

文章编号: 0253-2239(2007)08-1397-4

# 自启动的非归零/归零码和光电时钟信号发生器及码型转换\*

江 阳 于晋龙 胡 浩 王文睿 杨恩泽

(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:** 采用双波长注入一包含伪随机码发生器与相位调制器的光电振荡器可以同时得到非归零(NRZ)码, 归零(RZ)码以及光、电时钟信号输出。该方案使用了光域耦合的双环路结构, 在不增加有源器件的条件下实现边模抑制。相位调制器用于反馈调制并同时实现占空比可调的非归零码到归零码的转换。双波长的注入排除了编码信号在振荡器中引入的非时钟频率成分。实验给出了 10 Gb/s 工作速率下的结果, 得到了抖动为 637 fs 的光信号输出。转换得到的归零码信号占空比约为 33%。输出电时钟信号的相位噪声在频偏 10 kHz 处为 -109 dBc/Hz, 边模抑制比为 58 dB。

**关键词:** 光纤通信; 光电振荡器; 相位调制; 码型转换; 非归零码; 归零码

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

## Self-Starting Nonreturn-to-Zero/Return-to-Zero Signal, Optical, Electrical Clock Signal Generator and Data Format Conversion

Jiang Yang Yu Jinlong Hu Hao Wang Wenrui Yang Enze

(Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Utilizing two-light-sources-injection optoelectronic oscillator, including generator and phase modulator, nonreturn-to-zero (NRZ), return-to-zero (RZ) signal and optical, electrical clock signal are generated simultaneously. In this configuration, a coupled dual-loop is formed in optical domain for suppressing the side modes in each loop without adding any active device. The phase modulator is employed to perform feedback modulation and data format conversion between NRZ and RZ with tunable duty ratio. Two lights work together for eliminating the unexpected frequency components introduced by optical coding signal. The experimental results at 10 Gb/s rate are demonstrated. The timing jitter of optical signal outputs is 637 fs and the duty ratio of converted RZ data is 33%. The electrical clock signal has high-quality spectrum at 10 GHz with a side mode suppression ratio of 58 dB, and a phase noise of -109 dBc/Hz at 10 kHz away from carrier.

**Key words:** fiber communication; optoelectronic oscillator; phase modulation; data format conversion; nonreturn-to-zero; return-to-zero

### 1 引 言

近年来,许多研究者就高光电振荡器(OEO)的性能和拓展它的应用进行了大量的工作,但是仍有不足之处<sup>[1~9]</sup>。

首先,从光信号源的角度看:在现有的光电振荡

器多环路结构中每一个环路都需要独立的光电探测器和放大器等有源器件,这会带来电噪声并提高成本,降低实用性;传统的利用增益开关半导体激光器虽然可以比较方便的得到脉冲输出,但是往往有较大的啁啾和抖动;而采用电吸收调制器(EAM),其

\* 国家 973 计划(2003CB314900)和国家自然科学基金(60572013)资助课题。

作者简介:江 阳(1975—),男,贵州贵阳人,博士研究生,主要从事高速光纤通信以及光微波方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com

导师简介:于晋龙(1969—),男,山西长治人,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统以及全光信息处理方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

收稿日期:2006-10-30;收到修改稿日期:2007-01-05

输出信号含有较大的啁啾且消光比差,所得到的脉冲宽度也较大,不易调节。第二,对于时钟提取或码型转换的应用而言:利用光电振荡器提取时钟时,注入的光编码信号中包含了很多频率成分,除非选用选频特性极好的电滤波器,否则这些非时钟信号的频率成分会与光电振荡器自身起振的边模一起构成输出时钟信号中的噪声,严重影响时钟信号的质量,也进而影响码型转换的效果。而采用马赫-曾德尔结构的强度调制器或电吸收调制器进行码型转换时,所转换归零码的占空比通常为 50%,且不易调节。这对于需要通过调整归零码的占空比来抑制非线性色散影响时是一个很大的缺陷。

因此,本文提出了将两个波长的光注入一个附加了伪随机码发生器和相位调制器的双环路光电振荡器,实现了非归零码、归零码、光时钟脉冲信号与电时钟的同时输出。在该系统中,利用偏振分束器(PBS)和偏振合束器(PBC)在光域中形成双光学环路结构,不需要在普通单环路光电振荡器的基础上

增加有源器件,避免由此带来的电噪声,同时获得双环路结构对边模有效抑制的效果<sup>[10]</sup>;该方法可以简单地通过调节相位调制器上的调制信号功率或色散介质的色散量改变光时钟脉冲信号和所转换归零码的占空比<sup>[11]</sup>;双波长的注入使得振荡信号与编码信号由不同波长的光分别完成,避免了由于光编码信号直接进入反馈环路而形成的对振荡信号的干扰。

## 2 原理分析

如图 1 所示,波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两路光经耦合器合为一路后注入相位调制器,经过一段色散补偿光纤(DCF)后再由波分解复用器按波长分开。此后  $\lambda_1$  进入振荡环路, $\lambda_2$  携带编码信号输出。在振荡器稳定起振的条件下,假设由激光器发出角频率为  $\omega_0$ ,振幅为  $E_0$  的连续光,其电场表达式可以写为<sup>[12,13]</sup>:

$$E(t) = E_0 \exp(-j\omega_0 t), \quad (1)$$

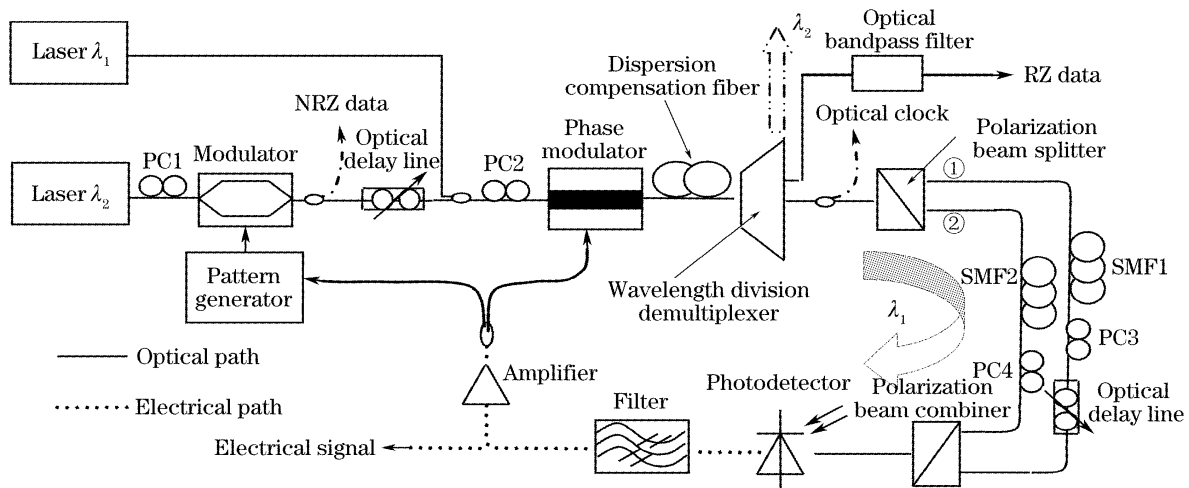


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental setup. SMF: single-mode fiber, RZ: return-to-zero, NRZ: nonreturn-to-zero,

当它被一个频率为  $f_m$  的正弦信号进行相位调制后,其输出为

$$E(t) = E_0 \exp\{-j[\omega_0 t + \Delta\theta \sin(2\pi f_m t)]\} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(\Delta\theta) \exp[-j(\omega_0 + 2\pi n f_m)t], \quad (2)$$

这里  $\Delta\theta$  为调制深度,  $J_n$  为第一类贝塞尔函数,  $n$  为整数。因此输出光波频率的变化与时间  $t$  的关系为

$$\nu(t) = \omega_0 / (2\pi) - \Delta\theta f_m \cos(2\pi f_m t), \quad (3)$$

显然,在  $f_m t = n/2 + 1/4$  ( $n$  为整数) 附近,光波的频率啁啾接近于线性变化,且有最大啁啾率:

$$(\partial\nu/\partial t)_{\max} = \pm 2\pi f_m^2 \Delta\theta, \quad (4)$$

当这个带啁啾的光通过适当的色散介质后,光场能量会产生周期性变化得到脉冲输出。在最优压窄条

件下,所得脉冲的宽度  $\tau$  可以表示为  $\tau \approx 0.7/\Delta\nu$ , 这里的  $\Delta\nu \approx 2f_m \Delta\theta$ <sup>[13]</sup>。由此可以看出,在一定的调制频率下,改变调制深度或相应的介质色散量可以改变输出脉冲的宽度。由于色散补偿光纤是线性色散介质,只能影响线性红移啁啾,而蓝移啁啾和非线性啁啾不能被色散补偿光纤压缩而会形成较大的直流分量和底座。这些不能压缩的部分可以用光带通滤波器加以抑制。类似的,当注入为非归零码信号时,只要编码信号与用于调制的时钟信号同步,就可以转换为归零码,并且在最佳色散条件下所得的占空比为  $\tau/T \approx 0.7/(2Tf_m \Delta\theta) = 0.7/(2\Delta\theta)$  ( $T$  为码元周期)。由此可见,通过控制调制深度和相应的介质色散量,转换得到的归零码的占空比具有很大的调

节空间。需要指出的是,马赫-曾德尔结构的强度调制器(MZM)虽然也可以用以实现码型转换,但是所转换得到的光归零码信号占空比为 50%。并且由于信号不带有啁啾,因此不能通过色散介质或其它方法减小占空比。而使用电吸收调制器,将会引入较大的插损且消光比较差,在其线型调制范围内,所转换得到的归零码也具有 50%的占空比。

### 3 实验结果及讨论

实验中我们使用了两个分布式反馈(DFB)激光器,输出波长分别为  $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$  和  $\lambda_2 = 1553 \text{ nm}$ 。两个调制器分别为  $\text{LiNbO}_3$  的马赫-曾德尔结构的强度调制器和  $V_\pi = 3.5 \text{ V}$  的  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器;高速的 PIN 光电探测器;中心频率为 10 GHz,带宽为 150 MHz 的射频放大器。由于放大器具有有限带宽,实验中没有使用滤波器。

#### 3.1 振荡器的光,电时钟信号输出

波长为  $\lambda_1$  的光进入振荡器环路后被偏振分束器

(PBS)分为两路。分列于两臂的偏振控制器 PC3, PC4 调节光的偏振态,克服由于单模光纤(SMF)带来的偏振变化。试验中,臂①长度约为 10 km,臂②长度约为 1.2 km。图 2(a)为输出的 10 GHz 电时钟信号的频谱图。在单环情况下强烈起振的一些边模已被有效抑制,抑制比约为 58 dB。图 2(b)给出了电信号的单边带相位噪声谱,可以看出相位噪声为在 10 kHz 处为 -109 dBc/Hz。图 2(c)所示为电时钟信号的时域波形。由于微波信号的  $Q$  值由振荡器的腔长决定,在该实验条件下, $Q$  值大于  $10^{10}$ [10]。光时钟信号的输出由图 2(d)给出。为了得到光信号的抖动  $\sigma$ ,对图 2(c)的噪声功率谱从 100 Hz~10 MHz 的范围内进行积分,并根据关系式[3]

$$\sigma = \sqrt{2 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} L(f) df} / (2\pi f_{\text{osc}}), \quad (5)$$

求出抖动为 637 fs。式中  $L(f)$  为噪声功率谱密度函数, $f_{\text{osc}}$  为起振频率。

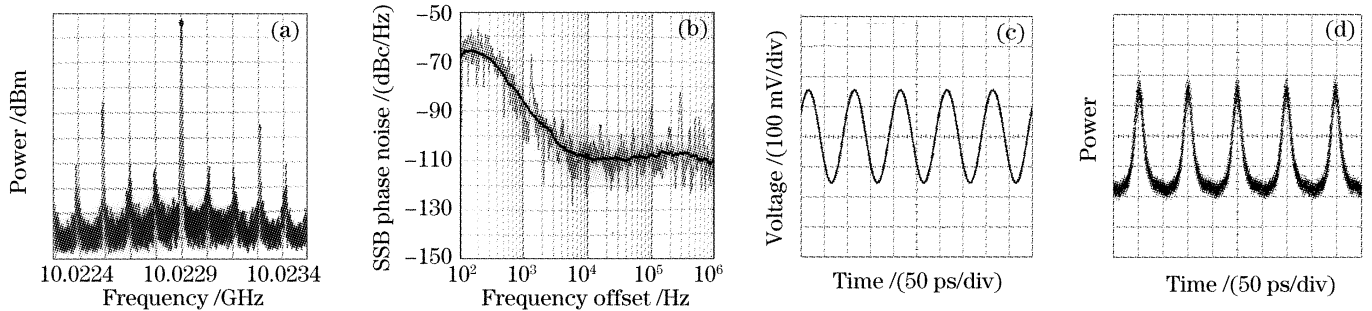


图 2 光,电时钟信号的输出。(a) 电信号频谱图。量程: 1 MHz; 分辨率带宽: 1 kHz, (b) 电信号的单边带相位噪声谱, (c) 电信号的输出波形, (d) 光时钟脉冲信号

Fig. 2 Output of optical and electrical clock signal. (a) Electrical signal spectrum, span: 1 MHz; resolution band width: 1 kHz, (b) single-sideband phase noise spectrum of the electrical signal, (c) output waveform of the electrical signal, (d) optical clock pulses

#### 3.2 非归零码与归零码的输出及码型转换

振荡器输出的电时钟信号注入伪随机码(PRBS)发生器后得到 10 Gb/s 的非归零码电信号。该信号经强度调制器调制在连续光上转变成为波长为 1553 nm 的光非归零码信号,见图 3(a)。通过调节光可变延时线,使非归零码在注入相位调制器时与调制信号同步。非归零码中的“1”码被调制后产生啁啾,被色散补偿光纤压窄后输出变为归零码。需要注意的是,如果不采取抑制措施,所得到的归零码会仍然在底部残留由蓝移啁啾和非线性啁啾所携带的非归零码的信息,如图 3(b)。实验中,使用一个带宽为 0.3 nm 的窄带光滤波器(OBPF)滤除非线性啁啾后,得到了理想的归零码输出,如图 3(c)。此

时调制信号功率为 17 dBm,相应的调制深度为  $0.45\pi$ 。按理论分析,此时最小占空比应为 17.5%。实验所测得的归零码的占空比为 33%,该结果大于理论值是由于实验中色散补偿光纤的色散量 ( $-65 \text{ ps/nm}$ ) 没有达到最佳值。理论和实验均给出,通过改变相位调制器的调制深度可以得到脉宽为 1~2 ps 的脉冲输出[14],所以,用相位调制器实现码型转换所得到的占空比有很大的调节空间,可以满足不同的通信要求。

在光电振荡器的电域里插入一可调谐窄带电滤波器,移除伪随机码发生器和强度调制器,本系统可扩展成一个可调谐光,电信号发生器。用单路或多路波分复用非归零码信号取代  $\lambda_2$  的注入即可构成

一个单路或多路波分复用非归零码时钟恢复及码型转换器。调节滤波器的中心频率并观察归零码的输出,当有理想的归零码输出时,可以认为这时电域的输出信号即是所注入光编码信号的时钟,而各波长

上的非归零码信号被同时转换为归零码信号。同样地,所转换信号的占空比可以通过改变调制深度及色散量来进行调节<sup>[6,15]</sup>。

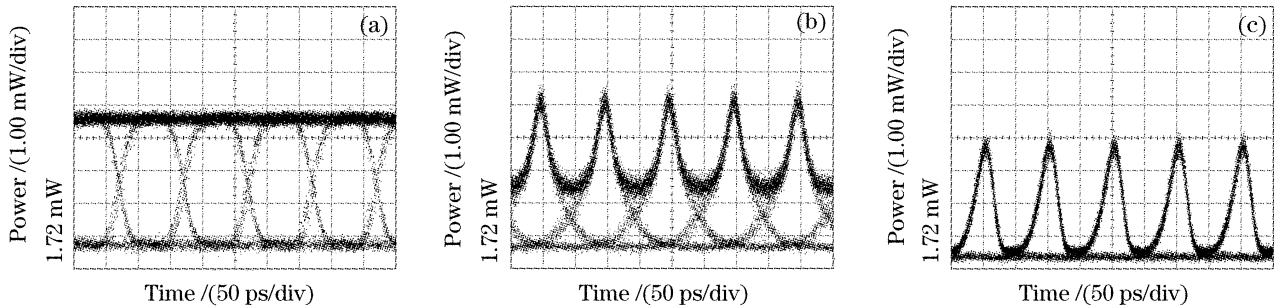


图 3 取样示波器所示非归零码以及转换得到的归零码信号。(a) 输出的非归零码信号,(b) 转换后未用光带通滤波器时的归零码信号输出,(c) 转换后使用光带通滤波器后的归零码信号输出

Fig. 3 Sampling oscilloscope trace for nonreturn-to-zero (NRZ) signal and converted return-to-zero (RZ) signal, (a) output of nonreturn-to-zero signal, (b) output of converted return-to-zero signal without passing optical bandpass filter (OBPF), (c) output of converted return-to-zero signal after passing optical bandpass filter

## 4 结 论

提出了利用双波长注入一个插入伪随机码发生器和相位调制器的光域耦合双环路光电振荡器,实现非归零码、归零码、光时钟脉冲信号与电时钟同时输出的全新结构。在理论上分析了相位调制器与色散补偿光纤链接输出光脉冲信号以及实现占空比可调的非归零到归零码信号转换的原理。此外,对该结构拓展应用到单路或多路波分复用非归零码时钟恢复及码型转换的应用进行了讨论。升级相应的有源器件,整个系统可以在 40 GHz 或更高的速率下工作。

## 参 考 文 献

- X. S. Yao, L. Maleki. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(8): 1725~1735
- X. Steve Yao, Lute Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. *J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(1): 79~84
- Jacob Lasri, Preetpaul Devgan, Renyong Tang *et al.*. Self-starting optoelectronic oscillator for generating ultra-low-jitter high-rate (10 GHz or higher) optical pulses[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1430~1435
- Preetpaul Devgan, Darwin Serkland, Gordon Keeler *et al.*. An optoelectronic oscillator using an 850-nm VCSEL for generating low jitter optical pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(5): 685~687
- Hidemi Tsuchida, Maoki Suzuki. 40-Gb/s optical clock recovery using an injection-locked optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 211~213
- Huo Li, Dong Yi, Lou Caiyun *et al.*. Clock extraction from 10 Gbit/s NRZ data and data format conversion using an optoelectronic oscillator[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(9): 1305~1307 (in Chinese)
- 霍力,董毅,娄彩云等. 利用光电振荡器实现 10 Gbit/s NRZ 码时钟的直接提取和码型转换[J]. *电子学报*, 2002, **30**(9): 1305~1307
- Zhu Likai, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Wavelength stabilization of mode-locked fiber laser via continuous-wave injection[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 149~152 (in Chinese)
- 朱利凯,于晋龙,王耀天等. 注入连续光实现锁模光纤激光器的波长稳定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 149~152
- 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 (in Chinese)
- 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
- Jacob Lasri, Preetpaul Devgan, Renyong Tang *et al.*. Ultralow timing jitter 40-Gb/s clock recovery using a self-starting optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 263~265
- Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 919~922 (in Chinese)
- 江阳,于晋龙,王耀天等. 一种新型双环光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919~922
- T. Kobayashi, H. Yao, K. Amano *et al.*. Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation [J]. *J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(2): 382~387
- Tetsuro Komukai, Takashi Yamamoto, Satoki Kawanishi. Optical pulse generator using phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1746~1748
- Y. Takita, F. Futami, M. Doi *et al.*. Highly stable ultra-short pulse generation by filtering out flat optical frequency components [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2004, **1**: 16~21
- Jacob Lasri, Preetpaul Devgan, Vladimir S. Grigoryan *et al.*. Multiwavelength NRZ-to-RZ conversion with timing-jitter suppression [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2004, **2**: 16~21