

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.06.02

全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率锁定技术的研究

王少峰¹, 武腾飞¹, 曹士英², 夏传青¹, 韩继博¹, 赵春播¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100029)

摘要: 介绍了 δ 腔型 SESAM 启动锁模的全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率锁定技术的原理和应用背景, 并设计了一套可以快速实现 SESAM 锁模全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率锁定的实验装置, 最终将激光器的重复频率锁定到氢原子钟上, 使得 SESAM 锁模全保偏掺 Er 光纤激光器的重复频率具有和氢原子钟同样的稳定度; 对锁定前和锁定后重复频率进行了一定时长的数据采集, 使用计算重复频率 Allan 方差的方法对全保偏掺 Er 光纤激光器的重复频率稳定度进行了量化, 并对激光器锁定前后的重复频率进行了对比。通过比较可知, 锁定后重复频率的稳定度比锁定前至少提高四个数量级。

关键词: 全保偏掺; Er 光纤激光器; SESAM 锁模; 重复频率; 锁定装置; 稳定度

中图分类号: TN24; TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)06-0008-05

Research on Repetition Rate Locking of All Polarization Maintaining Er-doped Fiber Laser

WANG Shaofeng¹, WU Tengfei¹, CAO Shiyong², XIA Chuanqing¹, HAN Jibo¹, ZHAO Chunbo¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Time and Frequency Metrology Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The principle of repetition rate locking technology and the application background of a δ cavity SESAM mode-locked all polarization maintaining Er-doped fiber laser is introduced and a set of experiment device which can quickly lock the repetition rate of SESAM mode-locked all polarization maintaining Er-doped fiber laser is designed. The locking device will finally lock the repetition frequency of laser to the hydrogen maser, so that the stability of the repetition frequency of the fiber laser is the same as the hydrogen maser. The repetition rate stability of the all polarization maintaining Er-doped fiber laser is quantized by using the method of calculating repeated frequency Allan variance. And the stability of repetition rate is compared between the locked laser and the unlocked laser. By comparison, the stability of the repetition rate after locking is at least four orders of magnitude higher than that before locking.

Key words: all polarization maintaining Er-doped fiber laser; SESAM mode-locked; repetition rate; locking devices; stability

0 引言

超短脉冲激光因其具有重复频率较高、脉冲宽度窄等优点, 已在激光技术领域得到了科研工作者的关注。经过多年的发展, 超短脉冲激光在高精度距离测量、高精度器件加工等领域得到较为广泛的应用。随着对超短脉冲激光的深入研究, 光学频率梳^[1]引起了科学家们的重视。光学频率的首次实现使用的是钛宝石激光器^[2], 经过多年的发展, 发现光学频率梳能够实现不同波长的光信号、射频信号、微波信号与光

信号的相位同步, 此种方式简单且效果较好, 这使得精确测量光频率等难题得到了解决^[3-4]。非线性光学和光纤技术的快速发展推动了光纤激光器技术逐渐走向成熟。光纤激光器由于具有体积小、稳定性高等优点, 也被应用于光学频率梳研制上。随着光学频率梳技术的日渐成熟, 在高精度距离测量^[5]、天文研究^[6]等领域重复频率锁定的光纤激光器发挥着越来越重要的作用。光纤飞秒光学频率梳的操作简单、成本低、具有较宽的重复频率调谐范围、且能够长时间稳定运行, 这些优点是钛宝石飞秒光学频率梳所无法达到的。其中, 高稳定的重复频率和载波包络相移是获得光学频率梳的两个关键因素。本文研究的对象就是全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率的锁定问题, 目的是将激光器的脉冲重复频率 f 锁定到原子钟上, 使其具有与原子钟同样的稳定度。

收稿日期: 2017-09-09; 修回日期: 2017-10-23

基金项目: 技术基础科研项目(JSJC201205B003)

作者简介: 王少峰(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事伺服控制方面的研究。

1 原理分析

为更好的了解光学频率梳, 这里先解释一下激光谐振腔中纵模的分布。光学频率梳是由具有较窄脉冲宽度的锁模激光器产生的。高度稳定的脉冲重复频率和载波包络相移是研制光学频率梳的关键。图 1 为锁模激光器输出的脉冲序列的频域图, 可以看出锁模激光器输出脉冲序列形状像一把梳子, 相邻梳齿之间距离相等, 因此被称作光学频率梳。这些梳齿是一系列纵模, 它们与频率轴相对应, 且相邻的两个纵模之间的间隔等于激光器输出脉冲重复频率 f_{rep} 。但一般情况下, 在光学频率梳中, 前后两个脉冲的相位会发生偏移, 导致梳齿频率不再是激光器脉冲重复频率的整数倍。因此在光学频率梳中, 每一个梳齿的频率可以表示为

$$f_n = n f_{\text{rep}} + \delta \quad (1)$$

式中: n 为整数; δ 为偏差频率; f_{rep} 为激光器激光脉冲的重复频率, 且 $\delta < f_{\text{rep}}$ 。纵模频域图如图 1 所示^[7]。

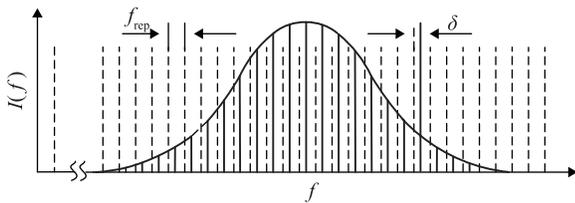


图 1 激光脉冲序列频域图

图 1 中虚线表示以重复频率为单位的数轴, δ 为纵模相对于理想光学频率梳的偏移频率。

在时域上的激光器输出表现为周期为 $1/f_{\text{rep}}$ 的光脉冲序列, 如图 2 所示, 由于激光器腔内色散等因素的影响, 使得载波和包络的相对相位关系发生微小的变化, 即出现了载波包络相移。图中实线为光脉冲序列的载波, 虚线为周期性脉冲包络, 脉冲包络与载波的相位差为 $\Delta\varphi_{\text{ce}} = 2\pi(\delta/f_{\text{rep}})$, 与频域上的脉冲偏移频率 δ 相对应。

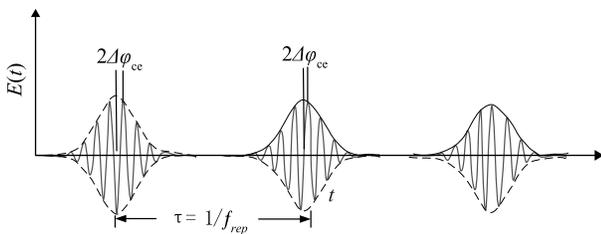


图 2 激光脉冲序列时域图

飞秒激光属于脉冲光, 飞秒激光器重复频率的计算方法因为其谐振腔结构的不同而有所差别, 对于线

型腔飞秒激光器, 其重复频率

$$f_{\text{rep}} = \frac{1}{\tau} = \frac{\nu}{2L} = \frac{c}{2nL} \quad (2)$$

对于环形腔激光器, 其重复频率

$$f_{\text{rep}} = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{nL} \quad (3)$$

式中: ν 为腔内的光脉冲的实际传播速度; L 为激光器腔长; n 为激光器腔内介质的折射率; c 为光速(真空中)。

由式(2)和式(3)可知, 激光器重复频率的调谐可以通过改变其腔长和折射率来实现。

目前, 激光器重复频率锁定方法主要通过压电陶瓷(PZT)改变激光器谐振腔的几何长度 L 来实现, 也可采用控制激光器腔内传输介质折射率的方法^[8], 例如通过挤压改变光纤折射率来影响激光器重复频率。本文的实验对象是 δ 腔型 SESAM 启动锁模的全保偏掺 Er 光纤激光器, 其重复频率的稳定度在未锁定的情况下可达 10^{-8} 量级。在本文的全保偏掺 Er 光纤飞秒激光系统中, 重复频率的控制主要通过控制光纤长度的变化来实现。实验中将激光器振荡腔中的部分光纤粘附在 PZT 上, 通过 PZT 的微小变化来拉伸光纤, 光纤在力的作用下长度产生变化, 进而达到影响激光器的重复频率的目的。将重复频率和参考频率进行混频, 混频器输出的差频信号经环路控制器处理后输出补偿控制信号, 该补偿控制信号是驱动 PZT 的控制信号, 控制 PZT 产生伸缩变化使光纤发生形变, 通过此方式来影响激光器的重复频率, 从而形成了一个闭环系统, 达到实时稳定激光器重复频率的目的。

2 系统结构设计

δ 腔型 SESAM 启动锁模的全保偏掺 Er 光纤激光器的结构和激光器重复频率锁定装置如图 3 所示。在本实验中 SESAM 锁模全保偏掺 Er 光纤飞秒激光器重复频率锁定系统采用的是一个和锁相环结构相类似的伺服控制系统, 主要由光学部分和电学两部分组成。光学部分包括: δ 腔型 SESAM 启动锁模的全保偏掺 Er 光纤激光器及用于改变激光器谐振腔的 PZT; 电学部分包括: 氢原子钟、信号发生器、混频器、环路控制器、自带高压放大的 PZT 驱动、计数器及示波器等。

如图 3 所示, 该激光器是实验中所用的 δ 腔型的全保偏掺 Er 光纤激光器。实验中 980 nm 泵浦源提供的泵浦光经 980/1550 nm 波分复用器(WDM)进入激光器的 δ 腔内。掺 Er 光纤和单模保纤构成了激光器 δ 腔,

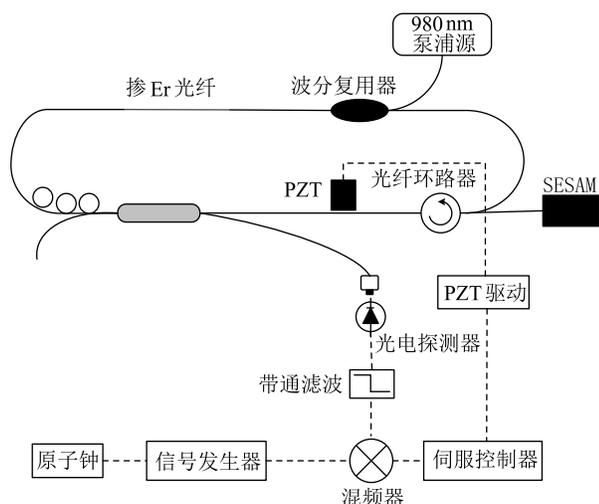


图3 SESAM锁模全保偏掺Er光纤激光器重频锁定整体方案结构图

激光器 δ 腔包括一个环形部分和一个线形部分，环形部分和线形部分通过光纤环路器连接，光纤环路器的单向性使得其同时起到了隔离回光的作用。线形部分末端为半导体可饱和吸收镜(SESAM)，SESAM启动锁模。一般照射在SESAM上的能流密度为SESAM饱和能流密度的两倍时，激光器可以启动锁模。

由图3可知，光电探测器将全保偏掺Er光纤激光器输出的激光脉冲转化为频率为 nf_{rep} 的电信号，带通滤波器滤波获取要锁定的信号频段。由于重复频率的高次谐波中包含更多的相位噪声信息，直接锁定重复频率的高次谐波可以获得更高的稳定度，因此本文实验中锁定的是SESAM锁模全保偏掺Er光纤激光器重复频率的14次谐波，由带通滤波器输出的信号频率是 $14f_{rep}$ 。带通滤波器的输出信号和参考到氢钟上的基准信号混频，得到差频信号作为控制器的输入信号，伺服控制器实质上是一个PI控制器，对差频信号进行PI处理，输出补偿控制信号经过高压放大后来驱动PZT，通过PZT的微小变化来改变拉伸光纤的作用力，使得光纤长度发生变化，因此激光器谐振腔几何长度就发生了变化，由式(3)可知，激光器腔长的变化导致激光器重复频率发生了改变。这样就实现了激光器重复频率的实时控制，使激光器重复频率锁定到原子钟上，与原子钟同样稳定^[9]。

PZT作为执行机构的核心器件，直接影响整个系统的响应特性及最大重复频率偏移。在控制系统中，通过自主设计的机械装置将光纤和PZT固定，通过改变PZT的输入电压值，来调节施加在光纤上的作用力，拉伸光纤，进而改变全光纤激光器谐振腔长度，达到

影响激光器重复频率的目的。通过光学部分的反馈回路，将重复频率的变化量反映至重复频率的高次谐波中，对其进行补偿，减小重复频率的高次谐波与参考信号的误差，实现重复频率锁定。

通过以上分析可知，PZT的选择需要考虑最大位移、响应频率、工作电压范围等多种因素的影响。结合重复频率锁定需求，本系统中选择的PZT是THORLABS公司的PK4GA3H5P2，其具体参数如表1所示。

表1 压电陶瓷驱动器参数指标

参数类型	参数指标
空间尺寸	7.3 mm×8.9 mm×45.0 mm
滞后	<15%
最大位移	(40.0±6) μm
阻力(150 V)	1600N(360lbs)
电容	(5.5±0.825) μF
响应频率	30 kHz(无负载)
工作温度	-25~130 °C
工作电压	0~150 V

由表1可知，PZT的位移伸缩量与加载电压的变化近似呈直线关系，其比例系数为 $k=2.7\times 10^{-7}$ m/V，无负载时共振频率为30 kHz。根据自控原理，响应频率为共振频率的三倍，则其响应频率为90 kHz，响应时间为11 μs。

忽略激光谐振腔内折射率的影响，激光在谐振腔内的传播速度约为光速，则激光器的重复频率可表示为

$$f_{rep} = \frac{v_g}{nL} \approx \frac{c}{nL} \quad (4)$$

根据微分性质，结合式(4)，频率变化与腔长变化的关系如式(5)所示，由于飞秒脉冲激光器自由运转时重复频率为72.25 MHz，代入式(5)中，得到频率腔长变化的关系为 2.61×10^7 Hz/m。

$$\frac{\Delta f_{rep}}{\Delta L} = \frac{c}{nL^2} = \frac{nf_{rep}^2}{c} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)可知，PZT驱动电压和重复频率变化近似的线性关系如式(6)所示。

$$K_{pzt} = \frac{2\pi\Delta f_{rep}k}{\Delta L} = 2\pi \times 2.61 \times 10^7 \times 2.7 \times 10^{-7} = 44.28 \text{ (rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}) \quad (6)$$

由于加载到PZT上的电压最大为150 V，最大移动范围为40 μm，根据式(5)，PZT可使重复频率改变

的最大范围为

$$\Delta f = 2.61 \times 10^7 \times 40 \times 10^{-6} = 1.044 \text{ (kHz)} \quad (7)$$

3 实验结果及分析

图 4 为在泵浦源泵浦功率为 80 mW 时, SESAM 锁模全保偏掺 Er 光纤激光器自由运转下的光谱图。

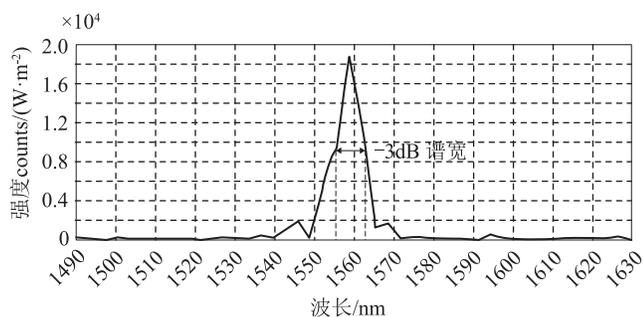


图 4 全保偏掺 Er 激光器光谱图

从图 4 可以看出, 激光器输出光谱的半高宽度在 10 nm 左右。图 5 为锁模激光器自由运转条件下, 采集到的激光器重复频率信号图。根据图 5 中的数据可以看出, 光电探测器采集到的重复频率信号包含本实验所需要的重复频率的 14 次谐波, 且信噪比良好。

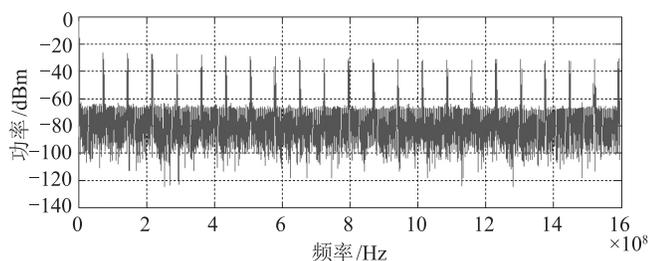


图 5 重复频率测量图

实验中利用计数器对锁定前全保偏掺 Er 光纤激光器的重复频率、锁定后激光器的重复频率以及射频参考频率的数据进行采集^[10]。本文实验中全保偏掺 Er 光纤激光器的泵浦功率为 120 mW, 激光器脉冲重复频率为 72.25 MHz, 为了使激光器重复频率具有更高的稳定性, 本文实验中锁定的是激光器重复频率的 14 次谐波, 14 次谐波的频率达到 1.01 GHz。使用计数器分别对锁定前后重复频率进行采集, 采集时长为 30 min。实验系统的结构图如图 6 所示。

从图 6 中可知, 全保偏掺 Er 光纤激光器输出的激光脉冲经探测器转化为电信号后, 由功分为两路, 一路经带通滤波器获取要采集的信号频段作为采样信号来观测重复频率的变化, 本实验中采集的是重复频率的 2 次谐波, 一路经带通滤波器获取重复频率的 14 次

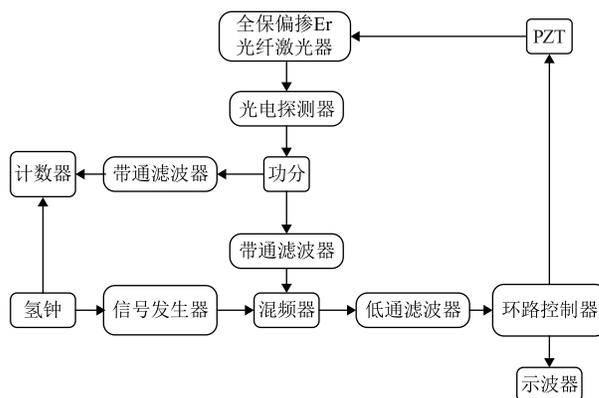


图 6 全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率锁定实验系统结构图

谐波与参考到氢钟上的参考信号混频, 得到的差频信号进行低通滤波后作为控制器的输入信号, 输入的差频信号经控制器处理后输出两路信号, 一路是差频信号的检测信号, 通过示波器监测, 另一路是对差频信号进行比例积分后输出的补偿控制信号, 补偿控制信号在高压放大后驱动 PZT 影响激光器重复频率。

为了直观地反映激光器重复频率在其锁定前后的变化, 使用 MATLAB 对实验数据进行了处理, 图 7 是激光器锁定前和锁定后的重复频率变化曲线。

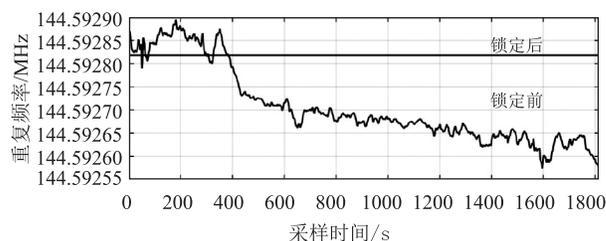


图 7 锁定前后重复频率的变化

由图 7 可知, 激光器重复频率锁定前, 激光器脉冲重复频率的峰-峰值波动范围在百赫兹量级, 稳定性较差。激光器重复频率锁定之后, 重复频率的波动范围小于 3 mHz, 稳定性有了明显的提高。通过对比锁定前后激光器重复频率的稳定性可以看出, 本文实验中所采用的重复频率锁定方法适用于该实验中所使用 SESAM 锁模全保偏掺 Er 光纤飞秒激光器重复频率的锁定, 可以达到将激光器重复频率稳定到原子钟上的目的, 并且取得了较好的锁定效果。从锁定后 30 min 的采集数据可以看出, 锁定装置工作状态良好。

为了更加科学地比较锁定前后全保偏掺 Er 光纤飞秒激光器重复频率的变化, 本文使用求重复频率 Allan 方差的方法对锁定前后激光器重复频率的稳定性进行了量化处理。通过对量化后的数据进行分析, 可以更

加科学地评价锁定前后激光器重复频率的稳定性。图8和图9是绘制的重复频率的Allan方差与采样平均时间的关系图。

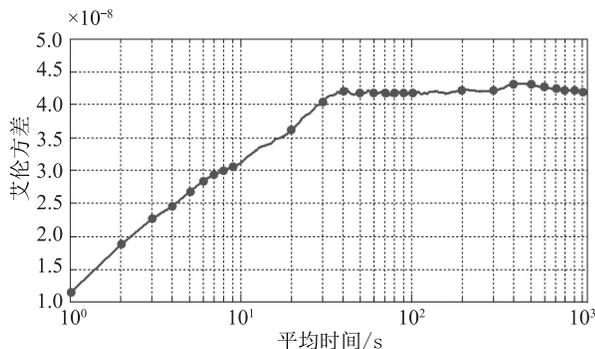


图8 锁定前重复频率艾伦方差

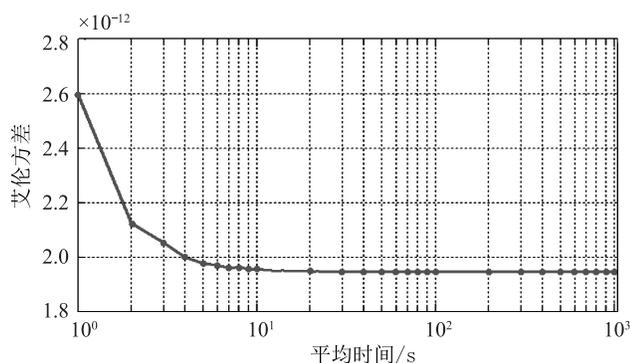


图9 锁定后重复频率艾伦方差

由图8和图9可知,在全保偏掺Er光纤飞秒激光器脉冲重复频率未锁定的情况下,其重复频率的Allan方差在 10^{-8} 量级,并且随着采样时间增大,重复频率的Allan方差值逐渐增大,表明其稳定性在变差,这是因为激光器在外部环境的影响下其重复频率有较为明显的变化,信号发生漂移;而在锁定后,重复频率的Allan方差在 10^{-12} 量级,并且由图9可知重复频率采样时间越大其稳定性越好。通过比较图8和图9可知,在重复频率锁定后全保偏掺Er光纤激光器脉冲重复频率的稳定度变化明显,提高了至少4个数量级,也证明了本文实验搭建的重复频率锁定装置能够很好的适用于全保偏掺Er光纤飞秒激光器重复频率的锁定,实验中设计的光纤与PZT的固定方式也是可行的。

由图7可知,在未锁定的情况下,激光器重复频率的稳定度在 10^{-8} 量级,其波动范围在百赫兹量级,参考信号稳定度在 10^{-12} 量级,在该实验中选用的PZT响应频率为30 kHz,可以满足该系统对激光器重复频率实时控制的要求。光电探测器采用的是EOT公司的高灵敏度超快InGaAs光电探测器ET-3000A(其具有速

度快,噪声低、带宽广等特点);混频器选用了mini公司的无源混频器(相对于激光器重复频率百赫兹量级的变化,该系统可以满足实时控制的需求)。

4 结论

对全保偏掺Er光纤飞秒激光器重复频率的锁定进行了分析与研究,实验中使用的激光器是 δ 腔型全保偏掺Er光纤激光器,由SESAM启动锁模。实验中980 nm泵浦源提供的泵浦光经980/1550 nm波分复用器(WDM)进入激光器的 δ 腔内,激光器 δ 腔由环形部分和线形部分构成,环形部分和线形部分通过光纤环路器连接,线形部分的末端为用于启动锁模的SESAM,激光器中所有光纤和器件都是保偏。根据该激光器的特点,搭建了一套重复频率锁定系统。重复频率锁定系统由氢原子钟、信号发生器、混频器、光电探测器、环路控制器、PZT驱动和PZT执行机构等组成,其中PZT执行机构是本文实验中激光器重复频率锁定的关键。为了验证所搭建重复频率锁定系统的效果,本文进行了激光器重复频率锁定实验,为了获得更高的重复频率稳定度,实验中锁定的是激光器重复频率的14次谐波,采集的是锁定前后的重复频率的2次谐波,采集时长为30 min,最后使用MATLAB对数据进行了处理。

通过对比激光器重复频率锁定前后重复频率的变化曲线和Allan方差发现:在未锁定的情况下,激光器重复频率的波动范围较大,其峰-峰值波动范围在百赫兹量级,重复频率的Allan方差在 10^{-8} 量级,且随着采样时间的增大,重复频率的Allan方差值逐渐增大;在锁定后,激光器重复频率波动范围显著降低,波动范围小于3 mHz,重复频率Allan方差在 10^{-12} 量级,并且随着采样时间的增加,稳定性越来越好。

由此可以得出,本文实验中所搭建的重复频率锁定装置适用于全保偏掺Er光纤激光器的重复频率的锁定,且获得了较好的重复频率锁定效果,验证了通过PZT给光纤施加作用力,拉伸光纤,改变激光器光学谐振腔长度来影响激光器重复频率的可行性,并且通过该实验证明了本文实验中所采用的PZT和光纤的固定方式是可行的。本文实验实现了将全保偏掺Er光纤激光器的脉冲重复频率锁定到氢原子钟上,使得激光器的重复频率获得了和氢原子钟同样的稳定度。并对重复频率锁定前和锁定后的2次谐波进行采样观测,使用求重复频率Allan方差的方法对锁定前后激光器重

(下转第55页)

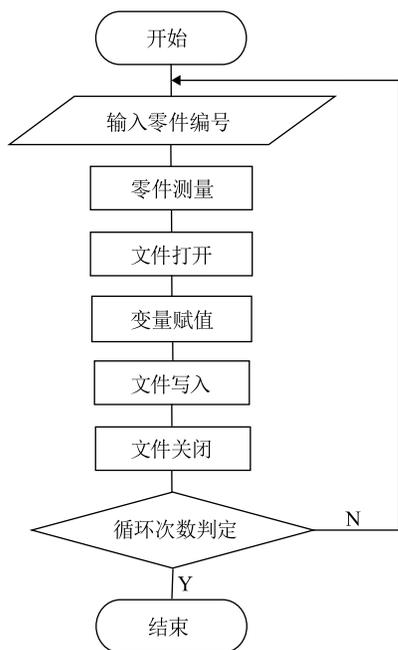


图5 编程流程图

关闭：关闭已打开的磁盘文件，提交对磁盘文件作出的所有更改；⑦循环次数判定：反复运行程序，直至达到设定的循环次数。

利用 PC-DMIS 软件编程，形成该批零件的人工编程模块，加入到零件的测量程序中，形成零件专用测量程序，实现该零件的批量自动测量。

(上接第 12 页)

复频率的稳定性进行了量化处理。比较锁定前后重复频率稳定度变化可知，锁定后其稳定度变化明显，提高了至少 4 个数量级。

参 考 文 献

[1] 曹士英, 方占军, 孟飞, 等. 双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 080601.
 [2] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K et al. Carrier - Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Laser and Direct Optical Frequency Synthesis[J]. Science, 2000, 288: 635-639.
 [3] Touahri D, Nez F, Abed M, et al. LPTF frequency-synthesis chain - results and improvement for the near future [Z]. LPTF 94&CPEM 94, Boulder, CO, Jun, (1994).
 [4] Schnatz H, Lipphardt B, Helmcke J, et al. First Phase-Coherent Frequency Measurement of Visible Radiation [J]. Physical Review Letters, 1996 76(1): 18-21.

3 结 论

经过试验，原来测量 30 件圆筒形零件，一个零件需要测量 20 个参数，采用一次测量 1 个零件的方法，需要运行 30 次程序，更换 30 次零件，记录 600 个数据，30 个编号；现在仅需运行 10 次程序，集中 10 次更换零件，测量中间做到了不停机，测量结果自动文本输出。

这种批量关键零件的测量方案，通过试验确定合理测量点数，设计运用固定夹具、建立坐标系、设计编写程序模块，通过程序化实现零件的多件连续测量，测量结果以文本格式输出，不仅保证了测量精度，提高了测量效率，而且降低测量人员劳动强度和对其工作技能的要求，避免了差错的产生。该方案在大批量零部件测量中，可发挥重要作用。

参 考 文 献

[1] PC-DMIS 参考手册[Z].
 [2] 陈永鹏, 岳晓斌, 曾孝云. 一种基于 MATLAB 的圆度评定方法[J]. 工具技术, 2003, 37(4): 39-42.
 [3] 海克斯康测量技术公司. 实用三坐标测量技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
 [4] 计量测试技术手册编辑委员会. 计量测试技术手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1995.
 [5] 吴翰钟, 曹士英, 张福民, 曲兴华. 光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 020601.
 [6] Wu Yuanjie, Ye Huiqi, Han Jian, et al. Astronomical Laser Frequency Comb for High Resolution Spectrograph of a 2.16-m Telescope[J]. Acta Optical Sinica. 2016, 36(6): 0614001.
 [7] 赵春播, 武腾飞, 梁志国. 飞秒激光器脉冲重复频率的锁定技术研究[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 23-24.
 [8] 罗浆, 杨松, 郝强, 曾和平. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定 [J]. 光学学报, 2017, 37(02): 0206003.
 [9] Razavi B. Phase - Locking in High - Performance Systems, Reprint Volume[M]. New York: IEEE Press, New York and Wiley, 2003.
 [10] 韩海年, 张炜, 王鹏, 等. 飞秒激光频率梳的精密锁定及其对碘稳 532 nm 激光的初步测量 [C]//中国光学学会 2006 学术大会论文摘要集. 北京: 中国光学学会, 2006.