

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.12

镱离子光钟的多波长数字PID激光稳频系统

韩蕾, 薛潇博, 纪仟仟, 苏亚北, 陈煜

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要: 针对镱离子光钟实验中激光冷却并操控离子时, 激光器频率漂移影响原子钟系统的问题, 基于数字PID控制方法, 设计了一种新的多通道频率-数字信号转换稳频方法, 将多路多波长激光频率锁定在波长计的参考频率上。对激光器锁定前和锁定后的频率进行一定时长的数据采集及数据对比, 激光频率漂移由800 MHz控制在 ± 0.8 MHz, 激光频率稳定度由 $9.29 \times 10^{-10}@1$ s优化至 $2.79 \times 10^{-10}@1$ s, 频率千秒稳达到 3.85×10^{-12} 。该系统简单、易实现, 具有小型化、适应性强的优点。

关键词: 镱离子光钟; 稳频; 数字PID; 波长计

中图分类号: TB96

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0129-07

Multi-wavelength digital PID laser frequency stabilization system for ytterbium ion optical clock

HAN Lei, XUE Xiaobo, JI Qianqian, SU Yabei, CHEN Yu

(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurements, Beijing 100039, China)

Abstract: In the ytterbium ion optical clock experiments, the ions are cooled and manipulated by lasers, and the laser frequency shifts will affect the atomic clock system. Aiming at the laser frequency shifts, based on the digital PID control method, a new multi-channel frequency-digital signal conversion method for frequency stabilization is designed to lock the multi-channel and multi-wavelength laser frequency to the reference frequency of the wavelength meter. The laser frequency data before and after locking are acquired for a certain amount of time and compared. The result shows that the laser frequency drift is stabilized from 800 MHz to ± 0.8 MHz, the laser frequency short-term instability decreases from $9.29 \times 10^{-10}@1$ s to $2.79 \times 10^{-10}@1$ s, and the long-term instability reaches $3.85 \times 10^{-12}@1$ 000 s. The system is simple and easy to implement, and has the advantages of miniaturization and strong adaptability.

Key words: Yb⁺ optical clock; frequency stabilization; digital PID; wavelength meter

0 引言

在原子钟系统中, 需要利用激光与原子的相互作用对原子进行冷却或操控, 因此, 对激光器

的频率稳定度有较高的要求^[1-5]。常用的激光稳频方法包括: 饱和吸收谱稳频、调制光频稳频、波长调制稳频、调制转移光谱稳频及频率电压转换稳频^[6-17]等。其中, 频率-电压转换稳频方法^[13],

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-02-07

引用格式: 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.

Citation: 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.



是将激光频率锁定在另外一台已经稳频的参考激光器上, 两台激光器产生的拍频信号利用光电二极管将频差光信号转换为电信号, 再与参考信号源混频后, 通过频率-电压转换器将频率信号转换为电压信号, 进而通过PID控制反馈调节激光频率。该方法具有频率可调、实时控制的优点, 但此系统较为复杂且成本过高。

针对镱离子光钟系统中冷却光、探测光、离化光、回泵光对激光频率稳定度的要求, 设计了一种新的多通道频率-数字信号转换稳频方法。以经过校准的波长计为参考, 利用波长计直接测量激光频率并转换为数字电信号, 并利用数字PID计算反馈控制量, 进而将控制信号转换为模拟电压信号反馈调制激光频率。该方法通过软件实现数字PID控制, 光路与硬件系统简单、易于实现且便于实时调节。实验系统可对镱离子光钟系统中的多通道多波长激光同时进行频率稳定, 激光波长(370, 399, 760, 935 nm)分布于可见光和红外光波段。

1 实验系统

使用半导体激光器作为光源, 利用经过校准的波长计测量激光频率, 并实现频率-数字信号转换功能。通过动态数据采集(DAQ)模块和软件算法, 采集激光频率值并设定锁定参考频率值, 计算频率误差信号后, 反馈输入数字PID算法中得到PID控制量, 进一步经过阈值保护判断、直流偏置算法后, 得到输出控制信号。利用模拟信号输出器(AO)将控制信号由数字信号转换为模拟信号, 反馈控制半导体激光器的电流或压电陶瓷(PZT)电压, 实现系统快环或慢环锁定, 最终将激光频率锁定在参考频率值上。

1.1 光电系统

激光频率稳定系统的原理图如图1所示, 其光学系统主要包括: 激光器、光隔离器、整形棱镜对、1/2波片和偏振分光棱镜(PBS)、反射镜和光纤准直器等。出射激光首先经过光隔离器, 避免后续光路中的反射光回射, 再经过光斑整形后, 利用1/2波片和PBS将激光分为两束, 并通过1/2波片调节透射光与反射光的分光比例。其中, 大

部分光强透射出PBS作为主要输出激光, 用于后续实验中与离子发生相互作用, 较弱的激光反射出PBS后, 通过调节反射镜和光纤准直器耦合进光纤连接至波长计。

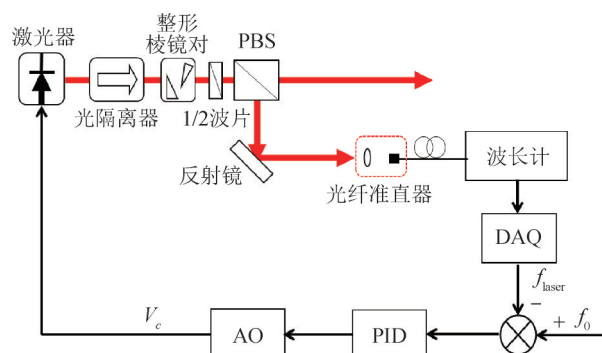


图1 激光频率稳定系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser frequency stabilization system

数据采集系统主要包括波长计和动态数据采集(DAQ)模块。经过校准后的波长计用于实时测量激光频率并转换为数字信号。DAQ模块实时采集信号并与数据处理系统进行通讯。

数据处理系统中, 利用软件算法集成了参数初始化、误差计算、PID控制、阈值保护、直流偏置等功能, 计算得到输出控制信号并连接至反馈控制系统。反馈控制系统为模拟信号输出器(AO), 将数据采集系统的输出控制信号由数字信号转为模拟电压信号, 并反馈调制激光频率。

1.2 软件设计

所设计的软件程序是基于LabVIEW平台编写, 工作原理如图2所示。首先, 利用减法器计算测量频率与参考频率之间的误差信号; 其次, 将误差信号输入数字PID算法中, 计算得到PID控制量; 再次, 利用比较器和与门逻辑器对PID控制量进行阈值保护判断后, 获取输出信号; 最后, 通过加法器向上述输出信号增加直流偏置, 输出反馈控制信号。基于数字PID的激光频率锁定方法流程图3所示, 主要步骤为:

①参数初始化, 设置激光锁定的目标参考频率值 f_0 , 设置偏置电压 V_{off} 及阈值 V_{max} 和 V_{min} , 保证 $[V_{off}+V_{min}, V_{off}+V_{max}]$ 在激光器反馈端口的允许输入电压范围内, 避免对激光器造成损害;

②启动PID控制功能后, 数据采集系统测量并

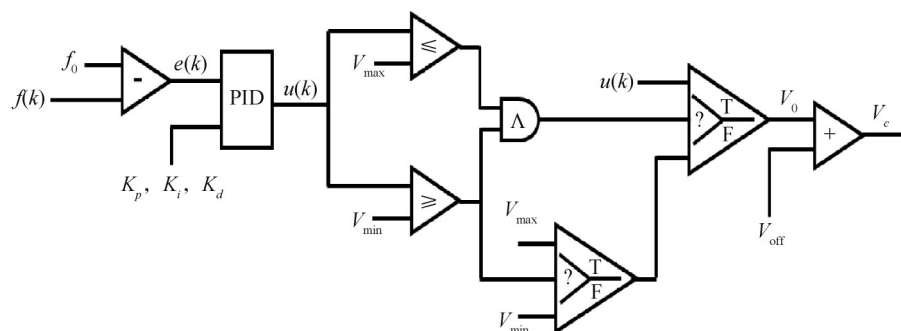


图2 激光频率锁定方法原理图

Fig.2 Schematic diagram of laser frequency locking method

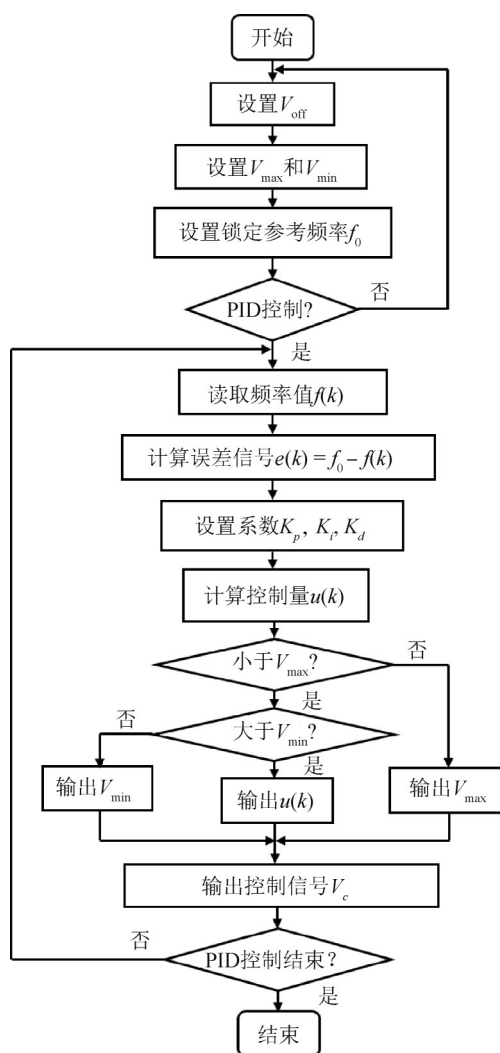


图3 激光频率锁定算法流程图

Fig.3 Flow chart of laser frequency locking algorithm

采集激光频率值 $f(k)$ ，将模拟信号转为数字信号输入至上位机；

③利用上位机控制软件编程，计算误差信号 $e(k) = f_0 - f(k)$ ；

④在上位机控制软件中设置 PID 参数 K_p , K_i , K_d ，产生 PID 控制量 $u(k)$ ，满足

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

⑤对控制量 $u(k)$ 进行阈值保护判断，若 $u(k) > V_{\max}$ ，则输出信号 $V_o = V_{\max}$ ；若 $u(k) < V_{\min}$ ，则输出信号 $V_o = V_{\min}$ ；若 $V_{\min} \leq u(k) \leq V_{\max}$ ，则输出信号 $V_o = u(k)$ ；

⑥对输出信号 V_o 增加直流偏置 V_{off} ，获得输出控制电压信号 $V_c = V_{\text{off}} + V_o$ ；

⑦将上述输出信号由数字信号转换为模拟信号并反馈至激光器，对激光频率进行调制以实现频率锁定；

重复步骤②至⑦，调节优化 PID 参数，直至激光频率稳定在设定的参考频率值。

2 实验结果

通过数字 PID 方法对镱离子光钟系统的 4 路激光频率进行锁定，在激光器自由运行和频率稳定条件下，对比激光频率漂移如图 4 所示。将 4 路激光对应的离子跃迁能级共振频率分别设定为相应的参考频率值，记为频率漂移零点。在激光器自由运行条件下，初始时将 4 路激光频率分别调节为相应的参考频率值；在数字 PID 锁频条件下，将 4 路激光的锁定频率值分别设为对应的参考频率值。横轴为采样时间，采样周期为 100 ms；纵轴为波长计测量的激光频率相对于参考频率的漂移。

图 4(a) ~ 图 4(d) 分别为 4 路 (370, 399, 760, 935 nm) 激光器自由运行条件下的频率漂移；图 4(e) ~ 图 4(h) 分别为 4 路激光频率 PID 锁定时的频率漂移。4 路激光器自由运行 10 h 后，频率漂移分

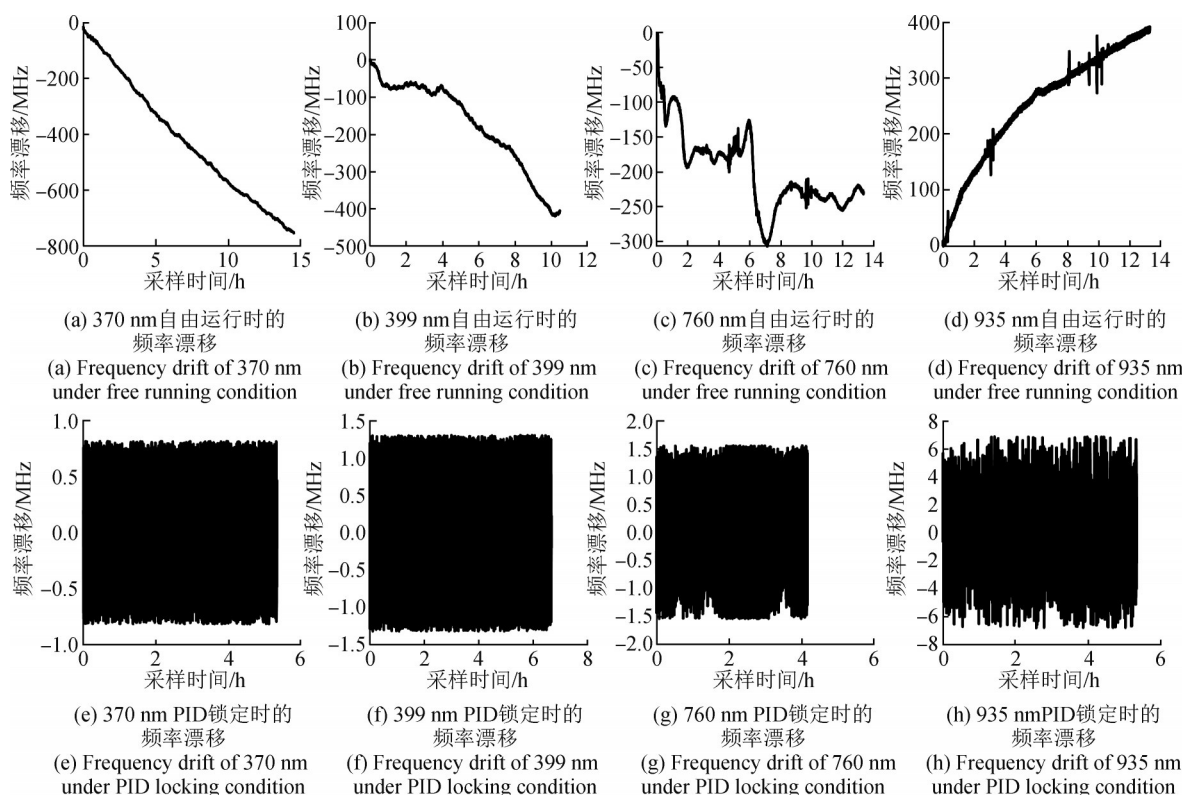


图4 激光频率漂移的实验结果

Fig.4 Experimental results of laser frequency drift

别达到-800, -500, -300, +400 MHz, 主要是激光器受外部环境影响导致的。分别对4路激光器的PZT电压同时进行PID反馈控制后, 激光器连续运行4~6 h内, 其频率波动范围分别约为 ± 0.8 , ± 1.3 , ± 1.5 , ± 7 MHz, 显著抑制了激光器的频率漂移, 实现了激光频率稳定, 频率漂移能够满足实验系统对4路激光频率的要求。

本设计中使用的波长计频率测量准确度为2 MHz, 分辨力为200 kHz, 激光稳频的实验结果趋于波长计的指标极限, 达到了预期效果。实验结果除受限于波长计的测量准确度、分辨力以外, 可能受到系统反馈带宽限制, 可通过增加激光功率、提高波长计的测量速度等方法进行优化, 参考频率值可随实验要求任意设定且随时调节, 灵活性较高。

对上述采集的八组激光频移数据分别求取阿伦方差, 根据相应的参考频率值, 计算频率稳定度。对比4路激光器稳频前后的频率稳定度, 激光频率稳定度的实验结果如图5至图8所示, 每幅图中的(a)和(b)分别为激光器自由运行和数字PID锁

频时的阿伦方差。

如图5所示, 370 nm激光器自由运行时, 频率稳定度为 $9.29 \times 10^{-10}@1\text{ s}$, 随着采样时间增加, 阿伦方差逐渐增大到 $1.25 \times 10^{-7}@10\,000\text{ s}$, 激光频率稳定性逐渐变差。数字PID稳频后, 频率稳定度提高到 $2.79 \times 10^{-10}@1\text{ s}$, 改善近1个数量级, 随着采样时间增加, 阿伦方差逐渐减小到 $3.85 \times 10^{-12}@1\,000\text{ s}$ 。

如图6所示, 399 nm激光器自由运行时, 频率稳定度由 $3.70 \times 10^{-10}@1\text{ s}$ 逐渐变差至 $1.40 \times 10^{-8}@1\,000\text{ s}$ 。数字PID稳频后, 频率稳定度由 $6.15 \times 10^{-10}@1\text{ s}$ 逐渐改善至 $9.76 \times 10^{-12}@1\,000\text{ s}$ 。

图7中, 760 nm激光器自由运行时, 稳定度由 $6.32 \times 10^{-9}@1\text{ s}$ 逐渐变差至 $3.79 \times 10^{-8}@1\,000\text{ s}$ 。数字PID稳频后, 稳定度由 $1.30 \times 10^{-9}@1\text{ s}$ 逐渐改善至 $2.05 \times 10^{-10}@1\,000\text{ s}$ 。

935 nm激光器自由运行时, 频率稳定度为 10^{-8} 量级, 且阿伦方差随着采样时间增加呈现增大趋势, 如图8所示。数字PID稳频后, 稳定度由 $1.71 \times 10^{-9}@1\text{ s}$ 逐渐改善至 $2.51 \times 10^{-10}@1\,000\text{ s}$ 。

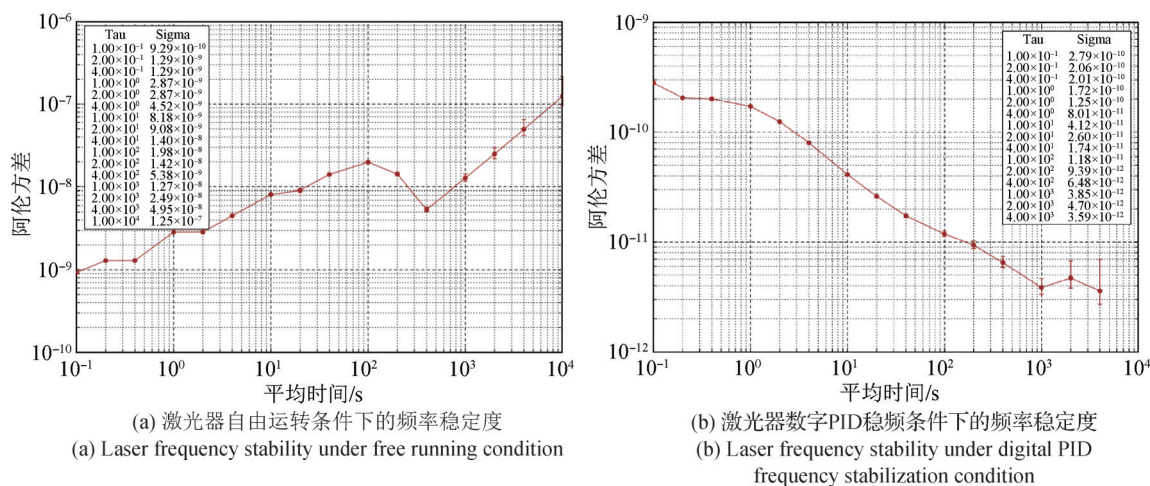


图5 370 nm激光频率稳定度的实验结果

Fig.5 Experimental results of 370 nm laser frequency stability

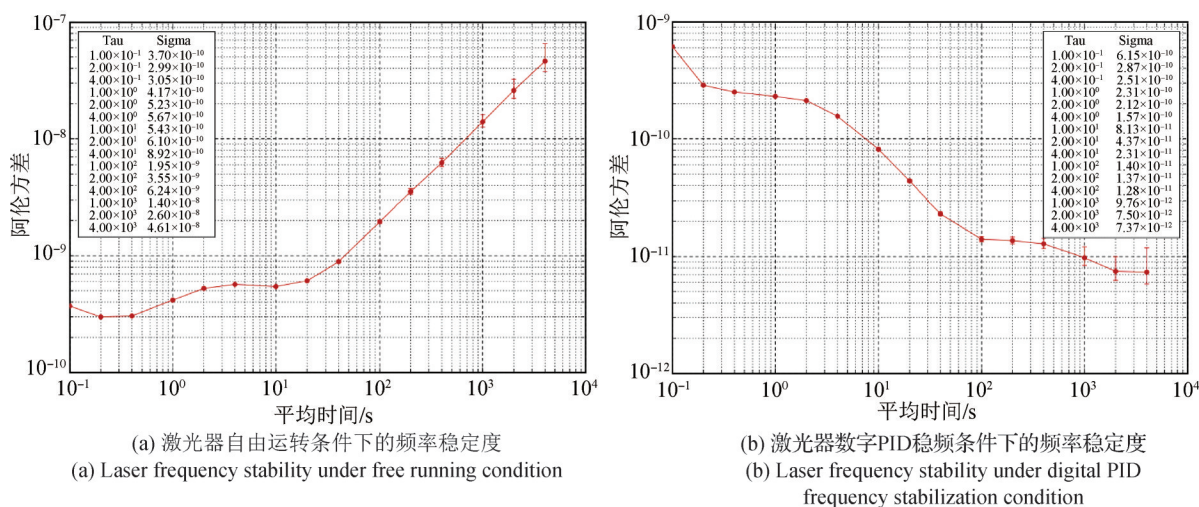


图6 399 nm激光频率稳定度的实验结果

Fig.6 Experimental results of 399 nm laser frequency stability

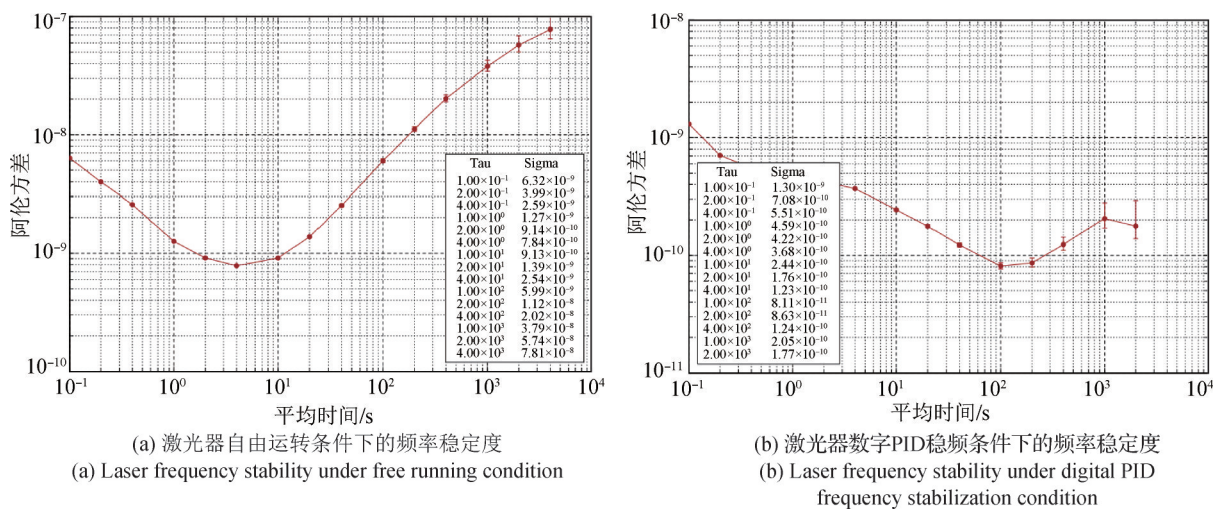


图7 760 nm激光频率稳定度的实验结果

Fig.7 Experimental results of 760 nm laser frequency stability

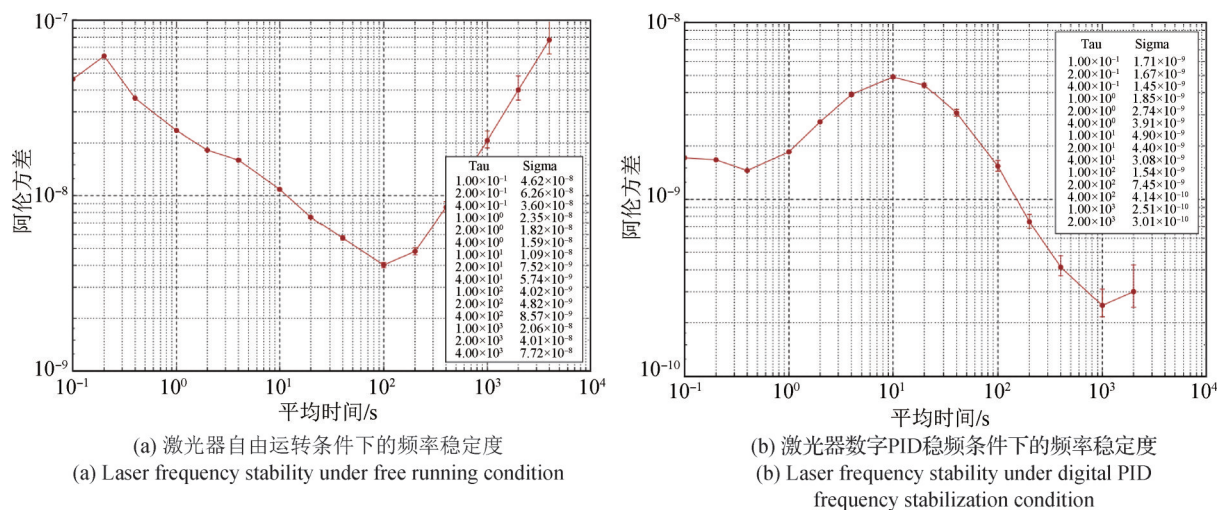


图8 935 nm激光频率稳定度的实验结果

Fig.8 Experimental results of 935 nm laser frequency stability

表明本设计中的实验方法与搭建的实验系统实现了激光频率长期稳定,能够满足原子钟系统中的实验要求,应用于激光与原子相互作用等场景,进行量子精密测量与控制。

3 结论

通过研究镱离子光钟系统的多波长数字PID激光稳频技术,设计并搭建了基于数字PID方法和波长计的多通道多波长激光稳频系统。经过激光器频率锁定实验,对比锁频前后的实验结果,激光频率漂移由800 MHz降至 ± 0.8 MHz,频率稳定度由 $9.29 \times 10^{-10}@1$ s优化至 $2.79 \times 10^{-10}@1$ s,并随着采样时间的增加长期稳定度可达到 $3.85 \times 10^{-12}@1000$ s,实现了激光频率稳定及长期锁定,满足激光与原子相互作用等实验对激光频率稳定性的要求,可应用于量子精密测量与控制领域。

参考文献

- [1] 王义遒. 原子的激光冷却与陷阱[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [2] STERR U, DEGENHARDT C, STOEHR H, et al. The optical calcium frequency standards of PTB and NIST[J]. C. R. Physique, 2004, 5: 845 – 855.
- [3] TIMUR A, KONSTANTIN M, IVAN S, et al. Compact transportable $^{171}\text{Yb}^+$ single-ion optical fully automated clock with 4.9×10^{-16} relative instability[J]. Photonics, 2020: 15244.
- [4] XUE X B, ZHOU T Z, WANG N R, et al. Recent progress on quantum frequency standards at BIRMM[J]. Frontiers in Physics, 2022: 971036.
- [5] PARTNER H L. Development and characterization of a $^{171}\text{Yb}^+$ miniature ion trap frequency standard[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2012, 51(1): 64 – 65.
- [6] PEIK E, SCHNEIDER T, TAMM C. Laser frequency stabilization to a single ion[J]. Journal of Physics B Atomic Molecular & Optical Physics, 2005, 39(1): 145 – 158.
- [7] YOSHIKAWA Y, UMEKI T, MUKAE T, et al. Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor[J]. Applied Optics, 2003, 42(33): 6645 – 6649.
- [8] PEARMAN C P, ADAMS C S, COX S G, et al. Polarization spectroscopy of a closed atomic transition: applications to laser frequency locking[J]. Journal of Physics B Atomic Molecular & Optical Physics, 2002, 35(24): 5141 – 5151.
- [9] 马杰, 赵延霆, 赵建明, 等. 利用偏振光谱对外腔式半导体激光器实现无调制锁频[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1605 – 1608.
- [10] 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, 32(15): 3295–3298.
- [11] 王杰, 高静, 杨保东, 等. 铷原子饱和吸收光谱与偏振光谱对780 nm半导体激光器稳频的比较[J]. 中国光

- 学, 2011, 4(3): 305–312.
- WANG J, GAO J, YANG B D, et al. Comparison of frequency locking of 780 nm diode laser via rubidium saturated absorption and polarization spectroscopies [J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(3): 305–312. (in Chinese)
- [12] 孟腾飞, 武跃龙, 姬中华, 等. 铯分子饱和吸收谱的半导体激光器稳频 [J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1182–1185.
- XIE T F, WU Y L, JI Z H, et al. Frequency stabilized diode laser based on cesium molecular saturated absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1182–1185. (in Chinese)
- [13] 贡昊, 王宇, 白金海, 等. 半导体激光器稳频综述 [J]. 计测技术, 2019, 39(3): 1–7.
- GONG H, WANG Y, BAI J H, et al. Review of semiconductor laser frequency stabilization [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(3): 1–7. (in Chinese)
- [14] 张璋. 半导体激光器的稳频稳相以及在原子光学中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- ZHANG Z. Frequency and phase stabilization of semiconductor lasers and their applications in atomic optics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 孙黎. 半导体激光器稳频方法的对比研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- SUN L. Comparative study of frequency stabilization methods for semiconductor lasers [D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [17] 涂文凯. 冷原子用的稳频激光及系统设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- TU W K. Stable frequency laser and system design for cold atoms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- (本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 韩蕾 (1990—), 女, 工程师, 博士, 主要研究方向为量子频标, 包括热原子束光钟、冷离子光钟、激光冷却、离子囚禁等。