

# 基于微波光子滤波器的归零到非归零码型转换研究

徐 静<sup>1,2</sup> 江 阳<sup>2</sup> 周竹雅<sup>2</sup> 李恒文<sup>2</sup> 王顺艳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>贵州大学计算机学院通信系, 贵州 贵阳 550025  
<sup>2</sup>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** 从信号频域处理的角度分析并实验验证了一种基于微波光子滤波器的归零(RZ)码到非归零(NRZ)码的码型变换方案。理论上,通过对 RZ 和 NRZ 码基带信号的频谱特点以及微波光子滤波器的特性进行分析,构建一个低通滤波器并对 RZ 码信号进行滤波,强烈抑制 RZ 码信号中的时钟分量,最终实现 RZ 到 NRZ 码的码型转换。在实验中,采用一种两抽头加色散延时的微波光子滤波器对速率为 10 Gbit/s 的 RZ 码信号进行了处理,成功得到了转换后的 NRZ 码信号。信号波形和频谱均显示了此方案的良好性能。通过简单地调节微波光子滤波器的部分参数,可对任意速率的信号进行处理,具有很好的灵活性。

**关键词** 光纤通信;码型转换;非归零;归零;微波光子滤波器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0905008

## Return-to-Zero/Nonreturn-to-Zero Signal Data Format Conversion Based on Microwave Photonic Filter

Xu Jing<sup>1,2</sup> Jiang Yang<sup>2</sup> Zhou Zhuya<sup>2</sup> Li Hengwen<sup>2</sup> Wang Shunyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Computer Science and Information, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China  
<sup>2</sup> Guizhou Provincial Key Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** From the view of signal processing in the frequency domain, a scheme for the return-to-zero (RZ) to nonreturn-to-zero (NRZ) signal data format conversion based on a tunable microwave photonic filter is analyzed and demonstrated. Theoretically, the spectral characteristics of RZ and NRZ baseband signals and microwave photonic filter characteristics are analyzed. It is found that RZ to NRZ data format conversion can be successfully realized by a low-pass filter on the RZ signal with strong suppressing the clock component of the RZ data. In the experimental demonstration, a 10 Gbit/s NRZ signal is successfully converted from a RZ signal by utilizing an two-tap microwave photonic filter with two different light sources and intensity modulation. Both waveform and spectrum show the signal has good quality. In addition, signals with various repetition rate can be well processed by simply adjusting some parameters of the filter. It is shown that this scheme is very simple and flexible.

**Key words** optical communication; data format conversion; nonreturn to zero; return to zero; microwave photonic filter

**OCIS codes** 060.2330; 060.4370; 060.4510; 060.5625

## 1 引 言

在通信系统中,归零码(RZ)和非归零码(NRZ)是数字通信领域应用得最为广泛的两种码型。以光

通信网络为例,在速率较高的骨干网或光时分复用网络系统中,RZ 码因具有脉宽窄、平均功率低、有利于时钟信号恢复的优点而在大容量长距离的系统

收稿日期: 2012-04-25; 收到修改稿日期: 2012-05-11

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)、贵州省优秀科技教育人才省长基金[(2009)98]、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(2012022)资助课题。

作者简介: 徐 静(1986—),女,硕士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: 89323515@qq.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)

中得到广泛应用。与之不同, NRZ 码具有简单、价格便宜、频谱效率高、时间抖动容忍度大等优点, 因而适合速率较低的接入网或光波分复用系统的需求<sup>[1,2]</sup>。针对不同网络或者后续信号处理的特点, 常常需要进行码型间的相互转换。利用同频时钟的二次调制, 可以实现 NRZ 码到 RZ 码的转换, 而从 RZ 码到 NRZ 码的转换则相对困难一些。特别是考虑到多数电接口采用 NRZ 码方式, 如何方便地实现 RZ 码到 NRZ 码的转换是一项有意义的工作。

总结现有的码型转换方法, 主要有电处理技术和全光码型转换两种方式。前者是利用电子滤波技术, 主要依靠电滤波器来实现, 但实际应用中, 特别是在高速率、变码率的信号处理方面, 对电滤波器性能要求很高, 在灵活性、价格上都不具优势, 因此需要考虑借助光子技术<sup>[3]</sup>。

将待处理的 RZ 码信号调制在光载波上(或直接对于光网络中的信号), 可利用现有的全光码型转换技术完成转换功能, 例如基于半导体光放大器(SOA)和光滤波器组合<sup>[4~8]</sup>、基于光纤参量环形镜的四波混频(FWM)效应<sup>[9]</sup>、基于光纤中的交叉相位调制(XPM)<sup>[10]</sup>等。但以上这些方案大多是基于非线性器件与光滤波器组合方式, 要求信号的速率和波长与光处理器件的带宽和波长严格匹配, 在处理不同速率的信号时需要选择配套的非线性器件和光滤波器, 可调谐性差, 缺乏灵活性。

如何避免已有电子技术和全光码型转换技术的不足, 更加方便灵活地完成码型变换是一个需要解决的问题。近年来, 微波光子滤波器(MPF)的出现让信号处理的方式更具多样性。MPF 可对信号进行高速、灵活的处理并具有抗电磁干扰、体积小、质

量轻等优点, 能提供较宽的工作带宽和高速的取样频率, 且容易实现可调谐、可重构<sup>[11,12]</sup>。特别是对于已在光域上的信号, 处理起来更加简单。目前, 对 MPF 的研究大多集中在对 MPF 性能的提高上, 而对其实际应用方面少有报道。基于 MPF 的优势和特性, 本文从信号频谱操作的角度分析和验证了一种 RZ 码到 NRZ 码的转换方案, 其系统结构简单灵活, 具有可重构、大带宽、易调谐的特点, 为任意速率的 RZ 码到 NRZ 码转换提供了一种便捷的桥梁。

## 2 原理分析

RZ 码和 NRZ 码在时域和频域上都有明显的特性。比较而言, 基带 NRZ 码信号的频谱是一个连续(CW)谱, 具有较小的带宽且不含时钟分量。因此, 若采用一个合适的低通滤波器对 RZ 码信号进行滤波并强烈抑制其时钟分量, 则 RZ 码信号将转变成为一个 NRZ 码信号。

对于一个光 RZ 码信号而言, 采用 MPF 可以更方便灵活地实现这一滤波过程。MPF 是一种利用光学方法处理微波信号(RF signal)并实现滤波功能的光学子系统, 其基本工作原理结构可分为三个部分, 如图 1 所示。电光调制部分, 其功能是完成微波信号  $S_i(t)$  对光源直接调制或利用光电调制器的外部调制实现电光转换, 其中光源可以使用单个连续光源或独立光源阵列; 光学子系统部分, 如光学延迟链路、光纤光栅(FBG)、耦合器、放大器等, 主要用来处理信号的采样、加权、相加等; 光电探测部分的接收器用来接收光信号, 如光电探测器(PD), 进行光电转换输出微波信号  $S_o(t)$ , 接收器可以是单个接收器或阵列接收器<sup>[13]</sup>。

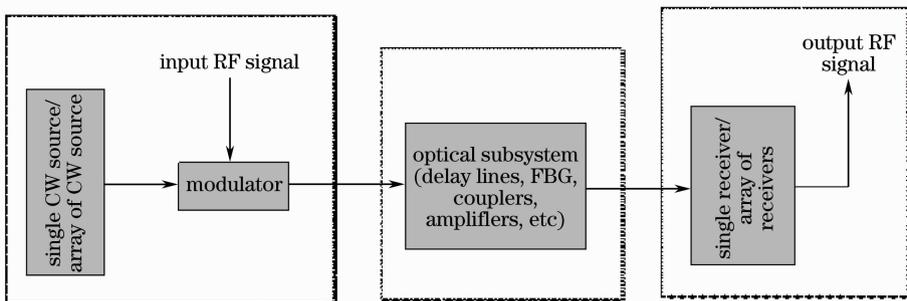


图 1 MPF 的基本结构

Fig. 1 Basic configuration of MPF

分析 RZ 码和 NRZ 码信号的频谱可知, 要实现 RZ 到 NRZ 的转换, 需实现低通滤波且对时钟分量有较强抑制。目前, 通过对 MPF 的研究, 比较成熟稳定的方案是采用多光源加强度调制配合适当的色

散延时实现低通滤波<sup>[14]</sup>。

基于独立激光器的多光源 MPF 能够提供更大的灵活性, 并且能够实现快速、独立的可调性及可重构性。基本工作原理是不同波长的光波经过耦合器

耦合后输入光电调制器,微波信号通过光电调制器调制在不同波长的光载波上,通过色散介质经历不同程度的色散延时后,不同载波频率的微波信号得到不同程度的响应,最后在输出端实现光电转换,完成滤波功能。基于独立激光器的多光源 MPF 的灵活性,可以调节每个激光器的输出功率以及相邻激

光器之间的波长差来改变系统的窗口采样函数<sup>[15,16]</sup>,从而改变系统的传输函数。

由以上分析,可设计基于 MPF 的 RZ 码到 NRZ 码的转换方案,如图 2 所示,其中虚线框内的部分为等效的滤波器结构。

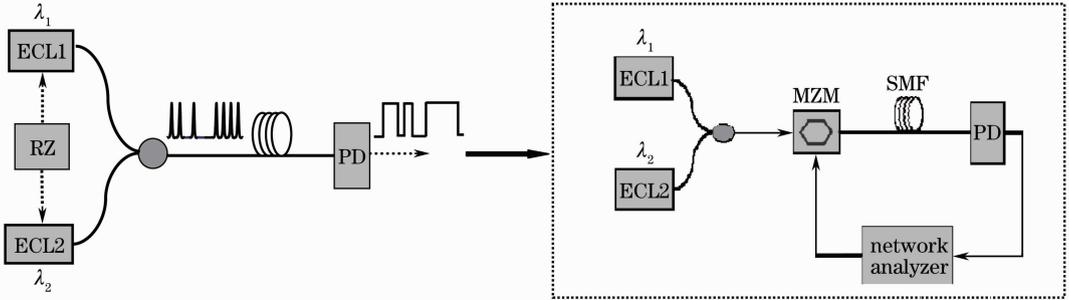


图 2 码型转换原理图及等效两抽头低通滤波器结构图

Fig. 2 Principle of signal data format conversion and configuration of two-tap and low-pass MPF

外腔可调谐激光器(ECL)输出连续光经马赫曾德尔调制器(MZM)调制后产生的两路波长为 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 的RZ码光信号耦合后馈入一段恰当长度的普通单模光纤(SMF),由于光纤的色散作用,两路信号的相位发生相应的改变,在PD上叠加后转换为NRZ码电信号输出。从系统频率响应的角度看,当光纤作为色散介质时,MPF的系统传输函数可以表示为<sup>[17]</sup>

$$H(\omega) = H_1(\omega) \cdot H_2(\omega), \quad (1)$$

式中 $H_1(\omega)$ 为光纤色散的频率响应, $H_2(\omega)$ 为典型低通滤波器的频率响应(当使用强度调制时,滤波器存在基带响应,称为正系数MPF,类似于低通滤波器),可以理解为信号处理中设计滤波器所选择的窗口函数,对 $H_1(\omega)$ 的频率响应进行加窗处理。

单模光纤的色散函数 $H_1(\omega)$ 可以表示为

$$H_1(\omega) = \cos\left(\frac{\pi DL \bar{\lambda}_n^2 \omega_{RF}^2}{c}\right), \quad (2)$$

式中 $D$ 为光纤的色散系数, $\bar{\lambda}_n$ 表示光载波的平均波

长, $\omega_{RF}$ 为微波信号的频率, $c$ 为介质中的光速, $L$ 为色散介质(光纤)的长度。

低通滤波器的频率响应可以表示为

$$H_2(\omega) = \sum_{n=1}^N P_n \exp[-j2\pi(n-1)\omega_{RF}DL\Delta\lambda], \quad (3)$$

式中 $P_n$ 为每个独立光源的功率, $N$ 为光源的个数, $\Delta\lambda$ 为相邻光源的波长差。

综上,总的系统传输函数为

$$H(\omega) = \cos\left(\frac{\pi DL \bar{\lambda}_n^2 \omega_{RF}^2}{c}\right) \sum_{n=1}^N P_n \times \exp[-j2\pi(n-1)\omega_{RF}DL\Delta\lambda], \quad (4)$$

MPF的自由频谱范围(FSR)可以表示为

$$r_{FSR} = \frac{1}{DL\Delta\lambda}. \quad (5)$$

可见,通过改变光源个数、波长差 $\Delta\lambda$ 的大小、光源间功率的相对值、光纤长度 $L$ 等参数,可得到所需要的系统传输函数。

图3给出了两抽头的系统频率响应曲线,计算

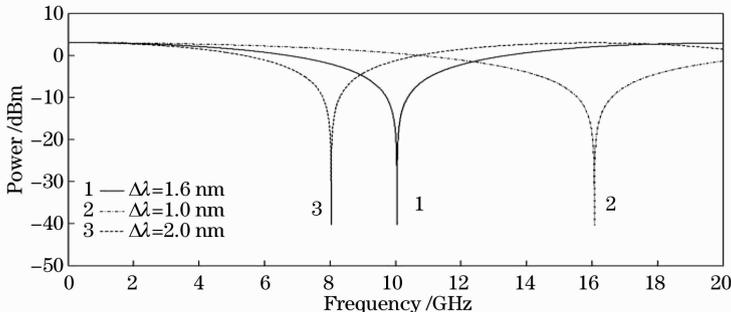


图 3 滤波器频率响应仿真曲线

Fig. 3 Simulation results of the frequency response with different wavelength intervals

中设置光源输出功率相对值  $P_1:P_2=1:1$ , 光纤长度  $L=1.83$  km, 色散系数  $D=17$  ps/(nm·km), 图 3 中三条曲线对应三种情况下光源波长差的关系为  $1.0:1.6:2.0$ 。从图 3 可以看出, 所得到的频率响应曲线可实现低通滤波, 且由于不同的  $\Delta\lambda$  值导致延时不同, 表现出不同的频率响应, 可对不同速率的信号进行处理。当  $\Delta\lambda=1.0$  nm 时, 第一个带陷位于 16 GHz 处; 当  $\Delta\lambda=1.6$  nm 时, 第一个带陷位于

10 GHz 处; 当  $\Delta\lambda=2.0$  nm 时, 第一个带陷位于 8 GHz 处, 其抑制比皆为 45 dB。

基于原理分析给出了码型转换方案的系统仿真结果, 如图 4 所示。由图 4 可看出, 经所设计的 MPF 滤波, RZ 码信号的时钟分量得到强烈抑制, 在时域上转换成为一个理想的 NRZ 码信号, 并且保留完整的信息。

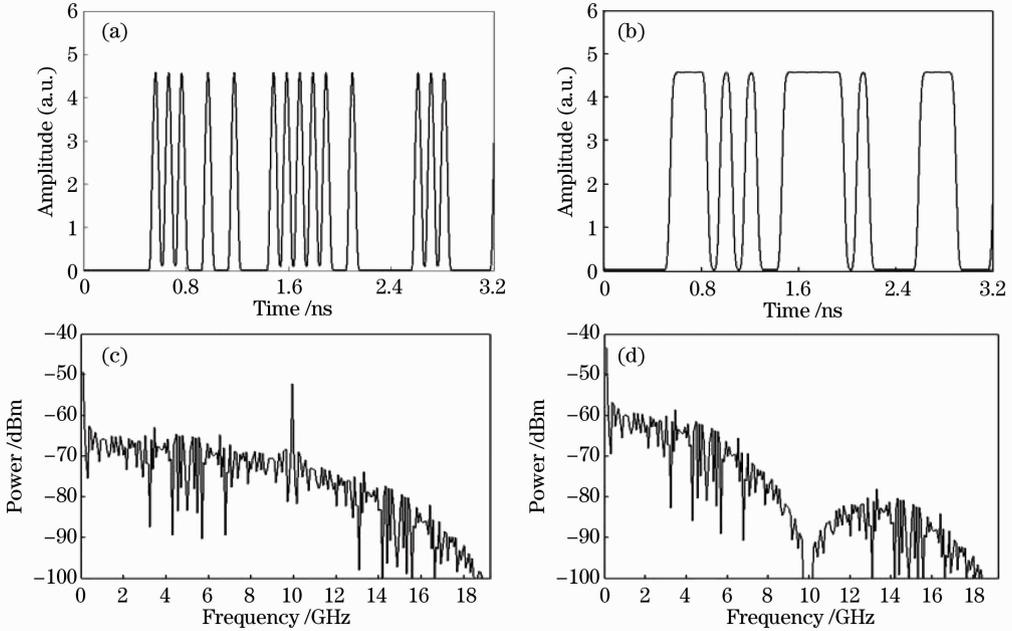


图 4 (a) 10 Gbit/s RZ 码信号波形; (b) 转换后的 NRZ 码信号波形; (c) RZ 码信号频谱; (d) 转换后的 NRZ 码信号频谱  
Fig. 4 (a) 10 Gbit/s RZ signal waveform; (b) converted 10 Gbit/s NRZ signal waveform; (c) RZ signal spectrum; (d) converted NRZ signal spectrum

### 3 实验结果和讨论

为了进一步验证理论分析的结果, 进行了实验演示。首先对拟采用的滤波系统进行了频率响应测试, 图 5 为采用矢量网络分析仪所得到的测试结果。测试中, 两路连续光的输出光功率相对值  $P_1:P_2=1:1$ ,  $\lambda_1$  为 1550.0 nm,  $\lambda_2$  为 1551.6 nm, 普通单模光纤的长度  $L$  为 1.83 km, 色散系数  $D$  为 17 ps/(nm·km), PD 为 12 GHz 带宽的 PIN 光电二极管。由图 5 可以看出, 系统的传输函数可实现低通滤波, 第一个带陷位于 10 GHz, 滤波器的抑制比约为 45 dB, 与理论结果一致。

根据上面的系统频率响应分析和测试, 设计了如图 6 所示的 RZ/NRZ 转换实验系统。两个独立的光源 ECL1、ECL2 输出波长为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  的连续光, 两路光经耦合器合成一路后在第一个 MZM 中被编码信号发生器 (PPG) 所产生的 10 Gbit/s 的信号调制, 得到

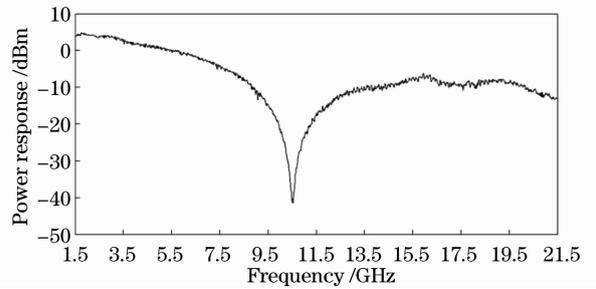


图 5 系统频率响应  
Fig. 5 Measured frequency response of the low-pass filter

光 NRZ 码信号, 然后再利用 PPG 输出的同频时钟对 NRZ 码信号进行二次调制, 产生 RZ 码信号。图中的偏振控制器 (PC) 用于控制光场的偏振态以获得最佳调制效果, 可调光延时线 (VDL) 用于调节两次调制间的时间延迟量。所产生的两路 RZ 码光信号馈入长度为 1.83 km [ $D=17$  ps/(nm·km)] 的单

模光纤中传输,在终端被 PIN 光电二极管接收。选取  $\lambda_1$  为 1550.0 nm,  $\lambda_2$  为 1551.6 nm 时,可输出稳定的 NRZ 电信号。

图 7(a)~(d) 分别给出了转换前两路 RZ 信号的波形图和眼图,图 7(e)、(f) 为其耦合后的光谱图

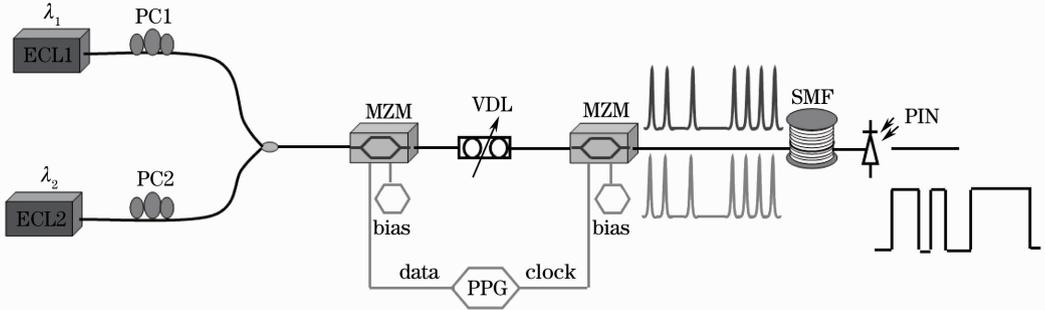


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental setup for RZ-to-NRZ conversion

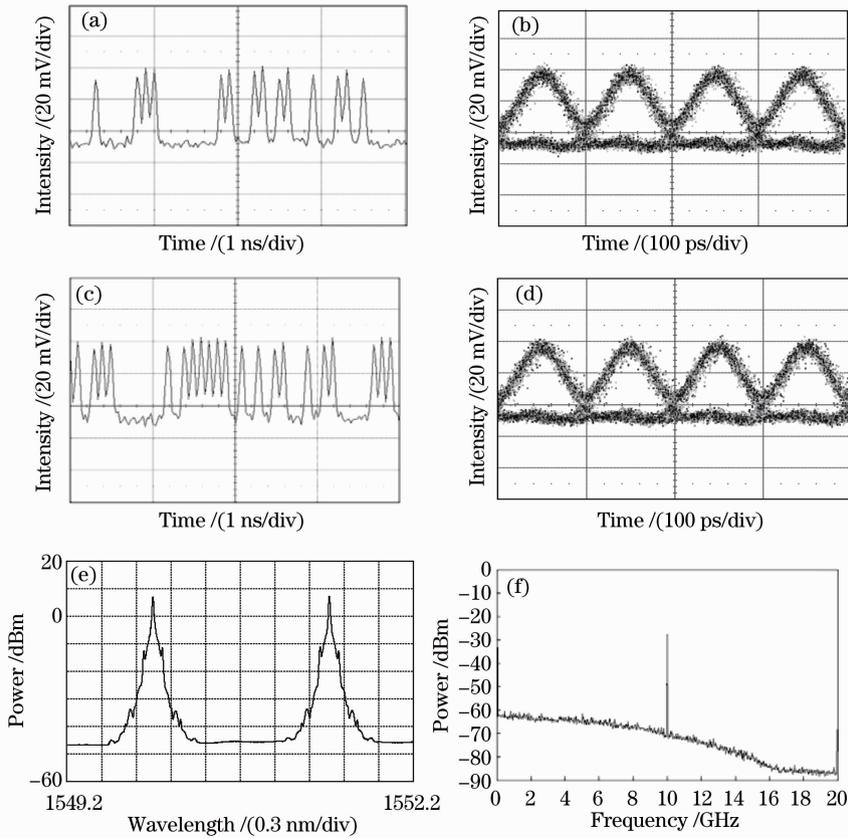


图 7 (a), (b) RZ 码信号的波形和眼图,波长为 1550.0 nm; (c), (d) RZ 码信号的波形和眼图,波长为 1551.6 nm; (e) 两路信号耦合时的光谱图; (f) 其中一路信号的电谱图

Fig. 7 (a), (b) Waveform and eye diagram of RZ signal at wavelength of 1550 nm; (c), (d) waveform and eye diagram of RZ signal at wavelength of 1551.6 nm; (e) optical spectrum of two signals; (f) electrical spectrum of one signal

经过系统的传输,调制产生的两路 RZ 码信号受到系统传输函数的影响,经 PD 检测后,完成了滤波过程。图 8(a)、(b) 为经光电探测后输出的 NRZ 码信号的波形和眼图,其电谱如图 8(c) 中实线所

和任一路的电谱图。从光谱上可以看到,输出的两路光载波通过两级强度调制,产生了携带信号的边带,边带上可看到对称的时钟谱量。在电谱图中可看到 10 GHz 频率处有明显的时钟分量。

示。通过转换后的信号波形可看出,原本的 RZ 码信号已经转换成了理想的 NRZ 码信号输出。通过转换前后的电谱比较也可看到 RZ 码信号的频谱受到了一个明显的滤波的作用,其信号中的时钟分量

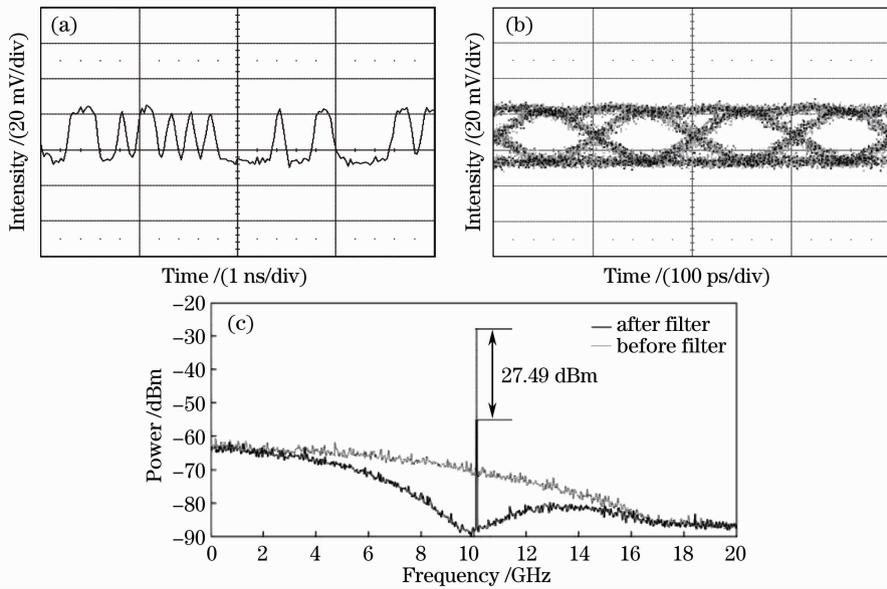


图 8 (a), (b)转换后的 NRZ 码信号波形和眼图; (c)转换后的 NRZ 码信号频谱与原 RZ 码信号频谱比较  
Fig. 8 (a), (b) Waveform and eye diagram of converted NRZ signal; (c) spectrum comparison of the converted NRZ signal and the original RZ signal

得到 27.49 dB 的抑制。

虽然实验只给出了速率为 10 Gbit/s 的信号码型转换结果,但通过前面的分析可以知道,改变两抽头间的相对延时,能调节带陷频率的位置,因此在调制器和 PD 带宽范围内,可方便地实现不同速率信号的码型转换,具有极大的带宽和良好的可调谐性。在具体实现手段上可以通过改变实验中两路光源的波长差或光纤长度(如利用一个开关色散矩阵选择光信号所经历的色散大小),来完成调谐功能。

在上述的实验演示中,为了方便采用直接调制的方法获得两个抽头,在实际光系统应用中可把线路中远端传输过来的 RZ 码光信号通过波长变换技术复制到所需要的另一光波长上,共同构成滤波器的两个抽头,以替代实验中对应的电光调制部分,然后只需通过恰当的色散延迟和光电探测即可完成所需要的码型转换。另外也可以不增加新的光源,采用对信号分路延时叠加的方法完成以上功能。所提方案只需两个抽头,采用偏振正交分/合路的方法能有效避免光源干涉带来的影响<sup>[18]</sup>。

由于 MPF 处理得到的信号已经是一个电信号,因此可以方便地进行后续的电域处理,若希望进入下一级光网络传输,则可以通过简单的调制产生相应的光信号。比较而言,采用 MPF 技术可以克服传统电子技术中电滤波器处理高速率信号的瓶颈问题;相对于全光码型转换方案,也避免了要求信号的速率和波长与光处理器件的带宽和波长严格匹配

的限制,更具灵活性和实用性。

## 4 结 论

从信号频域处理的角度分析并演示了一种基于两抽头 MPF 实现 RZ 码到 NRZ 码转换方案,获得了良好的效果。该方案可通过改变激光器的输出波长差或色散介质的长度实现可控的信号相位延时,产生不同需求的滤波器传输函数,因而可处理不同速率的信号,不仅克服了电子技术中电滤波器处理高速率信号的瓶颈问题,相对于全光码型转换方案,也更具灵活性。由于 MPF 具有可重构、可调谐的优点,在未来高速率、大容量通信网络或光、电混合网络中具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Weiqiang, Zhang Jianguo, Yao Baoli *et al.*. A novel scheme of all optical RZ to NRZ format converter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1837~1841  
王伟强, 张建国, 姚保丽 等. 一种全光归零码到非归零码变换的新技术方案 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1837~1841
- 2 Hui Zhanqiang, Zhang Jianguo. Recent progress in all-optical NRZ-to-RZ format conversion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060003  
惠战强, 张建国. 全光非归零(NRZ)到归零(RZ)码型转换技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(6): 060003
- 3 R. A. Minasian. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Trans. Micro. Theory Technol.*, 2006, **54**(2): 832~846
- 4 L. Xu, B. C. Wang, V. Baby *et al.*. All optical data format conversion between RZ and NRZ based on a Mach-Zehnder interferometric wavelength converter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 308~310

- 5 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Ding Yuan *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 940~944  
董建绩, 张新亮, 丁 园等. 利用半导体光放大器和滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 940~944
- 6 C. G. Lee, Y. J. Kim, C. S. Park *et al.*. Experimental demonstration of 10-Gb/s data format conversions between NRZ and RZ using SOA-loop-mirror[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 834~841
- 7 Wang Faqiang, Zhao Yu, Zhu Zhuqing. Theoretical study of extinction ration of wavelength converted optical signals based on SOA-XGM[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1495~1499  
王发强, 赵 宇, 朱竹青. 基于半导体光放大器-交叉增益调制波长转换器消光比特特性的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(12): 1495~1499
- 8 S. H. Lee, K. Chow, C. Shu. Spectral filtering from a cross-phase modulated signal for RZ to NRZ format and wavelength conversion[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5): 1710~1715
- 9 Liang Wang, Yongheng Dai, G. K. P. Lei *et al.*. All-optical RZ-to-NRZ and NRZ-to-PRZ format conversions based on delay-asymmetric nonlinear loop mirror[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(6): 368~370
- 10 Meng Xiaojun, Yan Lianshan, Pan Wei *et al.*. All-optical RZ to NRZ format conversion based on fiber cross-phase modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406005  
孟小俊, 闫连山, 潘 炜等. 基于光纤交叉相位调制的归零到非归零码转换[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0406005
- 11 J. Campany, D. Novak. Microwave photonics combines two words[J]. *Nat. Photon.*, 2007, **1**(6): 319~330
- 12 Xu Enming, Zhang Xinliang, Zhou Lina *et al.*. All-optical SOA-based microwave filter with passband and stopband interchanged [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2534~2539  
徐恩明, 张新亮, 周俐娜等. 基于半导体光放大器的通带与阻带相互切换的全光微波滤波器[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2534~2539
- 13 J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor *et al.*. Discrete-time optical processing of microwave signals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 702~723
- 14 J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor. A tutorial on microwave photonic filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 201~229
- 15 D. Pastor, J. Capmany, B. Ortega. Broad-band tunable microwave transversal notch filter based on tunable uniform fiber Bragg gratings as slicing filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 726~728
- 16 Yang Xiufeng, Peng Lei, Tong Zhengrong *et al.*. Design of tunable bandpass photonic microwave filter based on multi-wavelength fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0206004  
杨秀峰, 彭 磊, 童峥嵘等. 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0206004
- 17 Fei Zeng, Jianping Yao. Investigation of phase-modulator-based all-optical bandpass microwave filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1721~1728
- 18 Yang Jiang, Jinlong Yu, Yaotian Wang *et al.*. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(11): 807~809