

基于数据抽运的光纤光参量放大的 4×40 Gb/s 多波长全光 3R 再生实验研究

颜子恒 于晋龙 王 菊 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 提出了一种新型的基于数据抽运的光纤光参量放大(FOPA)的多波长(4×40 Gb/s)全光 3R 再生实现方案。与已有的利用光参量放大技术再生不同的是,所提方案利用 4 路恶化的数据信号作为抽运光,同时,分析了其再生机理。实验结果表明,对于“1”码和“0”码的噪声均有较好的抑制。利用波长变换和高 Q 值(1000)的法布里-珀罗(F-P)滤波器进行时钟提取,得到均方根(RMS)抖动仅为 180 fs 的高质量时钟。在多波长全光判决部分,采用了正交极化和双向注入的方法来抑制 4 个恶化信号之间的相互串扰。最终实现了 4 路信号的信噪比改善值分别达到 2.21、2.79、2.72 和 1.99 的再生实验。

关键词 光通信;多波长全光 3R 再生;光纤光参量放大;时钟提取;多波长全光判决

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1005003

4×40 Gb/s Multi-Wavelength All-Optic 3R Regeneration Using Data-Pumped FOPA

Yan Ziheng Yu Jinlong Wang Ju Yang Enze

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A novel scheme of multi-wavelength (4×40 Gb/s) all-optical 3R regeneration is presented by using a fiber optical parametric amplifier (FOPA) with degraded data signals as the pump, which is different in mechanism from previous regeneration schemes. It is demonstrated that, this scheme restrains the noise on both "1" bit and "0" bit very well. The clock extraction is based on wavelength conversion and a Fabry-Perot (F-P) filter with a high Q value of 1000. And the jitter of the recovered clock is only 180 fs. In the multi-wavelength decision unit, the orthogonal polarization as well as bidirectional injection is employed to avoid crosstalk among the four degraded signals. Finally, this scheme realizes that, the signal to noise ratios of the four regenerated signals are improved by 2.21, 2.79, 2.72, 1.99 respectively.

Key words optical communications; multi-wavelength 3R regeneration; fiber optical parametric amplification; clock recovery; wavelength-decision multiplexing

OCIS codes 060.1155; 060.2330; 060.4510

1 引 言

在密集波分复用(DWDM)系统中,为了满足电信网络容量的快速增长,需要更多的信道和更高的线路速率,这使系统中很多因素对信号的影响变得不容忽视,例如自发辐射噪声(ASE)、四波混频(FWM)、交叉相位调制(XPM)等。全光 3R 再生不仅具有更高的透明性,而且在网络节点上的处理与

基于光电光(OEO)再生技术相比,具有结构简单、可处理更高速率的信号等优点。另外一个潜在的优势是:与传统的串行信道不同,波分复用(WDM)网络中同时有多个波长的信道。而传统的 OEO 再生方案只能处理单信道信号,这意味着随着信道波长数目的增长,OEO 的设备数和成本也必须同步增长。全光再生从本质讲具有多路光信号同时处理的

收稿日期: 2010-03-22; **收到修改稿日期**: 2010-07-04

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z272)和国家自然科学基金(60736035)资助课题。

作者简介: 颜子恒(1987—),男,硕士研究生,主要从事全光 3R 再生方面的研究。E-mail: yanziheng@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

能力,如果多波长恶化信号通过一个全光 3R 设备同时实现再生,全光再生性价比的优势愈发突出,这是电再生技术无法实现的^[1,2]。近年有一些关于多波长 2R 再生实验方案的报道^[3~5]。文献[6]报道了使用太赫兹光非对称光解复用器(TOAD)和串并转换来实现四波长的同步全光 3R 再生。文献[5]报道了基于非同步时钟再生器(ADORE)的多波长全光 3R 再生。然而,这两个方案的思路均是串并转换,将多路 WDM 信号变成一路时分信号。这就要求恶化信号具有较低的数据率和较窄的脉冲宽度,限制了这些方案的实际应用。而光纤光参量放大(FOPA)处理数据的速率可达到 160 Gb/s^[7,8],可以同时处理多路信号。这意味着基于 FOPA 的全光 3R 再生可以处理速率极高的恶化信号,这对 WDM 系统极为有利。

在以往的基于 FOPA 的全光 3R 再生中,通常使用强度时钟作为抽运来实现再定时和再整形^[9~14]。在这些使用强度时钟作为抽运的单波长 3R 再生方案中,由于抽运时钟的增益饱和特性,可以很好抑制“1”码上的幅度噪声,但是“0”码由于处于抽运时钟的线性放大区,“0”码上的幅度噪声将会被线性放大,出现了“1”码和“0”码噪声抑制不均匀的现象^[10~14]。

本文提出了利用恶化信号作为数据抽运的基于 FOPA 的全光 3R 再生系统,其容量能达到 160 Gb/s(4×40 Gb/s)。当“0”码作为抽运,即低功率抽运时,FOPA 的指数增益特性可以抑制“0”码的

幅度噪声,提高信噪比。随着抽运功率的增加,非线性相位匹配条件被破坏^[15],导致闲频增益增长的减缓甚至饱和;同时,随着抽运功率的增加,高阶的 FWM 效率增强,抽运功率被转移到更高阶的频率上,致使闲频增益的下降。以上两点原因导致的闲频增益饱和甚至下降可以抑制“1”码上的幅度噪声。

2 实验装置

多波长全光 3R 再生原理图如图 1 所示,采用了极化复用和双向注入的方法来避免信号之间的相互串扰。

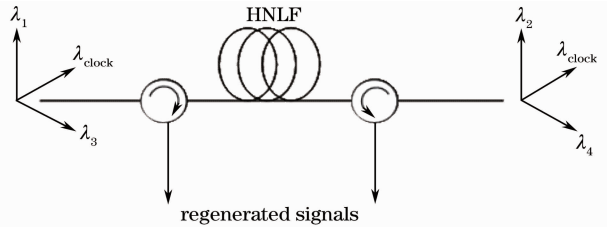
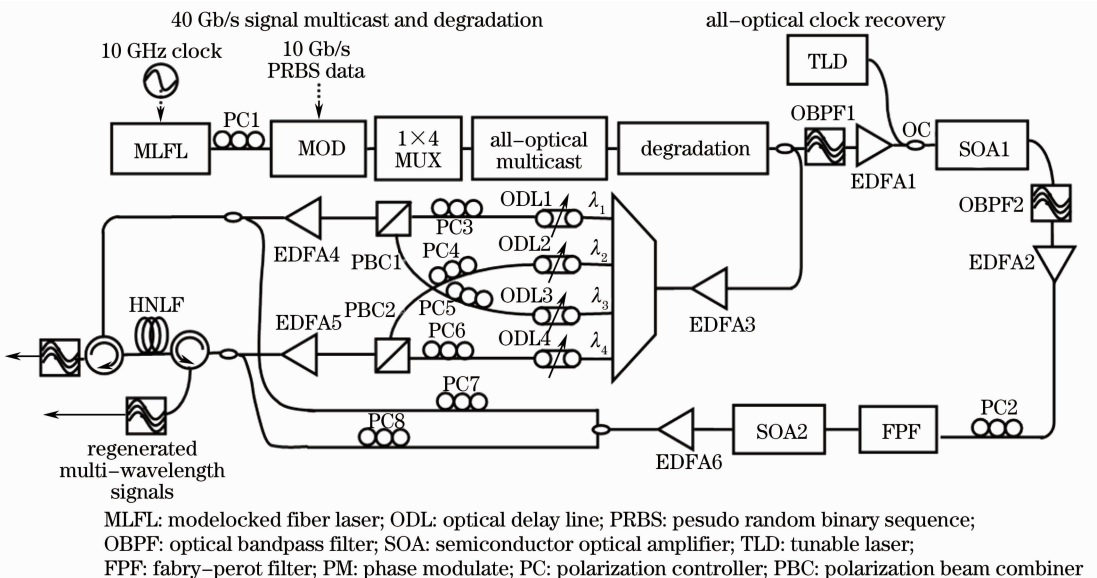


图 1 多波长全光 3R 再生的原理图

Fig. 1 Multi-wavelength all-optical 3R regeneration system principle diagram

本方案采用的 4×40 Gb/s 多波长全光 3R 再生实验原理如图 2 所示。它主要包括三部分。第一部分是 4 个波长($\lambda_1=1548.5\text{ nm}, \lambda_2=1549.32\text{ nm}, \lambda_3=1559.7\text{ nm}, \lambda_4=1560.61\text{ nm}$)恶化信号的产生;第二部分是时钟提取,它主要是基于波长变化和高 Q 值($Q=1000$)的法布里-珀罗(F-P)滤波器;第三部分也是最关键的部分是多波长全光判决。在第一



MLFL: modelocked fiber laser; ODL: optical delay line; PRBS: pseudo random binary sequence; OBPF: optical bandpass filter; SOA: semiconductor optical amplifier; TLD: tunable laser; FPF: fabry-perot filter; PM: phase modulate; PC: polarization beam combiner

图 2 4×40 Gb/s 多波长全光 3R 再生的实验原理图

Fig. 2 Experimental setup for 4×40 Gb/s multi-wavelength all-optical 3R regeneration

部分,由锁模光纤激光器产生 10 GHz 的短脉冲序列,然后进入调制器被伪随机二进制序列(PRBS)调制。这个 10 Gb/s 的信号通过复用单元被复用到 40 Gb/s 的信号,它通过一个基于半导体光放大器(SOA)^[16]的组播单元来产生 4×40 Gb/s 的信号。该信号经过一恶化单元,恶化单元由 SOA 和色散组成,引入抖动和噪声;随后信号被分成两部分,一部分注入时钟提取单元,另一部分进入多波长判决单元。在时钟提取单元,4 个信号中的一个被光带通滤波器(OBPF1)滤出,该信号连同—个波长为 1554.1 nm 的探测光进入半导体光放大器(SOA1),由于 SOA1 的 XPM 作用和级联的频偏滤波器(OBPF2),恶化信号的信息被复制到该探测光波长,同时探测光对准 F-P 滤波器的透射峰,该探测光经过掺铒光纤放大器(EDFA2)放大后注入自由光谱区为 40 GHz 的 F-P 滤波器就可以提取出信号脉冲^[17],F-P 滤波器后面的半导体光放大器(SOA2)可以抑制低频噪声^[15]。

在多波长全光判决单元, λ_1 和 λ_3 通过偏振合束器(PBC1)正交极化, λ_2 和 λ_4 通过偏振合束器(PBC2)正交极化^[18]。提取的时钟和 λ_1 和 λ_3 耦合正向进入高非线性光纤(HNLF),同样的 λ_2 和 λ_4 和

时钟耦合后反向注入 HNLF。HNLF 的非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,零色散波长为 1545 nm,色散系数为 $0.03 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。通过调整偏振控制器 PC7 和 PC8 使时钟的偏振态和任一恶化信号的偏振态均成 45° ,在闲频光处就得到了再生信号。

大部分的基于 FOPA 的实验方案采用的都是时钟抽运,时钟抽运可以通过增益饱和和特性抑制“1”码噪声,同时也放大了“0”码噪声。最大的不同点在于采用的是 4 个恶化信号作为抽运,很好地抑制了“0”噪声。在本方案中,闲频波长分别为 1542.9、1544.54、1565.3 和 1567.12 nm。因为参量放大的转换效率近似与闲频波长处的增益成正比,故可通过测量闲频波长处增益的方法来观察转换效率。在基于 HNLF 的参量放大中,实验测得闲频波长处的增益随着抽运功率(恶化信号)的变化如图 3 所示。可见,在抽运功率较低时(“0”bit),FOPA 的增益较低,在本实验条件下,低于 300 mW 的抽运功率可使闲频处的增益接近于零,可以抑制“0”码上的幅度噪声。随着抽运功率的增加,由于非线性相移的作用^[19],导致当输入功率超过阈值时,FOPA 的闲频处的增益接近饱和甚至下降,这可以用来抑制高功率的“1”码幅度噪声。

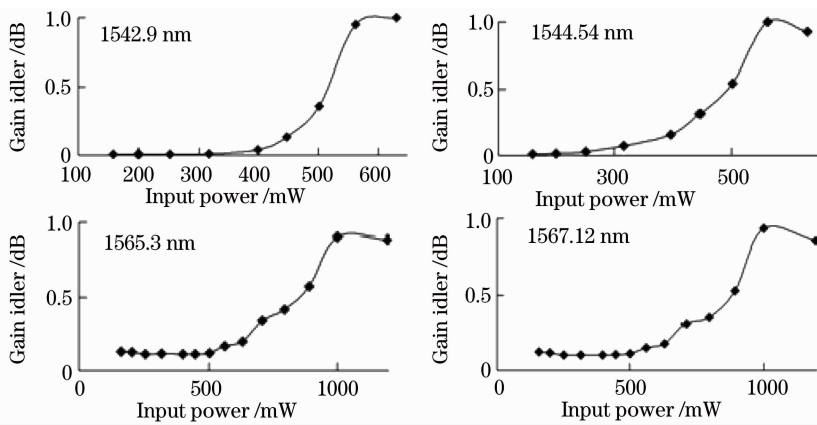


图 3 对抽运增益的闲频增益

Fig. 3 Idler gain against the pumps power

3 实验结果和讨论

从 SOA2 提取的 40 GHz 的时钟波形和单边带(SSB)相位噪声曲线分别如图 4(a)和(b)所示。通过计算测得的相位噪声,可以得到提取的时钟的均方根(RMS)抖动仅为 180 fs ^[20,21]。EDFA4 和 EDFA5 的输出功率分别调节到 24 dBm 和 26.7 dBm,可使 4 个恶化信号都得到再生。HNLF 的前向和后向输出频谱如图 5(a)、(b)所示,信号的频谱之间

没有相互重叠的部分,可以推测出,由于采用了偏振复用和双向注入的方法,信道间相互干扰已经大大降低。4 个波长 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 的恶化数据的眼图如图 6(a)所示,相应的再生数据的眼图如图 6(b)所示。

实验还进行了背对背的测试,即信号不恶化时测得再生信号的 Q 值。表 1 显示了背对背测试的 Q 值、恶化数据的 Q 值和再生数据的 Q 值。需要强调

的是,由于实验条件的限制(实验中所用的 PIN 探测器的噪声较大),所测得的背对背测试的 Q 值并不

算太高,但是 4 路恶化信号再生后的 Q 值已经接近于背对背测试。

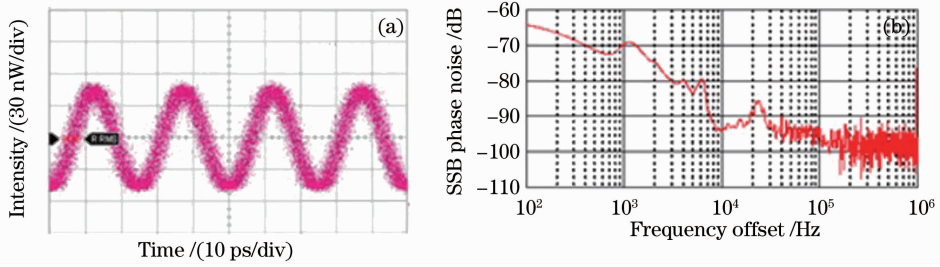


图 4 40 GHz 时钟信号的波形和相位噪声曲线

Fig. 4 Waveform and phase noise curve of the extracted 40 GHz clock

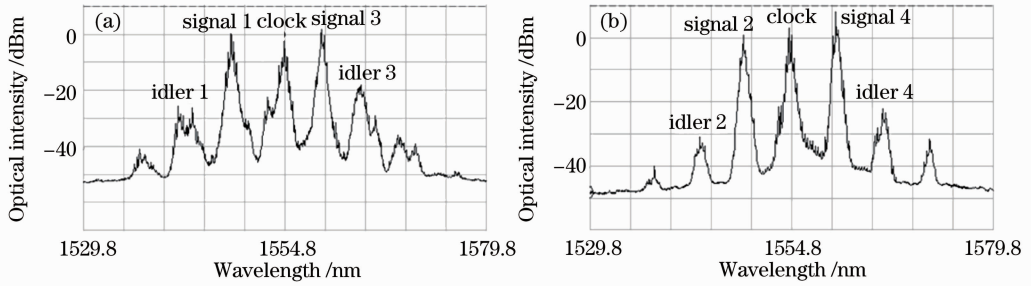


图 5 从前向(a)和后向(b) HNLf 的输出频谱

Fig. 5 Spectrum of output of HNLf from (a) forward and (b) backward

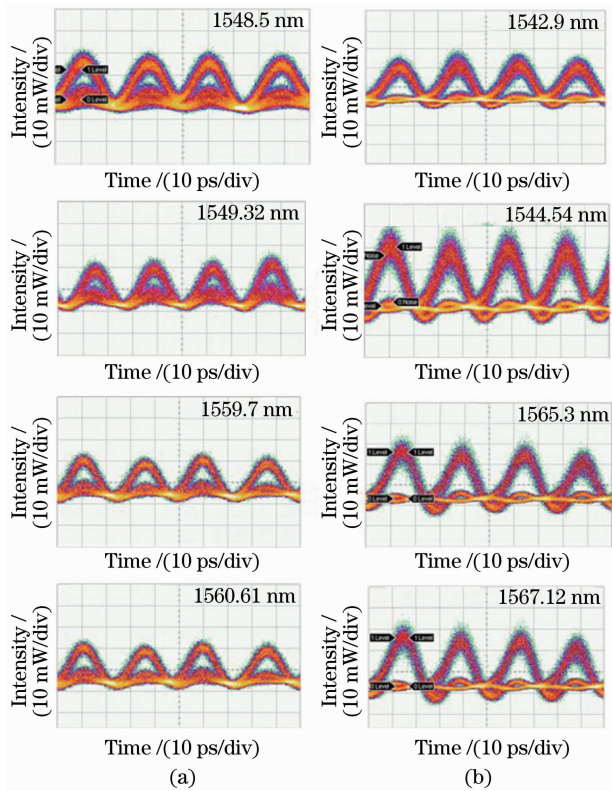


图 6 恶化数据(a)和相应再生数据(b)的眼图
Fig. 6 Eye diagrams of (a) degraded data and (b) corresponding regenerated data

表 1 背对背信噪比、3R 再生前信噪比和 3R 再生后信噪比
Table 1 Signal to noise ratio of back to back test, deteriorated data and regenerated data

Wavelength / nm	Q value of back to back	Q value of deteriorated data	Q value of regenerated data
1548.5	6.65	2.67	4.88
1549.3	5.13	2.06	4.85
1559.7	6.19	2.43	5.15
1560.6	5.36	3.00	4.99

4 结 论

提出了一种基于 HNLf 中的参量放大效应,以恶化信号作为抽运开关的多波长全光 3R 再生实验方案,完成了对 4 路 40 Gb/s 的恶化信号进行全光再生的 3R 实验。在低抽运(“0” bit)时,FOPA 的指数增益响应很理想地抑制了“0” bit 时的噪声。同时,FOPA 的闲频增益下降又很好地抑制了“1” bit 时的噪声,这不同于以时钟作为抽运的增益饱和。为了抑制信道间的相互串扰,采用了正交极化和双向注入的方法。提取的时钟 RMS 抖动仅为 180 fs,再生前 4 路信号的信噪比分别为 2.67、2.06、2.43、3.00,再生以后信号的信噪比分别改善

为 4.88、4.85、5.15、4.99, 接近背对背测试的结果。较为遗憾的是由于实验条件的限制, 没有对再生系统进行误码测试。

参 考 文 献

- 1 C. Janz. All-optical signal processing with photonic integrated circuits[C]. Optical Fiber Communication Conf. (OFC'2000), Baltimore, MD, 2000, **3**: 90~92
- 2 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
- 3 M. Vasilyev, T. I. Lakoba, P. G. Patki. Multi-wavelength all-optical regeneration [C]. Proc. 2008 Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conf. 2008 (OFC/NFOEC), 2008. 1~3
- 4 L. Provost, F. Parmigiani, P. Petropoulos *et al.*. Investigation of four-wavelength regenerator using polarization- and direction-multiplexing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(20): 1676~1678
- 5 P. Vorreaul, S. Sygletos, F. Parmigiani *et al.*. Optical grooming switch with regenerative functionality for transparent interconnection of networks[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15173~15185
- 6 Yue-Kai Huang, Lei Xu, Ivan Glesk *et al.*. Simultaneous all-optical 3R regeneration of multiple WDM channels[C]. Proc. 18th Annu. Meeting of IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2005 (LEOS 2005), 135~136
- 7 T. Torounidis, M. Westlund, H. Sunnerud *et al.*. Signal generation and transmission at 40, 80, and 160 Gb/s using a fiber-optical parametric pulse source[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 312~314
- 8 Qiu Ping, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. Principle and application of femtosecond optical parametric amplification[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(3): 273~282
邱 婷, 王青圃, 张行愚 等. 飞秒光参量放大技术原理及应用[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(3): 273~282
- 9 Xiaosheng Xiao, Ping Shum, E. S. Nazemosadat *et al.*. Four-wave mixing of pulsed signal in dispersion-shifted fiber with pump depletion[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(14): 1231~1233
- 10 Li Yuhua, Li Guifang. 2R regeneration and simultaneous wavelength conversion using a fiber parametric amplifier and a semiconductor optical amplifier[C]. OFC'2003, Atlanta, GA, USA, 2003, **1**: 349~350
- 11 C. Yu, T. Luo, B. Zhrng *et al.*. 3R regeneration of a 40-Gbit/s optical signal by optical parametric amplification in a highly nonlinear fiber[C]. Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, CA, USA, 2005, **2**: OTuO1
- 12 Yikai Su, Lijun Wang, Anjali Agarwal *et al.*. Simultaneous 3R regeneration and wavelength conversion using a fiber-parametric limiting amplifier[C]. OFC2001, America, 2000, **1**: MG4-1~MG4-3
- 13 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
- 14 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965
韩丙辰, 于晋龙, 罗 俊 等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零/归零码转换器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962~2965
- 15 K. Inoue. Suppression of level fluctuation without extinction ratio degradation based on output saturation in higher-order optical parametric interaction in fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4): 338~340
- 16 Litai Zhang, Jinlong Yu, Hao Hu *et al.*. Regenerative multi-wavelength conversion at 4×10 -Gbits using a single SOA[J]. *Microwave & Opt. Technol. Lett.*, 2009, **51**(2): 466~469
- 17 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing, Xu Shixiang. A novel all-optical accurate synchronization for broadband optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1481~1484
高艳霞, 赵改清, 徐世祥. 用于宽带啁啾脉冲光参量放大系统精确同步的新方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1481~1484
- 18 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. 利用光参量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
- 19 Per Kylemark, Henrik Sunnerud, Magnus Karlsson *et al.*. Semi-analytic saturation theory of fiber optical parametric amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(9): 3471~3479
- 20 Alper Demir. Computing timing jitter from phase noise spectra for oscillators and phase-locked loops with white and 1/f noise [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2006, **53**(9): 1869~1884
- 21 Quan Shuang, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 40 Gb/s clock recovery based on optical phase-locked loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1382~1386
权 爽, 姚敏玉, 张洪明 等. 利用光锁相环路实现 40 Gb/s 时钟恢复[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1382~1386