

光电混合的光时钟分频/倍频器

周竹雅 江 阳 白光富 徐 静 王顺艳 李恒文

(贵州大学贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要 提出并分析验证了一种光电混合结构的光时钟分频/倍频器系统,该系统通过光电转换后的反馈调制来实现光时钟信号的分频/倍频操作。分频过程类似于 D 触发器的输出信号反馈控制输入端信号的原理;在不更换器件的情况下,简单改变反馈顺序,还可以实现光时钟信号的倍频。从时/频域的角度分别讨论了分频/倍频的原理,在实验上验证了所提方案的可行性,从一路 10 GHz 的光时钟信号出发分别得到了 5 GHz 的光、电分频时钟信号和 20 GHz 的光时钟倍频信号。该系统结构简单,性能稳定,对光信号的波长透明且无需光、电滤波,并同时具有光、电信号输出,因此可以方便地配合后续信号处理环节,具有良好的实用性。

关键词 光纤光学;时钟分频;时钟倍频;反馈调制;马赫-曾德尔调制器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0306002

Optoelectronic Hybrid Optical Clock Frequency Divider/Multiplier

Zhou Zhuya Jiang Yang Bai Guangfu Xu Jing Wang Shunyan Li Hengwen

(Guizhou Key Laboratory for Photoelectric and Application, Guizhou University,
Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract A scheme of optoelectronic hybrid optical clock frequency divider/multiplier is proposed and analyzed. The optical clock signal frequency divider/multiplier is realized by feedback modulation after the photoelectric conversion. The procedure of the frequency divider is similar to the principle of D flip-flop, in which the output signal is used to control the input signal. The frequency multiplication of optical clock is also implemented by simply changing the feedback sequence without replacing devices. According to signal processing in the time/frequency domain, the principle of frequency divider/multiplier is discussed respectively and the feasibility of the proposed scheme is demonstrated. In the experimental demonstration, 5 GHz optical/electric clock signal and 20 GHz optical clock signal are generated from a 10 GHz optical clock signal. The system has simple configuration, stable performance. It is transparent to the wavelength of the optical signal, and doesn't need the optical, electrical filter. In this system, the optical/electrical signal can be output simultaneously, therefore it has good practicability and can easily cooperate with the subsequent signal processor.

Key words fiber optics; optical clock frequency dividing; optical clock frequency multiplication; feedback modulation; Mach-Zehnder modulator

OCIS codes 060.2310; 060.2630; 060.4080

1 引 言

光时钟信号是数字光纤通信系统的基本保证。为了更灵活地实现光信息的传输和处理,对时钟信号进行分频和倍频处理也有着极其重要的意义。对于分频时钟信号而言,它是实现光时分复用、数据

的串并转换、数据缓存和交换等功能的前提条件^[1];而倍频的时钟信号则可在更高速的开关时间内获得或在实时取样系统中得到应用。

目前已有一些时钟分频的方案和成熟技术,大体上看,主要分为如下 3 类:1)比较成熟的电子分频

收稿日期: 2012-09-26; 收到修改稿日期: 2012-11-22

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 和贵州大学创新项目(理工 2012022)资助课题。

作者简介: 周竹雅(1988—),女,硕士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: zhouzhuya0501@126.com

导师简介: 江 阳(1975—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: jiangyang415@163.com
(通信联系人)

器,它主要是利用电触发器或计数器的原理实现,但是由于电子技术自身的局限,在高速率情况下,其成本较高且提升空间有限。另外在光通信系统使用时,光时钟信号需要先经过光电转换,若需要获得光分频时钟信号,则必须再次调制。2)全光时钟分频,这类技术可以从光时钟信号中直接得到光分频时钟信号。例如 Chow 等^[2]提出并验证了半导体激光器(LD)倍周期振荡分频方案,该方案对可处理的时钟频率有较严格的要求,使用不够灵活;Manning 等^[3,4]实验验证了太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)加反馈环,或利用超快非线性干涉仪实现的全光时钟分频方法;Lee 等^[5]提出了半导体光放大器(SOA)用作光谱移位器、光栅滤波开关作为光栅滤波器的时钟分频方案;Lei 等^[6]证明了慢恢复 SOA 的“8 字形”锁模激光器提取分频时钟的可行性。这几种方案结构比较复杂,对偏振敏感,系统稳定性差,若后续需要电处理系统辅助时,需要光电转换得到电分频时钟信号。3)光电振荡器结构的时钟分频装置,Lou 等^[7]提出了光电振荡器(OEO)谐波锁模产生分频时钟的实验系统,该系统可以同时获得光、电分频信号,但是必须在系统中放置一个对应分频频率的电带通滤波器,这极大地限制了使用的灵活性,也增加了系统成本。考虑到现有光通信系统仍需大量地依赖电子信息处理技术,因此如何获得一个低成本、结构简单、性能稳定、使用灵活、并能同时产生光、电分频时钟信号的系统是一个有意义的课题。

相对时钟分频而言,时钟倍频较为容易实现,其主要思想是通过各种非线性效应产生高次谐波并过滤波的方式得到所需的倍频信号,或者直接利用光时钟差分的方法实现。这些方法的一个主要问题在

于所需的滤波环节会增加整个系统的复杂性和成本。

本文提出一种光电混合结构的光时钟分频/倍频器,它从一路光时钟信号出发,可通过后向的光电转换反馈调制来实现光时钟信号的分频操作;在不更换器件的情况下,简单改变反馈顺序,对光时钟信号进行二次调制,还可以实现光时钟信号的倍频。这一方案结构简单,性能稳定,工作带宽大,不需要配合使用任何滤波器件,对偏振相关性低,且对光信号的波长透明。该系统同时具有光、电信号输出,因此可以方便配合后续的光、电信号处理环节,具有很好的实用性。

2 实验原理

2.1 分频器的基本原理

所提出的分频器结构框图如图 1(a)所示,一路光时钟信号注入分频器后先通过一个马赫-曾德尔强度调制器(MZM)后,经过光可调延时线(ODL)进入光电探测器(PD)实现光电转换并反馈驱动 MZM 对原光时钟信号进行调制。仔细调节 ODL 的延时量,最终可以获得光、电分频时钟信号输出。从功能上看,反馈环路为注入的光时钟信号提供了一个延时保存,而系统中的 MZM 则起到一个电光开关的作用。开关的“通”和“断”取决于施加在 MZM 上的电压信号,因此该系统具有输入状态的“保持”和将“1”置“0”的“翻转”功能,其在分频时的原理可类比于如图 1(b)所示的电 D 触发器分频原理。输入 MZM 的光时钟信号等效为 D 触发器的控制时钟(CP)信号输入,经恰当延时后由 PD 转换得到的电信号相当于 D 触发器的输出端 \bar{Q} ,它将驱动 MZM 完成时钟信号的反馈控制,并最终得到分频输出 Q。

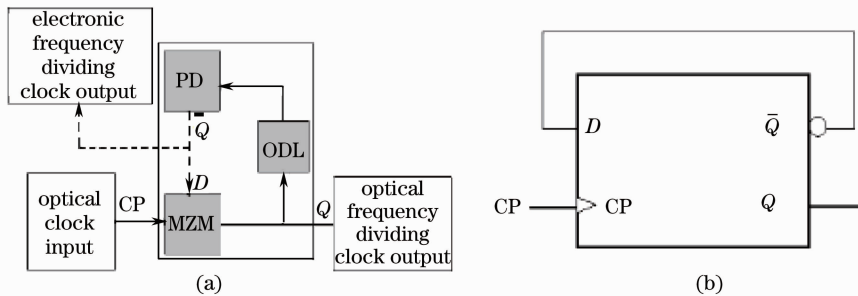


图 1 (a)分频器的结构框图; (b) D 触发器分频结构图

Fig. 1 (a) Structure of the frequency divider; (b) structure of the D flip-flop frequency divider

D 触发器的特性方程为 $Q_{n+1} = D = \bar{Q}_n$, 假设 D 触发器的“D”端输入初态 $D_n = 1$, 在控制时钟为“1”时, 输出信号 \bar{Q} 置“0”, 并在下一个控制时钟到来之前保持这个状态不变。输出信号 \bar{Q} 再反馈给触

发器的输入端“D”, 使 $D_{n+1} = 0$, 在下一个控制时钟到来时, $Q_{n+1} = 0$, 这时输出信号 \bar{Q}_{n+1} 就置“1”。这样循环下去就得到如图 2 所示的 \bar{Q} 的输出。从图 2 给出的 D 触发器时序逻辑图可以看出, 最终输出信号 Q

的频率为控制时钟信号的二分之一，相当于二进制计数器实现了二分频功能。通过这种触发器的级联，还可以获得更高的分频比。

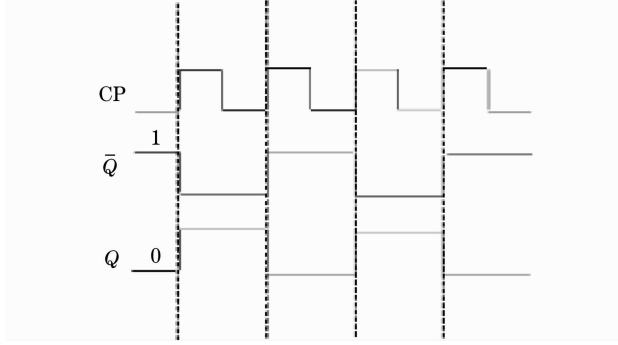


图2 D触发器时序逻辑图

Fig. 2 Timing logic of the D flip-flop

2.2 倍频器的基本原理

对上述结构的分频器，在不更换器件的前提下，简单改变反馈顺序，可实现光时钟信号的倍频操作，其结构框图如图3所示。

假设注入的光时钟信号为一个双边带的正弦信号，它可由角频率为 ω_0 的连续光被一个MZM调制产生，该光时钟信号的表达式可写为^[8,9]

$$E_{\text{CLK}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 [J_0(\beta_1) \cos(\omega_0 t) +$$

$J_1(\beta_1) \cos(\omega_0 + \omega_m)t + J_1(\beta_1) \cos(\omega_0 - \omega_m)t]$, (1)
式中 E_0 为光场振幅， J_0 和 J_1 为贝塞尔函数， ω_m 为电驱动信号的角频率。调制系数 β_1 可表示为 $\beta_1 = \frac{V_c}{V_\pi} \cdot \frac{\pi}{2}$ ，这里 V_c 为电驱动信号的幅度， V_π 为调制器的半波电压。

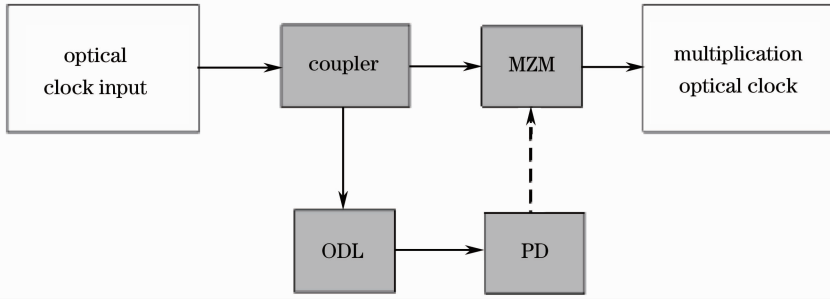


图3 倍频器结构框图

Fig. 3 Structure of the frequency multiplier

调制产生的光时钟信号，进入倍频器后，先经过一个3 dB耦合器分成两路，一路直接注入倍频器中的MZM，另一路被ODL延时后经过PD转换成电信号调制MZM。延时后产生的电信号与光时钟信号具有一个相位差 φ ，其幅度为 V'_c ，故MZM的电驱动信号表达式为

$$V(t) = V'_c \cos(\omega_m t + \varphi), \quad (2)$$

其调制输出信号为

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{CLK}} \cos\left[\frac{\phi}{2} + \frac{V'_c \pi}{2V_\pi} \cos(\omega_m t + \varphi)\right], \quad (3)$$

式中 ϕ 为MZM的直流偏压引入的固定相移量^[10]。当 $\phi = \frac{\pi}{2}$ 时，MZM工作在线性区，此时，倍频器的输出信号为

$$E_{\text{out}}(t) = \frac{1}{2} E_0 \{J_0(\beta_1)J_0(\beta_2) \cos(\omega_0 t) + J_1(\beta_1)J_1(\beta_2) \cos(\omega_0 t - \varphi) + J_1(\beta_1)J_1(\beta_2) \cos(\omega_0 t + \varphi) + J_0(\beta_1)J_1(\beta_2) \cos[(\omega_0 + \omega_m)t + \varphi] + J_1(\beta_1)J_0(\beta_2) \cos(\omega_0 + \omega_m)t + J_0(\beta_1)J_1(\beta_2) \cos[(\omega_0 - \omega_m)t - \varphi] + J_1(\beta_1)J_0(\beta_2) \cos(\omega_0 - \omega_m)t + J_1(\beta_1)J_1(\beta_2) \cos[(\omega_0 + 2\omega_m)t + \varphi] + J_1(\beta_1)J_1(\beta_2) \cos[(\omega_0 - 2\omega_m)t - \varphi]\}, \quad (4)$$

式中 $\beta_2 = \frac{V'_c}{V_\pi} \cdot \frac{\pi}{2}$ 为MZM的调制系数。当 $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ，且 $\varphi = (2k+1)\pi$ 时，(4)式变为

$$E_{\text{out}}(t) \approx \frac{1}{2} E_0 \{[J_0^2(\beta) - 2J_1^2(\beta)] \cos(\omega_0 t) + J_1^2(\beta) \cos(\omega_0 + 2\omega_m)t + J_1^2(\beta) \cos(\omega_0 - 2\omega_m)t\}. \quad (5)$$

由(5)式可以看出，此信号包括光载波及两个二阶边带，其频率为注入时钟信号的2倍。

3 实验结果及讨论

为了验证理论分析的结果,本文设计了如图4所示的实验系统。图中,第1个虚线框模拟一路待处理的光时钟信号,第2个虚线框是所设计的时钟分频结构。在初始光时钟产生部分,半导体激光器首先发出中心波长为 1555 nm 的连续光并被马赫-曾德尔调制器(MZM1)调制,此时调制器偏置在线性调制区,驱动信号为 10 GHz 的微波信号,偏振控制器(PC1)用于调节光场的偏振态以达到最佳调

制效果。调制所得到的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大至 11 dBm 并由 PC2 控制其偏振态后注入时钟分频系统。利用频谱分析仪(Agilent 8564EC)和光电示波器(Agilent 86100A),实验首先测试了光时钟信号的频谱、单边带相位噪声和波形,其结果如图5(a)~(c)所示。从图中可以看出该光时钟信号频率为 10 GHz,在频偏为 10 kHz 处,其相位噪声为 -105.743 dBc/Hz。

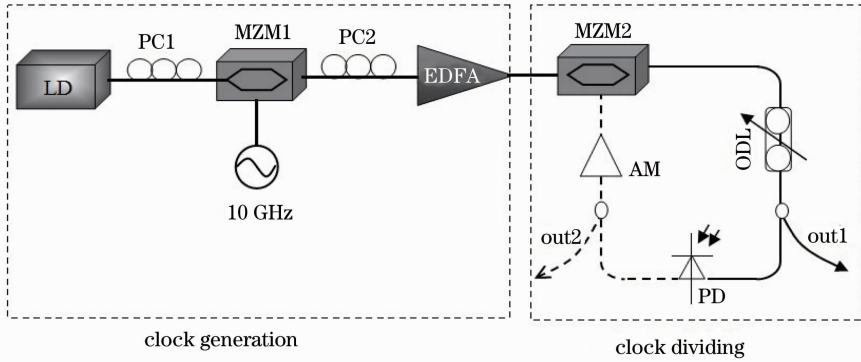


图4 分频器实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of the frequency divider

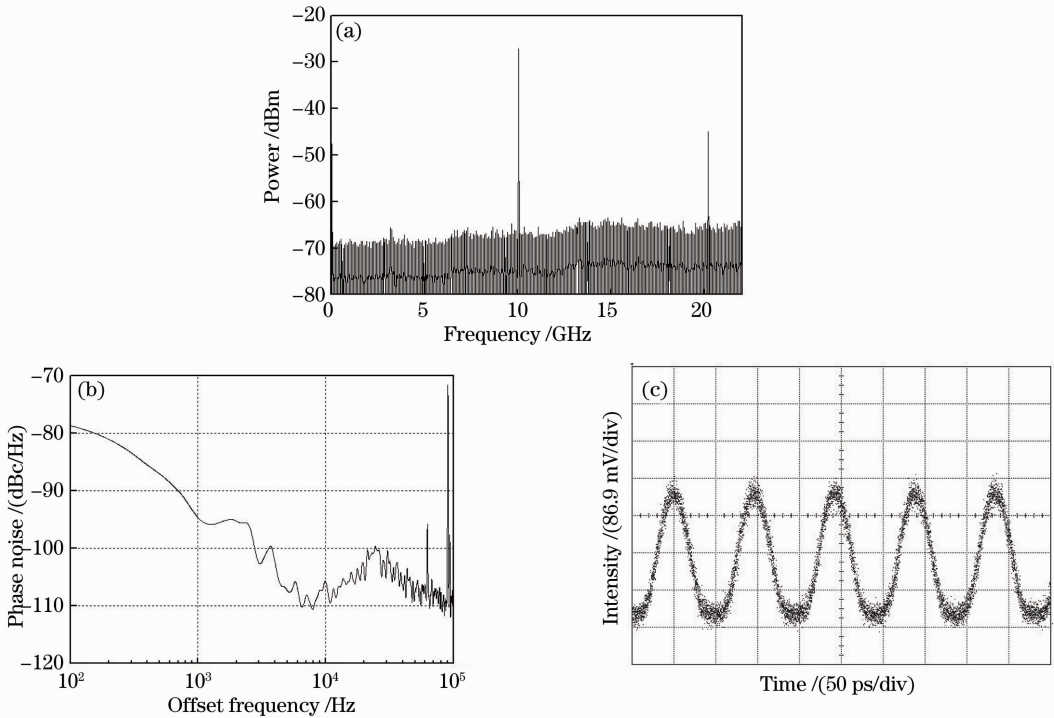


图5 10 GHz 光时钟信号。(a)电谱图;(b)相位噪声图;(c)波形图

Fig. 5 10 GHz optical clock signal. (a) Electrical spectrum; (b) phase noise; (c) waveform

时钟分频系统由马赫-曾德尔调制器(MZM2)、ODL(调节精度小于 1 ps)、80:20 的光耦合器、PD(U2T XPDV2320R,带宽为 50 GHz)、微波功分器

以及电驱动放大器(AM)所构成。光时钟信号被 ODL 恰当延后经光电转换进行反馈调制,通过 MZM2 的开关作用最终产生光、电分频时钟信号。

图 6(a)~(d)给出了频谱显示范围(SPAN)分别为 22 GHz 和 200 GHz 的分频信号的电谱、单边带相位噪声和对应的波形。从图 6(a)~(c)可以看出系统输出的信号频率为 5 GHz,频谱细节显示出该信号具有很好的质量,其单边带相位噪声在频偏 10 kHz 处的大小为 -112.789 dBc/Hz。利用原始时钟信号触发示波器,可以得到如图 6(d)所示的波形,此时波形清晰稳定,表明两者具有严格的相位关系。从波形上还可以看出,此时信号占空比为 25%,因此频谱上表

现出多条高次谐波分量。由于 ODL 和 PD 均可视为偏振和波长无关器件,因此在反馈环路中无需对波长和偏振态提出要求。

为了实现时钟倍频操作,在保持系统器件的情况下,将分频操作时 MZM2 的输出后反馈改为输入前反馈,其实验系统如图 7 所示。图中,第 1 个虚线框仍表示待处理 10 GHz 光时钟信号的产生,第 2 个虚线框为所设计的倍频结构。

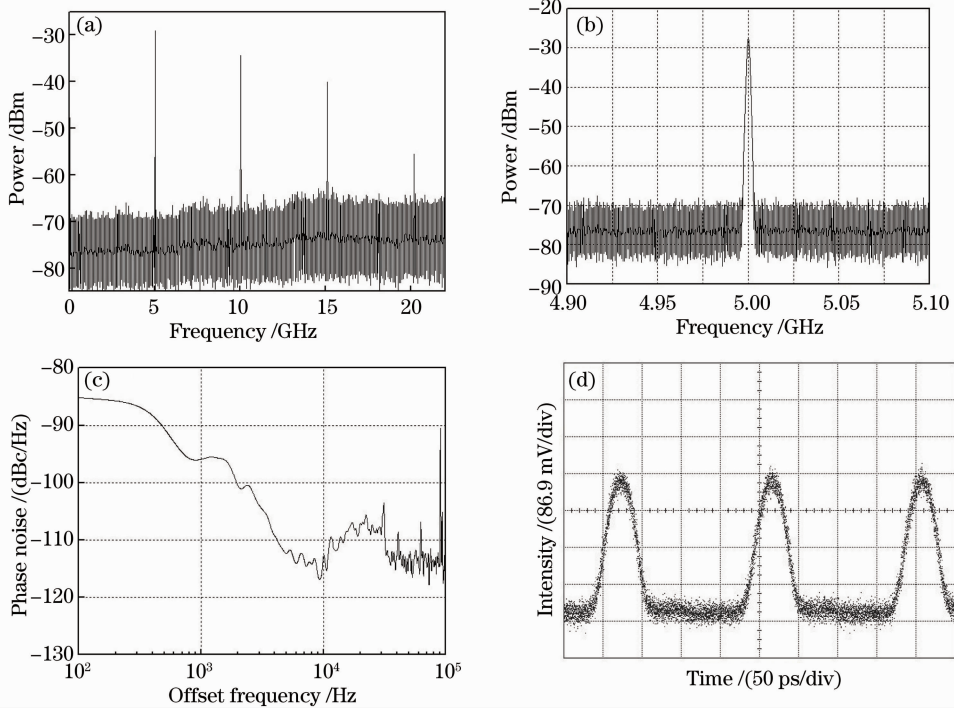


图 6 5 GHz 分频时钟信号。(a) SPAN 为 22 GHz 的电谱图; (b) SPAN 为 200 MHz 的电谱图; (c) 相位噪声图; (d) 波形图
Fig. 6 5 GHz frequency divided optical clock signal. (a) Electrical spectrum with SPAN of 22 GHz; (b) electrical spectrum with SPAN of 200 MHz; (c) phase noise; (d) waveform

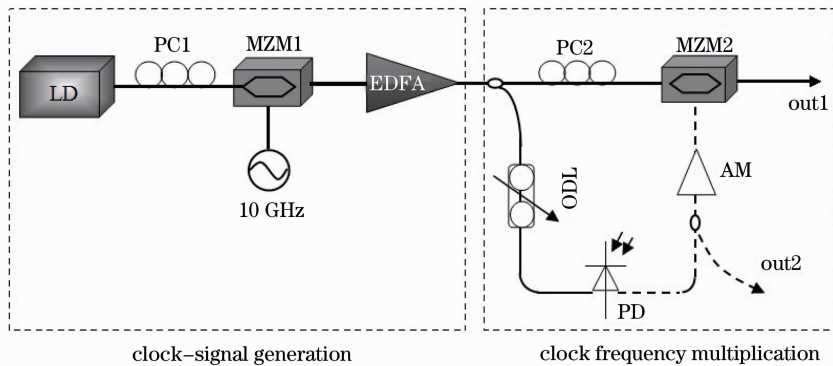


图 7 倍频器实验装置图

Fig. 7 Experimental setup of the frequency multiplier

由图 7 可以看出,光时钟信号进入倍频系统后,先被一个 50:50 的光耦合器分成两路,一路注入 MZM2,另一路经过 ODL 延时后由 PD 转换成电信

号,并驱动 MZM2。由前面的理论分析可知,恰当调节反馈信号的延时量,MZM2 将输出 20 GHz 的倍频信号,其结果如图 8 所示。图 8(a)给出了 MZM2 输

出信号的频谱,可以看出此时信号为一个 20 GHz 的时钟信号,原时钟信号的频率和高次谐波频率均被良好抑制。图 8(b)给出了在 SPAN 为 8 MHz 条件下的频谱细节,通过图 8(c)可以读出在频偏 10 kHz 处的单

边带相位噪声为 -101.114 dBc/Hz,对应的波形如图 8(d)所示。此时,电输出(out2)为所产生光倍频信号的分频信号。

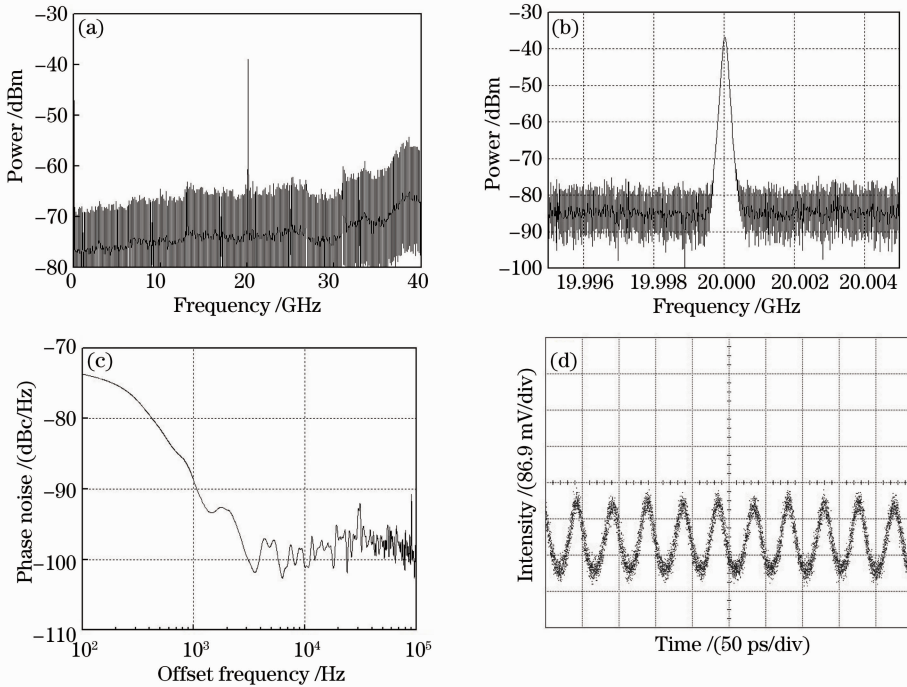


图 8 20 GHz 倍频时钟信号。(a) SPAN 为 40 GHz 的电谱图; (b) SPAN 为 8 MHz 的电谱图; (c) 相位噪声图; (d) 波形图

Fig. 8 20 GHz frequency multiplication optical clock signal. (a) Electrical spectrum of with SPAN of 40 GHz;

(b) electrical spectrum with SPAN of 8 MHz; (c) phase noise; (d) waveform

由于条件限制,实验中只演示了 10 GHz 光时钟信号的分/倍频操作,但是从原理上看,所提方案在工作带宽上具有极大的提升潜力。系统可操作带宽受限于有源器件 PD、电光调制器和电驱动放大器。在现有器件的条件下,工作带宽达到 40 GHz 的 PD、调制器和驱动放大已没有困难。通过已有文献可知,如采用单向载流子传输光电探测器(UTC-PD),可实现大于 100 GHz 带宽的光电转换并具有 10 dBm 以上的电功率输出^[11]。而在电光调制方面,行波电吸收调制器(TWEAM)的工作带宽可达 100 GHz 且所需电压小于 2 V^[12],因此两者的结合可以在系统中省略电驱动放大环节,有望提升整个系统工作频率。

4 结 论

提出了一种光电混合的光时钟分频/倍频器,它可以通过对光时钟信号的不同反馈顺序完成信号的分频/倍频操作。通过对系统的时域和频域分析,分别讨论了分频和倍频的工作原理,并从实验上对一

路 10 GHz 的光时钟信号进行了实验验证,获得了良好的效果。所提方案的优点在于它同时具备光、电信号输出,可以很方便地配合后续的光、电信号处理系统,并且该方案结构简单,工作稳定,对波长透明,无需额外的滤波环节。通过对系统中的器件升级,理论上可在更高速率条件下工作,具有很好的实用性。

参 考 文 献

- 1 Weiwei Zhang, Junqiang Sun, Jian Wang *et al.*. Optical clock division based on dual-wavelength mode-locked semiconductor fiber ring laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 231~236
- 2 K. K. Chow, C. Shu, Y. M. Yang *et al.*. Optical control of period doubling in a gain-switched Fabry-Perot laser diode and its application in all optical clock division [J]. *IEEE Proceedings of Optoelectronics*, 2003, **150**(3): 239~245
- 3 R. J. Manning, A. J. Pousite, K. J. Blow. All-optical clock division using a semiconductor optical amplifier loop mirror with feedback [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(16): 1504~1506
- 4 R. J. Manning, I. D. Phillips, A. D. Ellis *et al.*. All-optical clock division at 40 GHz using semiconductor optical amplifier based nonlinear interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(10): 827~829
- 5 H. J. Lee, K. H. Geun. Polarization-independent all-optical

- clock division using a semiconductor optical amplifier/grating filter switch [C]. Optical Fiber Communication Conference, 1999, **8**(1): 95~97
- 6 L. Xu, Minyu Yao, B. C. Wang *et al.*. All-optical clock division with mode-locked figure-eight laser based on the slow carrier recovery rate in semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 402~404
- 7 Caiyun Lou, Li Huo, Guoqing Chang *et al.*. Experimental study of clock division using the optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1178~1180
- 8 Wang Yong, Li Ming'an, Zhao Qiang *et al.*. Vector signal modulation technique based on a novel frequency quadrupling scheme in millimeter-wave band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0906001
王 勇, 李明安, 赵 强 等. 新型四倍频光生毫米波矢量信号调制技术 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0906001
- 9 Li Hengwen, Jiang Yang, Xu Jing *et al.*. Optical millimeter-wave sub-carrier generation based on optical parametric loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1006005
李恒文, 江 阳, 徐 静 等. 基于光纤参量环形镜的光毫米波副载波产生 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1006005
- 10 Feng Zhenhua, Fu Songnian, Tang Ming *et al.*. Investigation on agile bias control technique for arbitrary-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1206002
冯振华, 付松年, 唐 明 等. LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器任意偏置工作点锁定技术的研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1206002
- 11 Akihiko Hirata, Toshihiko Kosugi, Hiroyuki Takahashi *et al.*. 120-GHz-band wireless link technologies for outdoor 10-Gbit/s data transmission [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2012, **60**(3): 881~895
- 12 Marek Chaciński, Urban Westergren, Lars Thylén *et al.*. ETDM transmitter module for 100 Gb/s ethernet [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(2): 70~72

栏目编辑：王晓琰