

光纤参量振荡器的自动反馈控制技术研究

王利辉 武保剑* 文峰

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 611731)

摘要: 为了实现光纤参量振荡器(FOPO)的高精度稳定时钟信号提取, 该文首次开展了基于闲频光功率的自动反馈控制实验, 其中自动反馈控制单元由闲频光采集模块、自动控制信号处理模块以及延迟线驱动模块组成。测量了12.5 Gb/s 归零(RZ)信号输入时自动反馈控制 FOPO 提取的时钟信号质量, 其均方根(RMS)相位抖动值为 0.92 ps, 时钟提取精度明显高于之前的手动反馈控制系统。

关键词: 光时钟提取; 光纤参量振荡器; 闲频光功率; 自动反馈控制单元

中图分类号: TN253; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)08-2028-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01551

Automatic Feedback Control Technology for Fiber Optical Parametric Oscillators

Wang Li-hui Wu Bao-jian Wen Feng

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

Abstract: In order to realize highly accurate and stable clock signal extraction using Fiber Optical Parametric Oscillators (FOPOs), the idler-power-based automatic feedback control experiment is implemented for the first time. The automatic feedback control unit consists of idler acquisition module, signal processing module for automatic control, and delay line drive module. By means of the automatically feedback-controlled FOPO, a high-quality optical clock signal can be extracted from the 12.5 Gb/s Return-to-Zero (RZ) data sequence and the RMS phase jitter is 0.92 ps, much better than the results obtained in the previous manual feedback control system.

Key words: Optical clock extraction; Fiber optical parametric oscillator; Idler power; Automatic feedback control unit

1 引言

随着通信容量需求的不断增加, 光传送网的数据速率越来越高、传输距离更长, 信号对掺铒光纤放大器自发辐射噪声(ASE)、光纤色散和非线性效应等诸多劣化因素会更加敏感, 全光 3R(再放大、再整形、再定时)再生技术成为光信号处理领域的研究热点, 可避免“光-电-光”中继器具有潜在的“电子瓶颈”限制^[1]。全光时钟信号提取作为全光 3R 再生的关键功能之一, 它可以采用半导体锁模激光器(MLL)^[2], 自脉动 DFB 激光器^[3,4], 基于 SOA 的注入锁模光纤环形激光器^[5], 超快非线性干涉仪^[6], 法布里-珀罗谐振腔^[7], 光纤参量振荡器等技术实现。其中, 基于光纤参量振荡器(FOPO)的时钟信号提取在高速光通信系统中具有广泛的应用前景^[8,9], 同时

光纤参量振荡器还可以作为可调谐短脉冲光纤激光光源使用^[10,11]。然而, FOPO 的稳定性易受到环境温度、输入光功率和偏振态等因素的影响^[12]。为此, 人们提出在环形腔内插入大色散光纤^[13], 采用腔内滤波法抑制超模噪声^[14], 再生锁模技术和使用双折射光纤^[15]等方案来改善 FOPO 输出时钟的稳定性。

最近, 文献[16]提出了基于闲频光的反馈控制方案, 并进行了原理演示。本文在此基础上, 通过在反馈回路中加入自动控制信号处理模块, 实现了自动控制功能, 使 FOPO 时钟信号提取的精度大大提高。下面将详细描述自动反馈控制功能的实现过程, 涉及的关键技术包括闲频光信号的采集、反馈电信号的自动化处理、控制信号对延迟线的驱动, 以及信号处理模块中采样周期和延迟精度的设定等。

2 FOPO 的反馈控制原理

为了便于说明自动反馈控制功能的具体实现过程, 首先给出整个 FOPO 实验系统框图, 如图 1 所示。该系统包括 FOPO 光纤环形腔和自动反馈控制

2013-10-10 收到, 2013-12-11 改回

国家 973 计划项目(2011CB301703)和国家自然科学基金(61271166)资助课题

*通信作者: 武保剑 bjwu@uestc.edu.cn

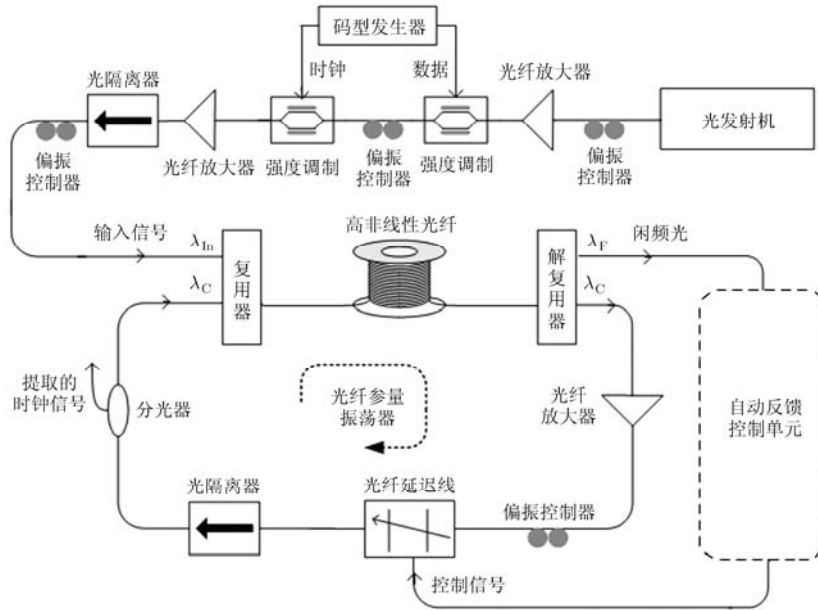


图 1 基于闲频光功率的光纤参量振荡器反馈控制实验框图

单元两个部分。利用 FOPO 进行光时钟信号提取，必须满足两个条件：一是同步条件，即输入信号的调制速率与环形腔的 FSR 相匹配；二是增益锁模机制，在有源 FOPO 结构中，增益主要来自于参量放大过程和环内 EDFA，时钟信号获得的增益等于或略小于环损耗。外界环境温度变化、光纤振动以及增益锁模状态的变化均会影响提取的时钟信号的相位抖动和幅度抖动。

FOPO 用于时钟信号提取的工作过程大致如下：输入的抽运光(波长为 λ_{in})与波分解复用器(De-MUX)带宽内的自发辐射(ASE)光发生参量放大过程，并在光纤环形腔内多次循环作用、发生多光束干涉；在增益饱和/锁模机制作用下，当同步条件得到满足时便可获得波长为 λ_C 的时钟信号，同时产生波长为 λ_F 的闲频光。实验表明，时钟提取信号质量与闲频光功率之间具有单调变化关系，据此本文提出了基于闲频光功率的反馈控制方案，并通过手动调节腔内光纤延迟线的方式验证了这种方案的可行性^[16]。本文在此基础上，通过在反馈回路中加入自动控制信号处理模块，实现了 FOPO 的自动控制功能，大大提高了时钟信号提取的精度。反馈控

制单元的具体工作原理是：由于闲频光功率的变化能够反映环长的变化，因此把闲频光功率作为反馈信号，然后根据反馈信号的变化情况调节光纤延迟线的延迟量，从而补偿光纤环腔的长度，使 FOPO 运行在较好的工作状态。因此，所提取的光时钟信号的质量与反馈控制精度密切相关。

3 自动反馈控制功能实现

本文实现了反馈控制单元的自动化，无需人工参与，提高了 FOPO 的反馈控制精度。自动反馈控制单元主要包括 3 个模块：闲频光采集模块，自动控制信号处理模块和延迟线驱动模块，如图 2 所示。

3.1 闲频光采集模块

闲频光采集模块对主要实现闲频光功率的光电转换和 A/D 变换，获取反馈电信号。闲频光采集模块由可调光衰减器(VOA)，光电探测器和数据采集卡(NI-USB4065)组成。VOA 将闲频光功率控制在光电探测器线性工作区间 $-20 \sim -40$ dBm 内。光电探测器把光信号转化成电信号，供 NI-USB4065 设备采集。NI-USB4065 是 NI 公司的数据采集设备，它一端连接光电探测器，另一端使用 USB 数据

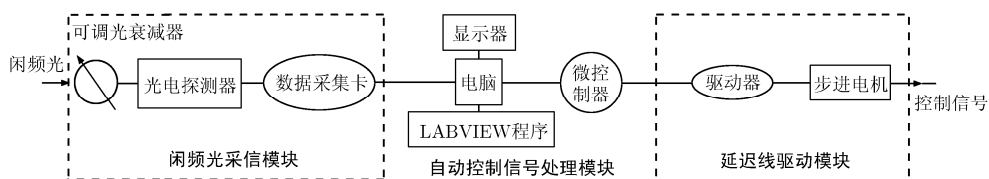


图 2 自动反馈控制单元

线与电脑相连, 读取相关数据。为了得到高质量的时钟信号, VOA 和光电探测器应选择在最佳工作电压区间: 电压值的变化和光纤延迟线的延迟量之间保持单调的关系, 且在这个区间范围内和边缘不会发生电压的跳变。

当 FOPO 工作在最佳状态时, 时钟信号提取系统具有相位抖动抑制功能。但由于环境温度等因素的变化使得环长和速率无法得到匹配, 此时自动控制信号处理模块将给延迟线驱动模块发送控制信号用于补偿温度引起的环长变化, 而该控制信号又与信号采集周期密切相关。由于延迟线驱动模块中的机械连接和光纤延迟线控制的延时响应, 控制信号变化不能太快。相应软件程序中的循环周期也就是信号采集周期, 在本文实验中设为 500 ms。

3.2 自动控制信号处理模块

自动控制信号处理模块是反馈控制单元的核心, 用于连接闲频光采集模块和延迟线驱动模块, 接收并处理闲频光采集模块输出的电信号, 同时产生控制延迟线的控制信号。自动控制信号处理模块包括个人电脑(PC), 单片机(MCU, 型号 AT89C51), 以及运行在 PC 之上的 LABVIEW 程序等, 单片机负责接收 LABVIEW 程序发送过来的命令并控制延迟线驱动模块。自动控制信号处理模块实质上就是 LABVIEW 的 VI 程序和单片机 C51 程序, VI 程序包括 NI-USB4065 设备驱动和滤波、信号判决以及延迟线的控制通信 3 个部分, 如图 3 所示。其中, NI-USB4065 的驱动程序是为了获取 NI-USB4065 所采集的信号, LABVIEW 软件提供了许多 NI 设备的驱动程序供用户使用, 以便有效地连接 NI 硬件设备。数据采集卡直接输出的信号抖动较大, 需要通过低通滤波滤除高频分量, 有利于反馈控制单元的稳定性。判决程序部分用于判决反馈电压偏离最佳工作点的大小, 进而决定光纤延迟线的调节方向和延迟量的大小, 并发出控制单片机(MCU)命令,

以便驱动光纤延迟线。通信部分的程序用于实现单片机的通信控制, 即通过串口发送相应的命令给单片机, 单片机的引脚与步进电机驱动器的相应引脚相连接, 通过延迟线驱动模块来电控制光纤延迟线的延迟行为。单片机 C51 程序通过 KEIL 软件编写, 它包括串口通信程序块和控制步进电机驱动器引脚程序块两个部分。程序主要用于接收反馈控制信号处理模块发送的命令, 并产生周期性的脉冲信号和方向控制信号分别给步进电机驱动器的 PUL 引脚和 DIR 引脚。

3.3 延迟线驱动模块

延迟线驱动模块接收到控制信号后, 通过光纤延迟线驱动电路来调节光纤环形腔的长度。延迟线驱动模块主要由步进电机驱动器和步进电机组成, 执行自动控制信号处理模块发送过来的命令, 它与执行单元的连接图如图 4 所示。步进电机驱动器型号为 BDL-20/BAL-35, 用于驱动两相式步进电机。根据步进电机的原理可知, 步进电机驱动器通过把接收的周期性脉冲信号转化成 A, B 相交替的信号, 来控制步进电机的转动, 脉冲频率决定了转动大小; 方向控制信号控制电机 A, B 相的通电顺序, 从而控制步进电机的正转和反转。另一方面, 由反射式光纤延迟线的组成结构可知, 当步进电机转动角度 $\Delta\theta$ 时, 光纤延迟线内部的螺纹转轴也会转动同样角度, 从而带动反射棱镜位移 ΔL , 即光程改变 $2\Delta L$, 对应的延迟时间为 $\tau = 2\Delta L/c$, 其中 c 为光速。本文利用示波器测量了步进角度 $\Delta\theta$ 与延迟时间 τ 的对应关系, 如图 5 所示, 其中步进电机的最小转动角度(步距角)为 1.8° 。根据图 5 可知, 步进电机转动 10 个步距角(1.8°)将产生 0.1 ps 的延迟变化。实验表明, 用于补偿 FOPO 腔长变化的光纤延迟线调节精度达到 0.1 ps 即能满足要求, 因此所选择的三相式步进电机能够满足本实验要求。

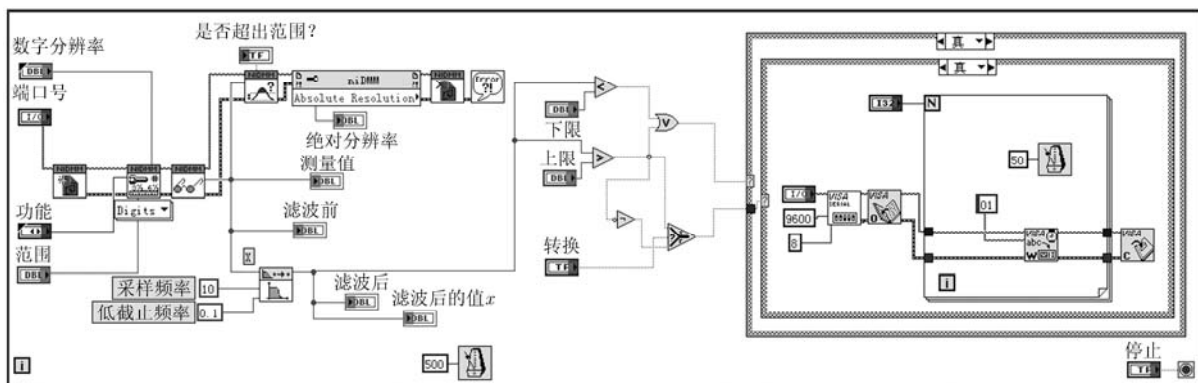


图 3 自动控制信号处理模块

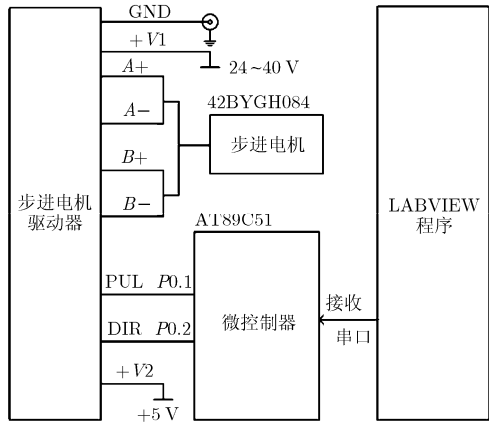


图 4 延迟线驱动模块

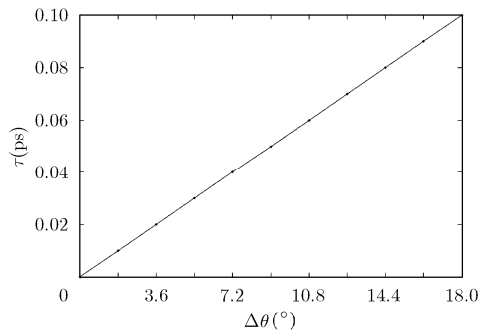


图 5 延迟时间与步进电机转动角度对应关系图

4 FOPO 稳定性测试过程

实验中通过 WDM 光发射机发出波长为 1558.98 nm 的连续光，它与码型发生器(Anritsu PPG, MP1758A)产生数据长度为 2^7-1 的 NRZ 伪随机信号和电时钟信号通过两次调制获得速率为 12.5 Gb/s 的光 RZ 信号。该信号的均方根(RMS)相位抖动为 1.28 ps，眼宽为 25.3 ps，如图 6(a)所示。经过高功率放大器(HP-EDFA)放大后，获得平均功率为 20.26 dBm 的抽运光注入 FOPO 系统进行全光时钟信号提取。提取的时钟信号波长为 1560.61 nm，其相位抖动和脉冲宽度由光取样示波器(EXFO, PSO-100)测得。图 6(b)给出了实验获得的光时钟信号，脉冲宽度为 8.5 ps，RMS 相位抖动是 0.92 ps。

下面描述具体的测试过程。首先，通过手动控制光纤延迟线的延时，获得闲频光功率与光纤环形腔长度的变化关系，并调节 VOA 使得闲频光功率处于光电探测器的线性工作电压范围内。为了便于稳定性测试，本文使用了延迟线驱动模块的操作面板，以及数据和波形的显示界面，它们由 LABVIEW 软件编写，并运行在 PC 上，延迟线驱动模块的操作面板能够控制步进电机转动并记录转动情况，数据和波形的显示界面用于记录和显示反馈信号；相关数据和波形可以通过显示器(monitor)观察。光纤延迟线(TODL)可调节的最小时间精度为 0.01 ps，

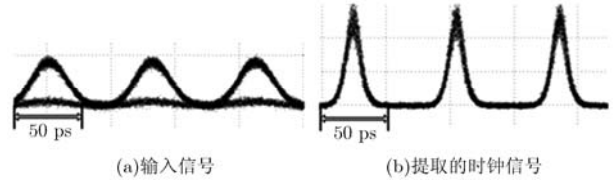


图 6 输入信号和所提取的时钟信号

实验中设定转动一个步距角(1.8°)为转动一次，有两个不同方向的转动，可记录正转和反转的次数以及当前位置。根据数据和波形的显示界面，可以动态调节工作电压区间和步进电机转向，实时观察电压信号波形以确定最佳工作电压区间。由实验可知，步进电机转动的角度大小和光纤延迟线的延迟时间成线性关系，随着角度的增加延迟时间变长，利用脉冲延迟方法^[17]可以得到转动角度和延迟时间的对应关系。实验表明，光纤延迟线的延迟 0.10 ps 对应于步进电机转动的角度为 1.8° ，即 10 个步距角。当把 0.10 ps 作为调节精度时，电压值能保持在 0.60~0.64 V 内，时钟信号稳定。当 LABVIEW 程序发送给单片机数字 1 时，步进电机一次性正转 1.8° ；发送数字 0 时，步进电机一次性反转 1.8° 。

图 7 和图 8 分别给出了反馈控制 FOPO 系统提取的时钟信号脉冲宽度和 RMS 相位抖动，其中工作电压保持在 0.60~0.64 V 区间，调节精度为 0.10 ps，采样周期为 500 ms。由图 7 可知，在室温情况下无反馈控制的 FOPO 提取信号眼图宽度不稳定，时钟信号仅能保持数分钟，而本文给出的具有自动反馈控制单元的 FOPO 光时钟提取系统能够实现长时间稳定工作。根据图 8 的实验结果明显看出，系统工作 30 min(商用皮秒光纤激光器的预热时间)后，自动反馈控制系统所提取的时钟信号能够很好地稳定在 0.92 ps；而对于手动反馈控制情况^[6]，越来越难以维持开始时的时钟抖动质量。利用本文给出的具有自动反馈控制单元的 FOPO 全光时钟提取系统，本文已经成功实现了全光 3R 再生功能器件，并在即将开展的超大容量全光交换节点中起到重要作用。而由于 NI 公司数据采集卡接口限制，实验中使用 LABVIEW 与之匹配，而自动控制信号处理模块借助 PC 和 MCU 以及相应的 VI 程序和 C51 程序实现。

自动反馈控制 FOPO 的实现具有重要的现实意义，它不但实现 FOPO 的长期稳定工作，还可提升光时钟提取的精度。目前，我们在该自动反馈控制 FOPO 平台上还实现了全光 3R 再生，其中自动反馈控制单元在较长时间参量测量方面发挥了重要作用，使误码率性能参数的测试更加可靠。下一步将在本实验的基础之上，使用微控制器代替 PC 去运行 VI 程序，并利用专用集成电路(ASIC)或者现场

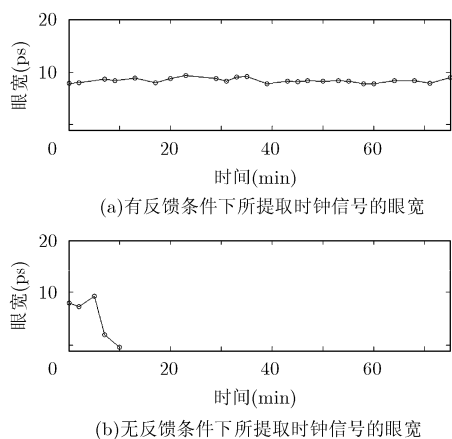


图7 有无反馈条件下所提取的时钟信号眼图宽度

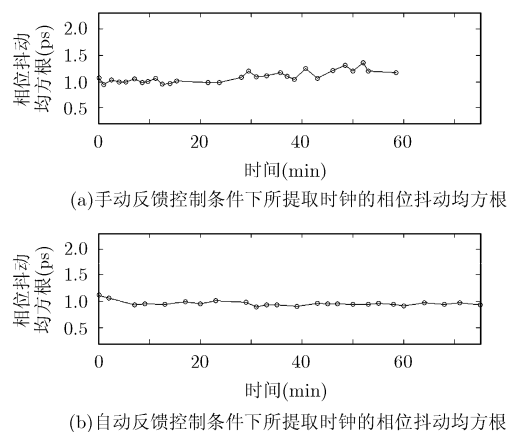


图8 手动和自动反馈控制条件下所提取时钟的RMS相位抖动

可编程门阵列(FPGA)来实现 A/D 转换,使基于 FOPO 的全光时钟提取更具商业应用前景。

5 结论

本文设计并实现了基于闲频光功率 FOPO 高精度时钟信号提取的自动反馈控制单元,它以闲频光功率作为反馈信号,经过由闲频光采集模块、反馈控制信号处理模块以及延迟线驱动模块组成的自动反馈控制单元,生成了控制信号,实现了对光纤延迟线的自动化控制,可及时地补偿 FOPO 环长的漂移,使环形腔 FSR 的整数倍始终等于输入信号的调制速率,从而得到长时间稳定的时钟信号。实验测试了 12.5 Gb/s 归零(RZ)信号输入时自动反馈控制 FOPO 提取的时钟信号质量,其均方根(RMS)相位抖动值为 0.92 ps,时钟信号提取精度明显高于之前的手动反馈控制系统。

参考文献

- [1] Leclerc O, Lavigne B, Balmefrezol E, *et al.*. Optical regeneration at 40 Gb/s and beyond[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2779-2790.
- [2] Shrane M, Hashimoto Y, Kurita H, *et al.*. Optical sampling measurement with all-optical clock recovery using mode-locked diode laser[R]. Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, CA, USA, 2001.
- [3] 陈维友, 刘式塘. 分布反馈半导体激光器电路模型[J]. 电子与信息学报, 1997, 19(5): 658-664.
- [4] Mao W, Li Y, Al-Mumin M, *et al.*. 40 Gbit/s all-optical clock recovery using a two-section gain-coupled DFB laser and semiconductor optical amplifier[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(21): 1302-1303.
- [5] 华颖, 于晋龙, 马晓红, 等. 基于注入锁模光纤激光器的 OTDM 时钟提取技术实验研究[J]. 高技术通讯, 2002, 12(8): 13-16.
- [6] Schubert C, Diez S, Berger J, *et al.*. 160 Gb/s all-optical demultiplexing using a gain-transparent ultrafast-nonlinear interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(5): 475-477.
- [7] Contestabile G, D'Errico A, Presi M, *et al.*. 40 GHz all-optical clock extraction using a semiconductor-assisted Fabry-Pérot filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2523-2525.
- [8] Li J, Huang T, Chen L R, *et al.*. Detailed analysis of all-optical clock recovery at 10 Gb/s based on a fiber optical parametric oscillator[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(2): 701-708.
- [9] Yang S G, Chen M H, Xie S Z, *et al.*. Fiber optical parametric oscillator based on highly nonlinear dispersion-shifted fiber[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2013, 6(1): 25-29.
- [10] Li J and Chen L R. Tunable and reconfigurable multiwavelength fiber optical parametric oscillator with 25 GHz spacing[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1872-1874.
- [11] Wang X, Zhou Y, Xu X, *et al.*. Multiwavelength pulse generation using fiber optical parametric oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(1): 33-35.
- [12] Wen F, Wu B J, Qiu K, *et al.*. A new feedback control method to stabilize fiber-optical parametric oscillators for clock extraction[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(1): 1-3.
- [13] Yang S, Cheung K K L, Zhou Y, *et al.*. Dispersion-tuned harmonically modelocked fiber-optical parametric oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(8): 580-582.
- [14] Wey J S, Goldhar J, and Burdge G L. Active harmonic modelocking of an erbium fiber laser with intracavity Fabry-Perot filters[J]. *Lightwave Technology*, 1997, 15(7): 1171-1180.
- [15] Nakazawa M, Yoshida E, and Kimura Y. Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarization maintaining erbium fiber ring laser[J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(19): 1603-1605.
- [16] 罗特, 武保剑, 文峰, 等. 基于闲频光功率的光纤参量振荡器反馈控制实验 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805008-1-0805008-5.
- [17] 刘益. 基于脉冲延迟比较的测距法[J]. 广西师范学院学报, 2007, 24(1): 85-88.

王利辉: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为光纤通信。
 武保剑: 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信方面的研究。
 文峰: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为全光信息处理。