

文章编号: 0253-2239(2008)01-0021-06

10 GHz 全光帧时钟提取的理论和实验研究

王文睿 于晋龙 张爱旭 王耀天 崔跃 韩丙辰 闫浩
(天津大学电信学院光纤通信实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种新型的 10 GHz 全光帧时钟提取的提取方案。采用低精细度的法布里-珀罗(F-P)滤波器直接提出帧时钟,保证帧时钟的快速建立和快速消失。利用半导体光放大器(SOA)的自增益调制效应(SGM)对法布里-珀罗滤波器提取的帧时钟进行整形,降低帧时钟的幅度噪声。并推导了法布里-珀罗滤波器的精细度和半导体光放大器的自增益调制效应对帧时钟建立时间、消失时间的影响。通过理论分析表明,利用半导体光放大器的自增益调制效应可以降低帧时钟的幅度噪声并加快帧时钟建立速度。实验中,用上述方案对 10.075 GHz 的帧信号进行了全光帧时钟提取,得到了建立时间为 8 个信号周期,消失时间为 22 个信号周期,抖动为 2.35 ps 的帧时钟信号。

关键词 光纤通信; 全光帧时钟提取; 法布里-珀罗滤波器; 半导体光放大器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

Theoretical and Experimental Study on 10 GHz All-Optical Packet Clock Extraction

Wang Wenrui Yu Jinlong Zhang Aixu Wang Yaotian Cui Yue Han Bingchen Yan Hao
(School of Electronics & Information Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract A novel 10 Gbit/s all-optical packet clock extraction is proposed, which comprises a Fabry-Pérot (F-P) filter and a semiconductor optical amplifier (SOA). Low finesse Fabry-Pérot filter was used to directly extract the packet clock from the data packet which ensures that the clock locks fast and vanishes quickly. The clock, amplitude modulated as a result of low-Q filter, then goes into SOA to reduce the low-frequency amplitude noise. The effect of the SOAs SGM on the locking and unlocking time of the packet clock is theoretically analyzed. Instantaneous 10.075 GHz clock extraction experimentally with the establishing time of about 8 codes periods, vanishing time of about 22 codes period and time jitter of 2.35 ps is demonstrated.

Key words optical fiber communication; all-optical packet clock extraction; Fabry-Pérot filter; semiconductor optical amplifier (SOA)

1 引 言

随着网络通信的不断发展,为了克服电交换带来的瓶颈,全光交换技术成为通信界目前最受关注的核心技术之一。这其中,全光分组交换以其更强的网络灵活性,安全性和更强的服务功能以及与网络协议(IP)技术的无缝结合成为光交换的必然发展

方向。但是,要真正实现全光分组交换还有很多技术难题,如:高速率光分组的报头处理;光分组的再生;光分组的路由等,而这些问题的解决都涉及到了全光帧时钟的提取技术^[1~8]。由于在分组交换网络中,信号是以长度较短的“包”的形式突发地在网络中传输,因此与一般的全光时钟提取技术相比,在全

收稿日期: 2007-03-27; 收到修改稿日期: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60572013,60736035)和国家 863 计划(2007AA01Z272)资助课题。

作者简介: 王文睿(1980—),男,浙江宁波人,博士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。

E-mail: wwr_blue@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,山西长治人,教授,博士生导师,主要从事高速光通信系统方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

光帧时钟提取中,网络对时钟信号的建立时间和消失时间要求更为苛刻。

全光时钟提取方案主要有以下几种:锁相环^[2,3]、半导体锁模激光器、自脉动半导体激光器^[4,5]、光纤锁模激光器^[9,10]、法布里-珀罗滤波器^[11]等。对于光电锁相环方案,由于腔长较长,时钟建立时间过长;半导体锁模激光器和自脉动半导体激光器由于腔长很短,所以时钟建立时间较短,但它们的时钟消失的时间过长。光纤锁模激光器稳定性差,时钟建立消失时间长。相对而言,利用法布里-珀罗(F-P)光滤波器具有结构简单,时钟建立和消失时间较快的优点,适用于全光帧时钟信号的提取。

2 理论分析

本文采用自由光谱区与线路码率精确匹配的法布里-珀罗光滤波器从归零(RZ)码随机帧信号中直接进行滤波后得到时钟光脉冲。但是为了保证帧时钟的快速建立和消失,采用的法布里-珀罗滤波器 Q 值不高,提取时钟的幅度起伏较大。因此,利用了半导体光放大器(SOA)的自增益调制效应(SGM)对低 Q 值法布里-珀罗滤波器提取的时钟信号进行整形,并加快了帧时钟的建立速度,从而最终得到高质量的帧时钟信号。

2.1 法布里-珀罗滤波器时钟提取

从随机数字信号中提取时钟的前提是信号中必须含有丰富的定时信息。归零码数据脉冲的频谱分量中含有两部分:对应脉冲形状连续谱成分和对应脉冲速率的离散谱成分,即频谱中的时钟分量。时钟提取过程即是一个滤除连续谱,提取离散谱的过程。本文时钟提取单元里的关键技术是采用自由光谱区(FSR)与线路码率精确匹配的法布里-珀罗滤波器,透过峰与数据信号中心波长对准,这样时钟分量将通过滤波器,而其余连续谱分量会被滤除。

法布里-珀罗滤波器是一个光波谐振腔,滤波器精细度 Q 的选择对帧时钟信号的提取至关重要。它决定了时钟信号的质量。

可以认为实际线路的信号是“0”码和“1”码等概率出现的随机信号。假设光载波波长精确对准法布里-珀罗滤波器的透过峰,线路码率与法布里-珀罗滤波器的自由光谱区精确匹配。此时光信号通过法布里-珀罗滤波器产生的时钟信号幅度的均方根抖动为^[12]

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} - R - \frac{R^2}{2} - \frac{1}{2} \frac{(1-R^2)(1-R)^2}{1+R^2}}, \quad (1)$$

式中 R 为法布里-珀罗滤波器的端面反射率。事实上 Q 值由 R 唯一确定:

$$Q = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}. \quad (2)$$

如图 1 所示,法布里-珀罗滤波器的精细度高,输出时钟抖动幅度下降。直观地看法布里-珀罗的精细度越高,其透射窗口宽度越窄,则通过窗口的连续谱成分越少,所得到的脉冲噪声小、信噪比高。因此要得到高质量的时钟需要选用高精度法布里-珀罗滤波器。

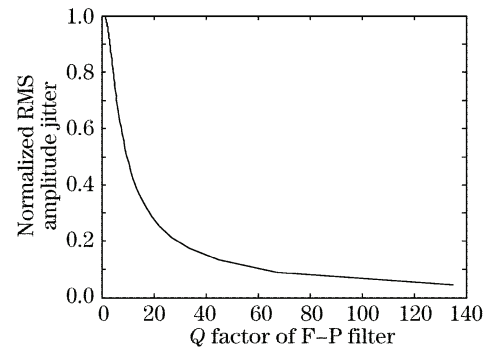


图 1 法布里-珀罗滤波器 Q 值与归一化时钟幅度抖动的关系

Fig. 1 Impacts of Q factor of Fabry-Pérot filter on normalized RMS amplitude jitter

帧时钟提取一般都需要一定的时间来建立时钟和使时钟振荡消失。这个时间的长短取决于滤波器的 Q 值。首先,考虑单一光脉冲进入法布里-珀罗的情况,输出脉冲序列的包络以如下指数形式下降:

$$y = \exp\left(-\frac{R_{fs}}{Q} \cdot 2\pi t\right), \quad (3)$$

其中 R_{fs} 为法布里-珀罗的自由光谱区, $R_{fs} = c/(2nx)$, 其中 c 为真空中的光速, n 为法布里-珀罗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。

对于帧时钟的下降沿(消失时刻),时钟峰值的包络将以同样的规律指数衰减。对于帧时钟的上升沿(建立时刻),首先假设建立时刻到达的全为“1”脉冲,事实上,在实际的分组交换系统中,每帧的帧头均有一定长度的连“1”码。此时,第 N 个“1”脉冲到达时,输出时钟可以用下式表示:

$$y(NT) = \sum_{i=0}^N \exp\left(-\frac{R_{fs}}{Q} \cdot 2\pi iT\right) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{R_{fs}}{Q} \cdot 2\pi NT\right)}{1 - \exp\left(-\frac{R_{fs}}{Q} \cdot 2\pi T\right)}, \quad (4)$$

其中 T 为时钟周期。

因此,帧时钟的上升沿处,时钟峰值的包络可以用下式表示:

$$y(t) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{R_{fs}}{Q} \cdot 2\pi t\right)}{1 - \exp\left(-\frac{R_{fs}}{Q} \cdot 2\pi T\right)}, \quad (5)$$

由(3)式、(5)式可见,法布里-珀罗得到时钟的上升沿和下降沿,时钟以相同的指数形式建立或消失。通常把时钟幅值从最大值的 10% 变化至 90% (90% 到 10%) 的时间称为时钟的建立时间 t_{on} (消失时间 t_{off})。由(3)式、(5)式得

$$t_{on} = t_{off} = Q \cdot \ln 9 / (2\pi \cdot R_{fs}), \quad (6)$$

可见,在帧时钟提取中,时钟的建立和消失时间和精细度 Q 值成正比。

为了提高网络利用率,分组交换网络中一般要求帧时钟的建立时间 t_{on} 和消失时间 t_{off} 尽可能短。因此,在帧时钟提取中,不可能选用高精度的法布里-珀罗滤波器。由(1)式可以看出,此时,提取到的帧时钟会含有大量噪声,时间抖动大,时钟信号质量较差。必须对提取后的时钟进行整形。可利用半导体光放大器的自增益调制效应来改善时钟信号。

2.2 利用半导体光放大器的自增益调制效应改善时钟信号

幅度调制的信号光经过半导体光放大器后,输出信号的调制深度 m_{out} 与输入信号调制深度 m_{in} 的比值为^[13]

$$m(\omega) = \frac{m_{out}}{m_{in}} = \left| \frac{1 + b - i\omega\tau_c}{1 + G_{CW}b - i\omega\tau_c} \right|, \quad (7)$$

式中 $b = \frac{\ln(G_0/G_{CW})}{G_{CW} - 1}$, ω 为调制信号角频率, G_0 为小信号增益, τ_c 为载流子寿命, G_{CW} 为直流光增益:

$$G_{CW} = G_0 \exp\left[-(G_{CW} - 1) \frac{P_{in}}{P_s}\right], \quad (8)$$

式中 P_{in} 为注入光功率, P_s 为半导体光放大器的饱和输出功率。

从(7)式可以看出,当输入信号功率较大时,受自增益调制效应作用,半导体光放大器表现出高通特性,对输入信号的低频幅度抖动有抑制作用。假设系统噪声为高斯白噪声,根据实验中所使用的参量, $G_0 = 16.8$ dB, $P_s = 6.5$ dBm, 对应 $P_{in} = 2$ dBm, 半导体光放大器的载流子寿命与其偏置电流有关,分别取 $\tau_c = 0.15$ ns, $\tau_c = 0.3$ ns, $\tau_c = 0.6$ ns。经过半导体光放大器的自增益调制效应抑制噪声,输出噪声曲线如图 2 所示,从图中可以看出,随着法布里-珀罗滤波器的 Q 值增加,系统的噪声减小,但是

当 Q 值增加到 50 以上时,系统噪声随 Q 值的变化变得不明显。同时考虑到 Q 值对帧时钟建立时间的影响[(6)式],在满足系统噪声要求的情况下, Q 值应当尽可能低。实验中采用精细度为 60、自由光谱区为 10 GHz 的法布里-珀罗滤波器,其通带带宽约为 0.167 GHz,因此过法布里-珀罗后时钟的幅度噪声也主要为 0.167 GHz 以下的低频噪声,故利用半导体光放大器的自增益调制效应可以显著抑制时钟的低频幅度抖动,改善法布里-珀罗提取的时钟波形。

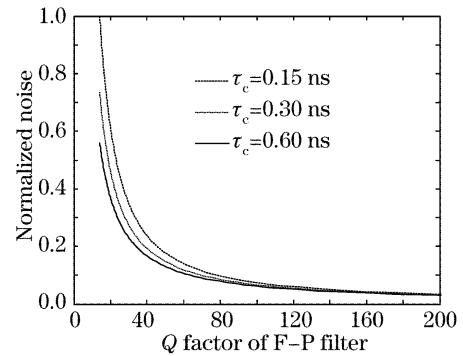


图 2 法布里-珀罗滤波器 Q 值与过半导体光放大器后归一化噪声的关系

Fig. 2 Impacts of Q factor of Fabry-Pérot filter on normalized noise after semiconductor optical amplifier

半导体光放大器的自增益调制效应除了可以抑制帧时钟的低频幅度抖动外,对帧时钟的上升时间和下降时间也会产生影响。但是迄今为止,尚没有相关文章对此进行报道。

帧时钟包络可以看作一个低速的脉冲,半导体光放大器对脉冲放大时,其增益可以表示为^[14]

$$\frac{dG}{d\tau} = \frac{G(\ln G_0 - \ln G)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_s} G(G - 1), \quad (9)$$

$$G(\tau) = \frac{G_0}{G_0 - (G_0 - 1) \exp[-E_0(\tau)/E_s]},$$

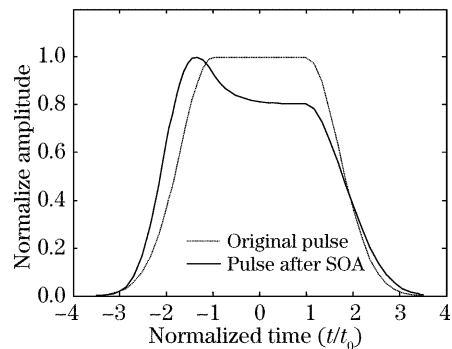


图 3 半导体光放大器的自增益调制效应对帧时钟包络的影响

Fig. 3 Impacts of SGM effect of SOA on envelope of packet clock

其中 E_s 为半导体光放大器的饱和能量, $E_0(\tau)$ 定义为

$$E_0(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} P_{in}(t) dt, \quad (10)$$

(9)式表明,对脉冲的不同部分,半导体光放大器具有不同的增益,脉冲前沿经历最大的增益,脉冲的后沿经历最小的增益,表现为帧时钟的上升沿变陡,而下降沿变缓,如图3所示。

3 系统实验

实验装置如图4所示,光源使用的是波长高度稳定并可调谐的激光器(Agilent81640A)输出连续光,其光谱宽度只有 12.5 MHz(10^{-4} nm),24 h 漂移小于 1 pm。从而保证了激光器输出波长能够与法布里-珀

罗滤波器的透射峰对准。首先用 10.075 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 10.075 Gb/s 伪随机信号经 LiNbO₃ 调制器 2 进行调制,并调节光可调延时线(ODL),从而得到 10.075 Gb/s 伪随机归零码信号。帧信号由 Anritsu ME522A 误码分析仪编码得到,经由 LiNbO₃ 调制器 3 调制在该伪随机归零码信号上。帧信号经由掺铒光纤放大器(EDFA)放大后放入精细度为 60 的法布里-珀罗滤波器得到能够快速建立和快速消失的帧时钟,法布里-珀罗滤波器通过高精度温控电路来稳定滤波器腔长,确保了滤波器透射窗口位置的稳定。法布里-珀罗滤波器提取的帧时钟经放大后进入半导体光放大器,利用自增益调制效应对时钟信号进行整形。

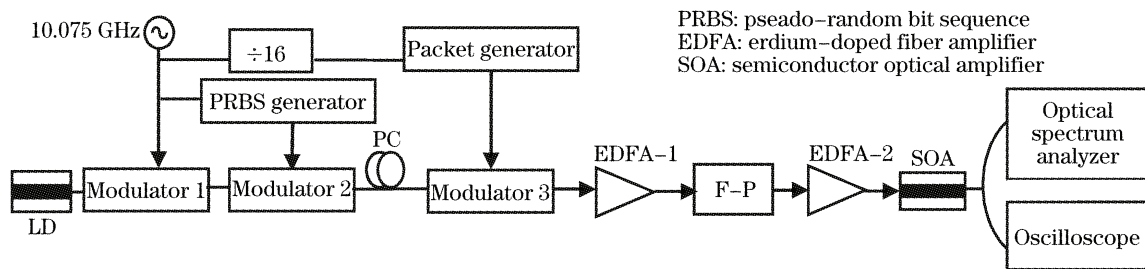


图4 全光帧时钟提取方案

Fig. 4 Experimental setup of all-optical frame clock recovery

4 实验结果与分析

对于上述全光帧时钟提取系统方案,通过 Agilent86100A 示波器观测记录时域波形,用 ANDO-AQ6317B 光谱仪观测记录光谱。

在实验中,通过两次强度调制产生归零码伪随机信号。帧信号由 10.075 GHz 正弦波经过 16 分频,作为 Anritsu ME522A 误码分析仪的外部触发输入,误码仪编码为 FFFF0000(16 进制),从而产生重复频率约为 19.678 MHz,半占空的帧同步信号。

经由 LiNbO₃ 调制器 3 产生帧信号,如图 5(a)所示。实际系统中,每帧信号应当是突发的,实验中,为便于通过示波器观察波形,帧同步信号取为信号速率的 1/512。

该帧信号输入一自由光谱区亦为 10.075 GHz 的法布里-珀罗滤波器,调节激光器输出波长为 1550.3877 nm 以精确对准法布里-珀罗滤波器的透射峰,如图 5 所示。法布里-珀罗提取的时钟信号经掺铒光纤放大器放大,调节进入半导体光放大器的

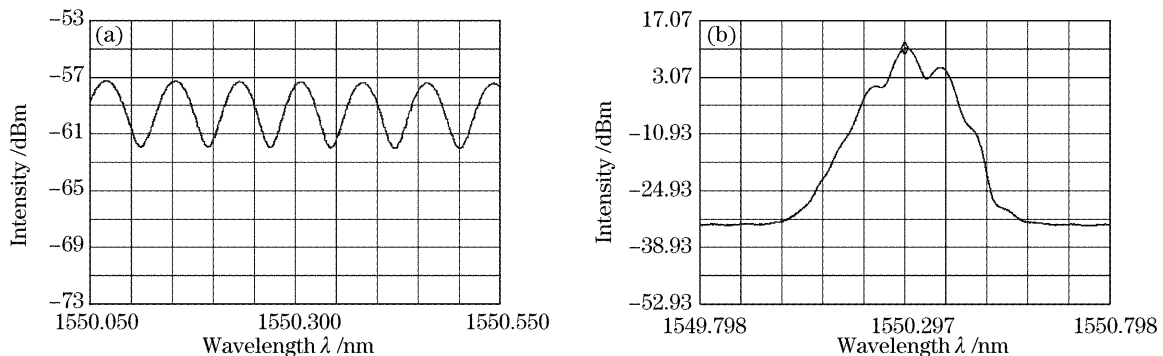


图5 (a)法布里-珀罗滤波器的透射谱, (b)帧信号的谱

Fig. 5 (a) Transmission spectrum of Fabry-Pérot filter, (b) spectrum of packet data signal

时钟信号功率为 2 dBm, 半导体光放大器工作电流为 200 mA。

图 6(b)和图 6(c)分别为经由法布里-珀罗提取时钟后帧包络的形状和经半导体光放大器整形后帧时钟包络的形状。理论上讲, 帧信号本身不存在建立时间和消失时间, 实际上, 由于实验中采用误码仪的速率限制, 实际帧信号包络有 2~3 个码字周期的上升时间和下降时间。经过法布里-珀罗提取的帧时钟包络上升沿和下降沿明显变缓, 从示波器上实际测量可得建立时间为 20 个码字周期, 消失时间为 15 个码字周期, 帧时钟持续时间为 250 个码字周期, 而由式(5)可以求得 Q 值为 60 的法布里-珀罗滤波器提取的帧时钟的建立和消失时间为 21 个码

字周期, 与实验结果基本吻合。经过半导体光放大器整形后, 由于自增益调制效应, 可以发现帧时钟包络的上升沿变陡, 而下降沿变缓, 实际测量得到帧时钟的建立时间和消失时间分别为 8 个码字周期和 22 个码字周期, 帧时钟持续时间为 261 个码字周期。

图 7 是将图 6 时间轴展宽的结果。图 7(a)是伪随机帧信号, 图 6(b)、图 6(c)分别为法布里-珀罗提取帧时钟的波形和经半导体光放大器整形后帧时钟的波形。可以看出由于 Q 值不高, 提取的帧时钟有明显的幅度抖动, 而经过半导体光放大器整形后, 帧时钟的质量得到明显的改善, 从示波器上可以测量出时钟的时间抖动为 2.35 ps。

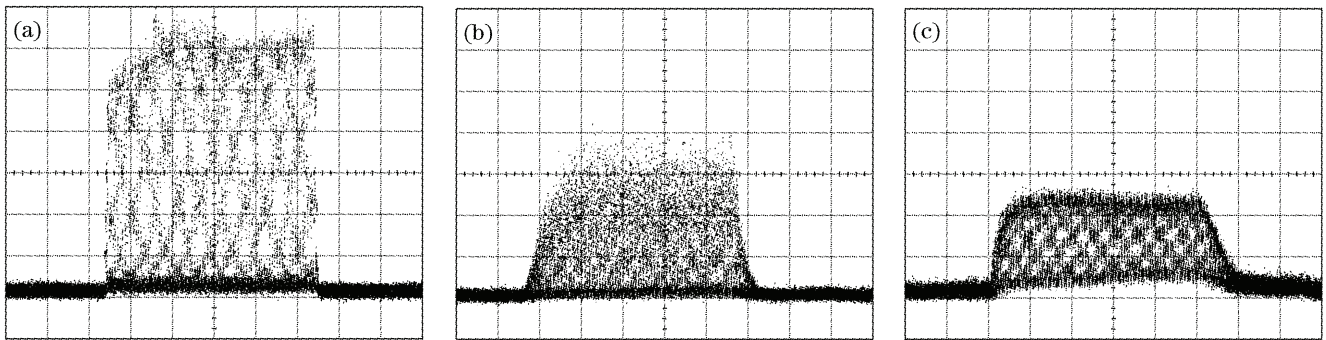


图 6 (a)输入信号帧, (b)法布里-珀罗提取的帧时钟, (c)半导体光放大器整形后的帧时钟

Fig. 6 (a) Input data packet, (b) Fabry-Pérot output, (c) recovered clock after SOA

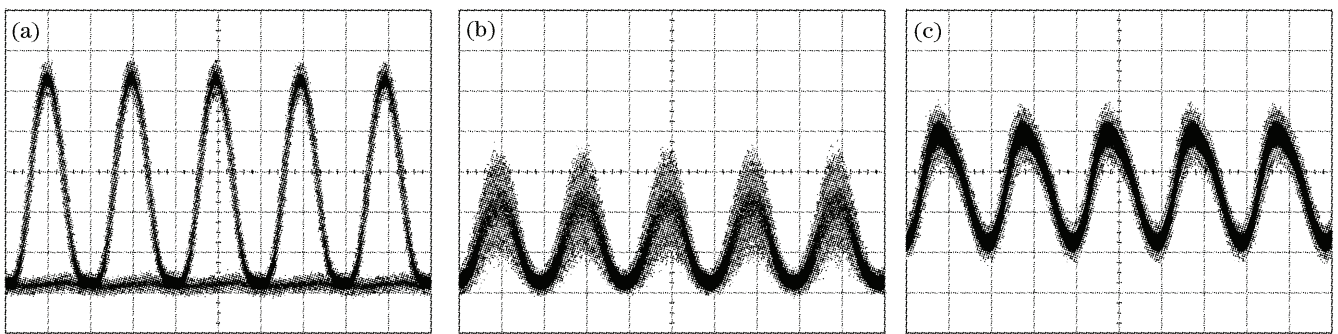


图 7 (a)输入伪随机信号眼图, (b)法布里-珀罗提取的帧时钟(眼图模式), (c)半导体光放大器整形后的帧时钟(眼图模式)

Fig. 7 Eye diagram of (a) input data, (b) extracted clock after Fabry-Pérot, (c) recovered clock after SOA

5 结 论

提出了一种新型全光帧时钟提取系统方案, 对方案进行了理论分析, 并进行了实验验证和测试。采用低精细度法布里-珀罗滤波器直接完成帧时钟提取, 后接半导体光放大器消除帧时钟的幅度抖动。从理论上分析了半导体光放大器的自增益调制效应加快帧时钟建立时间。实验证明, 从伪随机归零码帧信号中得到了抖动小、噪声低的 10.075 GHz 时钟。帧时钟的抖动为 2.35 ps。帧时钟建立时间 8

个码字周期, 消失时间 22 个码字周期, 持续时间 264 个码字周期。帧时钟建立时间快, 持续时间近似于帧数据信号持续时间, 为进一步进行全光分组交换的研究奠定良好的基础。

参 考 文 献

- 1 Z. Zhu, M. Funabashi, Z. Pan *et al.*. 10000-hop cascaded in-line all-optical 3R regeneration to achieve 1250000-km 10-Gb/s transmission[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(5): 718~720

- 2 Z. Hu, K. Nishimura, H.-F. Chou *et al.*. 40-Gb/s optical packet clock recovery with simultaneous reshaping using a traveling-wave electroabsorption modulator-based ring oscillator [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(12): 2640~2642
- 3 D. T. K. Tong, Kung-Li Deng, B. Mikkelsen *et al.*. 160 Gbit/s clock recovery using electroabsorption modulator-based phase-locked loop[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(23): 1951~1952
- 4 C. Ito, I. Monfils, J. Cartledge. All-optical 3R regeneration using higher-order four-wave mixing in a highly nonlinear fiber with a clock-modulated optical pump signal [C]. *Lasers & Electro-Optics Society*, 2006. 223~224
- 5 C. Bornholdt, B. Sartorius, S. Schelbase *et al.*. Self-pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gbit/s [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 327~328
- 6 G. T. Kanellos, L. Stampoulidis, N. Pleros *et al.*. Clock and data recovery circuit for 10-Gb/s asynchronous optical packets [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11): 1666~1668
- 7 C. Bintjas, K. Yiannopoulos, N. Pleros *et al.*. Clock recovery circuit for optical packets[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1363~1365
- 8 Zhang Feng, Chen Ming, Qin Xi *et al.*. All optical clock recovery from degraded non-return-to-zero data stream [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1101~1105
张 峰, 陈 明, 秦 曦 等. 恶化非归零码信号的全光时钟恢复 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1101~1105
- 9 Lú 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
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
- 10 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
- 11 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
- 12 Xiang Zhou, Chao Lu, Ping Shum *et al.*. A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Pérot filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5): 603~613
- 13 Zhang Yandong, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. The suppression of amplitude fluctuating noise of the all-optical clock using the SGM of SOA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 267~269
张艳冬, 于晋龙, 王耀天 等. 全光时钟提取中利用 SOA 抑制低频噪声的实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 267~269
- 14 G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers[J]. *J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(11): 2297~2306