

文章编号: 0253-2239(2008)03-0423-06

一种新型多速率归零码全光帧时钟提取系统

王文睿 于晋龙 张爱旭 韩丙辰 胡 浩 张立台 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种新型的、低成本的多速率归零(RZ)码全光帧时钟提取方案。采用低精细度的法布里-珀罗滤波器(F-P)直接提取不同速率的帧时钟,保证帧时钟的快速建立和快速消失。利用不同的偏振延时干涉仪(PDI)和自由光谱区(FSR)的法布里-珀罗滤波器构成组合滤波器以实现多速率帧时钟提取。利用半导体光放大器(SOA)的自增益调制效应(SGM)对组合滤波器提取的帧时钟进行整形,降低帧时钟的幅度噪声和时间抖动。实验中,利用光开关切换不同的偏振延时干涉仪构成不同自由光谱区的组合滤波器实现了 10 GHz、20 GHz 和 40 GHz 的帧时钟提取,得到了高质量、低时间抖动的多速率帧时钟信号。

关键词 光纤通信; 全光帧时钟提取; 多速率; 法布里-珀罗滤波器; 偏振延时干涉仪

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

A Novel Multi-Rate All-Optical Packet Clock Recovery System of Return-to-Zero Code

Wang Wenrui Yu Jinlong Zhang Aixu Han Bingchen Hu Hao Zhang Litai Yang Enze

(Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electronic & Information Engineering,
Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract We propose a novel, economical multi-rate all-optical packet clock extraction scheme of return-to-zero code, which comprises a Fabry-Pérot (F-P) filter, a semiconductor optical amplifier (SOA) and polarization dependent delay interferometers (PDIs). Fabry-Pérot (F-P) filter with low finesse and low free spectral range was used to directly extract the multi-rate packet clock from the packet data stream, which ensures that the clock establishes and vanishes quickly. Different PDIs, combined with F-P filter was used to form comb filters with different FSRs to extract multi-rate packet clock. The packet clock then goes into SOA to reduce the low-frequency amplitude noise and temporal fluctuation with the self-gain modulation effect of SOA. We demonstrate instantaneous 10 GHz, 20 GHz and 40 GHz packet clock extraction experimentally by switching different PDI and forming filters with different FSR. Multi-rate packet clock signals with high quality and low temporal fluctuation are obtained.

Key words optical fiber communication; all-optical packet clock recovery; multi-rate; Fabry-Pérot filter; polarization-dependent delay interferometer (PDI)

1 引 言

近年来,随着因特网中数据容量的飞速增长,全光网络引起了越来越多的关注。其中,全光分组交换网络(OPS)以其极高的网络利用率,与 IP 技术的

无缝结合成为全光通信网络的必然发展方向。在全光分组交换网络中,由于数据业务的突发特性,在交换节点对数据信号进行全光处理时,必须首先从数据信号中提取出与数据信号同步的帧时钟。因此,

收稿日期: 2007-08-14; 收到修改稿日期: 2007-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(60736035,60572013)和天津市自然科学基金(06YFJMJC01400)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

可以说全光帧时钟提取技术是实现全光分组交换网络的技术基础。

全光帧时钟提取的方案主要有自脉动激光器^[1]、基于电可吸收调制器(EAM)的光电锁相环^[2]、法布里-珀罗(F-P)滤波器加半导体光放大器(SOA)整形^[3~6]等。尤其是基于无源的法布里-珀罗滤波器的帧时钟提取方案,因其结构简单,帧时钟建立速度快,成为全光帧时钟提取技术的研究热点所在。但是,在未来的全光交换网络中,很可能存在多速率网络,在网络中可能同时存在 10 Gb/s、20 Gb/s、40 Gb/s等多种速率的数据信号,此外在不同网络的网关处,也存在对不同速率的光信号进行帧时钟提取的需求,而目前的帧时钟方案都只能用于提取固定频率的时钟,不适合用于多速率的帧时钟提取。

本文提出了一种新型的多速率帧时钟提取的方案,采用单一的法布里-珀罗滤波器和半导体光放大器,利用低自由光谱区(FSR)的法布里-珀罗滤波器和不同的偏振延时干涉仪(PDI)结构构成不同自由光谱区的组合滤波器。系统只需切换不同的偏振延时干涉仪即可实现多速率的全光帧时钟提取,从而大大降低了多速率帧时钟提取系统的成本。

2 理论分析

归零(RZ)码数据脉冲的频谱分量中含有两部分:对应脉冲形状和码字序列的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。利用法布里-珀罗滤波器提取帧时钟的原理就是利用法布里-珀罗滤波器的梳状滤波特性,将对应数据速率的离散谱分量滤出,而将对应波形和码字的连续谱分量滤除。因此,一般情况下,利用法布里-珀罗滤波器提取帧时钟时,法布里-珀罗滤波器的自由光谱区应当与线路码率精确匹配,且透过峰与数据信号中心波长对准。

但是,从理论上讲,由于法布里-珀罗滤波器的通带特性是梳状谱,因此也可以用于线路码率为法布里-珀罗滤波器自由光谱区的整数倍的帧时钟提取,但此时会有较大的亚时钟频率的谐波干扰。图1为光通信系统仿真软件 Optisystem 对自由光谱区为 10 GHz 的法布里-珀罗滤波器提取 20 Gb/s 帧时钟的数值仿真结果,可以看到,除了 20 GHz(对应谱宽约 0.16 nm)的时钟分量外,提取出的时钟在

10 GHz(对应谱宽约 0.08 nm)有较强的亚时钟频率分量。为了得到高质量的帧时钟信号,就必须滤除该频率分量,本文采用偏振延时干涉仪结构实现这一功能。

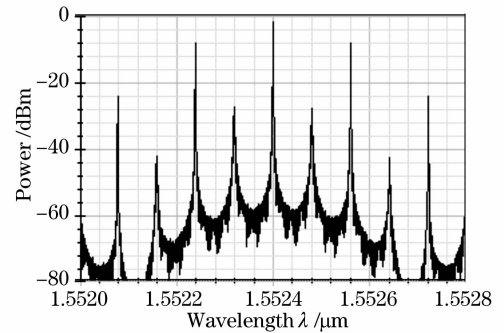


图1 10 GHz 的法布里-珀罗滤波器提取 20 Gb/s 的数据信号的仿真结果

Fig. 1 Simulated spectrum of 20 GHz optical packet clock recovery using Fabry-Pérot filter (FPF) with 10 GHz free spectral range (FSR)

偏振延时干涉仪结构如图2所示,由偏振控制器(PC)、保偏光纤(PMF)和起偏器级联而成。

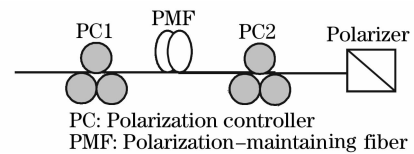


图2 偏振延时干涉仪结构

Fig. 2 Setup of polarization-dependent delay (PDI) interferometer

设通过 PC1 后的光信号为线偏光,可以表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp[j\psi(t)], \quad (1)$$

式中 E_0 为光信号的场强, $\psi(t)$ 为光信号的相位。

光信号注入保偏光纤后,由于保偏光纤的双折射效应,快轴和慢轴的光信号会产生一相位差。在保偏光纤的输出端的光信号的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_{ol}(t) = \begin{bmatrix} E_f \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \cos \theta \cdot \exp[j\psi(t)] \\ E_0 \sin \theta \cdot \exp[j\psi(t - \tau_{DGD})] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 E_f, E_s 分别为光信号在保偏光纤快轴和慢轴上的电场强度分量, θ 为线偏光的偏振方向和保偏光纤的快轴的夹角,而 τ_{DGD} 则为保偏光纤的差分群时延。

经过 PC2 后,理论上可以将光信号调整至任意偏振态,即对输出光的椭圆率和方向角做任意调节,故其输出光的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_{PC2}(t) = \begin{bmatrix} E_f \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_0 \cos \theta \cdot \exp[j\psi(t)] \\ E_0 \sin \theta \cdot \exp[j\psi(t - \tau_{DGD})] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_0 \cos \theta \cdot \exp[j\psi(t)] \\ E_0 \sin \theta \cdot \exp\{j[\psi(t - \tau_{DGD}) - \delta]\} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\alpha, \delta \in [0, 2\pi)$, δ 为 PC2 对光信号椭圆率的改变, 而 α 为 PC2 对光信号方向角的改变量。

为讨论方便起见, 将 PC2 后的光信号的正交分量坐标轴逆时针旋转 α 度, 即

$$\mathbf{E}_{PC2}(t) = \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_f \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \cos \theta \cdot \exp[j\psi(t)] \\ E_0 \sin \theta \cdot \exp\{j[\psi(t - \tau_{DGD}) - \delta]\} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

调整 PC1 和 PC2, 使得 $\theta = \pi/4$, E'_x 和 E'_y 的方向与起偏器成 45° , 这样通过起偏器后输出信号的强度可以表示为

$$|\hat{E}_{out}(t)|^2 = \frac{1}{2} |E'_x|^2 + \frac{1}{2} |E'_y|^2 = \frac{1}{4} E_0^2 \cos^2[\psi(t)] + \frac{1}{4} E_0^2 \cos^2[\psi(t - \tau_{DGD}) - \delta] = |E_0|^2 \cos(\omega \tau_{DGD} + \delta) \cos[\psi(t) + \delta + \psi(t - \tau_{DGD})], \quad (4)$$

式中 ω 为输入光载波信号的频率。从(5)式可以看出, 偏振延时干涉仪的频谱特性为一个正弦形状的梳状滤波器, 如图 3 中虚线所示。

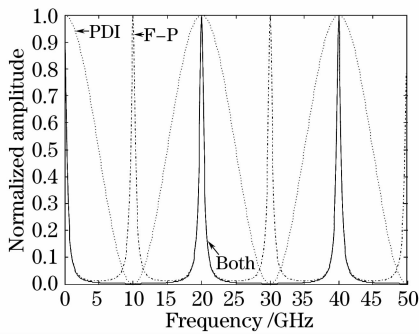


图 3 利用偏振延时干涉仪和 10 GHz 的自由光谱区的法布里-珀罗滤波器构成 20 GHz 自由光谱区的组合滤波器
Fig. 3 Comb filter with FSR of 20 GHz consisting of polarization delay interferometer and Fabry-Pérot filter with 10 GHz free spectral range

图 3 中保偏光纤的差分群时延 τ_{DGD} 决定了梳状谱的周期为 $1/\tau_{DGD}$, 而通过调节偏振控制器改变 δ ,

则可以实现梳状谱在频域的平移。这样, 如果将一个自由光谱区为 10 GHz 的法布里-珀罗滤波器和一个差分群时延为 50 ps 的偏振延时干涉仪级联, 如图 3 所示, 可以得到一个自由光谱区为 20 GHz 的组合梳状滤波器。

3 系统实验及结果分析

实验装置如图 4 所示。实验中, 为了通过光时分复用(OTDM)技术得到 20 Gb/s 和 40 Gb/s 的帧数据信号, 需要首先得到 10 Gb/s 的窄脉冲信号源, LD1 为直调激光器, 微波源 (Agilent E8257D) 产生 10.056 GHz 正弦波, 同时对 LD1 和相位调制器 (PM) 进行调制, 从而产生带负啁啾的光脉冲序列, 然后经过色散补偿光纤 (DCF) 压缩啁啾的方法可以得到 10.056 Gb/s 的窄脉冲源^[7]。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 伪随机归零码信号。再由 10.056 Gb/s 数据信号经

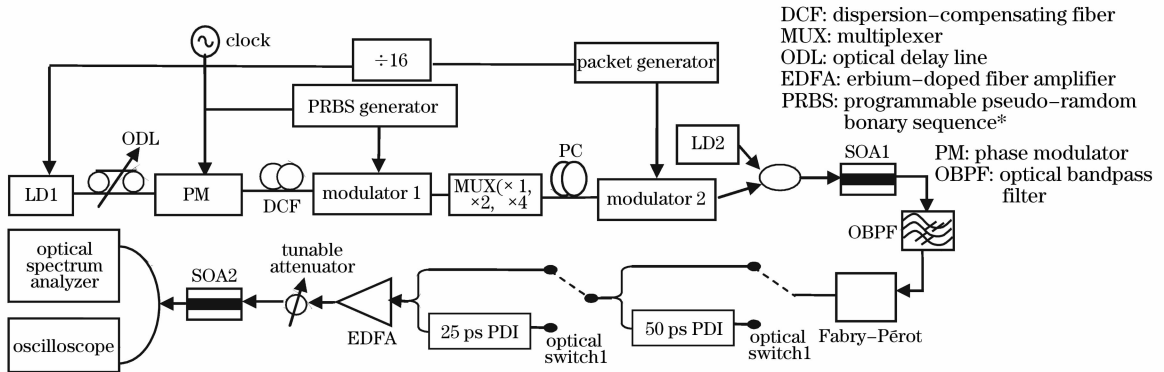


图 4 多速率全光帧时钟提取实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of multi-rate all-optical packet clock recovery

光时分复用得到 20.112 Gb/s 和 40.224 Gb/s 的帧数据信号。在实际分组网络中,帧信号应当是突发的,并没有固定的到达时刻,但在实验中,为便于通过采样示波器观察波形,帧信号由 Anritsu ME522A 误码分析仪编码得到,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 1:1,经由 LiNbO₃ 调制器 2 调制在伪随机归零码信号上,从而产生 10.056 Gb/s 信号。

在实际的分组交换网络中,数据信号的波长并不一定对准法布里-珀罗滤波器的透过峰,因此在利用法布里-珀罗滤波器进行帧时钟提取前,必须把信号的波长变换到法布里-珀罗滤波器的透过峰上。系统中是将帧数据信号和可调谐高稳光源 LD2 输

出的连续光同时送入 LD1 中,利用半导体光放大器的交叉相位调制(XPM)效应实现正码波长变换。实验中,帧数据信号的波长为 1554.546 nm。利用 SOA1 的交叉相位调制(XPM)效应,通过光窄带滤波器(OBPS)滤波,数据的波长变换到 1552.429 nm,与法布里-珀罗滤波器的透过峰精确对准。实验中,半导体光放大器的偏置电流为 200 mA,滤波器带宽为 0.26 nm。波长变换后的帧数据信号包络如图 5 所示,图 5 分别是利用过 Agilent86100A 示波器观测记录的 10 Gb/s、20 Gb/s 和 40 Gb/s 正码波长变换后帧数据信号的包络波形,而图 6 分别是将图 5 中对应图在时间轴上展宽的结果,分别是 10 Gb/s、20 Gb/s 和 40 Gb/s 正码波长变换后的帧数据信号的眼图。

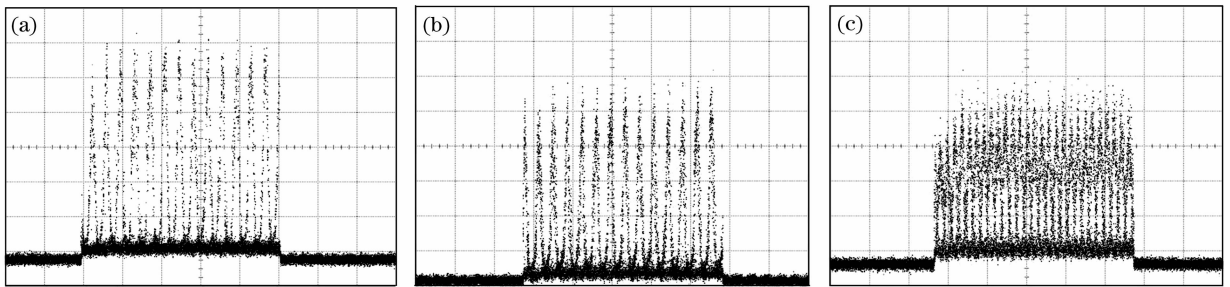


图 5 帧包络。(a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s, (c) 40 Gb/s

Fig. 5 Envelope of (a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s, (c) 40 Gb/s packet data

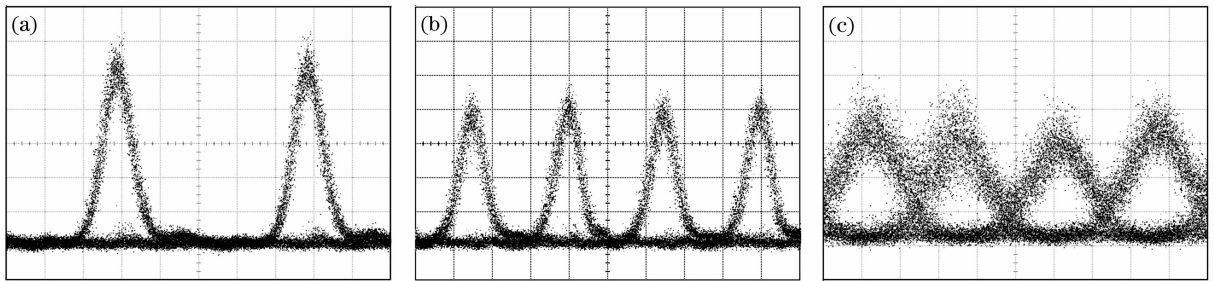


图 6 正码波长变换后的信号眼图(a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s, (c) 40 Gb/s

Fig. 6 Eye diagram of (a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s, (c) 40 Gb/s packet data after wavelength conversion

帧信号随后进入精细度为 50 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-珀罗滤波器由高精度温控电路控制,以保证法布里-珀罗滤波器的腔长稳定,从而确保了滤波器透射窗口位置的稳定性。

当帧数据码率为 20 Gb/s 或 40 Gb/s 时,如上文分析的,利用自由光谱区为 10 GHz 的法布里-珀罗滤波器对其进行时钟提取时,除了 20 GHz 和 40 GHz 的时钟分量外,在 10 GHz 有较大的亚时钟谐波频率分量。光谱仪的分辨力相对较低,为了更好地观测实验结果,将提取的帧时钟通过 50 GHz 的光电

探测器(PIN)后在光谱仪(HP 8563E)上观测其波形。当系统输入为 20 Gb/s 的帧数据信号,光开关 1 和光开关 2 均切换至直通臂上,即不采用偏振延时干涉仪。提取的帧时钟信号经过 PIN 检测后的电谱如图 7(a)所示,可以看出此时系统在 10 GHz 处有明显的亚时钟谐波频率分量。此时如果将光开关 1 切换至 50 ps 的偏振延时干涉仪时,如上文分析的,偏振延时干涉仪滤波器对应的峰值在 20 GHz 处,而谷值恰好在 10 GHz 处,因此对 10 GHz 处的噪声有很好的抑制效果。图 7(b)为此时的帧时钟信号经过 PIN 检测的电谱图,与图 7(a)相比,可以

明显地看出 10 GHz 处的噪声得到了很好的抑制，10 GHz 处的噪声峰值降低了约 10 dB。

图 8 是 40 Gb/s 帧时钟提取的实验结果，由于实验室光谱仪的最高测试频率为 26 GHz，无法利用光谱仪测量一个更为直观的实验效果，只能从 Agilent86142B 光谱仪观测记录光谱，图 8(a)是不加

偏振延时干涉仪的情况，可以看出光谱上有比较明显的 10 GHz 的分量(对应光谱间隔约为 0.08 nm)。而图 8(b)为同时加上了 50 ps 的偏振延时干涉仪和 25 ps 的偏振延时干涉仪后的光谱图，可以看出此时谱上存在比较干净的 40 GHz 分量(对应光谱间隔约为 0.32 nm)。

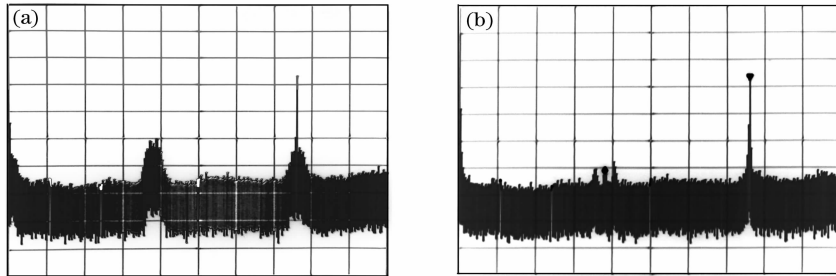


图 7 20 GHz 帧时钟提取的电谱图。(a)不加偏振延时干涉仪，(b)加入偏振延时干涉仪

Fig. 7 Electronic spectrum of 20 GHz packet clock recovery. (a) Without PDI, (b) with PDI

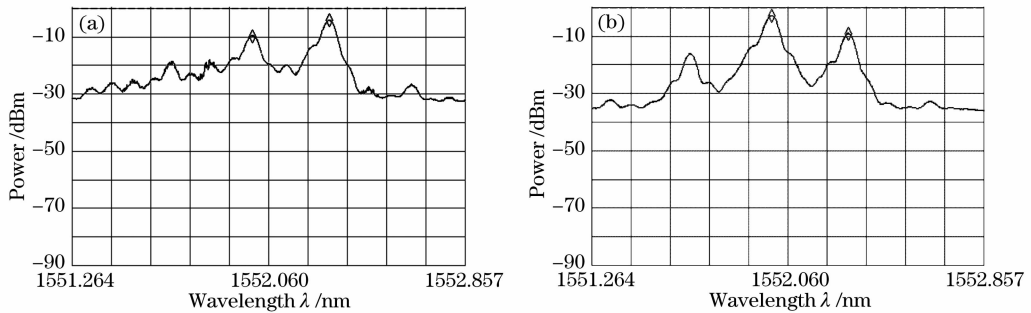


图 8 20 GHz 帧时钟提取的电谱图。(a)不加偏振延时干涉仪，(b)加入偏振延时干涉仪

Fig. 8 Electronic spectrum of 20 GHz packet clock recovery. (a) Without PDI, (b) with PDI

这样，通过 1×2 的电光开关选择帧时钟信号经过不同的偏振延时干涉仪滤波器，10 GHz 的帧时钟选择直通臂，20 GHz 的帧时钟经过 50 ps 的偏振延时干涉仪，而 40 GHz 的帧时钟信号同时经过 50 ps 和 25 ps 的偏振延时干涉仪。这样就可以通过低自由光谱区的法布里-珀罗滤波器和不同的偏振延时干涉仪的组合得到不同自由光谱区的组合滤波器。

提取的帧时钟经掺铒光纤放大器放大后进入半导体光放大器，利用半导体光放大器的自增益调制

(SGM)效应对时钟信号进行整形。进入半导体光放大器的信号光功率为 0 dBm，半导体光放大器的偏置电流为 250 mA。图 9 是最终得到的时钟眼图，图 9 分别对应了 10 GHz、20 GHz 和 40 GHz 的帧时钟提取结果。通过光开关 1 和光开关 2 切换不同的偏振延时干涉仪滤波器，用相同的正码波长变换单元、单一的法布里-珀罗滤波器和半导体光放大器整形结构实现了多速率的帧时钟提取。

为了测量帧信号的时间抖动，图 10(a)给出了

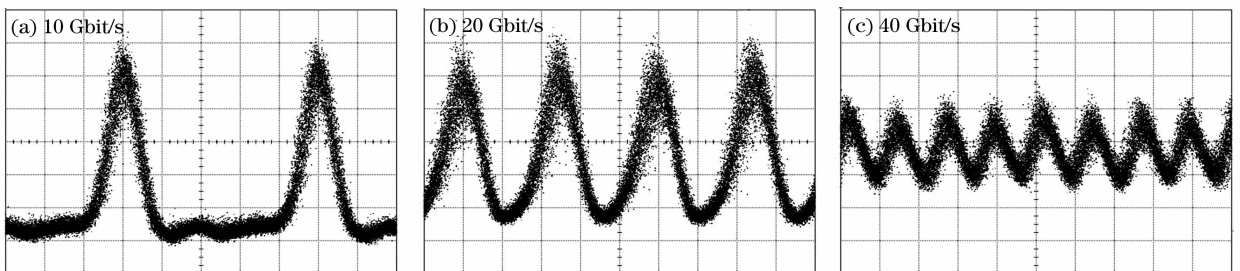


图 9 提取得到的帧时钟信号眼图。(a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s, (c) 40 Gb/s

Fig. 9 Eye diagram of (a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s, (c) 40 Gb/s recovered packet clock

10 GHz 的帧时钟的单边带相位噪声曲线,可以看出帧时钟的相位噪声在 10 kHz 时为 -100.00 dBc/Hz。为了得到光信号抖动 σ 的情况,对噪声功率谱从 100 Hz~1 MHz 的范围内进行积分,得到 1 GHz 的帧时钟的相位噪声为 0.0219 rad,并根据关系式^[8,9]

$$\sigma = \sqrt{2 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} L(f) df} / (2\pi f_{\text{osc}}), \quad (6)$$

得到抖动为 347 fs。式中 $L(f)$ 为相位噪声, f_{osc} 为

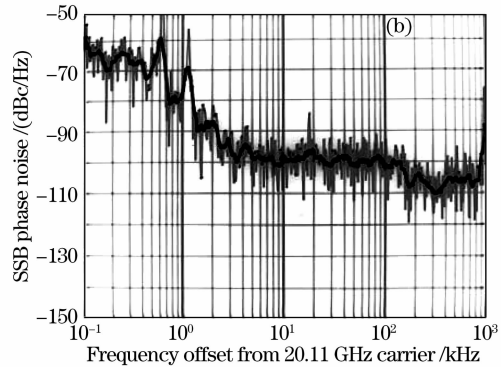
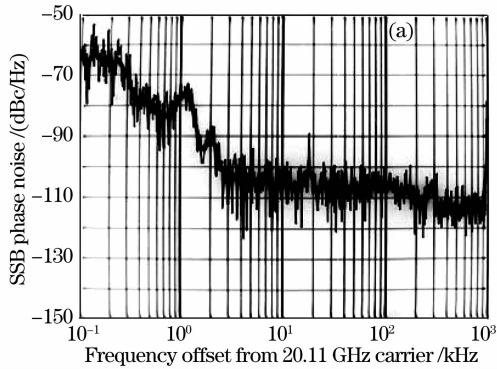


图 10 帧时钟信号的相位噪声。(a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s

Fig. 10 Phase noise of (a) 10 Gb/s, (b) 20 Gb/s recovered packet clock

4 结 论

提出了一种新型多速率全光帧时钟提取系统方案。利用低精细度、低自由光谱区的法布里-珀罗滤波器和不同的偏振延时干涉仪组成组合滤波器完成多速率帧时钟提取,并利用半导体光放大器的自增益效应抑制时钟的噪声。实验中,利用两个光开关切换不同差分群时延的偏振延时干涉仪实现了 10 GHz、20 GHz 和 40 GHz 的帧时钟信号提取,得到的帧时钟抖动小,噪声低。10 GHz 帧时钟抖动仅为 347 fs,而 20 GHz 的帧时钟抖动仅为 184 fs。

参 考 文 献

- 1 B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer *et al.*. 40 GHz optical clock recovery for application in asynchronous networks[C]. *Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Commun.*, 2001. 442~443
- 2 Zhaoyang Hu, Kohsuke Nishimura, Hsu-feng Chou *et al.*. 40-Gb/s optical packet clock recovery with simultaneous reshaping using a traveling-wave electroabsorption modulator-based ring oscillator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(12): 2640~2642
- 3 E. Kehayas, D. Tsiokos, P. Bakopoulos *et al.*. 40-Gb/s all-optical processing systems using hybrid photonic integration

起振频率。

图10(b)则给出了 20 GHz 帧时钟的单边带相位噪声曲线,可以看出帧时钟的相位噪声在 10 kHz 时为 -104.67 dBc/Hz,从 100 Hz~1 MHz 的范围内进行积分后为 0.0232 rad。同样可以得到帧时钟的时间抖动为 184 fs。

同样,由于电谱仪的功能限制,无法对 40 GHz 的帧时钟信号进行相位噪声和时间抖动的测量。

technology[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4903~4911

- 4 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
- 5 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
- 6 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): 21~26
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): 21~26
- 7 Hao Hu, Jinlong Yu, Litai Zhang *et al.*. Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(14): 8931~8937
- 8 J. Lasri, P. Devgan, R. Tang *et al.*. Self-starting optoelectronic oscillator for generating ultra-low-jitter high-rate (10 GHz or higher) optical pulses[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(12): 1430~1435
- 9 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 919~922
江 阳,于晋龙,王耀天等. 一种新型双环路光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919~922