

基于F-P腔和SOA 100 GHz及200 GHz全光时钟恢复

武岳 霍力 娄彩云

清华大学电子工程系, 北京 100084

摘要 解释了当信号速率是法布里-珀罗(F-P)腔的自由光谱区宽度(FSR)的整数倍时,利用F-P腔和基于半导体光放大器(SOA)级联偏移滤波的幅度均衡系统实现全光时钟恢复的原理。从理论上研究了幅度均衡系统中偏移滤波参数对时钟幅度抖动的影响,并且给出了理论上最佳的偏移滤波参数。实验中,为了解决时分复用(OTDM)系统中不同时间隙信道信号光相位不同导致F-P腔输出光脉冲幅度严重起伏的问题,采用了对信号光进行波长转换的方法,最终利用FSR为102 GHz的F-P腔和幅度均衡系统成功地分别从102 Gb/s和204 Gb/s 归零码开关键控(RZ-OOK)码信号中恢复出了102 GHz和204 GHz的光时钟。其中102 GHz时钟的幅度抖动为8.5%,时间抖动小于236 fs;204 GHz时钟的幅度抖动为9.4%,时间抖动小于251 fs。

关键词 光通信;法布里-珀罗腔;时钟恢复;幅度均衡;波长转换

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0806004

100-GHz and 200-GHz All-Optical Clock Recovery Based on F-P Cavity and SOA

Wu Yue Huo Li Lou Caiyun

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

Abstract The principle, how the Fabry-Pérot (F-P) cavity followed by amplitude equalizing system based on semiconductor optical amplifier (SOA) and cascade offset filter achieves all-optical clock recovery from the signal whose bit rate is a multiple of the free spectral range (FSR) of the F-P cavity, is explained. How the parameter of the filter in the amplitude equalizing system affects the amplitude fluctuation of the recovered clock is researched and the best parameter in theory is obtained. In the experiment, to solve the problem that is great fluctuation after F-P cavity because of the phase difference between the optical signals in different channels of the optical time division multiplexed (OTDM) system, a wavelength conversion system is utilized. Finally, by using the F-P cavity with 102 GHz FSR and amplitude equalizing system, 102 GHz optical clock recovery from 102 Gb/s return to zero code on-off Keying (RZ-OOK) signal and 204 GHz optical clock recovery from 204 Gb/s RZ-OOK signal are experimentally demonstrated. The 102 GHz recovered clock has an amplitude fluctuation of 8.5% and a timing jitter less than 236 fs, and the 204 GHz recovered clock has an amplitude fluctuation of 9.4% and a timing jitter less than 251 fs.

Key words optical communications; Fabry-Pérot cavity; clock recovery; amplitude equalization; wavelength conversion

OCIS codes 060.4510; 050.2230; 060.1155; 250.5980

1 引言

光时钟恢复在全光3R(再放大、再定时、再整形)再生^[1]、时分复用(OTDM)解复用^[2]、光信号串并行转换^[3]等系统中具有重要地位。光时钟恢复分为光电混合时钟恢复和全光时钟恢复两种。光电时钟恢复可以利用光电振荡器^[4-5]和光电锁相环路^[6]等方式实现;全光时钟恢复可以利用放大反馈式激光器^[7]、全通相移滤波

收稿日期: 2015-04-03; 收到修改稿日期: 2015-05-02

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

作者简介: 武岳(1989—),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: 799967562@qq.com

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

器^[8]、微环谐振器^[9]等手段实现。在众多全光时钟恢复的方案中,利用法布里-珀罗(F-P)腔和幅度均衡系统恢复时钟的方案因其结构简单、成本低廉而受到广泛关注。目前利用此方案已经成功地实现了10^[10]、40^[11-13]、100 GHz^[14]的全光时钟恢复,目前还没有用此方法实现更高速率的时钟恢复的报道。

石英玻璃的F-P腔可以解决空气隙稳定性差的问题,利用F-P腔恢复时钟的系统一般是要求F-P腔的自由光谱区宽度(FSR)和信号速率一致^[10-14],对于200 GHz的时钟恢复需要的材料太薄,为解决这一问题,本文利用了FSR为102 GHz的F-P腔,以及由半导体光放大器(SOA)和偏移滤波构成的幅度均衡系统,成功地实现了102 GHz和204 GHz的全光时钟恢复,解释了利用低FSR的F-P腔从高速率的信号中恢复时钟的原理,并且研究了SOA之后的滤波器的带宽及偏移滤波量对减小时钟抖动的影响。

2 实验原理与仿真

2.1 利用低FSR的F-P腔恢复高速率时钟的原理

F-P腔有两个平行的反射面,当光注入F-P腔之后,会在两个反射面之间来回反射,从而将注入的光脉冲储存在腔内,每当腔内的光到达反射面时,它就会释放出一小部分光到F-P腔的外面。因此,当一个光脉冲输入F-P腔之后,输出一串光脉冲,脉冲的时间间隔等于光在F-P腔中往返一周的时间。易见F-P腔是线性系统,频域上看其透射峰是等间距的,这个间距为F-P腔的FSR,它满足

$$R_{FS} = \frac{c}{2nL} = \frac{1}{T_{FPC}}, \quad (1)$$

式中 R_{FS} 即为F-P腔的FSR, c 为真空中光速, n 为F-P腔内介质折射率, L 为F-P腔反射面距离, T_{FPC} 为光在F-P腔中往返一周的时间。由此,如果注入F-P腔的是一族归零码开关键控(RZ-OOK)格式的信号,并且码元长度 T_s 恰好等于 T_{FPC} ,那么F-P腔中储存的光会在信号的0码处填补一个脉冲,从而将0-1随机信号转化为脉冲序列,由此可以恢复出时钟。

如果 $T_{FPC}=NT_s$,亦即信号速率 $f_s=NR_{FS}$, N 为正整数,可以通过F-P腔从信号恢复出时钟。这是因为信号的第 $k-N,k-2N,k-3N,\dots$ 个码元所对应的光脉冲注入F-P腔之后会将脉冲储存在腔内且由 $T_{FPC}=NT_s$ 可使它们之间彼此同步。第 k 个码元到来时,它也和前面所说的储存在腔内的光脉冲同步,如果第 k 个码元是0码,储存在腔内的光脉冲会在此处填补一个脉冲。因此,用此方法可以恢复出时钟。

用F-P腔恢复时钟的原理也可以从频域上解释,图1为利用FSR为102 GHz的F-P腔提取204 GHz时钟信号($N=2$)的情形, N 为其他正整数的情形类似。204 Gb/s信号的光谱如图1(a)所示,可以看到,信号的光谱拥有众多边频成分,这些边频成分携带了信号的信息;而F-P腔的传递函数如图1(b)所示,信号通过F-P腔之后,边频成分被抑制[见图1(c)],谱上有很强的204 Hz时钟分量,102 Hz时钟成分被有效抑制,从而可从信号恢复出204 Hz时钟。

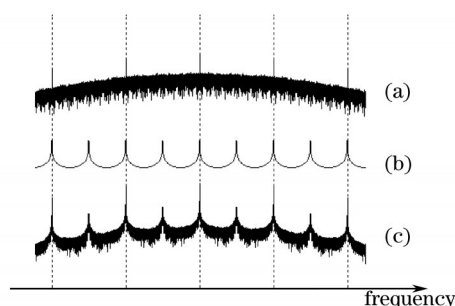


图1 F-P腔恢复时钟的频域解释示意图。(a) 204 Gb/s信号频谱;(b) F-P腔透射谱;(c)恢复时钟信号频谱

Fig.1 Explanation nation of the clock recovery by F-P cavity in frequency domain. (a) Spectrum of the 204 Gb/s signal; (b) transmission spectrum of the F-P cavity; (c) spectrum of the recovered clock

2.2 幅度均衡原理

由于光到达F-P腔反射面时会释放部分光能,当注入由0码和1码组成的伪随机码(PRBS)信号,1码到来时,腔内储存光能增加,0码到来时腔内光能减少,因此,从F-P输出的时钟会有幅度抖动,连续0码来到时抖动更加严重。为了得到幅度均衡的时钟,将F-P腔输出的脉冲注入SOA并且在SOA后面放置一个高斯形滤波器^[15]。

由于 SOA 有自增益调制(SGM)效应,幅度较大的脉冲将会导致 SOA 产生相对较强的增益饱和,得到较小的增益,而幅度较小的脉冲将会导致 SOA 产生相对较弱的增益饱和,得到较大的增益,这样使得通过 SOA 后的脉冲幅度抖动减小。除了 SGM 效应,输入的光脉冲在 SOA 中还会同时产生自相位调制(SPM)效应,使得脉冲通过 SOA 之后出现非线性相移和频率啁啾。其中脉冲在中心部分主要会有红移啁啾,在两侧主要会有蓝移啁啾。由于幅度高的脉冲具有较大的红移啁啾,蓝移滤波之后衰减较多;幅度低的脉冲具有较小的红移啁啾,蓝移滤波之后衰减较少。因此,在 SOA 后置合适的蓝移滤波可以减小幅度抖动;而后置红移滤波则可能增加其幅度抖动。SOA 的 SGM 效应和 SPM 效应这两个因素使得从 F-P 腔输出的脉冲幅度得到均衡。

为了考察 SOA 之后蓝移滤波器的带宽和中心波长对恢复时钟幅度抖动的影响,按照图 2 搭建系统进行仿真,其中幅度抖动定义为

$$K = \sigma/a, \tag{2}$$

式中 σ 为脉冲幅度的标准差, a 为脉冲幅度的平均值。图中 EDFA 为掺铒光纤放大器。信号为 $2^{10}-1$ 伪随机码(PRBS),速率为 200 Gb/s;F-P 腔反射面反射率为 99%,FSR 为 100 GHz;SOA 有源区长度为 1 mm,宽度为 2 μm ,厚度为 0.2 μm ,注入电流为 250 mA,SOA 所用数值模型类似文献[16];得到 F-P 腔之后和 SOA 之后的时钟眼图(见图 3),可以看到,F-P 腔之后时钟有较大的幅度抖动(20.8%),经过 SOA 中的 SGM 作用后抖动减小(12.0%)。

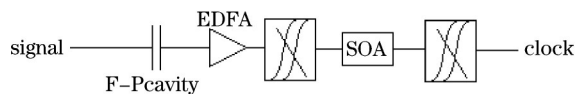


图 2 时钟恢复装置图

Fig.2 Schematic setup of clock recovery

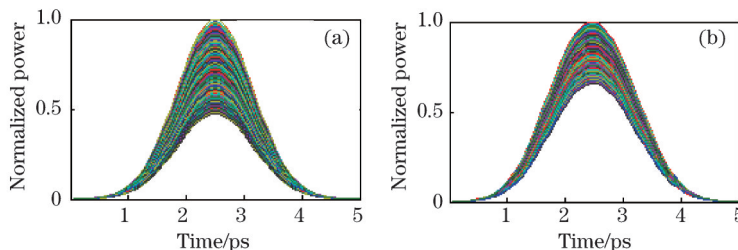


图 3 (a) F-P 腔之后时钟波形; (b) SOA 之后时钟波形

Fig.3 (a) Waveform after F-P cavity; (b) waveform after SOA

为进一步减小幅度抖动,可利用 SPM 效应,改变 SOA 后滤波器中心波长和带宽,得到时钟幅度抖动随滤波器变化如图 4 所示。从图 4 可以看到,SOA 后的滤波器带宽减小会导致输出脉冲幅度抖动随滤波器偏移量的变化更敏感,并且适当蓝移可以更好地减小输出脉冲的幅度抖动,红移则不利于减小幅度抖动。滤波器带宽为 3 nm、蓝移为 0.2 nm 时可以实现最小的幅度抖动(7.9%),如图 5 所示。

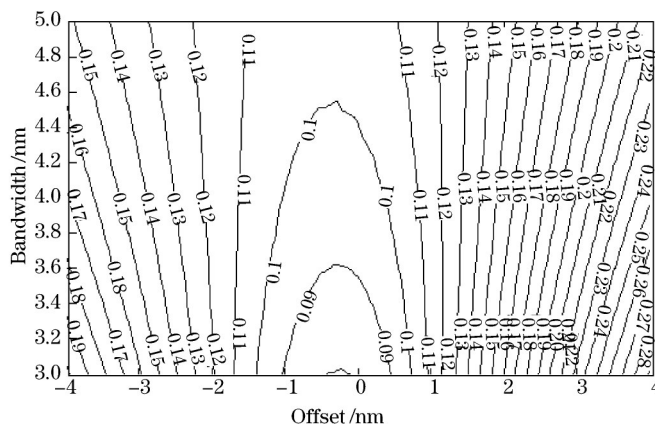


图 4 幅度抖动随偏移滤波的带宽及偏移量变化图

Fig.4 Amplitude fluctuation versus filter's bandwidth and offset

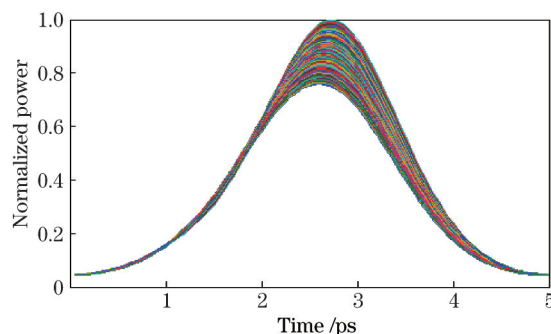


图5 幅度抖动最小时的时钟波形

Fig.5 Waveform of the clock with smallest amplitude fluctuation

3 实验结果和讨论

3.1 102 GHz时钟恢复

实验装置如图6所示,图中CW为连续光源,PM为相位调制器,HNLF为高非线性光纤,IM为强度调制器。使用图6(a)所示的装置产生25.5 Gb/s的伪随机码信号,并且用1×4复用器(MUX)复用至102 Gb/s^[17]。直接将信号注入图2所示的时钟恢复部分,其中F-P腔的FSR为102 GHz,将F-P腔输出的光放大并且滤掉放大器引起的带外噪声之后,注入到有源区长度为1 mm的SOA,其中注入SOA的电流为245 mA。其后放置一个3 nm宽的高斯形滤波器以减小脉冲的抖动,用光采样示波器观察恢复的时钟眼图并用光谱仪观察其光谱,恢复的时钟波形与光谱如图7(c)和(d)所示,由图7(c)可见,恢复的时钟存在严重的抖动,这是因为采用的光纤时分复用器致使不同时隙信道信号间相位不同所致。

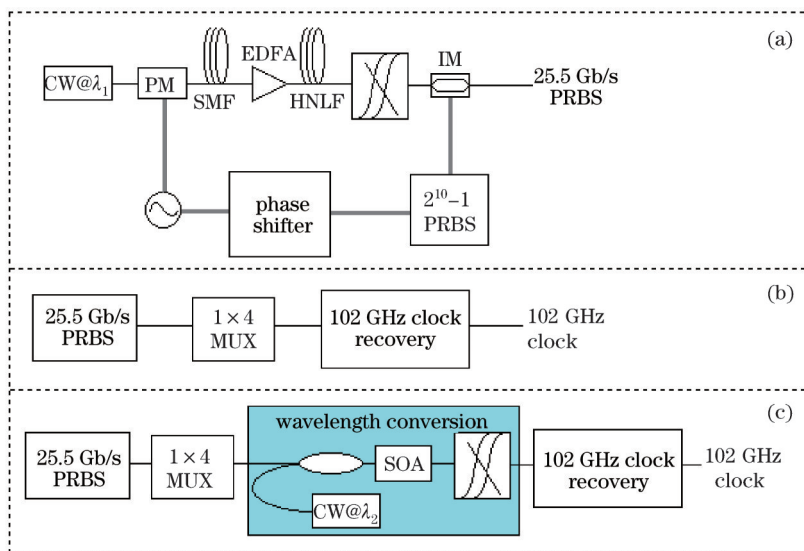


图6 102 Gb/s时钟恢复实验装置图。(a) 25.5 Gb/s信号产生部分;(b)没有波长变换系统的恢复时钟实验装置图;
(c)有波长变换系统的恢复时钟实验装置图

Fig.6 Experimental setup of the 102 Gb/s clock recovery. (a) Generation of 25.5 Gb/s signal; (b) experimental setup of clock recovery without wavelength conversion system; (c) experimental setup of clock recovery with wavelength conversion system

对于时分复用信号进行直接时钟提取时,由于复用器中不同支路相位易受到外界干扰,无法保证特定相位关系,导致F-P中不同时间进入的脉冲相干叠加时会产生强烈的幅度起伏,为解决这一问题,利用另一个SOA将信号先进行波长变换^[18]。波长变换所用直流光波长为1562.1 nm,SOA有源区长度为2 mm,注入SOA的电流为493 mA。将波长变换之后的信号注入相同的时钟恢复部分,测量的时钟恢复结果如图7(e)和(f)所示,利用光采样示波器测量时钟的幅度抖动为8.5%,均方根(RMS)时间抖动为236 fs,这包括示波器本身具有的50 fs的时间抖动。可以看到,使用波长变换之后,从时分复用的信号中提取出了低抖动的光时钟脉冲。

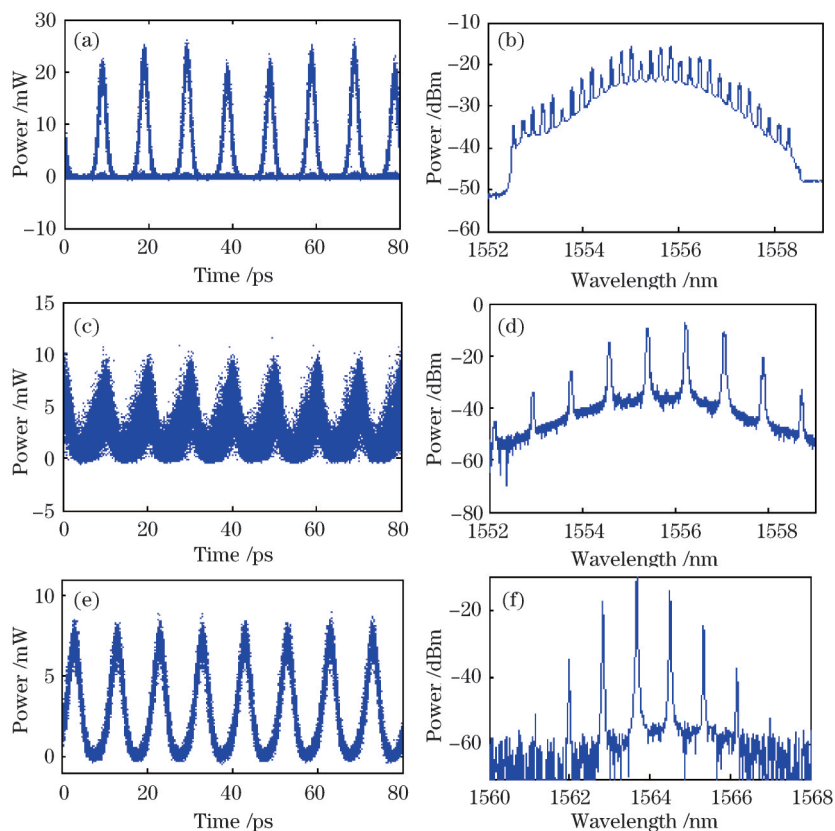


图 7 (a) 102 Gb/s 信号眼图; (b) 102 Gb/s 信号光谱; (c) 不用波长变换恢复的时钟波形; (d) 不用波长变换恢复的时钟光谱; (e) 使用波长变换恢复的时钟波形; (f) 使用波长变换恢复的时钟光谱

Fig.7 (a) Eye diagram of the 102 Gb/s signal; (b) spectrum of the 102 Gb/s signal; (c) waveform of the recovered clock without wavelength conversion; (d) spectrum of the recovered clock without wavelength conversion; (e) waveform of the recovered clock with wavelength conversion; (f) spectrum of the recovered clock with wavelength conversion

3.2 204 GHz 时钟恢复

实验系统如图 8 所示,用图 6(a)的装置产生 25.5 Gb/s 的信号并且复用至 204 Gb/s,然后将信号波长变换之后注入时钟恢复部分,波长变换部分使用直流光波长为 1559.6 nm,SOA 有源区长度为 2 mm,注入 SOA 的电流为 493 mA。时钟恢复部分和 102 GHz 时钟恢复实验的完全相同,仍然采用 FSR 为 102 GHz 的 F-P 腔。这意味着信号速率恰好是 F-P 腔 FSR 的 2 倍。图 9(a),(c),(e)分别为时分复用的 204 Gb/s 数据信号眼图、SOA 后的时钟及经蓝移滤波后的光时钟波形,图 9(b),(d),(f)分别为时分复用的 204 Gb/s 数据、SOA 后的时钟及经蓝移滤波后的光时钟的光谱。利用光采样示波器测得不采用蓝移滤波时,获得的光信号的幅度抖动为 14.0%,均方根时间抖动为 264 fs。采用蓝移滤波后,时钟的幅度抖动为 9.4%,均方根时间抖动为 251 fs,这包括示波器本身具有的 50 fs 的时间抖动。实验结果证明用此法可以成功地从 204 Gb/s 的信号中恢复出光时钟。

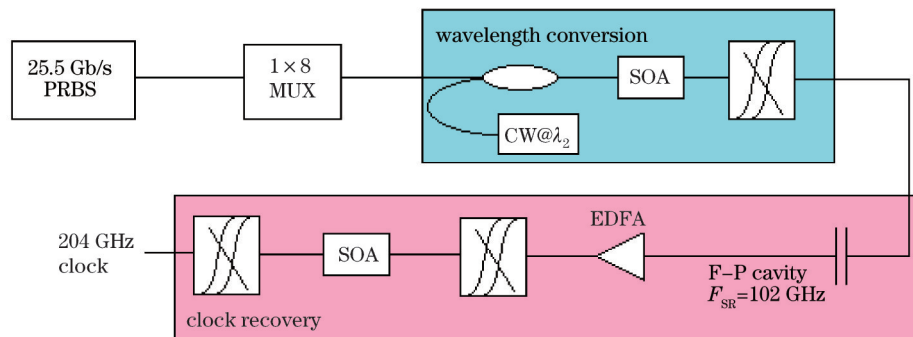


图 8 204 Gb/s 时钟恢复实验装置图

Fig.8 Experimental setup of the 204 Gb/s clock recovery

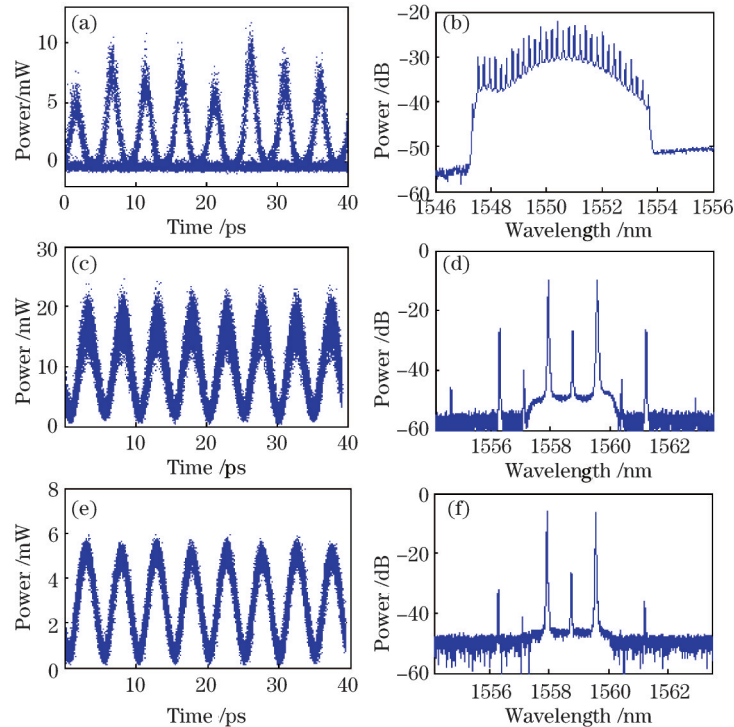


图9 (a) 204 Gb/s 信号眼图; (b) 204 Gb/s 信号光谱; (c) 未经偏移滤波的时钟波形; (d) 未经偏移滤波的时钟光谱;
(e) 偏移滤波之后的时钟波形; (f) 偏移滤波之后的时钟光谱

Fig.9 (a) Eye diagram of the 204 Gb/s signal; (b) spectrum of the 204 Gb/s signal; (c) waveform of the clock before filtered; (d) spectrum of the clock before filtered; (e) waveform of the clock after filtered; (f) spectrum of the clock after filtered

4 结 论

通过波长转换,利用FSR为102 GHz的F-P腔和基于SOA加偏移滤波的幅度均衡装置,从102 Gb/s RZ-OOK格式的信号中恢复出了幅度抖动为8.5%、时间抖动小于236 fs的102 GHz时钟,并且利用同样的F-P腔和幅度均衡装置从204 Gb/s RZ-OOK格式的信号中恢复出了幅度抖动为9.4%、时间抖动小于251 fs的204 GHz时钟。而且从理论上讨论了幅度均衡装置中偏移滤波器带宽和偏移量对时钟抖动的影响。

参 考 文 献

- 1 Sartorius B. All-optical clock recovery for 3R optical regeneration[J]. Optical Fiber Communication Conference & Exhibit, 2001, 1: MG7.
- 2 Huo L, Yang Y, Lou C, *et al.*. Demonstration of an 8*10-Gb/s OTDM system[J]. Chin Opt Lett, 2005, 3(3): 140-142.
- 2 Hu H, Yu J, Zhang L, *et al.*. 40 Gb/s All-optical serial-to-parallel conversion based on a single SOA[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(13): 1181-1183.
- 4 Ji Y, Jia X, Li Y, *et al.*. Simultaneous clock recovery and demultiplexing of a 320 Gb/s OTDM system using an optoelectronic oscillator based on cascaded MZM and PolM[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(5): 050602.
- 5 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帧时钟脉冲提取[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806003.
- 6 Ohara T, Takara H, Shake I, *et al.*. Highly stable 160-Gb/s OTDM technologies based on integrated MUX/DEMUX and drift-free PLL-type clock recovery[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(1): 40-48.
- 7 Wang Li, Zhao Xiaofan, Lou Caiyun, *et al.*. 40 Gbits/s all-optical clock recovery for degraded signals using an amplified feedback laser[J]. Appl Opt, 2010, 49(34): 6577-6581.
- 8 Maram R, Kong D, Galili M, *et al.*. Ultrafast all-optical clock recovery based on phase-only linear optical filtering[J]. Opt Lett, 2014, 39(9): 2815-2818.
- 9 Yang W, Yu Y, Ye M, *et al.*. Wide locking range and multi-channel clock recovery using a silicon microring resonator[J]. IEEE

- Photon Technol Lett, 2014, 26(3): 293–296.
- 10 Wang T, Lou C, Huo L, *et al.*. A simple method for clock recovery[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(8): 613–616.
- 11 Contestabile G, D’Errico A, Presi M, *et al.*. 40-GHz all-optical clock extraction using a semiconductor-assisted Fabry-Pérot filter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(11): 2523–2525.
- 12 V Roncin, S Lobo, L Bramerie, *et al.*. System characterization of a passive 40 Gb/s all optical clock recovery ahead of the receiver[J]. Opt Express, 2007, 15(10): 6003–6009.
- 13 Tang Guangqiang, Yu Jinlong, Wang Yaotian, *et al.*. 40 GHz all-optical clock extraction using a Fabry-Perot filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(10): 1853–1857.
汤广强, 于晋龙, 王耀天, 等. 基于法布里-珀罗滤波器的40 GHz全光时钟提取实验[J]. 光子学报, 2007, 36(10): 1853–1857.
- 14 Huo L, Wang D, Wang Q, *et al.*. 100-GHz all-optical clock recovery with Fabry-Perot cavity and semiconductor optical amplifier[J]. Asia Communications & Photonics Conference, 2012, 7363(1): 1–3.
- 15 Zhao Xiaofan. Research on Key Technologies of Optical Signal Processing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 21–30.
赵晓凡. 光信号处理关键技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2010: 21–30.
- 16 Chen Xin, Lou Caiyun, Wang Qiang, *et al.*. Investigation of all optical 2R regeneration based on semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906013.
陈 新, 娄采云, 王 强, 等. 基于半导体光放大器光判决门的光2R再生研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906013.
- 17 Wang Q, Lou C, Huo L, *et al.*. A short optical pulse source based on chirp compression and Mamyshev 2R regenerator for 200-Gbit/s OTDM System[C]. Asia Communications and Photonics Conference, 2011, 8309: 830920.
- 18 Chan K, Chan C, Chen L K, *et al.*. Mitigation of pattern-induced degradation in SOA-based all-optical OTDM demultiplexers by using RZ-DPSK modulation format[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(9): 1264–1266.

栏目编辑: 王晓琰