啾时基本相同,只有当啁啾较大且脉宽较大时,会对编解码器的性能有一定的影响,如图中当脉宽大于 13 ps,啁啾系数  $\Delta\theta$  大于 16 时, $P/W$  值有所增加。增益开关光脉冲基本符合这一特点,即脉宽较宽,且啁啾大。较宽的脉宽使

编解码的性能较低,但不会因为啁啾进一步使编解码性能劣化,反而会有所提高,可以说,单就编解码而言,在一定程度上还期望光脉冲存在一定的啁啾。

由以上分析可知,在一定的条件下,啁啾会给编解码带来影响,但主要决定编解码性能的还是脉冲宽度,这从图 4 和图 5 均可看出, $P/W$  随脉宽的变

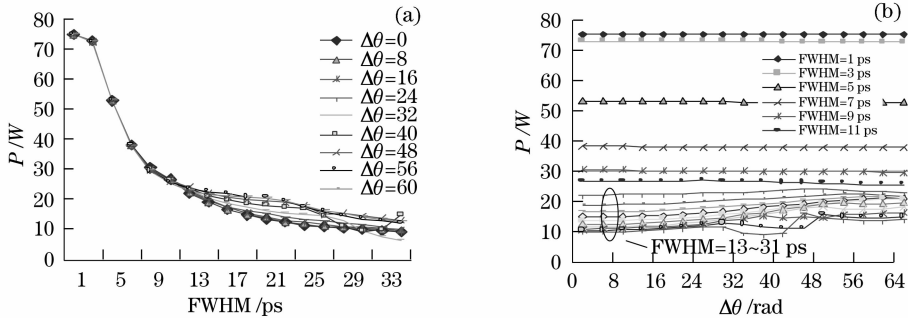


图 5 正弦啁啾条件下编解码器的性能

Fig. 5 Performance of en/decoder with different sinusoidal chirps

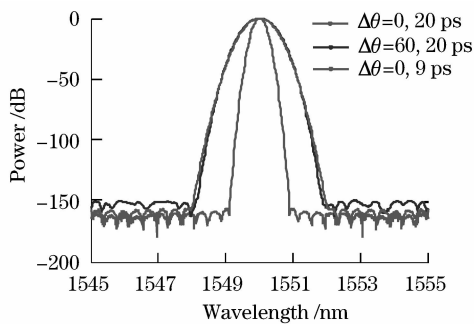


图 6 不同啁啾及脉宽时光脉冲的谱

Fig. 6 Spectra of optical pulses with different pulse widths and chirps

也就是说,虽然光脉冲所带有的啁啾会使其频谱有所展宽,在一定程度上有可能提高编码效率,但不足以抵消由于脉冲过宽带来的编解码器性能的劣化,随着脉宽增加,编解码性能下降很快,而啁啾带来的影响相对较小;也可认为由于脉宽过大,使得码片间的串扰增加,从而影响了编解码性能。因此对于用于编码的光脉冲,只保证足够的谱宽是不够的,与此同时,还应保证脉冲的时域宽度足够小。所以,对于增益开关激光器,只要其脉冲宽度不是过大,就认为是可以用于 OCDMA 系统中的,而且其脉冲的啁啾对系统影响较小。

## 4 实验结果

基于增益开关 DFB 激光器,我们进行了数据速率为 2.5 Gb/s 的 OCDMA 系统传输实验<sup>[11]</sup>,实验框图如图 7 所示。其中 PPG (Anritsu MP1763) 产生

化程度比啁啾导致的变化大得多。从另一个方面来看,决定编解码性能主要是光源的脉宽。如图 6 所示,不同条件下光脉冲的归一化谱,同为 20 ps 的光脉冲,当有啁啾时,谱宽可能大得多;当啁啾系数为 60 时(正弦啁啾情形),谱宽可与宽度为 9 ps 无啁啾光脉冲相当,然而  $P/W$  的值却不及 9 ps 无啁啾时的大。

2.488 Gb/s 随机序列 (PRBS) 作为数据信号,同时产生同步的 2.488 GHz 的时钟信号;时钟经微波放大后驱动 G-S DFB 脉冲激光器产生相应速率的窄脉冲光,光脉冲的半峰全宽约为 20 ps,对应约 0.65 nm 的 3 dB 带宽,光脉冲信号的中心波长为 1545.52 nm;数据信号经调制驱动电路放大后控制  $\text{LiNiO}_3$  强度调制器完成电 NRZ 码到光 RZ 码的变换;然后送入编码器,编码采用如图中所示 63 位等效相移<sup>[10-11]</sup> SSFBG 编码器,编码信号经 EDFA 放大后送入 60 km 的 G.652 光纤传输并在解码前实施色散补偿。解码信号经放大后由速率为 10 Gb/s 的 PIN & TIA 窄带接收组件实施光电转换,经门限可调整的时钟数据恢复 (CDR) 模块进行数据恢复和时钟提取,送入误码仪 (Anritsu MP1764) 测试误码。系统中各点的波形及眼图由光采样示波器 (LeCroy NRO9000) 测量。

图 7 给出 A、B、C、E 点的眼图,由测量结果得知 C 点处解码信号半峰全宽与编码前一致,约为 20 ps,峰瓣比 ( $P/W$ ) 约为 6 左右,这一值可以很好地满足恢复原始信号序列的要求。该编解码器峰瓣比的理论最佳值为 26.8,最佳  $P/W$  对应的光脉冲宽度约为 4 ps,实验得到的  $P/W$  与理论值最佳相差较大,这一方面是由于示波器接口带宽受限,从而观测不到脉冲的尖峰,另外,主要还是由于编码效率低,光源的脉宽 (20 ps) 较大、谱宽不够,而编码器的编码带宽约 2.2 nm,编码带宽资源利用不充分。不过该编解码器对 20 ps 的高斯光脉冲编解码时  $P/W$

理论值约为 9, 如果考虑到示波器接口带宽限制引起的能量损耗, 和增益开关光脉冲本身带有基底及旁瓣, 以及 EDFA 引入的噪声, 可以说实验结果已经非常接近理论值了, 这说明经过合适的色散补偿, 增益开关光脉冲的啁啾并没有给编解码带来不利的影响, 反而由于啁啾使得 20 ps 的脉冲谱宽大于满足变换极限脉冲的谱宽, 在一定程度上提高了编码效

率。经接收机判决恢复后,  $E$  点得到信号的眼图较为理想, 送入误码仪检测传输系统误码, 得出如图 8 所示的误码曲线, 包括编解码背靠背、60 km 脉冲无编码传输、60 km 传输编解码实验结果。实验结果表明, DFB 激光器这种带啁啾且脉宽较宽的光源是可以用于 OCDMA 系统的, 这对于降低系统成本, 使 OCDMA 技术得以实用化具有重要的意义。

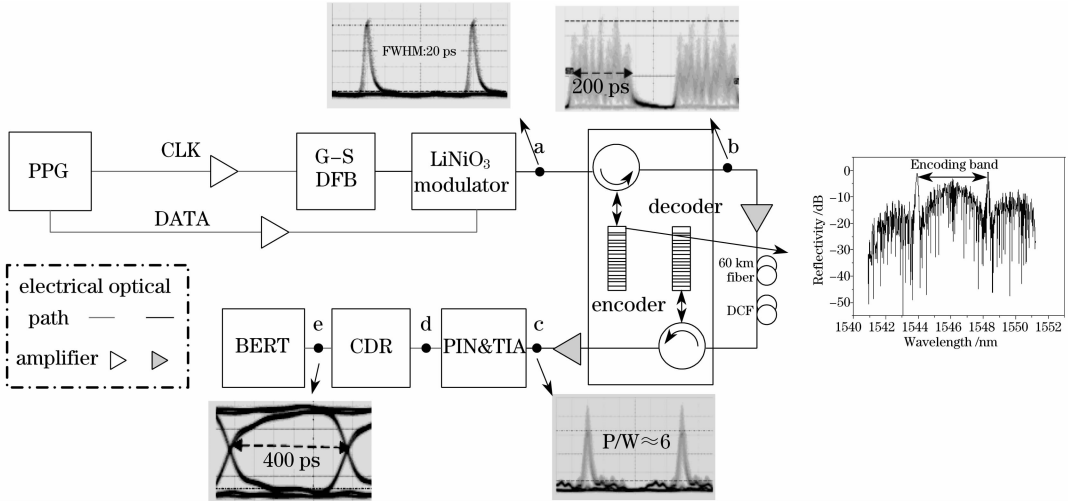


图 7 系统实验框图及结果

Fig. 7 Diagram and results of the system experiment

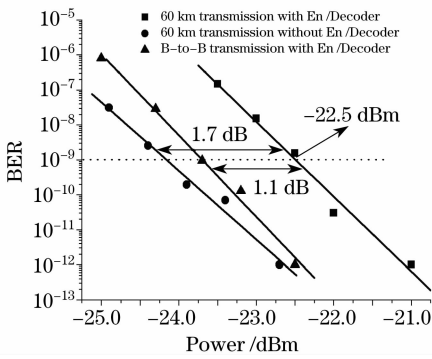


图 8 系统传输误码曲线

Fig. 8 Curves of bit error rate of the system in experiment

当然, 毕竟增益开关光脉冲脉宽较宽, 所以在实验中考虑使用码长适中的 63 位编解码器; 另外, 对多用户的应用还需采用相关技术窄缩脉宽才能较好的满足系统要求。而 G-S DFB 激光器的光脉冲主要呈近似线性的红移啁啾, 这一特性使之可以利用色散补偿光纤(DCF)或啁啾光纤光栅(CFBG)来压缩, 压缩后脉宽可大大减小, 脉宽的减小意味着可以采用码长更长的编解码器, 获得更好编解码效果和系统性能。也就是说, 经相应的技术改进, G-S DFB 激光器这类光源有可能满足多用户应用的要求。对于用户数要求不高的 OCDMA 系统, 是完全可以考

虑使用低成本的 G-S DFB 激光器这类脉冲光源的。

## 5 结 论

在研究脉宽对 OCDMA 编解码器性能的影响的基础上, 深入分析了啁啾对 OCDMA 编解码及系统性能的影响, 得出脉冲光源的啁啾对 OCDMA 编解码影响较小。要获得理想的编解码效果, 需保证光脉冲不仅有足够的谱宽, 还需脉冲的时域宽度足够小。基于 G-S DFB 激光器和等效相移光纤光栅编解码器进行 2.5 Gb/s, 60 km 的 OCDMA 系统传输实验, 得到了系统误码率小于  $10^{-9}$  的实验结果, 实验验证啁啾脉冲光源用于 OCDMA 系统的可行性。本文的理论结论及实验结果对 OCDMA 技术的实用化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 Transactions on Communications*, 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 Transactions on Communications*, 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 multiaddress 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 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): 1939~1994  
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
- 7 Xu Wang, Koji Matsushima, Akihiko Nishiki *et al.*. High reflectivity superstructured FBG for coherent optical code generation and recognition[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(22): 5457~5468
- 8 Peh Chiong Teh, Periklis Petropoulos, Morten Ibsen *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
- 9 J. C. Cartledge, R. C. Srinivasan. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5): 852~860
- 10 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Dianjie Jiang *et al.*. Equivalent phase shift in a fiber bragg grating achieved by changing the sampling period [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10), 188~190
- 11 Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5 Gbit/s 60 km optical code division multiple access transmission experiment base on equivalent phase shift superstructured fiber Bragg grating en/decoder [J]. *Chin. 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 Gbps 60 km光码分多址传输实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3), 418~421

## 《中国激光》“激光医学与生物光子学”专题征稿启事

光学技术特别是激光技术的快速发展给生物医学成像、传感以及诊断学领域带来了重大变革,并产生了巨大影响。激光医学与生物光子学作为一门新兴的交叉性学科,为生物医学的应用发展及基础理论研究提供了有利的条件。它结合多个学科,探索光子学技术在生物研究及医学诊断与治疗中的应用,已成为国际上迅速发展的领域并取得了诸多令人兴奋的成就。《中国激光》计划于2009年9月正刊上推出“激光医学与生物光子学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“激光医学与生物光子学”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域基础理论的研究进展以及最先进的临床试验水平。

征稿范围包括:

- 激光医学与生物光子学的基础研究
- 激光治疗
- 生物光学成像技术
- 非侵入性光学诊断
- 生物光学传感技术
- 生物光学器件
- 光动力学疗法
- 其他

截稿日期:2009年6月30日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“激光医学与生物光子学”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“激光医学与生物光子学”投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部