

# 基于光学频率梳的快慢反馈激光稳频实验\*

周茹心, 郑鹏程, 黄泽锐, 李君夏, 黄祺寅, 敬雨臻, 刘培亮

中山大学物理与天文学院 / 广东省量子精密测量与传感重点实验室, 广东 珠海 519082

**摘要:** 高稳定性的激光源是离子阱精密光谱测量和量子态操控实验的重要基础。针对镱离子精密测量实验对激光频率稳定性的需求, 本文设计并实现了一种基于光学频率梳参考的快慢反馈激光稳频方案。系统通过检测连续波激光与光学频率梳梳齿之间的拍频信号获取频率误差信息, 并构建双环反馈结构: 慢反应用于补偿激光器的长期频率漂移, 快反馈则基于声光调制器实现高带宽频率调节。同时, 为减弱声光调制器衍射角随驱动频率变化对光路稳定性的影响, 设计并实现了基于声光调制器两次移频的光路结构。实验结果表明, 将 934 nm 激光锁定到光学频率梳后, 拍频线宽被压窄到 Hz 量级, 且在 3 h 内中心频率波动范围为  $\pm 3.6$  mHz, 系统在 1 s 和 1 000 s 积分时间的相对不稳定性分别为  $4.55(4) \times 10^{-17}$  和  $1.6(4) \times 10^{-18}$ , 表明该方案具备良好的锁频效果并显著提升了激光的长期频率稳定性。该方法还可拓展至多台激光器的同步锁定, 从而为离子阱实验多波长激光系统的统一频率基准提供技术支持。

**关键词:** 光学频率梳; 激光稳频; 声光调制器; 快慢反馈控制

**中图分类号:** TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)04-0041-07

## Laser frequency stabilization experiment with fast and slow feedback based on optical frequency comb

Zhou Ruxin, Zheng Pengcheng, Huang Zerui, Li Junxia, Huang Qiyin, Jing Yuzhen, Liu Peiliang

School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University / Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Metrology and Sensing, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** A highly stable laser source is a fundamental requirement for precision spectroscopy and quantum state manipulation in ion-trap experiments. To meet the demand for laser frequency stability in precision measurements with ytterbium ions, this work presents the design and implementation of a fast-slow feedback laser frequency stabilization scheme referenced to an optical frequency comb. The system extracts frequency error information by detecting the beat signal between a continuous-wave laser and a comb tooth of the optical frequency comb, and employs a dual-loop feedback architecture: a slow feedback loop compensates for long-term frequency drifts of the laser, while a fast feedback loop provides high-bandwidth frequency tuning based on an acousto-optic modulator (AOM). To mitigate the impact of the AOM diffraction-angle variation with driving frequency on optical path stability, a double-frequency-shifting optical configuration based on the AOM is designed and implemented. Experimental results show that, after locking the 934 nm laser to the optical frequency

\* 收稿日期: 2026-04-29 录用日期: 2026-05-28 网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 广东省量子科学战略专项 (GDZX2304007, GDZX2505001);

广东省重点领域研发计划 (2019B030330001)

作者简介: 周茹心 (2001 年生), 女; 研究方向: 激光频率稳定技术; E-mail: zhourx23@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘培亮 (1984 年生), 男; 研究方向: 基于冷原子 (离子) 的精密测量;

E-mail: liupliang@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20260115

comb, the beat note linewidth is compressed to the Hz level, and the center frequency fluctuation is reduced to  $\pm 3.6$  mHz in 3 hours. The relative instability of the system reaches  $4.55(4) \times 10^{-17}$  at 1 s and  $1.6(4) \times 10^{-18}$  at 1 000 s, demonstrating excellent frequency locking performance and significantly improved long-term frequency stability. Furthermore, this method can be extended to the simultaneous locking of multiple lasers, providing a unified frequency reference for multi-wavelength laser systems in ion-trap experiments.

**Key words:** optical frequency comb; laser frequency stabilization; acousto-optic modulator; fast-slow feedback control

近年来,囚禁离子系统在量子计算、量子通信以及量子精密测量等前沿领域均取得了一系列重要进展,已成为量子技术研究的核心实验平台之一(Affolter et al., 2020; Saito et al., 2024; Huang et al., 2025; Löschnauer et al., 2025; Zhang et al., 2026)。其中,基于镱离子( $\text{Yb}^+$ )的体系凭借其丰富的能级结构、较长的量子相干时间以及高保真度的量子态操控能力,已被广泛应用于量子比特编码与高分辨光谱测量等研究方向(Peper et al., 2025; Jiang et al., 2026)。然而,在追求高保真度量子态操控与长时相干演化的过程中,激光频率稳定性与相位噪声已成为制约系统性能提升的关键因素(Schioppo et al., 2017; Day et al., 2022; Jiang et al., 2023; Qi et al., 2025)。特别地,在拉比振荡驱动、窄线宽跃迁激发以及高分辨光谱扫描等典型实验中,激光瞬时线宽与长期频率漂移会直接影响体系相干时间、谱线分辨率以及量子门操作保真度(Plankensteiner et al., 2016; Zhang, 2021; Day et al., 2022)。为此,借助外部稳定频率参考对激光器实施精密锁定,是保障激光频率稳定性的必要手段,其锁定性能将直接决定实验结果的可靠性与可重复性。

在囚禁镱离子实验中,实现高稳定性激光源通常依赖于外部频率参考。常用的频率基准主要包括原子跃迁谱线和高精细度超稳光学腔。原子跃迁谱线可提供优异的绝对频率基准(Han et al., 2009; Utreja et al., 2022; Chen et al., 2024),具有良好的长期稳定性,但其锁定频率受限于固定的跃迁能级结构,难以实现灵活可调的频率控制。高精细度超稳光学腔则可通过 Pound-Drever-Hall(PDH)技术(Drever et al., 1983)显著压窄激光线宽,实现优异的短期频率稳定性(Häfner et al., 2015; Matei et al., 2017; Jin et al., 2018),然而其长期频率稳定性易受到腔体热漂移、机械应力及环境扰动等因素的影响(Numata et al., 2004)。为抑制上述扰动,通常

需要采用超低膨胀材料、高真空环境和复杂温控系统。相比之下,光学频率梳能够提供可溯源的绝对频率基准(Sala et al., 2012; Benkler et al., 2013; McFerran, 2018; Yang et al., 2020; Zhou et al., 2021),并在宽光谱范围内实现高精度频率传递,如果将光学频率梳锁定到一台高稳定超窄线宽激光器上,则待稳定激光可以在保持窄线宽特性的同时实现长期频率稳定控制,且可以同时锁定多台激光器。

在将连续波激光器锁定到光学频率梳的过程中,通常需要通过探测激光与相邻梳齿之间的拍频信号,并构建伺服反馈环路对激光频率进行实时调节。常见的反馈方式是利用激光器温度、驱动电流或压电腔长等执行器实现频率调控(Mills et al., 2012)。然而,这类执行器的动态响应带宽往往有限,许多商用连续波激光器的调制带宽通常仅在 kHz 量级,难以对更高频率范围内的频率噪声进行有效补偿,从而给高带宽锁定系统的实现带来一定困难。

针对上述需求,本文面向镱离子精密测量实验对高稳定激光源的实际要求,构建了一套基于光学频率梳的快慢双环锁频系统。该系统采用慢反馈通道补偿激光器长期漂移,同时利用声光调制器(AOM)构建高速反馈通道,实现对高频噪声的有效抑制。通过与光频梳的拍频锁定,系统获得了 Hz 量级的拍频线宽,并实现了 3 h 内优于 3.6 mHz 的中心频率波动稳定性。该系统在保证良好锁频效果的同时,能够显著提升系统的长期稳定性能,为镱离子精密操控实验提供了稳定可靠的激光频率参考。

## 1 实验系统

实验采用 Menlo Systems 公司的 FC1500-ULN 掺 Er 光纤飞秒光频梳作为锁定的波长参考源,该光频梳在 1 s 和 1 000 s 平均时间下的频率稳定度分别优于  $10^{-16}$  和  $10^{-18}$ ,其频率准确度在 100 s 时间尺度

下可达  $10^{-17}$  量级或由外部参考源决定, 重复频率  $f_{\text{rep}}$  为 250 MHz, 载波包络相移频率  $f_{\text{ceo}}$  为 35 MHz, 其 HMP934 端口可输出中心波长为 934 nm 的光谱成分, 光谱线宽约为 8 nm, 总输出光功率大于 10 mW, 在 934 nm 附近可提供约 1 mW/3 nm 的有效光功率, 能够充分满足后续拍频探测及频率锁定的实验要求。待锁定激光器采用上海频准公司的 467 nm 四倍频激光器。该激光器的种子源输出种子光, 其标称中心波长  $\lambda_s$  为 1 868 nm, 经过两次倍频过程实现目标波长  $\lambda_0 = 1/4\lambda_s = 467$  nm 的激光输出, 用于激发镱离子的  $^2S_{1/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$  电八极跃迁。其中, 第 1 次倍频后的 934 nm 激光由于其波长与光频梳在相应波段的输出相匹配, 可作为锁定对象与光频梳进行拍频, 从而实现对种子激光频率的稳定控制。

整个锁定系统的实验装置如图 1 所示, 其中光路部分主要包括 AOM 双程移频和拍频探测两部分。为抑制驱动频率变化引起的光束方向变化, 避免光路重合度下降进而导致拍频信号信噪比劣化, 实验中采用了 AOM 双次通过 (double-pass) 光路结构。首先, 待锁定激光器的输出光经过半波片 (HP) 和偏振分光棱镜 (PBS)。通过旋转半波片调节入射光的偏振方向, 使得透射光在保持水平线偏光的基础上进入 AOM 的光功率尽可能高, 以保证拍频信号最大。在 AOM 前放置焦距为 150 mm 的平凸透镜, 用于压缩光束直径, 使其与 AOM 的有效通光孔径相匹配。光束进入 AOM 后产生不同级次的衍射光, 通过光阑选取一级衍射光用于后续光路。在 AOM 之后放置焦距为 75 mm 的平凸透镜, 并将 AOM 置于该透镜的前焦面、0° 反射镜置于后焦面, 可使 AOM 出射光经透镜后以平行光形式出射, 进

而将衍射角变化转化为平行光束的平移。随后, 光束通过四分之一波片 (QWP), 经反射镜反射后原路返回, 并再次依次通过 QWP、透镜及 AOM, 实现双次通过。在此过程中, 光束两次经过 QWP 后偏振方向总计旋转  $\pi/2$ , 因此返回光在 PBS 处从反射端输出, 从而实现与入射光的有效空间分离。该双程结构不仅显著抑制了频率调制引起的光束指向变化, 而且由于光束两次通过 AOM, 激光频率将经历两次频移, 因此输出光频率的变化量为 AOM 驱动频率变化量的两倍。设 AOM 驱动频率变化量为  $\delta f_{\text{AOM}}$ , 则双程移频后的激光频率变化量满足  $\delta f_{\text{laser}} = 2\delta f_{\text{AOM}}$ 。经 PBS 反射输出的二次一级衍射光随后与光频梳 (OFC) 输出的脉冲光在另一偏振分光棱镜处进行空间合束。由于两束光初始偏振方向相互正交, 需通过半波片和 PBS 对其偏振态进行调节, 使其具有相同偏振分量, 从而在合束后能够在光电探测器中产生有效拍频信号。

由虚线所包围的区域为电路控制部分。光电探测器输出的拍频信号首先经过带通滤波器 (BPF) 滤除无关频率成分, 仅保留目标拍频分量。滤波后的信号经射频放大器 (AMP) 放大, 提高信号幅度与信噪比。放大后的射频信号输入功分器 (PS) 分为两路: 一路连接至频谱分析仪或频率计数器, 用于实时监测拍频信号频率及激光频率稳定性; 另一路输入光学锁相控制器, 在内部通过数字鉴频鉴相器 (PFD) 与参考射频信号进行相位比较, 生成误差信号。锁定系统采用快慢双反馈回路结构, 其中慢反馈回路是将误差信号经比例-积分-微分电路 (PID) 处理后, 输出至激光器内部频率调谐端口, 其标称调谐带宽约为 100 kHz, 主要用于补偿激光器的长

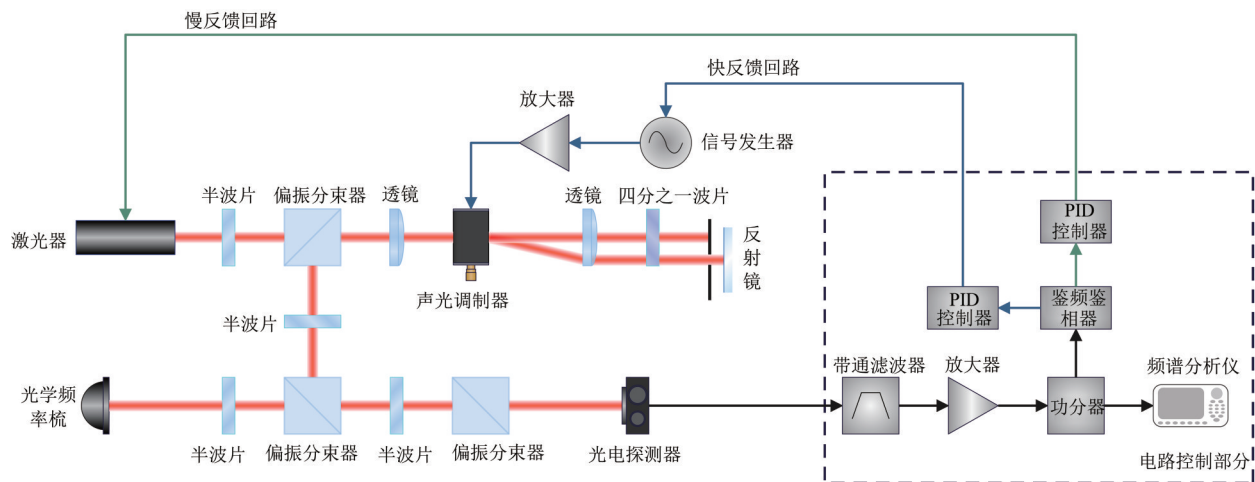


图 1 稳频系统装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the frequency stabilization system

期频率漂移和低频噪声。快反馈回路是将误差信号经 PID 处理后反馈至驱动 AOM 的信号发生器调制端口。利用信号发生器的调频(FM)模式调制 AOM 驱动频率,从而快速改变一级衍射光的频率。由于 AOM 响应速度快,光脉冲上升时间标称值为 160 ns(1 mm 光束直径条件下),对应本体响应带宽约为 MHz 量级,因此主要承担高频频率扰动和快速相位噪声的抑制任务。实验中, PID 参数采用逐步优化的方法确定。首先调节比例增益(P),在保证环路稳定不振荡的前提下最小化误差信号波动;随后优化积分参数(I),积分频率通常设置在 330 Hz 附近,并结合长期漂移抑制效果和锁定稳定性进行调整。由于微分环节(D)易引入高频噪声,本实验未将其作为主要优化参数。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 锁定前后拍频信号频谱特性测量

为了表征锁定后激光器的短期稳定性能,首先通过频谱分析仪(Keysight, N9342C)测量了锁定前后激光器和光频梳的拍频信号的频谱图。图 2(a)

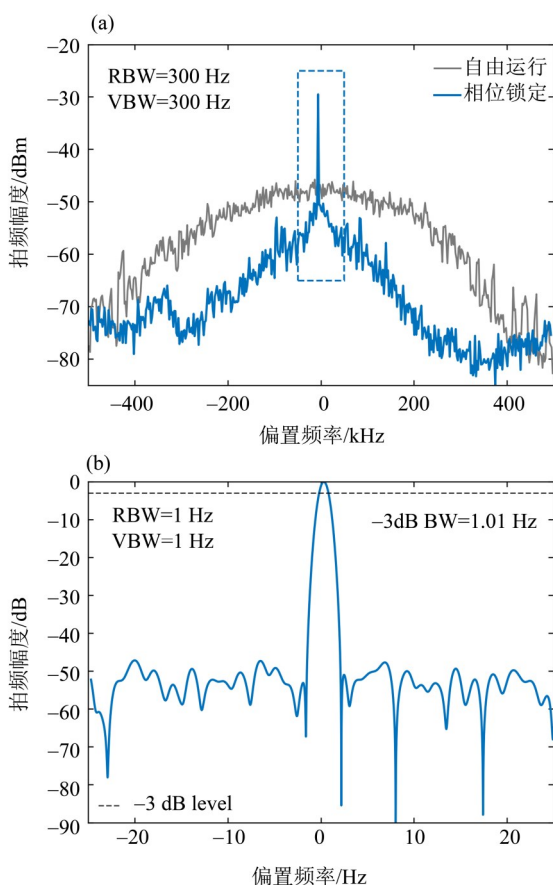


图 2 锁定前后激光与光学频率梳拍频信号的频谱图

Fig. 2 Beat-note spectra between the laser and the optical frequency comb before and after locking

给出了锁定前后拍频信号的功率谱对比,其中分辨率带宽(RBW)和视频带宽(VBW)均设置为 300 Hz,扫描范围(SPAN)为 1 MHz。横坐标表示相对 70 MHz 参考频率的频率偏移量,纵坐标表示拍频信号的幅度。灰色曲线对应激光器自由运行状态,可以看到拍频信号呈现出明显展宽的频谱包络,其  $-3$  dB 线宽约为 500 kHz,反映出自由运行时激光器较大的频率噪声。相比之下,蓝色曲线表示激光器锁定到光频梳后的结果,在宽频噪声背景显著降低的同时,频谱中心(蓝色虚线框区域)出现了一个尖锐的相干峰,这一变化表明锁定系统有效抑制了激光器的频率噪声。为进一步分析锁定后拍频信号的线宽,采用更高频率分辨率的频谱分析仪(R&S FSW26)对中心谱线进行了放大测量,图 2(b)展示了归一化处理后的频谱图,当扫描带宽缩小至 50 Hz, RBW 与 VBW 均设置为 1 Hz 时,得到拍频信号的  $-3$  dB 线宽仅为 1.01 Hz,考虑到仪器最小 RBW 为 1 Hz,该结果已接近仪器分辨极限,因此实际拍频信号的线宽可能更窄。

### 2.2 锁定前后激光的长时频率稳定性测量

为表征激光器锁定后的长期频率稳定性能,采用频率计数器(Keysight 53220A)对拍频信号的中心频率  $f_c$  进行了连续 3 小时的测量,门控时间设置为 1 s。基于获取的时间序列数据绘制图 3。进一步地,引入相对频率偏差  $f_c/f_0$  将频率波动归一化至光学频率尺度,并据此计算重叠 Allan 标准差(Gray et al., 1974)以评估不同时间尺度下的频率稳定性。在计算过程中,通过滑动分段平均构造不同时间尺度下的频率序列,并由相邻区间频率差计算 Allan 标准差。误差棒依据重叠 Allan 方差的统计不确定度估计得到,通过有效自由度的评估给出其统计波动范围,对应的 Allan 标准差曲线如图 4 所示。

实验结果表明,激光器锁定至光频梳后,拍频信号的中心频率在整个 3 h 测量时间内的波动为

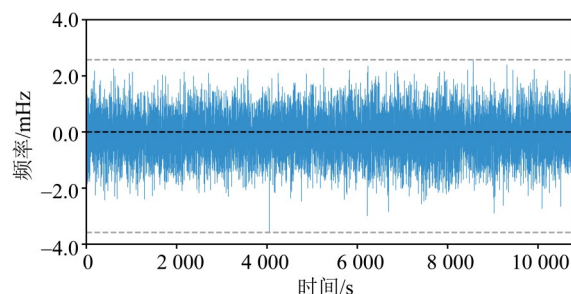


图 3 锁定后激光器连续运行 3 h 拍频频率波动

Fig. 3 Beat frequency fluctuation over 3 h of continuous operation after locking

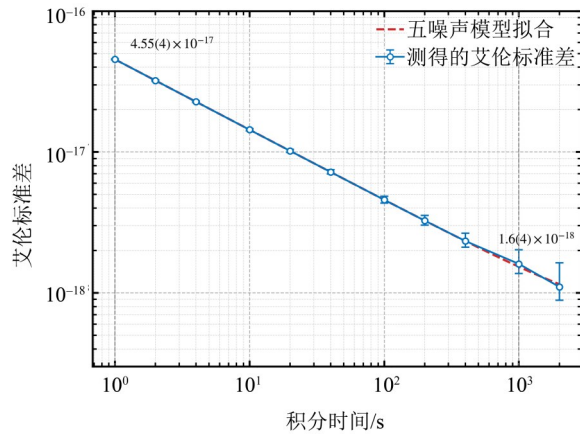


图4 频率稳定度艾伦标准差曲线

Fig. 4 Allan deviation curve of frequency stability

$\pm 3.6$  mHz, 未观察到明显的系统性漂移。Allan 标准差分析进一步显示, 在积分时间为 1 s 时, 系统的相对 Allan 标准差为  $4.55(4) \times 10^{-17}$ , 随着平均时间延长, 在 1 000 s 时达到  $1.6(4) \times 10^{-18}$ , 其中括号内不确定度来源于上述统计估计。整体上, Allan 标准差随平均时间持续下降, 表明系统在低频噪声抑制方面表现良好, 验证了该激光锁定方案优异的长期频率稳定性能。

进一步采用五项噪声模型  $\sigma^2(\tau) = \frac{h_{-2}}{\tau^2} + \frac{h_{-1}}{\tau} + h_0 + h_1\tau + h_2\tau^2$  (Riley, 2008) 对艾伦方差曲线进行拟合, 以进一步量化不同噪声机制对系统频率稳定度的影响, 拟合结果如表 1 所示。

表1 五项噪声模型拟合结果

Table 1 Fitting results of five noise models.

噪声类型	拟合系数	相对贡献/%
相位白噪声	$h_{-2} = 2.739 \times 10^{-37}$	0.007
频率白噪声	$h_{-1} = 2.071 \times 10^{-33}$	99.896
频率闪烁噪声	$h_0 = 2.633 \times 10^{-37}$	0.097
随机游走噪声	$h_1 = 1.423 \times 10^{-41}$	0.001
频率漂移	$h_2 = 0$	0

拟合结果显示频率白噪声对应系数  $h_{-1}$  较其他噪声项  $h_{-2}$ 、 $h_0$ 、 $h_1$  和  $h_2$  高约 4 个数量级, 在当前 1~2 000 s 积分时间范围内占主导地位; 相位白噪声、频率闪烁噪声、随机游走噪声及频率漂移项贡献均较小。该结果说明当前系统频率稳定度主要受频率白噪声限制, 其来源主要与拍频探测信噪比、光电探测器噪声以及锁相环路中的电子学噪声有关。与此同时, 代表环境温度变化、机械振动以及器件慢漂移等低频扰动的闪烁噪声、游走噪声和

频率漂移项均未表现出显著贡献。后续将重点提高拍频信号信噪比、优化锁相环路参数并降低电子学噪声, 以进一步压低频率白噪声水平; 同时继续优化环境温度控制和机械隔振措施, 以保证长期运行条件下低频噪声不会成为新的稳定度限制因素。

### 2.3 不同稳频方案性能比较

为进一步评估本文稳频方案的性能, 将基于光学频率梳参考的 934 nm 激光稳频结果与实验室的基于碘分子饱和吸收参考的 554 nm 激光稳频结果进行了比较, 结果如图 5 所示。其中, 碘分子饱和吸收稳频方案依据黄泽锐等(2026)的方法实现, 并在本实验条件下重新测量获得对比数据。从图中可以看出, 采用光频梳作为参考的稳频激光, 其相对艾伦标准差整体均低于碘分子饱和吸收参考方案, 表现出更优的频率稳定性。从时间演化趋势来看, 934 nm 激光的相对频率稳定度随积分时间的增加持续下降; 相比之下, 554 nm 激光的稳定度在短积分时间内有所改善, 但在更长积分时间尺度上出现回升, 最终稳定在约  $10^{-10}$  量级。总体而言, 基于光学频率梳的稳频方案能够实现更高水平的长期频率稳定性与更好的重复性。同时, 该方案还可通过将不同激光器分别锁定至不同梳齿, 实现多台激光器的同步稳频, 从而在系统扩展性与应用灵活性方

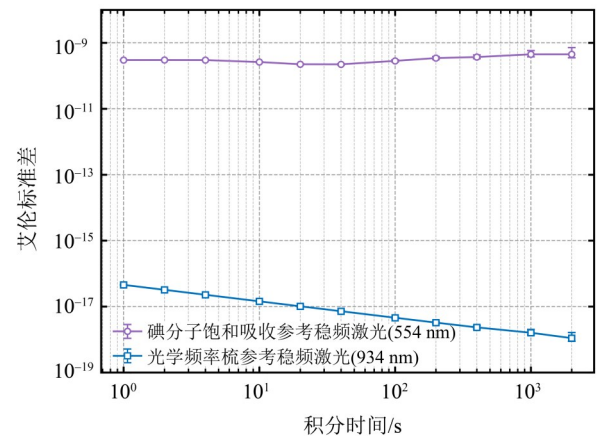


图5 基于碘分子饱和吸收与光学频率梳参考的稳频激光艾伦标准差

Fig. 5 Allan deviation for frequency-stabilized lasers referenced to iodine saturated absorption and an optical frequency comb

面具有更为突出的优势。

此外, 已有研究提出了多种基于光学频率梳或稳定参考激光的连续波激光稳频方案。Yang et al. (2020) 采用数字反馈与声光移频器前馈补偿相结合的方法, 实现了拍频频率波动优于  $\pm 6.82$  Hz, 并在

1 000 s 积分时间下获得  $2.19 \times 10^{-16}$  的 Allan 标准差。McFerran et al. (2018) 利用频率-电压转换器提取拍频误差信号, 在 1~100 s 积分时间范围内实现了约  $1.3 \times 10^{-13}$  量级的相对频率不稳定性。刘宇森等 (2024) 结合声光调制器与光学锁相环实现激光稳频, 锁定后拍频频率波动优于  $\pm 0.2$  Hz, 拍频线宽小于 2 kHz, 其 1 s 相对 Allan 标准差归一化至光频后约为  $10^{-16}$  量级。总体而言, 前两种方案基于频率测量构建反馈回路, 具有结构简单、实现方便等优点, 但频率稳定性和噪声抑制能力相对有限。相比刘宇森等采用声光调制器与光学锁相环的稳频方案, 本文基于光学频率梳参考的快慢双反馈稳频方案实现了更窄的拍频线宽和更小的拍频频率波动, 表现出良好的频率噪声抑制能力。

### 3 结 论

本文围绕离子阱实验对高稳定窄线宽激光源的需求, 构建并验证了一种基于光学频率梳的快慢双环锁频系统, 实现了对 934 nm 激光的高稳定度频率控制。该系统通过与光频梳拍频获取绝对频率信息, 并结合高速 PID 控制器和声光调制器构成快速反馈执行单元, 在维持激光窄线宽特性的同时显著提升了长期频率稳定性。最终实验结果表明, 系

统锁定后拍频线宽达到 Hz 量级, 3 h 内的频率波动控制在  $\pm 3.6$  mHz 范围内, 同时锁定系统在 1 s 和 1 000 s 积分时间的相对 Allan 标准差达到  $4.55(4) \times 10^{-17}$  和  $1.6(4) \times 10^{-18}$ 。

在离子阱精密测量实验中, 467 nm 激光常用于激发离子的  $^2S_{1/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$  电八极钟跃迁 (Blythe et al., 2003), 其频率稳定性可通过对其二倍频基频光 (934 nm 激光) 的频率锁定实现有效保障。提升 467 nm 激光的频率稳定性, 能够进一步优化电八极跃迁探测的谱线分辨率与信噪比, 为离子光频标的实现与性能提升奠定基础。本文实现的 934 nm 稳频系统可为钟跃迁探测提供稳定频率参考, 并有助于提高离子光钟实验中的频率测量精度。

此外, 该锁频系统具有良好的扩展能力。利用同一台光学频率梳作为统一频率基准, 可进一步实现多台实验激光器的同时锁定, 例如镱离子实验中常用的 369 nm 冷却激光和 935 nm 再泵浦激光等。通过建立多通道拍频检测与反馈控制系统, 可实现多波长激光的统一频率溯源与稳定控制, 从而构建完整的离子阱实验激光频率基准体系, 该方法为离子阱精密光谱测量与量子操控实验提供了一种稳定可靠的激光频率参考方案。

#### 参考文献:

- 黄泽锐, 郑鹏程, 李君夏, 等, 2026. 开普勒型缩束饱和强吸收光谱稳频方案与应用[J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-14. [2026-04-29]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.tn.20260428.1015.005>.
- 刘宇森, 王建波, 殷聪, 等, 2024. 基于声光调制器的光学锁相环 He-Ne 激光稳频方法研究[J]. 红外与激光工程, 53(3):20240003.
- Affolter M, Gilmore K A, Jordan J E, et al, 2020. Phase-coherent sensing of the center-of-mass motion of trapped-ion crystals[J]. Phys Rev A, 102(5):052609.
- Benkler E, Rohde F, Telle H R, 2013. Robust interferometric frequency lock between cw lasers and optical frequency combs[J]. Opt Lett, 38(4):555-557.
- Blythe P J, Webster S A, Margolis H S, et al, 2003. Subkilohertz absolute-frequency measurement of the 467-nm electric octupole transition in  $^{171}\text{Yb}^+$ [J]. Phys Rev A, 67(2):020501.
- Chen Y T, Xin N C, Qin H R, et al, 2024. Absolute frequency measurement of molecular iodine hyperfine transitions at 554 nm and its application to stabilize a 369 nm laser for  $\text{Yb}^+$  ions cooling [J]. Chin J Phys, 88: 485-492.
- Day M L, Low P J, White B, et al, 2022. Limits on atomic qubit control from laser noise [J]. NPJ Quantum Inf, 8:72.
- Drever R W F, Hall J L, Kowalski F V, et al, 1983. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Appl Phys B, 31(2):97-105.
- Gray J E, Allan D W, 1974. A method for estimating the frequency stability of an individual oscillator [C]//28th Annual Symposium on Frequency Control. Atlantic City, NJ, USA: 243-246.
- Häflner S, Falke S, Grebing C, et al, 2015.  $8 \times 10^{-17}$  fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity[J]. Opt Lett, 40(9): 2112-2115.
- Han S L, Cheng B, Zhang J F, et al, 2009. Stabilization and shift of frequency in an external cavity diode laser with solenoid-assisted saturated absorption [J]. Chin Phys Lett, 26(6):063201.
- Huang Y X, Wu W, Mei Q Y, et al, 2025. Experimental

- proposal on scalable radio-frequency magnetometer with trapped ions[J]. *Phys Rev Appl*, 24(6):L061002.
- Jiang J, Viatkina A V, Saaswath J K, et al, 2026. High-resolution spectroscopy of  $^{173}\text{Yb}^+$  ions[J]. *Phys Rev Lett*, 136(2):023001.
- Jiang X, Scott J, Friesen M, et al, 2023. Sensitivity of quantum gate fidelity to laser phase and intensity noise [J]. *Phys Rev A*, 107(4):042611.
- Jin L, Jiang Y Y, Yao Y, et al, 2018. Laser frequency instability of  $2 \times 10^{-16}$  by stabilizing to 30-cm-long Fabry-Pérot cavities at 578 nm[J]. *Opt Express*, 26(14):18699.
- Löschner C M, Mosca Toba J, Hughes A C, et al, 2025. Scalable, high-fidelity all-electronic control of trapped-ion qubits[J]. *PRX Quantum*, 6(4):040313.
- Matei D G, Legero T, Häfner S, et al, 2017. 1.5  $\mu\text{m}$  lasers with sub-10 mHz linewidth[J]. *Phys Rev Lett*, 118(26):263202.
- McFerran J J, 2018. Laser stabilization with a frequency-to-voltage chip for narrow-line laser cooling [J]. *Opt Lett*, 43(7):1475.
- Mills A A, Gatti D, Jiang J, et al, 2012. Coherent phase lock of a 9  $\mu\text{m}$  quantum cascade laser to a 2  $\mu\text{m}$  thulium optical frequency comb[J]. *Opt Lett*, 37(19):4083.
- Numata K, Kemery A, Camp J, 2004. Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities[J]. *Phys Rev Lett*, 93(25):250602.
- Peper M, Li Y, Knapp D Y, et al, 2025. Spectroscopy and modeling of  $^{171}\text{Yb}$  Rydberg states for high-fidelity two-qubit gates[J]. *Phys Rev X*, 15:011009.
- Plankensteiner D, Schachenmayer J, Ritsch H, et al, 2016. Laser noise imposed limitations of ensemble quantum metrology[J]. *J Phys B*, 49(24):245501.
- Qi Q C, Zhang T, Jin T Y, et al, 2025. Enhancing optical clock stability via decoupling laser frequency noise and systematic effects[J]. *Chin Opt Lett*, 23(9):092703.
- Riley W, 2008. Handbook of frequency stability analysis[M]. Gaithersburg, MD, USA: NIST.
- Saito R, Mukaiyama T, 2024. Sensing aharonov-bohm phase using a multiply-orbiting-ion interferometer [J]. *Phys Rev Lett*, 133(14):143402.
- Sala T, Gatti D, Gambetta A, et al, 2012. Wide-bandwidth phase lock between a CW laser and a frequency comb based on a feed-forward configuration[J]. *Opt Lett*, 37(13):2592.
- Schioppo M, Brown R C, McGrew W F, et al, 2017. Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles [J]. *Nature Photon*, 11(1):48-52.
- Utreja S, Rathore H, Das M, et al, 2022. Frequency stabilization of multiple lasers to a reference atomic transition of Rb[J]. *Sci Rep*, 12:20624.
- Yang R T, Lv H S, Luo J, et al, 2020. Ultrastable offset-locking continuous wave laser to a frequency comb with a compound control method for precision interferometry [J]. *Sensors*, 20(5):1248.
- Zhang B L, Ma Z X, Huang Y, et al, 2026. Liquid-nitrogen-cooled  $^{40}\text{Ca}^+$  ion optical clock with a systematic uncertainty of  $4.4 \times 10^{-19}$  [J]. *Phys Rev Lett*, 136(5):053202.
- Zhang M C, Xie Y, Zhang J, et al, 2021. Estimation of the laser frequency noise spectrum by continuous dynamical decoupling[J]. *Phys Rev Appl*, 15:014033.
- Zhou P P, Sun W, Liang S Y, et al, 2021. Digital long-term laser frequency stabilization with an optical frequency comb[J]. *Appl Opt*, 60(21):6097.

(责任编辑 王海蓉)