

基于闲频光功率的光纤参量振荡器反馈控制实验

罗特 武保剑 文峰 邱昆

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 为了补偿光纤参量振荡器光纤环的长度漂移, 提出一种基于四波混频闲频光功率的反馈控制方案。通过 10 Gbit/s 归零(RZ)光信号的时钟提取实验证实了该方案的可行性, 所提取时钟信号的归一化相位抖动与幅度抖动分别在 0.015 与 0.06 以下, 并可长时间稳定工作, 因此该方案具有很强的实用性。

关键词 光通信; 光时钟提取; 光纤参量振荡器; 长时间稳定性

中图分类号 TN253; O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0805008

Experiments on Feedback Control of Fiber Optical Parametric Oscillator Based on Idler Power

Luo Te Wu Baojian Wen Feng Qiu Kun

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications of the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract To compensate the drift of fiber loop length in fiber-optic parametric oscillator (FOPO), a novel feedback control scheme based on four-wave-mixing idler power is put forward. The feasibility of this scheme is confirmed by the clock extraction experiments for 10 Gbit/s optical return to zero (RZ) signal, and the normalized phase and amplitude jitter of less than 0.015 and 0.06 can be achieved under long-time stable operating condition. Thus, the scheme proposed in this paper is of practical applicability for the FOPO's stability of oscillation.

Key words optical communications; optical clock extraction; fiber optical parametric oscillator; long-time stability

OCIS codes 060.2320; 190.4410; 230.1150; 060.1155; 190.4370

1 引言

随着现代光通信速率的不断提高, 光信号将更容易受到群速度色散(GVD)、信道间串扰等因素的影响而劣化, 因此对劣化信号的再生显得尤为重要^[1]。全光再生技术再放大、再整形、再定时(3R)不仅能提升信号传输的质量, 还可以克服光电中继器“电子瓶颈”的限制, 从而成为近几年来光通信领域的一个重要研究方向^[2~5]。

全光时钟提取是实现全光 3R 再生的关键技术之一。在极高速的全光时钟提取中可以利用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^[6,7]。FOPO 具有较高的参量增益、快速的响应速度以及波长连续可调等优势, 不但能够用于全光时钟提取^[8~10], 还可以实现激光放大^[11~13]、脉冲信号产生^[14]、可调波长转换等^[15,16]。虽然利用 FOPO 可以提取出高质量的光时钟信号, 但是由于 FOPO 具有较长的光纤环腔, 所以如何保持 FOPO 长时间稳定工作成为一个关键的问题。影响 FOPO 稳定性的主要因素包括: 1) 谐波锁模固有的超模噪声引起短期不稳定性; 2) 温度导致的环长变化使得光信号调制频率和环本征谐波频率(环基频的整数倍频率)

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-05-08

基金项目: 国家 973 规划(2011CB301703), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-2008)及国家 863 计划(2009AA01Z216)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, 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)

之间失配。此外偏振模色散(PMD)引起的偏振效应等也会造成一定的影响。

目前提高 FOPO 连续工作时间的方案有:采用腔内滤波法可以抑制超模噪声^[17],但该方案会引入较大的插损,降低效率;采用再生锁模技术^[18],该方案会让调制频率或载波波长随环长而改变,针对调制频率与载波波长都一定的时钟提取系统,增加了外围系统的复杂性。考虑到温度引起的环长漂移是慢变的,环长的控制可以通过引入延迟线伺服机制来实现。延迟机制可以由压电陶瓷(PZT)完成^[19],但是通过 PZT 调节延迟时间时会使缠绕在 PZT 上的光纤产生形变,引起光信号偏振态变化,光纤不同的缠绕方式对延迟时间的精确度也会造成影响。提取的误差信号也可以是弛豫振荡信号的射频功率^[20],但是系统复杂度较高。

本文提出一种基于四波混频(FWM)闲频光的反馈控制方案来稳定 FOPO 环长,改善 FOPO 的时钟提取性能。实验表明,将 FWM 作用中产生的闲频光转换为反馈电压,并将此反馈电压作为监控信号,对环长的改变量进行补偿,进而能够解决 FOPO 无法长期稳定工作的问题。

2 实验系统及其工作原理

图 1 给出了基于闲频光功率的光纤参量振荡器反馈控制实验系统框图,主要由 FOPO 结构与反馈控制单元两部分组成。FOPO 结构是实现时钟提取功能的关键,反馈控制单元的作用是保证 FOPO 稳定地工作。

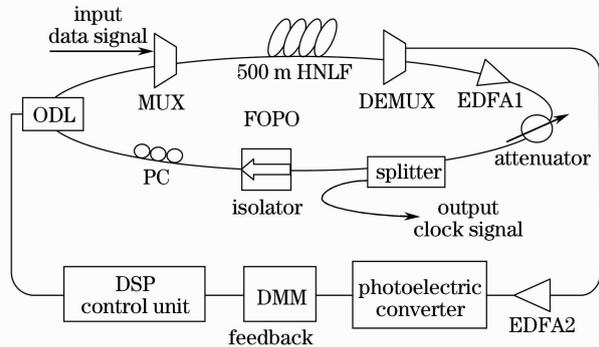


图 1 基于闲频光功率的光纤参量振荡器反馈控制实验框图

Fig. 1 Schematic setup of FOPO feedback control based on idler power

FOPO 主要由复用器(MUX)、高非线性光纤(HNLF)、解复用器(DEMUX)、掺铒光纤放大器(EDFA)、衰减器和电控光纤延迟线(ODL)等组成。

在 FOPO 结构中,输入归零(RZ)数据光作为抽运光在高非线性光纤中进行参量放大,所放大的信号光的中心波长由后续解复用器决定。在时钟提取过程中,将信号光与闲频光通过解复用器同时分两路输出,闲频光将输入到反馈功能单元中,而信号光将输入环内继续与输入抽运光进行参量放大。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,电控光纤延迟线则用于补偿温度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,由光接收机接收后输入示波器进行测量。

FOPO 进行时钟提取的原理如下:因为环形腔中存在自发辐射(ASE)与抽运光进行 FWM 作用,自发辐射被放大形成一个宽谱光,由后续解复用器选择出所需要的波长,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,信号光将会进一步增强,同时产生闲频光。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。为使 FOPO 稳定工作,需要保证信号光走过环长的时间是抽运光信号比特周期的整数倍,即调制频率和环本征谐波频率相匹配,此时在 HNLF 中才能进行稳定的光脉冲参量放大,并输出理想的时钟信号和最大功率的闲频光;但是温度变化所引起的环长改变,会导致调制频率和环本征谐波频率失配,进而使输出时钟信号劣化,闲频光功率下降,因此闲频光功率的改变可以反映环长的变化量。通常环境温度的改变只会引起 FOPO 环长的漂移,相应的闲频光功率改变也较缓慢。

保证 FOPO 稳定工作的关键是反馈控制单元,主要包括 EDFA、光电转换模块、PXI 型数字万用表(DMM)和数字信号处理(DSP)控制单元等。闲频光作为反馈信号经放大后输入到光电转换模块中,将光功率信号变为反馈电压信号,其直流成分反映了环长改变量。将反馈电压信号输入 DMM 中完成模数转换,经过 DSP 控制单元处理后再控制电控光纤延迟线对环长进行补偿,进而使 FOPO 可以稳定工作。ODL 通过在光纤中插入一段长度可控的自由空间来实现环长的调节,由于调节时不引起光纤形变,且在稳定控制中延迟时间的改变在皮秒量级(光程改变在毫米量级),因而对光信号的偏振态影响较小。

DMM 的控制程序在 LabView 开发平台上实现,主要实现对反馈电压的测量与模数转换功能。

程序主要由三个部分组成,如图 2 所示。第一部分是 DMM 的配置与初始化,用于驱动 DMM 硬件并进行设置;第二部分是测量与记录,用于测量、处理

与记录输入电压;第三部分是出错处理,用于处理程序出错的情况与关闭 DMM 驱动。

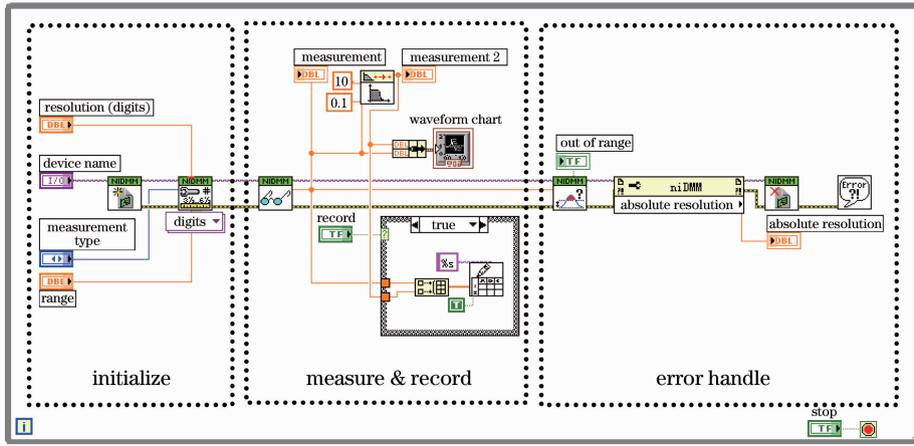


图 2 DMM 控制程序

Fig. 2 Control program of DMM

3 实验结果

首先,采用改变 ODL 延迟时间的方式模拟环长变化对时钟提取性能的影响,即测量环长改变(时延大小)、闲频光光电转换电压以及输出时钟信号抖动之间的关系曲线,进而确定 FOPO 时钟提取性能与控制电压的定量关系。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 $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,色散 $D=0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,色散斜率 $S=0.028 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,衰减 1.244 dB/km, HNLf 的插入损耗为 2.5 dB。实验表明,环长改变时反馈电压的改变是在毫伏量级,同时反馈电压中能反映环长改变的是直流成分。光发电机发出的波长为 1552.5 nm,入环光功率为 19.14 dBm,输入 RZ 光信号的调制频率为 10 Gbit/s。ODL 延迟时间变化范围是 171.8~178.3 ps。当环长改变时,反馈电压、相位与幅度抖动三者的改变如图 3 所示。图中幅度抖动对峰-峰值进行了归一化,相位抖动对信号周期(100 ps)进行了归一化。

由图 3 可知当延迟时间改变时,反馈电压在延迟时间为 172.8~174.8 ps 这一区间内出现线性变化,在图 3 中标注为工作区间。延迟时间小于 172.8 ps 时,时钟抖动较大,表明 FOPO 工作于不稳定状态;延迟时间大于 174.8 ps 时,反馈电压值变化平坦,不能反映环长的变化。而在工作区间中相位抖动和幅值抖动较弱,且反馈电压呈现线性变化。如果探测到反馈电压持续增加,则可以认为环长正

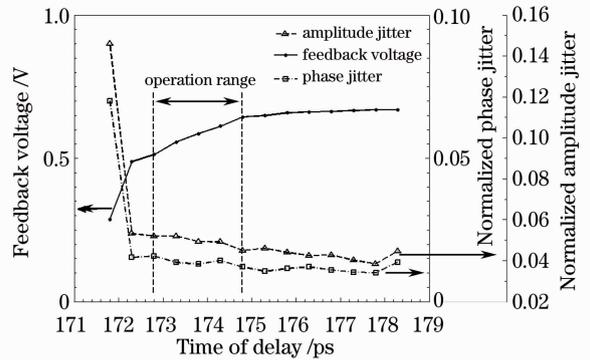


图 3 反馈电压与时钟信号抖动随时延的变化

Fig. 3 Variations of feedback voltage and clock jitter with delay time

在增加,如果探测到反馈电压持续减小,则可以认为环长正在减小。因此在此工作区间中,反馈电压值的改变可以反映环长的改变量。在工作区间中,反馈电压线性变化的斜率(灵敏度)为 $0.065488 \text{ V}/\text{ps}$,而 ODL 的步长为 1 ps,这要求后续 DMM 的数据采集精度在 0.06 V 以上。实验中采用的 DMM 是 NI 公司 PXI-4065 型,该 DMM 可以直接测量输入电压中的直流分量,量程可调为 $\pm 10 \text{ V}$,数位为 $6^{1/2}$,则分辨率为 $20/3999999=5 \times 10^{-6} \text{ V}$,同时精度达到 10^{-5} V ,满足测量要求。通过对电路结构与后续 DSP 控制单元进行优化,可以使灵敏度进一步提高。

接下来确定反馈稳定方式。从图 3 可以看出延迟时间 172.8 ps 对应的电压值为 0.512721 V,延迟时间 174.8 ps 的对应电压值为 0.643697 V,因此设

置延迟时间 173.8 ps 处为最佳工作点。当探测到电压值低于 0.512721 V 时,则由 DSP 控制单元控制 ODL 增加 1 ps 以靠近 173.8 ps 的最佳工作点;同理当探测到电压值高于 0.643697 V 时则控制 ODL 减小 1 ps,以此进行反馈控制,使 FOPO 能持续稳定地工作。

根据上述反馈稳定方式进行对比实验,让系统分别在有反馈和无反馈时进行工作,并测量时钟的相位抖动和幅度抖动情况,如图 4 所示。图 4 中所示幅度抖动对峰-峰值进行了归一化,相位抖动对信号周期(100 ps)进行了归一化。在 1 h 的对比实验中,无反馈情况下时钟抖动性能的严重劣化发生在

10 min 之后,其主要原因是 FOPO 对环长的改变具有一定的容忍度。由图 3 可以看出,延迟时间在 172.2~178.4 ps 之间变化时,时钟的相位和幅度抖动变化较小。由此可知系统工作在前 10 min 内,环长受温度的影响仍在 FOPO 的容忍度之内,而工作时间大于 10 min 时,环长的改变太大导致 FOPO 无法继续稳定地提取时钟信号。在实验中提出的反馈单元控制下,可以在整个测试时间范围内获得高质量的光时钟信号,其归一化相位和幅度抖动分别在 0.015 与 0.06 以下,保证 FOPO 长时间稳定工作。如果优化反馈单元,提取的时钟信号质量还可以进一步提升。

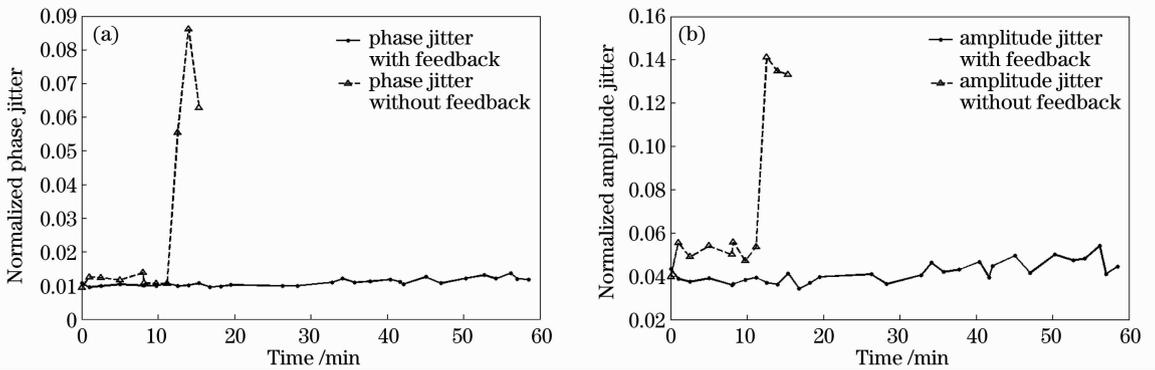


图 4 有、无反馈控制的 FOPO 系统输出的时钟信号抖动性能对比。(a)时钟信号相位抖动;(b)时钟信号幅度抖动
Fig. 4 Performance comparison of output clock jitter FOPO systems with and without feedback control.

(a) Phase jitter; (b) amplitude jitter

4 结 论

提出了一种可以使光纤参量振荡器长时间稳定工作的新型反馈控制方案,它依据 FOPO 中产生的闲频光功率大小来反馈控制光纤环腔中的光纤延迟线,从而补偿光纤环腔的长度漂移,以解决 FOPO 不能够长时间稳定工作的问题。利用该反馈控制方案,完成了对 10 Gbit/s 的 RZ 光信号的时钟提取实验,比较了有、无反馈控制时系统的正常工作时间。实验表明,采用提出的反馈控制方案可使 FOPO 系统长时间稳定工作在时钟提取状态,所提取时钟信号的归一化相位与幅度抖动可分别控制在 0.015 与 0.06 以下,从而验证了反馈控制方案的可行性,具有很好的应用价值。

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. Takara, K. Uchiyama *et al.*. 1.4 Tbit/s (200 Gbit/s×7 ch) 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 Yan Ziheng, Yu Jinlong, Wang Ju *et al.*. 4×40 Gb/s multi-wavelength all-optic 3R regeneration using data-pumped FOPA[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005003
颜子恒, 于晋龙, 王 菊等. 基于数据抽运的光纤光参量放大的 4×40 Gb/s 多波长全光 3R 再生实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005003
5 Lou Caiyun, Wang Tong, Huo Li *et al.*. Research on 10 Gb/s all-optical 3R regeneration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 27~29
娄采云, 王 桐, 霍 力等. 10 Gb/s 全光 3R 再生的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 27~29
6 Lijun Wang, Yikai Su, Anjali Agarwal *et al.*. All-optical laser synchronization and clock recovery based on dynamic parametric gain modulation[C]. OFC, 2000. ThP6
7 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**(1-4): 151~156
8 J. E. Sharping. Microstructure fiber based optical parametric oscillators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(14): 2184~2191
9 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
- 10 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
- 11 J. E. Sharping, M. Fiorentino, A. Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1048~1050
- 12 J. Fan, A. Dogariu, L. J. Wang. Parametric amplification in a microstructure fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(6): 801~805
- 13 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
- 14 A. Y. H. Chen, G. K. L. Wong, S. G. Murdoch *et al.*. Widely tunable optical parametric generation in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 762~764
- 15 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
- 16 R. Jiang, R. Saperstein, N. Alic *et al.*. 375 THz parametric translation of modulated signal from 1550 nm to visible band[C]. OFC, 2006. PDP16
- 17 J. S. Wey, J. Goldhar, G. L. Burdge. Active harmonic modelocking of an erbium fiber laser with intracavity Fabry-Perot filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7): 1171~1180
- 18 M. Nakazawa, E. Yoshida, Y. Kimura. Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarisation-maintaining erbium fibre ring laser[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(19): 1603~1605
- 19 X. Shan, D. Cleland, A. Ellis. Stabilising Er fibre soliton laser with pulse phase locking [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2): 182~184
- 20 Y. M. Jhon, C. W. Jang, J. H. Kim *et al.*. Noise characterization of a 10 GHz harmonically mode-locked fiber ring laser stabilized by cavity length control [C]. LEOS, 2002, **1**: 341~342

栏目编辑:王晓球