

高速光纤传输系统中三阶色散效应影响研究

余震虹 谢枫锋*

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 利用OptiSystem软件,对高速光纤传输系统中三阶色散(TOD)导致的脉冲失真进行了仿真研究。分析了光脉冲信号通过光纤传输系统传输 2000 km,不同的速率、占空比、脉冲形状和光纤类型对三阶色散的影响,同时比较了高斯脉冲和超高斯脉冲经过 2000 km 传输后的品质因数,发现高斯脉冲的品质因数优于超高斯脉冲的品质因数。通过仿真分析得出:当同时考虑群速度色散(GVD)和三阶色散的时候,标准单模光纤(SSMF)和啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)组成的高速光纤传输系统性能表现较好。

关键词 光纤光学;三阶色散;群速度色散;色散补偿

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.050604

Study of the Effects of Third-Order Dispersion in Ultra-High Speed Optical Fiber Communication System

Yu Zhenhong Xie Fengfeng

College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract We analyze pulse distortions due to the third-order dispersion (TOD) in ultra-high-speed optical fiber communication by using OptiSystem software. The effects of TOD are observed considering the variation of different factors such as bit rate, duty cycle, pulse shape and fiber type when pulse signals are transmitted through optical fiber communication system at a transmission distance of 2000 km. Meanwhile, we find that Q-factor of Gaussian pulses is better than that of super-Gaussian pulses at a transmission distance of 2000 km. The simulation results show that the performance of a standard single-mode fiber chirped fiber Bragg grating (SSMF-CFBG) system is better in ultra-high-speed application when both group velocity dispersion (GVD) and TOD effects are considered.

Key words fiber optics; third order dispersion; group velocity dispersion; dispersion compensation

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 070.4340; 070.4790

1 引言

在现代光通信系统中,常采用由直接调制半导体激光器^[1]产生的光脉冲作为信号脉冲。随着信息产业的快速增长,光纤传输系统向着更快速和更大的容量发展。随着速度和传输距离的增加,对于非线性^[2]的影响可以通过适当地控制入纤功率加以利用或者减弱,而色散^[3-4]就成了光纤传输系统中主要的限制因素。因此在光纤传输系统中不仅需要补偿群速度色散(GVD)^[5],还要补偿三阶色散(TOD)^[5-6]。目前,人们已提出一些可能的技术方案来解决色散补偿^[7-8]问题,其中有两种方法使用比较广,一种是色散补偿光纤(DCF)补偿^[9],另外一种是非啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)补偿^[10]。本文分析了在归零码(RZ)^[11]调制下 40、100、160 Gb/s 的光纤传输系统中三阶色散对系统的影响,同时比较分析了不同的速率、占空比和传输模式在传输高斯脉冲和超高斯脉冲时三阶色散对系统的影响。

收稿日期: 2013-11-26; 收到个改稿日期: 2013-12-18; 网络出版日期: 2014-04-30

基金项目: 江苏省光纤气体工程技术研究中心基金

作者简介: 余震虹(1962—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信和通信信号处理等方面的研究。

E-mail: yuzhenhong@163.com

*通信联系人。E-mail: qdxiiefengfeng@163.com

2 理论分析

在单模光纤传输系统中,光脉冲越短,三阶色散效应越大。光脉冲在单模光纤中传输演变的过程可以由非线性薛定谔方程^[12]来描述:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + S(z) |E|^2 E = -i\Gamma(z) + ig(z)E + i \frac{\beta_3(z)}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial t^3}, \quad (1)$$

式中 E 为光脉冲包络, z 为传输距离, $\beta_2(z)$ 为群速度色散, $\beta_3(z)$ 为三阶色散, $S(z)$ 为非线性系数, $\Gamma(z)$ 为光纤损耗, $g(z)$ 为放大增益。

设光纤输入端 ($z=0$ 处) 输入的是带有线性啁啾的高斯脉冲, 则脉冲可以表示为

$$E(0, T) = \exp \left[-\frac{1 + C \cdot i \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2m}}{2} \right], \quad (2)$$

式中 C 为入射脉冲的啁啾因子, T_0 表示在 $1/e$ 强度处的半宽, m 为脉冲形状参数。 $m=1$ 为高斯脉冲, $m>1$ 为超高斯脉冲。

如图 1 所示, 传输系统采用啁啾光纤光栅进行色散补偿, 从光源出来的超短光脉冲经过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 调制成 40/100/160 Gb/s 光脉冲, 先进入光纤光栅色散补偿器, 经过 100 km 的标准单模光纤 (SSMF), 用掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行功率放大, 然后再进入光纤光栅色散补偿器实施补偿, 进入环路控制, 其中进行 20 次循环, 也就是总共传输了 2000 km, 最后得到的信号通过低通滤波器 (LPF) 滤除高频噪声, 再利用眼图进行观察。本文采用了两种不同的色散管理模式, 一种是 SSMF 和 CFBG 相结合, 一种是非零色散位移光纤 (NZDSF) 和 CFBG 相结合。

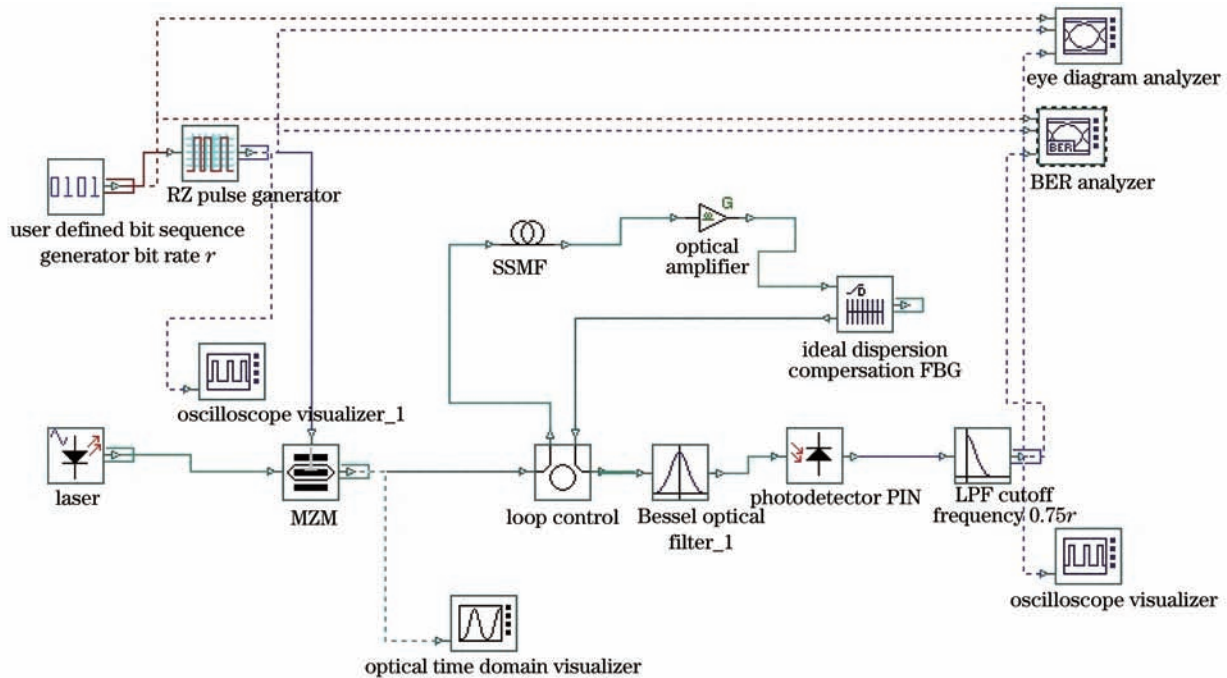


图 1 光纤传输系统的意图

Fig.1 Schematic of optical fiber transmission system

3 仿真分析

仿真实验参数如表 1 所示, 光纤传输系统的速率从 40Gb/s 到 160Gb/s, 可以得到群速度色散和三阶色散导致的脉冲展宽, 通过改变传输距离、速率、占空比、输入的脉冲形状和色散管理模式, 就可以得到脉冲中心的时域偏移量。

通过在光纤传输系统中采用不同速率的高斯脉冲和超高斯脉冲, 可以得到如图 2 所示的三阶色散对传输系统的影响。对应的输入功率是 1 mW, 占空比是 50%。从图 2 中可以看出, 速率从 40 Gb/s 增大到 160 Gb/s 时,

三阶色散效应也随之增大,在速率为 40 Gb/s 时,三阶色散效应可以忽略,而在速率为 100 Gb/s 和 160 Gb/s 时,脉冲的边缘开始了振荡。很明显,三阶色散影响了传输系统的群速度,使得脉冲发生了失真。

表 1 仿真实验参数

Table 1 Parameters of the simulation experiment

Parameter	Value
Center frequency of reference wavelength /THz	193.1
Dispersion of SSMF /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	16
Attenuation of SSMF /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.2
Dispersion slope of SSMF /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.08
Nonlinearity of SSMF /($\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	2.6×10^{-20}
Center wavelength of SSMF /nm	1550
Fiber core area of SSMF / μm^2	50
Attenuation of NZDSF /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.2
Dispersion of NZDSF /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	4.5
Dispersion slope of NZDSF /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.08
3dB bandwidth of CFBG /GHz	120
Dispersion compensation of CFBG /($\text{ps} \cdot \text{m}^{-1}$)	-1600 for SSMF; -450 for NZDSF
Noise of EDFA /dB	4

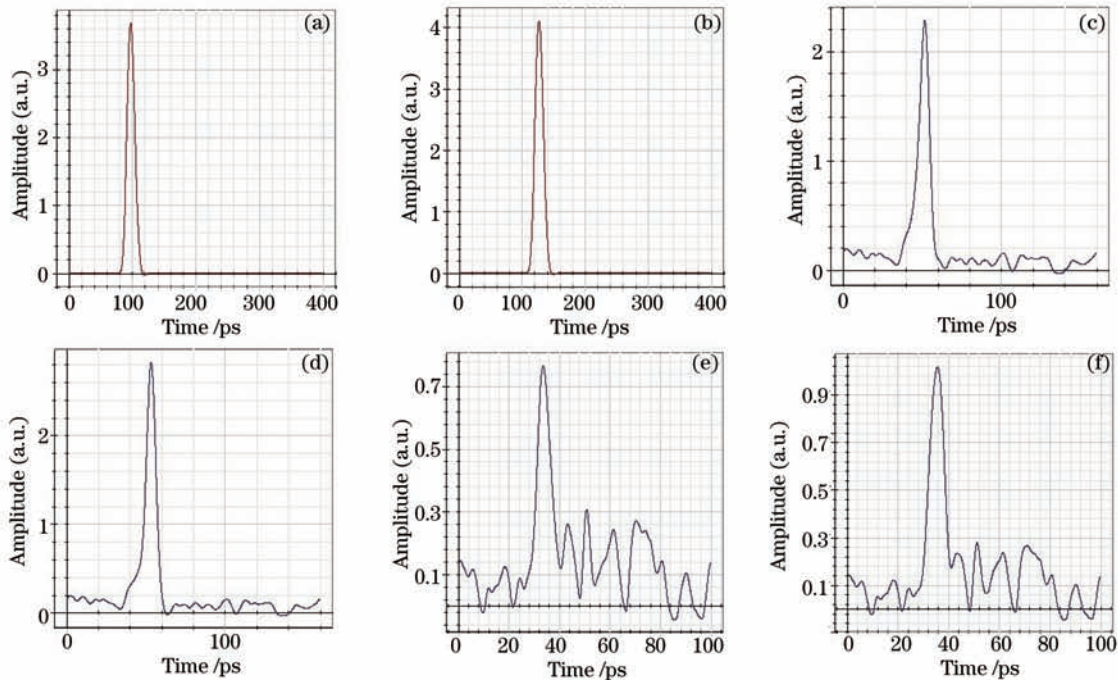


图 2 脉冲传输 2000 km 后的波形。(a) 40 Gb/s 高斯脉冲;(b) 40 Gb/s 超高斯脉冲;(c) 100 Gb/s 高斯脉冲;(d) 100 Gb/s 超高斯脉冲;(e) 160 Gb/s 高斯脉冲;(f) 160 Gb/s 超高斯脉冲

Fig.2 Pulse waveforms of (a) 40Gb/s Gaussian and (b) super-Gaussian, (c) 100 Gb/s Gaussian and (d) super-gaussian, (e) 160 Gb/s Gaussian and (f) super-Gaussian pulses at transmission distance of 2000 km

在图 3 中比较了占空比为 50% 的高斯脉冲通过光纤传输系统后的脉冲中心时域变化,如果仅考虑群速度色散,脉冲中心位置将不会发生改变,而当考虑三阶色散时,脉冲中心位置随着传输距离改变。从图中可以看出,速率为 40 Gb/s 时,传输 2000 km 以后,高斯脉冲中心改变了 3.418 ps,而超高斯脉冲中心改变了 2.825 ps,从而说明了随着传输距离的改变,三阶色散影响着光脉冲中心位置的变化。随着速率的增加,脉冲中心位置变化量也在增加,并且三阶色散效应对高斯脉冲中心位置变化比对超高斯脉冲中心位置变化影响更大。

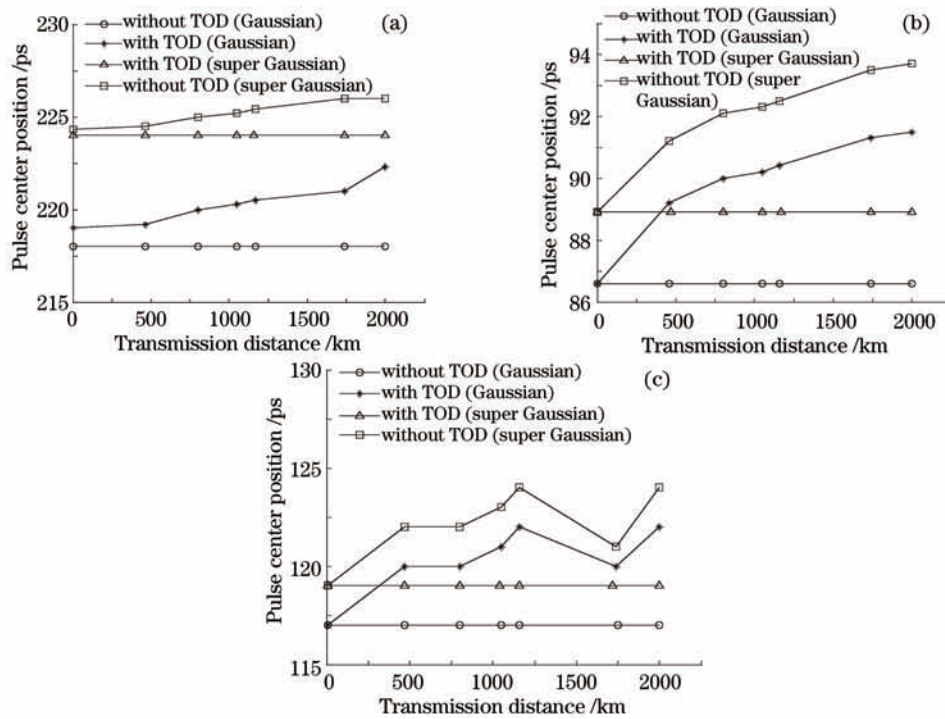


图3 (a) 40 Gb/s; (b) 100 Gb/s; (c) 160 Gb/s 高斯和超高斯脉冲中心位置与传输距离的关系

Fig.3 Change of pulse center position with variation of transmission distance for (a) 40 Gb/s, (b) 100 Gb/s and (c) 160 Gb/s Gaussian and super-Gaussian pulses

随着速率的增大,脉冲在传输 2000 km 后,通过分析可以得到高斯脉冲的品质因数优于超高斯脉冲的品质因数。分析结果如表 2 所示。

表 2 高斯脉冲和超高斯脉冲的品质因数

Table 2 Q-factor of Gaussian and super-Gaussian pluse

Pulse shape	100 Gb/s	160 Gb/s
	Q-factor /dB	Q-factor /dB
Gaussian	7.693	7.232
Super-Gaussian	6.745	6.164

将占空比从 20% 逐渐改变到 80%, 三阶色散引起的 100 Gb/s 高斯脉冲中心位置变化如图 4 所示。在占空比为 20% 和 40% 时, 信号传输 2000 km 后相应的高斯脉冲中心位置变化为 5.052 ps 和 5.061 ps。当占空比超

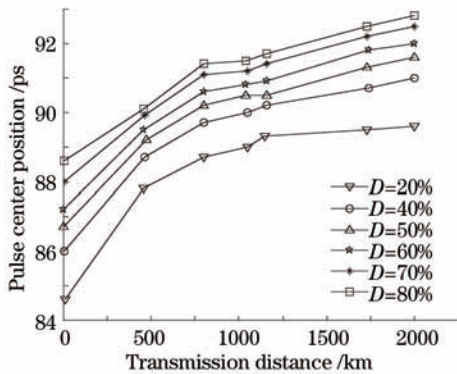


图 4 占空比 D 不同时 100 Gb/s 高斯脉冲中心位置与传输距离的关系

Fig.4 Change of pulse center position with variation of transmission distance under different duty cycles D for 100 Gb/s Gaussian pulses

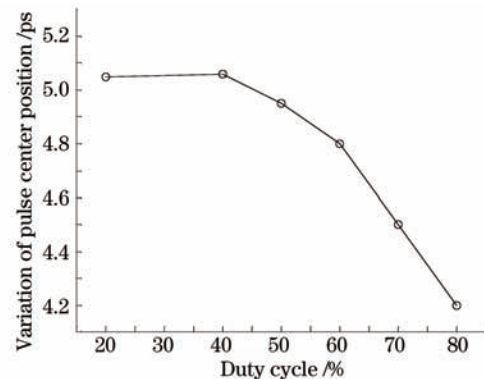


图 5 100 Gb/s 高斯脉冲中心时域变化与占空比的关系
Fig.5 Variation of pulse center position with duty cycle for 100 Gb/s Gaussian pulses

过 50% 时, 脉冲中心位置变化量相对变少。在占空比为 60% 和 70% 时, 信号传输 2000 km 后相应的高斯脉冲中心位置变化为 4.835 ps 和 4.542 ps。

图 5 表明了高斯脉冲中心位置的变化与占空比的关系, 随着占空比的增加, 变化量明显减少。初始脉冲的宽度是和占空比成比例的, 因此随着占空比的增加, 脉冲宽度变大, 同时三阶色散效应相对变小, 高斯脉冲中心位置的变化量也会减小。

光纤的种类不同, 由此而引起的三阶色散效应也不同。如图 6 所示, 同样是 100 Gb/s 的高斯脉冲传输系统, 采用 NZDSF-CFBG 组合的脉冲中心时域变化量比 SSMF-CFBG 组合的少。

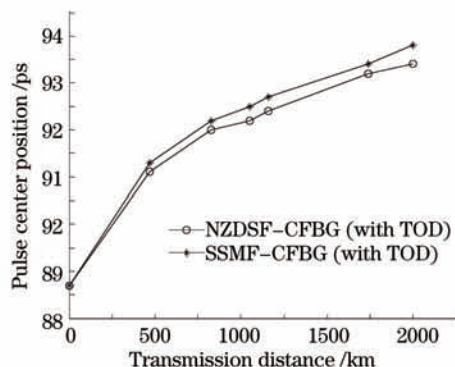


图 6 在不同的光纤中 100 Gb/s 高斯脉冲中心位置与传输距离的关系

Fig.6 Change of pulse center position with variation of transmission distance for different fiber types for 100 Gb/s Gaussian pulses

4 结 论

通过对不同的速率、传输距离、占空比、脉冲形状和传输模式对三阶色散效应影响的分析, 得出了以下结论: 三阶色散导致脉冲展宽, 脉冲边缘产生振荡, 同时脉冲中心会产生时域偏移, 随着速率的增加, 脉冲中心时域偏移也会变大, 脉冲中心时域偏移也受占空比、脉冲形状和光纤类型影响。当速率是 40 Gb/s 时, 脉冲边缘的振荡可以忽略, 但是速率增加到 100 Gb/s 时, 脉冲边缘发生了振荡, 传输系统中的三阶色散效应不容忽视。当光纤传输系统采用 SSMF-CFBG 的时候, 高斯脉冲的传输性能表现比较好。通过以上研究, 为光纤传输系统往更高的传输速率和更长的传输距离发展提供了一定依据。

参 考 文 献

- Chen He, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. Research progress on ultrafast gain-switching laser diode system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110001.
陈 河, 陈胜平, 侯 静, 等. 超短脉冲增益开关半导体激光系统研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110001.
- Lin Mi, Zhang Yang'an, Zhang Jinnan, *et al.*. Influence of nonlinear effects in 112 Gbit/s transmission Co-propagating multi-rate neighbors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306006.
林 密, 张阳安, 张锦南, 等. 112 Gbit/s 信号混传多种速率信号的非线性效应影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306006.
- Cao Wenhua, Wang Yong, Liu Songhao. Dispersion and nonlinearity compensation in optical fiber communication systems by optical phase conjugation incorporated pulse prechirp [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0906005.
曹文华, 王 勇, 刘颂豪. 光纤通信系统中基于光学相位共轭和预啁啾的色散及非线性补偿研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0906005.
- Qu Li, Meng Yu, Zhuo Zhongchang, *et al.*. Study on delay and dispersion characteristics of the fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0806001.
屈 丽, 孟 瑜, 卓仲畅, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔时延和色散特性的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0806001.
- Ze Li, Hao Chi, Xianmin Zhang, *et al.*. Pulse distortions due to third-order dispersion and dispersion mismatches in a phase-modulator-based temporal pulse shaping system [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(19): 2865-2872.
- Xiaoxiao Xue, Xiaoping Zheng, Hanyi Zhang, *et al.*. Analysis and compendation of third-order-dispersion induced RF distortions in highly reconfigurable microwave photonic filters [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(13): 2263-2270.

- 7 Li Chengshuai, Shen Weidong, Zhang Yueguang, *et al.*. Measurement of group delay dispersion of dispersive mirror based on white-light interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1031003.
李承帅, 沈伟东, 章岳光, 等. 基于白光干涉测量色散补偿薄膜的群延迟色散[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1031003.
- 8 Namiki S. Wide-band and-range tunable dispersion compensation through parametric wavelength conversion and dispersive optical fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(1): 28-35.
- 9 Tang Xiaohui, Zhang Wen, He Ning. DCF-based long-distance optical fiber communication systems dispersion compensation [J]. *Optical Communication Technology*, 2009, 33(11): 42-43.
唐晓辉, 张文, 何宁. 基于DCF长距离光纤通信系统的色散补偿[J]. *光通信技术*, 2009, 33(11): 42-43.
- 10 Cao Jihong, Wang Muguang, Zhang Jianyong, *et al.*. 40 Gb/s NRZ transmitted over 500 km based on broadband dispersion compensation CFBG [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(2): 167-171.
曹继红, 王目光, 张建勇, 等. 40 Gb/s NRZ在基于宽带CFBG色散补偿的G.652光纤中无电中继传输500 km[J]. *光学技术*, 2011, 37(2): 167-171.
- 11 Hui Zhanqiang, Zhang Jianguo. Recent progress in all-optical NRZ-to-RZ format conversion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060003.
惠战强, 张建国. 全光非归零(NRZ)到归零(RZ)码型转换技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060003.
- 12 G P Agrawal. *Application of Nonlinear Fiber Optics* (2th edition) [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin, *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
G P Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用(第二版)*[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2010.