

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514753

双频调制转移光谱激光自动稳频方法*

谢建东, 郭向阳, 严利平, 楼盈天, 陈本永

(浙江理工大学信息科学与工程学院(网络空间安全学院) 杭州 310018)

摘要: 为克服传统单频调制转移光谱方法中误差信号灵敏度不足及激光锁定状态判断困难的问题, 提出了一种双频调制转移光谱的双频调制转移光谱(DF-MTS)激光频率自动稳频方法。该方法在泵浦光上施加双频正弦相位调制, 解调获得两个误差信号并叠加, 构建出一个高灵敏度的双频调制转移误差信号。同时, 引入了基于二倍频信号辅助的激光锁定判别策略, 利用吸收信号中的二倍频信号以及误差信号的幅值信息, 判断激光频率是否与吸收峰对准, 实现吸收峰的自动识别与锁定状态的快速判别。进一步在可编程逻辑门阵列(FPGA)全硬件实时信号处理技术的基础上设计了全自动稳频控制模块, 具备双频误差信号解调、二倍频信号解调、识别-控制-监测控制模块(ICM)识别与控制监测、扫描控制、比例-积分-微分(PID)闭环控制、快速重锁等功能, 当检测到失锁时会快速重新锁定, 可实现全自动的稳频控制。开展了理论推导与仿真分析, 搭建了激光稳频实验系统, 实验结果表明, DF-MTS 方法所得的误差信号灵敏度较传统方法提升了 20.24%。进一步利用飞秒光频梳进行拍频测量, 验证了激光成功锁定于⁸⁵Rb D2 线($F=2 \rightarrow F'=3$)吸收峰, 锁定后稳频激光与吸收峰理论值间频差的标准差为 17 kHz, 相对阿伦偏差可达 1.09×10^{-11} 。自动重锁实验结果表明, 系统可实时监测激光的锁定状态, 检测到失锁后可在 40.192 ms 内完成重新锁定, 展现出良好的动态响应能力与鲁棒性。

关键词: 激光稳频; 调制转移光谱技术; 双频调制; 二倍频; 自动重锁

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A laser automatic frequency stabilization method using dual-frequency modulation transfer spectroscopy technology

Xie Jiandong, Guo Xiangyang, Yan Liping, Lou Yingtian, Chen Benyong

(School of Information Science and Engineering (School of Cyber Science and Technology), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This study proposes an automatic laser frequency stabilization method using dual-frequency modulation transfer spectroscopy (DF-MTS) to overcome the limitations of conventional MTS methods, such as insufficient sensitivity of the error signal and difficulty in determining the laser lock status. In this method, a dual-frequency sinusoidal phase modulation is applied to the pump beam, and two resulting error signals are demodulated and combined to construct a highly sensitive dual-frequency modulation transfer error signal. Furthermore, a second-harmonic-signal-assisted discrimination strategy is introduced for laser lock status determination. By utilizing the second-harmonic component in the absorption signal along with the amplitude information of the error signal, this approach enables accurate judgment of whether the laser frequency is aligned with the absorption peak, thereby achieving automatic absorption peak identification and rapid lock status detection. Based on the full-hardware real-time signal processing technology of field programmable gate array (FPGA), a fully automatic frequency stabilization control module is designed, featuring dual-frequency error signals demodulation, second harmonic signal demodulation, identify, control, and monitor (ICM), scanning control, proportional integral derivative control (PID), and fast relocking functions. When the loss of lock is detected, it will quickly start the relock process, enabling fully automatic frequency stabilization control. Theoretical derivation and simulation analysis are conducted, and a laser frequency stabilization experimental system is constructed to validate the proposed method. Experimental results show that the DF-MTS method improves the sensitivity of the error signal by 20.24% compared with conventional techniques. Further verification via beat-

收稿日期: 2025-12-04 Received Date: 2025-12-04

* 基金项目: 国家自然科学基金(52405604, 52375552, 52427808)、浙江省科技计划(LQ24E050005, 2024C01174, 2025C01051, 2022R52052)、国家重点研发计划课题(2022YFF0705803)项目资助

frequency measurements using a femtosecond optical frequency comb confirms that the laser is successfully locked to the absorption peak of the ^{85}Rb D2 line ($F=2 \rightarrow F'=3$). The standard deviation of the frequency difference between the stabilized laser and the theoretical value of the absorption line is 17 kHz, and the relative Allan deviation reaches 1.09×10^{-11} . Auto-relock experiments show that the system can monitor the locking status of the laser in real time and complete relocking within 40.192 ms upon detecting loss of lock, indicating excellent dynamic response and robustness.

Keywords: laser frequency stabilization; modulation transfer spectroscopy; dual frequency modulation; second harmonic; automatic relock

0 引言

激光稳频技术在激光干涉仪、原子重力仪、原子磁力仪以及原子喷泉钟等精密测量系统重发挥着重要作用^[1-5]。碱金属原子吸收光谱具因其高稳定性和频率可溯源性,被视为理想的激光稳频绝对频率参考^[6]。目前,基于碱金属原子吸收谱线的稳频技术主要包括饱和吸收光谱、频率调制光谱和调制转移光谱(modulation transfer spectroscopy, MTS)技术等^[7-9]。其中,MTS技术通过四波混频过程能有效抑制背景噪声,提高系统长期稳定性^[10-12]。在工程应用中,高稳定度的激光频率输出并保持全自动长期锁定具有重要意义,这对MTS误差信号的探测质量、吸收峰的识别准确度以及稳频控制策略提出了更高的要求^[13-16]。

高质量的误差信号是实现高稳定度激光频率锁定的基础。影响误差信号质量的关键因素包括气室原子浓度与温度、激光功率与偏振态、调制频率与调制深度等。Lee等^[17]通过抑制外部磁场对气室的影响,提升了误差信号幅值;Wu等^[18]通过提高气室温度,对两台锁定的激光进行拍频实验,频率漂移约为2 MHz;Innes等^[19]比较了不同泵浦-探测光偏振配置,验证了正交线偏振组合可显著增强误差信号幅值;Wu等^[20]优化了泵浦光与探测光的功率、偏振态及气室温度等参数,在拍频实验中验证了相对阿伦偏差为 1.35×10^{-11} 的稳定度(积分时间为1 s)。Mccarron等^[21]研究了MTS调制频率对误差信号的影响,发现当调制频率与原子谱线自然线宽之比分别为1和1.5时,误差信号的过零点斜率和幅值可分别达到最大值。Xu等^[22]采用谐振频率可调的电光调制器用于不同调制频率的MTS探测,确定了最优调制频率,最终实现了1 s积分时间下相对阿伦偏差为 1.73×10^{-10} 的稳定度。

吸收峰的准确识别与锁定控制方法,是实现激光全自动长期锁定的关键。激光稳频过程包括:受限在扫频过程中识别目标吸收峰,将激光频率调节至吸收峰中心区域(误差信号过零点附近的单调区间),然后启动闭环锁定,并在锁定后持续监测锁定状态,以便在失锁时快速恢复。现有吸收峰识别方法主要分为两类:一类基于误差信号,如检测误差信号过零点或判断其导数是否超过设定阈值^[23-25]。这类方法响应迅速,但误差信号在激光

锁定和完全失锁(远离吸收峰)时均接近于0,使得仅凭误差信号难以准确区分这两种状态。另一类方法基于饱和吸收信号进行识别,如Li等^[26-28]结合互相关技术与支持向量机对饱和吸收谱进行吸收峰定位,并通过监测误差信号的突变来判断失锁事件,有效实现了自动稳频及失锁恢复功能,平均重锁时间约为56 s。Winkler等^[29]利用卷积神经网络识别吸收峰,实现了633 nm激光器至碘分子目标谱线的自动锁定,识别过程在计算机上完成,耗时约80 s。本课题组^[30-31]前期工作中研究了基于卷积神经网络的铷原子吸收峰智能识别方法,并采用可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)对网络计算过程进行硬件加速,将单次识别时间缩短至0.25 ms,结合误差信号跳变检测实现失锁判断,失锁后可在3~4 s完成重锁。

针对上述问题,本研究提出了一种双频调制转移光谱(dual-frequency modulation transfer spectroscopy, DF-MTS)的激光频率自动稳频方法。该方法通过在DF-MTS中提取两个频率成分的误差信号,并将其叠加合成更高灵敏度的复合误差信号,从而提升激光频率锁定的稳定度;同时,引入二倍频信号作为判别依据,判断激光频率是否准确对准吸收峰,以实现吸收峰的可靠识别与锁定状态的有效监测;进一步采用FPGA技术构建了全自动稳频控制系统,最终实现激光频率在目标吸收峰上的长期、自动、稳定锁定。

1 理论分析

1.1 DF-MTS原理

基于DF-MTS的激光频率自动锁定方法原理框图如图1所示。该系统由4个模块构成:光源、DF-MTS探测单元、信号解调单元以及自动锁定单元。

在DF-MTS探测单元中,一束频率为 ν 的激光经光纤分束器以3:1的功率比分为泵浦光与探测光。泵浦光通过光纤型电光相位调制器(electro-optic phase modulator, EOPM)施加频率分别为 f_1 和 f_2 的正弦相位调制。调整后的泵浦光的电场可表示为: $E = E_0 \sin[2\pi\nu t + m_1 \sin(2\pi f_1 t) + m_2 \sin(2\pi f_2 t)]$,其中 E_0 为激光振幅, m_1 和 m_2 分别为两个调制的调制深度, t 为时间变量。调

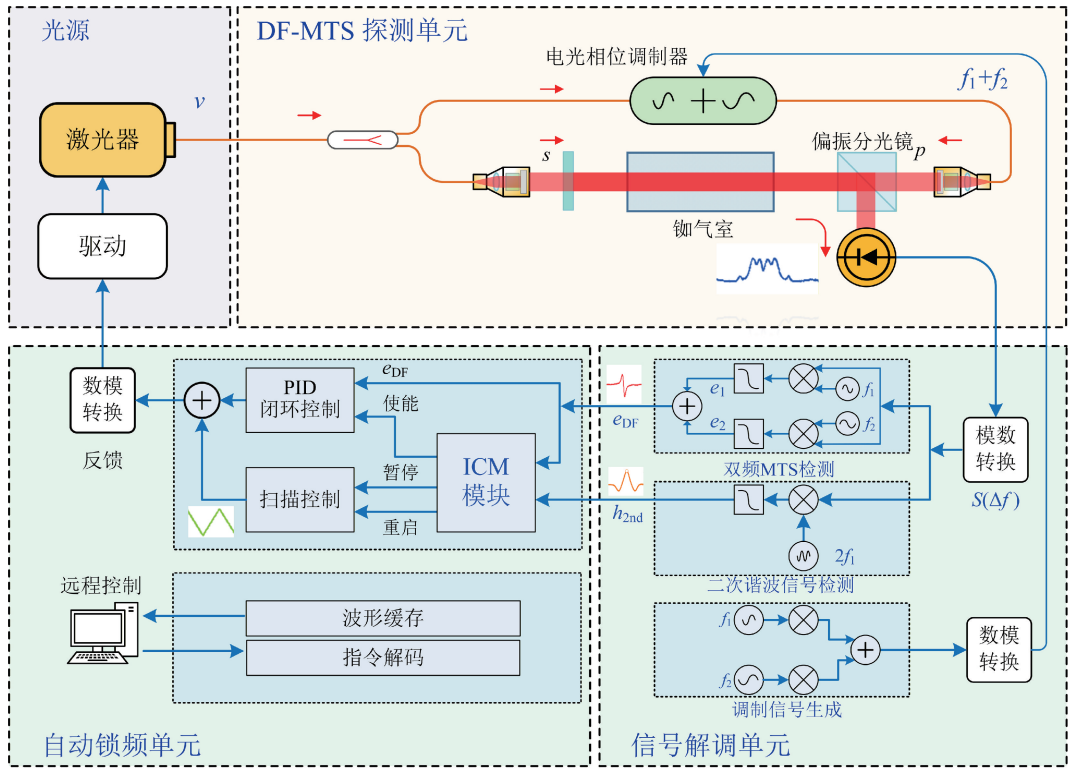


图 1 基于 DF-MTS 的激光频率自动锁定方法原理

Fig. 1 Diagram of the DF-MTS based on the automatic laser frequency locking method

制后的泵浦光在频域中产生频率为 $\nu \pm f_1$ 、 $\nu \pm f_2$ 的两对激光边带。通过四波混频效应,该调制特性被转移到未直接调制的探测光,使其产生相同分布的激光边带^[19]。

当激光频率扫描通过铷原子吸收峰时,DF-MTS 探测单元获得的吸收信号可表示为:

$$S(\Delta f) = \sum_{i=1}^2 k_i A_i [P_i(\Delta f) \cos(\omega_i t + \phi_i) + Q_i(\Delta f) \sin(\omega_i t + \phi_i)] \quad (1)$$

式中: Δf 表示激光频率与吸收峰中心频率之差, i 为两个调制频率的序号; $k_i = C / \sqrt{\Gamma^2 + \omega_i^2}$, 其中 $\Gamma \approx 6$ MHz 表示铷原子吸收谱线的自然线宽, C 为常数项; $A_i = J_0(m_i) J_1(m_i) J_0(m_{3-i})^2$ 为受调制深度影响的增益系数; $P_i(\Delta f) = L_{-1}(i) - L_{-1/2}(i) + L_{1/2}(i) - L_1(i)$ 表示吸收线型信号分量, $Q_i(\Delta f) = D_1(i) - D_{1/2}(i) - D_{-1/2}(i) + D_{-1}(i)$ 表示色散线型信号分量, 其中 $L_n(i) = \Gamma^2 / [\Gamma^2 + (\Delta f - n f_i)^2]$, $D_n(i) = \Gamma(\Delta f - n f_i) / [\Gamma^2 + (\Delta f - n f_i)^2]$; ϕ_i 表示相位。

在信号解调单元中,采样后的吸收信号分别与两个本振参考信号(频率为 f_1 和 f_2) 相乘,经低通滤波处理,得到对应于两个调制频率的误差信号,其数学表达式为:

$$e_i(\Delta f) = LPF[S(\Delta f) \cdot \sin(\omega_i t + \phi'_i)] = \frac{1}{2} k_i A_i [-P_i(\Delta f) \sin(\Delta \phi_i) + Q_i(\Delta f) \cos(\Delta \phi_i)] \quad (2)$$

式中: $LPF[\]$ 表示低通滤波运算; ϕ'_i 为本振信号的相位, $\Delta \phi_i = \phi_i - \phi'_i$ 为相位差。理论上,误差信号包含吸收与色散两种线型成分。由于色散线型在吸收峰中心附近具备单调特性,有利于实现稳定锁频,通常将相位差 $\Delta \phi_i$ 调为 0,使误差信号中仅保留色散成分^[21-22],从而误差信号可简化为 $e_i(\Delta f) = 1/2 k_i A_i Q_i(\Delta f)$ 。

为提升误差信号的斜率与幅值,将两个解调后的误差信号进行线性叠加,构造出一种新型复合误差信号,称为 DF-MTS 误差信号,即:

$$e_{DF}(\Delta f) = e_1(\Delta f) + e_2(\Delta f) = \frac{1}{2} A_1 k_1 Q_1(\Delta f) + \frac{1}{2} A_2 k_2 Q_2(\Delta f) \quad (3)$$

为分析不同调制深度组合对 DF-MTS 误差信号斜率与幅值的影响,基于式(3)开展数值仿真。设定调制频率分别为与 $f_1 = 9$ MHz(对应幅值最大)与 $f_2 = 6$ MHz(对应过零点斜率最大)^[21],对应的调制深度分别表示为 m_1 与 m_2 。图 2 展示了误差信号幅值与斜率的归一化仿真强度图,横坐标与纵坐标分别表示调制深度 m_1 与 m_2 ,取值范围为 0~2 rad。当任一调制深度为 0 时,DF-MTS 退化为传统单频 MTS。对于单频 MTS,误差信号幅值在 $(m_1 = 1.07, m_2 = 0)$ 处取得最大值 0.840 0,误差信号斜率在 $(m_1 = 0, m_2 = 1.07)$ 处取得最大值 0.216 5。

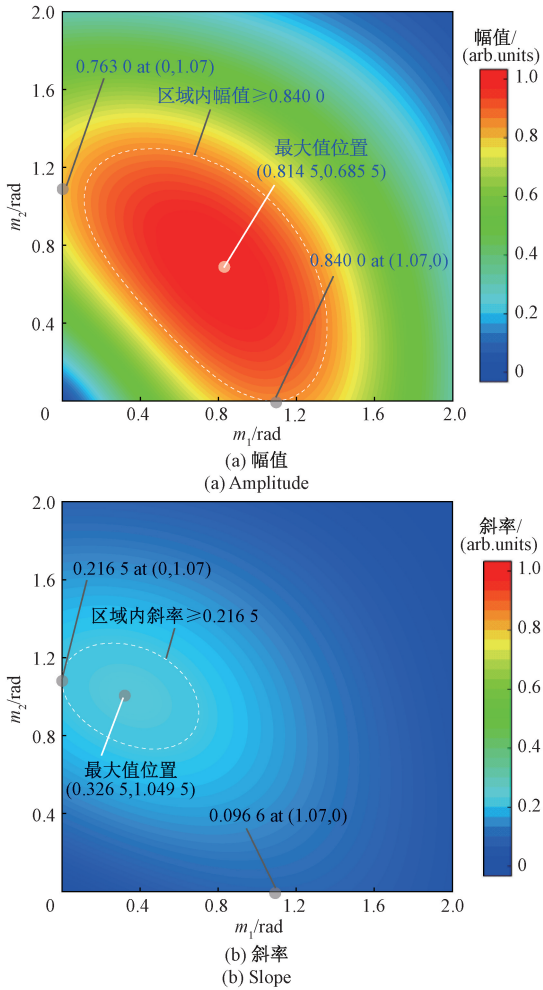
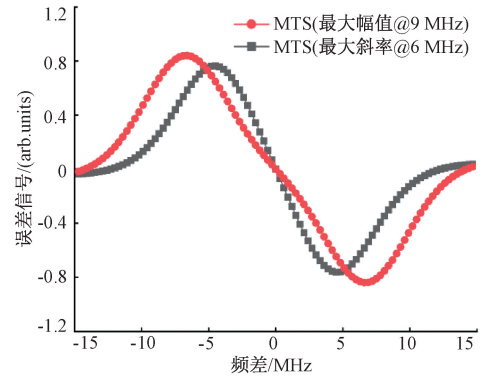


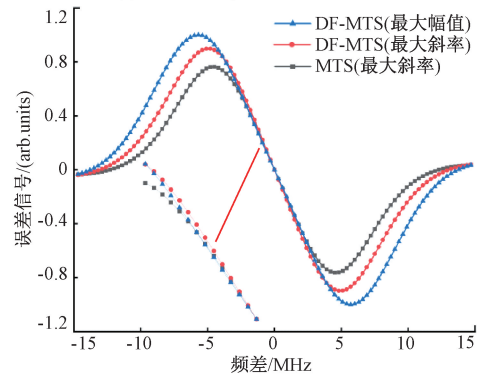
图2 误差信号幅值与斜率的归一化仿真结果强度
Fig. 2 Normalized intensity map of simulation results for amplitude and slope

在图2中绘制了这两条极值等高线,用于与DF-MTS进行对比。由图2(a)可知,在等高线区域内,DF-MTS的幅值均高于传统MTS,并在($m_1 = 0.8145, m_2 = 0.6855$)处达到最大值1.0000。由图2(b)可知,在等高线区域内,DF-MTS的斜率高于传统MTS,在($m_1 = 0.3265, m_2 = 1.0495$)处达到最大值0.2467。与传统MTS对应最大值相比,DF-MTS在幅值与斜率方面分别提升了16.00%和13.99%。

图3进一步比较了传统MTS和DF-MTS误差信号的仿真波形。如图3(a)所示,对于传统MTS,9 MHz调制频率下的误差信号幅值最大,但过零点附近存在畸变,导致斜率下降;6 MHz调制频率下过零点斜率较高,但整体幅值较小。如图3(b)所示,DF-MTS误差信号在幅值与斜率方面均优于传统MTS,表明通过双频调制与参数优化,可同步提升误差信号的幅值与斜率。



(a) 传统MTS误差信号
(a) The error signals of traditional MTS



(b) DF-MTS与传统MTS误差信号
(b) The error signals of traditional MTS and DF-MTS

图3 传统MTS与DF-MTS误差信号的仿真波形对比
Fig. 3 Comparison of simulated error signals between traditional MTS and DF-MTS

1.2 自动锁定控制

在激光频率锁定过程中,无论是处于锁定状态还是远离吸收峰的失锁状态,误差信号均接近于0。因此,仅依赖误差信号难以准确判断激光是否对准吸收峰,亦难以区分激光是否处于有效锁定状态。相比之下,探测光中正、负一阶边带相互拍频干涉所产生的二倍频信号,在激光频率对准吸收峰时达到极大值,而在远离吸收峰时趋近于零,具备明确的特征选择性^[8,32]。基于该特性,所提出的方法采用二倍频信号辅助实现吸收峰识别与锁定状态判断,进而构建完整的自动锁频控制系统。

如图1所示,在信号解调单元中,吸收信号与频率为 $2f_1$ 的本振参考信号相乘,经低通滤波后获得二倍频信号, h_{2nd} 为该信号的幅值。由于二倍频信号在激光频率与吸收峰频率重合时到达最大值,而误差信号在该点附近过0,可通过设定阈值比较二者是否满足特定条件,判断激光频率是否与吸收峰对准。据此构建式(4)判别函数,即:

$$flag = \begin{cases} 1, & (h_{2nd} \geq h_T) \& (|e_{DF}| \leq e_T) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_T 和 e_T 分别为二倍频信号与误差信号的预设阈值,“&”表示逻辑“与”运算。当判别函数 $flag = 1$ 时,判

定激光频率与吸收峰对准,否则判定为未对准。

为实现自动锁定控制,设计了如图 4 所示的识别-控制-监测控制模块 (identify, control and monitor, ICM)。在扫描阶段,该模块控制激光器进行三角扫频,并实时监测判别函数 $flag$ 的值。一旦检测到 $flag = 1$,模块立即发出扫描暂停信号,使扫描电压保持当前值,并同时图 1 的向比例-积分-微分 (proportional integral deriva-

ive, PID) 控制器发送锁定使能信号,启动闭环反馈控制,使激光频率锁定至吸收峰中心。在锁定状态下,二倍频信号维持在最大值附近,误差信号稳定在零点,此时判别函数 $flag = 1$ 。模块持续监测 $flag$ 状态,若其变为 0,则判定为失锁,立即关闭 PID 输出,系统重新进入扫频阶段,重启自动重锁流程,从而实现激光频率的长期自动稳定锁定。

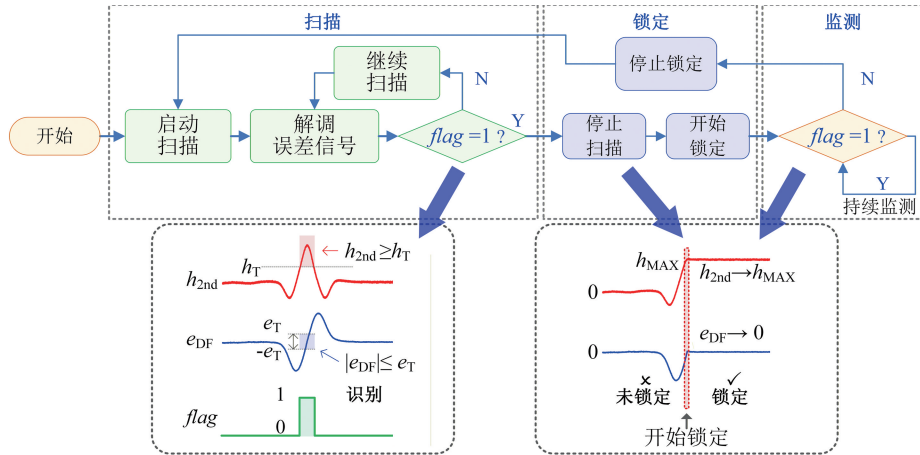


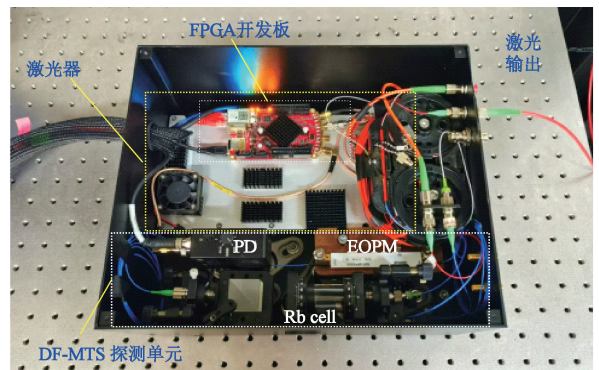
图 4 基于识别判据的自动锁频控制流程

Fig. 4 Flowchart of automatic locking based on the identification criterion

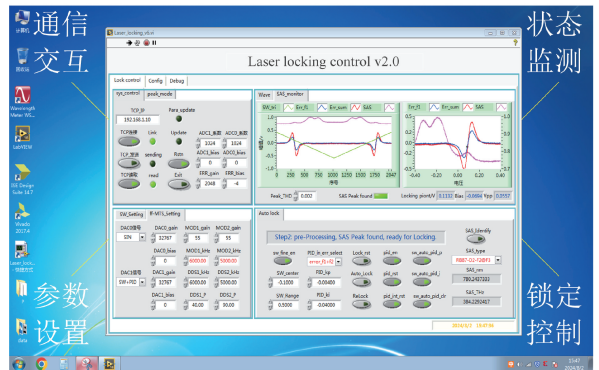
2 实验验证

2.1 激光自动稳频系统搭建

图 5(a) 展示了基于 DF-MTS 技术的激光自动稳频系统实物图。该系统整体尺寸为 35 cm×30 cm×10 cm, 面积与 A4 纸相当,具有较高的集成度与紧凑性。系统采用外腔半导体激光器作为光源,其中心波长为 780.244 nm,线宽为 20 kHz,光功率为 80 mW,频率调谐系数为 180 MHz/V。铷原子气室作为激光频率参考单元。泵浦光调制采用光纤型电光相位调制器 (EOPM, ixblue NIR-MPX800-LN),其工作带宽为 150 MHz。信号解调与自动锁频控制由搭载 Zynq-7010 处理核心的 FPGA 开发板 (RedPitaya, STEMLab125-14) 实现。该板板载 14 位双通道模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 与数模转换器 (digital to analog converter, DAC), 采样率与更新率均为 125 MHz,支持高精度实时数据采集与闭环控制。图 5(b) 所示为基于 LabVIEW 平台开发的远程控制软件界面,可实时显示 FPGA 采集的吸收信号与误差信号,全面监控锁频过程,并通过图形化界面配置系统参数,包括三角波扫描范围与扫描速率、误差信号解调频率与相位、PID 控制器参数等,显著提高了系统的可操作性与易用性。



(a) 系统实物图
(a) Physical setup



(b) 远程控制软件界面
(b) Remote-control software interface

图 5 激光稳频系统

Fig. 5 Laser frequency stabilization system

2.2 DF-MTS 探测实验

为确定最优调制频率组合,在 1~10 MHz 范围内以 1 MHz 步进调节调制频率,调制信号幅值固定为 15 V,开展传统 MTS 探测实验,分析误差信号的幅值与过零点斜率。斜率通过对误差信号过零点附近区域进行线性拟合获得。

实验结果如图 6 所示,与仿真趋势一致:调制频率为 6 MHz 时,误差信号斜率达到最大值 14.38;调制频率为 10 MHz 时,误差信号幅值达到最大值 0.67 V,但对应斜率下降至 12.63,说明单一调制频率难以同时优化误差信号的斜率与幅值。

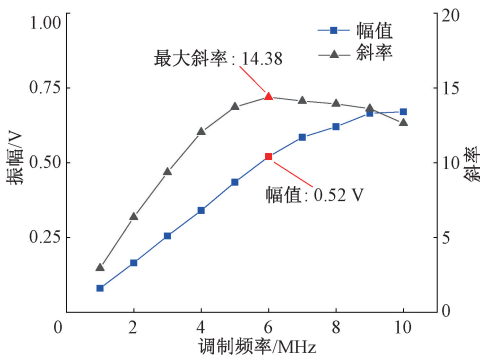


图 6 传统 MTS 在不同调制频率下的误差信号斜率与幅值
Fig. 6 Slope and amplitude of the error signal for traditional MTS at various modulation frequencies

考虑到 9 MHz 调制下误差信号幅值与 10 MHz 接近且斜率更大,DF-MTS 选用调制频率 $f_1 = 9$ MHz 与 $f_2 = 6$ MHz,对应调制电压记为 U_1 和 U_2 。在硬件限制(总电压 ≤ 15 V)下,以 1.5 V 步进调节两路调制电压 U_1 和 U_2 ,测量误差信号的斜率和幅值,结果如图 7 所示。误差信号幅值在 $U_1 = U_2 = 7.5$ V 时达到最大值 0.66 V,其他电压组合下均有所降低;误差信号过零点斜率在 $U_1 = 6$ V、 $U_2 = 9$ V 时取得最大值 17.29,对应幅值为 0.65 V,接近最大幅值。

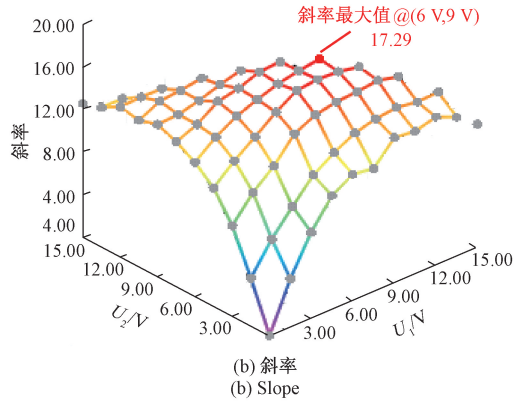
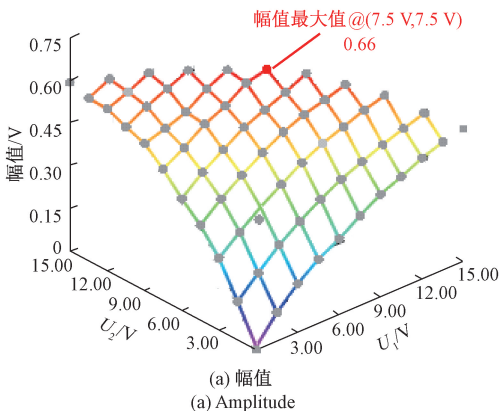


图 7 不同调制电压组合下 DF-MTS 误差信号的实验结果
Fig. 7 Experimental results of the DF-MTS error signal under different modulation voltages

在调制电压组合 ($U_1 = 6$ V, $U_2 = 9$ V) 下,误差信号过零点斜率最大且幅值接近最优,因此选定为 DF-MTS 的最佳调制参数。在后续实验中,DF-MTS 采用该组合参数用于激光双频调制 ($f_1 = 9$ MHz, $U_1 = 6$ V; $f_2 = 6$ MHz, $U_2 = 9$ V),传统 MTS 调制频率与幅值分别设为 6 MHz 与 15 V。如图 8 所示,DF-MTS 所获得的误差信号斜率较传统 MTS 提高 20.24%,幅值提高 24.04%,有利于激光频率锁定。图 8 中实线箭头代表 $V_{pp} = 1.04$ V,虚线箭头代表 $V_{pp} = 1.29$ V。

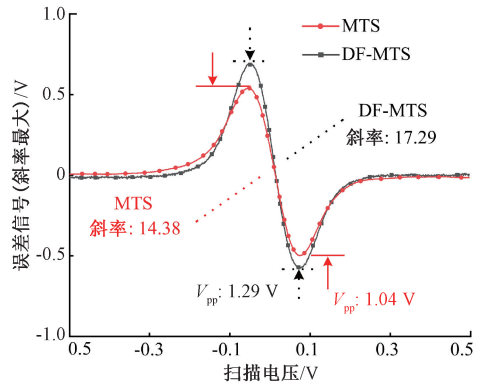


图 8 DF-MTS 与传统 MTS 实验获得的误差信号对比
Fig. 8 Comparison of error signals obtained from DF-MTS and traditional MTS in the experiment

2.3 DF-MTS 与传统 MTS 的频率稳定性对比实验

为评估所研制系统的频率准确度与稳定性,搭建了如图 9 所示的激光频率测量平台。采用 Menlo Systems FC1500-250 型飞秒光频梳作为基准,重复频率 f_{rep} 为 250 MHz,载波包络偏移频率 f_{CEO} 为 -20 MHz,参考时钟为频率稳定度优于 4×10^{-12} (1 s 平均时间)的超稳晶体时钟源 (Menlo Systems GPS-8)。首先使用波长计

(HighFinesse WS7-4822, 精度 30 MHz, 分辨率 0.1 MHz) 获取稳频激光的大致频率, 再通过光频梳系统的拍频单元获得稳频激光与频率梳之间的拍频信号, 使用高精度频率计 (Menlo Systems FXM50) 测量拍频信号频率 f_b , 最终换算得到稳频激光的频率^[33-34]。

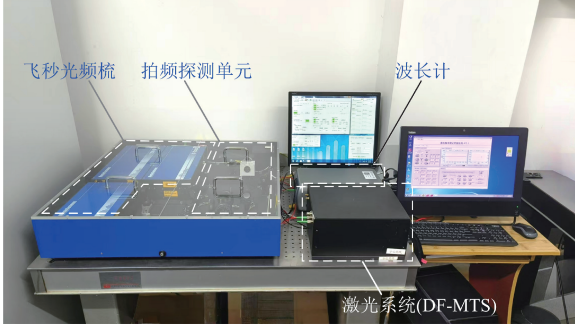


图 9 基于飞秒光频梳的激光频率测量实验平台

Fig. 9 Experimental setup for laser frequency measurement using a femtosecond optical frequency comb

波长计测量结果如图 10 所示, 锁定激光频率为 384 229 246.9 MHz。根据铷吸收峰频率分布可知, 该频率附近 ± 30 MHz 范围仅存在一个吸收峰, 对应⁸⁵Rb D2 线 ($F=2 \rightarrow F'=3$), 其标准跃迁频率为 384 229 241.7 MHz。测量偏差 (5.2 MHz) 小于波长计测量不确定度, 表明激光已成功锁定至该吸收峰。

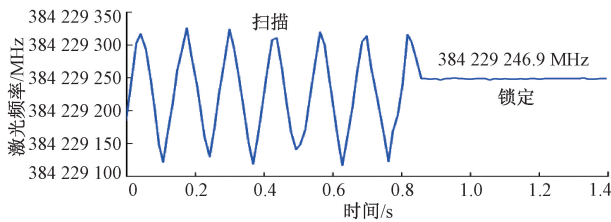


图 10 自动锁频过程中激光频率的测量结果

Fig. 10 Measurement results of the laser frequency during the automatic locking process

锁定激光与光频梳进行拍频, 频率关系为 $f_{\text{Laser}} = N \cdot f_{\text{rep}} + 2f_{\text{ceo}} + f_b$, 其中 N 表示光频梳中与锁定激光频率差最小的梳齿阶数。根据目标吸收峰频率计算得 $N = 1\,536\,917$ 。分别对 DF-MTS (调制频率 9 与 6 MHz) 于传统 MTS (调制频率 6 MHz) 锁定的激光进行与光频梳的拍频实验, 测量 2 h 拍频信号频率, 换算得到的激光频率如图 11 所示。图 11 中实线箭头代表峰峰值为 134 kHz, 虚线箭头代表峰峰值为 403 kHz。传统 MTS 锁定下, 频率抖动峰峰值为 404 kHz, 与吸收峰理论值差值的标准差为 62 kHz; DF-MTS 锁定下, 频率抖动峰峰值降低至 135 kHz, 与吸收峰理论值差值的标准差仅为 17 kHz, 远

小于铷原子自然线宽 (6 MHz), 表明 DF-MTS 显著提升了锁定激光的频率精度与稳定性。

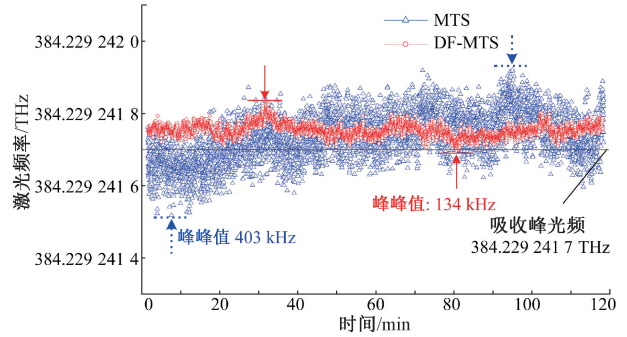


图 11 基于光学频率梳测得的激光频率值

Fig. 11 Laser frequency values measured using the optical frequency comb

为进一步评估锁定激光的频率稳定度, 计算了图 11 中激光频率的相对阿伦偏差, 结果如图 12 所示。在所有平均时间内, DF-MTS 的稳定度均优于传统 MTS。例如, 在 1 s 平均时间下, 传统 MTS 的相对阿伦偏差为 1.01×10^{-10} , DF-MTS 的相对阿伦偏差为 1.58×10^{-11} ; 在 4 s 平均时间下, DF-MTS 的相对阿伦偏差达到最小值 1.09×10^{-11} 。

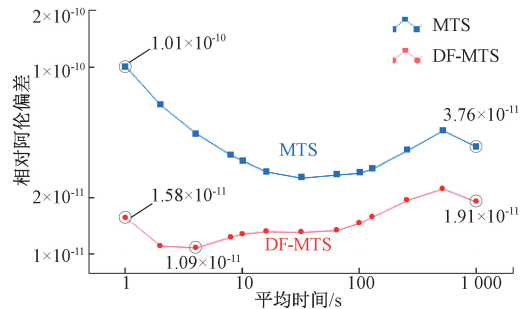


图 12 相对阿伦偏差测量结果

Fig. 12 Results of relative Allan deviation

2.4 自动重锁实验

为验证系统抗干扰与自动恢复能力, 进行重锁实验。在锁定状态下遮挡探测光以模拟失锁, 通过 FPGA 采集关键信号波形, 并利用波长计记录频率变化, 结果如图 13 所示。实验表明, 遮挡后二倍频信号在 0.256 ms 内由高降至低电平, 系统在 0.128 ms 后关闭 PID 控制 (PID 输出信号为 0) 并进入扫频阶段。扫频过程中, 二倍频信号在 0.64 ms 内由低跳变至高电平, 随后误差信号在 1.792 ms 内进入过零点附近, 系统立即启动 PID 控制, 并在 0.64 ms 内完成闭环锁定, 误差信号趋近于零。

上述实验结果表明, 系统失锁检测耗时仅为 0.64 ms, 响应延迟为 0.128 ms, 从识别吸收峰到完成锁

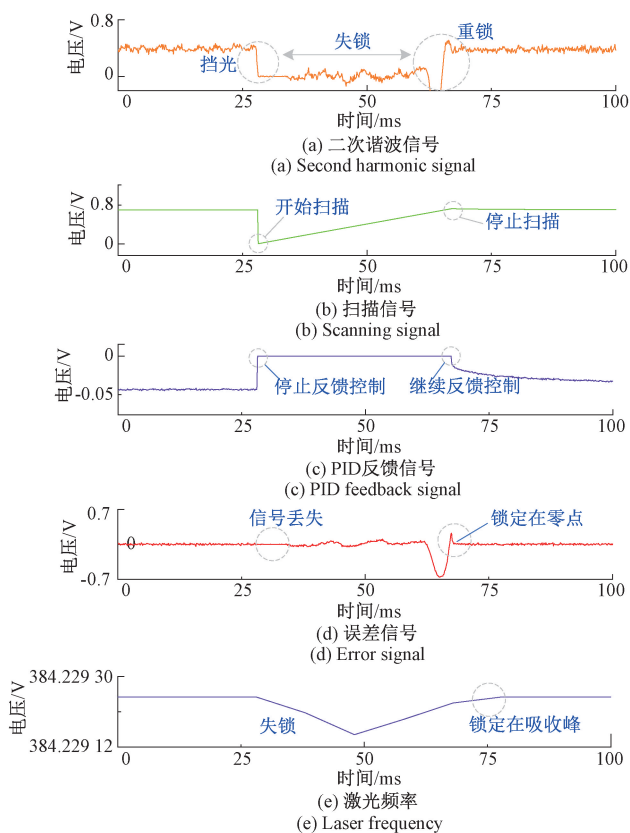


图 13 自动重锁过程中记录的信号波形

Fig. 13 Signal waveforms recorded during the automatic relocking process

定耗时仅为 3.072 ms。包括中间扫频时间在内,系统总重锁时间为 40.192 ms,表明所研制系统具备毫秒级快速重锁能力,对外界干扰具有良好的鲁棒性。

3 结 论

本研究提出了一种双频调制转移光谱激光稳频误差信号优化方法,并结合二倍频信号辅助判别机制,实现了一套全自动激光自动稳频系统。实验结果表明,与传统 MTS 技术相比,DF-MTS 方法将误差信号的斜率与幅值分别提升了 20.24% 和 24.04%,有效提高了误差信号的灵敏度与系统的锁定稳定度。通过飞秒光学频率梳进行拍频实验,验证了激光成功锁定于⁸⁵Rb D2 线 ($F=2 \rightarrow F'=3$) 吸收峰,锁定后频率与参考频率差值的标准差为 17 kHz。在频率稳定度方面,系统在 1 s 平均时间下的相对阿伦偏差为 1.58×10^{-11} ,并在 4 s 平均时间下达到最佳值 1.09×10^{-11} 。自动重锁实验进一步表明,系统具备快速响应与恢复能力:失锁检测时间为 0.64 ms,响应延迟为 0.128 ms,从失锁到完成重新锁定的总时间为 40.192 ms。综上所述,所提出的 DF-MTS 结合二倍频

信号辅助判别的激光自动稳频方法,能够实现高稳定性、快速全自动频率锁定,在激光干涉测量、原子物理、精密光谱及量子计量等高精度测量领域具有重要的应用潜力。

参考文献

- [1] 杨宏兴,付海金,胡鹏程,等. 超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 305-319.
YANG H X, FU H J, HU P CH, et al. Ultra-precision and high-speed laser interferometric displacement measurement technology and instrument [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 305-319.
- [2] 肖域坤,曾治霖,唐越,等. 基于激光球杆干涉仪的数控机床空间误差高效测量、辨识与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 222-233.
XIAO Y K, ZENG ZH L, TANG Y, et al. Efficient measurement, identification and compensation of volumetric errors on machine tools using laser bar [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 222-233.
- [3] 王凯楠,徐晗,周寅,等. 基于车载原子重力仪的外场绝对重力快速测绘研究[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 347-356.
WANG K N, XU H, ZHOU Y, et al. Research on rapid surveying and mapping of outfield absolute gravity based on vehicle-mounted atomic gravimeter [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(15): 347-356.
- [4] 董海峰,郭军,张海洋,等. 用于铯原子磁力仪的双 AOM 激光稳频系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 129-135.
DONG H F, GUO J, ZHANG H Y, et al. Double AOM frequency stabilization system for cesium magnetometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 129-135.
- [5] 秦晓敏,史田田,王志洋,等. 窄线宽外腔半导体激光器研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 63-78.
QIN X M, SHI T T, WANG ZH Y, et al. Research progress of narrow-linewidth external cavity diode lasers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 63-78.
- [6] 洪毅,侯霞,陈迪俊,等. 基于 Rb⁸⁷ 调制转移光谱稳频技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 27-34.
HONG Y, HOU X, CHEN D J, et al. Research on frequency stabilization technique based on Rb⁸⁷ modulation transfer spectrum [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 27-34.
- [7] ZI F, WU X J, ZHONG W CH, et al. Laser frequency

- stabilization by combining modulation transfer and frequency modulation spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2649-2652.
- [8] ZHAO W L, ZHOU X X, SHANG J CH, et al. Synchronous achievement of laser frequency stabilization and tunability via modulation transfer spectroscopy on the rubidium D1 line[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131153.
- [9] 喻晓, 吕梦洁, 张旭, 等. 基于铷原子调制转移光谱技术的1560 nm 光纤激光器频率锁定研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 15-23.
- YU X, LYU M J, ZHANG X, et al. Study on frequency locking of 1560 nm fiber laser based on Rubidium atomic modulation transfer spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 15-23.
- [10] WANG B W, PENG X, WANG H D, et al. Laser-frequency stabilization with differential single-beam saturated absorption spectroscopy of 4He atoms[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(4): 043001.
- [11] LONG J B, YANG SH J, CHEN SH, et al. Magnetic-enhanced modulation transfer spectroscopy and laser locking for ^{87}Rb repump transition[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27773-27786.
- [12] SO C, SPONG N L R, MÖHL C, et al. Zeeman-tunable modulation transfer spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5374-5377.
- [13] 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(9): 106698.
- [14] 陈俊杰, 高浚超, 周俊杰, 等. 基于调制转移光谱的激光自动锁频系统研究[J]. *光子学报*, 2024, 53(12): 100-111.
- CHEN J J, GAO J CH, ZHOU J J, et al. Research on laser automatic frequency locking system based on modulation transfer spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(12): 100-111.
- [15] 王艳, 杨涛, 慈骋, 等. 集成化的1.5 μm 乙炔线性吸收稳频激光系统[J]. *计量学报*, 2025, 46(6): 847-852.
- WANG Y, YANG T, CI CH, et al. Integrated 1.5 μm acetylene linear absorption frequency-stabilized laser system[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2025, 46(6): 847-852.
- [16] ZHANG H Q, LI ZH H, WANG Y R, et al. FPGA-based automatic laser frequency stabilization system using the dynamic time warping algorithm[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(6): 1459-1463.
- [17] LEE S, KANG J, KIM S, et al. Magnetic-field enhanced modulation transfer spectroscopy: Theory and experiment[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 34770-34780.
- [18] WU B, ZHOU Y, WENG K X, et al. Modulation transfer spectroscopy for D1 transition line of rubidium [J]. *Journal of the Optical Society of America B. Optical Physics*, 2018; 35(11): 2705-2710.
- [19] INNES A D, MAJUMDER P, NOH H R, et al. Modulation transfer spectroscopy of the D1 transition of potassium: Theory and experiment [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2024, 57(7): 057401.
- [20] WU Y Y, QIN F J, DING ZH CH, et al. Research on the frequency stabilization system of an external cavity diode laser based on rubidium atomic modulation transfer spectroscopy technology[J]. *Photonics*, 2024, 11(4): 298.
- [21] MCCARRON D J, KING S A, CORNISH S L. Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(10): 105601.
- [22] XU ZH Y, PENG X X, LI L H, et al. Modulation transfer spectroscopy for frequency stabilization of 852 nm DBR diode lasers[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(2): 025701.
- [23] WU Y Y, QIN F J, LI Y, et al. Designing an automatic frequency stabilization system for an external cavity diode laser using a data acquisition card in the LabVIEW platform[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(1): 308.
- [24] 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.
- ZHANG Y, WANG Q. Research of automatic frequency stability diode laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 18-22.
- [25] 谢日升. 基于调制转移谱的激光自动稳频技术研究[D]. 武汉: 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 SH. Research on Laser automatic frequency stabilization Technology based on modulation transfer spectrum[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Precision Measurement Science and Technology Innovation, Chinese Academy of Sciences), 2021.
- [26] LI Q X, ZHANG X, ZHU L X, et al. Intelligent and automatic laser frequency locking system using pattern recognition technology [J]. *Optics and Lasers in*

- Engineering, 2020, 126: 105881.
- [27] WANG G C, GAO L Y, HUANG G Y, et al. A wavelength-stabilized and quasi-common-path heterodyne grating interferometer with sub-nanometer precision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 7002509.
- [28] 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 technology of laser frequency automatic stabilization for atomic interferometer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [29] WINKRER L, NÖLLEKE C. Artificial neural networks for laser frequency stabilization [J]. Optics Express, 2023, 31(20): 32188-32199.
- [30] 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, 2023, 51(17): 113-123.
CHEN B Y, ZHAO Y, LOU Y T, et al. Laser frequency stabilization method based on intelligent identifying absorption peaks with convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 51(17): 113-123.
- [31] 严利平, 孟令纪, 楼盈天, 等. 基于FPGA加速卷积神经网络识别吸收峰的激光稳频方法[J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-19[2025-10-20].
YAN L P, MENG L J, LOU Y T, et al. Laser frequency stabilization method based on FPGA-accelerated convolutional neural network for identifying absorption peaks [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress, 1-19 [2025-10-20].
- [32] REID J, LABRIE D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers – comparison of experiment and theory[J]. Applied Physics B, 1981, 26(3): 203-210.
- [33] 谢建东, 严利平, 陈本永, 等. 可调谐激光器激光波长宽范围自动偏频锁定[J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 211-219.
XIE J D, YAN L P, CHEN B Y, et al. Automatic offset-

frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(2): 211-219.

- [34] 韩羿, 曹士英, 宋文霞, 等. 用于激光频率参数测量的飞秒光学频率梳[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 31-46.
HAN Y, CAO SH Y, SONG W X, et al. Femtosecond optical frequency comb for measuring laser frequency parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 31-46.

作者简介



谢建东, 2015年与2021年于浙江理工大学分别获得学士学位与博士学位, 现为浙江理工大学特聘副教授, 主要研究方向包括激光干涉精密测量技术、激光稳频技术、智能信号处理技术。

E-mail: xiejiaandong@yeah.net

Xie Jiandong received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Zhejiang Sci-Tech University in 2015 and 2021, respectively. He is currently an assistant professor at Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include laser interferometers, laser frequency stabilization, and intelligent signal processing.



陈本永 (通信作者), 2000年于浙江大学获得博士学位, 2002年清华大学光学工程博士后出站, 现为浙江理工大学教授, 博导。主要研究方向包括纳米位移测量与仪器、微纳驱动及精密测控技术。

E-mail: chenby@zstu.edu.cn

Chen Benyong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2000. From 2000 to 2002, he was a postdoctoral researcher in the field of optical engineering at Tsinghua University. He is currently a professor and Ph. D. advisor at Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include nanometer displacement measurement and instruments, micro-actuators, and precision measurement and control technology.