

基于超结构光纤光栅的全光编解码性能分析

陈小刚¹ 黄德修²

¹ 三峡大学理学院, 湖北 宜昌 443002
² 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 分析了光码分多址(OCDMA)系统中超结构光纤光栅(SSFBG)编解码器的相关特性,考虑了输入脉冲宽度、SSFBG 编解码光栅之间的波长偏移以及光栅的折射率调制振幅对全光编解码性能的影响。结果表明,随着输入脉冲宽度和编解码光栅之间的波长偏移量的增加,自相关峰值旁瓣比和自互相关峰值比下降,即编解码性能出现下降;编解码器的插入损耗和相关性能间存在矛盾,需要折中考虑 SSFBG 折射率调制振幅的选取。建立了基于 SSFBG 编解码器的时域相位编码 OCDMA 系统的数学模型,考虑了差拍噪声、多址干扰、接收机噪声以及接收机的带宽限制对系统性能的影响,采用全光阈值技术和 turbo 编码来提高相干扩时 OCDMA 的系统性能。

关键词 光通信;光码分多址;全光编解码;超结构光纤光栅;接收机带宽限制

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0001

Performance Analysis of All Optical Encoding and Decoding Based on Superstructured Fiber Bragg Grating

Chen Xiaogang¹ Huang Dexiu²

¹ College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To evaluate correlation characteristics for superstructured fiber Bragg grating (SSFBG) based en/decoder in the optical code division multiple access (OCDMA) system, the effects on encoding and decoding of input pulse width, encoder-decoder wavelength mismatch and grating refractive index modulation amplitude are considered. The theoretical results show that the degradation of en/decoder performance is obvious under the impact of increasing of input pulse width and encoder-decoder wavelength mismatch. In addition, there is a contradiction between correlation property and insertion loss of SSFBG en/decoder, it is need to select moderate refractive index modulation amplitude of SSFBG grating. The theoretical model of coherent time spreading phase coding OCDMA system based on SSFBG en/decoder is presented. Three different kinds of noise source are taken into account: multiple access interference (MAI) noise, beat noise and receiver noise. Moreover, the system performance degradation as a result of receiver's bandwidth limitation is evaluated. Optical threshold and turbo code are employed to improve the performance of coherent time spreading OCDMA system.

Key words optical communications; optical code division multiple access; all optical encoding and decoding; superstructured fiber Bragg grating; receiver's bandwidth limitation

1 引 言

光码分多址(OCDMA)提出于 20 世纪 70 年代中期,但很长一段时间都处于光通信主流研究领域之外。近年来对带宽的需求呈现出爆炸式的增长,而未来光网络的波长资源有可能出现不足。OCDMA 由于具有占用波长资源少、协议简单、可高

速光处理等特点而越来越引起人们的关注^[1]。相干 OCDMA 系统在光域采用双极性码(+1, -1)进行相位编码,因此其总体性能如误码率,用户容量等方面优于非相干 OCDMA 系统。而在相干编解码方案中,综合考虑编解码器的相关特性、频谱效率和色散效应等因素,时域相位编码 OCDMA 系统最引人

关注^[2,3]。不过制作时域相位编码 OCDMA 系统的编/解码器过程中光路径必须控制在光波长量级,以前只有采用平面光波回路(PLCs)才能符合这一要求。但是考虑器件成本、体积、插入损耗以及和光纤通信系统的兼容性等方面,基于 PLC 的光编/解码器并不是一个实用的选择。近年来,由于超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)^[4,5]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、和光纤通信系统良好的兼容性而有效地应用于时域相位编码 OCDMA 系统。

本文分析了光码分多址系统中超结构光纤光栅编解码器的相关特性,考虑了输入脉冲宽度、SSFBG 编解码光栅之间的波长偏移以及光栅的折射率调制振幅对全光编解码性能的影响。建立了基于 SSFBG 编解码器的时域相位编码 OCDMA 系统的理论模型,分析了接收机带宽限制对相干 OCDMA 系统性能的影响。采用光阈值技术来抑制带宽受限 OCDMA 系统中的干扰和噪声,并且应用 turbo 编码^[6,7]来进一步的提高系统性能。

2 基于超结构光纤光栅的全光编解码

相移 SSFBG 是在均匀光栅快速变化的周期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(即超结构),即 SSFBG 由一些相位不同的子光栅组成。在弱光栅条件限制下,满足布拉格条件的入射光脉冲将穿透整个光栅长度,而每段子光栅对入射光的反射作用大致相当,其脉冲响应波形与该光栅的折射率调制的空间结构一致。因此 OCDMA 的码字信息能直接写入 SSFBG。

图 1 给出了 SSFBG 编码光栅的相位和反射谱。

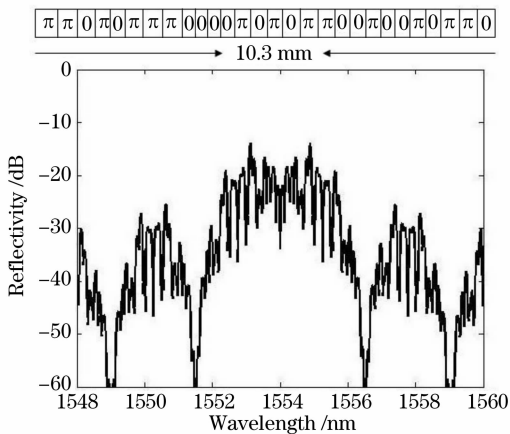


图 1 编码光栅的反射谱及其双相码

Fig. 1 Spectral reflectivity of SSFBG based encoder and its bipolar code

编码器包含 31 个码片(子光栅),单个子光栅的相位为“0”或“ π ”,采用码长为 31 的双极性 Gold 序列为地址码。光栅总长为 10.3 mm,单个子光栅长度为 0.33 mm,这分别对应于整个码字周期约 100 ps,单个码片周期约 3.2 ps。相移 SSFBG 的反射谱是采用传输矩阵法计算得到的,在计算中假定光栅的有效折射率为 1.452,折射率调制振幅 Δn 为 3×10^{-5} 。

假定编/解码光栅的冲激响应分别为 $h_e(t)$ 和 $h_d(f)$,相应的频域响应为 $H_e(f)$ 和 $H_d(f)$ 。输入脉冲为双曲正割脉冲($x(t) = \text{sech}(t/T_0)$),脉冲的半峰全宽(FWHM) $T_{\omega_{1/2}} \approx 1.763T_0$ 。

输入光脉冲经过 SSFBG 编解码后,其解码频域输出为

$$Y(f) = X(f)H_e(f)H_d(f), \quad (1)$$

式中 $X(f)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换,解码时域输出信号 $y(t)$ 可由 $Y(f)$ 傅里叶逆变换得到。

当编码光栅和解码光栅互相匹配时,则会获得自相关输出,否则解码输出的为互相关函数。为了实现良好的编解码,要求编解码器具有良好的相关性,即要求输入脉冲经过编解码光栅后,解码输出信号的自相关互相关峰值比(P/C)和自相关峰值旁瓣比(P/W)比较高。由于编解码器的频域响应取决于光栅的相移结构、中心波长 λ_c 和折射率调制振幅 Δn ^[8],故由(1)式可知,输入脉冲宽度、编解码光栅间的波长偏移和折射率调制振幅会影响编解码性能。

2.1 输入脉冲宽度对编解码的影响

图 2 给出了输入脉冲宽度对自相关互相关峰值比(P/C)和自相关峰值旁瓣比(P/W)的影响。可以看到,随着输入脉冲宽度 Δt 的增加,(P/C)和(P/W)都出现了下降,尤其是自相关互相关峰值比(P/C)迅速下降。因此需要限制输入脉冲宽度来实现良好的编解码。例如,要使(P/C)和(P/W)都大于 10,则要求脉冲宽度 $\Delta t < 2$ ps。图 2 说明 Δt 的增加会导致多址干扰(MAI)的增加,进而会影响 OCDMA 系统的误码率以及用户容量等性能。计算中假定光栅折射率调制振幅 Δn 为 1.5×10^{-4} 。

2.2 编解码光栅间的波长偏移对编解码的影响

由布拉格条件 $\lambda_c = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,可知光纤光栅的中心波长取决于光栅的有效折射率 n_{eff} 以及光栅周期 Λ ,而这两者都会受到温度和应力的影响。因此光栅的中心波长可能由于外界的影响而发生漂移,进而会使 SSFBG 编码光栅和解码光栅的中心波长不一致,即编解码光栅之间存在波长偏移。图 3 给出了编解码光栅之间的波长偏移对基于相移 SSFBG 的全光

编解码的相关特性的影响。分析结果说明编解码光栅间的波长偏移会使自相关互相关峰值比(P/C)迅速下降。为了使(P/C)大于10进而减小多址干扰(MAI),则要求波长偏移量 $\Delta\lambda < 0.06$ nm。因此在

实际的基于 SSFBG 的 OCDMA 系统中,需要采用温度控制和光栅封装来减小编解码光栅之间的波长偏移。计算中假定光栅折射率调制振幅 Δn 也为 1.5×10^{-4} 。

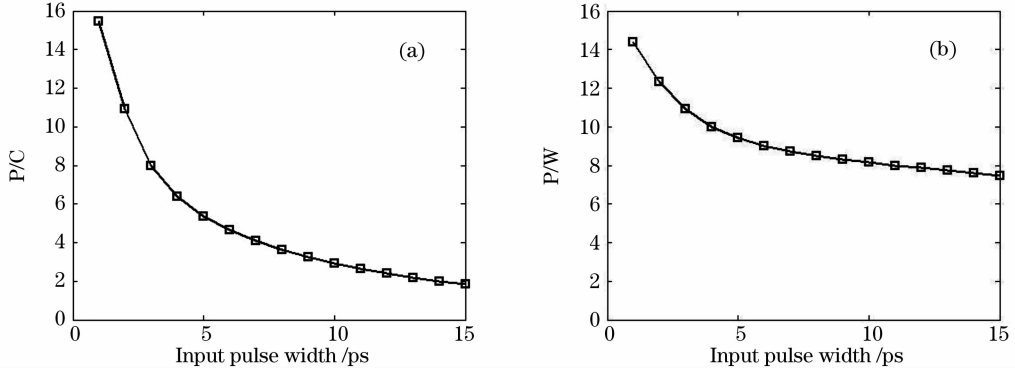


图2 输入脉冲宽度对编解码的影响。(a) 自相关互相关峰值比(P/C);(b) 自相关峰值旁瓣比(P/W)
Fig.2 Effect of input pulse width on encoding and decoding. (a) P/C ratio; (b) P/W ratio

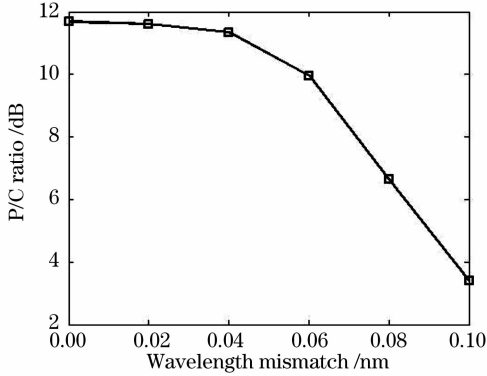


图3 编解码光栅之间的波长偏移对 P/C 的影响
Fig.3 P/C ratio versus encoder-decoder central wavelength mismatch ($\Delta\lambda$)

2.3 光栅折射率调制振幅对编解码的影响

图4给出了当编码光栅和解码光栅不匹配时解码输出信号波形轨迹,它描述的是 SSFBG 编解码光栅的互相关性能,可以看到当折射率调制振幅 Δn 较小时(3×10^{-5}),互相关峰值较小约为0.067,而当 Δn 较大时(4×10^{-4}),互相关峰值迅速增加约为0.25,这意味着自相关互相关峰值比(P/C)出现了很大程度的下降,编解码器的互相关性能恶化严重。

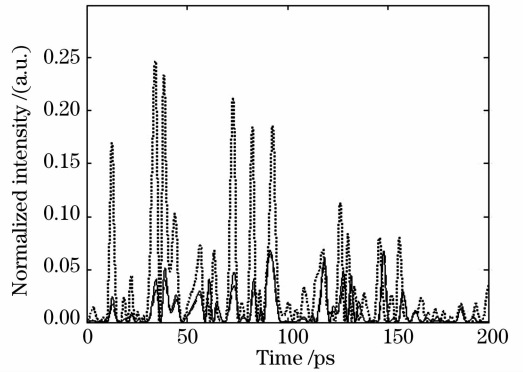


图4 不同 Δn 编解码光栅的互相关波形。 $\Delta n = 3 \times 10^{-5}$ (虚线), $\Delta n = 1.5 \times 10^{-4}$ (实线), $\Delta n = 4 \times 10^{-4}$ (点线)
Fig.4 Cross correlation waveform with different Δn (3×10^{-5} : dashed line, 1.5×10^{-4} : solid line, 4×10^{-4} : dotted line)

SSFBG 的反射率也和 Δn 有着直接的关系: Δn 越大则光栅的反射率越大。因此编解码器的插入损耗及其相关性能间存在矛盾,而从图4可以看到,当 Δn 适中时(1.5×10^{-4}),编解码光栅的互相关特性和 Δn 较小时(3×10^{-5})的特性相差无几,即 Δn 适中时编解码器也可以保持良好的相关特性,同时这时的 SSFBG 的峰值反射率可以大于 -10 dB,进而减小了编解码器的插入损耗。

3 基于 SSFBG 的相干 OCDMA 性能分析

在相干扩时 OCDMA 系统中,需要考虑三种噪声:多址干扰(MAI)、差拍噪声和接收机噪声(含热噪声和散粒噪声)。

假定 OCDMA 网络中有 K 个异步接入用户。如果在某一时刻系统中有 m ($0 < m < K$) 个干涉信号同时出现,则光电探测器接收到的目标信号光场为

$$E(t) = \sqrt{P_d} \exp[j\omega_d t + \phi_d(t)] + \sum_{i=1}^m \sqrt{P_i} \exp[j\omega_i(t - \tau_i) + \phi_i(t - \tau_i)], \quad (2)$$

其中 P_d 和 P_i 分别为目标解码信号和干涉信号的光场强度, ω_d 和 ω_i 以及 ϕ_d 和 ϕ_i 分别为这些目标解码信号和干涉信号的光频率以及相位噪声, τ_i 为干涉信号相应的网络传输时延。

在理想的开关键控(OOK)OCDMA 系统中, 常假定探测器在码片速率量级对信号进行探测, 接收机带宽约为码片速率大小, 则接收机中等效积分器的积分时间为码片周期 T_c , 探测输出为^[9]

$$Z = T_c R P_d + T_c R \sum_{i=1}^m P_i + 2T_c R \sum_{i=1}^m \sqrt{P_d P_i} \cos(\Delta\phi_{id}) + 2T_c R \sum_{j=i+1}^m \sum_{i=1}^{m-1} \sqrt{P_i P_j} \cos(\Delta\phi_{ij}) + \int_0^{T_c} n_0(t) dt, \quad (3)$$

式中 R 为探测器的响应度, n_0 为接收机噪声电流。(3) 式中的第一项为期望接收的目标信号, 第二项表示多址干扰, 而第三和第四项分别为一阶目标信号—干涉差拍噪声以及二阶干涉—干涉差拍噪声, 最后一项为接收机噪声。这里, 我们考虑差拍噪声影响最严重的情况, 即假定期望接收的目标信号和干涉信号的偏振态是相同的。 $\Delta\phi_{id}$ 和 $\Delta\phi_{ij}$ 分别导致了一阶差拍噪声和二阶差拍噪声, 它们为分布在 $[-\pi, \pi]$ 区间的随机变量。

OCDMA 系统的误码率可以表示为

$$p_e = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{K-1} p(m) \left[\left(2 - \frac{T_c}{T_b}\right) p_e(1/0)(m) + \frac{T_c}{T_b} p_e(0/1)(m) \right], \quad (4)$$

式中 T_b 为比特周期, $p_e(1/0)(m)$ 和 $p_e(0/1)(m)$ 分别是码片为“0”和“1”时的错误条件转移概率。另外, (4) 式中 $p(m)$ 为在探测码片间隔内 $K-1$ 个干涉用户中有 m 个用户同时传“1”的概率, 该概率服从二项式分布

$$p(m) = \binom{K-1}{m} \left(\frac{1}{2}\right)^{K-1}. \quad (5)$$

假定差拍噪声、MAI 噪声和接收机噪声都为高斯分布, 则错误条件转移概率为

$$p_e(1/0)(m) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{P_d(D - m\epsilon)}{\sqrt{2\sigma_0^2}} \right], \quad (6)$$

$$p_e(0/1)(m) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{P_d(1 + m\epsilon - D)}{\sqrt{2\sigma_1^2}} \right], \quad (7)$$

式中 D 为判决阈值, σ_0^2 和 σ_1^2 分别表示码片为“0”和

码片为“1”时总噪声的方差

$$\sigma_0^2 = \sigma_{\text{MAI}}^2 + \sigma_{\text{beat-0}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2 + \sigma_{\text{sh-0}}^2 = m\epsilon^2 P_d^2 + m(m-1)\epsilon^2 P_d^2 + N_{\text{th}} B_R + 2eB_R R P_d m\epsilon, \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = \sigma_{\text{MAI}}^2 + \sigma_{\text{beat-1}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2 + \sigma_{\text{sh-1}}^2 = m\epsilon^2 P_d^2 + [2m\epsilon + m(m-1)\epsilon^2] P_d^2 + N_{\text{th}} B_R + 2eB_R R P_d (1 + m\epsilon), \quad (9)$$

式中 ϵ 为干涉信号产生的串扰平均值, 定义为干扰信号功率平均值与目标信号功率间的比值 $\epsilon \equiv \langle P_i \rangle / P_d$ 。如果相干 OCDMA 系统的地址码采用常用的码长为 N 的双极性码 Gold 序列, 则 $\epsilon \approx 1/N$ 。 B_R 为接收机带宽, N_{th} 为热噪声功率谱密度, 其典型值约为 $1 \text{ pA}^2/\text{Hz}$ 。

在实际的带宽受限 OOK-OCDMA 系统中, 假定接收机带宽为 B , 则接收机中等效积分器的积分时间为 $T_r = 1/B$, 探测输出为

$$Z = T_c R P_d + T_r R \sum_{i=1}^m P_i + 2T_c R \sum_{i=1}^m \sqrt{P_d P_i} \cos(\Delta\phi_{id}) + 2T_r R \sum_{j=i+1}^m \sum_{i=1}^{m-1} \sqrt{P_i P_j} \cos(\Delta\phi_{ij}) + \int_0^{T_r} n_0(t) dt, \quad (10)$$

假定 $r = T_r/T_c$, 则码片为“0”和码片为“1”时总噪声的方差变为

$$\sigma_{0b}^2 = rm\epsilon^2 P_d^2 + rm(m-1)\epsilon^2 P_d^2 + N_{\text{th}} B + 2eBR P_d r m\epsilon, \quad (11)$$

$$\sigma_{1b}^2 = rm\epsilon^2 P_d^2 + [2m\epsilon + rm(m-1)\epsilon^2] P_d^2 + N_{\text{th}} B + 2eBR P_d (1 + rm\epsilon). \quad (12)$$

图 5 给出了异步接入 OOK-OCDMA 系统的误码率 (BER) 性能曲线, 数据传输速率假定为

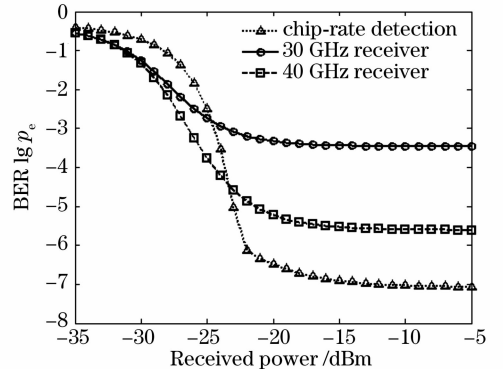


图 5 OCDMA 系统误码率 (用户数 $K=10$)

Fig. 5 BER of OCDMA system with $K=10$ active users

622 Mbit/s,同时接入 OCDMA 网络的用户数为 $K=10$ 。图 5 中的点三角线表示理想码片速率探测系统的误码率,而实际接收机带宽为 30 GHz 和 40 GHz 的 OCDMA 系统误码率分别由图中的实圆线和虚方线表示。从图中可以清楚地看到 OCDMA 系统中接收机的带宽限制导致了明显的系统性能下降。这里,采用了固定阈值判决,地址码为码长 $N=511$ 的双相 Gold 序列码。

采用光阈值技术可以抑制 OCDMA 系统中的干扰和噪声并进而提高系统性能,常用的光阈值器件有非线性光学环境(NOLM)^[10]和周期极化铌酸锂(PPLN)波导^[11]等。在解码光栅和接收机之间插入光阈值器件可以抑制低强度的干扰和噪声,采用理想的光阈值器件可以完全消除多址干扰(MAI)和二阶拍噪声。另外,还可以采用信道编码如 turbo 编码来进一步提高相干 OCDMA 系统的性能由码字的码重分布可以推导出 turbo 编码通信系统的误码率上限,该误码率可表示为

$$p_b \leq \sum_{k=1}^L \sum_{d_1=0}^L \sum_{d_2=0}^L \frac{k}{L} A(k, d_1, d_2) p_e(k, d_1, d_2), \quad (13)$$

式中 L 为交织器的长度, $A(k, d_1, d_2)$ 表示码重为 k 的输入比特序列和码重分别为 d_1 和 d_2 的校验比特序列产生的 turbo 码的码字数。

$p_e(k, d_1, d_2)$ 表示码重为 k 的信息序列和码重分别为 d_1 和 d_2 的校验序列产生的码字的误码率。将带宽受限 OCDMA 系统中接收信号的均值和噪声方差乘以 $(k + d_1 + d_2)$, 就可以得到 turbo 编码系统信号的均值和噪声方差。另外,用 $p^{(k+d_1+d_2)}(m)$ 代替(4)式中的概率 $p(m)$, 可由该式推导出误码率 $p_e(k, d_1, d_2)$, 最后由(13)式可以得到采用 turbo 编

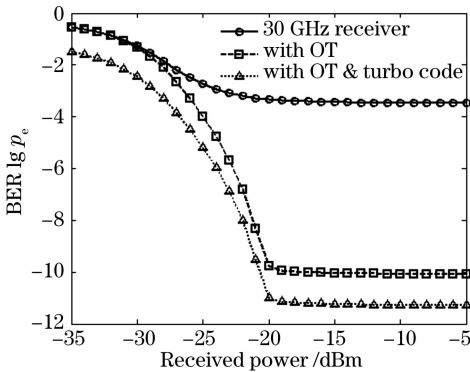


图 6 带宽受限 OCDMA 系统误码率(用户数 $K=10$)
Fig. 6 BER of bandwidth limited OCDMA system with $K=10$ active users

码的带宽受限 OCDMA 系统的误码率。

图 6 给出了带宽受限 OCDMA 系统的误码率性能曲线,其中的虚方线表示采用光阈值技术的系统误码率,而点三角线表示同时采用光阈值判决和 turbo 编码的系统误码率。从图中可以看到,采用光阈值判决可以较有效地抑制干扰和噪声从而减小带宽受限 OCDMA 系统的误码率。另外,采用 turbo 编码可以进一步提高带宽受限 OCDMA 系统的性能,这里假定交织器长度 $L=4$ 。

4 结 论

计算结果表明,输入脉冲宽度的增加和 SSFBG 的折射率调制振幅 Δn 的增加,会使编解码光栅的相关性能下降,即多用户干扰的影响增加。SSFBG 编解码器的相关性能和插入损耗之间存在矛盾,需要选择适中的 Δn (如 1.5×10^{-4})。编解码光栅之间的波长偏移也会严重影响编解码的效果,应采用温度控制和光栅封装来使波长偏移量小于 0.06 nm。分析了基于 SSFBG 的相干扩时 OCDMA 系统性能。结果表明,接收机的带宽限制导致了相干 OCDMA 系统的性能下降,而采用光阈值技术能有效地抑制干扰和噪声引起的性能恶化;另外,采用 turbo 编码可以进一步提高相干扩时 OCDMA 系统性能。

参 考 文 献

- 1 K. Kitayama, H. Sotobayashi, N. Wana. Optical code division multiplexing (OCDM) and its application to photonic networks [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science*, 1999, **E82-A**(12):2616~2626
- 2 P. Petropoulos, N. Wada, P. C. Teh *et al.*. Demonstration of a 64-chip OCDMA system using superstructured fiber gratings and time-gating detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(11):1239~1241
- 3 Chen Xiaogang, Yuan Xiuhua, Huang Dexiu. Quaternary phase encoding and decoding of ultrafast pulses at 40 Gb/s [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):29~33
陈小刚,元秀华,黄德修. 40Gb/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
- 4 P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen. Phase encoding and decoding of short pulses at 10 Gb/s using superstructured fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(2):154~156
- 5 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructured fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):77~81
陈小刚,黄德修,元秀华等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码复用系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):77~81

- 6 B. Sergio, M. Guido. Unveiling turbo codes: some results on parallel concatenated coding schemes [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1996, **42**(2):409~428
- 7 Chen Jun, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Analysis of free space optics system based on twofold turbo code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1532~1536
陈 俊, 黄德修, 元秀华. 基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1532~1536
- 8 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 9 X. Wang, K. Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(10):2226~2235
- 10 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Suppression of interchannel interference noise in 40 Gb/s optical code division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1570~1574
陈小刚, 黄德修, 元秀华. 抑制信道间干涉的 40 Gb/s 光码分复用系统[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1570~1574
- 11 Z. Jiang, D. Seo, S. Yang *et al.*. Four-user 10-Gb/s spectrally phase-coded O-CDMA system operating at ~ 30 fJ/bit [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3):705~707