

基于数字闭环控制的光锁相环稳频技术研究

周天乐, 张 荣

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

本文设计了一种基于声光移频器(AOFS)的光学锁相环系统, 实现了DFB半导体激光器与窄线宽光纤激光器的频率锁定。系统采用高速数据采集卡获取主从激光器的相位与频率误差信号, 并结合PID控制策略调节本振激光器。同时引入AOFS作为快速精密调谐元件, 提升了系统的环路带宽和相位噪声抑制能力。本文首先从理论上分析了系统的工作原理, 建立了包含噪声因素的仿真模型, 并对锁相性能进行模拟验证。实验结果进一步证实了系统的有效性, 显示出良好的频率稳定性和抗干扰能力。

关键词

光学锁相环, 声光移频器, 激光器频率稳定度

Research on Frequency Stabilization Technology of Opto-PLL Based on Digital Closed Loop Control

Tianle Zhou, Rong Zhang

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 15th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

In this paper, an optical phase-locked loop (PLL) system based on acousto-optic frequency shifter (AOFS) is designed to realize the frequency locking of DFB semiconductor laser and narrow linewidth fiber laser. The system uses a high-speed data acquisition card to obtain the phase and frequency error signals of the master-slave laser, and adjusts the local oscillator laser with PID control strategy. At the same time, AOFS is introduced as a fast precision tuning element to improve the loop bandwidth and phase noise suppression ability of the system. In this paper, the working principle

of the system is analyzed theoretically, the simulation model including noise factor is established, and the phase-locked performance is simulated and verified. The experimental results further confirm the effectiveness of the system, showing good frequency stability and anti-interference ability.

Keywords

Optical Phase-Locked Loop, Acousto-Optic Frequency Shifter, Laser Frequency Stability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锁相环是一种基于负反馈原理的闭环控制系统,常见的锁相环通常是电信号锁相环,处理电学信号。光学锁相环是在电学锁相环基础上,将其应用于光学信号的锁相环。光学锁相环能够将激光器频率稳定到另一稳定参考频率上,使从激光频率和相位主动跟踪主激光的频率和相位,保持两者的频率差稳定[1]。

光锁相环的研究起步于1964年,Enloe等人首次利用激光锁相环装置成功实现了两路单频He-Ne激光器的锁定[2]。国内有关光学锁相环的研究起步较晚,2014年,岳浩进行了零差平衡锁相环的相干光通信实验,测得在通信速率为1.25 Gbps时,其接收灵敏度为-51 dBm,且误码率为 9.72×10^{-5} [3]。2019年,冯丽爽等人进一步设计全光纤外差式OPLL系统,提出抑制激光器相对频率噪声的方案,完成全数字反馈控制环路设计与实验验证[4]。2019年,姚佳彤研究了双光梳锁相技术及其在多通道射频下变频中的应用,设计并实现了500 MHz外差光锁相环,完成了双光梳相位锁定实验,验证了DC至11.3 GHz射频信号的多通道并行下变频方案的可行性[5]。2021年,王恒在实时数据采集和辨识的基础上设计了一种基于数据采集卡的光学平衡锁相环,对两个窄线宽光纤激光器进行锁定。实验激光器频率稳定度达到 10^{-11} ,相比自由运行激光器提高了3个量级[6]。

分布反馈(Distributed Feedback, DFB)半导体激光器具有体积小、成本低和工艺成熟等优势,在相干通信[7]、高精度光谱学、引力波探测[8]等领域有着大量需求,但兆赫兹量级的线宽以及较低的频率稳定度使其应用范围受限。光学锁相环作为一种主动激光稳频技术,能够有效提高激光器的频率稳定性。本文拟研究的外差式光学平衡光锁相环,在传统的光学平衡锁相环的基础上加入了声光移频器作为激光器的快速精密调谐元件,并且使用高速数据采集卡和高速数字频率解调处理单元完成两路激光器间相位和频率误差信号的识别及本振激光器的反馈控制,将DFB半导体激光器锁定到频率稳定度较高的光纤激光器上。当前常见的激光稳频技术主要包括Pound-Drever-Hall(PDH)技术、光学谐振腔锁频、自注入锁定以及光学锁相环(OPLL)等。PDH技术具备极高的频率稳定度,适用于高精度测量场景,但系统复杂度较高,对谐振腔的稳定性和光学器件匹配提出了较高要求;自注入锁定方法结构简单、响应速度快,但稳定性相对较差,容易受到外界扰动影响;光学谐振腔锁频方法虽然稳定性好,但调谐范围受限,难以实现快速宽带调节。

与上述方法相比,本文提出的基于声光移频器(AOFS)的数字闭环控制OPLL技术结合了快速调谐与高精度控制的优点,通过高速数据采集与双PID控制策略,实现了从频率粗调到微调的动态切换,有效提高了系统的锁定效率与频率稳定性,具备较强的工程应用潜力。

2. 光学锁相环的基本原理

传统电学锁相环主要包含鉴相器、环路滤波器与压控振荡器三部分。光学锁相环与传统电学锁相环

有着相类似的结构, 其基本结构如图 1 所示, 由光鉴相器、环路滤波器和光压控振荡器三个部分组成。其中光鉴相器是由光混频器以及平衡探测器组成, 由平衡探测器组成的光学锁相环也叫作平衡锁相环[9]。光压控振荡器本质上是一个电压与光频率的转换器, 在光学锁相环中即可调谐激光器。光混频器的输入为信号光和本振光, 输出混频后光信号, 经光电探测器转换为电信号, 经环路滤波器滤除高频信号, 得到反馈控制电压信号, 通过控制调谐激光器输出本振光信号, 实现闭环频率控制。

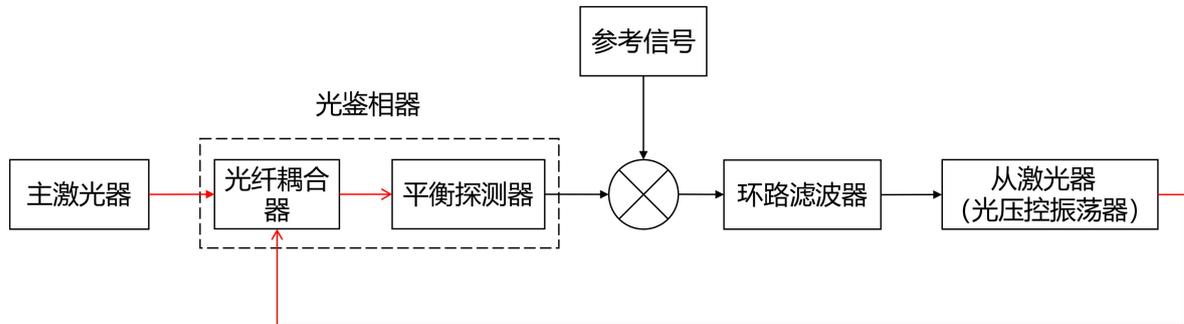


Figure 1. Basic structure of optical phase-locked loop

图 1. 光学锁相环的基本结构

主从激光器光束经 2×2 光纤耦合器后进入平衡探测器, 输出包含频率和相位差信息的电信号, 该信号与参考信号在混频器中混频。随后进入环路滤波器, 该滤波器滤除高频干扰和抑制环路噪声, 并保留下变频信号, 同时调节反馈电压大小, 最终目的是实现对从激光器输出光频率的精确控制。

主激光器输出为 E_L , 从激光器输出为 E_M , 具体表达式为:

$$E_L = \sqrt{P_L} \exp[i(\omega_L t + \phi_L)] \quad (1)$$

$$E_M = \sqrt{P_M} \exp[i(\omega_M t + \phi_M)] \quad (2)$$

式中, P_L 为主激光器的输出光功率、 P_M 为从激光器输出光功率、 ω_L 为主振激光器的瞬时频率、 ϕ_L 为主激光器的初始相位、 ϕ_M 为从激光器的初始相位。主激光器与本振激光器的光通过光纤耦合器后的光场分别为 E_1 、 E_2 , 其表达式为:

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_L + E_M) \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_L - E_M) \quad (4)$$

为了便于后续分析, 我们首先设定平衡探测器的光电转换效率为 r , 则由该探测器产生的光电流可表示为如下形式:

$$I_1(t) = rE_1E_1^* = \frac{r}{2} \left\{ P_M + P_L + 2\sqrt{P_M P_L} \exp \left[i(\omega_M - \omega_L)t + \phi_M - \phi_L - \frac{\pi}{2} \right] \right\} + n_1(t) \quad (5)$$

$$I_2(t) = rE_2E_2^* = \frac{r}{2} \left\{ P_M + P_L + 2\sqrt{P_M P_L} \exp \left[i(\omega_M - \omega_L)t + \phi_M - \phi_L + \frac{\pi}{2} \right] \right\} + n_2(t) \quad (6)$$

式中, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别代表两个光电二极管的噪声, 且两者互不相关。光电流经光电二极管转化为电压信号, 记为 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 。经过对这两个信号进行差分运算处理, 可以获得代表探测器输出的电压信号 $V_{BD}(t)$ 。设跨阻放大器的增益为 R , 则:

$$V_{BD}(t) = R(V_1 - V_2) = 2rR\sqrt{P_M P_L} \sin[(\omega_M - \omega_L)t + \phi_M - \phi_L] + [n_1(t) - n_2(t)] \quad (7)$$

设参考信号为 $V_F(t)$, 则:

$$V_F(t) = P_F \sin(\omega_F t + \phi_F) \quad (8)$$

其中 P_F 和 ω_F 分别为参考信号的功率与频率, $V_{BD}(t)$ 进入混频器与参考信号混频, 混频器相当于一个乘法器, $V_{BD}(t)$ 与 $V_F(t)$ 相乘, 由三角函数的积化和差公式可知相乘之后会得到两个信号, 分别为上变频信号与下变频信号。经过一系列信号处理, 包括使用环路滤波器滤除上变频信号后最终获得 $V_{mix}(t)$ 。

$$V_{mix}(t) = 2rRP_F\sqrt{P_M P_L} \sin[(\omega_M - \omega_L - \omega_F)t + \phi_M - \phi_L] + [n_1(t) - n_2(t)] \quad (9)$$

由前述公式可知, 环路滤波器的输出信号蕴含着两激光器之间的频率差信息 $\omega_M - \omega_L - \omega_F$ 。锁相环进入锁定状态后, 主激光器与从激光器的频率差会趋近于 ω_F , 此时混频信号 $V_{mix}(t)$ 的幅度与激光器频率差近似成线性比例关系。因此, 可将环路滤波器的输出近似表示为:

$$V_{mix}(t) = 2rRP_F K_{mix} K_L \sqrt{P_M P_L} [(\omega_M - \omega_L - \omega_F)t + \phi_M - \phi_L - \phi_F] + [n_1(t) - n_2(t)] \quad (10)$$

其中, K_L 为环路滤波器的增益值, K_{mix} 为混频器的增益值。 $V_{mix}(t)$ 即从激光器的反馈电压。通过设计合适的环路滤波器可以确定环路的锁定状态。

从激光器的频移量与相应的反馈电压幅度可推导出相应的频率变化:

$$\delta\omega = K_D V_{mix}(t) \quad (11)$$

其中 K_D 表示从激光器频率响应于电压变化的增益系数。利用上述反馈电流, 从激光器的输出频率将逐步调整, 以实现主激光器频率的跟踪, 从而使整个系统进入稳定的锁定状态。这一过程被定义为自捕获过程。

在光学锁相环系统中, 相位噪声是衡量频率稳定性的重要指标。系统进入锁定状态后, 从激光器的相位噪声不仅受到自身特性的影响, 还会受到环路滤波器特性与主激光器噪声的共同作用。其相位噪声功率谱密度 $L_{out}(f)$ 可由如下关系近似表示:

$$L_{out}(f) = |T(f)|^2 L_{in}(f) + |1 - T(f)|^2 L_{VCO}(f) \quad (12)$$

其中, $T(f)$ 表示环路的传递函数, $L_{in}(f)$ 为主激光器的相位噪声, $L_{VCO}(f)$ 为从激光器(或调谐激光器)的自由运行相位噪声。在环路带宽内, 系统能有效抑制从激光器的噪声, 输出相位噪声主要来源于主激光器; 而在带宽之外, 系统反馈能力减弱, 从激光器的噪声成分开始主导输出。

因此, 提高环路带宽, 可拓宽系统对相位噪声的抑制范围。而本文引入的声光移频器(AOFS)提供了快速的相位调节能力, 在 PID 控制的配合下, 有效增强了系统在高频扰动下的抑噪能力, 从而进一步提升激光器频率输出的相位稳定性。

3. 激光稳频锁相环仿真研究

根据上述原理搭建仿真模型, 对光学锁相环的动态特性进行了深入分析。仿真模型涵盖了主激光器、从激光器、鉴相器、低通滤波器、声光移频器以及 PID 控制器等关键模块。为模拟真实环境, 仿真中加入了高斯白噪声和 $1/f$ 噪声, 并采用混合控制策略: 首先利用电压调频进行快速频率粗调, 当频率误差降低至预设阈值以下时, 切换至 AOFS 进行精细微调。仿真结果可用于优化 OPLL 系统参数, 提升锁相精度及稳定性, 为实际 OPLL 系统的设计提供理论依据和参考。根据上述模块建立基于数据采集与识别的激光稳频锁相环的模型如图 2 所示。

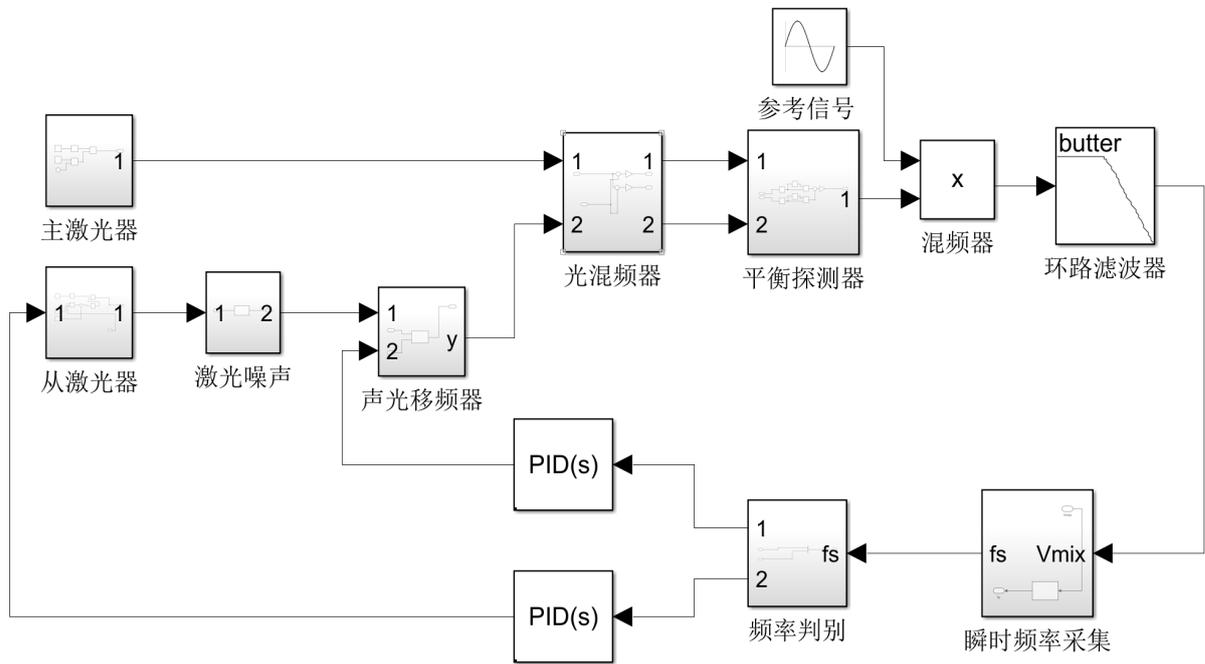


Figure 2. Structure of laser frequency stabilized phase-locked loop based on data acquisition and recognition
图 2. 基于数据采集与识别的激光稳频锁相环的结构图

结合实验设备与实验测试。设置一定量频差。系统参数如表 1 所示。

Table 1. Simulation parameter settings for acousto-optic shifter based outlier balanced optical phase-locked loop
表 1. 基于声光移频器的外差式平衡光学锁相环的仿真参数设置

名称	数值
主激光器功率	10 mw
从激光器功率	10 mw
参考信号频率	500 MHz
主从激光器频率	590 MHz
从激光器电压增益系数	60 MHz/V
环路滤波器截止频率	50 MHz
频率判别阈值	1 MHz
频率期望值	10 MHz
声光移频器初始频率	55 MHz

根据表 1 的参数进行仿真模拟, PID 输出的反馈控制电压的仿真结果如图 3 所示。从仿真结果中可以看出, 在电压调制过程中最终反馈控制电压会稳定到 1.543 mV 左右, 此时频率误差降低至预设阈值, 反馈控制电压保持不变。

频率误差降低至预设阈值之后切换至 AOFS 进行精细微调, 图 4 为声光移频器移频量随时间的变化, 可以看出移频量在 55 MHz 左右上下波动。

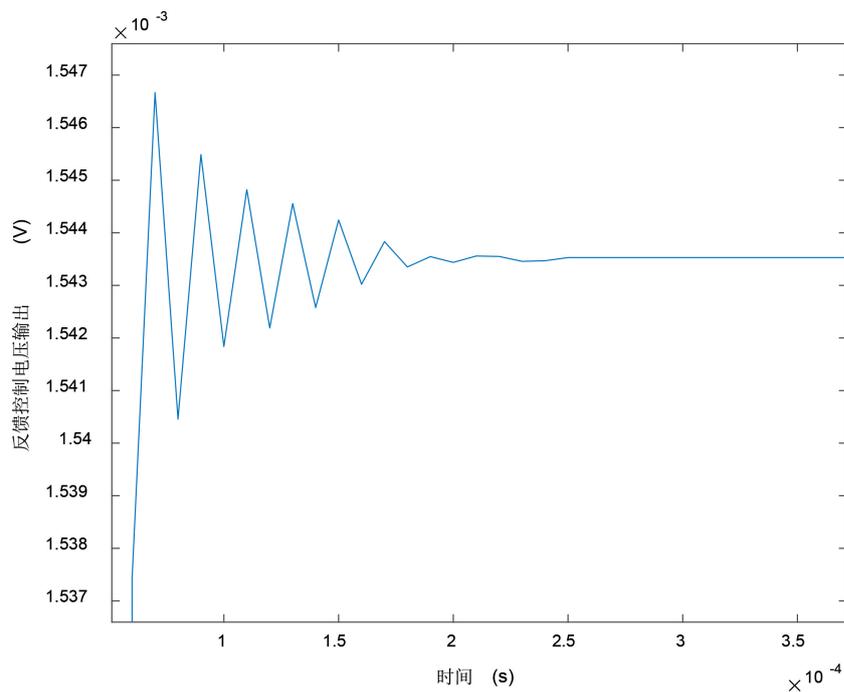


Figure 3. Simulation results of feedback control voltage

图 3. 反馈控制电压的仿真结果

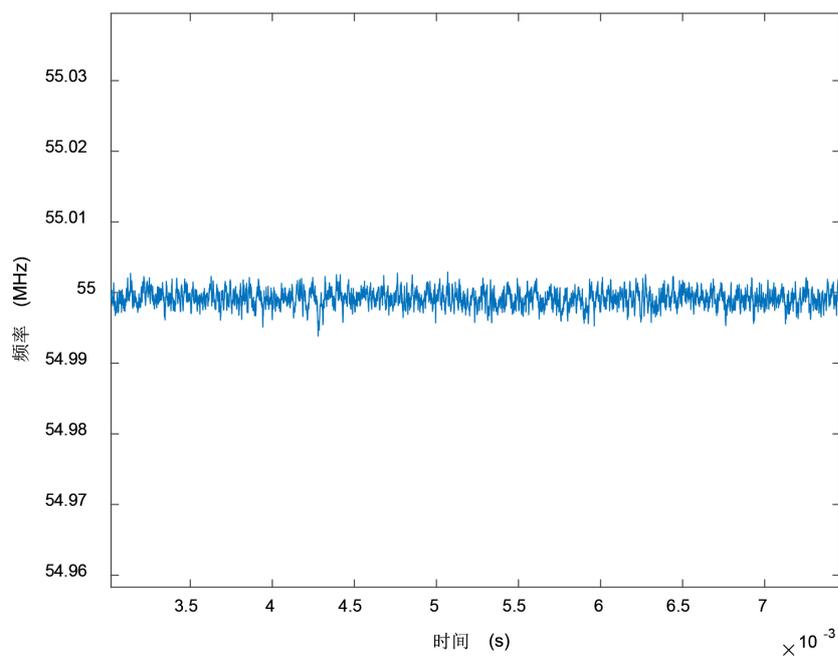


Figure 4. Variation of frequency shift amount with time for acousto-optic frequency shifter

图 4. 声光移频器移频量随时间的变化

图 4 为瞬时频率检测模块检测到的瞬时频率随时间的变化, 当锁相环工频率锁定稳定时, 瞬时频率一直稳定在 10 MHz 附近, 与频率期望值相符。最大频率波动范围为 ± 0.5 MHz 左右, 在锁相环的跟踪范围之内, 不会产生脱锁的情况, 验证了所提出光锁相环结构的功能正确性。

4. 激光稳频锁相环实验设计及测试

为克服传统平衡锁相环易受噪声和相位波动影响的缺点, 本章提出了一种基于实时数据采集和识别的激光稳频锁相环系统, 其设计和搭建依据前文中的仿真模型。系统结构如图 5 所示。

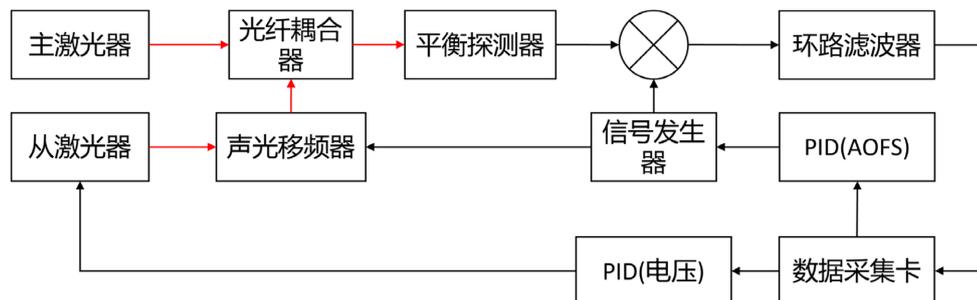


Figure 5. Experimental structure of laser frequency stabilized phase-locked loop based on data acquisition and identification
图 5. 基于数据采集与识别的激光稳频锁相环的实验结构图

主激光器和从激光器输出的光信号经过光纤耦合器分束后, 分别注入平衡探测器。为了进行后续的数字信号处理, 数据采集卡会将该电信号转换为数字信号, 从中提取出两激光器的频率差值。该值输入频差判别软件中来判断从激光器的控制方式, 当频率差较大时采用电压调频模式, 进行快速的频率粗调, 当频率差较小时频差判别软件将调频方式切换为声光移频调频模式, 进行精细的频率微调。频差判别软件选择好调频模式之后, 解调出的两激光器的频率差值再作为对应的闭环 PID 控制软件的输入信号, 来控制从激光器的电压或者驱动声光移频的信号发生器, 通过两种方式来调解从激光器的输出。

4.1. 自由运行激光器频率稳定度的实验测试

本文实验中主激光器为 NKT-Pho-tonics 公司的 E15 窄线宽光纤激光器。本振激光器为四川莱特索斯公司制造的 DFB 半导体激光器。为了评估本振激光器相对于主激光器的频率稳定性, 采用了拍频测量方法。为了降低外部环境的干扰, 整个实验系统被搭建在一个光学平台上, 并且所有的实验器件都被放置在一个温控箱内, 目的是最大限度地降低振动和温度变化对测量结果产生的干扰。图 6 为测试光路。

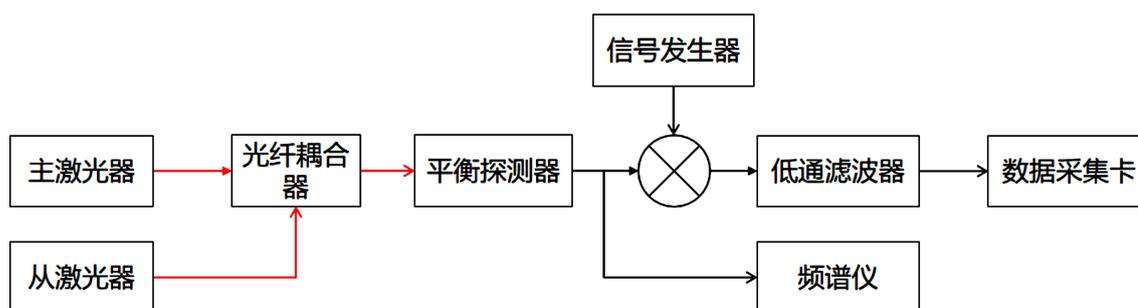


Figure 6. Structure of frequency stability measurement experiment
图 6. 频率稳定度测量实验结构图

测量结果如图 7 所示, 由于光纤激光器的频率稳定性能远远大于 DFB 半导体激光器, 所以可以将光纤激光器视为稳定光源, 频率波动仅由 DFB 激光器引起, 频率稳定度可以通过多种方法计算。一种常见的方法是采用阿伦方差(Allan Variance)。阿伦方差是一种统计方法, 用于分析频率波动的特性, 能够有效区分不同时间尺度上的频率噪声。计算其艾伦方差得出自由运行时 DFB 激光器的频率稳定度为 0.0637。

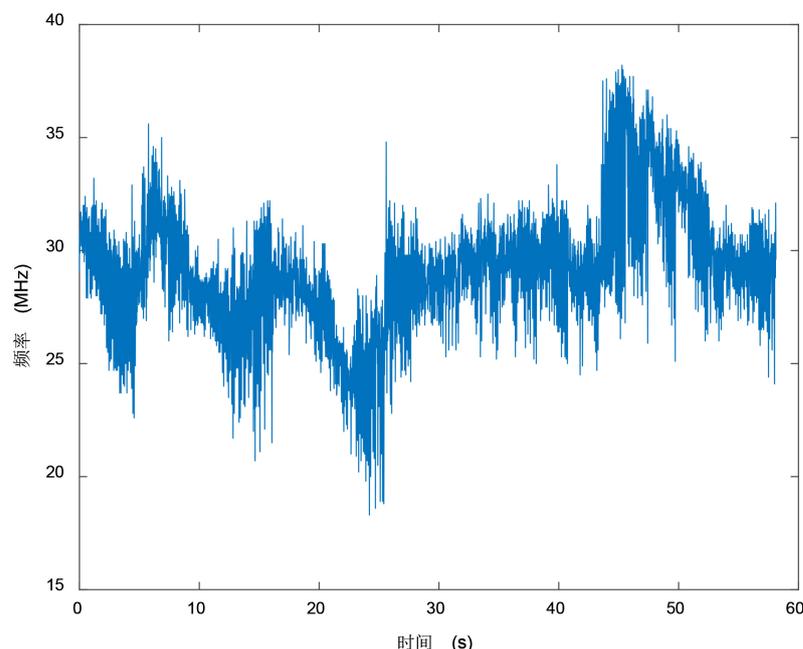


Figure 7. Fluctuation of beat frequency of the two lasers with time during free operation

图 7. 自由运行时两激光器拍频随时间波动

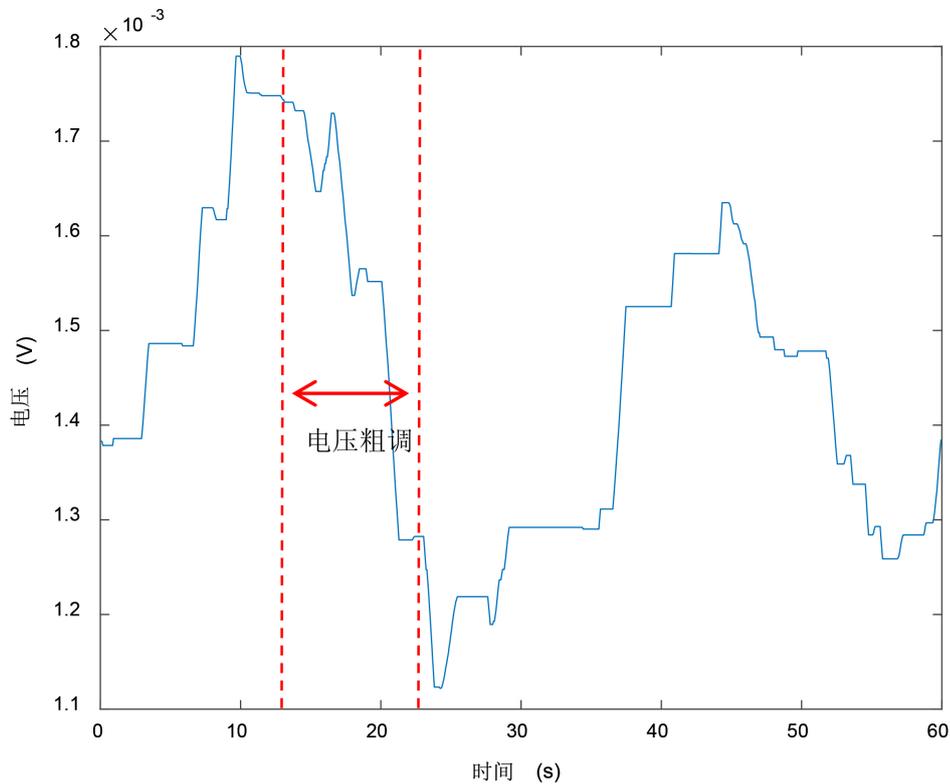
4.2. 半导体激光器频率锁定实验

根据图 5 搭建 DFB 半导体激光器频率锁定的光学锁相环路, 由于温度对半导体激光器的频率有着很大影响, 为降低温度的影响, 将整个实验系统放入恒温箱中, 恒温箱采用水循环散热并且用热敏电阻监测水温的方式保持温度的温度, 设定恒温箱的温度为 25° 。

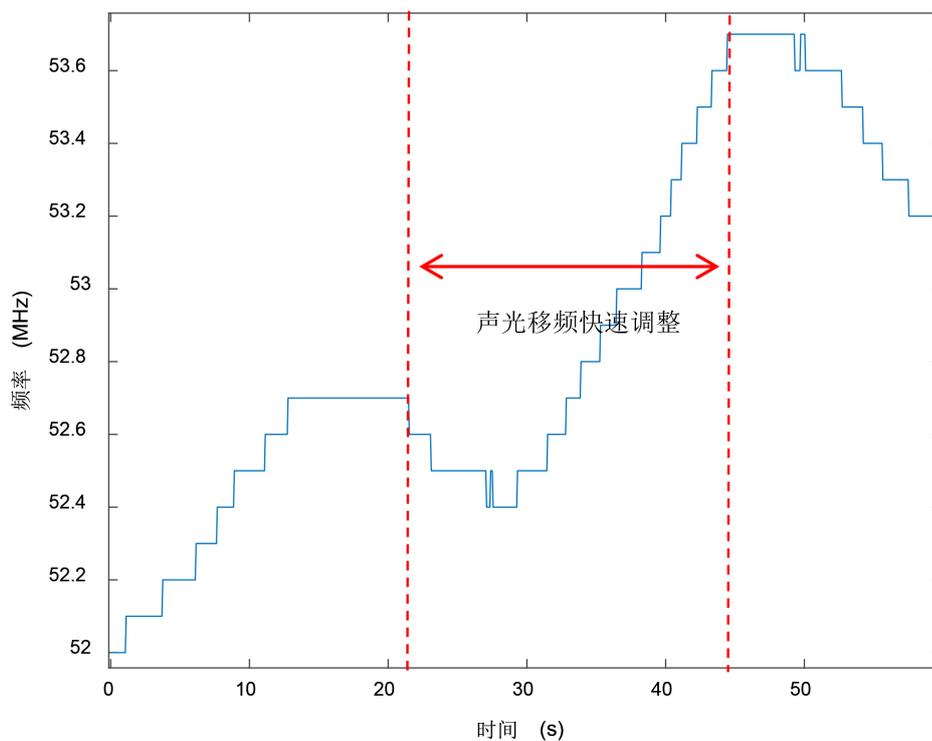
对两激光器进行波长校准之后, 调节拍频信号与信号发生器的参考信号的输出, 将进入数据采集卡的信号频率降低到 50 MHz 以下, 设置数据采集卡采集期望频率为 30 MHz, 设置频差判别的频率阈值为 1 MHz, 调节两个闭环 PID 控制软件的参数, 两个闭环 PID 控制软件输出的反馈控制信号分别用于调节 DFB 半导体激光器驱动电压与声光移频器的移频量, 最终使得数据采集卡采集到的频率更快进入采集期望值并且频率更加稳定。为了观察环路入锁并处于稳定状态时, 闭环 PID 控制软件的输出特性, 图 8 展示了环路锁定时闭环 PID 控制软件的输出, 分别展示了(a)控制电压随时间的变化和(b)声光移频器的移频量随时间的变化。具体来说, (a)图中显示, 在 60 秒的时间内, DFB 激光器控制电压在 1.2 mV 到 1.8 mV 之间波动, 波动幅度约为 0.6 mV。(b)图中显示, 声光移频器移频量在 52.6 MHz 到 53.6 MHz 之间波动, 波动幅度约为 1 MHz。对比两图中曲线的变化趋势可以发现, 声光移频器的移频量呈现出阶跃型的变化, 这说明声光移频器相较于电压调控具有快速响应并调节的特点。

图中还可以发现电压和移频量的波动并非完全同步, 而是呈现出一种交替变化的关系, PID 控制系统通过这种交替控制机制实现对激光器频率的精确锁定。这些波动反映了激光器频率受到诸如温度变化、震动以及其他环境因素的影响, 为了维持频率的稳定, PID 控制系统需要不断地调整驱动电压和移频量来进行补偿。PID 控制系统并非单一地调节电压或移频量, 而是根据误差信号动态调整两者, 形成一种相互补偿的机制, 从而维持整体频率的稳定。

图 9 为数据采集卡所采集到的频率随时间变化的曲线。从图中可以看出, 尽管两激光器之间的频率差偶尔会出现较大的偏离, 但系统能够快速地将频率差拉回到预设值附近, 并且能够在较长的时间内维持频率的稳定。计算可得锁相后的 DFB 半导体激光器的频率稳定度为 0.0105, 相较于锁相前提升了 83%。



(a) 控制电压随时间的变化



(b) 声光移频器的移频量输时间的变化

Figure 8. Output of closed-loop PID control software when the loop locks up
图 8. 环路锁定时闭环 PID 控制软件的输出

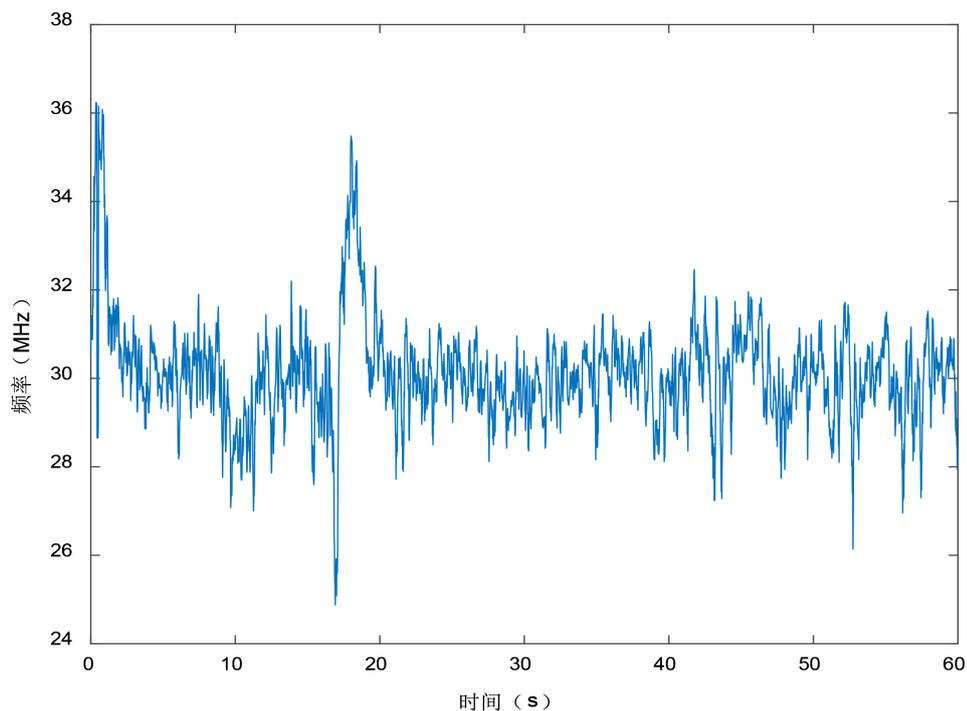


Figure 9. Output of closed-loop PID control software when the loop locks up
图 9. 环路锁定时闭环 PID 控制软件的输出

5. 结论

本文研究了一种基于数字闭环控制的外差式光学锁相环稳频系统, 引入声光移频器作为高精度调频元件, 并结合高速数据采集与 PID 控制, 实现对 DFB 半导体激光器的频率精确锁定。通过系统建模与仿真分析, 验证了该结构在频率粗调与微调阶段的高效协同作用。实验结果表明, 在闭环控制下, DFB 激光器的频率稳定度由自由运行时的 0.0637 提升至 0.0105, 稳定性提升约 83%。同时, 系统能有效应对温度波动等干扰因素, 维持频率长期稳定。该方法在提升激光器频率稳定性、增强系统抗干扰能力方面效果显著。

参考文献

- [1] 刘小雨. 外差式数字光锁相环的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [2] Zhang, R., Wang, C., Wang, H., Li, X., Li, J. and Kong, M. (2019) Improving Locking Accuracy of Resonant Optical Gyroscope by Laser and Acoustooptic Frequency Shifter Jointed Pound-Drever-Hall Technique. *Fiber and Integrated Optics*, **38**, 106-116. <https://doi.org/10.1080/01468030.2019.1579395>
- [3] 岳浩. 基于 90° 光混频器的零差相干光通信技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [4] 冯丽爽, 高晶, 焦洪臣, 等. 谐振式光纤陀螺多激光器系统相对频率噪声抑制(英文) [J]. 光子学报, 2019, 48(1): 7-14.
- [5] 姚佳彤. 双光梳锁相技术及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [6] 王恒. 分布反馈半导体激光器自注入和光锁相环锁定研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [7] 张震, 孙建锋, 卢斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 177-182.
- [8] 王俊尧. 空间相干激光通信中光学锁相环快速捕获技术研究[D]: 长春理工大学, 2020.
- [9] 丁之. 光锁相环环路设计与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.