

基于光谱峰识别的原子微波测量自动稳频技术*

唐鑫¹⁾ 林沂^{1†)} 赵建栋¹⁾ 杨凯¹⁾ 付云起^{1‡)}

1) (国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073)

摘要

基于里德堡原子的微波测量技术因具有宽频带、小尺寸探头、高灵敏度等优点而受到广泛关注, 激光系统的自动稳频是提升原子微波测量系统自动化水平与响应速度的关键环节。然而, 现有系统多依赖人工操作实现激光频率锁定, 针对原子微波测量双波长激光自动稳频的研究尚不充分。本文提出一种基于光谱峰距离的峰识别算法, 实现对饱和吸收光谱与电磁诱导透明光谱中目标峰的准确定位, 并以此为频率基准直接驱动激光自动稳频闭环, 从而完成探测光与耦合光频率的自动锁定。测量结果表明, 探测光频率自动锁定耗时 5.55 秒, 耦合光频率自动锁定耗时 13.9 秒; 探测光频率秒级稳定度达 10^{-10} 量级, 32 s 平均时间下阿伦偏差最小为 1.1×10^{-10} ; 耦合光频率秒级稳定度也在 10^{-10} 量级, 16 s 平均时间下阿伦偏差最小为 2.3×10^{-10} 。在测试周期内, 自动锁定后的探测光与耦合光展现出良好的频率稳定性, 其稳定度指标满足里德堡原子微波测量系统的典型工作需求, 验证了所提基于光谱峰距离的峰识别算法的可靠性。

关键词: 里德堡原子, 自动稳频, 光谱识别

PACS: 32.80.Ee, 42.62.Fi, 32.70.Cs

基金: 国家自然科学基金(批准号: 62401586, U24B2009);

† 通讯作者.E-mail: linyi_886@163.com

‡ 通讯作者.E-mail: yunqifu@nudt.edu.cn

第一作者.E-mail: 18570105281@163.com

1 引言

里德堡原子是实现微波电场精密测量的理想量子传感介质, 基于里德堡原子的微波测量系统已成功测量微波电场幅度^[1,2]、极化^[3]、相位^[4]与方位角^[5]等关键参数; 结合微波外差探测^[6]、局域场增强谐振器^[7-10]、平衡光电探测等技术, 基于里德堡原子的微波测量系统灵敏度得到显著提升, 推动了“原子无线电”这一新兴前沿领域的快速发展^[11-15]。

在典型的里德堡原子微波测量系统中, 通常以原子基态跃迁的饱和吸收光谱 (Saturated Absorption Spectroscopy, SAS) 作为探测光的频率参考, 以里德堡态跃迁的电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 光谱作为耦

合光的频率参考。2009 年, Abel 等人首次基于级联型 EIT 效应将激光频率锁定于里德堡态跃迁, 为耦合光稳频奠定了方法论基础^[16]; 此后, 文献^[17]与文献^[18]相继开展了里德堡原子激光稳频技术研究, 均利用级联 EIT 光谱实现耦合光频率锁定。然而, 当前此类系统的激光频率锁定仍高度依赖人工操作: 需先手动调节激光器的驱动电流与压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT)电压以逼近锁定点, 再开启比例-积分-微分(Proportional-Integral-Differential, PID)反馈环路完成锁定^[19]。目前, 里德堡原子微波测量系统的自动化程度与响应速度仍有待提高, 亟需开展面向该系统的自动稳频技术研究。

自动稳频的核心在于光谱峰识别, 其目标为确定锁定点所对应的 PZT 电压, 即通过光谱峰识别算法从采集光谱中定位目标峰。2003 年, Koch 提出对误差信号求导的方法, 在导数信号超过预设正阈值时开启 PID 闭环控制, 实现激光器自动锁定^[20]。刘丹丹于 2012 年依据目标峰值点一阶导数为零、二阶导数小于零的条件确定峰位, 进而得到对应的 PZT 扫描电压值^[21]。2014 年, 张胤等人设计了基于误差信号过零点检测的分布式反馈激光器自动稳频系统, 采用温度粗调与电流细调相结合的策略^[22]。鱼志健于 2015 年对误差信号进行三点相邻平均与后向差分运算, 得到差分平均误差信号, 并通过检测其极大值标记待锁定饱和吸收峰对应的激光器电流值^[23]。2021 年, 谢日升通过对调制转移光谱(MTS)进行过零点检测, 获取对应的 PZT 电压^[24]。2018 年, 李期学利用人工智能模式识别技术, 实现了铷原子饱和吸收光谱的智能特征提取与锁定点精准定位^[25]; 2024 年, 陈本永团队提出了基于卷积神经网络智能识别铷原子吸收峰的激光稳频方法, 可精准识别铷原子饱和吸收光谱中的 24 个吸收峰^[26]。上述基于峰阈值、导数和过零点的光谱峰识别方法普适性有限, 其判定标准易受环境因素影响; 而基于人工智能模式识别和卷积神经网络的方法则依赖大量训练数据, 增加了开发成本。业内亟需设计一种兼具高稳定性与低成本的光谱峰识别方法, 以满足里德堡原子微波测量系统自动稳频的需求。

本文围绕里德堡原子微波测量中的激光自动稳频方法开展系统研究。首先, 提出一种基于光谱峰间距的特征峰识别算法, 可实现 SAS 与 EIT 光谱目标峰位置的精准判定。该算法以铯原子精细能级的固有频率间隔为核心判别依据, 不依赖光谱峰幅值特征, 因此判定基准稳定可靠, 可从原理上规避光功率波动引发的峰形幅值变化与判定阈值漂移对识别结果的干扰; 算法具备轻量化、低计算开销的优势, 无需采集大量原子光谱样本进行模型训练, 可便捷移植部署于嵌入式平

台，为原子微波测量自动稳频系统提供核心算法支撑。其次，基于 Redpitaya 实现数字调制解调、混频滤波与 PID 反馈控制功能，构建了完整的激光频率闭环稳频硬件电路。最后，搭建探测光与耦合光双光路自动稳频实验系统，基于所提峰识别算法实现两路激光频率的一键式自动锁定，实验结果验证了该算法在里德堡原子微波测量系统中应用的有效性与可靠性。

2 基于光谱峰距离的峰识别算法

本文采用的铯里德堡原子微波测量系统的探测光波长是 852 nm、耦合光波长为 509 nm，探测光-耦合光自动稳频实验装置如图 1 (a)所示，其主要由三部分构成：852 nm 探测光锁定光路、509 nm 耦合光锁定光路以及 Redpitaya 稳频控制电路平台。探测光由 852 nm 激光器输出，经半波片与偏振分束镜分为两路：一路进入探测光锁定光路用于探测光稳频，另一路进入耦合光锁定光路用于耦合光稳频。在探测光锁定光路中，该光束进一步分为功率较高的泵浦光束与功率较低的探测光束，两光束反向共线传播，于铯原子气室中产生饱和吸收效应。探测光束穿过铯原子气室后，由光电探测器(Photodetector, PD)接收并转换为电信号(即 SAS 信号)，随后接入 Redpitaya 稳频控制电路平台，用于反馈控制探测光频率。

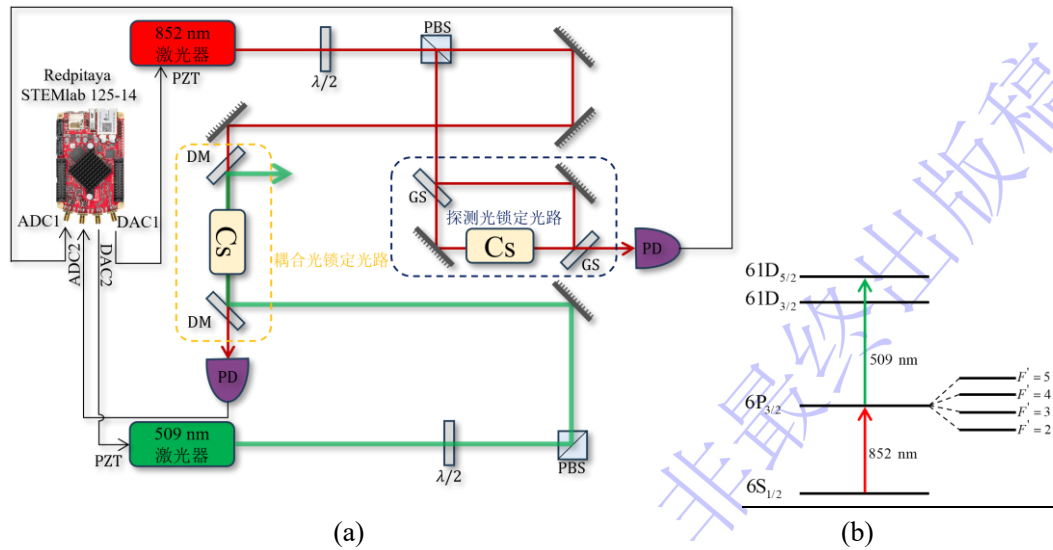


图 1 探测光-耦合光自动稳频 (a)实验装置示意图；(b)对应的原子能级系统

Figure 1. Automatic frequency stabilization of the probe laser and coupling laser (a) Schematic diagram of the experimental setup; (b) Corresponding atomic energy level system

509 nm 激光器输出耦合光，该光束在耦合光锁定光路中与已完成频率锁定的探测光反向共线传播。其中，耦合光功率较高，探测光功率较低，二者在铯原子气室中共同激发 EIT 效应。弱探测光穿过铯原子气室后被 PD 采集，得到 EIT 光谱信号，并接入 Redpitaya 平台用于耦合光频率的反馈控制。图 1 (b)展示了探测光-耦合光自动稳频所对应的能级跃迁。852 nm 探测光的频率参考为铯原子

$6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}(F' = 5)$ 基态跃迁，利用探测光锁定光路产生的 SAS 中的 T_5 吸收峰，将探测光频率锁定于该跃迁。509 nm 耦合光的频率参考为铯原子 $6P_{3/2}(F' = 5) \rightarrow 61D_{5/2}$ 里德堡态跃迁，利用耦合光锁定光路产生的 EIT 光谱中的 $61D_{5/2}$ 透射峰，将耦合光频率锁定于该跃迁。

本文提出的基于光谱峰距离的峰识别算法的核心思想是对采集到的光谱进行峰坐标定位以获取光谱上各峰之间的横坐标距离。由于这些横坐标距离正比于原子各超精细或精细能级之间的频率间隔，而该频率间隔为原子的固有物理常数，故各峰横坐标之间的相对距离是固定的。以此作为判定依据，即可进行光谱峰的定位识别，进而实现激光频率的自动锁定。

图2展示了实验测试获得的探测光锁定光路铯原子 SAS 及其对应的鉴频误差曲线，图中标注了三个超精细能级所对应的吸收峰 T_5 、 C_{45} 、 C_{35} ，三者之间具有固定的频率间隔，在光谱上表现为吸收峰之间的相对距离固定。首先标记光谱上的任意一个峰及其右侧相邻的两个峰，计算第一个峰到右侧两个峰的横坐标距离并求其比值；将该比值与目标超精细能级间的频率间隔比值相比较，若基本吻合，则判定该峰为目标峰，否则向右遍历下一个光谱峰，直至找到目标谱峰。确定目标谱峰后，获取其对应的横坐标索引，由于峰横坐标索引与扫描三角波横坐标索引一一对应，可得到目标谱峰所对应的扫描三角波电压值。以此电压值作为 PID 电压参考反馈至激光器 PZT，启动 PID 反馈控制，实现激光频率的自动锁定。通过上述峰间相对距离比值匹配的方式，可准确定位目标吸收峰的位置，为探测光频率锁定提供基准。

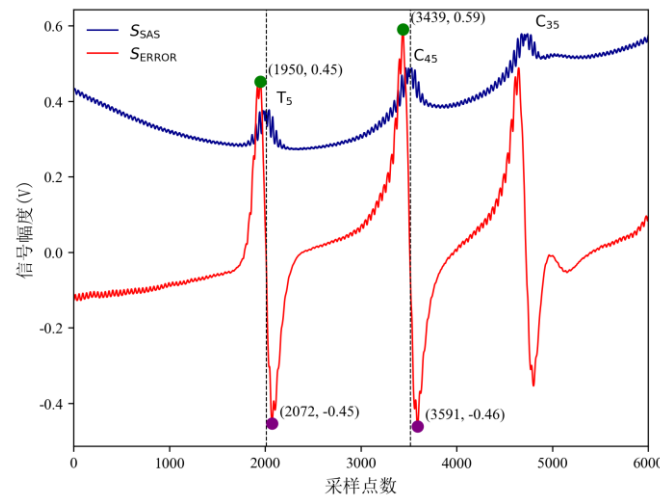


图 2 铯原子 SAS 及对应鉴频误差曲线

Figure 2. SAS of cesium atoms and the corresponding frequency discrimination error curve

耦合光锁定针对主量子数为 61 的铯原子展开。铯原子 $61D$ 里德堡态存在

$61D_{3/2}$ 和 $61D_{5/2}$ 两个精细能级。图 3 展示了实验测试获得的铯原子 EIT 光谱及对应的鉴频误差曲线，图中两个幅度差异明显的透射峰即对应这两个精细能级，其中幅度较高的透射峰对应 $61D_{5/2}$ 态，幅度较低的透射峰对应 $61D_{3/2}$ 态，两者之间具有固定的频率差，通过计算这两个连续透射峰的距离，判断其是否与 $61D_{3/2}$ 和 $61D_{5/2}$ 两个精细能级的频率差相匹配，即可精准定位目标透射峰 $61D_{5/2}$ 的位置，从而为耦合光频率锁定提供基准。

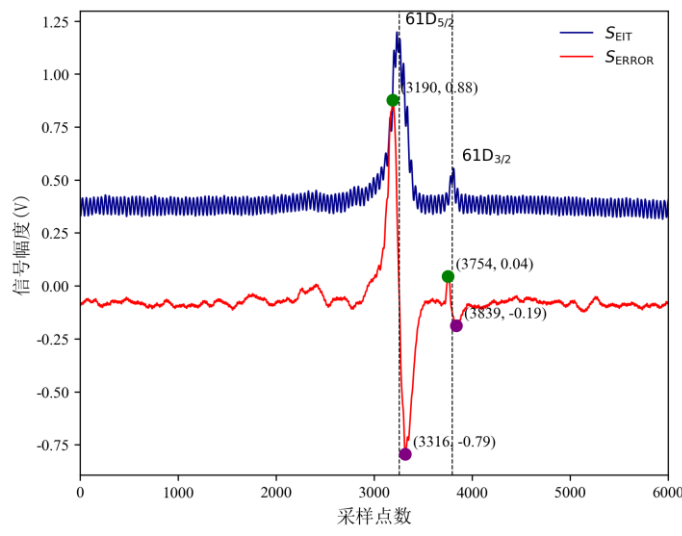


图 3 铯原子 EIT 与对应鉴频误差曲线

Figure 3. EIT of cesium atoms and the corresponding frequency discrimination error curve

3 探测光-耦合光自动稳频

稳频软硬件依托 PyRPL 库调用 Redpitaya 内部功能模块设计，其连接示意如图 4 所示。调制光谱信号经 ADC 采集后，依次通过高通滤波器滤除直流分量、乘法器与正弦调制信号相乘以及低通滤波器处理，得到鉴频误差信号，再输入 PID 模块生成反馈控制信号。稳频控制采用信号叠加方法，将三角波扫描信号、正弦调制信号与 PID 反馈信号叠加至同一 DAC 输出端口，驱动激光器 PZT，实现双波长闭环锁定。

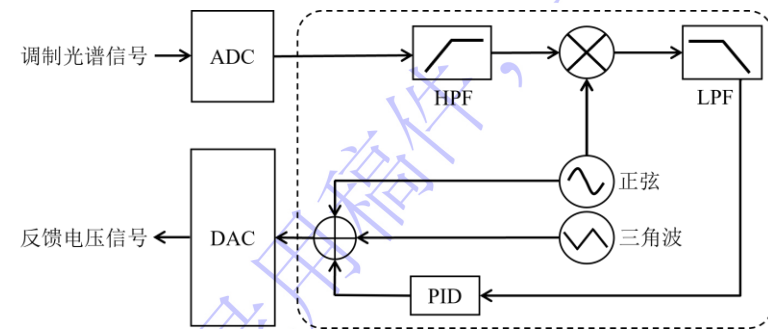


图 4 Redpitaya 平台模块连接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the Redpitaya platform module connection

执行探测光与耦合光频率扫描时，同步采集的信号如图 5 所示。当探测光频率在 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 跃迁线附近连续扫描时，实验测试获得的信号如图 5 (a)所示。图中 S_{PZT} 为三角波扫描与正弦调制信号的叠加波形， S_{SAS} 为光电探测器输出的调制 SAS 信号， S_{ERROR} 为调制解调后获得的鉴频误差曲线。 S_{SAS} 中各吸收峰对应铯原子 $6P_{3/2}$ 态的不同超精细能级，它们随 S_{PZT} 三角波扫描呈左右对称分布，在三角波上升沿， S_{SAS} 中从左至右三个显著的吸收峰依次对应 T_5 、 C_{45} 、 C_{35} 超精细能级，探测光要锁定的目标吸收峰 T_5 ，即 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 跃迁，对应于最外侧的鉴频误差曲线。

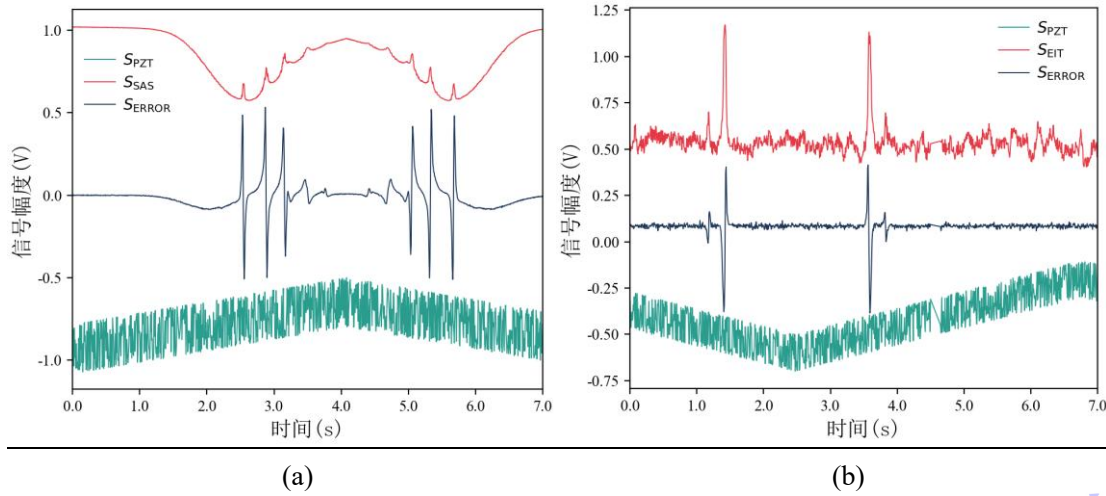


图 5 频率扫描过程同步采集信号 (a)探测光; (b)耦合光

Fig. 5 Synchronously acquired signals during laser frequency scanning (a)Probe laser; (b)Coupling laser

待铯原子被稳定激发至 $6P_{3/2}$ 中间态后，在 $6P_{3/2} \rightarrow 61D$ 附近扫描耦合光频率，即可获得 EIT 光谱，扫描过程同步采集的信号如图 5 (b)所示，其中， S_{PZT} 为三角波扫描与正弦调制信号的叠加波形， S_{EIT} 为光电探测器输出的调制 EIT 光谱信号， S_{ERROR} 为解调得到的鉴频误差曲线。可以观察到，EIT 光谱呈现两个幅度差异明显的透射峰，分别对应 $61D_{3/2}$ 和 $61D_{5/2}$ 态，耦合光频率锁定的目标态为 $61D_{5/2}$ 态，对应于幅度较高的透射峰。

采用双光子激发里德堡态方案，852 nm 探测光首先将原子激发到 $6P_{3/2}$ 中间态，509 nm 耦合光再将原子激发到 $61D_{5/2}$ 里德堡态。EIT 光谱为耦合光频率在原子 $6P_{3/2} \rightarrow 61D_{5/2}$ 跃迁附近扫描得到的，因此探测光频率锁定至关重要，只有探测光频率锁定后原子才能稳定处于 $6P_{3/2}$ 态，才能获得 EIT 光谱，进一步用于耦合光频率锁定。

探测光与耦合光的自动稳频流程通过四个步骤设计实现：探测光寻峰、探测光锁定、耦合光寻峰、耦合光锁定。其中，寻峰阶段由基于光谱峰距离的峰识别

算法负责输出锁定点的 PZT 电压值；锁定阶段则利用该电压值实施激光闭环稳频，该流程在 Redpitaya 平台内部实现如图 6 所示。首先，应用此算法确定 SAS 中 T_5 目标吸收峰的位置，并获取对应的扫描三角波电压 V_0 ，将其输入至探测光闭环稳频模块。自动稳频控制算法遂以 V_0 作为 PID 参考电压，完成探测光频率的锁定。一旦探测光频率稳定，铯原子即被可靠激发至 $6P_{3/2}$ 态。随后，再次运用该算法识别 EIT 中 $61D_{5/2}$ 目标透射峰的位置，得到相应的扫描三角波电压 V_1 ，并将其反馈至耦合光闭环稳频模块，进而锁定耦合光频率。

在“探测光寻峰→探测光锁定→耦合光寻峰→耦合光锁定”的自动稳频流程中，若探测光或耦合光的一键式自动锁定失效，算法将自动触发两级异常处理机制，执行两路激光的重锁定流程。第一级处理为：将 PID 控制器输出清零，经短时延待系统状态弛豫后，重新加载目标参考电压并启动 PID 闭环反馈；若该重试操作仍未实现有效锁定，则进入第二级处理，回退至光谱寻峰环节，通过降低三角波扫描频率提升光谱采样精度，获取更精准的 PID 锁定参考电压后，再次执行对应光路的一键式自动锁定。该异常处理机制可显著提升自动锁频的一次成功率，对增强系统运行鲁棒性、提升工程实用价值具有重要意义。

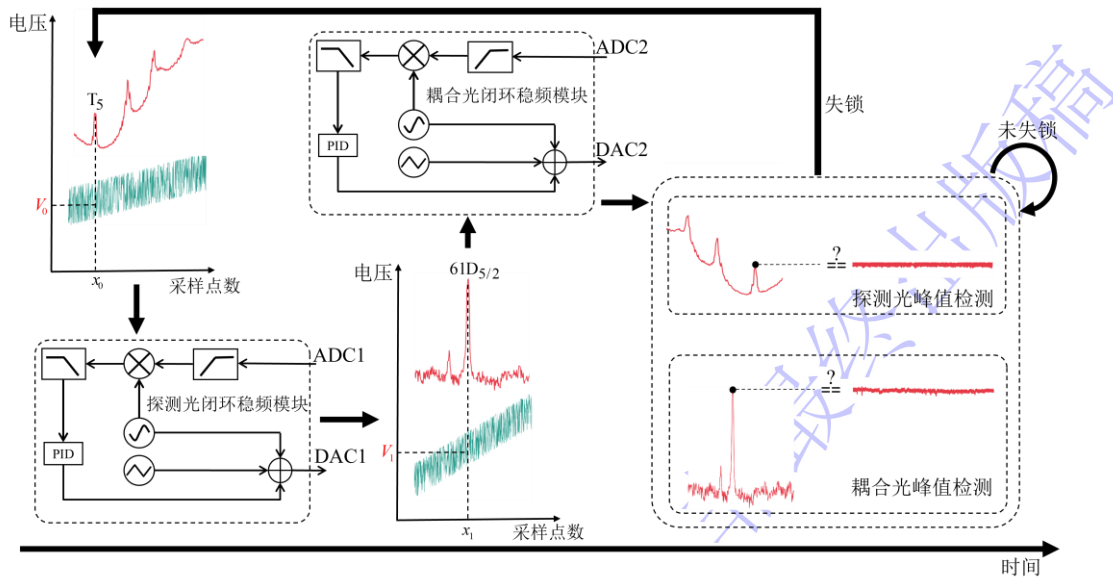


图 6 探测光-耦合光自动稳频流程示意图

Figure 6. Schematic diagram of the automatic frequency stabilization process for the probe laser and coupling laser

所提算法集成自动重锁机制，可在激光频率发生失锁时自主完成重锁定过程，为里德堡原子微波测量系统的长期连续稳定运行提供核心支撑。该机制在探测光与耦合光均完成一键式频率锁定后自动进入待机监测状态：实时采集光谱信号，将其与算法识别的目标峰值进行比对；当偏差值处于预设阈值范围内时，系

统维持闭环锁定状态并持续采样监测；若偏差超出判定阈值，则判定激光频率失锁，随即触发自动重锁流程。

自动重锁执行过程中，算法首先退出 PID 闭环控制，将 PID 控制器输出清零，同时以失锁前 PID 反馈值为三角波扫描中心电压，恢复三角波的额定扫描幅度与扫描频率，重新获取完整的光谱信号；随后调用本文提出的目标峰识别算法定位目标光谱峰的对应位置，解算出精确的锁定参考电压；最终关闭扫描三角波，重新切入 PID 闭环反馈，完成激光频率的重锁定。频率重锁定完成后，系统自动回归实时监测状态，循环执行失锁判定与重锁响应，形成“监测—判定—重锁—恢复”的闭环容错机制，保障原子微波测量系统的长期不间断稳定运行。

探测光-耦合光自动稳频过程中的信号变化如图 7 所示。在图 7 (a)的 0-5.55 秒期间，扫描探测光频率并识别目标吸收峰 T_5 ；在第 5.55 秒，系统关闭扫描并开启探测光锁定：此时，探测光 PZT 驱动信号停止扫描，鉴频误差信号围绕零值波动，探测光 SAS 信号稳定在目标吸收峰 T_5 峰值处，探测光锁定完成。图 7 (b)显示，在 0-5.55 秒期间，耦合光频率处于未知状态；第 5.55 秒探测光频率锁定瞬间，EIT 光谱得以显现。随后，扫描耦合光频率并识别目标透射峰 $61D_{5/2}$ ；至第 13.9 秒，系统关闭扫描并开启耦合光锁定：耦合光 PZT 驱动信号停止扫描，鉴频误差信号在零值附近波动，EIT 信号锁定于目标透射峰 $61D_{5/2}$ 峰值处，耦合光频率成功锁定。此后，通过 PID 同步调控探测光与耦合光激光器，13.9 秒后两台激光器的频率持续保持稳定。锁定过程无需人工干预，实现了里德堡原子微波测量系统探测光与耦合光双波长激光系统的自动锁定。

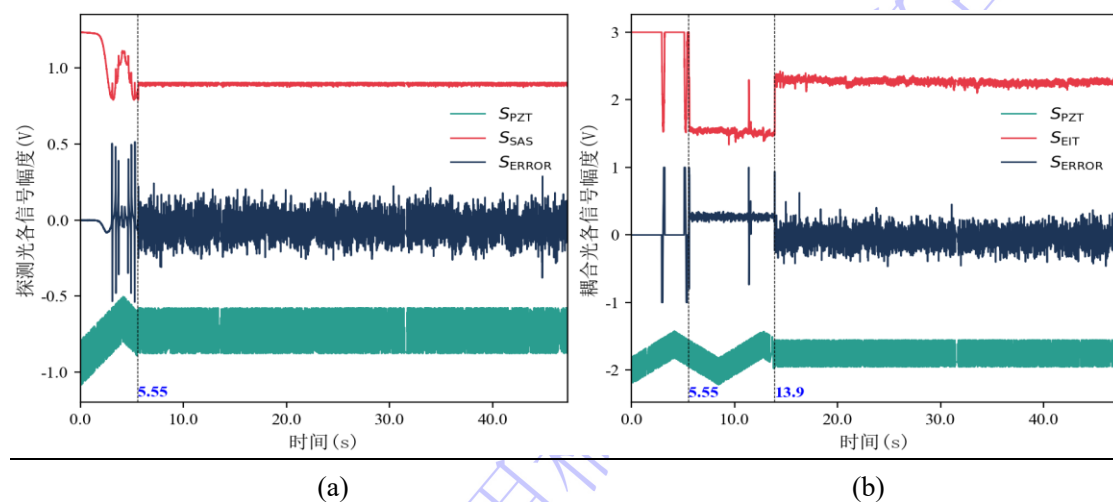


图 7 激光自动稳频同步采集信号 (a)探测光；(b)耦合光

Figure 7. Synchronously acquired signals during the laser automatic frequency stabilization process (a) Probe laser; (b) Coupling laser

基于提出的光谱峰间距特征峰识别算法，本文实现了探测光与耦合光双光路

的同步自动锁定，总锁定耗时仅为 13.9 s。与已报道的同类原子激光自动稳频方案相比，该方法在时间性能上具备显著优势：文献针对单路 780 nm 激光提出的自动锁频方法需数分钟方可完成锁定^[27]，本文双光路同步锁定的总耗时远低于该单路方案的时间开销；文献采用互相关技术结合支持向量机实现铷原子饱和吸收谱峰位识别^[25]，其自动稳频的平均锁定时间为 56 s；文献基于卷积神经网络的谱线定位策略对应耗时约 35 s^[26]。综上，本文方法的锁定速度均优于上述现有方案。

图 8 展示了系统频率锁定后，高精度波长计采集的探测光和耦合光激光器输出的激光波长随时间的变化曲线。图 8 (a)采集探测光波长 1530 s，中心波长 852.356401 nm，呈现准线性慢漂移，累计漂移约 2 fm，频率波动约 1.65 MHz。图 8 (b)采集耦合光波长 1160 s，中心波长 509.007144 nm，无明显单向漂移，峰值波动 2 fm，对应频率波动约 2.32 MHz。

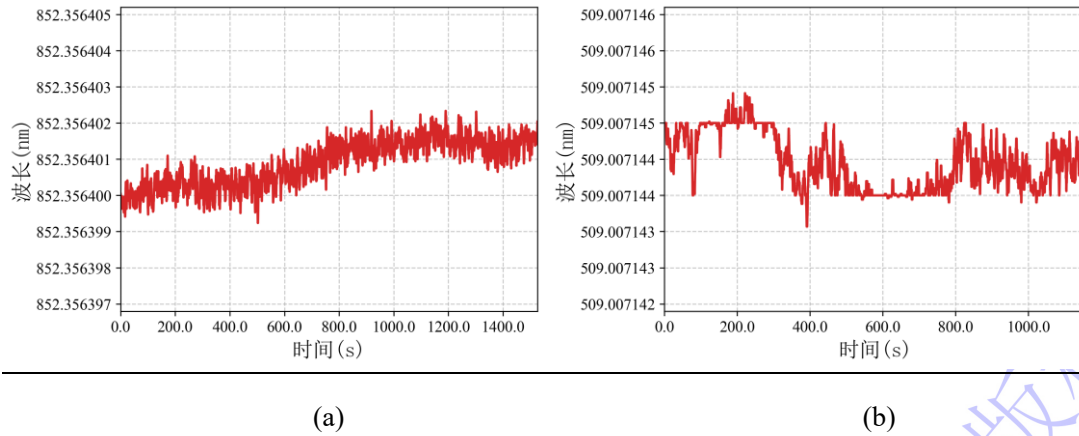


图 8 锁定状态下频率波动曲线 (a)探测光；(b)耦合光

Fig. 8 Frequency fluctuation curve in locked state (a) Probe laser; (b) Coupling laser

为进一步定量表征不同时间尺度下的频率稳定性，计算了两台激光器的重叠阿伦偏差(Overlapping Allan Deviation)，结果如图 9 所示。两条曲线均呈现稳频激光器典型的“V”型特征：在短时间尺度($\tau < 1\text{ s}$)，阿伦偏差随平均时间增大先小幅上升后下降，主要受白频率噪声和闪烁频率噪声主导；在中时间尺度($1\text{ s} < \tau < 100\text{ s}$)，阿伦偏差持续降低并达到最小值，对应稳频系统的最佳工作区间；在长时间尺度($\tau > 100\text{ s}$)，阿伦偏差随平均时间增大开始上升，主要由环境温度漂移、机械振动等慢变因素引起的随机游走噪声主导。

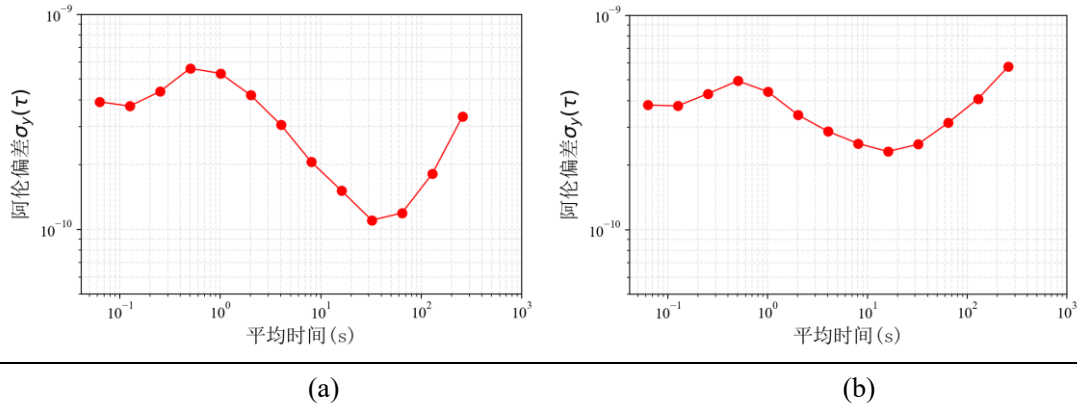


图 9 锁定后激光频率的阿伦偏差曲线 (a)探测光; (b)耦合光

Fig. 9 Allan deviation curves of laser frequency after locking (a) Probe laser; (b) Coupling laser

509 nm 激光器的最佳阿伦偏差约为 2.3×10^{-10} ，出现在 $\tau = 16$ s 处；852 nm 激光器的最佳阿伦偏差约为 1.1×10^{-10} ，出现在 $\tau = 32$ s 处，其频率稳定性较 509 nm 激光器提升约一倍，这一差异主要源于级联 EIT 稳频过程引入的噪声叠加，以及两台激光器稳频系统伺服环路参数的不同优化结果。受环境温度波动、气压起伏、PZT 振动噪声及 Redpitaya 反馈带宽等多因素共同制约，本实验搭建的稳频系统频率稳定度最终达到 10^{-10} 量级，与现有文献中基于高精度原子光谱稳频方案实现的 10^{-11} 、 10^{-12} 量级稳定度相比^[19, 26]，本系统的稳定度指标存在一定差距；但该性能属于常温环境下原子饱和吸收谱稳频方案的典型可达水平，与商用工业级稳频激光器的主流性能相当，充分满足里德堡原子微波测量系统的工程应用需求。

4 总结

本文围绕里德堡原子微波测量系统激光自动稳频需求，提出了基于光谱峰距离的峰识别算法，搭建探测光-耦合光自动稳频实验装置，实现了探测光-耦合光自动稳频，验证了该算法的有效性与可靠性。基于光谱峰距离的峰识别算法充分利用原子精细能级频率间隔固定特征实现光谱峰识别，探测光-耦合光自动稳频测试结果表明，探测光和耦合光稳频后频率稳定性均达到了 10^{-10} 量级，能够满足里德堡原子微波测量系统的激光稳频需求；探测光锁定耗时仅 5.55 s，耦合光锁定耗时 13.9 s，为里德堡原子微波测量系统的集成化与自动化发展奠定技术基础。

参考文献

- [1] Gordan J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, Miller S A, Anderson D A, Raithel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 024102
- [2] Holloway C L, Gordon J A, Jefferts S R, Kusevitch D, Wilson P F, Young A, Dudzik M J 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 6169
- [3] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Lowe R, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [4] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Holloway C L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114**

- [5] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, Artusio-Glimpse A B, Holloway C L 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 114001
- [6] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Fan H W, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911
- [7] Holloway C L, Prajapati N, Artusio-Glimpse A B, Berweger S, Simons M T, Kasahara Y, Alù A, Ziolkowski R W 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 204001
- [8] Ding Z K, Liu Y, Yang K, Lin Y, Wu B, Fu Y Q 2024 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **72** 9558
- [9] Yang K, Chen X, Mao R, Lin Y, Wu B, Fu Y Q 2024 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **72** 6060
- [10] Sandidge G, Santamaria-Botello G, Bottomley E, Tong M, Hubbard J, Moss A, Gordon J A, Holloway C L, Shaffer J P 2024 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **72** 2057
- [11] Holloway C L, Simons M T, Haddab A H, Gordon J A 2019 *AIP Adv.* **9** 065308
- [12] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 5931
- [13] Schlossberger N, Prajapati N, Berweger S, Holloway C L 2024 *Nat. Rev. Phys.* **6** 606
- [14] Fu Y Q, Lin Y, Wu B, Yang K, Mao R Q 2022 *Chin. J. Radio Sci.* **37** 279 (in Chinese) [付云起, 林沂, 武博, 杨凯, 毛瑞棋 2022 电波科学学报 **37** 279]
- [15] Huang W, Liang Z T, Du Y X, Jiang J F, Yan H, Zhong Z P 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160702 (in Chinese) [黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 江俊峰, 颜晗, 钟志萍 2015 物理学报 **64** 160702]
- [16] Abel R P, Mohapatra A K, Bason M G, Weatherill K J, Adams C S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 071107
- [17] Jiao Y C, Li J K, Wang L M, Zhang H, Zhang L J, Zhao J M, Jia S T 2016 *Chin. Phys. B* **25** 054203 (in Chinese) [焦月春, 李敬奎, 王丽梅, 张好, 张临杰, 赵建明, 贾锁堂 2016 中国物理 B **25** 054203]
- [18] Yang K, Mao R Q, An Q, Sun Z S, Fu Y Q 2023 *Chin. Opt. Lett.* **21** 021401 (in Chinese) [杨凯, 毛瑞棋, 安强, 孙占山, 付云起 2023 中国光学快报 **21** 021401]
- [19] Yan L P, Meng L J, Lou Y T, Xie J D, Chen B Y 2025 *Laser & Optoelectronics Progress* **62** 1 (in Chinese) [严利平, 孟令纪, 楼盈天, 谢建东, 陈本永 2025 激光与光电子学进展 **62** 1]
- [20] Koch G J 2003 *Opt. Eng.* **42** 1690
- [21] Liu D D 2012 *M.S. Thesis* (Xi'an: National Time Service Center of Graduate School of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘丹丹 2012 硕士学位论文 (西安:中国科学院研究生院国家授时中心)]
- [22] Zhang Y, Wang S Q 2014 *Journal of Jilin University (Information Science Edition)* **32** 471 (in Chinese) [张胤, 王斯琦 2014 吉林大学学报(信息科学版) **32** 471]
- [23] Yu Z J, Xue W X, Zhao W Y, Li X F, Chen J, Ruan J, Du Z J, Zhang S G 2015 *J. Time Freq.* **38** 129 (in Chinese) [鱼志健, 薛文祥, 赵文宇, 李孝峰, 陈江, 阮军, 杜志静, 张首刚 2015 时间频率学报 **38** 129]
- [24] Xie R S 2021 *M.S. Thesis* (Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [谢日升 2021 硕士学位论文 (北京:中国科学院大学)]
- [25] Li Q X 2018 *M.S. Thesis* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [李期学 2018 硕士学位论文 (长沙:国防科技大学)]

- [26] Chen B Y, Zhao Y, Lou Y T, Yan L P, Xie J D, Yu L, Tang J J 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 113 (in Chinese) [陈本永, 赵勇, 楼盈天, 严利平, 谢建东, 于良, 唐健钧 2024 中国激光 **51** 113]
- [27] Ji J W, Chen H N, Zhang Z, Liu K K, Xiang J F, Ren W, Li L, Lv D S 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 163 (in Chinese) [吉经纬, 程鹤楠, 张镇, 刘亢亢, 项静峰, 任伟, 李琳, 吕德胜 2020 光学学报 **40** 163]

录用稿件，非最终出版稿

Automatic Frequency Stabilization Technology for Atomic Microwave Measurement Based on Spectral Peak Recognition*

Tang Xin¹⁾, Lin Yi^{1†)}, Zhao Jiandong¹⁾, Yang Kai¹⁾, Fu Yunqi^{1)‡)}

唐鑫¹⁾ 林沂^{1†)} 赵建栋¹⁾ 杨凯¹⁾ 付云起^{1)‡)}

1) (College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073,

China)

Abstract

Microwave measurement technology based on Rydberg atoms has attracted extensive attention due to its advantages of broad bandwidth, small-size probe, and high sensitivity. Automatic frequency stabilization of laser systems is a key link to improve the automation level and response speed of atomic microwave measurement systems. However, most existing systems rely on manual operation to achieve laser frequency locking, and research on automatic frequency stabilization of dual-wavelength lasers for atomic microwave measurement is still insufficient. This paper proposes a peak recognition algorithm based on spectral peak distance, which realizes accurate positioning of target peaks in saturated absorption spectroscopy and electromagnetically induced transparency spectroscopy. Using these peaks as frequency references, we directly drive the automatic frequency stabilization closed loop of lasers, thereby completing fully automatic locking of both probe light and coupling light frequencies. The measurement results show that the automatic frequency locking takes 5.55 seconds for the probe light and 13.9 seconds for the coupling light. The second-order frequency stability of the probe light reaches the 10^{-10} level, with a minimum Allan deviation of 1.1×10^{-10} at an averaging time of 32 seconds. The second-order frequency stability of the coupling light is also at the 10^{-10} level, with a minimum Allan deviation of 2.3×10^{-10} at an averaging time of 16 seconds. During the test period, the automatically locked probe light and coupling light exhibit excellent

frequency stability, whose stability indicators meet the typical operational requirements of Rydberg atom microwave measurement systems, verifying the reliability of the proposed spectral peak distance-based peak recognition algorithm.

Keywords: Rydberg atoms, Automatic frequency stabilization, Spectrum recognition

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62401586, U24B2009).

† Corresponding author.E-mail:linyi_886@163.com

‡ Corresponding author.E-mail:yunqifu@nudt.edu.cn

The first author.E-mail:18570105281@163.com

录用稿件，非最终出版稿