

# 全光纤锁模腔结构的全光时钟提取实验研究

王顺艳<sup>1</sup> 江 阳<sup>1</sup> 吴次南<sup>1</sup> 王 菊<sup>2</sup> 于晋龙<sup>2</sup> 周竹雅<sup>1</sup> 徐 静<sup>1</sup> 李恒文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州大学理学院贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025  
<sup>2</sup>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** 分析并实验验证了一种全光纤锁模激光器结构的全光时钟提取方案。方案中,采用高非线性光纤(HNLF)替代传统结构中的半导体光放大器(SOA),利用光纤中的交叉相位调制(XPM)效应实现腔内的非线性调制,避免了以 SOA 作为非线性光调制器件的锁模激光器全光时钟提取方案中,由于载流子恢复时间较长从而限制工作速率的缺点,以达到突破“电子瓶颈”的目的。理论分析了光纤中交叉相位调制的特性以及环形锁模腔的时钟提取原理,并通过实验,从 40 Gbit/s 的光归零码(RZ)信号中提取出了高质量的光信号时钟。该方案可以直接在更高速率条件下工作。

**关键词** 光纤通信;全光时钟提取;交叉相位调制;光纤环形激光器

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0505005

## Experimental Study on All-Optical Clock Recovery of All-Fiber Mode-Locking Cavity Configuration

Wang Shunyan<sup>1</sup> Jiang Yang<sup>1</sup> Wu Cinan<sup>1</sup> Wang Ju<sup>2</sup> Yu Jinlong<sup>2</sup>  
Zhou Zhuya<sup>1</sup> Xu Jing<sup>1</sup> Li Hengwen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Photoelectric Technology and Application, School of Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

<sup>2</sup>Laboratory of Optical Fiber Communication, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** A scheme of all-optical clock recovery based on an all optical fiber mode-locking cavity configuration is analyzed and demonstrated. In the scheme, the semiconductor optical amplifier (SOA) in traditional structures is displaced by a segment of highly nonlinear optical fiber (HNLF). Through the cross-phase modulation effect (XPM) in optical fiber, the nonlinear modulation is implemented in the cavity, which is able to overcome the limitation of data rate caused by the carrier recovery time of SOA in traditional methods and break through the "electronics bottleneck". The theory of cross phase modulation effect in optical fiber and the principle of clock recovery in mode-locking ring cavity are analyzed. In addition, a high quality clock signal is successfully extracted from a 40 Gbit/s optical return-to-zero (RZ) signal experimentally. This scheme can work straightway with higher bit rate.

**Key words** optical fiber communication; all-optical clock recovery; cross-phase modulation; fiber ring laser

**OCIS codes** 060.2330; 060.1155; 060.4510

## 1 引 言

随着信息社会的发展,人们对网络带宽的需求

与日俱增。目前的光纤通信技术由于受到“电子瓶颈”的限制,想要进一步升级面临很大的困难,因此

**收稿日期**: 2011-11-25; **收到修改稿日期**: 2012-02-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(61061004)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0099)、贵州省优秀青年科技人才专项基金(2009-09)和贵州省优秀科技教育人才省长基金(2009-98)资助课题。

**作者简介**: 王顺艳(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: wangshunyan1012@126.com

**导师简介**: 江 阳(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

发展全光网络是一种理想的选择。对于全光网络技术,高速信号的全光时钟提取<sup>[1~3]</sup>是一个关键问题。它要求从高速率的光信号中提取出低抖动、高稳定性的光时钟信号,这对光存储、光逻辑、全光波长变换<sup>[4,5]</sup>以及全光 3R 再生技术<sup>[6,7]</sup>的实现都具有重要意义。此外,全光时钟提取技术也是光时分复用(OTDM)通信系统和全光交换环节中的重要技术,是未来全光通信网的基础。

目前,关于全光时钟提取技术已有许多研究成果。利用光法布里-珀罗(F-P)滤波器<sup>[8]</sup>、基于非线性光纤环形镜(NOLM)动态增益调制和非线性放大环形镜(NALM)孤子特性的光纤参量振荡器(FOPO)<sup>[9]</sup>、自脉动的分布反馈(DFB)激光器<sup>[10]</sup>等都被用于全光时钟提取。另外,锁模技术用于全光时钟提取也是常用的一种方法<sup>[11~13]</sup>。

在这些全光时钟提取方案中,F-P 谐振腔的时钟提取结构简单、响应速度快,但其易受波长匹配和码率变化范围的限制;基于 FOPO、自脉动 DFB 激光器和半导体锁模激光器的时钟提取方案其系统结构比较复杂,造价昂贵,难以商用;基于半导体光放大器(SOA)的光纤锁模激光器时钟提取方案,其结构相对简单,工作频率高,波长和速率范围可灵活改变,具有很好的实用性,但是由于受 SOA 载流子恢复时间的限制,工作速率难以进一步提高。全光纤结构的锁模激光器可以通过光纤中的光-光调制作用实现高速光信号的时钟提取<sup>[14]</sup>,从而避免 SOA 载流子恢复时间的限制。虽然以前的工作对此有所涉及,但其工作特性和在高速信号下的实验验证并不充分。

本文分析并实验演示了全光纤结构的锁模激光器全光时钟提取方案,通过环路内光纤中的交叉相位调制作用,40 Gbit/s 的光信号经由主动锁模机制,成功产生了高质量的光时钟信号,验证了该方案的可行性。通过分析和讨论,该方案可以在更高的速率下工作,具有良好的实用性。

## 2 实验原理

交叉相位调制(XPM)是光纤中的一类重要的非线性效应,它可以用一对耦合的非线性薛定谔方程描述<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{\nu_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 = \\ i\gamma_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{\nu_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 = \\ i\gamma_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) A_2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $A_1$  和  $A_2$  为入射两束频率分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的光波的振幅; $\nu_{g1}$  和  $\nu_{g2}$  分别为他们在光纤中的群速度; $\beta_{21}$  和  $\beta_{22}$  分别为这两束光的群速度色散系数, $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为其损耗系数; $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  为其非线性系数。

由于交叉相位调制作用,频率分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的两束光波在光纤中传播时,会获得一个与强度有关的非线性相移:

$$\begin{aligned} \phi_i^{\text{NL}}(z) = (\omega_i/c) \Delta n_i z = n_2 (\omega_i/c) (|E_i|^2 + \\ 2|E_{3-i}|^2) z, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $i = 1, 2$ ;  $\phi_i^{\text{NL}}(z)$  为第  $i$  个光波场获得的非线性相移; $\omega_i$  为第  $i$  个光波场的频率; $\Delta n_i$  为三阶非线性效应感应折射率的改变量; $E_i$  为第  $i$  个光波场的振幅。如果忽略光纤的损耗,(3)式变为

$$\phi_i(z) = \gamma_i (P_i + 2P_{3-i}) z, \quad (4)$$

式中  $\gamma_i = n_2 \omega_i / (c A_{\text{eff}})$ ,  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积; $P_i$  为频率为  $\omega_i$  的光波场的光功率。(4)式右边第一项是自相位调制(SPM)产生的相移,第二项是交叉相位调制产生的相移,(4)式右边表明了对于相同的光强,交叉相位调制的作用是自相位调制的 2 倍。因此,一般在入射数据信号功率远大于时钟信号功率时,往往忽略自相位调制效应的影响,而只考虑交叉相位调制效应的作用。

光纤环形激光器用于时钟提取,利用的是主动锁模原理。根据激光器谐振理论,光波依次通过高非线性光纤、滤波器、掺铒光纤放大器(EDFA)等器件后是自洽的,其场方程<sup>[16]</sup>为

$$E_{c1} = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [E_{c2}(T)] T_f(\omega) \} \exp \left[ \int G(z) dz \right], \quad (5)$$

式中  $T = t - z/\nu_{g1}$ ;  $T_f(\omega)$  为滤波器的透射率曲线; $G(z)$  为掺铒光纤放大器的增益系数; $E_{c1}$  和  $E_{c2}$  为光时钟信号通过高非线性光纤前后的光场; $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  表示傅里叶变换和逆傅里叶变换。

对于光纤环形激光器,若假设入射信号和时钟信号具有相同的偏振态,且忽略光纤的损耗,则表征光纤交叉相位调制效应的(1)、(2)式变为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} = i\gamma_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1, \quad (6) \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{\nu_{g1} - \nu_{g2}}{\nu_{g1} \nu_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} = \\ i\gamma_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) A_2, \end{aligned} \quad (7)$$

式中,下标 1 和 2 的分量分别对应入射信号和时钟



以明显地看出,建立稳定的振荡后,在滤波器锁定的波长(1559.75 nm)上出现很强的时钟分量谱线。

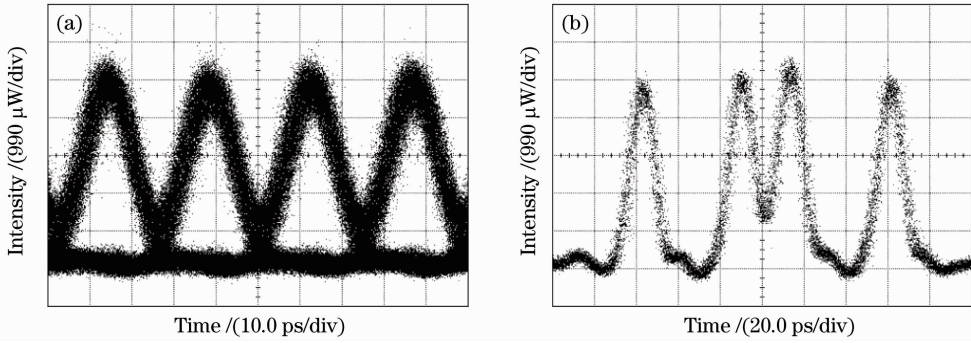


图 2 注入的 40 Gbit/s RZ 光信号的眼图(a)和波形图(b)

Fig. 2 (a) Eye diagram and (b) waveform of injected 40 Gbit/s RZ signal

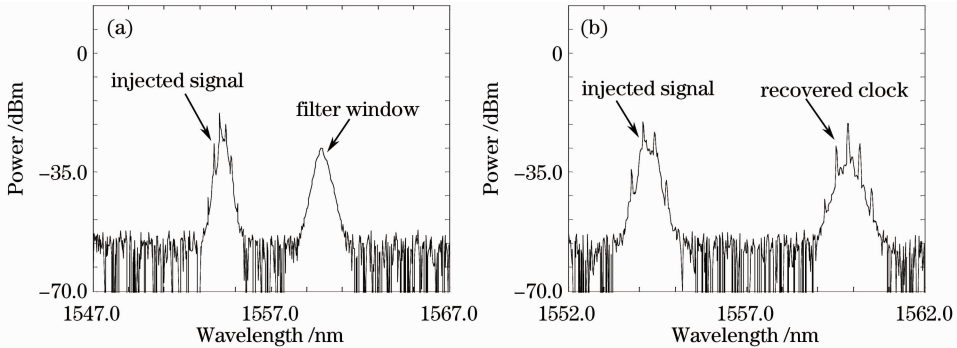


图 3 环形激光器内形成稳定振荡前(a)和稳定振荡后(b)的光谱图

Fig. 3 Optical spectra (a) before and (b) after forming stable oscillation

为了进一步分析所提出的时钟信号质量,实验中分别检测了所提时钟的波形、光谱和电谱,其结果如图 4 所示。图 4(a)给出了所提取时钟的波形,可以看出时钟信号具有 40 GHz 的重复频率,信号强度平稳,噪声较小,此时测得的信号抖动为 1.7 ps。图 4(b)显示了时钟信号的光谱细节(分辨率为 0.05 nm),可以看出有清晰的时钟谱分量产生。将

光时钟信号经由一个 50 GHz 带宽的光电探测器转换后可以检测信号的电谱,其结果如图 4(c)所示。电谱显示信号的中心频率为 40.29 GHz,与注入信号的速率相同,在 span 为 100 MHz 的测试条件下显示出良好的信号质量。由于该频率已接近电谱分析仪的测试极限,因此未能直接测量信号的相位噪声。

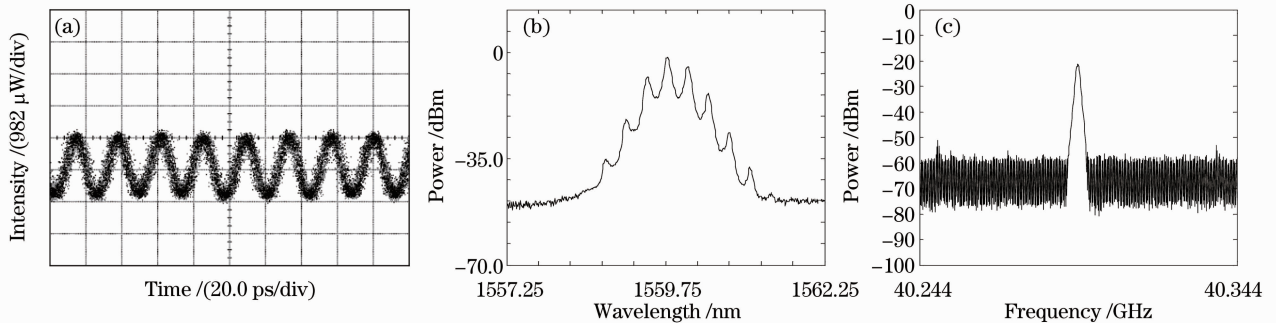


图 4 40 GHz 光时钟信号波形图(a)、光谱图(b)和电谱图(c)

Fig. 4 (a) Waveform, (b) optical spectrum and (c) electrical spectrum of the extracted clock signal

以上实验结果可以看出,全光纤结构的锁模激光器能方便地提取 40 Gbit/s 光信号的同步时钟信号,理论和实验都证明该方案具有良好的性能和实用性。在利用锁模腔结构提取光时钟信号的系统

中,腔长稳定性和系统的偏振相关性是一个普遍存在的问题,从系统结构上可以有两种方法进行改进: 1) 尽可能缩短腔长或者在锁模腔部分辅以温控系统,这样可以降低环境对系统稳定的影响。实验采用

的 HNLF 的非线性系数  $\gamma$  较小, 因此为了提供足够的交叉相位调制作用, 所用的 HNLF 的长度较长, 这导致了实验中环形激光器的腔长较长, 系统的稳定性受到一定影响。目前,  $\gamma$  值超过  $1000 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的 HNLF 已有报道<sup>[17]</sup>, 若实验中能采用此类 HNLF, 锁模腔的腔长可以做到跟传统 SOA 方案的腔长相当同时也能降低注入功率。而对于全光纤的锁模腔结构, 也可以比较方便地将其置于一块温控平台上, 提高稳定性。2) 利用保偏光纤来搭建整个锁模腔, 这样可以在很大程度上降低偏振变化带来的不利影响。此外, 在短腔情况下进一步降低腔内的损耗有利于提高谐振腔的 Q 值, 获得更好的时钟信号输出。实验中虽然只演示了 40 Gbit/s 的全光时钟提取结果, 但原理上该系统可以直接适用于更高速率的全光时钟提取, 突破传统基于 SOA 锁模激光器的速率限制, 对高速全光通信网络的实现具有重要意义。

## 4 结 论

本文分析并验证了一种全光纤结构的光纤环形激光器时钟提取方案, 并在实验上成功演示了 40 Gbit/s 信号的时钟提取, 获得了高质量的同步光时钟信号输出, 验证了该结构的可行性。原理上证明了该结构可以避免传统的以 SOA 作为非线性调制器件的锁模激光器时钟提取方案中, 工作速率受载流子恢复时间限制的缺点。若采用非线性系数更大的 HNLF, 该系统结构可以更加紧凑, 腔长稳定性更容易控制, 功耗也将大大降低, 因此可以完全取代传统方案, 满足未来全光网络发展的需求。

## 参 考 文 献

- 1 Fei Wang, Xinliang Zhang, Enming Xu. Investigation of data-format-transparent multiwavelength all-optical clock recovery using a single FP-SOA [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(7): 1203~1207
- 2 Arnaud Fernandez, Lu Chao, Jacques W. D. Chi. All-optical clock recovery and pulse reshaping using semiconductor optical amplifier and dispersion compensating fiber in a ring cavity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13): 1148~1150
- 3 Fei Wang, Yu Yu, Xi Huang *et al.*. Single and multiwavelength all-optical clock recovery using Fabry-Pérot semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(16): 1109~1111
- 4 Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Experimental research of simultaneously wavelength conversions with two independent signals based on a single semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 330~334

- 韩丙辰, 于晋龙, 张立台等. 利用单个半导体光放大器实现两个独立信号同时波长变换的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 330~334
- 5 Zhou Hui, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. All-optical wavelength conversion for orthogonal frequency division multiplexing optical signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 959~961
- 周 慧, 董 泽, 曹子峥等. 正交频分复用信号的全光波长变换性能研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 959~961
- 6 Yan Ziheng, Yu Jinlong, Wang Ju *et al.*.  $4 \times 40$  Gb/s multi-wavelength all-optic 3R regeneration using data-pumped FOPA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005003
- 颜子恒, 于晋龙, 王 菊等. 基于数据抽运的光纤光参量放大的  $4 \times 40$  Gb/s 多波长全光 3R 再生实验研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005003
- 7 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Experimental research on dual wavelength all-optical decision based on fiber-optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1576~1580
- 韩丙辰, 于晋龙, 罗 俊等. 利用光参量放大同时实现双波长全光判决的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1576~1580
- 8 Xiang Zhou, Chao Lu, Ping Shum *et al.*. A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Perot filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5): 603~613
- 9 Lijun Wang, Yikai Su, Anjali Agarwal *et al.*. All-optical laser synchronization and clock recovery based on dynamic parametric gain modulation [C]. Baltimore: Optical Fiber Communication Conference, 2000, ThP6
- 10 W. Mao, Y. Li, M. Al-Mumin *et al.*. 40 Gbit/s all-optical clock recovery using two-section gain-coupled DFB laser and semiconductor optical amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(21): 1302~1303
- 11 T. Ohno, K. Sato, R. Ira *et al.*. Recovery of 160 GHz optical clock from 160 Gbit/s data stream using mode-locked laser diode [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(4): 265~267
- 12 Lü Jie, Yu Jinlong, Li Ya'nan *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
- 13 Wang Yaotian, Yu Jinlong, Li Ya'nan *et al.*. Experiment of 40 GHz all-optical clock recovery by using ultrafast nonlinear interferometer in mode-locked laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1294~1298
- 王耀天, 于晋龙, 李亚男等. 基于 UNI 开关的 40 GHz 注入锁模全光时钟提取实验 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1294~1298
- 14 E. J. Greer, K. Smith. All-optical FM mode-locking of fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(18): 1741~1743
- 15 R. R. Alfano, P. L. Baldeck, P. P. Ho *et al.*. Cross-phase modulation and induced focusing due to optical nonlinearities in optical fibers and bulk materials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(4): 824~829
- 16 Zuo Peng, Wu Jian, Lin Jintong. All-optical bit clock extraction technology based on fiber cross phase modulation effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 944~947
- 左 鹏, 伍 剑, 林金桐. 基于光纤交叉相位调制效应的全光位时钟提取技术 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 944~947
- 17 Mable P. Fok, Chester Shu. Recent advances in optical processing techniques using highly nonlinear bismuth oxide fiber [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(3): 587~598