

文章编号: 0253-2239(2009)01-0151-06

利用光窄带滤波器加快帧时钟消失速度的理论和实验研究

张爱旭^{1, 2, 3} 于晋龙^{2, 3} 王文睿^{2, 3} 张立台^{2, 3} 韩丙辰^{2, 3}

¹天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072
²天津大学电信学院光纤通信实验室, 天津 300072
³光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072

摘要 帧内时钟提取是高速率的光分组交换中关键技术之一。帧时钟建立和消失的快慢决定了线路中的最小分组间隔, 从而影响了线路的分组速率。提出了一种利用半导体放大器(SOA)的自相位调制效应(SPM)导致的红移, 利用光学滤波器减小分组时钟消失时间的方法, 并最终完成了 10 Gb/s 的分组时钟的提取, 建立和消失时间分别为 2 个和 6 个码元周期。

关键词 光纤通信技术; 分组交换; 帧时钟提取; 法布里-珀罗滤波器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0151

Investigation on Packet Clock Recovery with Fastened Unlocking Time Using an Optical Band-Pass Filter

Zhang Aixu^{1, 2, 3} Yu Jinlong^{2, 3} Wang Wenrui^{2, 3} Zhang Litai^{2, 3} Han Bingchen^{2, 3}

¹ School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
³ Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract All-optical packet clock recovery is a key technique for high-speed optical packet switching (OPS) networks. The locking and unlocking time of the packet clock determines the guard time in the OPS, and therefore affects the network bandwidth utilization. An all-optical packet clock recovery system with ultrafast locking and unlocking time via the self-phase modulation effect of the saturated semiconductor optical amplifier (SOA) and an optical band-pass filter was proposed. The 10 GHz packet clock recovery with locking time of two code-periods and unlocking time of six-code periods is obtained.

Key words optical fiber communication; optical packet switching; all-optical clock recovery; Fabry-Pérot filter

1 引 言

光分组交换具有灵活性好, 网络利用率高的优点, 能与现有的 IP 技术无缝结合, 是光交换发展的必然方向。其中一个关键的技术问题是提取帧内的高速率数据的时钟, 为数据的处理和判决提供同步

信号。所以帧时钟提取是高速率光分组的报头处理、光分组的再生、光分组的路由等全光分组交换中关键技术的基础。而全光帧时钟提取技术由于可以克服“电子瓶颈”, 成为帧时钟提取技术的一个重要的研究方向。

收稿日期: 2008-04-14; 收到修改稿日期: 2008-07-04

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z272)、国家自然科学基金(60572013)、国家自然科学基金重点项目(60736035)、教育部新世纪人才计划和天津市自然科学基金(06YFJMJC01400)资助课题。

作者简介: 张爱旭(1969-), 女, 教师, 主要从事高速光通信系统的研究。E-mail: eieky@tju.edu.cn

与传统的同步数字体系(SDH)同步网络不同,在分组交换网络中,一般是异步的,即分组间无固定的时间关系,并且不同用户发送的分组中数据的码率会有一定的偏差。这意味着在分组交换中,对于每个分组都要尽快建立各自的时钟信号。当分组结束时,又要尽快让此时钟信号消失,以便准备好处理下一分组。即,帧时钟提取技术除了要求提取出低抖动时钟外,还要求尽量短的时钟建立和消失时间。建立时间短,意味着每个分组用于建立时钟的前导同步码可以很短,这样就减小了分组中的编码冗余;消失时间短,则可以减小分组间的最小时间间隔,从而提高线路中的分组速率(Packet rate)。

全光帧时钟提取中采用法布里-珀罗(F-P)加半导体光放大器(SOA)整形这个主要方案^[1~8]。该方案具有简单,时钟建立和消失时间易于控制的优点。F-P滤波器后级联SOA的作用有两个:1)为了减小时钟的建立和消失时间,一般选用的F-P滤波器的Q值不能太高,但随之而来的问题是时钟信号的低频噪声过大。级联SOA后,利用SOA饱和增益条件下的自增益调制(SGM)效应可以有效抑制低频噪声,提高时钟的质量。2)SOA的SGM效应同时可有效减小时钟帧的上升沿时间,从而相对减小时钟建立时间。有报道称采用此方法实现了1 bit的时钟建立时间^[3,4](严格讲这里是指时钟帧的上升沿时间,而不是真的只要1 bit就可以建立时钟)。但对于时钟帧的下降沿,SGM效应却会增加帧时钟的消失时间,这几乎完全抵消了减小时钟建立时间所带来的好处。对于如何减小时钟的消失时间,文献[3]采用了二次调制的方式降低了下降沿时间,但此法仅限于特殊的码型,且结构复杂。

本文报道了一种利用SOA的自相位调制效应(SPM)所造成的时钟帧的啁啾,用向长波长偏移的光窄带滤波器(OBPS)加快帧时钟消失速度的方法。与传统的基于F-P滤波器的全光帧时钟提取方案相比,本方案仅仅增加了一个光器件就大大减少了帧时钟的消失时间。完成了码率为10 Gb/s的数据帧的帧时钟提取实验,得到了上升沿(建立时间)为2个码元周期,消失时间为6个码元周期的高质量帧时钟信号。与不加OBPS的方案相比,新方案的帧时钟消失时间减少了16个码元周期。

2 理论分析

经过F-P滤波器后,帧时钟有一定的建立时间

和消失时间,其上升沿 $y_r(t)$ 和下降沿 $y_f(t)$ 的包络可以分别描述为^[9]:

$$y_r(t) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{R_{FS}}{Q} \times 2\pi t\right)}{1 - \exp\left(-\frac{R_{FS}}{Q} \times 2\pi T\right)}, \quad (1)$$

$$y_f(t) = \exp\left(-\frac{R_{FS}}{Q} \times 2\pi t\right), \quad (2)$$

(1)式和(2)中 R_{FS} 为F-P的自由光谱区, $R_{FS} = c/2nx$,其中 c 代表自由空间中的光速, n 为F-P两个反射端面之间的介质折射率, x 为两反射端面之间的距离; Q 为F-P滤波器的精细度;而 T 为时钟信号的周期。

图1给出了F-P提取得到的一个帧时钟信号的仿真图。

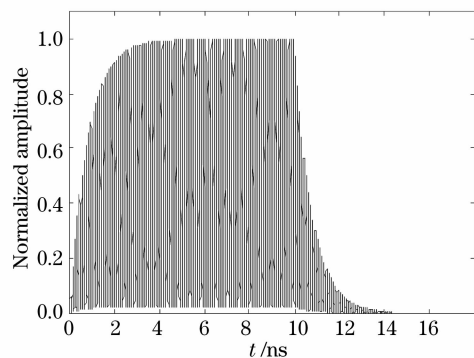


图1 F-P提取得到的帧时钟信号仿真图
Fig. 1 Simulation of the packet clock extracted by F-P filter

帧时钟信号随之进入SOA,利用SOA的自增益调制(SGM)效应抑制幅度噪声,但同时SGM效应对帧时钟的上升时间和下降时间也会产生影响。假设光脉冲在传播过程中偏振方向不变,并且忽略增益非线性效应,则SOA的传输特性可以由如下微分方程描述:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{g_0 L - h(t)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(t)}{E_{sat}} [\exp h(t) - 1], \quad (3)$$

(3)式中放大函数 $h(t)$ 表示光脉冲功率包络上每一点在整个SOA上的积分增益; g_0 为SOA小信号增益系数; L 为SOA的有源区长度; τ_c 为SOA的载流子寿命; $P_{in}(t)$ 为输入光信号的功率函数; E_{sat} 为SOA的饱和能量。

而光脉冲经过SOA后的功率和相位变化的表达式为

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \exp h(t), \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{out}}(t) = \varphi_{\text{in}}(t) - \frac{\alpha}{2}h(t), \quad (5)$$

其中 α 为线宽增强因子，它反映由载流子浓度变化而引起折射率改变和增益改变的关系。

本文主要研究 SOA 对帧时钟包络的影响，因此忽略 F-P 滤波器提取到的帧时钟的幅度噪声，假设输入 SOA 的帧时钟序列如图 1 所示。利用 Runge-Kutta 求解微分方程(3)式得到 $h(t)$ ，带入(4)式和(5)式即可得到经过 SOA 后的帧时钟信号，如图 2 所示。可以看出，经过 SOA 后，帧时钟的建立时间明显减小，但同时帧时钟的消失时间却变长。

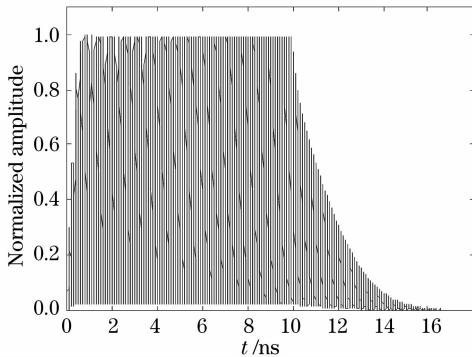


图 2 经过 SOA 后的帧时钟信号幅度

Fig. 2 Amplitude of the packet clock after SOA

图 3 则给出了过 SOA 后帧时钟的光载波频率的偏移曲线。可以看出，虽然帧时钟在每个时钟周期都经历了先红移后蓝移的变化，但在帧时钟建立阶段，红移更加明显，而在帧时钟消失阶段，蓝移的频率分量占主导地位。而整个帧从总体上出现了红移。

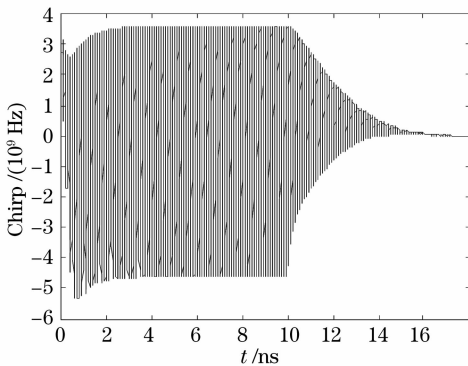


图 3 经过 SOA 后的帧时钟信号的啁啾

Fig. 3 Chirp of the packet clock after SOA

从 SOA 物理作用过程来看，由于帧时钟建立之始，SOA 无输入光信号，载流子浓度较高，因此初始 SOA 的增益较大。当高速率的时钟信号进入 SOA 后，尽管每个时钟信号经过后 SOA 的载流子

浓度都有所恢复，但由于 SOA 的载流子恢复时间相比时钟周期较长，载流子浓度还没有恢复到初始的水平，下一个脉冲又进入了 SOA。这样在时钟建立的阶段，随着帧时钟信号的不断进入，SOA 的载流子浓度不断减小，增益不断降低。因此在帧时钟的上升沿，随着帧时钟信号的增强，SOA 的增益降低，载流子浓度减小。表现为时钟建立时间缩短(由增益变化引入的 SGM 效应导致)，频率分量中红移分量较多(由载流子浓度变化导致的折射率变化所致，即 SPM 效应)。而在帧时钟消失阶段则正好相反，随着帧时钟信号幅度的逐渐减低，SOA 载流子浓度缓慢恢复，增益也随之变大，从而表现为帧时钟下降沿变缓而频率分量中蓝移分量更大。

这里需要注意的是：由于 SOA 的 SPM 效应作用，帧时钟的上升沿和下降沿的光频率的偏移情况不同。如果利用向长波长偏移的光滤波器滤出帧时钟中的红移分量，就可以消除时钟帧的蓝移拖尾部分，从而大大加快帧时钟的消失时间，图 4 给出了利用红移窄带光滤波器得到的快速消失的帧时钟信号。为了比较起见，图 5 则给出了入 SOA 前、SOA

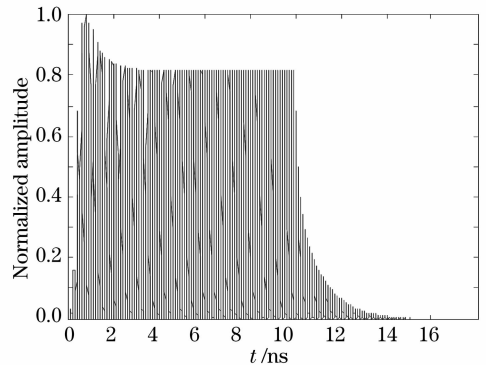


图 4 利用 OPBS 滤波后得到的帧时钟信号

Fig. 4 Filtered optical packet clock after OPBS

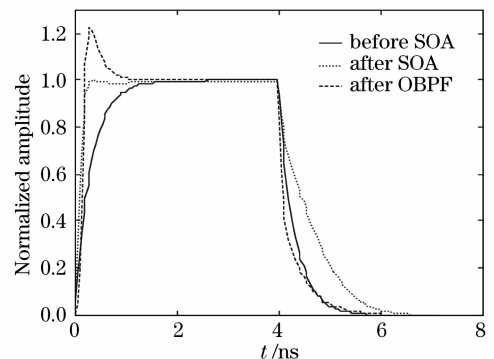


图 5 F-P 滤波器后、SOA 后和 OPBS 后的帧时钟包络比较

Fig. 5 Comparison of the envelope of packet clock before SOA, after SOA and after OPBS

后和滤波器后的帧时钟的包络比较。可以看出利用 SOA 加光窄带滤波器的方法,可以得到建立和消失时间很快的帧时钟信号。

3 实验装置与结果

实验装置如图 6 所示,激光器产生波长为 1552.3 nm 的连续光,首先用 10.056 GHz 正弦波经 LiNbO₃ 调制器 1 进行调制,然后用由 $2^{23}-1$ 伪随机码发生器产生的 10.056 Gb/s 伪随机信号经 LiNbO₃ 调制器 2 进行调制,从而得到 10.056 Gb/s 伪随机 RZ 码信号。帧信号由 Anritsu ME522A 误码分析仪

编码得到,经由 LiNbO₃ 调制器 3 调制在该伪随机 RZ 码信号上。帧包络信号的重复频率取为信号速率的 $1/2048$,约为 5 MHz,占空比为 1:2。用示波器 (Agilent 86100A) 观测帧信号的包络、眼图、上升沿、下降沿如图 7 所示,由于受误码仪的速率所限,帧信号包络并非理想的方波信号,而是有 3 个码字周期的建立和消失时间(本文均指幅度 10%~90% 的时间)。需要指出的是,这与理想的帧信号显然有些不同,这对于帧时钟的建立和消失时间都有一定程度的不利影响。

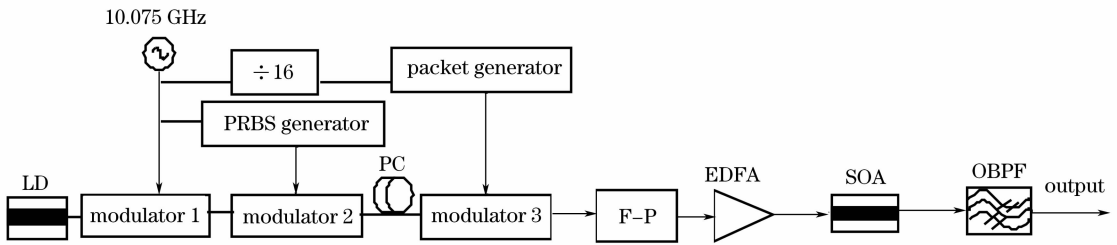


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

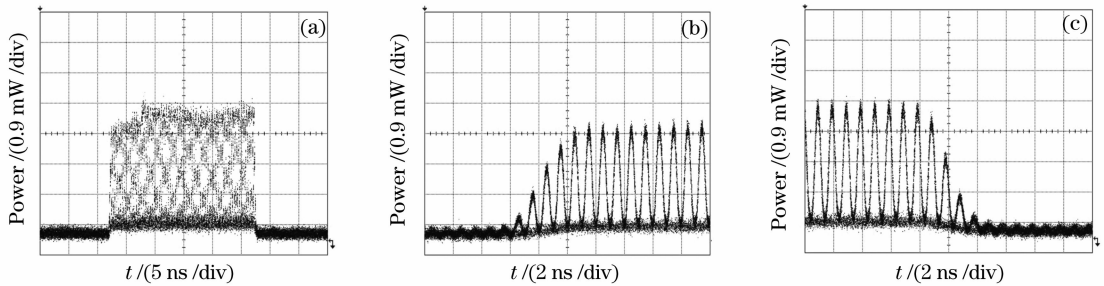


图 7 数据帧信号波形。(a) 数据帧的包络;(b) 数据帧的上升沿;(c) 数据帧的下降沿

Fig. 7 Waveform of (a) packet data; (b) rising edge; (c) falling edge

形成的帧信号随后进入自由光谱区 (FSR) 与线路码率精确匹配的 F-P 滤波器直接提取帧时钟, F-P 滤波器通过高精度温控电路来稳定滤波器腔长,并调节滤波器透射窗口位置与光信号的波长对准。为了得到较小的时钟建立和消失时间,实验选取了精

细度 $Q \approx 50$ 的 F-P 滤波器。得到的帧时钟信号如图 8 所示。实验中测得到的时钟建立和消失时间约为 2.2 ns (22 个码元周期),这与理论计算基本相符 (计算值为 2.1 ns)

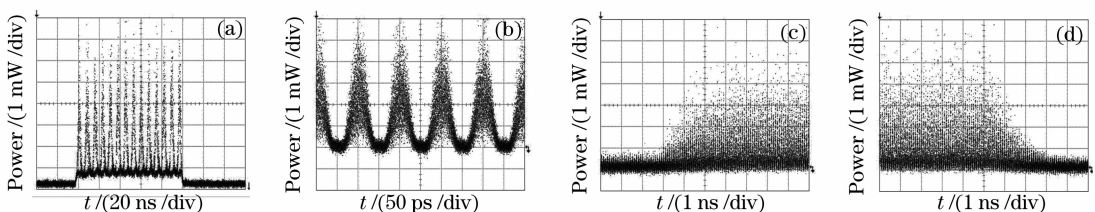


图 8 经过 F-P 滤波器后的时钟帧 (a) 时钟帧包络;(b) 时钟脉冲;(c) 时钟帧的上升沿;(d) 时钟帧的下降沿

Fig. 8 Waveform of the packet clock extracted by F-P filter.

(a) the envelope of packet; (b) clock; (c) rising edge; (d) falling edge

从实验中的波形看，当 F-P 滤波器 Q 值过低时，输出的时钟含有过多的低频噪声。为了解决这个问题，实验中在 F-P 滤波器后紧跟一个掺铒光纤放大器(EDFA)。调节 EDFA 的增益，将 F-P 输出的功率放大到一定水平(实验时 EDFA 输出的平均

光功率为为 2 dBm)后再将信号注入 SOA，SOA 的偏置电流为 250 mA。此时 SOA 有较强的自增益效应(SGM)，对于频率较低的(<1 GHz)噪声有极好的抑制作用。SOA 输出的帧信号如图 9 所示，图 9 中的时钟脉冲有了明显的改善。

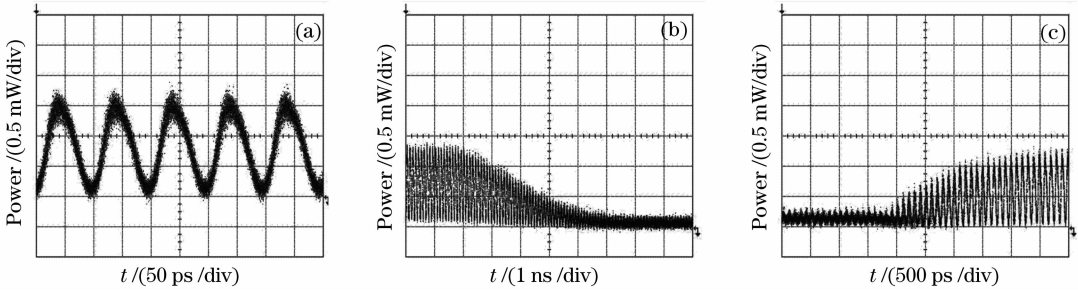


图 9 经过 SOA 整形后的时钟帧信号波形。(a) 时钟脉冲信号；(b) 时钟帧的下降沿；(c) 时钟帧的上升沿

Fig. 9 Waveform of the reshaped packet clock after SOA.

(a) packet clock; (b) falling edge; (c) rising edge

从输出的光波形图中，还可以清楚地看出时钟帧的包络变化:由于 SOA 的 SGM 效应，时钟帧的上升沿与经过 F-P 时(2 ns)相比较大大减小，约为

7 个码元周期(700 ps)。但同时对于时钟帧的包络的后沿，这个效果完全相反，时钟消失时间延长到了将近 5 ns。

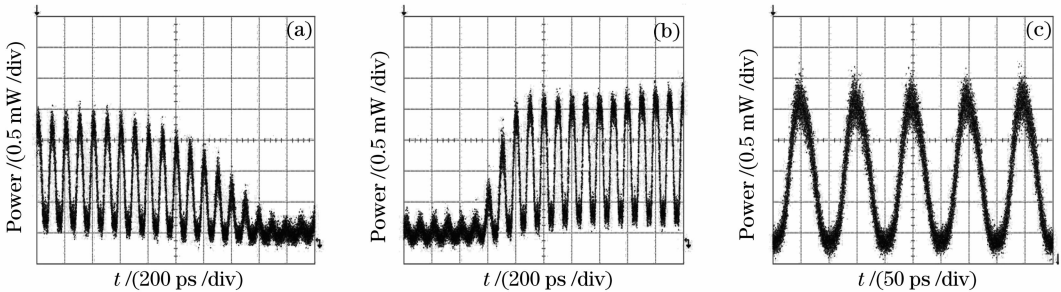


图 10 经过窄带光滤波器后的时钟帧信号。(a) 时钟帧的下降沿；(b) 时钟帧的上升沿；(c) 时钟脉冲

Fig. 10 Waveform of the filtered packet clock after OBPS. (a) falling edge; (b) rising edge; (c) packet clock

此时将 SOA 后的窄带滤波器向长波长偏移 0.2 nm，得到的时钟帧如图 10 所示。此时由于滤波器的红移，对时钟脉冲的形状也有一定的影响，由于经过 SOA 的脉冲引入正啁啾，所以滤波器向短波长偏移会导致时钟脉冲的后沿变陡，但从总体上讲，由于波长偏移量不大，并没有影响时钟脉冲的质量。对于时钟帧的形状来讲，正如前面第二节计算的结果，此时滤波器对后沿产生了较大的衰减，加快了时钟帧的消失。同时合适的滤波器偏移量也加快了时钟帧的建立时间。最终，得到了上升沿为 2 个码元周期，下降沿为 6 个码元周期的帧时钟，考虑到原始数据帧本身具有的上升和下降沿时间，这是一个相当理想的结果，也验证了第二节的理论分析。

经过 50 GHz 的光电探测器(PIN)后利用光谱仪(HP 8563E)观测帧时钟信号频偏从 100 Hz 到 1 MHz 的相位噪声，测试结果如图 11 所示。积分后，帧时钟信号的相位噪声为 0.0115 Rad，对应的瞬时抖动为 184 fs。

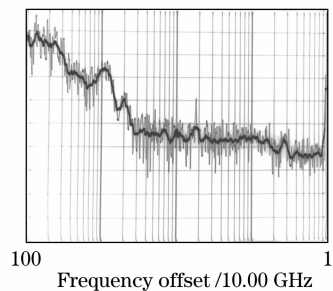


图 11 帧时钟信号的相位噪声的测量

Fig. 11 Measurement of packet clock signal phase noise

为了进一步测量帧时钟信号的质量，将光信号

4 结 论

本文提出并实验验证了利用红移的光窄带滤波器,可以有效减小帧时钟提取中的时钟建立和消失时间。利用 F-P 滤波器、SOA 加窄带滤波器的方案从 10.056 Gbit/s 的伪随机 RZ 码帧信号中得到了建立时间 2 个码字周期,消失时间 6 个码字的抖动小、噪声低的时钟帧。与传统方案相比较,本方案仅增加了 1 个无源器件,系统简洁而有效。尽管由于条件限制,只完成了 10 GHz 的时钟提取,但从原理来讲,对于速率更高的帧时钟提取,本方案依然是有效的。

参 考 文 献

- 1 H. Tsuchida. 160-Gb/s optical clock recovery using a regeneratively mode-locked laser diode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(16): 1687~1689
- 2 E. Kehayas, D. Tsiokos, P. Bakopoulos *et al.*. 40-Gb/s all-optical processing systems using hybrid photonic integration technology[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2006, **24**(12): 4903~4911
- 3 M. Presi, N. Calabretta, G. Contestabile *et al.*. Wide dynamic range all-optical clock and data recovery from preamble-free NRZ-DPSK packets[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 372~374
- 4 L. Stampoulidis, E. Kehayas, H. Avramopoulos *et al.*. 40 Gb/s fast-locking all-optical packet clock recovery[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2005. *Technical Digest. OFC/NFOEC Volume 4*, 2005, **4**: 6~11
- 5 M. Jinno, T. Matsumoto. Optical tank circuits used for all-optical timing recovery[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 895~900
- 6 Yu Jinlong, Wang Yaotian, zhang Aixu *et al.*. Experimental Study on 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
- 7 G. T. Kanellos, L. Stampoulidis, N. Pleros *et al.*. Clock and data recovery circuit for 10-Gb/s asynchronous optical packets [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11): 1666~1668
- 8 Wenrui Wang, Jinlong Yu, Aixu Zhang *et al.*. Investigation of a rate-selectable all-optical packet clock recovery system[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(7): 466~468
- 9 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. Theoretical and experimental study on 10 GHz all-optical packet clock recovery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 22~26
王文睿, 于晋龙, 张爱旭 等. 10 GHz 全光帧时钟提取的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 22~26