

基于半导体激光器注入锁定的全光时钟提取

马 闯¹ 江 阳¹ 贾 石² 白光富¹ 胡 林¹ 单媛媛¹ 梁建惠¹ 李红霞¹ 于晋龙²

¹贵州大学理学院物理系, 贵州 贵阳 550025

²天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072

摘要 提出并分析验证了一种基于半导体激光器注入锁定实现的全光时钟提取方案。方案中,借助半导体激光器的注入锁定过程,可以将光归零(RZ)码信号中的载波和一个时钟分量依次锁定两个半导体激光器获得光场的锁相输出,通过输出分量的叠加,得到所需的同步时钟信号。实验中,采用两个分布反馈(DFB)型半导体激光器,成功地获得了10 Gb/s光RZ码信号的时钟信号。这一方案在注入功率的动态范围、可调谐性、信号波长稳定性要求等方面都表现出了很好的灵活性,并具有可集成潜力,是一种实用性很强的新方法。

关键词 光通信;全光时钟提取;半导体激光器;注入锁定

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0306001

All-Optical Clock Extraction Based on Injection-Locked Semiconductor Laser

Ma Chuang¹ Jiang Yang¹ Jia Shi² Bai Guangfu¹ Hu Lin¹ Shan Yuanyan¹

Liang Jianhui¹ Li Hongxia¹ Yu Jinlong²

¹Physics Department, School of Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

²Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A scheme of all-optical clock extraction based on injection locked semiconductor laser is proposed and demonstrated. In the scheme, optical carrier and one clock component of return-to-zero (RZ) signal lock two semiconductor lasers to obtain the phase locked optical outputs. When these two components are coupled together, the recovery clock signal is achieved. Two distributed feedback (DFB) lasers are used to extract the clock signal of a 10 Gb/s RZ signal experimentally. This scheme is very flexible in dynamic range of injected power, tunability and stability requirements of signal wavelength. This novel technique also has potential in integration and practicability.

Key words optical communications; all-optical clock recovery; semiconductor laser; injection locking

OCIS codes 060.2330; 060.1155; 140.5960

1 引 言

随着人们对网络带宽需求的不断增加,全光网络成为了突破“电子瓶颈”限制的理想方法。对于全光网络技术而言,全光时钟提取^[1]是不可或缺的环节。全光时钟提取是指从高速率光信号中提取出低抖动、高稳定的光时钟信号,其在光储存、光逻辑、全光波长变换以及全光再放大、再整形、再定时(3R)再生技术^[2]中都起到非常重要的作用。此外,全光时钟提取技术也是光时分复用(OTDM)通信系统^[3]和全光交换环节中的重要

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(61061004, 61465002)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0099)

作者简介: 马 闯(1990—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术方面的研究。

E-mail: ma782494714@163.com

导师简介: 江 阳(1975—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

技术,是未来全光通信网的基础。

目前实现全光时钟提取技术的方法有多种,其中主要包括:基于光纤锁模激光器的全光时钟提取^[4-5]以及基于法布里-珀罗(F-P)滤波器的全光时钟提取技术^[6-7]。从第一种方法上看,它是利用锁模腔内的模式选择特性将光信号的时钟分量分离出来,获得光时钟输出。这一方法可以通过调节腔长来改变锁模腔的频率特性,因此可完成不同速率的时钟提取工作。但是这种方案仍存在一些问題:1)锁模腔内的非线性器件通常采用半导体光放大器(SOA),由于受SOA载流子恢复时间的限制,其工作频率带宽有限,难以满足未来超高速率信号时钟提取的要求;2)虽然锁模腔内也可以采用高非线性光纤(HNLF)作为调制器件满足超高速率信号时钟提取的要求,但这一方案对信号光功率要求很高,一定程度上提高了系统使用的难度。此外,光纤锁模腔是一个光纤结构的环路,容易受环境的影响,稳定性不易保证。就基于F-P滤波器的全光时钟提取而言,其结构更加简单,它直接利用F-P滤波器自身的梳状谱特性从光信号中分离出时钟分量,获得光时钟信号输出。这一方案对光功率要求不高,但其在工作时需要时钟分量与滤波窗口精确对准,这对注入信号的稳定性提出了很高的要求。同时,这一方案在码率改变时需要更换相应的滤波器,极大地限制了这一方法的灵活性。

本文提出了一种基于半导体激光器注入锁定实现的全光时钟提取方案,它和已有的方案相比,不仅可以在超高速率的条件下工作而且对光功率的要求灵活,同时又具有工作频率可调、波长匹配要求宽松、结构简单、体积小且有可集成潜力等特点,是一种具有良好实用性的时钟提取新方法。

2 实验原理

如前所述,要实现全光时钟提取,对信号中的时钟分量滤波是关键。图1给出了从光归零(RZ)码信号中提取时钟信号的原理图。如图1所示,RZ码信号在光谱上包含有频率间隔为 f 的时钟分量,信号光通过如锁模腔或F-P滤波器等滤波装置滤出至少其中两条时钟分量,即可得到光时钟信号。

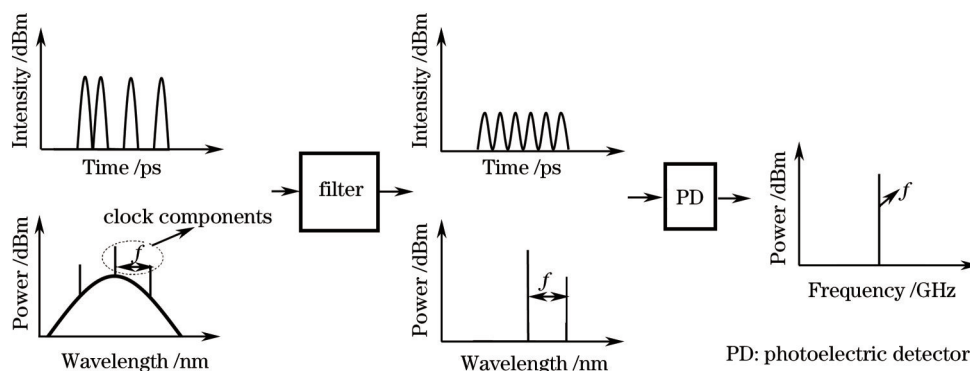


图1 全光时钟提取原理图

Fig.1 Diagram of all-optical clock recovery

从图1的原理中可以看出,为了得到数据的光时钟信号,实际上所用的滤波装置只要具有两个极窄的,间隔等于时钟频率的光滤波窗口即可。为了进一步说明这一问题,利用OptiSystem软件,图2给出10 Gb/s的RZ码信号同步时钟信号提取的实验仿真图,PPG为伪随机码序列发生器,OC为光电耦合器。

如图2所示,激光器(LD)发出1550 nm的光经过两次马赫-曾德尔调制器(MZM1,MZM2)后产生RZ码信号。图中A点引出图2(a)~(c)分别为信号的波形、电谱和光谱。从图中可以看出,RZ码信号电谱包含连续谱分量和时钟分量。而电谱中的时钟分量对应了光谱中的离散谱部分。若将光信号功率分为两路,并采用两个带宽为100 MHz的滤波器可将信号中相邻的两条离散谱线滤出,滤波后的光谱分别如图2(d)和图2(e)所示。将滤出的两离散谱再次合为一路,在输出端即可获得同步时钟信号,其所对应的波形、电谱和光谱分别如图2(f)~(h)所示。通过信号和时钟的光谱和电谱对比可以看出,获得的时钟信号由于滤波作用,已不再包含连续谱成分。这里时钟波形具有较大的直流量,是由于两条光谱的功率不均衡所致。

需要指出的是,虽然上述仿真表明了采用两个独立光窄带滤波器获得光时钟信号的可行性,但是仿真

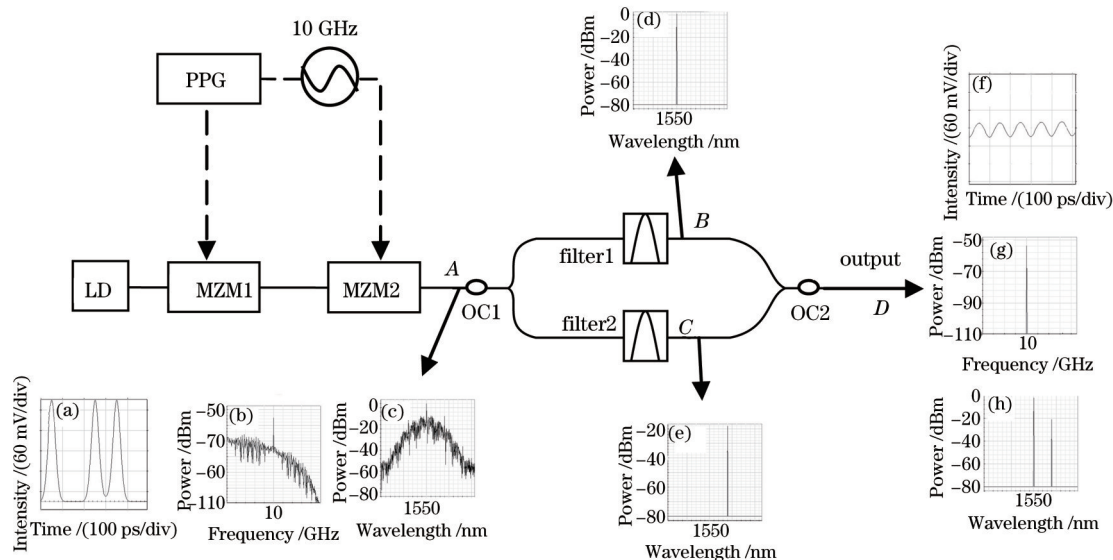


图2 10 Gb/s的RZ码信号时钟信号提取的仿真图。A点的信号的波形(a)、光谱(b)和光谱(c); (d) B点的光谱; (e) C点的光谱; D点的波形(f)、电谱(g)和光谱(h)

Fig.2 Simulation diagram of clock recovery for 10 Gb/s RZ signal. Waveform (a), electrical-spectrum (b) and spectrum (c) of signal at point A; (d) spectrum at point B; (e) spectrum at point C; waveform (f), electrical spectrum (g) and spectrum (h) at point D

中带宽为 100 MHz 的独立光带通滤波器在实际中难以获得。为了达到这一效果,半导体激光器中的注入锁定过程是一种可能的选择。在半导体激光器的注入锁定^[8-12]过程中,入射光场一旦落入锁定范围,它将锁定激光器的输出光场相位,形成相位同步的连续光输出。而锁定一旦建立,激射光场以外的频率成分由于激光器自身谐振腔的频率选择特性将获得极大的衰减。这一效果相当于一个光域的窄带滤波过程,而其滤波带宽仅为百兆赫兹^[13]。此外,需要强调的是,光注入锁定过程还具有诸多特点:1)光注入锁定的锁定范围很大,具有几个吉赫兹的锁定范围,因此对注入光场波长的准确性有一定的容忍度;2)半导体激光器的工作波长可以通过改变注入电流或温度的方法来进行调节,其调节范围可达到 1 nm 以上,因此具备了可调谐性;3)注入锁定对注入种子光功率要求很低,具有很大的动态范围;4)注入锁定带有增益特性,即使在低功率注入条件下,一旦注入锁定建立,其输出光场强度由激光器自身的输出功率决定,而没有被锁定的光场将得到很大的衰减,表现出理想的、带增益的滤波特性。因此在实验中可以用两个半导体激光器代替仿真中带宽为 100 MHz 的滤波器实现灵活的全光信号时钟提取。

3 实验结果与讨论

为了验证上述原理,设计了如图 3 所示的实验装置图。实验中,外腔可调谐激光器(ECL)产生的波长为

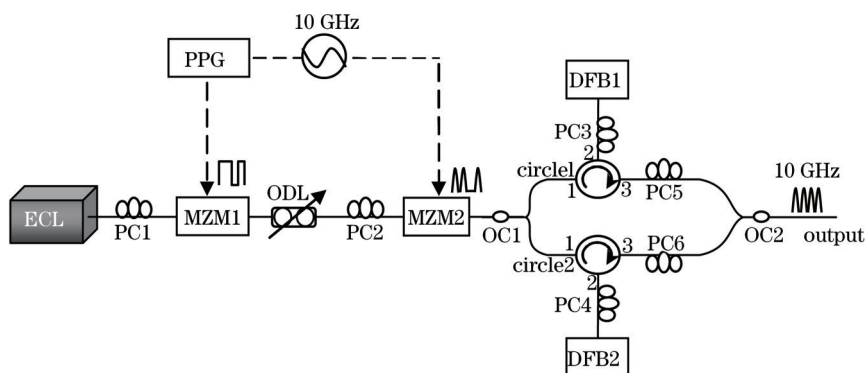


图3 基于注入锁定的全光时钟提取实验装置图

Fig.3 Experimental schematic diagram of all-optical clock recovery based on injection locked

1549.609 nm 的连续光进入 MZM1, 经过光可调延时线(ODL)恰当延时后进入 MZM2。这里偏振控制器 1(PC1)和偏振控制器 2(PC2)分别用来控制进入 MZM1 和 MZM2 的光场偏振态以达到最佳调制效果。为了产生 RZ 码信号, 时钟源产生 10 GHz 正弦时钟信号并被分成两路, 一路触发伪随机码序列(PRBS)发生器产生 10 Gb/s 的非归零(NRZ)信号驱动 MZM1 得到光 NRZ 码信号, 实验中序列字长为 $2^{31}-1$; 另一路驱动 MZM2 对 NRZ 码信号进行时钟调制, 产生 10 Gb/s 的 RZ 码信号。其波形眼图、光谱以及电谱如图 4 所示。

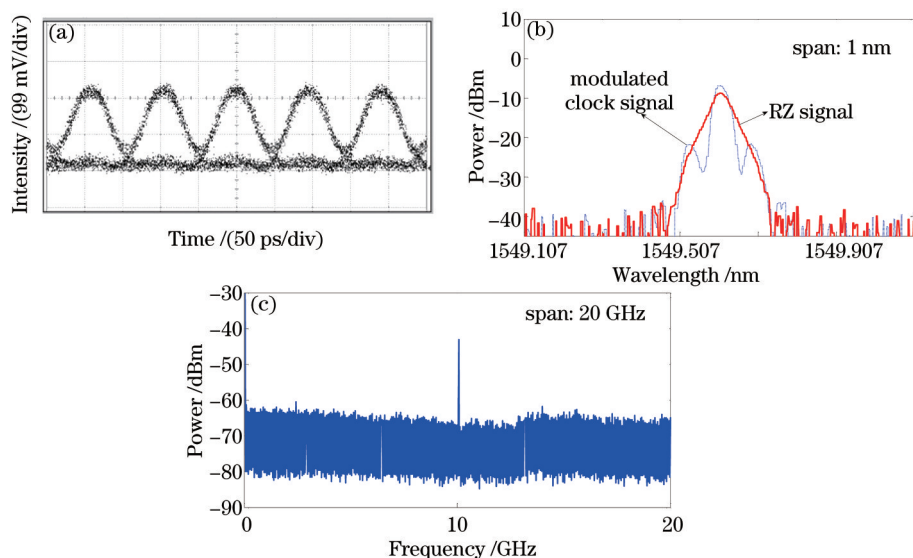


图 4 注入的 10 Gb/s RZ 码信号的(a)波形眼图, (b)光谱图, (c)电谱图

Fig.4 (a) Eye diagram, (b)optical spectrum and (c) electrical spectrum of injected 10 Gb/s RZ signal

由图 4(a)可以看出, 经过调制后的 RZ 码信号具有良好的质量; 图 4(b)给出了 RZ 码信号光谱。在实验中, 由于第二级调制的驱动放大器输出功率偏小, 使得信号调制度较小, 而光谱仪的分辨率只能达到 0.05 nm, 所以其时钟分量位置略有突起, 显示不明显。为了便于比较, 同时给出了 10 GHz 调制的时钟信号光谱(点线), 其载波波长和一条一阶边带波长分别为 1549.609 nm 和 1549.687 nm, 与 RZ 码信号的光谱轮廓特征相吻合; 图 4(c)表示光电转换后 RZ 码信号的电谱图, 可以看出 RZ 码信号的频谱中包含频率为 10 GHz 的时钟信号, 并在低频部分有明显的连续谱分量。

将产生的 RZ 码信号经由 3 dB 光耦合器 1(OC1)分成上下两路, 上路进入三端口光环形器 1(Circle1)后, 从端口二输出, 通过偏振控制器 3(PC3)注入到半导体激光器 1(DFB1)。因为 DFB1 为量子阱结构, 只有注入光场的横电磁波(TE 模式)会被锁定, 所以此注入锁定过程对偏振敏感。这里 PC3 可调节注入光场的偏振态, 达到最佳的锁定效果。通过调节温度或注入电流, 使 DFB1 的中心波长与 RZ 码信号的光载波大致对齐, 此时 RZ 码信号的光载波将锁定 DFB1 输出光场相位, 并由 Circle1 的端口三输出。由于 DFB 激光器自身的窄带宽频率选择特性, 载波以外的光谱分量将被急剧抑制。以此类似, 下路到达三端口光环形器 2(Circle2)后, 从其端口二输出, 通过偏振控制器 4(PC4)注入到半导体激光器 2(DFB2)内部。由于 DFB2 的中心波长与 RZ 码信号的一阶时钟分量大致对齐, 所以 DFB2 的输出将被此时钟分量锁定, 并通过 Circle2 的端口三输出。上下两路的输出光场分别经过偏振控制器 5(PC5)和偏振控制器 6(PC6)后, 由 3 dB 光耦合器 2(OC2)合为一, 这里 PC5 和 PC6 是用来分别调节 DFB1 和 DFB2 输出光场的偏振态, 以保证它们的偏振方向相同, 最终在光电探测器(PD)上产生时钟拍频信号。

两个 DFB 激光器注入锁定前后的光谱如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出, RZ 码信号注入后, 载波锁定激光器并得到一定程度的放大, 而载波之外的频率成分剧烈衰减。此外, 可以注意到 DFB1 中心波长与注入锁定前相比发生了红移。虽然信号中一阶时钟分量远弱于信号载波分量, 但由于一阶时钟分量强度仍强于它附近的连续谱功率, 而注入锁定所需功率要求很低, 因此 DFB2 仍然能够被此分量注入锁定输出, 其结果如图 5(b)所示。这里, 注入锁定后 DFB2 中心波长也发生了红移, 同时 RZ 码信号的一阶时钟分量被放大到

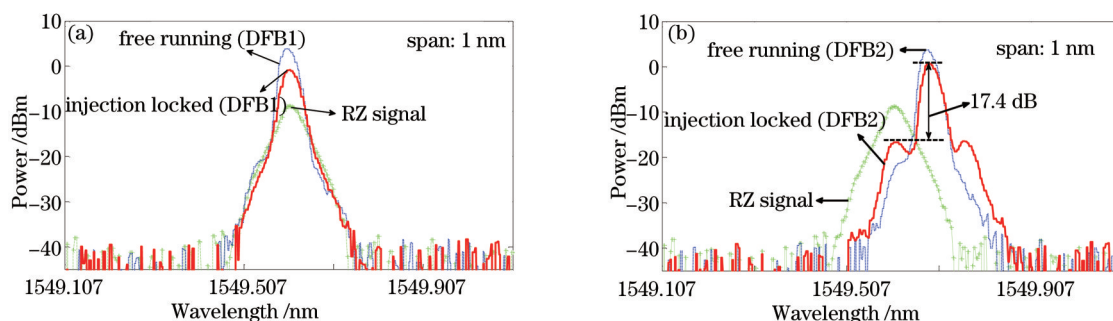


图 5 被 RZ 码信号注入锁定后 DFB1(a)和 DFB2(b)的输出光谱

Fig.5 Optical spectra of DFB1(a) and DFB2(b) after injecting the RZ signal

0.68 dBm, 高于残留的载波分量 17.4 dB。图中, 在长波长一侧出现的小峰来源于 DFB2 激光器中信号载波与激光光场间的四波混频效应。通过选择谐振腔滤波特性更好的 DFB2, 可以使得原 RZ 信号的载波得到更大的抑制。由于两个激光器自身出射功率相当, 因此两个激光器注入锁定后, 输出光场强度相差仅为 0.2 dB, 这有利于减小最终时钟信号中的直流分量。当两路注入锁定输出光场被 OC2 合为一路后, 其光谱图、电谱图、波形由图 6 给出。

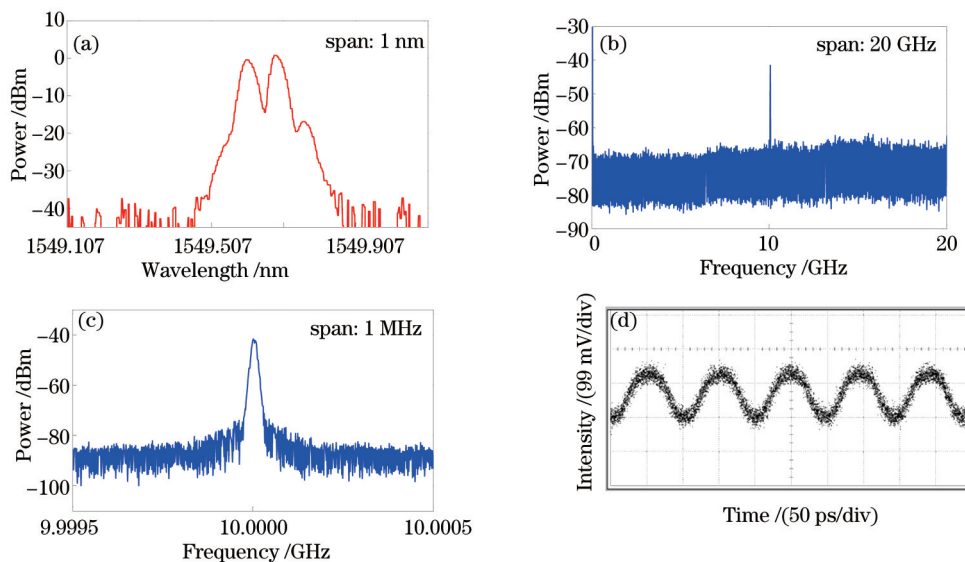


图 6 提取时钟信号的光谱图(a)、电谱图(b)、电谱细节图(c)以及波形图(d)

Fig.6 Optical spectrum(a), electrical spectrum(b), detailed electrical spectrum(c) and waveform(d) of extracted clock signal

图 6(a) 表示所提时钟的光谱也即为 DFB1 和 DFB2 所滤出的载波和一阶时钟分量的叠加。需要指出的是, 由于实验中光谱仪分辨率为 0.05 nm, 因此光谱间表现出较大的交叠。图 6(b) 为光信号被 PD 转换后得到的电谱图, 与图 4(c) 相比可以清楚地看出此时信号为一个理想的 10 GHz 的时钟信号, 原 RZ 码信号中的连续谱已被完全滤除。图 6(c) 是电谱图的细节图, 可以看出信号的中心频率为 10 GHz, 在 1 MHz 范围内的测试条件下显示出良好的信号质量。图 6(d) 给出了其对应的时钟信号波形。

需要说明的是, 由于注入锁定具有较大的锁定范围, 因此对波长的不稳定性具有较好的忍受性。实验过程中, 在 1 GHz 范围内略微改变注入信号的波长, 本方案仍然能够很好地提取出时钟信号, 这极大地放宽了对波长稳定性的要求。

以上实验结果表明本方案可以很方便地实现全光时钟提取。虽然实验只给出了 10 Gb/s RZ 码信号的时钟提取结果, 但是通过调节 DFB 激光的中心波长, 几乎可以实现任意速率光 RZ 码信号的时钟提取工作。通过实验也可以看出, 这一方案同时具有注入光功率动态范围大、波长匹配简单、结构简单、体积小、具有可集成潜力等特点。必须指出, 由于实验系统中采用了光纤结构, 导致两时钟分量在耦合输出时易受外界干

扰,使得时钟信号表现出一定的不稳定性,这一问题可以通过采用集成的方法或使用波导完成两个分量的耦合得到理想解决。

4 结 论

提出了一种新型的全光时钟提取方案,它通过半导体激光器的注入锁定过程可以有效分离出光 RZ 码信号的时钟分量,进而得到信号的同步时钟信号。它在工作特性上有速率任意可调、信号功率动态范围大、波长匹配简单、使用简便、体积小且有可集成潜力的特性。通过分析和实验验证,成功完成了对 10 Gb/s 的 RZ 码信号的同步时钟提取,获得了高质量的同步时钟信号。

参 考 文 献

- 1 Wang Shunyan, Jiang Yang, Wu Cinan, *et al.*. Experimental study on all-optical clock recovery of all-fiber mode-locking cavity configuration [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0505005.
王顺艳,江 阳,吴次南,等.全光纤锁模腔结构的全光时钟提取实验研究[J].中国激光,2012,39(5):0505005.
- 2 Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.*. 2×40 Gb/s all-optical 3R regeneration system using four wave mixing in dispersion shifted fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0806004.
孟天晖,于晋龙,王 菊,等.基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统[J].光学学报,2012,32(8):0806004.
- 3 Xie Xi, Huo Li, Wang Qiang, *et al.*. Ultra-short optical prescaled clock recovery based on an improved optoelectronic oscillator [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806003.
解 析,霍 力,王 强,等.基于改进光电振荡器结构的超短光脉冲时钟提取[J].光学学报,2014,34(8):0806003.
- 4 Tianye Huang, Junqiang Sun, Jia Li, *et al.*. 40-Gb/s all-optical clock recovery based on a mode-locked semiconductor fiber laser using nonlinear polarization rotation [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(8): 682-684.
- 5 Josué Parra Cetina¹, Jun Luo, Nicola Calabretta, *et al.*. All optical clock recovery of 40 GHz quantum dash mode-locked laser to return-to-zero 160 Gb/s data stream [C]. 2013 IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and International Quantum Electronics Conference, 2013.
- 6 Li Huo, Dong Wang, Qiang Wang, *et al.*. 100-GHz all-optical clock recovery with Fabry-Perot cavity and semiconductor optical amplifier [C]. 2012 IEEE Communications and Photonics Conference, 2012. 1-3.
- 7 Fei Wang, Yu Yu, Yin Zhang, *et al.*. All-optical clock recovery using a single Fabry-Perot semiconductor optical amplifier [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2012, 30 (11): 1632-1637.
- 8 Li Zhifeng, Wang Hongjie, Wang Wenrui, *et al.*. Upconversion by vertical cavity surface emitting laser injection locking [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (2): 0206001.
李知峰,王红杰,王文睿,等.利用垂直腔表面发射激光器注入锁定实现上变频[J].光学学报,2014,34(2):0206001.
- 9 Xiong Jintian, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Amplification properties of a distribution feedback semiconductor laser under optical injection and its application in generating microwave signals [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0614002.
熊锦添,王 荣,蒲 涛,等.光注入条件下分布反馈半导体激光器的放大特性研究及其在微波信号产生中的应用[J].光学学报,2013,33(6):0614002.
- 10 Han Bingchen, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Experimental study of continuously tunable photonic microwave frequency multiplication based on distributed feedback injection locking [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205004.
韩丙辰,于晋龙,王文睿,等.基于分布反馈注入锁定的连续可调光子微波倍频实验研究[J].中国激光,2012,39(12):1205004.
- 11 W S Tsai, Y L Chen, H Y Shao, *et al.*. Optical single sideband modulation in radio-on-fiber systems based on stimulated Brillouin scattering and injection locked technology [C]. 2014 IEEE Optoelectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fiber Technology, 2014. 781-783.
- 12 C J Buczek, R J Freiberg, M L Skolnick, *et al.*. Laser injection locking [J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61 (10): 1411-1431.
- 13 Radan Slav, Francesca Parmigiani, Joseph Kakande, *et al.*. All-optical phase and amplitude regenerator for next-generation telecommunications systems [J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 690-695.

栏目编辑:何卓铭