

低功率抽运光纤参量振荡器的时钟提取抖动性能

罗 特 武保剑 文 峰

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 采用两次光调制技术将非归零(NRZ)码数据转换成归零(RZ)码光信号后,利用光纤参量振荡器(FOPO)结构实现了较低光功率抽运下的参量波长转换和时钟提取功能。实验表明,对于波长转换间隔为 1.6 nm 的 10 Gbit/s 时钟提取,优化的输入抽运光功率范围是 8~14 dBm;当输入信号的幅度抖动和相位抖动分别大于 2.28 mV 和 3.5 ps 时,该时钟提取系统可实现抖动抑制功能,其输入/输出抖动转移曲线斜率约为 0.29 和 0.16。

关键词 光通信;光时钟提取;光纤参量振荡器;抖动性能

中图分类号 TN253;O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0805003

Jitter Performance of Clock Signal Extracted by Fiber Optical Parametric Oscillator with Low Power Pump

Luo Te Wu Baojian Wen Feng

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract An optical return-to-zero (RZ) signal is generated from non-return-to-zero (NRZ) signal by means of two-stage optical modulation technique, and then is launched into the fiber parametric oscillator under low power pump for parametric wavelength conversion and clock extraction. Experiments show that, for 10 Gbit/s clock extraction with 1.6 nm-interval wavelength conversion, the optimized input pump power is in the range of 8~14 dBm, the jitter suppression function can be implemented for the input signal with the amplitude and phase jitters of less than 2.28 mV and 3.5 ps, and the slopes of the corresponding input/output transfer curves are about 0.29 and 0.16, respectively.

Key words optical communications; optical clock extraction; fiber optical parametric oscillator; jitter performance

OCIS codes 060.2320; 190.4410; 230.1150; 060.1155; 190.4370; 230.4320

1 引 言

随着近年来光通信技术的高速发展,未来的光通信网络将会工作于每秒太比特量级。传输光纤的非线性效应、群速度色散(GVD),以及光放大器的自发辐射噪声(ASE)等因素会造成信号的严重损伤,网络节点的级联能力和传输距离都会受到限制^[1]。全光 3R 即信号的再放大、再定时、再整形、再生等光子信息处理技术成为光通信领域的研究热点^[2,3]。全光 3R 再生技术不仅能从根本上消除色

散等不利因素的影响,而且克服了光电中继器速度受限于“电子瓶颈”的缺点,成为全光信息处理的基础技术之一。

全光时钟提取是实现全光 3R 再生的关键技术之一。可以利用光纤法布里-珀罗(FFP)滤波器来恢复时钟,但是这种方案只对固定速率的信号可行^[4];也可以利用基于半导体光放大器(SOA)的自相位调制效应实现时钟提取与波长变换^[5,6],但处理信号的带宽受到 SOA 增益恢复时间的限制^[7]。

收稿日期: 2010-12-14; 收到修改稿日期: 2011-04-08

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301703)、国家 863 计划(2009AA01Z216)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-2008)资助课题。

作者简介: 罗 特(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: luote_work@126.com

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信方面的研究。

E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S040111641S)

而基于光纤非线性的全光时钟提取方案,如非线性光纤环镜(NOLM)和光纤参量振荡器(FOPO)等,可以应用于极高速的全光时钟恢复中,如每秒太比特量级的速率范围内^[8,9]。

FOPO 具有较高的参量增益、快速的响应时间以及波长连续可调性等优势,不但能够用于全光时钟提取^[10~12],还可以实现光放大^[13~15]、信号产生^[16]、波长转换^[17,18]等。本文针对波分复用(WDM)信道来研究较宽脉冲、低光功率抽运下光纤参量振荡器的波长转换/时钟提取性能。实验表明,在 1.6 nm 波长间隔时输入/输出幅度和相位抖动转移曲线斜率分别约为 0.29 和 0.16;所需的抽运输入光功率可以降为 8 dBm,这样可省去了高功率放大器,另一方面也无需采用相位调制器来抑制受激布里渊散射(SBS),成本更低,从而增强了这种时钟提取方案的现实应用的可行性。

2 实验系统及其工作原理

基于 FOPO 提取时钟的实验系统框图如图 1 所示,它由非归零码/归零码(NRZ/RZ)转换^[19]、掺铒光纤放大器(EDFA)、FOPO 结构以及示波器接收等 4 个功能单元组成。

NRZ/RZ 转换功能采用两次调制方案实现。WDM 光发机发出 1552.5 nm 波长的连续光经 EDFA 放大和滤波器滤波后作为光载波输入到马

赫-曾德尔调制器(MZI)中。使用放大器的作用是补偿调制器的插入损耗。码型发生器(PPG)产生的 10 Gbit/s NRZ 码型信号调制光载波,所得到的光 NRZ 码信号再经过一个 10 GHz 的射频(RF)信号调制后便可得到光 RZ 数据信号。经过高功率 EDFA 放大后的 RZ 光信号作为抽运光通过复用器(MUX)注入到高非线性光纤,以实现参量放大过程。

时钟提取的关键是 FOPO 结构,它主要由高非线性光纤(HNLF)、可调滤波器、掺铒光纤放大器、衰减器、光延迟线(ODL)等组成。其中 HNLF 作为非线性介质,输入抽运与信号光在 HNLF 中进行参量放大作用,所放大的信号光的中心波长由后续可调滤波器决定。环中的 EDFA 与衰减器用于精确补偿环内损耗,同时保证在环中输入连续波时不能建立振荡,光延迟线则用于补偿温度、振动等因素引起的环长漂移。所提取的时钟信号通过 FOPO 中的分光器输出,光接收机接收后输入示波器进行测量。

基于 FOPO 的提取时钟提取原理如图 1 所示。

1)时钟提取建立过程:输入数据光作为抽运光在高非线性光纤进行参量放大过程,环形腔中存在自发辐射与抽运光进行四波混频(FWM)作用,自发辐射被放大形成一个宽谱光,由后续滤波器选择出

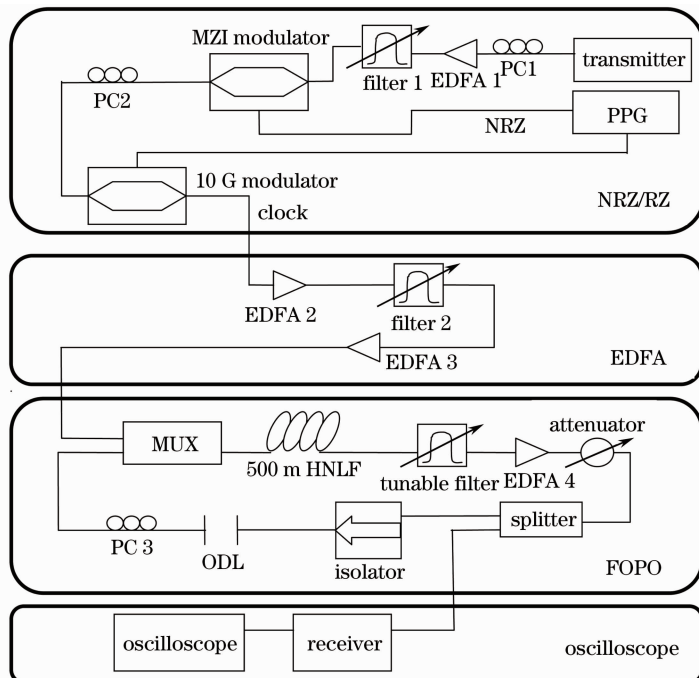


图 1 实验系统框图

Fig. 1 Schematic of the experimental system setup

所需要的波长,成为信号光,再回到耦合器中与输入的抽运光进行耦合。此时,输入抽运光与信号光在HNLF中通过FWM进行参量放大过程,信号光将会进一步增强。如此重复这一过程,直到FWM的放大增益达饱和,时钟提取得以建立。

2)时钟提取保持过程:小心调节衰减器的衰减大小,使之与EDFA的功率增益相平衡,用以补偿损耗。另一方面,只有当信号光走过环长的时间是抽运光信号比特周期的整数时,在HNLF中才能进行稳定的光脉冲参量放大过程,因此需要小心调节光延迟线。此外,抽运脉冲(输入数据)消耗引起的FWM增益饱和对恢复时钟脉冲的幅度稳定性特别重要,增益饱和允许一个弱脉冲比一个强脉冲获得更大的增益。

由于目前关于FOPO的理论分析还不完善,建立FOPO的等效模型可以用于解释FOPO环长、参量增益等参数对时钟提取效果的影响。

3 实验结果

分析时钟提取性能对注入FOPO的光功率和伪随机序列等因素的依赖性,并通过测量输入/输出抖动曲线来表明该方案的抖动抑制作用。实验中使用500 m的高非线性光纤进行参量放大,在1550 nm处光纤非线性系数为 $10/(W \cdot km)$,色散 $D=0.5 ps/(nm \cdot km)$,色散斜率 $S=0.028 ps/(nm^2 \cdot km)$,衰减为1.244 dB/km,HNLF的插入损耗为2.5 dB。

3.1 抽运光功率对时钟提取信号抖动的影响

输入的光RZ数据作为抽运信号通过波长间隔为1.6 nm的波分复用器注入到FOPO的HNLF中,光纤环中也采用波分复用器来滤波,从而考察输入与输出光波长间距对时钟提取信号抖动的影响。转换波长不同时,输入信号光功率改变对输出时钟信号幅度和相位抖动的影响如图2和3所示,测量时,输出光功率保持在5 dBm左右。

由图2和图3可以看出,当输入抽运功率在8~14 dBm时,输出的时钟信号幅度和相位抖动对抽运光功率不敏感,即可以容忍6 dB的功率起伏。优化的输入抽运光功率较低,因此在实验中省去了高功率放大器,也无需采用抽运啁啾技术来抑制受激布里渊散射。下面实验中,入环光功率基本在11~12 dBm。值得说明的是,波长间距为4.8 nm时,输入功率小于15 dBm时抖动过大,无法测量,一定程度上表明了该时钟提取方案的受限带宽。波长转换

的时钟提取带宽受限于环内放大器的增益带宽和高非线性光纤的参量增益带宽。由于本文使用的高非线性光纤在工作波长附近存在一定的色散,这限制了参量增益带宽。研究表明,通过合理设计高非线性光纤的色散参数,参量增益带宽可达到100 nm左右,大大增加了FOPO处理的信道数量。

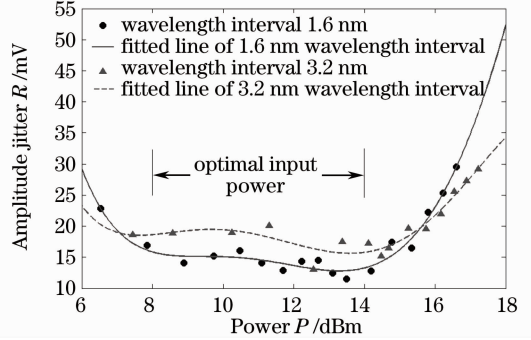


图2 幅度抖动随输入光功率的变化

Fig. 2 Variations of amplitude jitter with input pump power

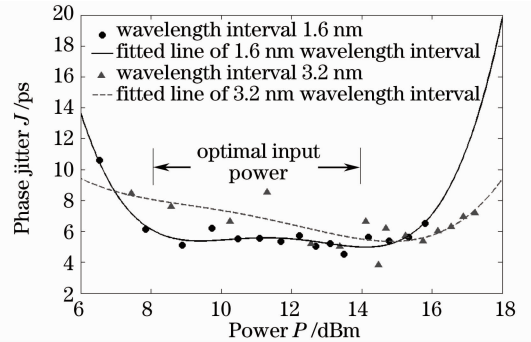


图3 相位抖动随输入光功率的变化

Fig. 3 Variations of phase jitter with input pump power

3.2 时钟提取信号抖动对随机序列的依赖性

将波长转换固定在1.6 nm,入环光功率为11 dBm,通过改变RZ伪随机码序列的长度以及“1”码的出现概率,来考察输出时钟信号的抖动变化。图4给出了“1”码概率为1/4, $(2^N - 1)$ 随机序列中N取不同值(N=7、9、11、20、23、31)时输出时钟信号的抖动性能。比较幅度抖动和相位抖动,前者对数据序列的依赖性更为明显,N=31时比N=7时的幅度抖动上升了4 mV,表明该时钟提取方案也存在一定的码型效应,即当大量连“0”序列作为输入信号时,所提取的时钟信号抖动将会增加;而当N=31时,可重复出现的伪随机码序列最长,此时可能出现最长的连“0”序列,使幅度抖动增加。然而,实验中N通常取31,以便模拟实际通信中传输的数据序列。

测量比较“1”码概率分别为1/2,1/4,1/8时输

出的时钟信号幅度抖动,其最小值分别为 11.54, 12.0 和 20.23 mV,而相位抖动变化不大。由此可见,“1”码的出现概率越低,幅度抖动越大。因此,“1”码概率设置为 1/2 时(与实际数据通信情形一致),基于光纤环振荡器结构的时钟提取装置具有最佳的工作状态。上述测量结果表明,FOPO 时钟提取质量与随机序列的参数设置相关,即 FOPO 存在码型效应,数据连“0”概率的增加会降低 FOPO 时钟提取性能。研究表明,在时钟提取单元后面级联再整形单元,能够在一定程度上克服码型效应对时钟质量的影响。

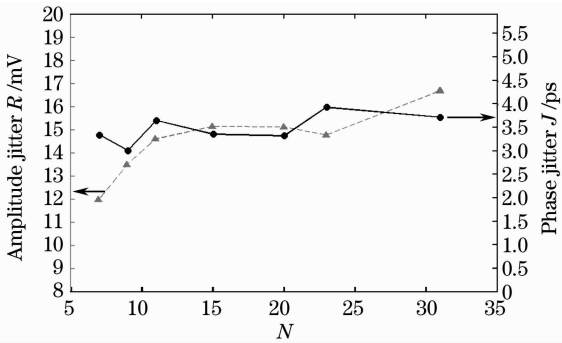


图 4 幅度抖动和相位抖动对随机数据序列的依赖性
Fig. 4 Dependences of amplitude and phase jitter on random data sequence

3.3 时钟提取系统的抖动抑制特性

通过调节 NRZ 信号与 10 GHz 时钟信号之间的时延,使两次调制方案中产生的光 RZ 信号幅度和相位抖动改变,并用于研究时钟提取系统的输入/输出抖动特性。仍将波长转换间距设为 1.6 nm,入环光功率为 12.04 dBm,输入的伪随机码序列设置为 $2^{31}-1$,“1”码概率为 1/2。测试中调整接收端的衰减器以使输出时钟的功率保持在 -5 dBm。输出的时钟信号幅度抖动和相位抖动如图 5 和 6 所示,其中 45° 直线对应的抖动增益为 1。

由图 5 和 6 可知,在一定的输入抖动范围内,幅度和相位抖动均有较大改善,随着输入抖动的增加,输出抖动也略有提高,相应的输入/输出抖动转移曲线斜率分别约为 0.29 和 0.16。另一方面,当输入信号的幅度抖动和相位抖动分别大于 2.28 mV 和 3.5 ps 时,该时钟提取系统才具有抖动抑制作用。在实验测量范围内,输出的时钟信号幅度抖动和相位抖动基本上可控制在 3 mV 和 5 ps 以下。实验结果表明,FOPO 由于增益饱和特性能够大幅改善提取的时钟信号质量。与使用 FP 滤波器提取时钟后通常需要额外的再生装置相比,FOPO 装置能够在

单一结构中实现波长连续可调的高性能时钟提取,这在高速全光信息处理技术中具有更好的应用前景。与光纤锁模激光器类似,过长的 FOPO 环长容易受到外界因素干扰。针对这一点,进行了关于 FOPO 环长稳定性的实验,目前已经可以从闲频光中提取出反馈信号,并通过调整光延迟线来增强 FOPO 的稳定性,下一步计划完成对 FOPO 环长的自动稳定方案的研究。

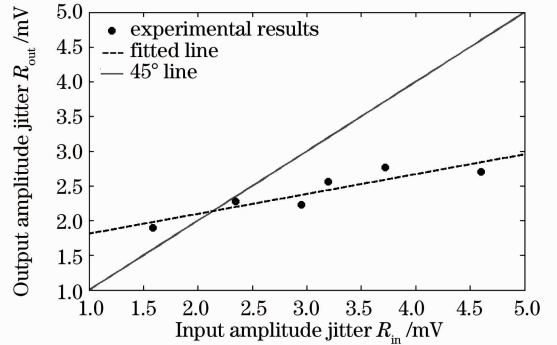


图 5 输入/输出信号的幅度抖动转移曲线

Fig. 5 Input/output transfer curves for amplitude jitter

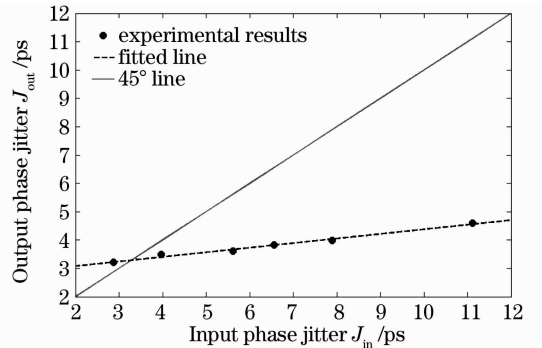


图 6 输入/输出信号的相位抖动转移曲线

Fig. 6 Input/output transfer curves for phase jitter

4 结 论

研究了低功率抽运的光 RZ 信号注入下光纤参量振荡器的时钟提取抖动性能,描述了时钟建立和稳定两个阶段的工作原理。实验中采用 WDM 解复用器作为滤波器实现了 1.6 nm 的波长转换时钟提取,得到了输出抖动不敏感的抽运光功率范围,可容忍约 6 dB 的输入功率波动。分析了“1”码概率对输出时钟抖动的影响,当“1”码概率设置为 1/2 时可获得最小的幅度抖动。通过测量输入/输出信号的抖动转移曲线表明,低功率抽运下该时钟提取系统所允许的输入信号幅度和相位抖动应大于 2.28 mV 和 3.5 ps,此时可实现抖动抑制作用,对应的输入/输出抖动转移曲线斜率分别约为 0.29 和 0.16,具

有抽运功率较低、光脉冲较宽、无需 SBS 抑制等特点, 具有更强的现实应用可能性。

参 考 文 献

- 1 Pei Li, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 142~146
裴 丽, 宁提纲, 祁春慧等. 高速光通信系统光纤光栅色散补偿的偏振模色散研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 142~146
- 2 S. Kwaanishi, H. Takar, K. Uchiyama *et al.*. 1.4 Tbit/s (200 Gbit/s \times 7 channel WDM) 50 km optical transmission experiment[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(20): 1716~1717
- 3 S. Fischer, M. Dulk, E. Gamper *et al.*. Optical 3R regenerator for 40 Gbit/s networks[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(23): 2047~2049
- 4 George T. Kanellos, Dimitris Petrantonakis, Dimitris Tsiokos *et al.*. All-optical 3R burst-mode reception at 40 Gb/s using four integrated MZI switches[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 184~192
- 5 Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia *et al.*. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2952~2956
董 泽, 曹子峥, 卢 嘉等. 基于半导体光放大器的四波混频效应对正交频分复用光信号进行全光波长变换[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2952~2956
- 6 Zhao Xiaofan, Pan Shilong, Yang Yanfu *et al.*. All-optical wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier and delay interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 892~896
赵晓凡, 潘时龙, 杨彦甫等. 基于半导体光放大器结合延迟干涉仪的全光波长变换[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 892~896
- 7 Hyuek Jae Lee, Hae Geun Kim, Jee Yon Choi *et al.*. All-optical clock recovery from NRZ data with simple NRZ-to-PRZ converter based on self-phase modulation of semiconductor optical amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12): 989~990
- 8 Lijun Wang, Yikai Su, Anjali Agarwal *et al.*. All-optical laser synchronization and clock recovery based on dynamic parametric gain modulation[C]. Baltimore: Optical Fiber Communication Conference, 2000, ThP6
- 9 Yikai Su, Lijun Wang, Anjali Agarwal *et al.*. Wavelength-tunable all-optical clock recovery using a fiber optic parametric oscillator[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **184**: 151~156
- 10 J. E. Sharping. Microstructure fiber based optical parametric oscillators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(14): 2184~2191
- 11 G. K. L. Wong, S. G. Murdoch, R. Leonhardt *et al.*. High-conversion-efficiency widely-tunable all-fiber optical parametric oscillator[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2947~2952
- 12 Y. Zhou, K. K. Y. Cheung, S. Yang *et al.*. Widely-tunable picosecond optical parametric oscillator using highly nonlinear fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 989~991
- 13 J. E. Sharping, M. Fiorentino, A. Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1048~1050
- 14 J. Fan, A. Dogariu, L. J. Wang. Parametric amplification in a microstructure fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(6): 801~805
- 15 K. S. Abedin, J. T. Gopinath, E. P. Ippen *et al.*. Highly nondegenerate femtosecond four-wave mixing in tapered microstructure fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(8): 1384~1386
- 16 A. Chen, G. Wong, S. Murdoch *et al.*. Widely tunable optical parametric generation in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 762~764
- 17 T. Andersen, K. Hilligse, C. Nielsen *et al.*. Continuous-wave wavelength conversion in a photonic crystal fiber with two zero-dispersion wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4113~4122
- 18 R. Jiang, R. Saperstein, N. Alic *et al.*. 375 THz parametric translation of modulated signal from 1550 nm to visible band[C]. Anaheim: Optical Fiber Communication Conference, 2006, PDP16
- 19 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965
韩丙辰, 于晋龙, 罗 俊等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零/归零码转换器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962~2965