

# 基于改进光电振荡器结构的超短光帧时钟脉冲提取

解 析 霍 力 王 强 王 东 娄 采 云

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 研究了一种基于双相位调制器(PM)结构的光电振荡器(OEO)。利用 OEO 提取的电时钟对外加的连续光进行相位调制,再经过光带通滤波器(OBPF)进行偏移滤波,产生了脉宽为 7.6 ps 的光脉冲。随后进入由相位调制器和单模光纤(SMF)组成的脉冲压缩器进行脉冲压缩,从而得到脉宽很窄的光帧时钟。实验中,成功实现了从  $4 \times 25$  Gbit/s 信号中同时提取出 25 GHz 的光时钟和电时钟。光时钟的脉冲宽度为 3.1 ps, 占空比为 7.75%, 时间抖动为 135 fs(100 Hz~10 MHz)。电时钟载噪比为 61.7 dB, 时间抖动为 118 fs(100 Hz~10 MHz)。

**关键词** 光通信;光电振荡器;帧时钟提取;光时分复用;相位调制器

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0806003

## Ultra-Short Optical Prescaled Clock Recovery Based on an Improved Optoelectronic Oscillator

Xie Xi Huo Li Wang Qiang Wang Dong Lou Caiyun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** An optoelectronic oscillator (OEO) on the basis of two phase modulators is proposed. The incident continuous wave (CW) light is modulated firstly by a phase modulator (PM). The PM is driven by the electrical prescaled clock extracted from this improved OEO. The spectrum of the modulated CW light is then sliced by an optical band-pass filter (OBPF) on the blue side or red side to the original center wavelength. The generated 7.6 ps optical pulses are subsequently launched into a pulse compressor, which consists of a PM and a single-mode-fiber (SMF). Thereby, optical prescaled clock with a narrow width is then obtained. 25 GHz optical clock and electrical clock are experimentally extracted from  $4 \times 25$  Gbit/s signal. The width of optical clock pulse is 3.1 ps, which corresponds to a duty cycle of 7.75%. The resulted timing-jitter (100 Hz to 10 MHz) is 135 fs. The carrier-to-noise ratio of electrical clock is 61.7 dB and its timing jitter (100 Hz to 10 MHz) is 118 fs.

**Key words** optical communications; optoelectronic oscillator; prescaled clock recovery; optical time division multiplexing; phase modulator

**OCIS codes** 060.4510; 060.4230; 230.4910; 320.5520

## 1 引 言

随着互联网、高清视频等业务的迅猛发展,对于高速率、大容量的通信需求变得越来越强烈。通过提高单波长信道数量来增加通信容量的光时分复用(OTDM)技术具有光源波长固定、对放大器的带宽和增益平坦度要求低、非线性影响小等优点,具有广

阔的研究潜力和发展空间。

在 OTDM 系统中,帧时钟提取技术是其一个关键技术,是完成信道解复用的重要环节。在接收机中或光信号处理节点中,分出一小部分光信号功率,注入到时钟提取模块中,可以实现位时钟或帧时钟提取功能。帧时钟提取,即从  $N$  条支路信号时分

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-04-17

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301703)、国家自然科学基金(61275032,61077055)

作者简介: 解 析(1984—),男,硕士研究生,主要从事信息光电子学与高速光通信方面的研究。

E-mail: jx12@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 霍 力(1976—),男,副教授,主要从事信息光电子学与高速光通信方面的研究。

E-mail: lhuo@tsinghua.edu.cn

复用后速率为  $N \times B$  的码流中提取出速率为  $B$  的帧时钟。提取出的帧时钟经不同延时后对应给不同信道从而完成解复用。在解复用中,基于光纤的非线性、硅基波导等半导体器件<sup>[1-2]</sup>的全光解时分复用都需要光帧时钟,而基于调制器的光电解时分复用则需要电帧时钟<sup>[3-4]</sup>。帧时钟的时间抖动和宽度影响 OTDM 系统解时分复用的质量,因此要求帧时钟提取单元应该有较高的灵敏度,偏振不敏感,恢复的时钟具有尽可能小的时间抖动。对于  $100 \sim 25$  Gbit/s 的全光解复用,要求光时钟的脉宽小于  $10$  ps,与信号光相同的脉宽更利于消除信道的串扰。

近些年,帧时钟提取技术历经发展,大体可以归纳为三大类:电时钟提取、全光时钟提取和光电混合时钟提取。依据解复用的要求,需要提取的帧时钟为电和光脉冲两种。基于窄带带通滤波器的电时钟提取,提取能力完全依赖于电器件的处理能力,所以严重受限于电子速率瓶颈,同时难于处理各信道幅度相同的情况,无法应用在高速 OTDM 系统。而全光时钟提取中利用锁模激光器的方案受限于器件制作的难度<sup>[5]</sup>。光电混合时钟提取中,使用光电锁相环(PLL)和光电振荡器(OEO)来进行时钟提取的方案都比较常见,但是仅可以提取电时钟,PLL 还需要压控振荡器(VCO)等器件,而  $40$  GHz 的 VCO 尚无产品<sup>[6]</sup>。相比而言,OEO 具有结构简单、无需高频器件、频率锁定范围大、提取的时钟质量高以及相位噪声与工作频率无关等优点,是目前较为成熟和普遍使用的方法<sup>[7]</sup>。目前一些基于 OEO 的光电混合结构还可以同时提取光、电帧时钟,

Tsuchida 等<sup>[8]</sup>利用注入锁定的 OEO 实现了从  $4 \times 40$  Gbit/s 的数据信号中提取  $40$  GHz 的光和电帧时钟,但其所提取的光时钟脉冲宽度较宽,为  $11.3$  ps,时间抖动为  $782$  fs( $10$  Hz $\sim$  $18.6$  MHz)。文献<sup>[9-10]</sup>也实现了光和电帧时钟的同时提取,但他们是借助于锁模半导体激光器或锁模光纤激光器,技术比较复杂。

本文提出了一种基于双相位调制器(PM)的 OEO 结构,可以实现从  $4 \times 25$  Gbit/s 信号中同时提取出  $25$  GHz 的支路光时钟和电时钟,提取的光时钟脉冲宽度仅为  $3.1$  ps,时间抖动为  $135$  fs( $100$  Hz $\sim$  $10$  MHz);电时钟的载噪比为  $61.7$  dB,时间抖动为  $118$  fs( $100$  Hz $\sim$  $10$  MHz)。

## 2 实验装置和原理

实验的装置如图 1 所示,由两部分构成,一部分为 OEO 环路,另一部分为双 PM 超短光脉冲产生模块,两个部分共用一个相位调制器(PM1)。OEO 环路是由相位调制器(PM1)、光带通滤波器(OBPF1)、光电转换器(PIN)、电带通滤波器(EBPF)、移相器(PS1)和电放大器(EA1)构成的正反馈环路。超短光脉冲产生模块包括分布反馈激光器(DFB)、相位调制器(PM1)、掺铒光纤放大器(EDFA)、光带通滤波器(OBPF2)、相位调制器(PM2)、单模光纤(SMF)、电带通滤波器(EBPF)、移相器(PS2)、单模光纤(SMF)、电放大器(EA1 和 EA2)以及移相器(PS1 和 PS2)。

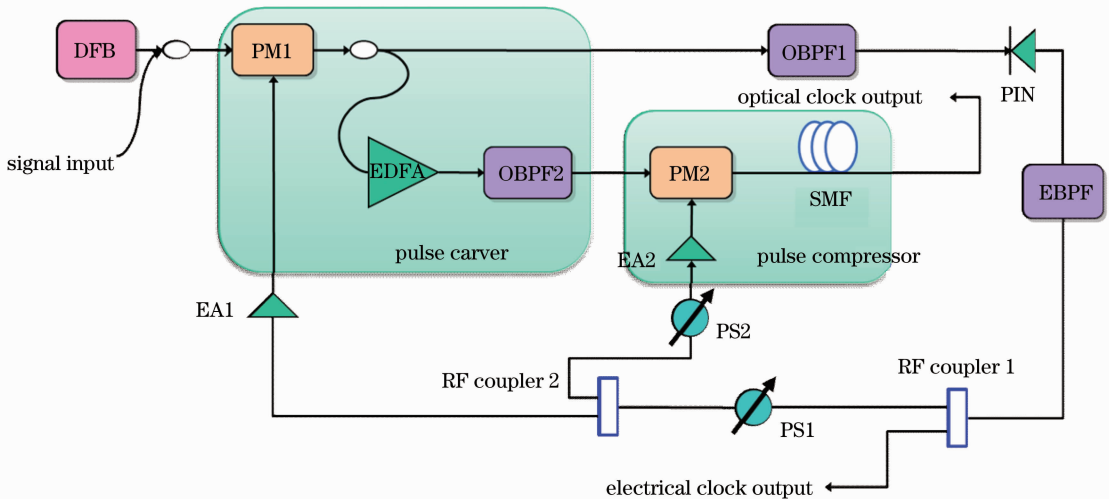


图 1 具有光脉冲压缩功能的 OEO 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the OEO with optical pulse compression capability

由相位调制器和基于光纤中自相位调制效应的非线性光信号整形器(Mamyshev整形器)组成25 GHz超短光脉冲源,经调制复用后获得100 Gbit/s光信号<sup>[11]</sup>,与DFB激光器输出的连续(CW)光通过耦合器进入PM1。在OEO环路中,只关注100 Gbit/s的数据信号,PM1把入射光调制成载有环中反馈回的频率为25 GHz的信号,利用OBPF1滤除掉调制后的CW光部分,仅允许100 Gbit/s的信号通过。该信号进入PIN转化为电信号,使用中心频率为25 GHz、带宽为10 MHz的EBPF滤出25 GHz的微波(RF)来增强时钟分量,进入分支器后一部分经移相器PS1、放大后作为驱动信号反馈回PM1,调节PS1以达到注入锁定,EA1功率适当时OEO环达到稳定振荡,分支器另一部分可输出高质量的电时钟。

双PM超短光脉冲产生模块是由脉冲切割和脉冲压缩两部分功能组合完成的<sup>[12]</sup>,DFB发出CW光进入第一级PM1,调制后的CW光瞬时频率发生了周期性变化,利用OBPF2滤出高频部分,相当于切割光谱,从而得到光脉冲,但得到的脉冲宽度不够

窄,所以再送入第二级PM2。调节PS2使得经PM2后的光脉冲的正啁啾分量光强 $I > I_{\max}/2$ ,即对脉冲引入了一个正啁啾,然后通过一段反常色散介质例如单模光纤补偿这个正啁啾,这样光脉冲宽度就被有效地压窄了,这部分的相位调制器是由OEO环提取的帧时钟驱动的。

相位调制器PM1是本方案的核心器件,其功能一方面构成传统OEO环路的调制器,实现时钟提取;另一方面将对注入的CW光信号进行相位调制,使其产生频谱展宽,从而可以通过偏移滤波获得一个初始光时钟脉冲。

### 3 实验结果

实验中,DFB输出的CW光波长为1543.7 nm,光功率为7.3 dBm。100 Gbit/s的OTDM信号的眼图如图2(a)所示,光功率为2.8 dBm。PM1和PM2的驱动功率均为27 dBm。CW光和100 Gbit/s信号在进入PM1之前和通过PM1之后的光谱分别如图2(b)、(c)所示。

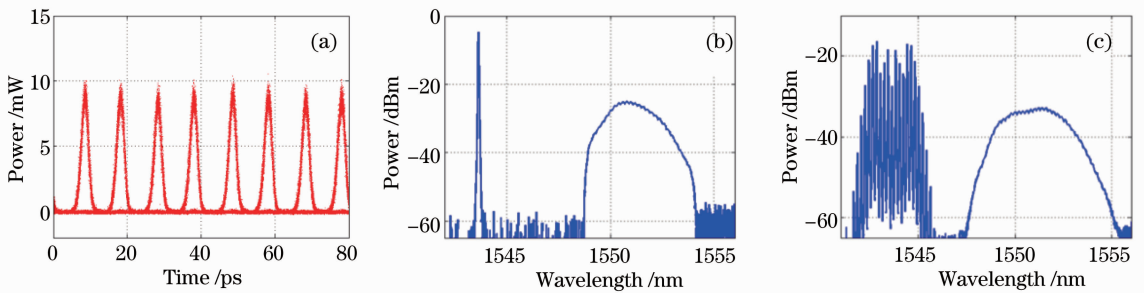


图2 (a)进入OEO的100 Gbit/s OTDM信号眼图以及(b)在PM1之前和在(c) PM1之后测得的光谱  
Fig. 2 (a) Waveform of 100 Gbit/s OTDM signal launched in OEO and optical spectra of CW light and OTDM signal observed (b) before and (c) after PM1

在超短脉冲产生模块中,用来脉冲切割的OBPF2的3 dB带宽为1 nm,滤波后产生的光脉冲宽度为7.6 ps。其波形和光谱如图3所示。为了减

小解复用中信道的串扰,减小解复用的功率代价,PM2与补偿光纤构成的脉冲压缩器可对光时钟进一步压窄,脉冲压缩所使用的SMF长度为350 m。

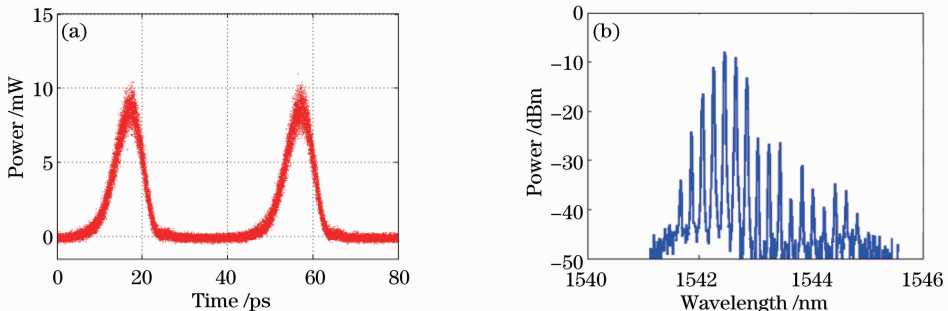


图3 (a) OBPF2之后的光脉冲波形图和(b)光谱图  
Fig. 3 (a) Optical waveform and (b) optical spectrum of optical pulses after OBPF2

调节 PS1、PS2, 可使得光时钟的质量达到最佳, 最终获得的光时钟脉冲的波形、光谱和电时钟的频谱, 分别如图 4(a)~(c) 所示, 图 4(c) 中插图是电频谱测量范围 (SPAN) 为 1 kHz 的电谱。光采样示波器测得光时钟脉冲的宽度为 3.1 ps, 光谱谱宽为 0.8 nm, 计算得到占空比为 7.75%。所得的电时钟

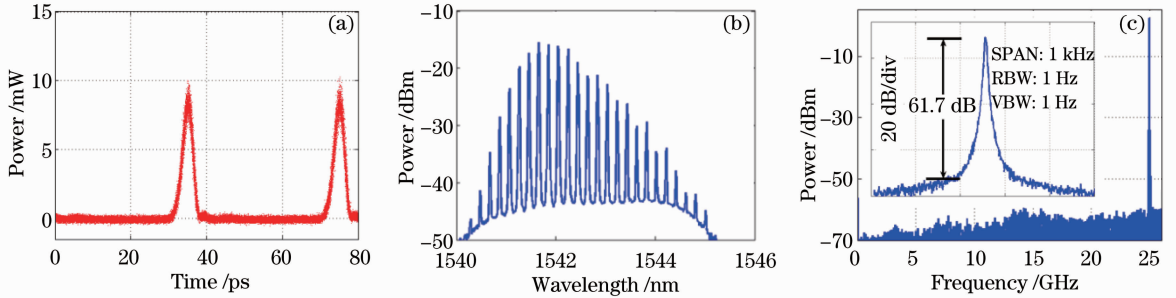


图 4 获得的光时钟的 (a) 波形图和 (b) 光谱图以及 (c) 从 100 Gbit/s 信号中提取的 25 GHz 电时钟的电谱图

Fig. 4 (a) Waveform and (b) optical spectrum of the obtained optical clock and (c) electrical spectrum of the 25 GHz electrical clock extracted from 100 Gbit/s signal

实验中测量的 25 GHz 电时钟的单边带 (SSB) 相位噪声谱如图 5 所示, 作为参考还测量了 RF 源以及所提取的光时钟单边带相位噪声谱<sup>[13]</sup>。测量时, RF 源及电时钟信号输入到频谱仪中的电信号功率都固定为 7 dBm, 光时钟信号通过一个带宽为 50 GHz 的光电探测器进行光电转换, 输入到频谱仪中的电信号功率为 -3 dBm。测得 25 GHz 的 RF 源、光时钟和电时钟在频率偏移为 10 kHz 的相位噪声分别为 -86.95, -81.95, -83.65 dBc/Hz, 相应的时间抖动分别为 108, 135, 118 fs (100 Hz~10 MHz)。由于 OEO 时钟提取过程中, 电时钟在 RF 源相位噪声的基础上增加了电放大器的热噪声以及光电转换过程中的散粒噪声, 因此所提电时钟频谱较 RF 源有所劣化。光时钟信号不仅要经过两级带有电时钟信号噪声调制器的调制, 而且在最后进行电频谱测

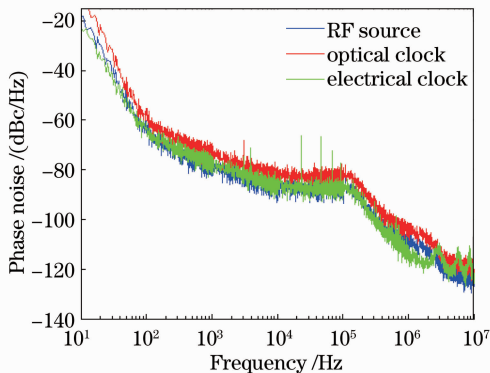


图 5 单边带相位噪声

Fig. 5 SSB phase noise spectra

频谱纯净, 在频谱测量范围为 1 kHz, 频率分辨率 (RBW) 为 1 Hz, 显示分辨率 (VBW) 为 1 Hz 设置条件下, 测得 25 GHz 的时钟分量高出背景噪声 61.7 dB。实验中使用的光谱仪为 ANDO-AQ6317, 光采样示波器为 EXFO-102C (带宽 500 GHz)。

量时, 还需要多进行一级的光电转化, 在此过程中又会引入散粒噪声, 因此测得的光时钟信号的噪声是三者中最大的。但无论是电时钟还是光时钟, 其抖动均小于 150 fs, 完全适用于 OTDM 的解复用要求。注意到在所提时钟频谱上的个别频点存在尖峰噪声, 实验证实这些尖峰与环路中所用微波器件接口不理想的反射特性有关, 更换器件后, 这些尖峰会出现位置的移动和强度的改变。

## 4 结 论

提出一种新的基于 OEO 结构的 OTDM 帧时钟提取装置, 研究并验证了从  $4 \times 25$  Gbit/s 的信号中能够同时提取出 25 GHz 的电时钟和窄脉宽的光时钟。相比于相似功能的结构, 本文提出的结构更加紧凑经济, 提取出的光时钟脉冲宽度仅为 3.1 ps, 占空比为 7.75%, 时间抖动为 135 fs (100 Hz~10 MHz)。电时钟频谱平坦纯净, 载噪比为 61.7 dB, 时间抖动为 118 fs (100 Hz~10 MHz)。

## 参 考 文 献

- 1 H Hu, H C H Mulvad, M Galili, *et al.*. Polarization-insensitive 640 Gb/s demultiplexing based on four wave mixing in a polarization-maintaining fibre loop [J]. *J Lightwave Technol.* 2010, 28(12): 1789-1795.
- 2 H Ji, M Galili, H Hu, *et al.*. 1.28-Tb/s demultiplexing of an OTDM DPSK data signal using a silicon waveguide [J]. *IEEE Photon Technol Lett.* 2010, 22(23): 1762-1764.
- 3 Y Ji, Y Li, J Wu, *et al.*. 160-Gbaud DQPSK optical time-division demultiplexing using a polarization modulator [J]. *IEEE Photon Technol Lett.* 2012, 24(9): 772-774.
- 4 M Yañez, J C Cartledge. Single harmonically driven

- electroabsorption modulator for OTDM demultiplexing [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(10): 1437–1444.
- 5 N Calabretta, J Luo, J Parra-Cetina, *et al.*. 320 Gb/s all-optical clock recovery and time demultiplexing enabled by a single quantum dash mode-locked laser Fabry-Perot optical clock pulse generator [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2013, OTh4D.
- 6 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.
- 7 L Huo, G Chang, Y Li, *et al.*.  $8 \times 2.5$ -Gbit/s frame clock recovery using an optoelectronic oscillator [C]. *Optics and Optoelectronic Inspection and Control: Techniques, Applications, and Instruments*. International Society for Optics and Photonics, 2000. 44–47.
- 8 H Tsuchida, M Suzuki. 40-Gb/s optical clock recovery using an injection-locked optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(1): 211–213.
- 9 C Ware, L K Oxenløwe, F Gómez Agis, *et al.*. 320 Gbps to 10 GHz sub-clock recovery using a PPLN-based opto-electronic phase-locked loop [J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 5007–5012.
- 10 Z Wang, T Wang, C Lou, *et al.*. A novel approach for clock recovery without pattern effect from degraded signal [J]. *Opt Commun*, 2003, 219(1): 301–306.
- 11 L Huo, H F Li, Q Wang, *et al.*.  $4 \times 25$ -GHz 2-ps multicolor ultrashort pulse generation with a single phase modulator and Mamyshev reshaper [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2012, JTh2A.
- 12 Q Wang, L Huo, Y Xing, *et al.*. Optical Gaussian pulse generator using phase modulator based spectral slicing and compression [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2013. CM4G.4.
- 13 Q Wang, L Huo, Y Xing, *et al.*. Effective optical clock recovery and simultaneous fourfold demultiplexing of OTDM signal using an optoelectronic oscillator [J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 30000–30006.

栏目编辑：王晓球