

文章编号: 0253-2239(2007)08-1382-5

利用光锁相环路实现 40 Gb/s 时钟恢复^{*}

权 爽 姚敏玉 张洪明 张 璠

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 提出并建立了一种新型的基于光纤四波混频效应和压控光脉冲源的光锁相环路(OPLL),用于光时分复用系统(OTDM)中的时钟恢复过程。从理论上分析了其工作原理,及各模块结构和功能。利用高非线性光纤中的四波混频效应实现全光鉴相器,有效缩短了光纤长度,减小了光纤色散引起的脉冲走离,鉴相器消光比超过 30 dB。采用再生锁模光纤激光器实现压控光脉冲源,在保证脉冲质量的前提下,重复频率调节范围达到 380 kHz。在 40 Gb/s 时钟恢复实验中,获得脉宽为 7.2 ps、接近变换极限的时钟脉冲,时间抖动(RMS)为 152 fs,超模抑制比大于 60 dB。实验证明,输入信号幅度波动和码型效应对环路影响很小。

关键词: 光纤通信; 时钟恢复; 光锁相环路; 高非线性光纤; 压控光脉冲源

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

40 Gb/s Clock Recovery Based on Optical Phase-Locked Loop

Quan Shuang Yao Minyu Zhang Hongming Zhang Jun

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A novel optical phase-locked loop (OPLL) based on four-wave-mixing in optical fibers and optical voltage-controlled oscillator (OVCO) is proposed and built to perform clock recovery in optical time-division multiplexed systems. The operation principle of the optical phase-locked loop and the configurations and functions of modules in optical phase-locked loop are analyzed theoretically. With the use of highly-nonlinear fibers in all-optical phase detector, the fiber length is shortened sufficiently, which reduces the walk-off between two pulse trains induced by dispersion. The phase detector has an extinction ratio beyond 30 dB. The optical voltage-controlled oscillator based on regenerative mode-locked fiber laser provides high-quality pulses over a repetition frequency range of 380 kHz. In the clock recovery experiment, a transform-limited pulse train is recovered from a 40 Gb/s signal, with pulse width of 7.2 ps, timing jitter (root-mean-square) of 152 fs, and super-mode suppression ratio over 60 dB. The loop is robust against pattern effect and amplitude fluctuation of input signal.

Key words: optical fiber communication; clock recovery; optical phase-locked loop; highly-nonlinear fibers; optical voltage-controlled oscillator

1 引 言

时钟恢复是高速光时分复用(OTDM)系统中的关键技术,直接影响了三 R 再生(Re-amplification, re-shaping, re-timing, 3R)、解复用等同步过程的质量^[1~3]。光锁相环路(OPLL)^[4~9]是目前一种比较成功的时钟恢复方法,具有同时提

供支路速率的光时钟和电时钟、输出脉冲质量高、码型效应小等优点,日益受到人们的关注。

半导体光放大器(SOA)中的非线性效应受载流子恢复时间的限制,典型值在几十甚至上百皮秒,很难处理速率在 40 Gb/s 以上的信号。而光纤中的非线性效应具有超快的响应速度,适用于超高速光

* 国家自然科学基金(60477021)资助课题。

作者简介: 权 爽(1982—),男,北京人,硕士研究生,主要从事高速光通信方面的研究。

E-mail: qshuang00@mails.thu.edu.cn

导师简介: 姚敏玉(1946—),女,上海人,教授,博士生导师,主要从事超高速光通信系统及超高速光电子学方面的研究。

E-mail: yaomy@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-09-22; 收到修改稿日期: 2006-11-09

时分复用系统。但由于普通单模光纤(SMF)或色散位移光纤(DSF)非线性系数较低,需要高输入功率,并且存在光纤色散引起脉冲走离等影响因素。采用高非线性光纤(HNLF)可以有效缩短光纤长度,克服色散效应的影响,提高鉴相器性能。

压控光脉冲源(OVCO)是光锁相环路中的另一个关键模块,实现方法可以利用压控振荡器(VCO)直调半导体激光器(LD)^[4,5,8]或主动锁模光纤激光器(AMLFL)^[7,10],也可以利用再生锁模光纤激光器(RMLFL)^[6,11,12]。半导体激光器直调输出的脉冲较宽,且存在较大啁啾,不适合于高速系统;主动锁模光纤激光器可以提供高质量的脉冲输出,但由于要求调制频率与腔长精确匹配,当压控振荡器频率改变时脉冲质量将大大下降,甚至不能实现锁模。再生锁模光纤激光器通过再生反馈机理,可以在保证脉冲质量的同时实现重复频率可调,是一种比较理想的方案。

本文设计并建立光锁相环路,同时采用了基于高非线性光纤中四波混频效应的全光鉴相器和基于再生锁模光纤激光器的压控光脉冲源,并从理论上分析了其工作原理。

2 光锁相环路原理

光锁相环路将传统锁相环路(PLL)的频率跟踪原理用于光信号处理,它的基本结构包括全光鉴相器、环路滤波器、压控光脉冲源三个模块,如图 1 所示。

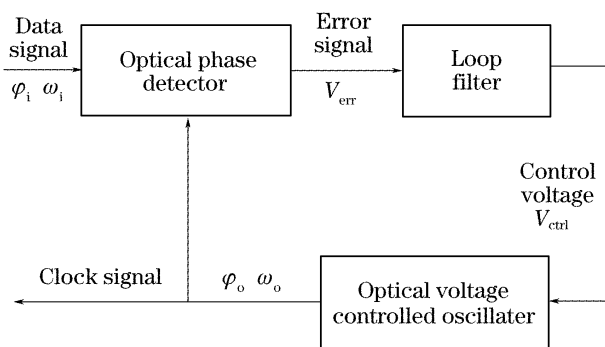


图 1 光锁相环路原理图

Fig. 1 Principle diagram of the optical phase-locked loop

2.1 全光鉴相器

全光鉴相器用于鉴别两路光脉冲信号间的走离程度,输出的误差信号 V_{err} 是两路输入光瞬时相位差 $\Delta\varphi$ 的函数,即

$$V_{err}(t) = f_{pd}[\Delta\varphi(t)], \quad (1)$$

式中,函数 f_{pd} 为鉴相特性,一般是周期函数。

在基于光纤非线性效应的全光鉴相器中,由于单模光纤或色散位移光纤非线性系数低,为产生足够强的误差信号需要使用较长的光纤。随着光纤长度的增加,由色散效应引起的脉冲走离变得严重。当走离大小与信号周期可比拟时,鉴相器将无法工作。采用高非线性光纤可以有效解决上述问题,较短长度的光纤就可以提供足够的输出光功率,附加的脉冲走离影响很小。实验中鉴相器结构如图 2,数据光和时钟光经过放大后进入高非线性光纤,产生的四波混频光被滤出,由低速光电探测器接收,其平均光功率经过光电转换作为误差信号输出。由于四波混频强度随信号光和时钟光瞬时功率的增加而增加,当两路光脉冲序列走离较小时四波混频较强,平均光功率较高,输出的误差信号较大;反之亦然,从而实现鉴相功能。实验测得一个周期内的鉴相特性曲线如图 3。

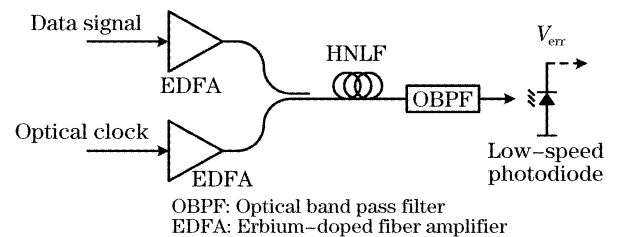


图 2 全光鉴相器结构图

Fig. 2 Scheme of the all-optical phase detector

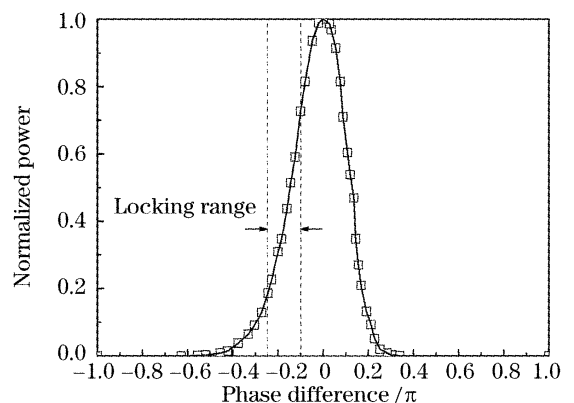


图 3 鉴相特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of the phase detector

2.2 压控光脉冲源

压控光脉冲源是一个重复频率可调的短脉冲源。鉴相器输出的误差信号经环路滤波器低通滤波后,对压控光脉冲源进行控制。

$$V_{ctrl}(t) = h(t) * V_{err}(t), \quad (2)$$

$$\omega_o(t) = \omega_{fr} + K_\omega V_{ctrl}(t), \quad (3)$$

式中 $h(t)$ 为环路滤波器单位冲击响应, V_{ctrl} 为压控光脉冲源控制电压, ω_{fr} 为自由振荡频率, ω_o 为压控光脉冲源输出信号重复频率, K_ω 为调制系数。(3)式

假定压控光脉冲源在一定范围内具有线性调制特性。

基于再生锁模光纤激光器的压控光脉冲源结构如图 4, 环腔中的光经分束、延时、光电转换、滤波、放大后, 作为调制器的调制信号。因此, 调制信号始终与腔长保持匹配, 保证激光器工作于锁模状态。控制电压 V_{ctrl} 加在缠绕光纤的压电陶瓷 (PZT) 上, 实现腔长可变, 从而调节重复频率。反馈支路中的光延迟线 (ODL) 用于调整调制信号相位, 使之与腔内脉冲序列同步。该方案可同时提供中心频率在 10 GHz 附近的光时钟和电时钟。

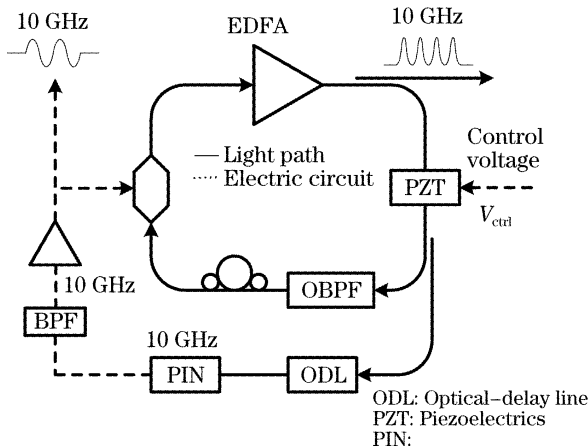


图 4 压控光脉冲源结构图

Fig. 4 Scheme of the optical voltage-controlled oscillator

当调谐范围不大时, 可以证明^[11]

$$\frac{K_{\omega}}{2\pi} = \frac{Nc}{L_0^2} K_{\text{PZT}}, \quad (4)$$

式中 N 为脉冲重复频率与环腔基频之比, c 为光纤中光速, L_0 为腔长, K_{PZT} 为压电陶瓷在单位电压下引起的腔长改变量。实验中测试压控光脉冲源调制特性如图 5, 频率可调范围大于 380 kHz, 调制曲线近似线性, $K_{\omega}/2\pi \approx 26$ kHz/V。

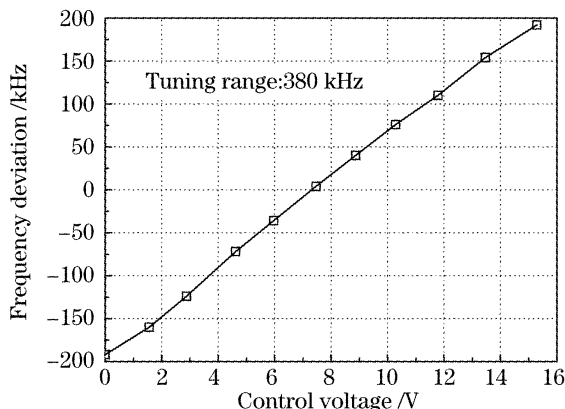


图 5 压控光脉冲源调制特性曲线

Fig. 5 Tuning characteristic of the optical voltage-controlled oscillator

2.3 环路方程和锁相原理

(1)式中

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_i(t) - \varphi_o(t), \quad (5)$$

$$\varphi_o(t) = \int_0^t \omega_o(\tau) d\tau, \quad (6)$$

其中 φ_i 和 φ_o 分别表示数据信号和时钟信号的瞬时相位, 由(1)式~(3)式及(5)式、(6)式可得

$$\Delta\varphi(t) + K_{\omega} \int_0^t h(\tau) * f_{\text{PD}}[\Delta\varphi(\tau)] d\tau = \varphi_i(t) - \omega_{\text{fr}} t, \quad (7)$$

(7)式是环路方程, 给定输入的数据信号相位即可得到时钟信号与数据信号间相位差随时间的变化情况。作为一个特例, 假定数据信号具有固定频率 ω_{i0} , 即 $\varphi_i(t) = \omega_{i0} t$; 并假定环路滤波器为直通网络, 即 $h(t) = 1$, 则由(7)式两边微分可得 $t \rightarrow \infty$ 时稳态解为

$$\Delta\varphi(\infty) = f_{\text{PD}}^{-1}[(\omega_{i0} - \omega_{\text{fr}})/K_{\omega}], \quad (8)$$

$$\omega_o(\infty) = \omega_{i0}, \quad (9)$$

由(8)式、(9)式可以看出环路锁定时时钟信号与数据信号具有相同的重复频率和固定的相差, 时钟信号会跟踪数据信号的频率波动, 实现时钟恢复。由于环路中的压控光脉冲源是一个独立的锁模激光器, 当输入信号出现长“0”码时, 压控光脉冲源仍能提供稳定的时钟输出, 因此输入信号的幅度波动和码型效应对时钟质量影响很小。

3 实验方案

光锁相环路时钟恢复实验装置如图 6 所示。光源使用锁模光纤激光器, 输出的 10 Gb/s 短脉冲序列经调制、放大、复用后, 成为 40 Gb/s 光时分复用数据信号。光源中心波长 1554.5 nm, 脉宽 5 ps, 调制信号采用 $2^{31} - 1$ bit 伪随机比特序列 (PRBS)。数据光经分束后一路进入示波器观察, 另一路输入光锁相环路进行时钟恢复。恢复的光时钟进入示波器观察, 同时电时钟作为示波器的触发信号。光锁相环路具体结构如图中右半部分所示。压控光脉冲源中心波长为 1562.3 nm, 重复频率在 10 GHz 附近。鉴相器中使用 500 m 长的高非线性光纤, 非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 色散系数 $0.3 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 由色散引起的脉冲走离约为 1.2 ps, 与 25 ps 的脉冲周期相比可以容忍。产生的四波混频光中心波长在 1546.7 nm。鉴相器消光比超过 30 dB。

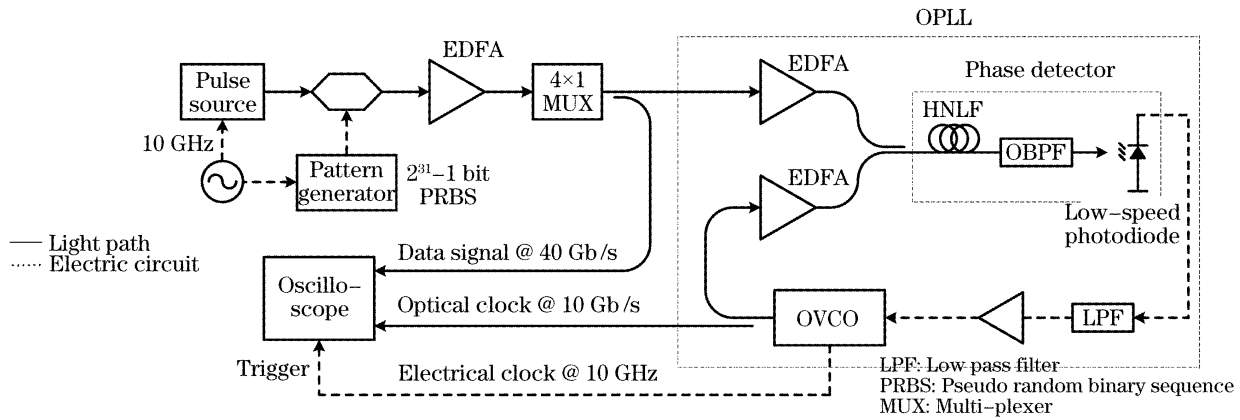


图 6 光锁相环路实现时钟恢复实验方案

Fig. 6 Experimental setup of clock recovery based on optical phase-locked loop

4 实验结果

图 7(a)所示为 40 Gb/s 数据信号,四路信号幅度不均匀,可以检测信号幅度波动对光锁相环路性能的影响。图 7(b)为恢复的原信号眼图和 10 Gb/s 光时钟。可以看到,时钟波形清晰稳定,噪声很小,脉冲形状好;恢复的信号眼图清晰,与图 7(a)中形状一致,可见输入信号幅度波动对光锁相环路性能影响很小。时钟信号光谱如图 8,中心波长 1562.3 nm,

-3 dB带宽 0.348 nm。光谱清晰稳定,有明显的分立谱峰,间隔 0.08 nm,对应于 10 GHz。

图 9 为时钟脉冲自相关曲线,计算得到脉冲宽度 7.244 ps,由此可得脉宽谱宽积为 0.315,说明时钟脉冲是双曲正割型的变换极限脉冲。图 10 是电时钟单边带噪声谱,频谱仪分辨率 1 kHz。图中横轴是相对中心频率的频偏,采用对数坐标,在 10 kHz到500kHz间积分得到时间抖动(RMS)为

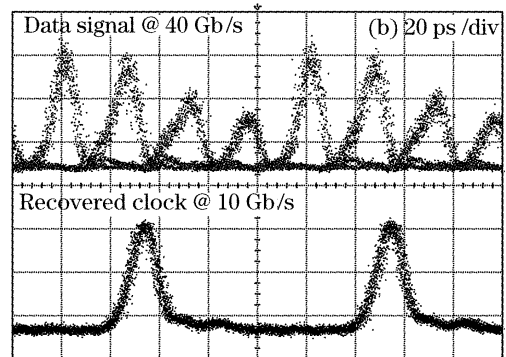
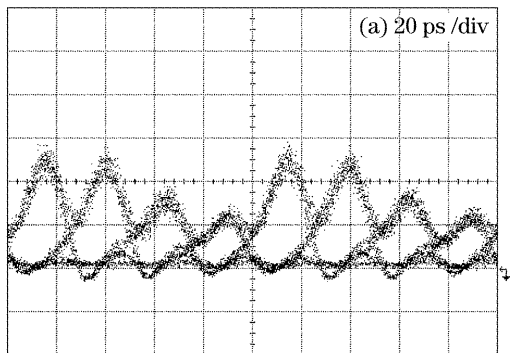


图 7 信号波形。(a) 40 Gb/s 原始信号,(b) 恢复的信号眼图和光时钟

Fig. 7 Oscilloscope trace of (a) 40 Gb/s input signal, (b) recovered eye diagram of input signal and optical clock

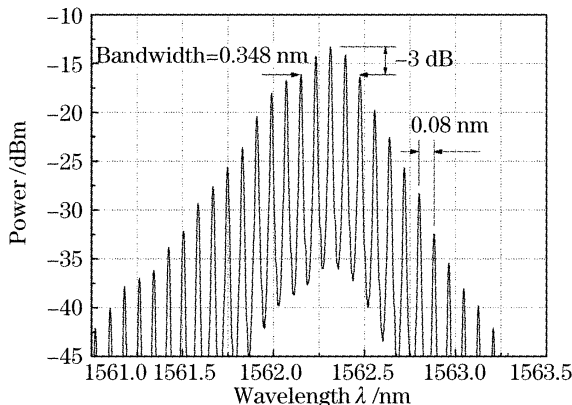


图 8 时钟信号光谱图

Fig. 8 Optical spectrum of the clock signal

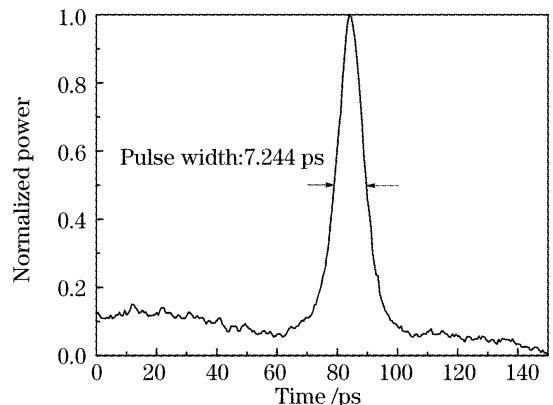


图 9 时钟信号自相关曲线

Fig. 9 Autocorrelation curve of the optical clock

152 fs。插图中横轴是线性坐标,可以看到超模抑制比大于 60 dB。上述结果表明,所研制的光锁相环路可以有效恢复出高质量的时钟信号。

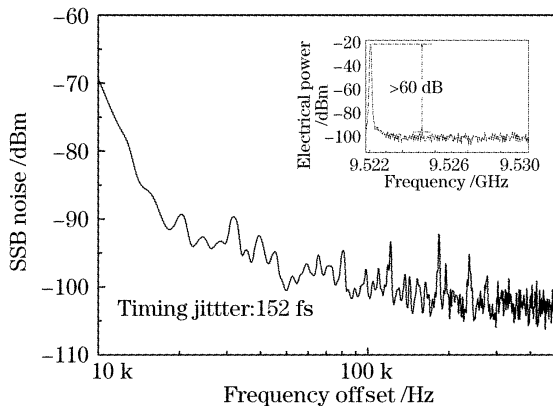


图 10 电时钟单边带噪声谱

Fig. 10 Single sideband noise spectrum of the electrical clock

5 结 论

本文提出并设计了一种光锁相环路,利用高非线性光纤中的四波混频效应实现全光鉴相器,同时采用再生锁模光纤激光器实现压控光脉冲源,从理论和实验上证明该方案可以用于高速光信号时钟恢复。在对 40 Gb/s 信号进行的实验中,得到的时钟脉冲接近变换极限,脉宽 7.2 ps,时间抖动 152 fs,超模抑制比大于 60 dB,恢复的信号眼图清晰。该方案对输入信号幅度波动和码型效应均不敏感。光锁相环路技术适合应用在超高速光时分复用系统的各种同步过程中。

参 考 文 献

1 Li Huo, Yanfu Yang, Caiyun Lou *et al.*. Demonstration of an 8 \times 10-Gb/s OTDM system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 140~142

2 Lou Caiyun, Wang Tong, Huo Li *et al.*. Research on 10 Gb/s all-optical 3R regeneration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 27~29 (in Chinese)
 娄采云,王桐,霍力等. 10 Gb/s 全光 3R 再生的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(1): 27~29

3 Lü Jie, Yu Jinlong, Li Yanan *et al.*. 40 Gb/s all-optical clock extraction based on the injection mode-locked laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1307~1312 (in Chinese)
 吕捷,于晋龙,李亚男等. 基于注入锁模激光器的 40 Gb/s 全光时钟提取[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1307~1312

4 O. Kamatani, S. Kawanishi. Prescaled timing extraction from 400 Gb/s optical signal using a phase lock loop based on four-wave-mixing in a laser diode amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(8): 1094~1096

5 O. Kamatani, S. Kawanishi. Ultrahigh-speed clock recovery with phase lock loop based on four-wave mixing in a traveling-wave laser diode amplifier[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(8): 1757~1767

6 C. Porzi, P. Ghelfi, F. Ponzini *et al.*. Ultra-fast clock recovery by all-optical PLL[C]. *Proc. LEOS '2003*, 2003, **TuY4**: 386~387

7 D. H. Kim, S. H. Kim, J. C. Jo *et al.*. Ultrahigh-speed clock recovery with optical phase lock loop based on four-wave-mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**: 329~334

8 T. Saito, Y. Yano, N. Henmi. Optical TDM 20 Gb/s-105 km transmission employing newly proposed optical PLL timing extraction[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(4): 555~557

9 T. Sakamoto, K. Seo, K. Taira *et al.*. Polarization-insensitive all-optical time-division demultiplexing using a fiber four-wave mixer with a peak-holding optical phase-locked loop[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 563~565

10 Y. M. Jhon, H. J. Ki, S. H. Kim. Clock recovery from 40 Gb/s optical signal with optical phase-locked loop based on a terahertz optical asymmetric demultiplexer [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**: 315~319

11 A. Bogoni, L. Poti, F. Ponzini *et al.*. All-electrical equivalent model for mode locked fiber sources synchronization schemes based on electro-optical PLLs[C]. *Proc. LEOS '2002*, 2002, **TuE4**: 177~178

12 M. Nakazawa, E. Yoshida. A 40-GHz 850-fs regeneratively FM mode-locked polarization-maintaining erbium fiber ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1613~1615