

文章编号:1001-5078(2024)11-1681-07

· 激光应用技术 ·

基于 LabVIEW 的光纤激光器稳频系统设计

刘帆^{1,2}, 郭文阁^{1,2}, 刘丹丹^{2,3}, 阮军^{2,3}, 高玉平³, 张首刚^{2,3}

(1. 西安石油大学, 陕西 西安 710065; 2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 陕西 西安 710600;

3. 中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600)

摘要: 本文利用工控机、NI 数据采集卡、外围光路搭建激光稳频硬件系统, 以调制转移光谱技术为基础, 使用 LabVIEW FPGA 开发了一套单频光纤激光器数字稳频控制软件。基于调制转移光谱产生的伺服控制信号, 通过采集误差信号, 经 PI 处理后控制压电陶瓷伸缩, 将 780 nm 的激光频率锁定在铷原子的超精细跃迁谱线上。Allan 方差结果显示, 短期稳定度为 $1.52 \times 10^{-11} @ 10 \text{ s}$; 长期稳定度优于 $1.56 \times 10^{-11} @ 100000 \text{ s}$, 可连续运行 20 天以上。该数字稳频软件利用图形化编程语言, 大大节约开发周期, 操作界面直观简洁, 方便用户分析处理。已成功应用于铷 87 喷泉钟系统中, 且该稳频系统具有通用性, 可应用于原子干涉仪、激光陀螺仪等精密测量领域。

关键词: 单频光纤激光器; 调制转移光谱; LabVIEW FPGA; 数据采集卡; 数字稳频

中图分类号: TN249; TN911.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.005

Design of LabVIEW-based fiber laser frequency stabilization system

LIU Fan^{1,2}, GUO Wen-ge^{1,2}, LIU Dan-dan^{2,3}, RUAN Jun^{2,3}, GAO YU-ping³, ZHANG Shou-gang^{2,3}

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: In this paper, the laser frequency stabilization hardware system is built using an industrial computer, NI data acquisition card and peripheral optical path, and a set of digital frequency stabilization control software for single-frequency fiber laser is developed using LabVIEW FPGA. Based on the servo control signal generated by the modulated transfer spectrum, the 780 nm laser frequency is locked to the ultrafine jump spectral line of rubidium atoms by acquiring the error signal and controlling the piezoelectric ceramic expansion and contraction after PI processing. Allan variance results demonstrate that a short-term frequency stability precision of $1.52 \times 10^{-11} @ 10 \text{ s}$, and the long-term stability is better than $1.56 \times 10^{-11} @ 100000 \text{ s}$, with continuous operation for over 20 days. This digital frequency stabilization software employs a graphical programming language, which significantly reduces development cycles, presenting an intuitive and concise user interface for convenient analysis and processing. It has been successfully applied to the rubidium 87 fountain clock system and possesses versatility for applications in precision measurement fields such as atomic interferometers and laser gyroscopes.

Keywords: single-frequency fiber laser; modulation transfer spectroscopy; LabVIEW FPGA; data acquisition card; digital frequency stabilization

基金项目: 西安石油大学创新与实践能力培养计划项目 (No. YCS23113085); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目 (面上) (No. 2023-JC-YB-078) 资助。

作者简介: 刘帆 (1997 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光与光电子技术。E-mail: liufan@ntsc.ac.cn

通讯作者: 郭文阁 (1967 -), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光电子技术。E-mail: wguo@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-11; **修订日期:** 2024-03-27

1 引言

光纤激光器具有输出功率高、光束质量好、结构紧凑、稳定性优良的特点被广泛用于光通信、激光冷却、冷原子频标等领域^[1-2]。但它容易受到温度、湿度、气压、振动的影响,使激光频率发生抖动和漂移,影响激光频率的稳定性,因此通过主动稳频技术,并结合数字化反馈控制,可以实现光纤激光器的锁定。目前,国内外的激光稳频研究普遍采用数字化控制的方法,文献[3]中介绍了基于单片机(Microcontroller Unit, MCU)控制的自动稳频系统,但受限于MCU的性能,难以实现复杂数字算法。文献[4]提出了基于数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)和无限脉冲响应滤波器(Infinite Impulse Response Filter, IIR),进行数字反馈的自动稳频系统,并成功应用于空间冷原子钟原理样机地面实验中。文献[5]讨论了应用于冷原子喷泉钟的激光光源,选用1560 nm 光纤激光器,经放大、倍频得到780 nm 激光,实现秒级频率稳定度为 2.3×10^{-12} ,但该光学系统平台较大,不利于原子钟的小型化。文献[6]报道了基于STEMlab平台搭建的自动稳频系统,采用调制转移光谱技术和频率锁相环技术(Phase Lock Loop, PLL),实现线宽压窄至52 kHz。文献[7]报道了由单片机控制回路、调制解调电路、比例积分微分(Proportional Integral Differential, PID)反馈电路组成的嵌入式稳频控制系统,已成功应用于可搬运铷原子喷泉钟中并可连续锁定一个月以上。文献[8]详述了基于调制转移光谱稳频技术的稳频系统,该系统积分时间1 s的Allan方差为 1.18×10^{-11} ,但该系统仅采用PID模块,并未结合数字稳频技术,难以实现高性能的自动稳频。

本文针对调制转移光谱技术设计了一套集成于光路盒中的光纤结构光路系统,成功获得了斜率较大且具有平坦过零背景的误差信号。采用PCIe(Peripheral Component Interconnect Express)-7841R(NI公司,美国)内嵌FPGA(Field Programmable Gate Array)芯片的数据采集卡与工控机结合的方式作为数据采集和控制的核心,针对商用780 nm单频光纤激光器(上海科乃特激光科技有限公司, VENUS系列),构建了一套数字稳频控制系统。该系统利用LabVIEW FPGA技术高速处理误差信号,经过PI反馈控制实现激光频率锁定。相较于基于

MCU、STEMlab和DSP技术的稳频系统,LabVIEW FPGA具有高速数字并行处理能力和实时性能,节约了开发周期,并通过图形化的操作界面和数字信号处理算法,便于调控和高效稳频。Allan方差结果显示,短期稳定度为 1.52×10^{-11} @10 s;长期稳定度优于 1.56×10^{-11} @100000 s,可连续运行20天以上。该稳频系统采用全数字控制,稳频性能优良,集成度较高,可实现长时间稳定锁定,已成功应用于铷87喷泉钟系统中。

2 工作原理

实验选用1560 nm单频种光源,经放大、倍频后获得780 nm激光,采用调制转移光谱技术,将激光器的频率锁定到⁸⁷Rb原子D2线的超精细谱线 $5^2S_{1/2}F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}F'=3$ 上实现激光频率的稳定。⁸⁷Rb原子D2线超精细结构跃迁图1所示,利用调制转移光谱稳频技术能有效地消除多普勒本底信号,并通过额外的外部调制方式降低了对激光器的附加噪声。

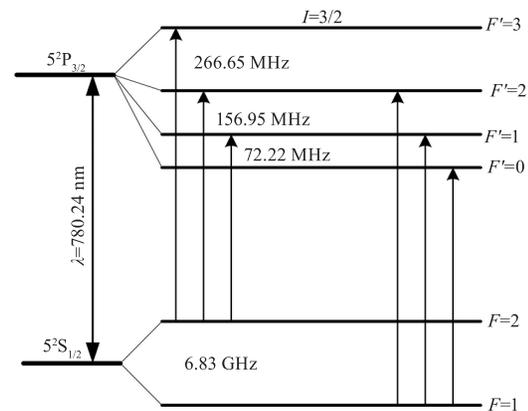


图1 ⁸⁷Rb原子D2线超精细结构跃迁图

Fig. 1 Hyperfine structure transition diagram of ⁸⁷Rb atomic D2 line

实验工作环境温度为26.7℃,湿度为57%,780 nm单频光纤激光器的电流源工作温度25.27℃,泵浦电流为1.860 A,泵浦光功率为40 mW。该稳频系统包括三部分:光路系统、数据采集反馈系统、用户交互系统。激光稳频系统如图2所示。

光路系统主要用于产生调制转移光谱信号,接收经处理后的调制电压进行反馈控制。激光器内置1560 nm单频种子源经光纤放大器和倍频晶体模块输出780 nm单频信号光,通过FOC光纤分束器将激光分为两束光,一束为探测光,一束为泵浦光,探测光经过二分之一波片,改变激光的偏振

状态,照射进入铷泡。泵浦光经过 EOM(电光调制器)外加信号发生器输出 4 MHz 的频率调制,产生调制边带,与探测光对向照射进入铷泡,进行饱和吸收,当探测光与泵浦光的频率在铷泡中发生近简并四波混频后,泵浦光上的调制信号会转移到无调制的带有饱和吸收信号的探测光上。探测光将带调制边带的光通过 BS(分光棱镜),用 PD(光电探测器)探测得到调制转移光谱信号,光电探测器将光信号转化成电信号,产生光外差拍频电流。AWG(函数/任意波形发生器)的调制信号与探测光经过光电探测器转换的电信号进入混频器,进行混频、解调。

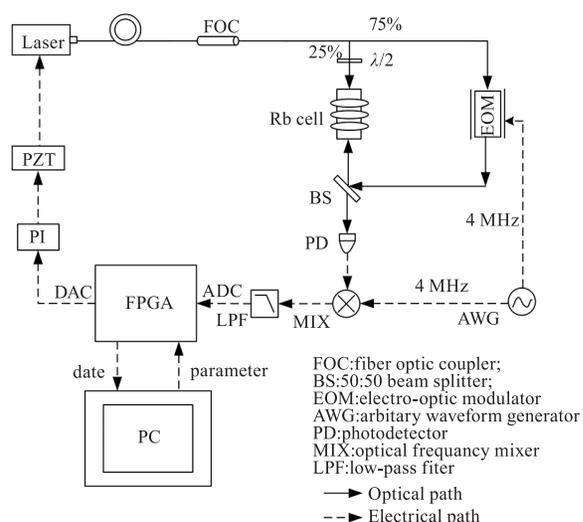


图2 激光稳频系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the laser frequency stabilization system

数据采集反馈系统首先将光路系统产生的解调信号通过低通滤波器输出,调制转移光谱信号作为误差信号经模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)转换,再由内接在工控机上的 PCIe-7841R 采集卡采集,通过数据采集卡内嵌的 FPGA 芯片进行比例-积分运算,运算数据经过数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)转换输送至激光器的压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT)端,反馈电压驱动激光器的 PZT 实现激光频率的稳定。

用户交互系统在 Host. vi 与 FPGA. vi 之间传递数据,Host. vi 用户界面用于显示高速采集和稳频运算的数据结果,允许修改和调用系统参数和相关控件,同时支持系统功能的升级和更新。FPGA. vi 负责系统精确定时、高速数据采集和同步 A/D、D/A 转换,以满足数字信号处理和数字协议应用的需求。

3 系统硬件及软件

3.1 系统硬件选型

本实验选用的激光器为上海科耐特激光科技有限公司生产的 VENUS 系列 780 nm 单频光纤激光器,其内置 1560 nm 单频种子源、1560 nm 单频光纤放大器、倍频晶体模块和温控模块,输出 780 nm 单频信号光及 1560 nm 种子检测光。工控机选择的是具有 PCIe 总线结构的工控机。工控机内部选择了美国国家仪器(NI)公司生产的 PCIe-7841R 高性能数据采集卡,该数据卡通过 PCI Express 插槽与工控机连接。其板载的 FPGA 芯片有强大的代码容量和代码执行速度,并能快速的实现复杂数字信号的处理。有 8 个模拟输入通道,16 位分辨率,每通道最大采样速率为 200 kS/s。8 个模拟输出通道,最大更新速率为 1 MS/s,96 个数字输入输出通道,可配置为输入、输出、计数器或自定义逻辑,每通道速率高达 40 MHz。通过转接电缆将数据采集卡与 SCSI-68 转接模块相连接,转接模块用于与外部设备的连接,本实验用到 1 路模拟输入通道和 1 路模拟输出通道。

3.2 系统软件介绍

LabVIEW 是美国国家仪器有限公司最核心的软件产品。LabVIEW 是一种编程语言,与其他常见的编程语言相比,最大的特点在于它是一种图形化编程语言,它不仅在程序界面设计上采用了与其他高级语言类似的图形化方式,而且在编写程序代码、实现程序功能的同时,使用了图形化操作。目前,主流的测试仪器、数据采集设备都拥有专门的 LabVIEW 驱动程序,通过 LabVIEW 控制模块如:LabVIEW DSC、LabVIEW FPGA 可以便捷的控制硬件设备^[9]。现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGA)是一种可以重复编程的逻辑器件,因其处理性能优越、重构性高、功耗低、实时性强而被广泛应用^[10]。本实验使用了 LabVIEW 中的 FPGA 模块功能,用图形化的编程语言完成对 FGPA 的开发,极大的简化了 FPGA 的复杂设计问题。LabVIEW FPGA 还提供了高度集成的开发环境、IP 库、高保真模拟器和调试功能,使设计者能够更高效、更有效地设计复杂系统。用户可以创建嵌入式 FPGA. vi 来直接访问 I/O,并利用用户定义的 LabVIEW 逻辑,对定制的硬件进行编程,以满足数字协议通信、硬件在环仿真和快速控制原型等

应用的需求^[11]。

4 系统软件开发及实验结果

本文设计的程序主要功能包括 Host. vi 与 FPGA. vi 的数据传输、MTS 谱线扫描、锁频。下面就数字锁频系统的三个主要模块:扫描模块、数据传输模块、锁频模块进行详细介绍。

4.1 扫描模块

扫描模块包括模拟输出任务和模拟输入任务且不需要严格的同步要求,具体过程为:在 FPGA. vi 中创建 FPGA I/O 节点,打开模拟输入通道 AI₁ 和模拟输出通道 AO₁。在 Host. vi 中调用编译好的 FPGA. vi 中的模拟输入输出通道,并结合条件结构中的 For 循环,可以实现每次模拟输出通道 AO₁ 输出一个电压值,模拟输入通道 AI₁ 都会采集到对应的误差信号。扫描模块包括了对扫描电压的上下限进行设置,扫描范围长度,计算出相邻采样点的间隔,也可以设置采

样程序的循环速率,来改变信号的频率。

将扫描电压及误差信号的数据保存到一维数组中,根据误差信号的最大值和最小值,计算误差信号对应的 PZT 扫描电压值。采集的误差信号及扫描程序如图 3 和图 4 所示。

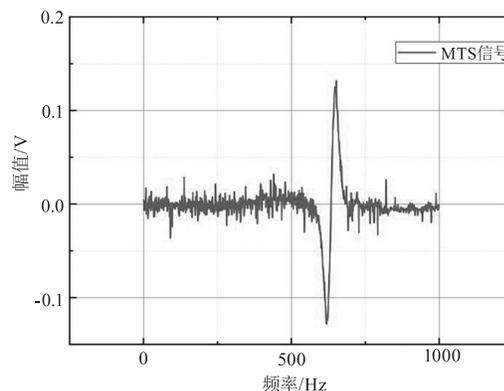


图 3 MTS 扫描波形图

Fig. 3 MTS scanning waveform chart

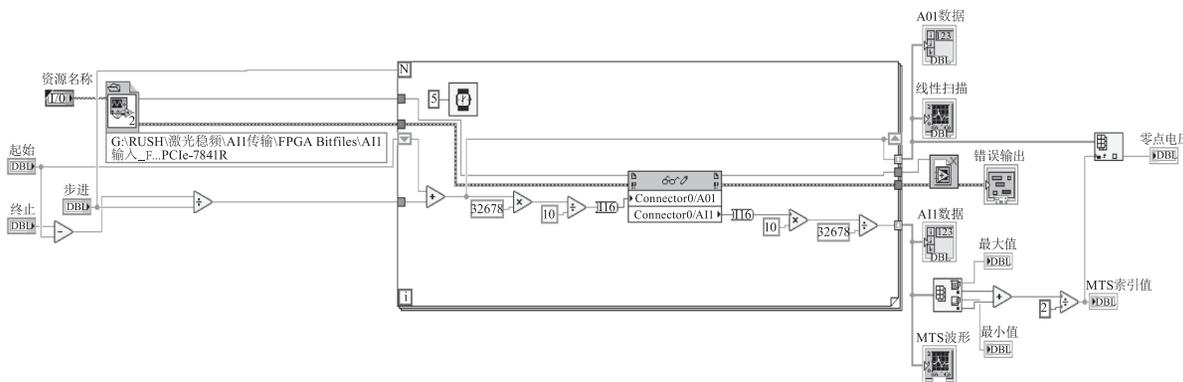


图 4 扫描模块程序图

Fig. 4 Schematic diagram of the scanning module program

4.2 数据传输模块

数据传输模块负责实现 Host. vi 与 FPGA. vi 之间的同步数据传输,包括扫描阶段的 MTS 信号及稳频过程中经 PI 运算产生的调制信号。为了实现数据同步传输,在 FPGA. vi 和 Host. vi 之间高速数据传输时,必须使用缓冲区进行数据缓存。在同步的高速数据传输中,我们采用了直接存储器(DMA) FIFO 存储机制。FIFO(First In First Out)代表一种先入先出的数据结构^[12],在 FPGA. vi 和 Host. vi 之间都有对应的 FIFO 控件。FPGA. vi 通过 PCIe 总线将数据直接传输到 Host. vi 存储器中,由于 Host. vi 开辟了储存空间,因此可以传输大量的数据。当 FPGA. vi 将数据传输到 Host. vi 存储器时,Host. vi 处理器开始处理数据,以防止消息队列的堆积。具体过程如下:

在 FPGA. vi 中创建 FIFO,将 FIFO 类型设置为“终端至主机 - DMA”,同时,FPGA. vi 将数据存入 FPGA 的 FIFO 中,并将经过打包好的数据发送到 Host. vi 的存储器中。FPGA. vi 程序如图 5 所示。

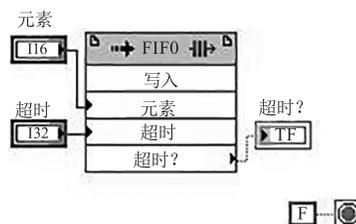


图 5 FPGA. vi 程序

Fig. 5 FPGA. vi program

在 Host. vi 中创建读取 FIFO 控件,并配置读取的深度,这样就可以从 Host. vi 开辟的存储器中按照先入先出顺序读取 FPGA. vi 上传的数据。Host. vi 程序如图 6 所示。

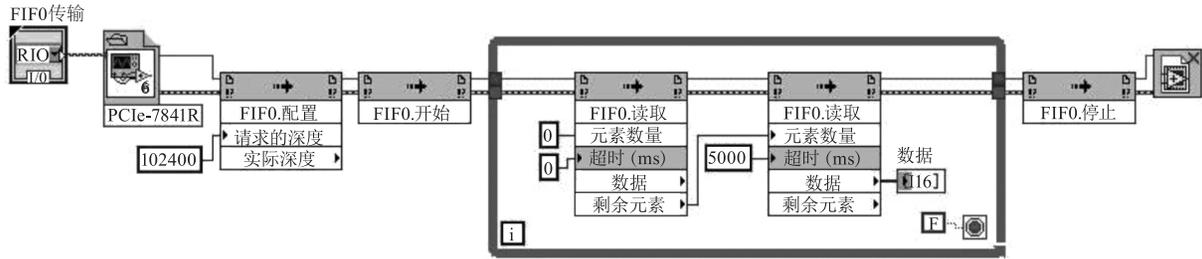


图6 Host.vi 程序

Fig.6 Host.vi program

4.3 锁频模块

锁频模块利用的是比例 (Proportional)、积分 (Integral) 和微分 (Derivative) 控制, 即 PID 控制算法^[13]。PID 的控制原理如图所示, 其中 $r(t)$ 为系统输入参数; $y(t)$ 为系统输出参数; $e(t)$ 为系统误差; $u(t)$ 为经过 PID 运算后的系统控制参数, PID 控制原理图如图 7 所示。

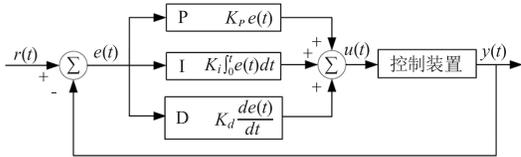


图7 PID 控制原理图

Fig.7 Schematic diagram of PID control principles

PID 算法的数学表达式为^[14]：

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

也可以整理为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

其中, K_p 为比例系数; K_i 为积分时间常数; K_d 为积分时间常数。

本次实验使用比例和积分两种控制算法的组合 (即 PI 控制), 由于通过光路系统解调后的误差信号是一次微分信号, 所以一次微分信号经过 PI 运算可以用于激光频率的锁定^[15]。又由于计算机处理数据时是采用离散数据进行运算, 故 PI 运算需要做如下近似：

$$u(t) \approx u(k) \quad (3)$$

$$e(t) \approx e(k) \quad (4)$$

$$\int_0^t e(t) dt \approx \sum_{j=0}^k T e(j) \quad (5)$$

经近似转换后的 PI 运算的学表达式为：

$$u(k) = K_p e(k) + k_i \int_{i=0}^k e(j) \quad (6)$$

由 PI 控制算法编写的, 基于 LabVIEW FPGA 模块下的 PI 控制程序, 如图 8 所示。将零点电压作为稳频控制起始量, 模拟输入通道 AI₁ 的误差信号作为系统变量, 通过 PI 运算得到稳频信号, 并通过模拟输出通道 AO₁ 输出。

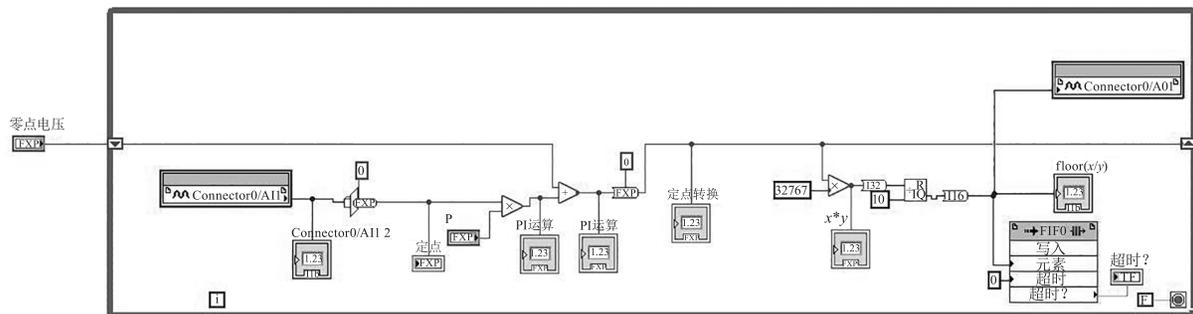


图8 PI 控制程序图

Fig.8 Schematic diagram of PI control program

4.4 软件流程

锁频软件主要包括两部分: 1. 扫描得到误差信号, 找到斜率最大的点记作零点, 并通过计算得到零点对应的电压值。2. 关闭扫描, 进行锁频操作。稳

频系统流程图如图 10 所示。

具体的稳频流程如下：

1) 在开始运行锁频程序前, 首先在 Host.vi 的前面板中设置起始电压, 终止电压和扫描范围, 点击

程序开始运行按钮;

2) 扫描完毕,判断 Host. vi 前面板是否显示得到 MTS 信号,若没有得到完整的 MTS 信号则重新调整扫描电压范围进行扫描;

3) 将 MTS 信号及扫描电压数据以一维数组形式储存,并通过数组索引得出 MTS 信号的峰值索引值;

4) 将峰值索引求和取均值后得到 MTS 信号中斜率最大点(即零点)的数组索引值,将该值输入到扫描电压一维数组中,索引得到对应的 PZT 扫描电压值;

5) 关闭 MTS 扫描,Host. vi 自动选择“稳频控制”条件,将 FPGA. vi 切换到稳频控制状态;

6) 误差信号经过模数转换器(ADC)转换,通过 FPGA 高速采集并进行 PI 运算,实现误差信号的稳定;

7) 稳频信号经过数模转换器(DAC)转换,以调制电压的方式实时补偿激光器的 PZT,实现激光频率的稳定。

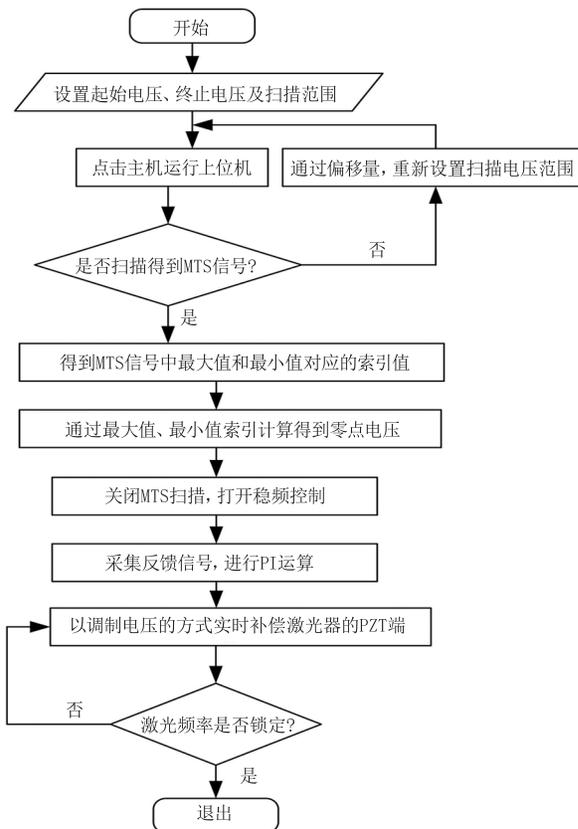


图 9 稳频系统流程图

Fig. 9 Flowchart of the frequency stabilization system

通过 Host. vi 前面板实时观察稳频状态,激光稳频显示界面如图 10 所示。

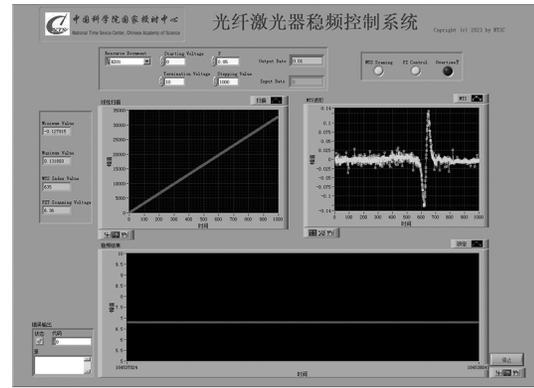


图 10 激光稳频显示界面图

Fig. 10 Laser frequency stabilization display interface

4.5 实验结果

为了得到单频光纤激光器激光频率的稳定性,实验采用调制转移光谱技术将另一台相同型号的光纤激光器锁定后进行拍频,两台激光器拍频信号经低通滤波后,由频率计数器采集频率偏差数据,采样时间间隔为 10 s,连续采样二十天以上,频率稳定度结果如图 11 所示,Allan 方差结果显示,短期频率稳定度为 $1.52 \times 10^{-11} @ 10 \text{ s}$,长期稳定度优于 $1.56 \times 10^{-11} @ 100000 \text{ s}$,优于基于调制转移光谱技术的外腔半导体激光器稳频系统一个量级^[16]。

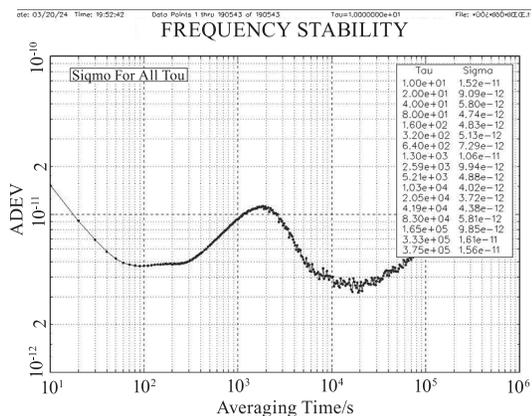


图 11 两台光纤激光器拍频后的频率稳定度

Fig. 11 Frequency stability after beat frequency measurement of two fiber lasers

5 结论

本文基于调制转移技术为设计了一套高度集成的光纤结构光路系统,获得了无 Doppler 噪声,信噪比良好且斜率较大的误差信号。利用 FPGA 芯片为核心,搭建了一套基于 LabVIEW FPGA 的激光稳频控制系统,实现了自动扫描获得误差信号、Host. vi 与 FPGA. vi 的无损数据传输、数字反馈稳频等功能。该稳频系统界面简洁易于操作,升级维护方便,

可连续运行 20 天以上。Allan 方差结果显示,短期稳定度为 $1.52 \times 10^{-11} @ 10 \text{ s}$,长期稳定度优于 $1.56 \times 10^{-11} @ 100000 \text{ s}$ 。已成功应用于铷 87 喷泉钟系统中,且该稳频系统具有通用性,可应用于原子干涉仪、激光陀螺仪等精密测量领域。

参考文献:

- [1] Yang Jingwen, Zhang Peipei, Lv Xiaoying. Study on localization single-mode high power fiber laser[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(3): 318 - 321. (in Chinese)
杨敬文, 张培培, 吕晓英, 等. 国产化单纤高功率光纤激光器的研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(3): 318 - 321.
- [2] Yuan Dandan, Hu Zhuling, Liu Honghai, et al. Research of laser frequency stabilization [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 22 - 28. (in Chinese)
苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 22 - 28.
- [3] Zhang Yin, Wang Qing. Research of automatic frequency stability diode laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 18 - 22. (in Chinese)
张胤, 王青. 自动稳频半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 18 - 22.
- [4] Xiang Jingfeng, Wang Liguang, Li Lin, et al. Automatic frequency stabilization system of external cavity diode laser based on digital signal processing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 146 - 154. (in Chinese)
项静峰, 王利国, 李琳, 等. 基于 DSP 技术的外腔半导体激光器自动稳频系统[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 146 - 154.
- [5] Wang Xinwen, Xiang Jingfeng, Peng Xiangkai, et al. Light source of rubidium cold atomic clock based on fiber laser amplification and frequency doubling [J]. 2019, 39(9): 229 - 235. (in Chinese)
王新文, 项静峰, 彭向凯, 等. 基于光纤激光放大倍频的冷原子钟光源[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 229 - 235.
- [6] Preuschoff T, Schlosser M, Birkl G. Digital laser frequency and intensity stabilization based on the STEMLab platform (originally Red Pitaya) [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8): 083001.
- [7] Ji Jingwei, Cheng Henan, Zhang Zhen, et al. Automatic laser frequency stabilization system for transportable ^{87}Rb fountain clock [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 163 - 169. (in Chinese)
吉经纬, 程鹤楠, 张镇, 等. 可搬运铷喷泉原子钟全自动激光稳频系统[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 163 - 169.
- [8] Qi Hanghang, Yang Bowen, et al. Narrow linewidth laser system for integrating sphere cold atom clock [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 250 - 254. (in Chinese)
齐航航, 杨博文, 赵浩杰, 等. 应用于积分球冷原子钟的窄线宽激光稳频系统[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 250 - 254.
- [9] 阮奇桢. 我和 LabVIEW. 第 2 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [10] Wu Yang, Xu Guangping, Geng Lin, et al. Laser echo data acquisition and transmission system based on FPGA [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(11): 1345 - 1351. (in Chinese)
吴洋, 徐广平, 耿林, 等. 基于 FPGA 的激光回波数据采集与传输系统[J]. 激光与红外, 2020, 50(11): 1345 - 1351.
- [11] Peng Xiaoping, Wang Wenyi, Yi Jiangyi. Feature and design of flows testing and control system based on LabVIEW FPGA [J]. Industrial Control Computer, 2007, (5): 22 - 23. (in Chinese)
彭小平, 王文杰, 易江义. LabVIEW FPGA 模块在测量控制系统中的开发流程及特点[J]. 工业控制计算机, 2007, (5): 22 - 23.
- [12] Cao Ning, Xu Youxing, Zhu Qingsong. Research on the displacement control method of piezoelectric actuator by LabVIEW FPGA module [J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(3): 222 - 224. (in Chinese)
曹宁, 许有熊, 朱松青. 基于 LabVIEW FPGA 的压电陶瓷驱动器位移控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(3): 222 - 224.
- [13] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. Dyn. Sys. Meas. Control, 1993, 115(2B): 220 - 222.
- [14] Jin Qi, Zheng Zhijie. PID control principle and techniques of parameter tuning [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2008, (5): 91 - 94. (in Chinese)
金奇, 邓志杰. PID 控制原理及参数整定方法[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, (5): 91 - 94.
- [15] Liu Dandan, Wu Changjiang, Ruan Jun, et al. Automatic locking system of extended cavity diode laser based on LabwindowsCVI [J]. Journal of Time and Frequency, 2010, 33(2): 98 - 102, 102. (in Chinese)
刘丹丹, 吴长江, 阮军, 等. 基于 LabwindowsCVI 的外腔半导体激光器数字稳频系统设计[J]. 时间频率学报, 2010, 33(2): 98 - 102, 120.
- [16] Xu Zhengyi, Peng Xinxin, Li Lianhuan, et al. Modulation transfer spectroscopy for frequency stabilization of 852 nm DBR diode lasers [J]. Laser Physics, 2020, 30(2): 025701.