

文章编号

基于 FPGA 的 PDH 激光稳频数字化实现

于龙昆¹, 曹开明¹, 周非凡¹, 范习谦^{2,3}, 刘河山², 高雪荣²,

李磐^{2*}, 罗子人^{2,3*}

- (1. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031;
2. 中国科学院力学研究所 微重力重点实验室, 北京 100190;
3. 国科大杭州高等研究院, 杭州 310024)

摘要: 传统 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术使用模拟器件来对激光器进行主动稳频, 系统自身体积庞大, 控制过程复杂, 难以满足空间引力波探测等新型应用场景对稳频系统小型化和自动化的要求。本文在鉴频信号寻峰方面特别设计了一种基于后向差分的自动寻峰算法, 可以有效减少稳频过程中的人为因素影响。该方法通过比较连续信号峰的时间宽度来完成信号主峰寻找以及控制状态切换, 避免了常规阈值法的固有缺陷。且在此基础上设计搭建了一套基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的数字稳频系统, 该系统将稳频伺服反馈控制中的各分立部件全部数字化并集成到单块 FPGA 内, 构建了以压电陶瓷为执行器的快速伺服反馈环路。稳频系统首先利用幅度解调方法在本地得出鉴频信号, 再通过所设计的后向差分算法实现自动寻峰, 最终在锁频点处开启伺服控制器, 并利用增量式数字 PID 算法成功将商用 Nd:YAG 激光器频率锁定到精细度为 35000 的 10cm 法布里-珀罗腔谐振峰频率上。功能测试实验中系统的锁频时长为半小时, 波长计测量数据显示相对频率漂移小于 2MHz。该结果验证了所设计的自动寻峰算法有效性, 也表明 FPGA 是一种实现全数字化激光稳频控制的有效途径。

关键词: 激光稳频; Pound-Drever-Hall 技术; 自动寻峰; FPGA;

中图分类号:

文献标识码: A

Digital implementation of PDH laser frequency stabilization system based on FPGA

YU Long-kun¹, CAO Kai-ming¹, ZHOU Fei-fan¹, FAN Xi-qian^{2,3}, LIU He-shan²,

GAO Xue-rong², LI Pan^{2*}, LUO Zi-ren^{2,3*}

- (1. College of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China)

* Corresponding author, E-mail: lipan@imech.ac.cn

Abstract: The traditional Pound-Drever-Hall (PDH) technique utilizes analog devices for active frequency stabilization of lasers. However, this results in a bulky system and a rigid control process, making it difficult to meet the requirements of miniaturization and automation of the frequency stabilization system for new applications such as space gravitational wave detection. In this paper, we specifically design an automatic peak-finding algorithm based on backward difference for frequency discrimination signal peak

searching, which effectively reduces human intervention in the frequency stabilization process. This method identifies the main signal peak and controls state switching by comparing the time width of consecutive signal peaks. And it avoids the inherent drawbacks of the conventional threshold method. Furthermore, we designed and constructed a digital frequency stabilization system based on a field-programmable gate array (FPGA). This system digitizes and integrates the discrete components of the stabilization servo feedback control into a single FPGA, forming a fast servo feedback loop with a piezoelectric actuator. The digital frequency stabilization system firstly obtains the frequency discrimination signal locally by an amplitude demodulation, and then achieves automatic peak-finding through the designed backward difference algorithm. Finally, the servo controller is activated at the lock-in point, and an incremental digital PID algorithm is used to successfully lock the frequency of a commercial Nd:YAG laser to a resonance of a 10 cm Fabry-Pérot cavity with a finesse of 350,000. During functional testing, the system maintained frequency lock for half an hour, with a wavelength meter measurement showing a relative frequency drift of less than 2 MHz. This result validates the effectiveness of the designed automatic peak-finding algorithm and demonstrates that FPGA is an effective approach for achieving fully digital laser frequency stabilization control.

Key words: laser frequency stabilization; Pound-Drever-Hall technique; automatic peak detection; FPGA;

1 引言

相干探测、精密光谱和原子光钟等领域对所用单频激光光源线宽和稳定度有严格要求^[1-3]。自由运转激光器因其内部谐振腔的热效应和外界环境噪声影响,其频率随时间波动和漂移,因此需要采取抑制激光频率噪声的措施对激光进行稳频控制。除被动稳频外,一般仍需增加主动控制以进一步提升激光频率稳定度。现行诸多主动式稳频方法采用伺服反馈控制以驱动压电陶瓷(PZT)和热电制冷器(TEC)等执行机构,并主动作用在激光谐振腔上,从而锁定激光频率到某一参考频率标准上。因此按照参考频标的不同,主动稳频方法主要有以原子分子跃迁频率为参考频标的塞曼效应稳频、饱和吸收谱稳频、调制转移光谱稳频等^[4-6]和以光学腔谐振频率为参考频标的PDH稳频^[7]、Tilt-locking稳频^[8]等。

饱和吸收谱等稳频技术受原子分子跃迁谱线限制,只适用于特定激光波长。与之相比,PDH稳频技术不受波长限制,可锁定在F-P腔的任一谐振峰上;同时,该技术通过增加激光调制频率和提高参考腔产生的高精度频率基准的方式,能更大程度上降低噪声和压窄线宽,因此该技术也是实现超高稳定度、超窄线宽激光的主要技术。目前PDH稳频技术的研究主要集中在三方面:一是围绕F-P腔的设计制作研究,包括设计和研制超高稳定性或可搬运的腔体结构、减小振动噪声以及降低腔的热噪声影响等^[9-11]。二是从PDH稳频基本原理出发,优化鉴频曲线性能,比如抑制剩余幅度调制和拓宽鉴频动态范围等^[12-13]。三是出于科学应用需要,将光学鉴频部分全光纤^[14]或者将电子学伺服部分数字化,实现稳频系统小型化和自动化。

随着激光稳频技术在引力波探测、原子钟等应

用的进一步扩展^[15-16],对稳频系统的可靠性、稳定性和小型化提出了更高要求。伺服反馈控制电路作为激光稳频技术的关键之一,其高可靠性、数字化和集成化成为研究的重点和难点。FPGA具有并行处理特性,通常用于需要实时处理高速数据流的情况。不同于微控制器的数模混合方式^[17-18],结合FPGA的稳频方案可以实现更高集成度和全数字化。在诸多研究报道中,一般使用商用数据采集卡,并结合LabVIEW配套软件实现^[19-21]。这种方式可以借助LabVIEW内的寻峰、谱分析和上位机交互等诸多模块,开发周期短;另一种方式是通过直接编程来搭建数字稳频系统^[22],在本地完成所有的逻辑运算和控制,可拓展性更高不依赖第三方软件,且具有更好的集成性,但研究报道较少。

本文面向空间引力波探测对数字稳频和自动稳频的高可靠性集成化的应用需求,在寻峰方面有别于数模混合方案,特别设计了一种基于后向差分的自动寻峰算法来实现锁频点的自动切换。该算法可避免常规阈值判断法需要预先进行手动设定,易受信号幅值波动影响等缺陷。文中通过对信号发生器、混频器、滤波器和伺服控制器等稳频所需部件全部数字化的方式将稳频功能集成到单块FPGA芯片内。在FPGA数字稳频伺服模块基础上搭建了全数字化反馈控制的PDH稳频系统,实现了激光器频率锁定。本文所发展的全数字稳频方法在实现上采用Verilog语言直接对FPGA底层编程,其实验结果对稳频系统的集成化智能化设计具有参考价值。

2 PDH技术稳频原理

图1为PDH激光稳频技术基本原理图,可分为光学鉴频和电子学伺服两部分。在合适的电光调

制器 (EOM) 调制深度下, 激光经过相位调制后会在原载波频率两侧产生一对幅度相等且相位相反的一阶调制边带。将调制后的激光注入到 F-P 腔中, 可于腔反射端的光电探测器 (PD) 处探测到包含激光频率相较谐振峰频率的失谐信息, 并经过混频器和滤波器的解调, 最终形成用于反馈的鉴频信号。伺服反馈电路再根据此鉴频信号通过控制激光器压电陶瓷的方式主动改变激光频率以匹配腔的谐振频率, 从而将激光锁定在腔的谐振峰上。

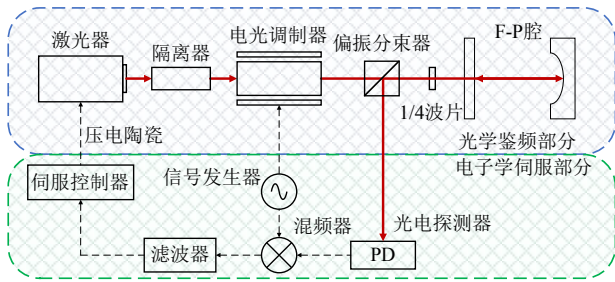


图 1 PDH 激光稳频技术原理图

Fig.1 Schematic of the PDH frequency stabilization technique

为得出该鉴频信号, 可定义 F-P 腔对光场的反射函数 $F(\omega_e)$ 为反射光场 E_r 同入射光场 E_i 之比:

$$F(\omega_e) = \frac{E_r}{E_i} = R \frac{\exp(i\frac{\omega_e}{\nu_{FSR}}) - 1}{1 - R^2 \exp(i\frac{\omega_e}{\nu_{FSR}})} \quad (1)$$

式中 ω_e 表示为激光频率失谐量, R 为腔镜反射率, ν_{FSR} 为腔的自由光谱范围。

当激光载波频率足够接近腔的某一谐振峰频率时, 载波与边带间的拍频信号不再因对称而干涉相消。此时由腔反射端光电探测器探测并转换所得的反射信号为:

$$I_r \propto P_c |F(\omega)|^2 + P_s \left\{ |F(\omega + \Omega)|^2 + |F(\omega - \Omega)|^2 \right\} + 2\sqrt{P_c P_s} \left\{ \begin{aligned} &\text{Re} [F(\omega) F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega) F(\omega - \Omega)] \cos \Omega t \\ &+ \text{Im} [F(\omega) F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega) F(\omega - \Omega)] \sin \Omega t \end{aligned} \right\} + (2\Omega \text{ terms}) \quad (2)$$

式中 P_c 表示为载波功率, P_s 为边带功率, Ω 为 EOM 的调制频率。其中第二行是载波和边带相互作用的结果, 也即鉴频信号内容。第一行则为直流成份, 而第三行是因两个一阶边带间相互作用而产生的 2Ω 项, 在此不做展开。

若令 $A(\omega) = F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)$, 可将式(2)化简为:

$$I_r \propto (\text{DC terms}) + 2\sqrt{P_c P_s} \left\{ \begin{aligned} &\text{Re} [A(\omega)] \cos \Omega t \\ &+ \text{Im} [A(\omega)] \sin \Omega t \end{aligned} \right\} + (2\Omega \text{ terms}) \quad (3)$$

为发挥 PDH 技术优势, 实际应用中通常选用远大于腔线宽的调制频率, 从而可将 $A(\omega)$ 近似为虚数。因此光电探测器所得反射信号最终形式为:

$$I_r \propto (\text{DC terms}) + 2\sqrt{P_c P_s} \text{Im} [A(\omega)] \sin \Omega t + (2\Omega \text{ terms}) \quad (4)$$

容易看出式(4)中只有 $\text{Im}[A(\omega)]$ 项反映了激光频率的失谐信息。为了进一步用于实际伺服, 需要从式中将该项提取出来。

从调制解调的角度分析, 可将该反射信号视作是一个叠加直流偏置的幅度调制结果。因此可先使用交流耦合输入或带通滤波器将直流项和 2Ω 项等无关信号分量滤除, 再通过幅度解调方法将低频基带信号 $\text{Im}[A(\omega)]$ 从高频载波信号 $\sin \Omega t$ 上分离。

3 数字稳频的关键实现

3.1 整体框架

本文数字稳频系统 (如图 2 所示) 采用自底向上的 Verilog 设计方法, 主要由信号发生模块、信号解调模块、峰值检测及锁频点判断模块和数字伺服控制模块等四部分组成。

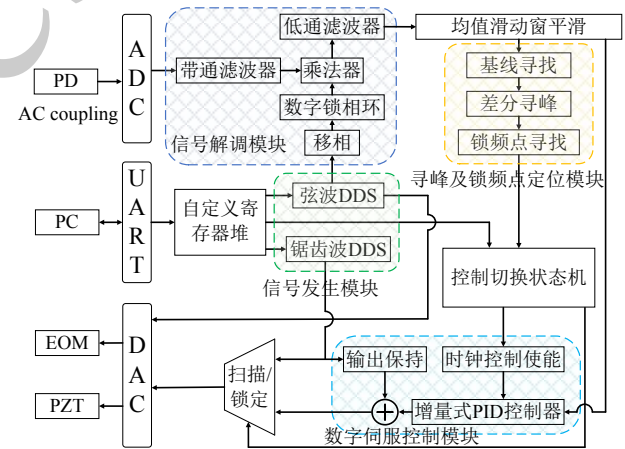


图 2 PDH 数字稳频系统框图

Fig.2 Block diagram of the PDH digital frequency stabilization system

图 3 为稳频操作流程, 具体可分为扫频和锁频两部分。初始扫频状态下, 首先对 PZT 施加锯齿波扫描电压并通过调节激光器电流以进行信号搜索, 直到观察到 F-P 腔透射光斑形状为 TEM_{00} 模。与此同时由信号解调模块完成对模/数转换器 (ADC) 采集所得数字信号的幅度解调, 并得到鉴频信号。然后当监控到的鉴频信号形状符合锁频要求时, 由上位机 PC 通过 RS232 串口开启锁频使能。

之后峰值检测及锁频点判断模块开始判断有效鉴频信号峰。当进一步寻找到鉴频曲线锁频点时，系统自动切换到锁频状态，并触发数字伺服控制模块。控制模块的输出将经数/模转换器 (DAC) 转换为模拟电压并反馈到 PZT 上，最终实现环路锁定。

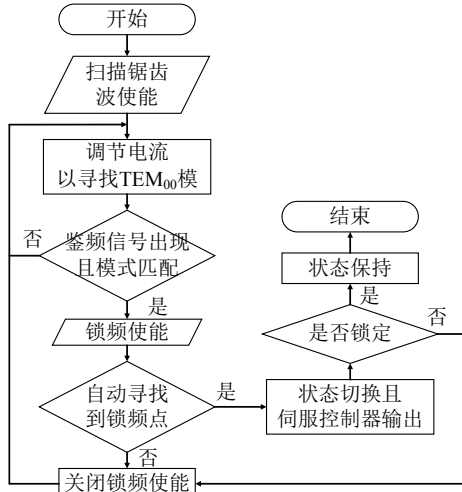


图 3 稳频流程图

Fig.3 Flow chart of frequency locking process

3.2 任意波形发生器

不同以往在模拟或数模结合的稳频系统中，需要依靠专门的信号发生仪器或者独立的波形发生芯片来实现调制弦波以及扫描锯齿波信号，FPGA 提供了一种更加快速简便地产生任意信号的方法，也即直接数字频率合成 (Direct Digital synthesis, DDS) 技术。该方法可以直接部署在 FPGA 芯片内部，极大程度上缩短了调制解调的信号路径，有效避免了高频调制下因射频线缆或板间走线连接而可能引入的电子学噪声。

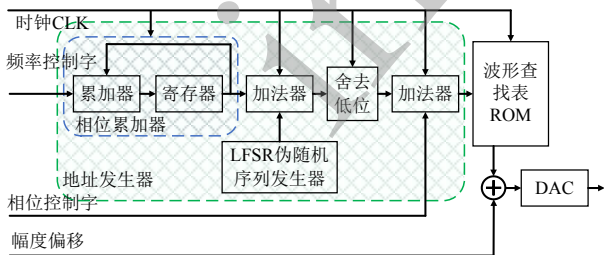


图 4 带抖动注入的 DDS 波形发生器

Fig.4 DDS wave generator with jitter injection

图 4 为本文使用 DDS 搭建的任意波形发生器框图，主要由地址发生器和波形查找表组成。地址发生器中相位累加器的功能是根据输入的频率控制字循环累加出地址序列，然后通过预先存储的波形查找表实现相位到幅度的转换，从而得出每个地址对应的幅度数字值。在内部高速时钟的驱动下，上

述幅度数字值可以组成表示诸如正弦波等任意波形的离散幅度序列，最后再由 DAC 转换为模拟信号。

该波形发生器中还存在一个线性反馈移位寄存器 (LFSR)。该 LFSR 采用伽罗瓦结构，能够产生用于相位抖动注入的多位伪随机码。该做法可以对原有地址序列增加随机抖动，从而改变其固有的周期性并最终改善 DDS 的输出频谱特性^[23]。在此基础上，波形发生器对输入给查找表的地址序列和输入给 DAC 的离散幅度序列分别增加额外的偏置值，可以实现信号移相以及偏置的功能。

3.3 鉴频信号的获取

PDH 稳频技术一般采用相干解调的方法从腔反射信号中提取出鉴频信号。此方法的关键点是在本地构建出一个与调制载波严格同频且同相的本振信号。为此在数字相干解调 (如图 5 所示框图) 中需要对波形发生器产生的弦波进行复用，也即将其中一路作为 EOM 的调制载波，另一路直接作为本振信号输入到数字乘法器中来进行解调。

此外在实际应用中，进入到乘法器的两条信号路径因系统延迟总是存在相位不匹配的问题，通常需要在本地信号路径上串联移相器进行补偿。基于 DDS 技术的波形发生器优势在于可通过相位控制字实现 360° 范围内的移相操作，因而无需额外的移相器件。

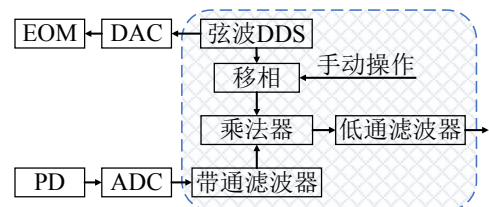


图 5 数字相干解调框图

Fig.5 Block diagram of the coherent demodulation

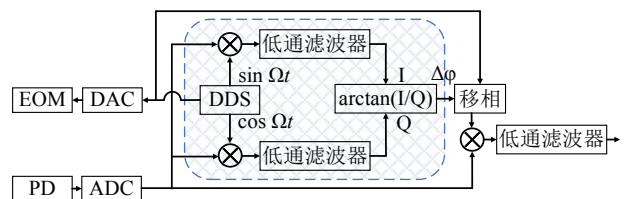


图 6 数字正交解调框图

Fig.6 Block diagram of the digital orthogonal demodulation

考虑到手动移相且以人眼观察鉴频信号的方式必然会引入人为误差，本文在相干解调的基础上介绍数字正交解调方法^[24-25]，其结构如图 6 所示。该方法原理同相敏检波类似，首先通过各自乘以正余弦的方式构造出同相和正交两条通道。然后利用反

正切运算来计算出本振信号相较调制载波的相位差值信息。最后将之反馈给 DDS 以进行自动相位补偿, 从而实现本振信号向调制载波的相位同步。

3.3 差分自动寻峰算法

图 7 所示为 $\text{Im}[A(\omega)]$ 信号分量的仿真结果, 图中可见鉴频信号由一个主峰和两边幅值较低的侧峰组成, 并且中间主峰的鉴频斜率明显大于侧峰。因此 PDH 稳频中一般将主峰同基线(零线)的相交处视作锁频点。以该点为中心的线性斜线区域正确反映频率失谐量的符号方向, 也是实际用于反馈控制的有效鉴频范围。另一方面, 鉴频信号是通过在谐振峰附近小范围内主动扫描激光频率而得到的, 因此在锁频状态切换时会随着加在压电陶瓷端扫描锯齿波的停止而消失。为确保后续伺服控制器能在有效鉴频范围内进行控制, 系统应能预先寻找锁频点位置并记录对应时刻的扫描电压值。考虑到鉴频信号主峰是离锁频点最近的一个识别特征, 本文首先确定鉴频信号峰位置, 然后进一步将第一个跨基线时刻认作是锁频点。

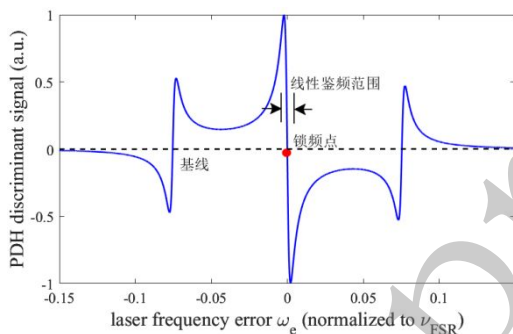


图 7 用 MATLAB 仿真的 PDH 鉴频信号

Fig.7 The PDH discriminant signal by MATLAB simulation

鉴频信号峰的寻找是定位锁频点的前提, 也是实现扫频至锁频状态自动切换的关键。应用在 FPGA 上的时域寻峰算法中最易实现的是阈值比较法。然而此法易受信号的幅值波动影响, 随着所设的阈值不同, 对于同一数据的寻峰判别结果也会有出入。因此本文结合阈值比较法和鉴频信号实际特征, 提出了一种用于 PDH 鉴频信号的后向差分寻峰算法。

首先对采集所得的良好以及恶劣的鉴频信号(图 8)进行分析。图 8(a)的曲线对称且信噪比高, 中心主峰比两边侧峰显著突出, 是贴近理想仿真的良好信号。图 8(b)所示信号因相位不匹配导致两侧峰间不对称, 且有连续振荡的收敛拖尾^[26]。时间间隔非常近连续假峰会使得常规阈值寻峰算法误判。图 8(c)中信号的信噪比很低。图 8(d)所示信号存在直流偏置, 并且因参考腔的光路耦合问题导致

中心主峰不沿基线对称。其次由图 8(a)和 8(b)比较可知, 当移相器的补偿相位超过 180 度时, 信号会出现反转。最后鉴频信号的幅值还会受入射激光的功率波动影响。

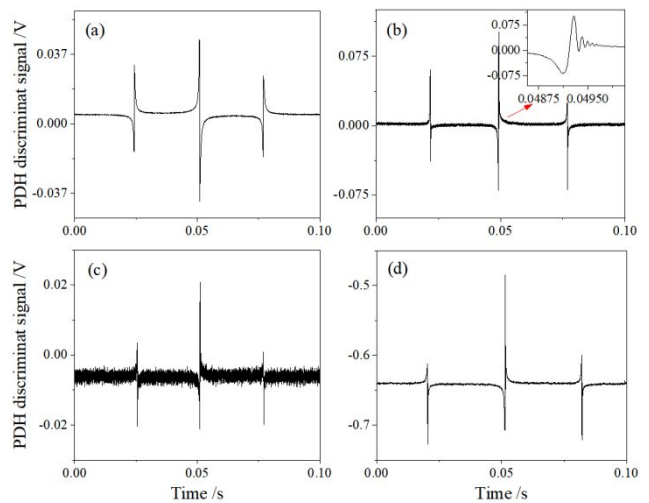


图 8 实验采集的鉴频信号

Fig.8 The acquired discriminant signal by experiments

针对上述寻峰需面对的多种情形, 本文所用方法的基本思想主要有三点。一是通过减去基线的方式将信号分割为正负两部分, 既实现对反转信号的寻峰又可减少因噪声导致的误判; 二是由于鉴频信号的中心主峰上升时间远大于两边侧峰, 通过比较上升时间进行寻峰可不受幅值波动和拖尾的影响; 三是由于在短时连续扫频中, 一个锯齿波的周期只对应有一个鉴频信号。因此可将前一周期内计算所得数据循环用于后一周期的寻峰判别, 从而确保有效峰的实时性。

此后向差分寻峰算法实现流程如图 9 所示, 可分为基线计算、信号分割、疑似峰寻找和宽度比较四个步骤。第一步在基线计算中, 首先对滑动窗平滑后的解调信号求其方差, 从而忽略掉数据流中的离群点。然后对剩余数据比较以得出最值, 最终保留的数据最大值和最小值即是包含噪声下的基线最值。第二步利用 FPGA 的并行处理能力, 将后锯齿波扫描周期内的解调数据减去前一周期内所求得的基线最值。从而将信号分割成两部分以便于分别处理。以基线以上的情形为例, 当信号从平坦过渡至陡峭时, 后一个数据总是大于前者的。因此第三步中通过后向差分运算判断信号变化趋势, 即可找出所有疑似上升峰的过渡段。第四步循环遍历两个连续周期内的所有疑似峰, 若有后一周期的某个疑似峰宽度大于前周期的最大疑似峰宽度, 则此处即是鉴频信号实际的主峰位置。最终在差分寻峰算法的引导下, 系统进一步将此峰同基线的第一个相交处

确定为锁频点。

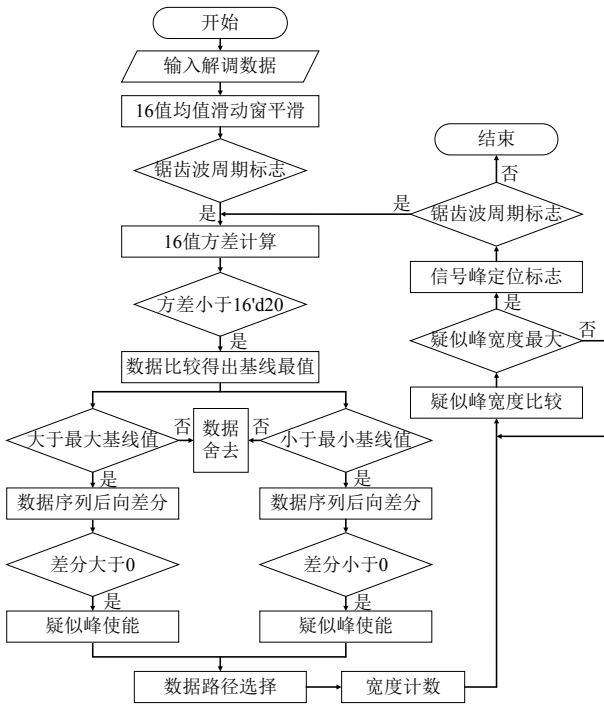


图 9 差分寻峰算法流程图

Fig.9 Flow chart of backward difference peak-finding algorithm

3.5 伺服控制环路

经过前端解调和寻峰后，顶层控制状态机将在锁频点处开始伺服锁定。图 10 所示为基于压电陶瓷构建的单环路稳频控制框图。

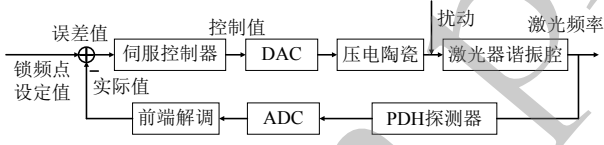


图 10 单环路的数字反馈控制框图

Fig.10 Block diagram of a single-loop digital control loop

该环路以激光频率为被控量，将锁频点和 PDH 探测器所得鉴频信号分别作为设定值和实际测量值，并以两者之差作为输入给伺服控制器的误差值。控制器正是通过不断比较反馈回来的实际值和设定值来调节输出的控制信号。当探测到的实际值不断接近设定值时，环路反馈后的误差随之减小。直至误差值为零时数字控制器输出的控制值也趋于稳定。在数字控制中，此输出信号需要经过 DAC 转换成模拟电压后才能驱动压电陶瓷执行机构。由此可知，主动激光稳频的实现过程实际上是激光频率探测技术和通用伺服控制原理相结合的过程。

本文伺服控制器采用增量式数字 PID 算法，相应表达式为：

$$\begin{cases} \Delta u(k) = (K_p + K_d)\Delta e(k) + K_i e(k) - K_d \Delta e(k-1) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中 K_p 、 K_i 和 K_d 分别表示比例、积分和微分项系数， $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ，表示第 k 时刻和第 $k-1$ 时刻误差值之差。相较位置式 PID 算法需从初始时刻开始累加误差值，增量式的输出 $u(k)$ 仅为上一采样时刻输出 $u(k-1)$ 和本次增量 $\Delta u(k)$ 之和，并且控制增量 $\Delta u(k)$ 只与最近三次的误差值有关。其显著的优势在于更少的计算量和更小的溢出风险，因此更适合部署在 FPGA 上，所占用的逻辑资源也更少。

图 11 所示为此控制算法的实现流程图。在参数整定完毕的前提下，控制器首先根据输入的 PDH 探测器测量值 P_v 分别计算出在 $k-2$ 、 $k-1$ 和 k 时刻的误差值。然后在下一周期内并行计算出 $\Delta e(k)$ 和 $\Delta e(k-1)$ 的值。将之分别与对应通道的比例、积分和微分系数相乘，最终所得乘积之和即是控制增量 $\Delta u(k)$ ，且增量的累加结果即为控制器的输出 $u(k)$ 。在 FPGA 的并行处理下，整个增量式计算过程只需要 15 个时钟周期。

考虑到激光器的压电陶瓷响应速度一般在 kHz 量级，伺服控制器中增加有时钟使能模块以匹配控制环路的响应带宽。该模块利用时钟计数的方式人为调节控制器的计算速度，可以有效降低因 FPGA 定点数运算特性而导致累积溢出的风险。

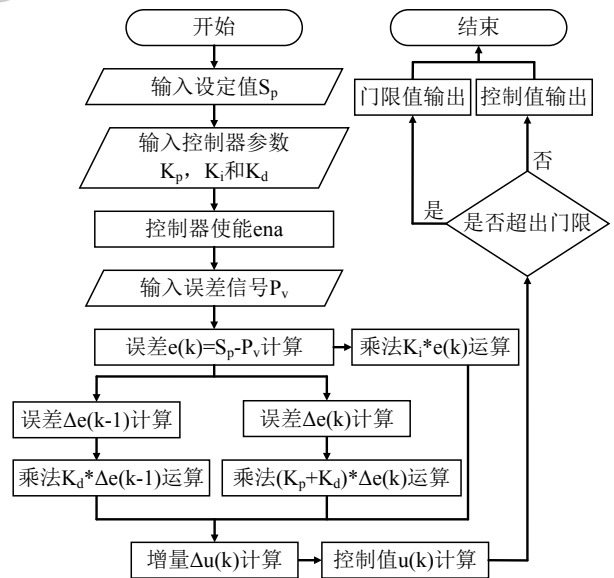


图 11 增量式数字 PID 算法流程图

Fig.11 Flow chart of the incremental digital PID algorithm

4 稳频实验与结果

4.1 实验装置

为了验证基于 FPGA 的数字稳频方案的可行性，本文搭建了如图 12 所示的腔稳频实验装置。该

装置的 PDH 鉴频光学链路分为光纤光路和空间光路两部分。由波长为 1064nm 的 Nd:YAG 固体激光器 (Mephisto-500FC, Coherent) 光源所输出的单频激光首先会经过 99:1 的分束器 (PN1064R1A1, Thorlabs) 分光, 然后受光纤型电光调制器 (NIR-MPX-LN-0.1, iXblue) 的相位调制, 并到达光纤环形器 (CIR1064PM-APC, Thorlabs) 和准直器后进入到空间光路中, 最终经两面反射镜空间耦合进 F-P 腔中。装置所使用的 10cm 商用参考腔来自于 Stable Laser Systems 公司, 其材质为超低膨胀系数 (ULE) 玻璃, 精细度为 350000, 对应的共振峰线宽约为 4.3kHz。链路中还存在一个可调节的光功率衰减器, 用于避免激光功率过高对光腔造成损

伤。为减小振动等外界环境噪声的影响, 整个光路装置都被放置在光学隔振平台上。参考腔则垂直安置在真空室内, 并且配有专门的真空度和温度控制单元。其中腔体温度恒定在 37.55℃, 真空室的真空度保持在 $2.5e-5$ Pa。

实验装置中电子学伺服部分的主体是一块型号为 XC7K325T 的实验室自制 FPGA 电路板卡, 包括四路 125MSPS 转换速率的 14 位 ADC 和四路采样率达 100MSPS 的 16 位 DAC。该电路板同上位机 PC 之间采用的是 RS232 串口通信。此外存在两个光电探测器 (PDA10CS2, Thorlabs) 分别用于探测腔两端透射和反射光信号。在透射端处额外增加 CCD 相机用于直接观察透射光斑变化。

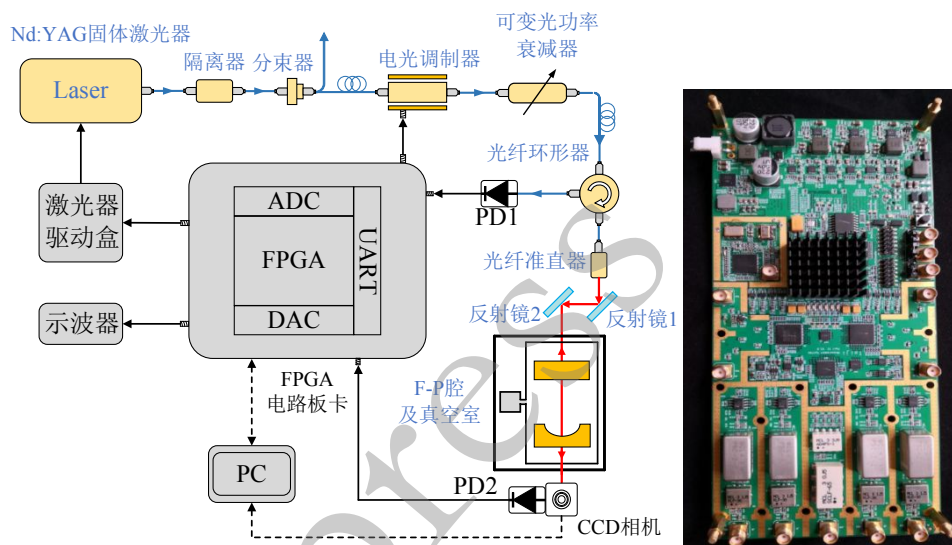


图 12 数字稳频实验系统及 FPGA 硬件电路板

Fig.12 The digital frequency stabilization experimental equipment and FPGA hardware PCB

4.2 验证实验

为避免引起 EOM 器件发热及高阶调制边带等问题, 实验中首先将 DDS 波形发生器产生的弦波频率和幅值分别设定为 1.3MHz 和 300mVpp 左右, 扫描锯齿波的频率为 10Hz 且幅值为 6Vpp。

再调节激光器的晶体温度和驱动电流, 直至于透射端 CCD 中观察到光斑为 TEM₀₀ 基模。设置信号解调模块中带通滤波器的通带范围为 0.8MHz 至 1.7MHz, 且低通滤波器的截止频率为 80kHz。图 13 所示为扫频过程中的各信号变化, 由 500kSa/s 采样频率下的数据采集卡所记录并经 Origin 软件绘制。图中经过移相补偿后的鉴频信号已经较为对称, 其中主峰为载波频率接近腔谐振峰频率所得, 侧峰分别为两调制边带相较谐振峰所得。从局部放大图中可见鉴频信号同透射信号的峰间位置是相互对应的, 并且点 O 表示主峰处的锁频点, 该点附近的鉴

频区域幅值约为 60mVpp。

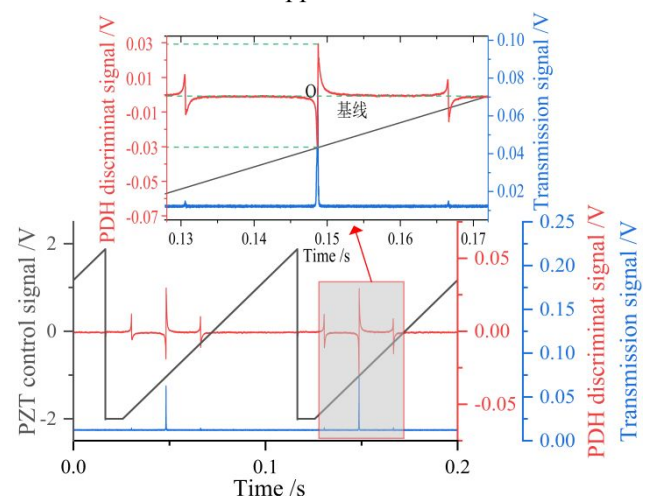


图 13 扫描过程中的信号

Fig.13 Signals during the frequency scan process

通过串口开启峰值检测及锁频点判断模块后,

随着寻峰算法检测到信号峰出现, 会触发对应信号峰位置的定位标志。控制状态机捕获此定位脉冲后, 再相应关闭锯齿波并开启伺服控制器。图 14 所示为由状态机主导的锁频自动切换过程。图中可见 PZT 两端的控制信号在第二个扫描周期内由锯齿波输出切换为伺服控制器输出。这表明模块认为在该周期内的主峰时间宽度大于前一周期内所有疑似峰的最大宽度。

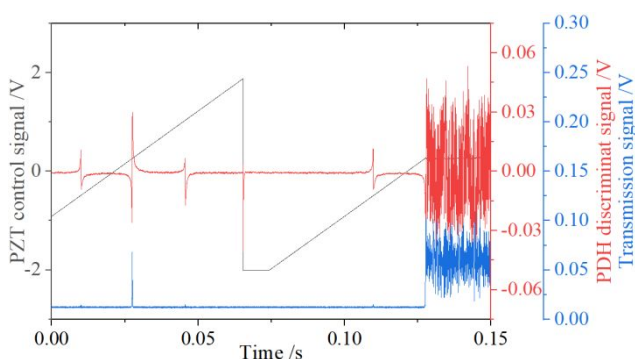


图 14 从扫频到锁频的自动切换过程

Fig.14 The process of automatic transition from scan to lock

为进一步说明切换过程的细节, 有图 15 所示是在第二周期处的局部放大图。其中粉色虚线标识的相交处点 A 是实际状态切换的地方。由于鉴频信号峰与透射信号峰位置是对应的, 容易看出 A 点位置位于透射信号峰上。并且该点同图 13 中的锁频点 O 一致, 均处于鉴频信号的线性区域中。在状态切换后, 伺服控制器即将此线性区域作为误差信号来实时校正激光频率的偏移。最终当频率锁定完成时, CCD 中观察到的透射光斑亮度会远超扫频状态时的亮度, 即透射信号的幅值会被拉高并保持小范围波动。

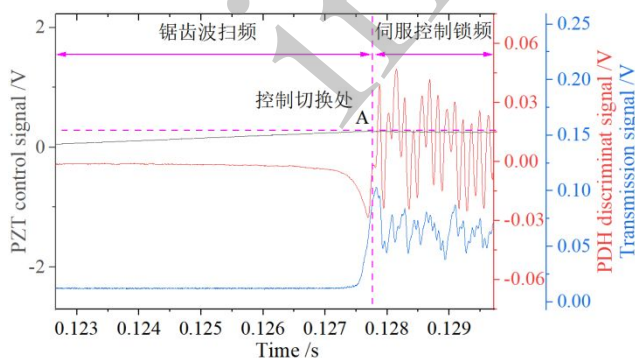


图 15 第二个扫描周期内的放大图

Fig.15 The enlarged view of the second scan cycle

图 16 所示是数字稳频全过程中的频率变化, 由波长计 (WS7-30, HighFinesse) 记录。相较局部放大图 16(a)中自由运转阶段的 10MHz 左右频率漂

移, 采取 PDH 主动噪声抑制措施后激光器的频率波动得到明显改善。由图 16(b)中锁定阶段的放大图可见此时波动范围小于 2MHz。激光频率的精确评估需要进一步拍频分析, 相关测量设备正在建立中。

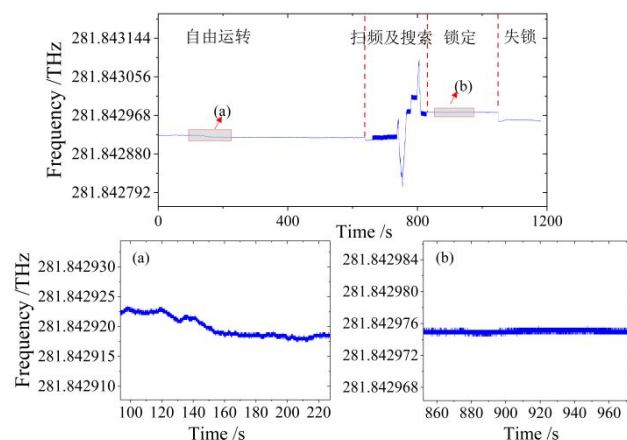


图 16 数字稳频中的激光频率漂移

Fig.16 The laser frequency drift during digital frequency stabilization process

随着参考腔精细度的提高, 电子学伺服对控制精度和噪声的要求也更严格。文中腔共振峰线宽为 4.3kHz, 压电陶瓷的调谐系数为 1MHz/V, 即允许的调谐电压范围仅为 4.3mv。而 16 位宽 DAC 的电压精度约为 0.46mv, 这意味着锁定共振峰时此范围仅使用 9 个点来描绘。这是本文认为锁定不佳的一个原因。另一个则是硬件电路的实际噪声明显。因为 PDH 稳频要求反馈环路自身的电子学噪声足够低, 以避免在伺服控制过程中引入额外的噪声。

图 17 所示为使用频谱仪 (N9020A, Agilent) 测试的电子学环路噪声。可见一方面电路板底噪较频谱仪本底高约 25dB, 另一方面该底噪相较 DDS 加 DAC 方式所发生的 1.3MHz 弦波基本在同一量级。这说明环路中电子学的噪声已不可忽视, 并且 DDS 波形发生器不是此噪声的主要来源。

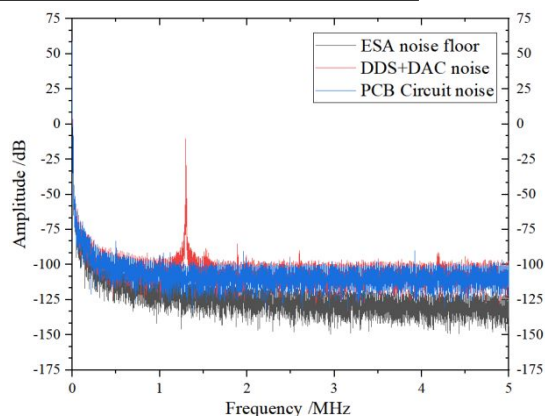


图 17 FPGA 板卡底噪测量

Fig.17 Floor noise measurement of the FPGA circuit board

5 结论

本文结合 PDH 技术小型化和智能化发展方向, 在驱动信号发生、鉴频信号解调和控制环路伺服等方面详细介绍了数字激光稳频系统的设计方案。从腔反射信号的形式分析开始, 说明了幅度解调获取有效鉴频信息的方法。并在此基础上创新设计了一种用于锁频点定位的自动寻峰算法, 该算法适应性强, 可满足实时锁频点定位要求。最后通过搭建 F-P 腔稳频实验装置进行了锁频功能的测试。波长计所采集的激光频率数据表明该方案下的有效稳频时长

为半小时, 锁频后的相对频率漂移范围小于 2MHz。该实验结果验证了设计的寻峰算法及全数字稳频方案的可行性。

通过对 DAC 实际控制精度和电子学环路噪声进行分析, 可知目前的锁定只是初步跟随上高精度腔的共振峰, 而非是窄线宽的精确锁定。为此后续一方面将增加慢速温控环路来抑制长时频漂, 继续增加稳频时长。另一方面将设计具有更小噪声的 PCB 电路, 减小电源纹波, 并选用位宽合适且具有足够转换速率的 DAC 来平衡高精度腔锁定对电子学环路噪声和控制反馈带宽的需求。

参考文献:

- [1] HUANG S, GONG X, XU P, et al.. Gravitational wave detection in space--a new window in astronomy[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(1): 010404.
- [2] LI R, WU Y, RUI Y, et al.. Absolute Frequency Measurement of ^6Li D Lines with kHz-Level Uncertainty[J]. *Physical review letters*, 2020, 124(6): 063002.
- [3] LIU L, LÜ D S, CHEN W B, et al.. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms[J]. *Nature communications*, 2018, 9(1): 2760.
- [4] CORWIN K L, LU Z T, HAND C F, et al.. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. *Applied optics*, 1998, 37(15): 3295-3298.
- [5] 张沛, 王晨曦, 宋丽军, 等. 基于 FPGA 的半导体激光器稳频系统[J]. *量子光学学报*, 2024, 30(01): 95-104.
- [6] ZHANG P, WANG CH X, SONG L J, et al.. Frequency Stabilization System of Semiconductor Laser Based on FPGA[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2024, 30(01): 95-104. (in Chinese).
- [7] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} 调制转移光谱稳频技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 27-34.
- [8] HONG Y, HOU X, CHEN D J, et al.. Research on Frequency Stabilization Technology of Modulation Transfer Spectroscopy Based on Rb^{87} [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 27-34. (in Chinese).
- [9] BLACK E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *American journal of physics*, 2001, 69(1): 79-87.
- [10] SHADDOCK D A, GRAY M B, MCCLELLAND D E. Frequency locking a laser to an optical cavity by use of spatial mode interference[J]. *Optics letters*, 1999, 24(21): 1499-1501.
- [11] MATEI D G, LEGERO T, HÄFNER S, et al.. 1.5 μm lasers with sub-10 mHz linewidth[J]. *Physical review letters*, 2017, 118(26): 263202.
- [12] HERBERS S, HÄFNER S, DÖRSCHER S, et al.. Transportable clock laser system with an instability of 1.6×10^{-16} [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(20): 5441-5444.
- [13] JIAO D, DENG X, GAO J, et al.. Highly vibration-resistant sub-Hertz ultra-stable laser passing over 1700 km transport test[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 130: 104608.
- [14] GILLOT J, TETSING-TALLA S F, DENIS S, et al.. Digital control of residual amplitude modulation at the 10^{-7} level for ultra-stable lasers[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 35179-35188.
- [15] ZEYEN M, AFFOLTER L, AHMED M A, et al.. Pound-Drever-Hall locking scheme free from Trojan operating points[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(1).
- [16] LUO Y, LI H, YEH H C. Note: digital laser frequency auto-locking for inter-satellite laser ranging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5).

- [15] 罗子人,张敏,靳刚,等.中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J].深空探测学报,2020,7(1):3-10.
LUO Z R, ZHANG M, JIN G, et al.. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program "Taiji" and "Taiji-1" satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10. (in Chinese).
- [16] 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.
JI J W, CHENG H N, ZHANG ZH, et al.. Automatic Laser Frequency Stabilization System for Transportable ^{87}Rb Fountain Clock[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 163-169. (in Chinese).
- [17] YAN C, SHI H, YAO Y, et al.. Automatic, long-term frequency-stabilized lasers with sub-hertz linewidth and 10^{-16} frequency instability[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(7): 070201.
- [18] GUO X, ZHANG L, LIU J, et al.. An automatic frequency stabilized laser with hertz-level linewidth[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107498.
- [19] ZHANG F, LIU K, LI Z, et al.. Long-term digital frequency-stabilized laser source for large-scale passive laser gyroscopes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(1).
- [20] LEE S, LEE S B, PARK S E, et al.. Compact modulation transfer spectroscopy module for highly stable laser frequency[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106698.
- [21] LIU X, ZHAI Z, LIU J, et al.. Parameter Optimization of Digital Locking of an Optical Cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 1536001.
- [22] LUDA M A, DRECHSLER M, SCHMIEGELOW C T, et al.. Compact embedded device for lock-in measurements and experiment active control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2).
- [23] Yan C, Sun J, Liu W. An efficient high SFDR PDDS using high-pass-shaped phase dithering[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2021, 29(11): 2003-2007.
- [24] HU J, LIU S, WU X, et al.. Orthogonal demodulation Pound-Drever-Hall technique for ultra-low detection limit pressure sensing[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3223.
- [25] 严利平,张哲伟,谢建东等.双调制深度大线性动态范围自适应 PDH 稳频方法[J].光学学报,2023,43(19):123-134.
YAN L P, ZHANG ZH W, XIE J D, et al.. Adaptive PDH Frequency Stabilization Method with Large Linear Dynamic Range Based on Two Modulation Depths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19): 123-134. (in Chinese)
- [26] BERSANETTI D, DIAZ J C, ALLOCCA A, et al.. New algorithm for the guided lock technique for a high-finesse optical cavity[J]. *Astroparticle Physics*, 2020, 117: 102405.

作者简介: 于龙昆(1987-), 男, 江西九江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学湍流效应评估/图像处理、光电测量技术等方面的研究。E-mail: yulongkun@ncu.edu.cn。

曹开明(1999-), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 现就读于南昌大学信息工程学院, 主要从事激光频率噪声抑制方面的研究。E-mail: renyusilver_ckm@email.ncu.edu.cn。

李磐(1986-), 男, 湖南益阳人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光技术及应用, 窄线宽激光及放大、激光非线性变频和引力波激光噪声评估与抑制等方面的研究。E-mail: lipan@imech.ac.cn。

罗子人(1980-), 男, 湖南长沙人, 博士, 研究员, 现为中国科学院力学研究所研究员。太极计划首席科学家助理, 主要从事引力波探测的空间激光干涉测距技术的理论分析和方案设计方面的研究。E-mail: luoziren@imech.ac.cn。

通信地址: 李磐, 北京市海淀区北四环西路 15 号, 联系固话 010-82544139, 手机号 18201266458