

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.05

激光器自动锁频方法研究综述

张晓菁, 白金海*, 胡栋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了激光自动锁频的意义与目的, 阐述了实现激光自动锁频的算法和常用的光学频率参考, 分析了不同算法和频率参考的区别和优劣, 探讨了在自动领域下实现激光锁频需要解决的问题和方法, 指出了有待加强的领域, 提出了部分仍待解决的困难, 得出了当前激光自动锁频领域的发展方向和改良趋势, 为激光器自动锁频的后续研究提供了参考。

关键词: 自动锁频; 激光器; 频率锁定; 闭环反馈; 自动控制

中图分类号: TB939; TP29; O56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 01-0060-13

Review of automatic frequency locking methods for lasers

ZHANG Xiaojing, BAI Jinhai*, HU Dong

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Introducing the significance and purpose of laser automatic frequency locking, expounds the algorithm of laser automatic frequency locking and common optical frequency references, analyzes the differences and advantages and disadvantages of different algorithms and frequency references, discusses the problems and methods to solve in the field of laser automatic frequency locking, and obtains the development direction and improvement trend of the current laser automatic frequency locking field. The areas to be strengthened are pointed out, and some difficulties to be solved are put forward, which provides a reference for the subsequent research on automatic frequency locking of lasers.

Key words: automatic frequency locking; laser; frequency locking; closed-loop feedback; automatic control

0 引言

激光是二十世纪的重要发明之一, 利用受激辐射产生激光的装置被称为激光器, 自20世纪60年代世界上第一台红宝石激光器被发明以来, 激光因其相干性、单色性、方向性好等优势, 在激光加工、激光成像、战术武器、大气通信、干涉测量等领域中被大量运用, 是现代生活生产和科学研究的重要工具^[1-3]。

大部分激光的应用领域对激光的频率稳定性

都有一定要求, 激光的频率稳定性是指激光输出的频率在一段时间内保持一致的能力。激光的频率稳定性至关重要, 例如, 光通信中, 激光器需要保持稳定的频率以确保信号传输的质量; 光学量子计量中, 需要使用特定频率的激光操控和探测量子态; 高精度测量中, 需要使用激光来提供稳定并可追踪的参考频率。近年来, 新兴的高精密光学测量领域如冷原子重力仪、光通信、引力波探测和光原子钟等更是对激光器稳定度提出了小于 10^{-15} @1 s的要求^[4-6]。

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-02-02

基金项目: 国家装备基础科研项目(JX7J202402JL002200)

引用格式: 张晓菁, 白金海, 胡栋. 激光器自动锁频方法研究综述[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 60-72.

Citation: ZHANG X J, BAI J H G, HU D. Review of automatic frequency locking methods for lasers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 60-72.



但是,自由运转的激光器对环境敏感,易受到环境温湿度、大气压强、机械振动等因素的影响^[7],输出中心频率会随时间的变化产生MHz甚至GHz级别的漂移,逐渐远离初始频率,严重影响激光的质量。因此,需要利用锁频手段提高激光器的输出频率稳定度。

在激光器输出频率改变后,系统利用反馈原理自发地将频率拉回到设定频率的方法被称为自动锁频方法。自动锁频方法是主动锁频方法的智能化和自动化^[8],近年来,随着科技的发展,特别是计算机性能的提升和嵌入式芯片技术的成熟,实现自动锁频的方法途径和控制手段大为拓展,逐渐成为一个新兴的研究领域,具有广阔的应用前景。国内外有关激光锁频技术的总结与分析已较为完善,但仍然缺乏针对自动领域的回顾与比较。

对激光进行主动锁频实现闭环反馈需要控制器、参考输入和探测器,分别对应激光控制系统、

参考频率和鉴频器。本文从控制器和参考输入两个层次,即自动锁频算法和激光频率参考,对激光自动锁频技术进行系统性的描述和综合。

1 自动锁频现状或进展

目前,国内和国外均有利用自动思路实现激光锁频的研究。

最早的有关自动锁频的研究发布于1998年,芬兰赫尔基辛理工大学开发了一种碘稳定He-Ne激光器的数字控制系统,如图1所示,该系统能根据 I_2 分子吸收谱线将频率锁定在调制频率谐波上,稳定后激光频率波动不超过 ± 3.1 kHz,短期稳定度优于 $10^{-10}@1$ s,长期稳定度为 $10^{-12}@1000$ s^[9];同年,美国州立大学利用法布里-珀罗腔和个人计算机实现了对放射性Fr原子磁光捕获的激光的长期锁定,能同时将3个He-Ne激光器在锁定 ± 1.2 MHz范围内数小时^[10]。

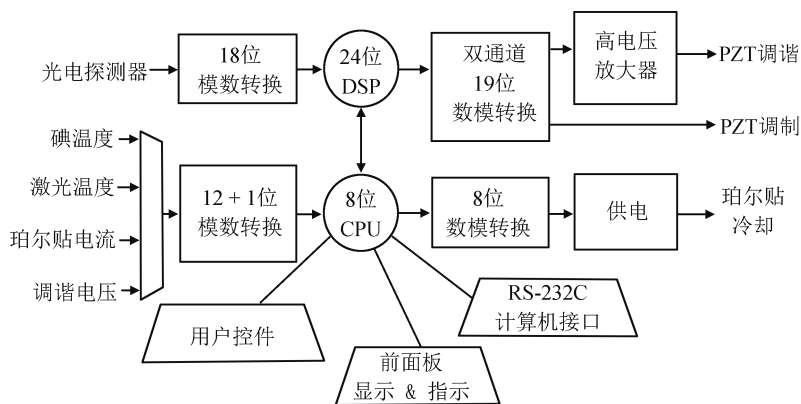


图1 芬兰的碘稳定 He-Ne激光器自动锁频系统

Fig.1 Automatic frequency locking system of iodine stabilized He-Ne laser realized by Finland

2006年,北京大学完成国内第一台自动锁频激光器,利用商用数据采集卡,将外腔半导体激光器(ECDL)输出激光锁定在Cs原子的饱和吸收峰上,频率稳定度优于 $2 \times 10^{-11}@1$ s,稳定时间大于24 h^[11]。2014年,该高校将商用采集卡优化为C8051F020单片机,通过对饱和吸收信号三次谐波进行检测,如图2所示,实现了开机自动锁频,在失锁后能重新锁定,得到秒稳 8.39×10^{-11} ,千秒稳 7.99×10^{-12} 的稳定度指标^[12]。

2010年,中国科学院利用PCI-6040E数据采集卡,利用饱和吸收法,采用比例积分算法,将外腔半导体激光器输出激光锁定在Cs原子D2线的饱

和吸收峰上,如图3所示,其频率稳定度达到 $2.6 \times 10^{-10}@1$ s,重锁定时间75 s^[13]。2014年,中国科学院又采用STM32F1单片机和模拟PID,实现了星载POP铷钟的自动锁频,脱锁后在1 s内重新锁定^[14]。

2011年,国防科技大学选用现场可编程门阵列(FPGA)实现数字双比例积分微分算法,采用PDH(Pound-Drever-Hall)锁频法,实现了 $10^{-10}@30$ s的激光频率稳定度,达到了2 s内实现重锁定的效果^[15]。2018年,该校又提出了一种基于神经网络模式识别向量机的SAS智能识别技术^[16],如图4所示,多次实验的平均重锁定时间为56 s,频率稳定度达到 $1.2 \times 10^{-12}@30$ s。

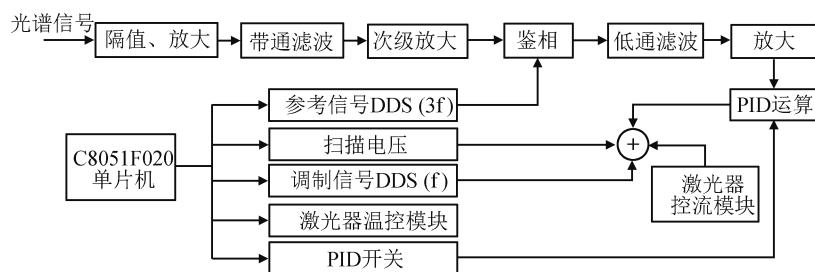


图2 北京大学实现的铯原子自动锁频激光器

Fig.2 Cesium atom automatic frequency locking laser realized by Peking University

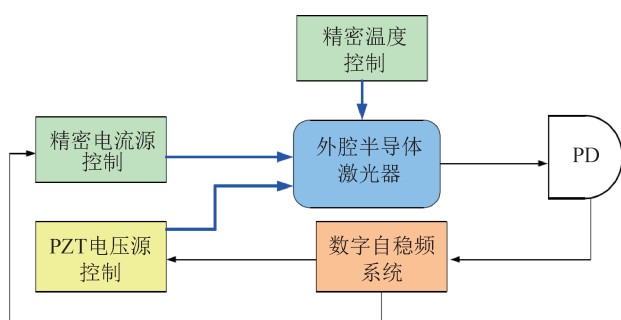


图3 中国科学院实现的铯原子钟激光自动锁频

Fig.3 Cs atomic clock laser automatic frequency locking realized by the Chinese Academy of Sciences

2012年,上海交大利用光谱仪对激光频率进行测量,通过LabVIEW实现数字PID算法,实现了DFB激光器的高稳定宽带频率跟随,宽带锁频稳定性的均方根误差在连续工作的2 h内优于5 MHz^[17]。

2016年,英国诺丁汉大学物理与天文学院开发了一种基于FPGA的频率稳定系统用于原子捕获和冷却的激光系统,开启反馈到激光稳定时间为

10 ms,频率稳定度为 $10^{-9}@10\text{ s}$ ^[18]。

2019年,德国联邦物理技术院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)利用FPGA替代了PDH锁频中的模拟元件,将946 nm的Nd:YAG激光器锁定在30 cm长的超稳光学腔(Ultra-low expansion, ULE)中,如图5所示,该系统室温下稳定度在 $1.1 \times 10^{-16}@1\text{ s}$ ^[19]。

2021年,中国科学院大学将Rb原子调制转移信号作为误差信号,利用FPGA实现了用于冷原子干涉仪的自动锁频系统,系统反馈控制的响应时间在0.5 s内,激光频率的短期稳定度为 $1.3 \times 10^{-9}@1\text{ s}$,长期稳定度优于 $3 \times 10^{-11}@2000\text{ s}$ ^[20]。

2022年,中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心使用STM32单片机控制模拟PID电路,实现了无自旋交换弛豫(Spin Exchange Relaxation Free, SERF)陀螺仪的自动锁频,该系统失锁后可在0.5 s内自动回锁,激光频率稳定度达 $8.133 \times 10^{-11}@128\text{ s}$ ^[21]。

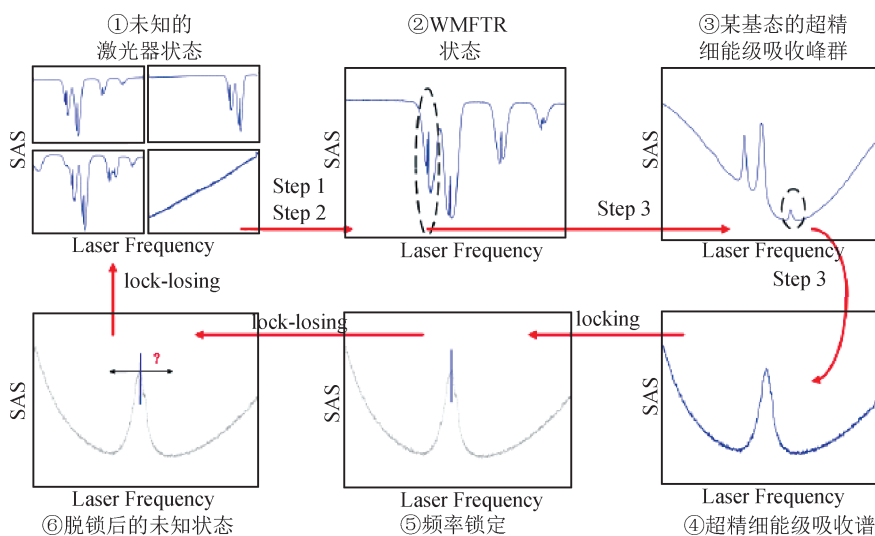


图4 国防科技大学利用向量机实现铷原子SAS智能锁频系统

Fig.4 Rb atom SAS intelligent frequency locking system realized by vector machine in National University of Defense Technology

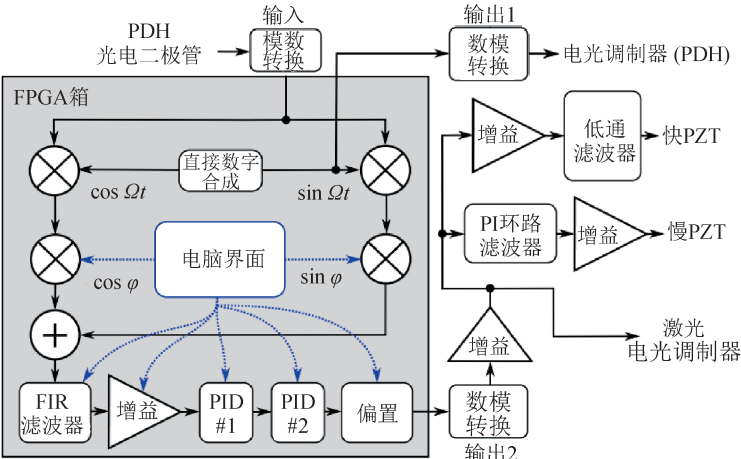


图 5 德国 PTB 利用 FPGA 和 ULE 实现自动锁频系统电控部系统

Fig.5 Electronic control system of automatic frequency locking system realized by German PTB using FPGA and ULE

2022 年，华东师范大学利用获得的 PDH 信号输入伺服系统，实现光学频率合成器的自动化控制，可在 0.5 s 内实现激光频率锁定，系统频率稳定度达 $6 \times 10^{-16} @ 1 \text{ s}^{[22]}$ 。

归纳整理上述激光自动锁频研究情况，如表 1 所示。总体来说，国外关于自动锁频的研究开展较早，技术也比较成熟，因此有部分实验室采用集成式纯模拟电路或改良激光器结构实现激光频

表 1 激光自动锁频研究现状

Tab.1 Research status of laser automatic frequency locking

年份	机构	采用方法	所用激光器	频率参考	锁定时间/s	频率稳定性	应用场合
1998	芬兰赫尔基辛理工大学	PC+DSP	He-Ne 激光器	I ₂ 分子吸收谱		10 ⁻¹⁰ @1 s; 10 ⁻¹² @1000 s	
2006	北京大学	PC+模拟 PID	外腔半导体激光器	Cs 原子饱和吸收谱		2×10 ⁻¹¹ @1 s	
2014	北京大学	C8051F020+模拟 PID	半导体激光器	Cs 原子饱和吸收谱		8.39×10 ⁻¹¹ @1 s; 7.99×10 ⁻¹² @1000 s	
2010	中国科学院	PCI-6040E	外腔半导体激光器	Cs 原子饱和吸收谱	75	2.6×10 ⁻¹⁰ @1 s	原子钟
2011	国防科技大学	FPGA+模拟 PID	光纤激光器	F-P 光腔	2	10 ⁻¹⁰ @1 s	光纤通信
2018	国防科技大学	电脑+FPGA	外腔半导体激光器	Rb 原子饱和吸收谱	56	1.2×10 ⁻¹² @30 s	原子干涉仪
2016	英国诺丁汉大学物理与天文学院	FPGA	外腔半导体激光器	中性原子饱和吸收谱		10 ⁻⁹ @10 s	原子干涉仪
2019	德国 PTB	FPGA	Nd:YAG 激光器	超稳光学腔		1.1×10 ⁻¹⁶ @1 s	光原子钟
2021	中国科学院精密测量科学与技术创新研究院	FPGA	半导体激光器	Rb 原子调制转移光谱		1.3×10 ⁻⁹ @1 s; 3×10 ⁻¹¹ @2000 s	冷原子重力仪
2022	中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心	STM32+模拟 PID	半导体激光器	Rb 原子饱和吸收谱	0.5	8.133×10 ⁻¹¹ @128 s	SERF 陀螺仪
2022	华东师范大学	PC+单片机	调谐钛宝石连续激光器	F-P 腔、波长计	0.5	6×10 ⁻¹⁶ @1 s	光学频率合成器

率的自动锁定。而随着数字电路的兴起,大量数字化芯片也被用于自动锁频领域。其中,采用单片机作为控制手段的自动锁频方法具有集成度高、结构简单的优势,但受限于工作速度、精度不高,基本需要依赖于模拟电路;采用FPGA作为控制手段的自动锁频方法弥补了单片机在运行速度和运行精度上的欠缺,常常作为纯数字控制的首选方法,但具有成本高、算法复杂的劣势。未来数字化自动锁频系统的推广必须对二者之间的优势和劣势加以平衡。

2 自动锁频算法

利用数字系统作为激光控制系统实现自动锁频的过程需要对扫频获得的电压-频率关系进行分析和计算,找到输出频率和参考频率误差为零对应的误差零点,将输出稳定在误差零点附近。目前实现激光锁频的算法分为经典PID控制算法、模糊PID控制算法、神经网络控制算法。

2.1 经典PID控制算法

经典PID控制算法是由比例(Proportional)控制、积分(Integral)控制和微分(Derivative)控制通过线性组合实现的,通过三项控制方法的线性组合进而调节实时采集数据跟随设定输入的变换率。

图6为PID算法的示意图。设定值与实际值之差 $e(t)$ 作为输入进入控制模块,比例控制主要用于调节输出与误差 $e(t)$ 之间的响应倍率,以达到改变响应速度的目的;积分控制主要用于控制输入的设定值和实际值之间的稳态误差,即当 t 趋向于无限大, $e(t)$ 会在比例控制的作用下被抑制至0;微分控制用于对系统的响应趋势进行预测和调节。

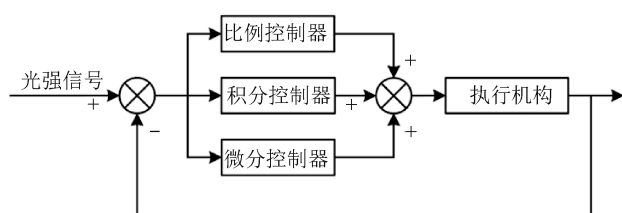


图6 经典PID控制算法

Fig.6 Classical PID control algorithm

激光锁频系统的误差来源于激光器自身的漂移、环境温度和振动,是一种随机性的、无准确运动模型的变化,PID算法在处理无法很好建立数

学模型的实际工程问题时,具有很高的适应性。且相比于其他算法,采用PID算法进行自动锁频处理具有响应速度快、结构简单的特点,这种特点允许系统通过模拟电路或数字电路实现PID反馈,灵活性高,因此被广泛应用于激光器自动锁频方案中。另外,在光学锁频的反馈控制系统中,锁频的目标往往着眼于实现小信号扰动后消除稳态误差而非响应速度,因此也常常采用PI控制,以避免引入微分项导致锁相系统对噪声敏感,从而降低其稳定性^[23]。

2.2 模糊PID控制算法

模糊PID控制是PID控制的变体和改良,将模糊控制器替代或添加到经典PID控制器中^[24]。模糊PID是一种非线性控制,利用了模糊数学的基本思想,人为地对控制策略进行规定和预设,使控制参数跟随外界环境进行自主修正。

如图7所示,模糊控制过程分为模糊化、模糊推理和解模糊化三个部分^[25]。模糊化是将作为输入值的光强电信号的电压值偏差 e 和电压值偏差的变化量 ec 映射到模糊集合;模糊推理是将输入的模糊集合按照预定的模糊规则得到隶属度;解模糊化是通过隶属度得到比例控制、积分控制、微分控制的修正系数 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。PID控制器将模糊控制器得到的修正系数代入PID控制器中进行计算^[26]。相比于传统PID控制,模糊PID算法具有更高的控制精度和鲁棒性,尤其适用于环境或控制对象发生较大变化的场景,对系统时变的动态特性和数学模型有更好的适应性^[27-28]。

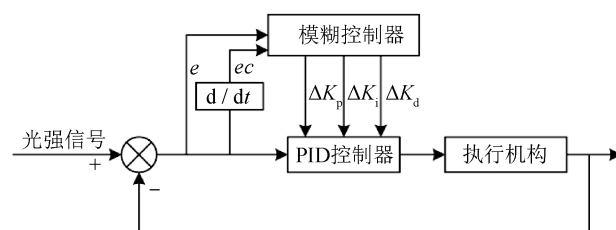


图7 模糊PID控制算法

Fig.7 Fuzzy PID control algorithm

模糊PID控制常用于激光器温控模块^[29-30],温控系统具有预热时间长、迟滞效应明显、对激光器输出影响大的缺点,部分半导体激光器还会因为温控系统的调节出现跳模现象。模糊PID控制能根据实际场景自行修正PID参数,将漂移过大的温

度逐渐调整回控制目标温度上。

另外,调制边带产生的激光锁定在光学谐振腔的锁频方法(PDH锁频法)也会用到模糊PID控制。PDH锁频方法是依赖于F-P超稳腔射频调制的一种锁频方法。F-P腔具有频率精度高但对外界环境变化敏感的特点,实验室环境的变化如温湿度的变化,都会造成F-P腔的频率发生偏移。

传统的PID控制算法对被控对象不断的变化适应性较差,需要针对不同情况对PID参数进行调节,因此部分研究团队^[31]会采用模糊算法进行反馈控制。另外,模糊PID控制也被用于激光器锁频反馈^[32]和光强反馈控制^[33]中。

2.3 神经网络控制算法

神经网络是由类神经元结构的网络节点组成的运算法则,节点之间的权重类比神经元之间的活跃状态,代表两节点之间的相关性。神经网络控制算法是一种基于大量样本和运算实现的黑盒模型。

神经网络在激光自动锁频方面的应用主要分为两类:①用于模糊PID控制的参数整定计算;②用于较为复杂的应用场景中,例如数字系统自发地对原子谱线中饱和吸收峰位置或者对F-P腔的透射峰进行确定进而锁定,即狭义上的智能化自动锁频。如国防科技大学^[16]中利用模式识别算法对原子饱和吸收谱进行吸收峰的锁定,通过互相关算法对于多个饱和吸收谱线进行特征提取和分类,使激光工作在宽无跳模调谐范围(Wide Mode-hop Free Tuning Range, WMFTR)上,锁定后激光线宽约60 kHz,频率稳定度为 $1.2 \times 10^{-12} @ 30 \text{ s}$ 。山西大学^[34]采用深度Q网络(Deep Q-Network, DQN)算法将激光锁定在F-P腔透射峰上,当锁定电压发生异常波动后,能在3~5 s的时间内将信号拉回到待锁定频率点上。浙江理工大学^[35]选用卷积神经网络(CNN)对Rb原子吸收谱线进行特征提取,利用数字正交解调实现相位解调和相位匹配,大大抑制了饱和吸收光谱信号的相位延迟,激光频率稳定度达 $3.50 \times 10^{-12} @ 64 \text{ s}$ 。

3 自动锁频频率参考

根据激光应用场景的差异,不同自动锁频方法的参考源也不同。对激光频率参考进行选取时,

主要考虑目标频率、锁频精度、持续时间、实现自动化可能性等。目前主要的频率参考源主要分为原子谱线参考、光学谐振腔参考、波长计参考、拍频信号参考、激光干涉仪参考。

3.1 原子谱线参考

在进行以碱金属或镧系原子、气体分子为基础的实验如原子钟、偶极量子测量等,往往需要将激光频率稳定在原子发生稳态跃迁的吸收频率附近,由此发展出了基于原子谱线的自动锁频技术。基于原子谱线的激光锁频是一种将通过常温或加热条件下原子或分子蒸汽池的激光作为反馈信号,以原子的吸收谱线作为频率稳定参考源的亚多普勒光谱锁频方式^[36],如饱和吸收光谱法锁频(Saturated Absorption Spectroscopy, SAS)^[37]、调制转移光谱法锁频(Modulation Transfer Spectroscopy, MTS)^[38]、双色激光锁频(Dichroic Atomic Vapour Laser Lock, DAVLL)^[39]等。在实现自动锁频的过程中,数控系统需要对光电探测器得到的吸收谱进行目标吸收峰的识别,或对调制得到的调制谱进行误差零点的判定。

作为一种绝对频率参考,采用原子谱线作为频率参考的自动锁频方法具有参考稳定、高效简单的特点,且具有优异的长期稳定性。当前采用原子谱线参考的激光锁频的长期稳定性已经达到 $10^{-8} \sim 10^{-14} @ [40-42]$ 。

这种方法伴随着不可忽视的问题:①原子谱线实现的频率参考离散且固定,这是由原子或分子能级间隔决定的;②原子谱线无法做到理论上的单一线宽,吸收峰峰值也具有一定的宽度,对锁频的短期稳定性造成了影响;③原子谱线中含有大量的吸收峰和因多普勒展宽导致的交叉峰,给自动锁频的实现带来了关键问题,即如何保证数字系统识别的锁定点为目标锁定频率而非其他吸收峰对应点。对于目标峰识别的问题,往往采用边界检定^[20, 43-44]、特征提取^[14]、过零点个数^[45]等方法进行判定。

3.2 光学谐振腔参考

光学谐振腔包括光纤干涉仪、光纤光栅、微环腔和法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔^[46]。其中,光纤干涉仪出现在激光锁频的早期,受环境干扰影响大,光纤光栅和微环腔一般用于激光器制造。

用于自动锁频的谐振腔参考一般选用F-P腔,主要考虑其高精度、高稳定度的特点。1964年, Pound提出了将光学谐振腔的谐振频率作为参考频率标准的思路^[47], 1983年, Drever和Hall等人首次利用F-P腔得到了拍频线宽优于100 Hz的激光^[48], 因此, 这种将调制边带产生的激光锁定在光学谐振腔的锁频方法得名PDH法。

图8为PDH锁频思路, 激光器出射激光由调制器调制后经过光学谐振腔, 被光电探测器接收并转换为电信号, 经过放大和滤波处理后进行鉴频或鉴相, 得到PDH误差信号, 根据误差信号对激光频率进行反馈控制^[49-50]。当调制后的激光频率满足光学谐振腔的共振条件, 即激光波长整数倍接近谐振腔腔长的2倍, 腔的反射输出最小, 对应误差曲线斜率最大, 将激光频率锁定在这里有利于压窄线宽^[51]。得益于光学谐振腔的高稳定性, PDH法鉴频特性好、响应快、鲁棒性强, 且信噪比高、短期稳定性强^[52-53]。因此, 这种锁频方法被广泛运用于光频标准、超稳微波产生等精密场合。这种方法的缺点在于缺少绝对频率参考, 容易随环境温度变化逐渐发生频率偏移, 因而长期稳定性较差, 若要抑制长期漂移带来的稳定性下降问题, 则需要引入额外的绝对参考源, 如原子谱线等^[54]。目前, PDH锁频的频率稳定度能达到 $10^{-15} \sim 10^{-17}$ 量级^[55-58], 线宽压窄至低于10 mHz量级^[59]。

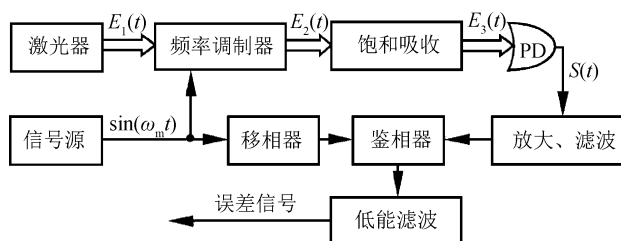


图8 PDH锁频思路

Fig.8 PDH frequency locking

3.3 波长计参考

波长计是一种利用谐振现象对波长进行测量的仪器。高精度辐射光波长计按照原理主要分为Michelson干涉型、Fizeau干涉型、Fabry-Perot干涉型, 对应商用波长计绝对测量精度已达到 4×10^{-8} ^[60]、 2×10^{-8} ^[61], 甚至 2×10^{-9} ^[62], 而测量时间可能低至10 ms, 甚至更短^[63]。

相比于前两种频率参考, 采用原子分子谱线或光学频率腔进行锁频虽然稳定性高、线宽窄, 但受限于原子分子跃迁能级离散、F-P腔谐振频率固定, 可选取的参考频率也是有限的, 且利用光学分束器、声光调制器和电光调制器实现的光学装置复杂且对环境要求高, 这样的锁频方法仅适用于特定频率要求下的应用场景, 灵活性较差。而利用波长计实现锁频的方法在简化装置的同时, 能在大范围实现任意目标频率的设定, 是一种更加直接和灵活的锁频方法。因此, 在对激光进行任意目标频率的锁频场合, 常常考虑采用波长计作为锁频的参考频率, 且商用波长计能与主机进行高速信息流通讯, 方便主机对波长进行实时监测, 实现自动锁频。

利用波长计进行锁频的缺点为锁频的精度和稳定度均受限于波长计的测量精度和采样率, 锁频后激光频率会有几MHz到几十MHz的漂移, 且随着对精度和采样率的要求提高, 波长计的成本会更加高昂, 仅适用于对激光频率精度要求不高的场合^[64-68]。

3.4 拍频信号参考

以拍频信号作为锁频参考的方式至少需要2束或2束以上激光, 待锁定激光与参考激光拍频, 得到的拍频激光的频率为二者的频率差, 拍频激光通过光谱仪或者频率仪进行直接测量, 或通过光电探测器后进行鉴频器, 对得到的频率差进行解调与测量, 进而实现对待锁定激光的频率锁定^[69]。其中, 参考激光采用光学频率梳(Optical Frequency Comb, OFC)或已经锁定的激光。

光学频率梳具有大量高稳定和严格等间距的梳齿结构, 可以产生一系列等间距的离散频率分量^[70]。自光子晶体光纤^[71]出现和钛宝石固态飞秒激光器的商品化后, 光学频率梳的精度和稳定度都有了极大的提升^[72-74], 是精准测量领域常用的一种光学频率参考源, 并被广泛应用于激光测距、精密光谱学、微波生成等领域^[75-77]。利用光频梳提供激光参考^[78]能简化光路和电路结构, 但光频梳本身的高成本和大体积仍然是限制其应用的主要原因。因此, 采用已锁定的激光实现另一激光的锁定是一种更为通用的方法。

利用已锁定的激光作为拍频参考实现的激光

锁频往往也被称为激光锁相^[79]。很多场合要求待锁定的激光能与参考激光存在固定的频率和相位差关系,即相干激光,参考激光称为主激光,待锁定激光称为从激光,用于从激光锁定的方法被称为光学锁相环法。这种方法源于电学锁相环的类比功能,用待锁定激光器替代电锁相环中的压控振荡器,加以光电探测器实现光学信号到电学信号的转换。这种方法被广泛运用于原子干涉仪中拉曼相干双激光的生成,但拉曼光之间的频率差往往在GHz量级,且光学锁相环相较电学锁相环具有稳定性差、调节速度慢、漂移量大的缺点,如何利用已锁定激光实现自动锁频技术是一个值得探讨的问题。

3.5 激光干涉仪参考

激光干涉仪可以通过两臂或多臂之间的相对等效长度及波动进行测量,进而求取长度或相位等测量信息,且测量灵敏度与载波频率密切相关。干涉仪的输出含有多种噪声,如频率波动、臂长差、温度等,在对本底噪声进行压制后,其激光频率耦合噪声与两波段光程不匹配成正比,可以利用干涉仪相位噪声对激光频率的波动进行监测,进而反馈至激光器进行锁定^[80-81]。目前常用的干涉仪是Michelson干涉仪和Mach-Zehnder干涉仪,其具有高灵敏性、稳定性和易于复用的优势^[82]。

这种锁频方法具有灵敏度高、稳定性强、动态范围大的优势,并且机械重量低,不需要对待锁定的频率基准的共振频率进行重新调整或模式匹配,可以实现连续的频率调谐^[83]。目前,基于激光干涉仪的锁频稳定性已达到 1.1×10^{-14} @1000s。缺点是激光频率噪声作为相噪的主要来源,在进行超高精度(mHz量级)实验时,需要配合超稳腔或原子分子参考进行使用以压低本底噪声并保证长期稳定度,且装置对振动噪声敏感,往往需要额外的主动隔振装置^[84]。

为了在未来实现进一步的性能提升,目前的研究主要考虑三个方面:①对光纤干涉仪的结构进行调整,以获得更大的测量范围和更简单的机械结构;②对材料进行优化,提高稳定度,减小实验环境对结果的影响;③对实验光学环路进行优化。

4 结论

对激光系统自动锁频技术现状和方法进行了分析和对比,主要围绕反馈控制算法和反馈系统频率参考两个方面展开:

从算法的角度看,经典PID是激光自动锁频控制中最广泛的控制方法,被广泛运用于自动锁频系统的温度控制、振动控制和激光器反馈调谐中。而基于PID控制的变体如模糊PID算法等也有较多的应用,特别是有关激光器、原子气室和F-P腔温度的反馈控制。近年来,随着神经网络算法逐渐成熟和推进,这种方法也开始被运用于激光器自动锁频系统中,除了对PID参数进行计算,也被用于原子吸收谱或调制谱中对复杂谱线的识别,能在多个吸收峰中稳定地对目标频率进行搜索和锁定,这有利于智能化自动锁频的实现,具有广阔的发展前景,但如何实现锁频时间的压缩仍然是值得探讨的问题。

从频率参考的角度看,当前的光学频率参考可以分为原子谱线、光学谐振腔、波长计、拍频参考、激光干涉仪等五个方面。参考原子谱线和光学谐振腔的锁频方法具有稳定性好、精度高的特点,但目标频率固定;利用波长计可以将激光锁定在任意频率上,与电脑能直接通信,自动锁频实现简单,但精度差,适用于频率稳定度要求不高的场合;激光干涉仪也能实现任意频率的锁频,灵敏度高,但需要额外的绝对频率参考实现长期锁频;依赖于光频梳拍频参考实现的自动锁频精度几乎只受限于电路,结构简单,易于实现,稳定性好,但造价高昂;依赖于锁频激光实现的激光锁频受限于光锁相环性能,目前在自动锁定上仍有欠缺。

目前,激光自动锁频已经应用于陀螺仪、原子干涉、原子光钟等领域,在保证长期稳定性的同时解放人力,无需对激光器进行定期监测,是精密物理实验和测量仪器长期持续工作的重要保证,但仍存在可以改进的方面:①激光自动锁频的锁定时间基本处于秒量级到百秒量级,速度慢,难以适应跳频实验的需求;②基于模拟电路实现的自动锁频存在锁定时间长、装置复杂、上手难度高的问题,基于数字电路实现的自动锁频又往

往具有较低的带宽和反馈速度, 如何寻找一个合适的兼容点仍有待探索; ③有关自动锁相的研究仍然缺乏, 是实现激光系统全数字化和智能化需要突破的重要难点。

参考文献

- [1] MIZUTANI K, DE M, SUDO S, et al. Liquid crystal mirror-base wavelength-tunable laser module with asynchronous mode cavity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(12): 1299–1301.
- [2] 吴子博, 宋悦, 牛岫, 等. 大功率半导体激光器电极失效机理研究综述[J]. 激光与红外, 2023, 53(5): 643–650.
WU Z B, SONG Y, NIU S, et al. Review on electrode failure mechanism of high power semiconductor laser [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(5): 643–650. (in Chinese)
- [3] 李鹏, 盛立文, 黄琳, 等. 窄线宽可调谐半导体激光器研究进展[J]. 光电技术应用, 2023, 38(2): 1–9, 84.
LI P, SHENG L W, HUANG L, et al. Research progress of tunable semiconductor lasers with narrow linewidth [J]. Electro-Optic Technology Application, 2023, 38(2): 1–9, 84. (in Chinese)
- [4] ABBOTT B P. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(061102): 1–16.
- [5] CAMPBELL S L, HUTSON R B. A fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock [J]. Science, 2017, 358(6359): 90–94.
- [6] LUDLOW A D, BOYD M M. Optical atomic clocks [J]. Reviews of Modern Physics, 2014, 87(2): 637–701.
- [7] MATTHEY R, AFFOLDERBACH C, MILETI G. Methods and evaluation of frequency aging in distributed feedback laser diodes for rubidium atomic clocks [J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3311–3313.
- [8] MASSEY G A, OSHMAN M K, TARG R. Generation of single-frequency light using the fm laser [J]. Applied Physics Letters, 1965, 6(1): 10–11.
- [9] AHOLA T, HU J, IKONEN E. A digital control system for the iodine stabilized He-Ne laser [J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(5): 1934–1937.
- [10] NEVSKY A, ALIGHANBARI S, CHEN Q F, et al. Robust frequency stabilization of multiple spectroscopy lasers with large and tunable offset frequencies [J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4903–4906.
- [11] DONG L, YIN W, MA W, et al. A novel control system for automatically locking a diode laser frequency to a selected gas absorption line [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(5): 1447–1452.
- [12] 张胤, 王斯琦. 基于C8051F020单片机的半导体激光器稳频系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(5): 471–475.
ZHANG Y, WANG S Q. Frequency stabilization system of semiconductor laser based on C8051F020 microcontroller [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2014, 32(5): 471–475. (in Chinese)
- [13] 刘丹丹. 用于新型原子钟的外腔半导体激光器数字自动稳频系统研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2012.
LIU D D. Research on Digital automatic Frequency stabilization System of External cavity semiconductor laser Used in New atomic clock [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2012. (in Chinese)
- [14] 鱼志健, 薛文祥, 赵文宇, 等. 用于POP铷原子钟的DFB激光器自动稳频技术研究[J]. 时间频率学报, 2015(3): 129–138.
YU Z J, XUE W X, ZHAO W Y, et al. Research on automatic frequency stabilization technology of DFB laser for POP Rubidium atomic clock [J]. Journal of Time and Frequency, 2015(3): 129–138. (in Chinese)
- [15] 马祥春, 邹宏新, 沈咏, 等. 基于现场可编程门阵列的数字化自动锁相技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 173–178.
MA X C, ZOU H X, SHEN Y, et al. Research on digital automatic phase locking technology based on field programmable gate Array [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 173–178. (in Chinese)
- [16] 李期学. 面向原子干涉仪的智能化激光自动稳频技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
LI Q X. Research on intelligent laser automatic frequency stabilization Technology for Atomic Interferometer [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 李乐逊, 邹卫文, 吴龟灵, 等. DFB激光器的高稳定宽带锁频方案设计和实现[J]. 光通信技术, 2013, 37(3): 1–4.
LI L X, ZOU W W, W G L, et al. Design and implementation of High Stable wideband Frequency locking Scheme for DFB Lasers [J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(3): 1–4. (in Chinese)

- [18] JORGENSEN, N B, BIRKMOSE D, TRELBORG K, et al. A simple laser locking system based on a field-programmable gate array [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(7): 1-5.
- [19] DIDIER A, IGNATOVICH S, BENKLER E, et al. 946-nm Nd:YAG digital-locked laser at 1.1×10^{-16} in 1 s and transfer-locked to a cryogenic silicon cavity [J]. Optics Letters, 2019, 44(7).
- [20] 谢日升. 基于调制转移谱的激光自动稳频技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院), 2021.
- XIE R S. Research on laser automatic frequency stabilization technology based on modulation transfer spectrum [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [21] 庄铭今, 王天顺, 张文静, 等. 用于SERF陀螺仪的半导体激光器自动稳频技术[J]. 导航与控制, 2022, 21(2): 76-82.
- ZHUANG M J, WANG T S, ZHANG W J, et al. Automatic frequency stabilization of semiconductor laser for SERF Gyroscope [J]. Navigation and Control, 2022, 21(2): 76-82. (in Chinese)
- [22] 晏城志. 光学频率合成器中激光频率自动控制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- YAN C Z. Research on laser frequency automatic control in Optical frequency synthesizer [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022. (in Chinese)
- [23] 王青, 赖舜男, 齐向晖, 等. 基于饱和吸收谱的激光稳频实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(12): 23-28, 32.
- WANG Q, LAI S N, QI X H, et al. Experimental system design of laser frequency stabilization based on saturation absorption spectrum [J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(12): 23-28, 32. (in Chinese)
- [24] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- WANG S Y, SHI Y, FENG Z X. Research on Control Method Based on Fuzzy PID Controller [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172. (in Chinese)
- [25] 段敏, 李丽娟, 盖竹秋. 基于模糊PID的激光定位投影仪自动调焦控制系统设计与仿真[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(4): 83-90.
- DUAN M, LI L J, GAI Z Q. Design and simulation of automatic focusing Control System for laser positioning Projector based on Fuzzy PID [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 46(4): 83-90. (in Chinese)
- [26] 陈诗慧, 杨雁南. 基于模糊PID控制的伺服电机系统仿真[J]. 电子设计工程, 2019, 27(19): 174-179.
- CHEN S H, YANG Y N. Simulation of Servo Motor System Based on Fuzzy PID Control [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(19): 174-179. (in Chinese)
- [27] 张镭, 李浩. 四旋翼飞行器模糊PID姿态控制[J]. 计算机仿真, 2014, 31(8): 73-77.
- Zhang L, Li Hao. Fuzzy PID attitude control of quadrotor vehicle [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 31(8): 73-77. (in Chinese)
- [28] 郑新林. 基于模糊PID的激光钎焊焊缝跟踪控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- ZHENG X L. Research on laser brazing weld tracking control system based on fuzzy PID [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [29] 胡晓亮. 模糊PID-Smith算法在激光器热稳频应用中的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- HU X L. Research on the Application of Fuzzy PID-Smith Algorithm in Laser thermal frequency stabilization [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [30] 叶海平. 半导体激光器温度控制系统的设计[J]. 福建技术师范学院学报, 2022, 40(5): 498-503, 518.
- YE H P. Design of temperature control system for semiconductor laser [J]. Journal of Fujian Normal University of Technology, 2022, 40(5): 498-503, 518. (in Chinese)
- [31] 陈一路. 基于模糊算法的光学谐振腔锁定优化[D]. 太原: 山西大学, 2023.
- CHEN Y L. Optical cavity locking optimization based on fuzzy algorithm [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023. (in Chinese)
- [32] 张岩. 具有小波滤波和自动增益的激光陀螺仪稳频控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- ZHANG Y. Research on frequency stabilization control method of laser gyroscope with wavelet filtering and automatic gain [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [33] 刘放, 张士邈, 陈明. 模糊PID控制算法及其在激光陀

- 螺稳频控制中的应用[J]. 测控技术, 2001, (7): 21-23.
- LIU F, ZHANG S M, CHEN M. Fuzzy PID control algorithm and its application in Frequency stabilization control of laser gyro [J]. Measurement and Control Technology, 2001, (7): 21-23. (in Chinese)
- [34] 孙浩程. 基于深度强化学习的激光控制锁定研究[D]. 太原: 山西大学, 2023.
- SUN H C. Research on laser controlled locking based on deep reinforcement learning[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023. (in Chinese)
- [35] 陈本永, 赵勇, 楼盈天, 等. 基于卷积神经网络智能识别吸收峰的激光稳频方法[J]. 中国激光, 2024: 1-19.
- CHEN B Y, ZHAO Y, LOU Y T, et al. Laser frequency stabilization method based on Convolutional neural network intelligent recognition of absorption peak [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024: 1-19. (in Chinese)
- [36] QUAN W, LI Y, LI R, et al. Fax off-resonance laser frequency stabilization using multipass cells in Faraday rotation spectroscopy[J]. Appl. Opt., 2016, 55(10): 2503-2507.
- [37] LIU X, BOUDOT R. A distributed-feedback diode laser frequency stabilized on doppler-free Cs D1 line[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(10): 2852-2855.
- [38] BJORKLUND G C. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions[J]. Optics Letters, 1980, 5(1): 15-17.
- [39] HAUTH M, FREIER C, SCHKOLNIK V, et al. First Gravity Measurements Using the Mobile Atom Interferometer GAIN [J]. Applied Physics B: Lasers & Optics, 2013, 113(1): 49-55.
- [40] ZHAO Q L, ZHOU K J, YANG C S, et al. Near quantum - noise limited and absolute frequency stabilized 1083 nm single- frequency fiber laser[J], Optics Letters, 2018, 43(1): 42-45.
- [41] 魏珊珊, 刘元煌, 陈群峰, 等. 面向Rb原子精密测量的边带锁定 780 nm 高功率激光源[J]. 中国激光, 2021, 48(7).
- WEI S S, LIU Y H, CHEN Q F, et al. Sideband locked 780 nm high power laser source for Rb atom precision measurement [J]. Chinese Laser, 2021, 48 (7). (in Chinese)
- [42] LIANG S Q, XU Y F, LIN Q. Laser frequency locking with low pump field saturated absorption spectroscopy[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2018, 19(2).
- [43] 徐周翔. 冷原子干涉实验的激光频率以及过程的自动控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Xu Z X. Laser frequency and process automatic control for cold atom interference experiments [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [44] 张胤, 王斯琦. 基于C8051F020单片机的半导体激光器稳频系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(5): 471-475.
- ZHANG Y, WANG S Q. Frequency Stabilization System of semiconductor Laser based on C8051F020 microcontroller [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2014, 32 (5): 471-475. (in Chinese)
- [45] AHOLA T, HU J, IKONEN E. A digital control system for the iodine stabilized He-Ne laser[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(5): 1934-1937.
- [46] 邹萌, 肖何, 宋青果, 等. 短腔型超窄线宽低噪声光纤激光技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 25-42.
- ZOU M, XIAO H, SONG Q G, et al. Review of short cavity ultra-narrow linewidth low noise fiber laser technology [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 25-42. (in Chinese)
- [47] POUND R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators [J]. Review of Scientific Instruments, 1947, 35(12): 1405-1415.
- [48] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Applied Physics B, 1983, 31(2): 97-105.
- [49] ERIC D B. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79.
- [50] 王东月. 激光冷却分子锁频相关技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- WANG D Y. Research on molecular frequency locking related technology of laser cooling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [51] 江晓. 冷原子量子存储中的激光稳频与锁相技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- JIANG X. Laser frequency stabilization and phase-locking technology in cold atom quantum storage[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [52] 沈辉, 李刘锋, 陈李生. 超窄线宽激光——激光稳频原理及其应用[J]. 物理, 2016, 45(7): 441-448.

- SHEN H, LI L F, Chen Lisheng. Ultra-narrow linewidth laser — principle and application of laser frequency stabilization[J]. Physics, 2016, 45(7): 441–448. (in Chinese)
- [53] 江飞, 焦明星, 苏娟, 等. 正交解调 Pound–Drever–Hall 激光稳频技术实验研究[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(4): 533–537.
- JIANG F, JIAO M X, SU J, et al. Experimental study on frequency stabilization technique of Pound–Drever–Hall laser for orthogonal demodulation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(4): 533–537. (in Chinese)
- [54] BOHLOULI-ZANJANI P, AFROUSHEH K, MARTIN J D D, et al. Optical transfer cavity stabilization using current-modulated injection-locked diode lasers[J]. Rev. Sci. Instrum., 2016, 77(9).
- [55] CHEN H, JIANG Y, FANG S, et al. Frequency stabilization of Nd:YAG lasers with a most probable linewidth of 0.6 Hz[J]. Journal of the Optical Society of America B Optical Physics, 2013, 30(6): 1546–1550.
- [56] WU L F, JIANG Y Y, MA C Q, et al. 0.26-Hz-line width Ultrastable Lasers at 1557nm[J]. Scientific Reports, 2016, 6.
- [57] SEBASTIAN H F, STEPHAN F, CHRISTIAN G, et al. Fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 2112–2115.
- [58] WU L, JIANG Y, MA C, et al. 0.26-Hz-line-width ultra-stable lasers at 1557 nm[J]. Scientific Reports, 2016, 6.
- [59] MATEI D G, LEGERO T, HAFNER S, et al. 1.5 μm Lasers with Sub-10mHz Line width[J]. IEEE, 2017.
- [60] BANERJEE A, RAPOL U D, WASAN A, et al. High-accuracy wavemeter based on a stabilized diode laser[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(14): 2139–2141.
- [61] KOBTSEV S, KANDRUSHIN S, POTEKHIN A. Long-term frequency stabilization of a continuous-wave tunable laser with the help of a precision wavelengthmeter[J]. Appl. Opt., 2007, 46(23): 5840–5843.
- [62] SCHOLL T J, REHSE S J, HOLT R A, et al. Broadband precision wavelength meter based on a stepping Fabry–Pérot interferometer[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3318–3326.
- [63] 王利强, 左爱斌, 彭月祥. 光波长测量仪器的分类、原理及研究进展[J]. 科技导报, 2005, (6): 31–33.
- WANG L Q, ZUO A B, PENG Y X. Classification, principle and research progress of optical wavelength measuring instruments[J]. Science and Technology Review, 2005, (6): 31–33. (in Chinese)
- [64] 李敏, 张勇, 彭文翠, 等. 基于精密波长计的外腔半导体激光长期稳频系统[J]. 量子电子学报, 2017, 34(4): 432–435.
- LI M, ZHANG Y, PENG W C, et al. Long-term frequency stabilization system for external cavity semiconductor laser based on precision wavemeter[J]. Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(4): 432–435. (in Chinese)
- [65] 郭继鑫, 肖俊杰, 程学武, 等. 1319 nm 种子激光器稳频控制[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(3): 105–111.
- GUO J X, XIAO J J, CHENG X W, et al. Frequency Stabilization Control of 1319nm seed laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 21(3): 105–111. (in Chinese)
- [66] 黄聪. 基于稳频优化的差分吸收激光雷达系统构建与研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- HUANG C. Construction and Research of differential absorption Lidar system based on Frequency stabilization optimization[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [67] 韩蕾, 薛潇博, 纪仟仟, 等. 镱离子光钟的多波长数字 PID 激光稳频系统[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 129–135.
- HAN L, XUE X B, JI Q Q, et al. Multi-wavelength digital PID laser Frequency stabilization System for Ytterbium ion optical Clock[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 129–135. (in Chinese)
- [68] 晏城志. 光学频率合成器中激光频率自动控制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- YAN C Z. Research on laser frequency automatic control in Optical frequency synthesizer[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022. (in Chinese)
- [69] 张成. 用于高分辨率海水温度测量的小型化激光锁频控制系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- ZHANG C. Research on Miniaturized laser frequency locking control system for high resolution sea water temperature measurement[D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- [70] DIDDAMS, SCOTT A. The evolving optical frequency comb (Invited)[J]. Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 2010, 27(11): 51–62.
- [71] 张颜艳. 掺铒光纤飞秒光梳及其在光频测量中的应用

- [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- ZHANG Y Y. Erbium-doped fiber femtosecond optical comb and its application in optical frequency measurement [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [72] DIDDAMS S A, JONES D J, YE J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102.
- [73] IWATSUKI K, SUZUKI H, FUJIWARA M, et al. Optical frequency comb generation technology and its application to WDM access networks [C]. *Lasers & Electro-optics Society, Leos the Meeting of the IEEE*. 2004, 332 (6029): 555-559.
- [74] BRODNIK G M, HARRINGTON M W, DALLYN J H, et al. Optically synchronized fibre links using spectrally pure chip-scale lasers [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 588-593.
- [75] 陈嘉伟. 光频梳光谱干涉测距的相关研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- CHEN J W. Research on optical frequency comb spectrum interferometric ranging [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [76] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology [J]. *Nature*, 2002, 416 (6877): 233 - 237.
- [77] SALVADE Y, SCHUHLER N, LEVEQUE S, et al. High-accuracy absolute distance measurement using frequency comb referenced multiwavelength source [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(14): 2715 - 2720.
- [78] 徐萍. 超冷偶极量子气体实验中激光功率与频率的稳定 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- XU P. Stability of laser power and frequency in ultracold dipole quantum gas experiments [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022. (in Chinese)
- [79] 陈扬. 高精度光学锁相系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- CHEN Y. Design of high-precision optical phase lock system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [80] 李明, 黄亚峰, 叶美凤, 等. 面向空间引力波探测的低噪声稳频激光器 [J]. *光学学报*, 2023, 43(19).
- LI M, HUANG Y F, YE M F, et al. Low noise frequency stabilized laser for space gravitational wave detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19). (in Chinese)
- [81] DANDRIDGE A. Zero path-length difference in fiber-optic interferometers (*Journal of Lightwave Technology* 1983) [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1994, 101.
- [82] 王建国. 基于频率扫描干涉法的光纤干涉仪臂长差测量方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- WANG J G. Research on length difference measurement method of fiber optic interferometer arm based on frequency scanning interferometry [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [83] Frequency stabilization for space-based missions using optical fiber interferometry [J]. *Optics Letters*, 2013, 38 (3): 278-280.
- [84] Victor H, Miguel D Á, Kohei Y, et al. 2×10^{-13} Fractional Laser-Frequency Stability with a 7 cm Unequal-Arm Mach-Zehnder Interferometer [J]. *Physical Review Applied*, 2023.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 张晓菁(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事数字系统硬件控制、原子干涉仪激光系统方面的研究。



通讯作者: 白金海(1988—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为量子精密测量; 参与并主持多项量子测量相关科研项目, 作为主要参与者研制了冷原子干涉绝对重力仪。