

基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统

孟天晖 于晋龙 王 菊 孙 斌 苗 旺 王文睿 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072)

摘要 利用色散位移光纤(DSF)中四波混频效应在闲频光波长处增益的指数增长特性及增益饱和特性,提出了一种基于恶化信号抽运的 2×40 Gb/s 的双波长全光 3R(再放大、再整形、再定时)再生实验方案。对再生原理做了理论分析和实验验证,完成了 1550.92 nm 和 1557.36 nm 两个波长上不同恶化信号的全光再生实验,将恶化信号的接收机灵敏度分别由 -20.3 dBm、 -20.4 dBm 改善到 -27.3 dBm、 -25.6 dBm,灵敏度改善量为 7.0 dB 和 5.2 dB。系统实验验证了理论分析的结果,对于解决波分复用(WDM)系统中多路信号的同时再生问题提出了一种可行的解决方案。

关键词 光通信;3R(再放大、再整形、再定)再生;四波混频;光信号处理

中图分类号 TN914.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0806004

2×40 Gb/s All-Optical 3R Regeneration System Using Four-Wave Mixing in Dispersion Shifted Fiber

Meng Tianhui Yu Jinlong Wang Ju Sun Bin Miao Wang Wang Wenrui Yang Enze

(Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electronic and Information Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Using the exponential growth of idler gain and the properties of gain saturation of the four-wave mixing effect in a dispersion-shifted fiber (DSF), a 2×40 Gb/s two-channel all-optical 3R (re-amplification, re-shaping, re-time) regeneration system based on degraded signal pump is proposed. The theoretical analysis and experimental validation of the regenerative principle are conducted, and the regeneration experiment of different degraded signals in two wavelengths of 1550.92 nm and 1557.36 nm is completed. The receiver sensitivity (power penalty) of the degraded signals is improved from -20.3 dBm to -27.3 dBm and from -20.4 dBm to -25.6 dBm. The amount of improvement is 7.0 dB and 5.2 dB. System experimental results verify the theoretical analysis. A viable solution is proposed to solve the problem of simultaneous multi-channel signal regeneration in wavelength division multiplex (WDM) system.

Key words optical communications; 3R (re-amplification, re-shaping, re-time) regeneration; four-wave mixing (FWM); optical signal processing

OCIS codes 060.2330; 190.4380; 200.6015

1 引 言

随着信息产业的不断发展,对扩展光通信网络容量的需求逐渐增强。同时,传输系统对 40 Gb/s

及以上传输速率的要求不断提高,而且信号需要进行长距离传输,途经很多转换节点。如此高速的传输系统,对于由色散、非线性效应、放大器的噪声所

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-04-15

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603)和(2012CB315704)资助课题。

作者简介: 孟天晖(1988—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。

E-mail: mengtianhui@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn(通信联系人)

导致的信号恶化有更为严格的要求。所以,高速的3R(再放大、再整形、再定时)再生系统将成为光传输网络中一个必不可少的元素。尽管目前基于电路处理的3R再生系统已可以满足40 Gb/s的传统要求,但对于更高的速率全光3R再生依然有其特有的优势。另一方面,对于目前常见的波分复用(WDM)传输系统而言,采用常见的单路3R再生技术会导致系统成本、能耗和系统复杂性随着波长数的增加线性增加。而全光再生技术存在多路信号同时再生的能力,可以大大降低系统的成本和复杂性。

为了实现全光3R再生,许多机构都做了大量的研究。现阶段,3R再生主要有以下几种实现方案:利用电吸收放大器(EAM)中的交叉吸收调制(XAM)^[1,2];利用半导体光放大器(SOA)中的交叉增益调制(XGM)或交叉相位调制(XPM)^[3,4];利用高非线性光纤(HNLF)中的自相位调制(SPM)及四波混频效应(FWM)等非线性效应^[5~7]。韩国的Chung等^[1]利用EAM实现了40 Gb/s的光判决,我国清华大学也实现了40 Gb/s的光判决^[2],但此方案由于XAM的制约,要实现同时处理多路信号比较困难。基于SOA的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)进行判决的方案也有报道^[3,4],此方案的缺点是器件对称性要求高,作为基本开关元件复杂度过高。非线性光纤和非线性波导从理论上讲完全可以同时对多波长信号进行并行处理^[8,9],从而能够大大降低多波长再生系统的复杂度与成本。日本Osaka大学利用HNLF进行了双波长的信号再生实验^[7],此方案利用高阶四波混频效应,四波混频效率较低,并且以连续光做抽运,再生效果有限。国内杂志也有关于利用高非线性光纤中的参量放大效应进行全光信号处理和信号再生实验的报道^[9,10],将时钟作为抽运光,利用增益饱和特性,可以很好地抑制“1”码上的幅度噪声,但是“0”码由于处于线性放大区,幅度噪声将会被线性放大,因此时钟抽运方案存在“0”码和“1”码信号再生不均匀的问题。对于WDM系统,一个直接对WDM信号进行再生的方案^[11]是将输入信号先输入解复用器(DMUX)进行解复用后再分别再生,此方案属于单路再生,其成本和可靠性的优势随波长数增加被大大抵消;另一个方案是美国普林斯顿大学研究人员利用太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)将多路WDM信号进行并串转换,然后对高速串行信号进行全光再生^[12,13],该方案的明显缺陷是其要求各波长上的信号必须有相同的时钟信号,因此不适于非同步网络;而且多波长信

号必须经过时序调整再进行复用,从时间上看仍然是单路3R再生。

本文提出了一种基于色散位移光纤(DSF)中四波混频效应的多路再生方案并进行了实验测试。与已有利用四波混频效应进行再生的方案相比,利用恶化信号抽运作为光判决门的开关,可同时对信号“0”码和“1”码上的噪声进行抑制,解决时钟抽运方案再生不均匀的问题。利用双向注入方式解决由于非线性光纤中存在的XPM和XGM等非线性效应导致的信道间串扰。而且,由于采用双向分离时钟,双路信号不会通过时钟信号产生相互串扰。提出的多路全光3R再生系统在系统成本、复杂性和对WDM系统的适用性上较其他方案有优势。最终实验完成了对波长为1550.92 nm和1557.36 nm的两路40 Gb/s恶化信号的再生实验,并进行了系统的误码率(BER)测试。

2 系统原理分析

四波混频过程中,闲频光的增益可以近似认为与闲频光波长处的参量放大(FOPA)增益成正比。在强抽运和弱信号的情况下,闲频光的增益可以描述为^[14,15]

$$G_0 = \left[\gamma P_{s0} L \frac{\sinh(gL)}{gL} \right]^2, \quad (1)$$

式中 γ 为光纤的非线性系数, P_{s0} 为输入光功率, L 为光纤长度, g 为参量增益。在相位完全匹配时,闲频光得到的增益将达到最大,(1)式中 $g = \gamma P_p$,此时

$$G_{0,\max} \approx \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_{s0} L), \quad (2)$$

由(2)式可以看出,在光纤长度一定的情况下,闲频光处的增益随着输入光功率的增大呈指数增长状态。信号的“0”码对应抽运功率小的情况,此时指数增长的增益特性可以有效抑制“0”码上的噪声。

但实际情况下,闲频光波长处的增益不是按理想的指数型增长,而是出现饱和现象。当输入信号光功率增大时,会发生以下两种情况:1)当输入抽运光功率继续增大时,将会改变信号间的非线性相移,从而逐步破坏四波混频中的相位匹配条件,使四波混频效应中闲频波长处的增益降低;2)随着输入光功率的增大,光纤中四波混频的转换效率提高。这种效率的提高与指数增益成正比,从而产生高阶四波混频分量。输入光的能量将会被转移到距离中心波长更远的波长上,从而抑制了低阶闲频光处增益

实验设置分为 3 个部分:信号恶化部分、全光时钟提取部分和多波长全光信号判决部分。

产生的两路 40 Gb/s 信号携带的是 7 阶的伪随机二进制序列(PRBS),使用不同的 PRBS 信号驱动(两个伪随机码发生模块)独立调制,两路信号光载波波长分别为 $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm 和 $\lambda_{s2} = 1557.36$ nm。两路信号经掺铒光纤放大器 EDFA-1 放大后,进入信号恶化部分。一个完整的信号恶化过程应该包括两个部分:时间抖动和幅度噪声。一方面,用 625 Mb/s 的正弦微波信号通过相位调制器(PM)对信号进行相调,然后进入 1.7 km 长普通单模光纤(SMF),通过其色散在信号上增加抖动。另一方面,无阈值的掺铒光纤放大器的自发辐射噪声(ASE)经滤波后与加了抖动的信号一同进入耦合器(OC),给信号增加带内 ASE 噪声。至此完成对信号的恶化。

恶化后的信号由光耦合器分成两部分,一部分进入系统的全光时钟提取部分。信号光经过可调光

带通滤波器 OBPF-1 滤出 $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm 通道的信号,与可调光源 TLD-1 发出的连续光一同注入半导体光放大器 SOA-1,输出端用带宽为 1 nm 的光带通滤波器 OBPF-2 滤出红移分量,实现了从输入信号的波长到 TLD-1 的波长的转换。波长变换后的信号进入一个自由光谱区(FSR)约为 40 GHz、精细度为 1012 的法布里-珀罗滤波器(FPF),利用其梳状透射谱滤出信号中的时钟分量从而提取出时钟。而通过调整 TLD-1 的输出波长可以使变换后的波长与法布里-珀罗滤波器的透射窗口对准。这样的设置,可以使系统的时钟提取部分与输入信号波长无关,提高系统的适用性。为了进一步抑制提取出时钟信号的低频噪声,将其通过一个增益饱和的半导体光放大器 SOA-2,利用其自增益调制(SGM)作用完成对时钟低频噪声的抑制^[16~18]。实验中得到波长 λ_c 为 1554.13 nm、质量较好的 40 Gb/s 时钟。图 3 为提取出的时钟的眼图和谱图。

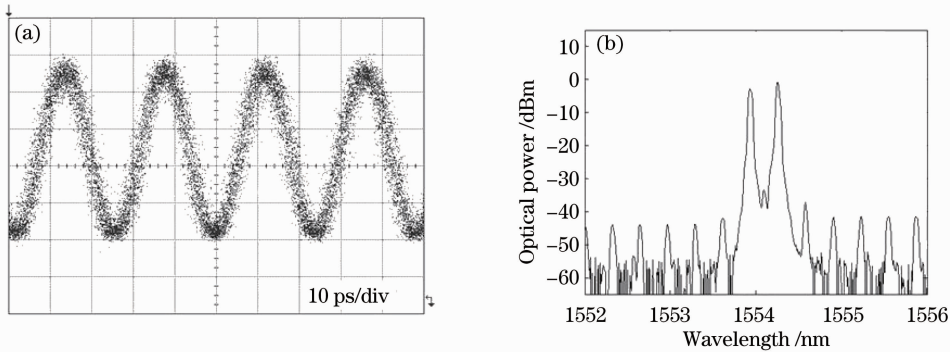


图 3 (a)时钟信号眼图;(b)时钟信号谱图

Fig. 3 (a) Eye diagram of clock; (b) Spectrum diagram of clock

恶化信号的另一部分与提取出的时钟一同进入多波长全光判决部分。恶化信号由大功率掺铒光纤放大器 HP-EDFA-1 放大后进入光波分复用器 WDM-1。两路放大的信号分别由对应的通道 λ_{s1} 和 λ_{s2} ,各自经过一个偏振控制器和光延时线进入波分复用器 WDM-2 和 WDM-3 的对应通道中。提取出的时钟由 HP-EDFA-2 放大后由耦合器分成两路分别进入 WDM-2 和 WDM-3 的 λ_c 通道。光延时线用来将两路信号与时钟对准。WDM-2 的 com 口传出的光进入环行器 CIR-1 的 1 口,由 2 口传出的光注入到 DSF 中,利用 DSF 中的四波混频效应对信号进行再生,再由 CIR-2 的 3 口传出信号,用可调组合光带通滤波器 OBPF-4 滤出四波混频后的长闲频处信号 λ_{i1} ,得到第一路 λ_{s1} 的再生信号。同样的,由 CIR-1 的 3 口传出的信号,用可调组合光带通滤波

器 OBPF-5 滤出四波混频后的短闲频处信号 λ_{i2} ,得到第二路 λ_{s2} 的再生信号。实验中采用的 DSF 长度为 3.2 km,零色散波长为 1553 nm,色散斜率为 0.077。图 4 和图 5 分别给出了 $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm 和 $\lambda_{s2} = 1557.36$ nm 两路信号恶化前、恶化后、再生后的信号眼图和四波混频谱图。由图中可以看出,经过恶化部分,原始信号被加入了时间抖动。“0”和“1”码上的噪声。

双路再生信号分别进入接收机,得到的电信号接入误码仪,进行误码率的测试。实验中使用的接收机是德国 U2T 公司型号为 XPRV2021 的 43 Gb/s 宽带光接收机。测试得到的误码率测试结果如图 6 所示。

由图 6 所示,两路信号在误码率为 10^{-9} 时,背对背信号的接收机灵敏度分别为 -28.3 dB 和一

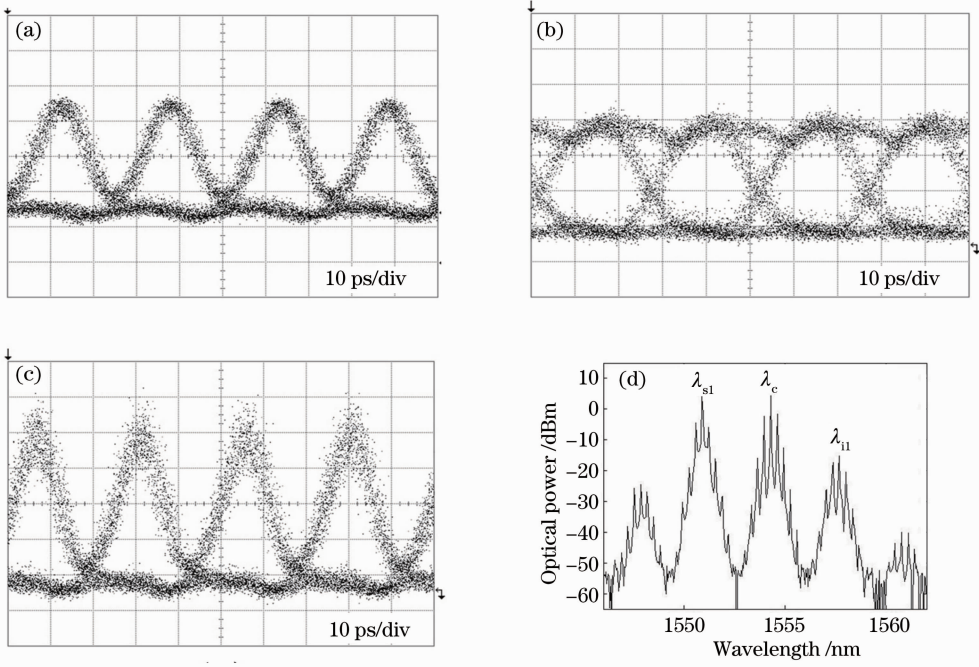


图 4 $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm。(a) 恶化前信号眼图；(b) 恶化后信号眼图；(c) 再生信号信号眼图；(d) 四波混频谱图

Fig. 4 $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm. (a) Eye diagram of original signal; (b) eye diagram of degraded signal; (c) eye diagram of regenerated signal; (d) spectrum diagram of FWM

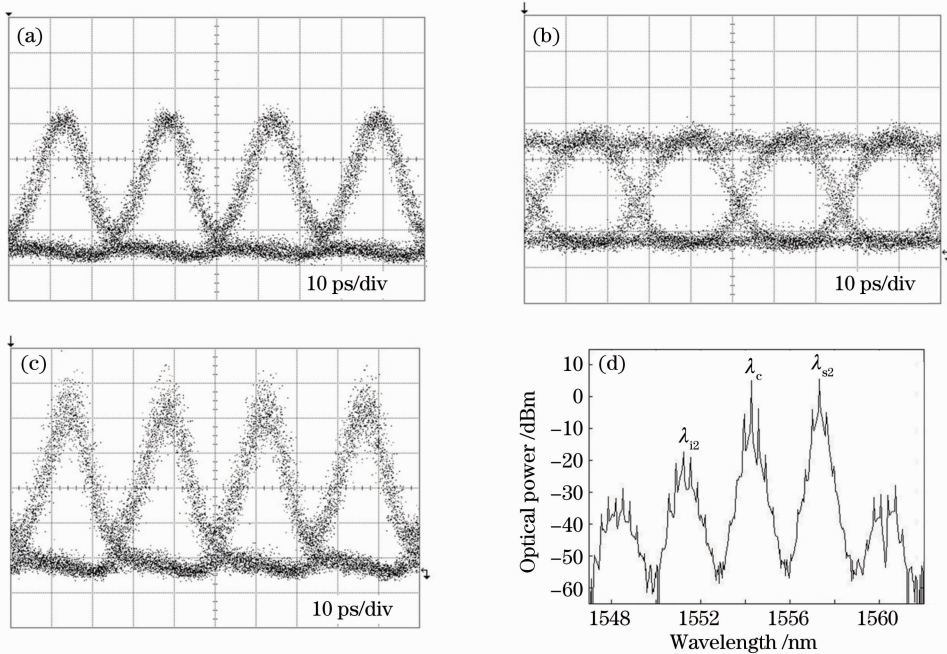
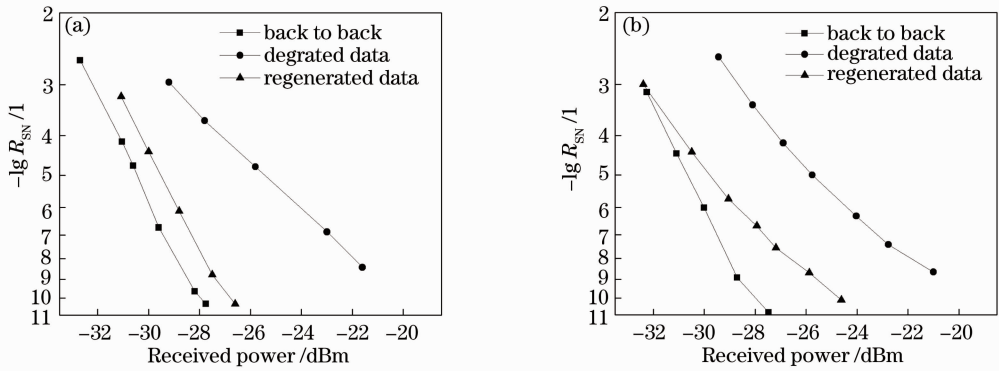


图 5 $\lambda_{s2} = 1557.36$ nm。(a) 恶化前信号眼图；(b) 恶化后信号眼图；(c) 再生信号信号眼图；(d) 四波混频谱图

Fig. 5 $\lambda_{s2} = 1557.36$ nm. (a) Eye diagram of original signal; (b) eye diagram of degraded signal; (c) eye diagram of regenerated signal; (d) spectrum diagram of FWM

28.5 dB, 恶化信号的接收机灵敏度为 -20.3 dB 和 -20.4 dB, 两路信号的接收机灵敏度分别恶化 38.0 dB 和 8.1 dB; 经过文中提出的 3R 再生系统, 第一路信号 $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm 在误码率为 10^{-9} 时, 恶化信号的接收机灵敏度由 -20.3 dBm 改善到

-27.3 dBm; 另一路信号 $\lambda_{s2} = 1557.36$ nm 在误码率为 10^{-9} 时, 接收机灵敏度由 -20.4 dBm 改善到 -25.6 dBm。灵敏度改善量分别为 7.0 dB 和 5.2 dB。再生系统对恶化信号有明显的再生效果, 从而验证了第 2 节的理论分析。

图 6 误码率测试图。(a) $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm; (b) $\lambda_{s2} = 1557.36$ Fig. 6 Test diagram of BER. (a) $\lambda_{s1} = 1550.92$ nm; (b) $\lambda_{s2} = 1557.36$

4 结 论

提出了一种基于 DSF 中四波混频效应,以恶化信号作为抽运光的多路全光 3R 再生方案,进行了实验测试,解决了时钟抽运方案再生不均匀的问题。利用双向注入解决了由于非线性光纤中存在的 XPM 和 XGM 等非线性效应导致的信道间串扰。最终完成了对两路 40 Gb/s 恶化信号的同时再生实验,并进行了系统的误码率测试。实验结果中系统的接收机灵敏度改善量最大为 7.0 dB。

参 考 文 献

- H. S. Chung, R. Inohara, K. Nishimura *et al.*. 40-Gb/s NRZ wavelength conversion with 3R regeneration using an EA modulator and SOA polarization-discriminating delay interferometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 337~339
- Lou Caiyun, Yang Yanfu, Huo Li *et al.*. 40 Gb/s all optical 3R regeneration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1467~1471
娄采云, 杨彦甫, 霍力等. 40 Gb/s 信号的全光 3R 再生[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1467~1471
- R. Maldonado-Basilio, S. Latkowski, J. Parra-Cetina *et al.*. All-optical 40 Gb/s 3R regeneration assisted by clock-extraction based on a passively mode-locked quantum-dash Fabry-Perot laser [C]. Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on, 2010. 1~3
- Z. Q. Zhu, M. Funabashi, Z. Pan *et al.*. High-performance optical 3R regeneration for scalable fiber transmission system applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(2): 504~511
- C. Yu, T. Luo, B. Zhang *et al.*. Wavelength-shift-free 3R regenerator for 40-Gb/s RZ system by optical parametric amplification in fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24): 2569~2571
- S. Watanabe, F. Futami, R. Okabe *et al.*. 160 Gb/s optical 3R-regenerator in a fiber transmission experiment[C]. Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest (Optical Society of America, 2003), 2003. PD16
- N. S. M. Shah, M. Matsumoto. All-optical regeneration of time-interleaved multi-wavelength signals based on higher-order four-wave mixing[C]. Summer Topical Meeting, LEOSST'09. IEEE/LEOS, 2009. 103~104
- R. Slavik, J. Kakande, F. Parmigiani *et al.*. All-optical regeneration based on phase sensitive amplification[C]. CLEO: 2011-Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011).

2011. CWD2

- Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Experimental research on dual wavelength all-optical decision based on fiber-optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1576~1580
韩丙辰, 于晋龙, 罗俊等. 利用光参变放大同时实现双波长全光判决的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1576~1580
- Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056
江阳, 于晋龙, 张爱旭等. 双抽运光纤光参变放大的全光多波长变换与码型转换[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1051~1056
- O. Leclerc, B. Lavigne, E. Balmefrezol *et al.*. Optical regeneration at 40 Gb/s and beyond[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2779~2790
- Y. K. Huang, I. Glesk, R. Shankar *et al.*. Simultaneous all-optical 3R regeneration scheme with improved scalability using TOAD[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10339~10344
- Y. K. Huang, L. Xu, I. Glesk *et al.*. Simultaneous all-optical 3R regeneration of multiple WDM channels [C]. Lasers and Electro-Optics Society, 2005. LEOS 2005. The 18th Annual Meeting of the IEEE, 2005. 135~136
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang Transl. Beijing: Publishig House of Electronics Industry, 2002. 246~258
G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 贾东方译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 246~258
- P. Kylemark, H. Sunnerud, M. Karlsson *et al.*. Semi-analytic saturation theory of fiber optical parametric amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(9): 3471~3479
- Yu Jinlong, Wang Yaotian, Zhang Aixu *et al.*. Experimental study on 40 Gb/s all optical 3R regeneration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 801~806
于晋龙, 王耀天, 张爱旭等. 40 Gb/s 信号全光 3R 再生实验 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 801~806
- Wang Wenrui, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. A novel multi-rate all-optical packet clock recovery system of return-to-zero code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 423~428
王文睿, 于晋龙, 张爱旭等. 一种新型多速率归零码全光帧时钟提取系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 423~428
- Luo Jun, Yu Jinlong, Wang Ju *et al.*. Experimental investigation of 40 Gb/s all-optical clock recovery using high finesse Fabry-Perot filter [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(9): 1324~1327
罗俊, 于晋龙, 王菊等. 基于高精细度 F-P 滤波器的 40 Gb/s 全光时钟提取实验研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(9): 1324~1327

栏目编辑: 王晓球