

文章编号: 0258-7025(2009)11-2962-04

基于光纤光参量放大的多通道全光 非归零/归零码转换器

韩丙辰^{1,2} 于晋龙¹ 罗俊¹ 王文睿¹ 王菊¹ 吴波¹ 郭精忠¹ 杨恩泽¹

(¹ 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; ² 山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

摘要 提出了一种基于光纤光参量放大器(FOPA)的多通道全光非归零码(NRZ)/归零码(RZ)调制格式转换的方案。该方案中,非归零码信号与同步的时钟抽运光共同注入到高非线性光纤(HNLF)中,由高非线性光纤构成的参量放大器把非归零码信号转换为归零码信号,同时不改变信号光的波长。多通道的码型转换器以两路10 Gb/s的非归零码进行了实验论证。转换后的归零码信号的信噪比(SNR)高于7.6 dB,其脉冲宽度约为30 ps,并且具有3 dB的消光比(ER)提高。根据多通道码型转换器的实现原理,该码型转换器可以应用于40 Gb/s或更高比特率的多通道码型变换操作。

关键词 光通信; 格式转换器; 光纤光参量放大器; 高非线性光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2962

Multi-Channel All-Optical Non-Return-to-Zero to Return-to-Zero Format Converter Based on Fiber Optical Parametric Amplifier

Han Bingchen^{1,2} Yu Jinlong¹ Luo Jun¹ Wang Wenrui¹ Wang Ju¹

Wu Bo¹ Guo Jingzhong¹ Yang Enze¹

(¹ School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract A multi-channel all-optical modulation format converter from non-return-to-zero (NRZ) to return-to-zero (RZ) is reported based on the fiber optical parametric amplifier (FOPA). In this scheme, the NRZ data together with a synchronized pump clock are injected into the highly non-linear fiber (HNLF). The FOPA consisting of HNLF converts the NRZ signal to RZ signal, and the wavelength of the signal is preserved. The multi-channel operation at 10 Gb/s is demonstrated experimentally. The signal to noise ratio (SNR) of the converted RZ signals is no less than 7.6 dB with 3 dB enhancement of extinction ratio (ER). The pulse-width of the obtained RZ signal is around 30 ps. According to the operating principle of the multi-channel code converter, the converter is considered to be proper for the multi-channel operation at 40 Gb/s or even higher bit-rates.

Key words optical communication; format converter; fiber optical parametric amplifier; highly non-linear fiber

1 引 言

近年来,随着数据交换业务的持续增长,宽带通信解决方案必须满足光网络空前的发展需求。针对不同的通信应用,提出了多种通信技术和系统。而

光纤通信系统广泛采用光波分复用(WDM)和光时分复用(OTDM)技术来实现超高速和超大容量的数据通信。其中归零码(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,在速率

收稿日期: 2009-03-20; 收到修改稿日期: 2009-04-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035)、国家 863 计划(2007AA01Z272)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0248)和山西大同大学青年项目(2008Q10)资助课题。

作者简介: 韩丙辰(1976—),男,博士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: han_bchen@126.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。
E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

相对较低的 WDM 网络中,普遍采用的是 NRZ 的调制格式。因为与 RZ 相比,NRZ 具有谱宽窄,对时间抖动容忍度大等优点。相比之下,OTDM 系统则需要采用 RZ 的调制格式,以便在时域上插入不同的信号。与 NRZ 相比,RZ 的平均光功率低,对光纤非线性、偏振模色散(PMD)的容忍度高,而且有利于时钟恢复。因此 NRZ 和 RZ 之间的码型转换将成为未来光网络的一个重要的接口技术^[1~7]。

目前已有多种实现 NRZ 到 RZ 的转换方案,诸如半导体光放大器(SOA)和光滤波器组合^[1,2],基于 SOA 的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构^[3],基于 SOA 的光环形镜结构^[4],使用注入锁定半导体激光器^[5],基于周期极化反转铌酸锂(PPLN)光波导^[6],基于太赫兹光非对称解复用器(TOAD)^[7],基于光电振荡器等^[8],以上这些方案均是基于单通道的码型变换,且使用 SOA 作为非线性处理单元,因载流子响应速度的限制,很难实现高速率的码型转换。随着 WDM 网络的快速发展,多通道的全光调制格式的转换成为新的需求。本文提出了一种基于光纤光参量放大器(FOPA)的多通道 NRZ 到 RZ 的转换方案。而光纤光参量放大器由于具有高增益、大带宽、响应速度快等特征而受到广泛关注,且已成功地应用到全光解复用、全光再生、全光取样等高速光信号处理方面^[9,10]。本文中的多通道码型转换器正是基于光纤光参量放大器的上述优点而提出的,不仅能够同时进行多路通道的码型转换,且结构简单,只需调整信号光与时钟抽运光保持同步及偏振态保持一致即可。由于主要利用光纤光参量放大器的窗口开关特性,不需要特别高的增益,因此时钟抽运光的功率不必很高,这样更容易构成和实现本方案中 NRZ 到 RZ 的码型转换器。

2 工作原理

参量放大是光纤中一种非常重要的非线性现象,可以简单理解为光纤中的四波混频(FWM)效应的简并状态^[11]。四波混频通常涉及 4 个光波之间的相互

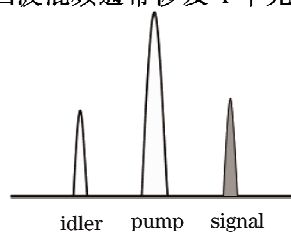


图 1 光纤光参量放大原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the FOPA

作用,而参量放大可认为两个光波完全相同并作为大功率的抽运光,这里设它的频率为 ω_p 。如图 1 所示,当一个很弱的信号光(频率为 ω_s)与此抽运光一起在光纤中同向传输时,两个光场会由于差拍的作用产生一个频率为 $\omega_p - \omega_s$ 的强度变化包络。这种强度变化会激发光纤中的克尔效应,使光纤中的折射率出现周期性的变化,而折射率的变化会造成相位调制的效果,产生一对调制边带,其频率为

$$\begin{cases} \omega_s = \omega_p - (\omega_p - \omega_s) \\ \omega_i = \omega_p + (\omega_p - \omega_s) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 ω_i 为闲频光的频率。由此,光能量就从抽运光场转移到了信号光场,使信号得到放大。若抽运光为时钟脉冲,在放大信号光同时会对信号产生调制作用。

基于光纤光参量放大的多通道 NRZ/RZ 的转换原理如图 2(a)所示,多通道 NRZ 信号和时钟抽运光同时注入到光纤光参量放大器中,在光纤光参量放大器中实现多通道 NRZ 到 RZ 的转换,然后通过光带通滤波器可以得到每一个通道转换后的 RZ 信号。在参量放大过程中,参量增益 G_s 由正弦调制的抽运光导致

$$G_s \approx 1/4 \exp\{2\gamma L [P_0 + P_0 \sin(2\pi f t)]\}, \quad (2)$$

其中 P_0 为抽运光的平均功率, f 为正弦时钟调制抽运光的频率, γ 和 L 分别为高非线性光纤(HNLF)的非线性系数和长度。光纤光参量放大的参量增益的仿真结果如图 2(b)所示,假设 $P_0 = 1.0 \text{ W}$, $f = 10 \text{ GHz}$, $\gamma = 11 \text{ / (W} \cdot \text{km)}$, $L = 500 \text{ m}$ 。由图 2(b)可发现,光纤光参量放大器可作为具有窄开关窗口特性的光开关。

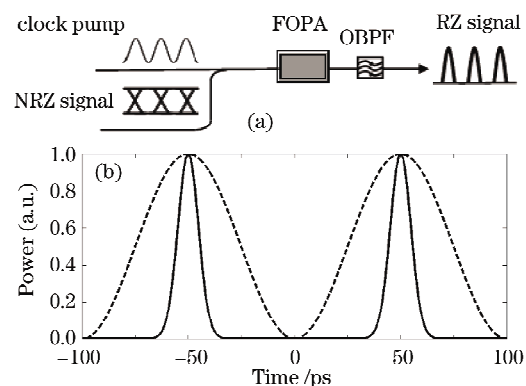


图 2 (a)多通道码型转换器原理图;(b)参量放大器的参量增益仿真图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the format converter based on FOPA; (b) simulated gain characteristics of the FOPA

3 实验及结果分析

基于图 2 的多通道码型转换原理和仿真结果,对双通道 10 Gb/s NRZ/RZ 转换进行了实验验证。实验装置如图 3 所示,两个分布反馈式激光器 LD-1 和 LD-2 经 10 Gb/s 伪随机二进制序列调制成 NRZ 数据,从而作为两个输入信号通道。两个信号通道的波长分别为 1551.7 nm(通道 1)和 1553.3 nm(通道 2),并且通过光可调延时线与时钟抽运光进行同步。为了提高转换效率,双通道信号的偏振态应与时钟抽运光的偏振态保持平行,可通过调整偏振控制器来实现。激光器 LD-3 作为光纤光参量放大器的抽运光源,为了抑制受激布里渊散射(SBS)效应,针对 LD-3 产生的连续光,使用 700 MHz 的电时钟进行相位调制从而提高 SBS 的阈值,随后通过 10 GHz 射频正弦信号进行幅度调制从而产生时钟抽运光。为了达到最佳转换性能,时钟抽运光经大功率掺铒光纤放大器(EDFA)放大至 27 dBm,而光带通滤波器 OBPF-1 和 OBPF-2 的使用均是为滤除自发辐射噪声(ASE)。双通道的 NRZ 信号和高功率的时钟抽运光经 5:95 的光耦合器后进入一段 500 m 长的色散平坦的 HNLF。HNLF 的非线性系数 $\gamma=11 /(\text{W}\cdot\text{km})$,零色散波长为 1545 nm,色散斜率 $0.03 \text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$,光纤损耗 $0.5 \text{ dB}/\text{km}$ 。

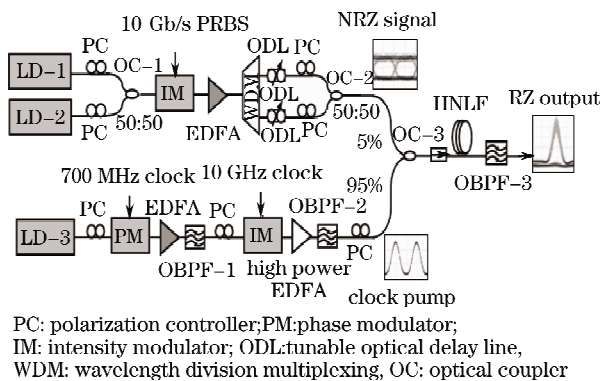


图 3 双通道非归零码/归零码转换器实验系统图

Fig. 3 Experiment setup of the dual-channel NRZ to RZ conversion

图 4 所示为进入 HNLF 的时钟抽运光和双通道 NRZ 信号的光谱图,并分别给出了时钟抽运光的波形和双通道 NRZ 信号的眼图。经取样示波器 Agilent-86100A 测量可知:通道 1 和通道 2 的信噪比(SNR)分别为 9.09 dB 和 9.03 dB,并且双通道的消光比均约为 8 dB。

在 HNLF 中的参量过程中,实现了 NRZ 到 RZ 的转换。一个带宽 0.25 nm 的可调光滤波器接在

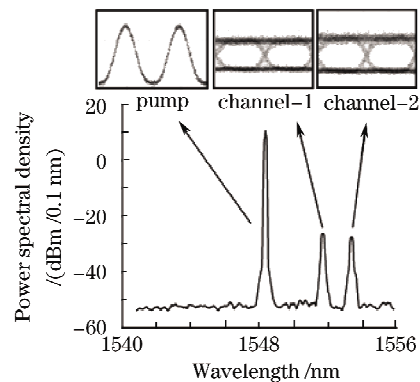


图 4 光纤光参量放大器的输入光谱图

Fig. 4 Input optical spectrum of FOPA

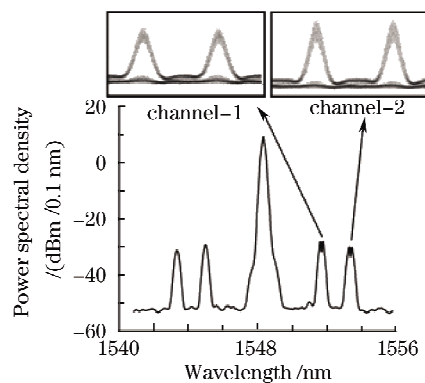


图 5 光纤光参量放大器的输出光谱图

Fig. 5 Output optical spectrum of FOPA

HNLF 的输出端,用于滤出每一通道的信号。每个通道输出的 RZ 信号经 50 GHz 等效取样示波器和光谱分析仪 Agilent-86142B 测量,结果如图 5 所示。转换后信号的信噪比分别为 8.6 dB(通道 1)和 7.6 dB(通道 2),由于参量放大过程中产生的噪声导致信噪比有轻微的恶化。两个通道的 RZ 信号消光比均为 11 dB,相比输入的 NRZ 信号有 3 dB 的消光比提高,这归功于参量放大中的参量增益。除此之外,由于光纤光参量放大器的窄窗口开关特性,输出的脉冲宽度大约为 30 ps。

4 结 论

报道了一种新型多通道 NRZ/RZ 码型变换器方案。该方案基于正弦时钟抽运光的光纤光参量放大器,多通道 NRZ 信号与同步的时钟抽运光共同注入到 HNLF 中,由于参量过程的作用,可在与 NRZ 信号同波长处得到 RZ 信号,经可调带通光滤波器后可得到每一通道的 RZ 输出。文中针对双通道以 10 Gb/s NRZ 信号进行了实验论证。实验结果表明,转换后的 RZ 信号虽有轻微的信噪比恶化,但有 3 dB 的消光比提高。本方案中,由于光纤光参量放

大器具有超快的响应速度和宽带宽等优势,且码型变换后的信号波长不会发生改变,因此有利于高速 WDM 系统的处理应用。

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, 姚保利等. 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 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
- 3 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
- 4 Yu Jianjun, Guan Kejian, Chen Shuqiang *et al.*. Realizing NRZ to RZ conversion based on non linear optical loop mirror [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(4): 317~320
余建军, 管克俭, 陈树强等. 利用非线性光学环路镜实现非归零码脉冲到归零码脉冲的变换[J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(4): 317~320
- 5 C. W. Chow, C. S. Wong, H. K. Tsang. All-optical modulation format conversion and multicasting using injection-locked laser diodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(11): 2386~2392
- 6 Wang Dalin, Sun Junqiang, Wang Jian. High speed data format conversion from non-return-to-zero to return-to-zero based on periodically poled lithium niobate waveguides [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 252~259
汪大林, 孙军强, 王健. 基于周期极化反转铌酸锂光波导高速非归零码到归零码的转换[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 252~259
- 7 Yan Yumei, Yin Lina, Zhou Yunfeng *et al.*. 10 Gbit/s all-optical non-return-to-zero to return-to-zero conversion based on terahertz optical asymmetric demultiplexer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1510~1514
闫玉梅, 尹丽娜, 周云峰等. 利用 TOAD 实现 10Gbit/s 全光非归零码到归零码的转换[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1510~1514
- 8 Jiang Yang, Yu Jinlong, Hu Hao *et al.*. Self-starting nonreturn-to-zero/return-to-zero signal, optical, electrical clock signal generator and data format conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1397~1400
江阳, 于晋龙, 胡浩等. 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[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1397~1400
- 9 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056
江阳, 于晋龙, 张爱旭等. 双抽运光纤光参量放大的全光多波长变换与码型转换[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1051~1056
- 10 F. Futami. Highly nonlinear fibers for ultrahigh-speed optical signal processing[C]. *OFC/NFOEC*, 2008, OMP1
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*, transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 247~259
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 247~259