

# 可搬运铷喷泉原子钟全自动激光稳频系统

吉经纬<sup>1,2</sup>, 程鹤楠<sup>1,2</sup>, 张镇<sup>1,2</sup>, 刘亢亢<sup>1</sup>, 项静峰<sup>1</sup>, 任伟<sup>1</sup>, 李琳<sup>1</sup>, 吕德胜<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 能够长期自主运行的稳频激光器是喷泉原子钟连续工作的基础。基于铷原子喷泉钟中的 780 nm 商用半导体激光器, 利用嵌入式系统设计了一个长期全自动稳频系统。该系统具有自动识别铷饱和吸收谱线的目标峰、长期锁定频率与意外失锁后的快速重锁的功能。提出了一种动态调整工作点的方法。在激光器长期运行过程中, 受温度、湿度和器件老化等因素的影响, 目标工作点会随时间发生变化, 所提方法可解决该问题。利用该方法, 激光器的稳频系统不易失锁, 即使失锁也可以快速重新锁回。将所提稳频系统成功应用于可搬运铷喷泉原子钟中, 铷喷泉原子钟在搬运后能够快速投入工作, 激光频率的长期锁定时间可达一个月以上。激光频率相对于铷饱和参考谱线的频率长期稳定度约为  $2.3 \times 10^{-13}$ , 可搬运铷喷泉原子钟的长期稳定度在搬运前后均达到了  $10^{-16}$  量级。

**关键词** 激光器; 激光冷却; 喷泉原子钟; 自动稳频; 稳定度

中图分类号 TN284.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2214002

## Automatic Laser Frequency Stabilization System for Transportable <sup>87</sup>Rb Fountain Clock

Ji Jingwei<sup>1,2</sup>, Cheng Henan<sup>1,2</sup>, Zhang Zhen<sup>1,2</sup>, Liu Kangkang<sup>1</sup>,

Xiang Jingfeng<sup>1</sup>, Ren Wei<sup>1</sup>, Li Lin<sup>1</sup>, Lü Desheng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A frequency stabilized laser capable of long-term autonomous operation is the basis for the continuous operation of an atomic fountain clock. In this paper, based on a 780 nm commercial external cavity diode laser used in the <sup>87</sup>Rb fountain clock, we develop a long-term automatic frequency stabilization system by using an embedded system. The proposed system can automatically identify the target peak in the <sup>87</sup>Rb saturated absorption spectrum, stabilize the laser frequency for a long time and quickly re-lock it after an accidental loss of lock. In addition, we develop a method for dynamically adjusting the operating point. The target operating point changes with time because the influences of temperature, humidity, device aging, and other factors during the long-term operation of the laser. Based on this method, the laser frequency stabilization system makes lock loss rarely occur, and easily re-locks even if lock loss happens. The proposed frequency stabilization system has been successfully applied to our transportable <sup>87</sup>Rb fountain clock. The clock can operate normally soon after transport and the long-term stabilization time of laser frequency can reach more than one month. The long-term stability of laser frequency relative to the <sup>87</sup>Rb saturated absorption spectrum is about  $2.3 \times 10^{-13}$  and the long-term stability of the transportable <sup>87</sup>Rb fountain clock before and after transport is always at the magnitude of  $10^{-16}$ .

**Key words** lasers; laser cooling; atomic fountain clock; automatic frequency stabilization; stability

**OCIS codes** 140.3320; 140.3425; 140.3518

收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-07-28; 录用日期: 2020-07-31

基金项目: 中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)、国家自然科学基金(11034008)

\* E-mail: dslv@siom.ac.cn

## 1 引 言

激光冷却技术的重要应用之一是喷泉原子钟<sup>[1-3]</sup>, 喷泉原子钟在时频领域发挥着重要的作用<sup>[4-10]</sup>。具有可靠稳频性能的激光器是原子钟连续运行的基础, 因此从应用角度看, 开发高可靠的激光稳频控制技术非常关键, 其可以减少甚至消除在喷泉钟连续运行过程中由激光失锁问题带来的检修和维护问题。

激光稳频的原理如下: 选取一个稳定的频率作为参考频率, 当激光频率偏离参考频率时, 通过鉴别偏差来产生能表征这个偏差的误差信号, 并将误差信号反馈给激光器。参考频率多采用原子分子的跃迁谱线中心频率或光学谐振腔的共振频率。文献<sup>[11-12]</sup>利用光学谐振腔产生稳频所需的误差信号以用于稳频。文献<sup>[13]</sup>报道了基于低温稀土离子掺杂晶体光谱烧孔效应的激光稳频技术。但光学谐振腔和低温稀土对温度和振动敏感, 不便于搬运, 因此基于光谱烧孔效应的激光稳频技术不适合制备可搬运冷原子喷泉钟的稳定光源。文献<sup>[14]</sup>设计了一套

长期锁定的自动稳频系统, 然而其失锁后的快速锁回未考虑激光器工作点的变化。文献<sup>[15]</sup>基于 1560 nm 的光纤激光器, 利用光纤放大器和倍频晶体得到了 780 nm 的激光, 再通过饱和吸收以实现稳频, 但该光学平台体积较大, 易受振动影响。

本文基于商用外腔半导体激光器 (TLB-6800, New Focus) 构建了一套自动稳频系统。该系统可实现自动找峰与锁频功能, 并且在长期稳频过程中, 可以动态调整工作点, 使激光器的误差信号始终在 0 附近波动, 激光器不容易失锁。另外, 一旦发生意外失锁, 该系统一般都能在几秒钟内快速重新锁频。

## 2 自动稳频控制系统

## 2.1 自动稳频控制系统的组成

自动稳频系统以原子饱和吸收光谱中心频率作为频率参考, 采用波长调制光谱的方法对激光器进行调制解调, 从而得到稳频所需要的鉴频信号。自动稳频系统的主要组成如图 1 所示, 其主要由光学部分、单片机控制回路、调制解调电路、比例积分微分 (PID) 反馈电路、上位机模块和激光控制器六部分组成。

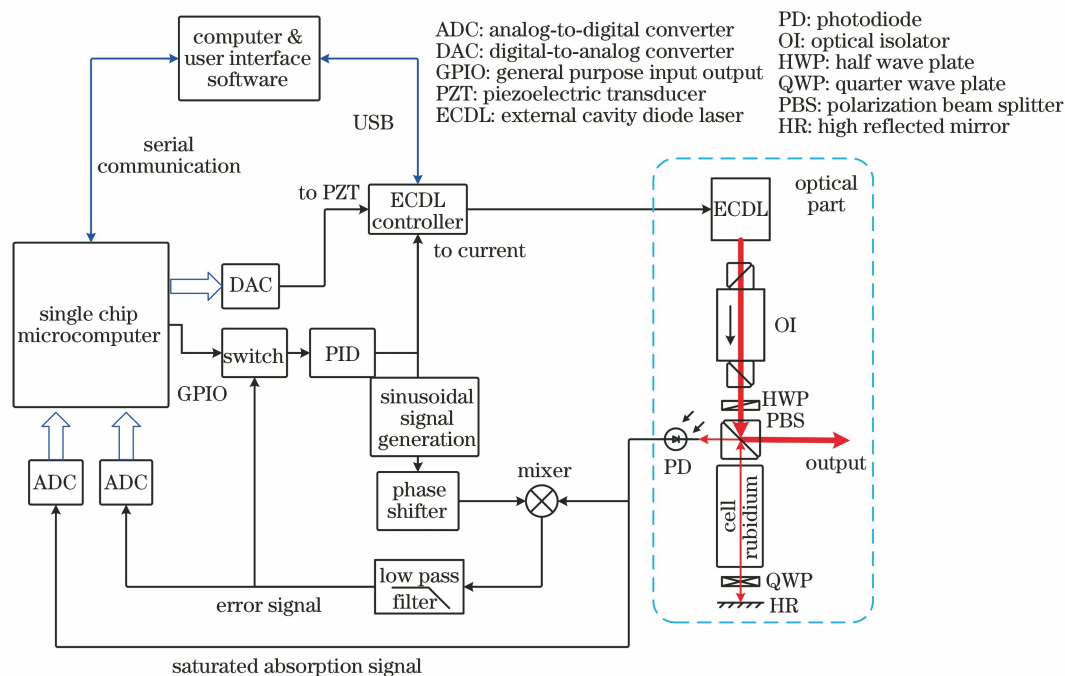


图 1 激光自动稳频系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser automatic frequency stabilization system

外腔半导体激光器 (External cavity diode laser, ECDL) 的输出光束经过隔离器、二分之一波片和偏振分光棱镜 (PBS) 后, 一小部分进入铷泡用于稳频<sup>[16]</sup>。用于稳频的光束通过铷泡和四分之一波片, 最后经由  $0^\circ$  反射镜反射后返回并在 PBS

的反射端被光电管接收。该光路为典型的饱和吸收光路, 可以产生带多普勒本底的饱和吸收光谱。饱和吸收信号与调制信号先经乘法器解调, 再经低通滤波器滤波后作为鉴频信号用于自动稳频<sup>[17]</sup>。单片机利用模数转换器 (ADC) 采集鉴频

信号与饱和吸收信号,通过数模转换器(DAC)将压电陶瓷(PZT)扫描信号输出至激光器频率调制端,调制端会对激光频率进行小范围扫描。当扫描到需要锁定的吸收峰时,单片机利用通用型输入输出(GPIO)控制开关,使误差信号经PID模块反馈至激光控制器电流调制端。上位机模块用于与用户进行界面交互,保存激光器工程数据,并可以通过通用串行总线(USB)通信设置激光器PZT电压,实现激光器频率的大范围扫描,确定激光器的工作范围。

### 2.2 动态调整激光器工作点

由于可搬运喷泉需要在不同地方运行,受环境温度、湿度以及运输过程中振动的影响,激光器的工作

点会发生较大变化,因此,激光自动稳频系统需适应不同环境,自动找到激光器的工作点以实现稳频。

本文所设计的全自动激光稳频系统,可以通过上位机软件、单片机和激光器控制器三者的配合找到激光器工作点。激光稳频的具体流程如图2所示。在用户界面点击开始自动稳频,单片机通过数模转换器将扫描电压输出至激光器频率调制端,开始寻找饱和和吸收峰。如果没有找到峰,上位机通过USB调整PZT的设定值,单片机重新寻找饱和和吸收峰。当单片机没有扫到峰时,都会通过工程数据,返回给上位机一个PZT扫描标志,上位机通过PZT扫描标志来计算给激光控制器的PZT设定值。扫描标志默认值是数字量128,变化方式为

$$P_{\text{flag}} = \begin{cases} 128 + S_{\text{count}}/2, & S_{\text{count}} \bmod 2 = 0 \\ 128 - (S_{\text{count}} - S_{\text{count}} \bmod 2)/2, & S_{\text{count}} \bmod 2 = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

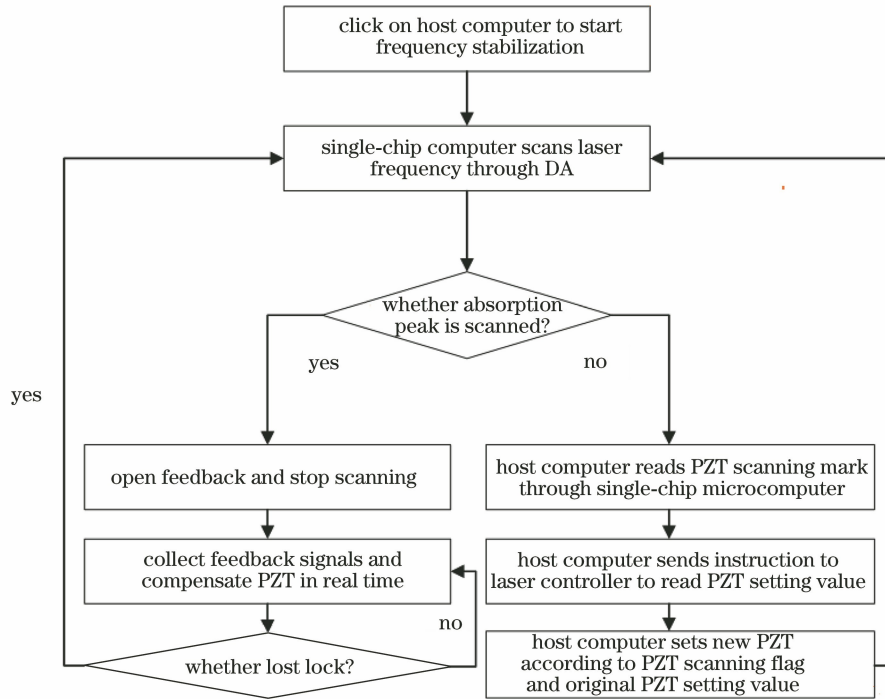


图2 激光自动稳频流程图

Fig. 2 Flow chart of laser automatic frequency stabilization

式中: $P_{\text{flag}}$ 为单片机回传的PZT扫描标志; $S_{\text{count}}$ 为单片机扫描激光饱和吸收谱线的次数; $S_{\text{count}} \bmod 2$ 为 $S_{\text{count}}$ 除以2所得的余数。随着单片机数模转换器扫描次数的增加,扫描标志在默认值128的基础上呈正负递增和递减周期变化。

上位机软件收到PZT扫描标志后,发送指令“读取当前PZT”至激光控制器,获取当前的PZT设定值。之后通过计算得到新的PZT设定值,并重新设定给激光控制器:

$$P_{\text{new set}} = \begin{cases} P_{\text{old set}} + (P_{\text{flag}} - 128) \times 0.4 - 0.2, & P_{\text{flag}} > 128 \\ P_{\text{old set}} + (P_{\text{flag}} - 128) \times 0.4, & P_{\text{flag}} < 128 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $P_{\text{new set}}$  为最新的 PZT 设定值; $P_{\text{old set}}$  为上一周期的 PZT 设定值; $P_{\text{flag}}$  为单片机回传的 PZT 扫描标志。

当 PZT 初始设定值为 60 V 时,PZT 设定值随扫描次数的变化情况如表 1 所示。PZT 初始设定值为 60 V,PZT 扫描标志初始为 128,如果单片机

表 1 PZT 设定值随扫描次数的变化情况

Table 1 Variance of PZT setting value with number of scans

Number of scans	PZT flag	PZT setting value /V	Frequency stability
1	128	60.0	Unstable
2	129	60.2	Unstable
3	127	59.8	Unstable
4	130	60.4	Unstable
5	126	59.6	Stable

随着扫描次数的增加,根据初始 PZT 设定值沿正负两个方向扫描激光频率,正方向扫描与负方向扫描轮流进行,正负方向扫描的间隔为 0.2 V。正负方向轮流扫描的方法有两个优点。第一,稳频系统不会因为只往一个方向扫描而错过工作点。第二,在稳频过程中,当激光器受到某些干扰而意外失锁时,通过正负方向轮流扫描,可以准确快速地重新锁定。

当上位机调整完 PZT 设定值后,发送指令给单片机,单片机通过数模转换器输出扫描电压至激光器频率调制端,从而寻找饱和吸收峰以进行稳频,在扫描的同时采集饱和吸收信号和鉴频信号。首先,从 0 V 到 2 V 进行正向扫描,找到误差信号的最大值和最小值,根据这两个值得到饱和吸收峰的阈值;然后,再从 2 V 到 0 V 进行反向扫描,在反扫过程中,根据鉴频信号的大小判断扫描范围内是否有所需的饱和吸收峰。如果判断此时为正确的饱和吸收峰,则数模转换器的输出固定为当前电压值,单片机通过 GPIO 口控制开关打开 PID 反馈,激光器开始进行稳频。

### 2.3 快速重锁

可搬运喷泉在运行过程中,激光器需要尽量一直处在稳频状态,一旦失锁,需要能快速重新锁回。相关研究大部分是在激光器开机不久,工作点没有发生大变化时进行的。在激光器长期运行过程中,受到温度、湿度和器件老化等因素的影响,激光器稳频的工作点会随着时间发生变化,特别是可搬运喷泉有时需要在非实验室环境下运行。本文提出了一种动态调整工作点的方法,该方法可使激光器的误差信号始终在 0 附近波动,激光器不容易失锁,即使

通过数模转换器未扫到吸收峰,通过(1)式将 PZT 扫描标志变为 129,上位机通过(2)式重新计算 PZT 设定值为 60.2 V,如果仍未扫到吸收峰,单片机将 PZT 扫描标志再变为 127,上位机设置 PZT 设定值为 59.8 V,依此顺序设置 PZT 设定值,直至单片机扫到吸收峰完成锁频。

一旦失锁,也可以快速重新锁定。具体流程如图 3 所示。当激光器处于锁定状态时,误差信号经 PID 后作为反馈信号被传输至激光控制器的电流端,以进行实时的模拟反馈补偿。同时,单片机对反馈信号进行采集,当反馈信号大于零时,单片机通过减小数模转换器电压输出,对激光器的频率调制端进行补偿,当反馈信号小于零时,单片机增大数模转换器的电压输出值。通过上述补偿,在短时间内激光器的输出能保持很好的稳定性。然而,随着激光器稳频时间的增加,激光器的工作点发生改变,数模转换器的输出值超出正常区间,如果不及时调整工作点,激光器将会失锁。为了解决该问题,本文通过单片机向上位机发送工程数据,上位机接收到该数据后通过 USB 发送调整 PZT 电压的指令,进而动态调整 PZT 的电压值,使数模转换器的输出重新回到正常区间内,激光器就不容易失锁了。

当激光器在长时间的稳频工作中受到振动或其他干扰影响而发生意外失锁时,单片机检测到这种突变后会重新启动自动锁频程序。由于两层 PZT 的动态补偿,饱和吸收峰保持在当前工作点附近。因此,在重新自动锁定过程中,单片机通过数模转换器输出扫描电压,就可以扫到饱和吸收峰,进而在几百 ms 内就能完成重新锁定。如果数模转换器没有扫描到吸收峰,由于工作点就在附近,只需要通过上位机自动控制 PZT 设定点,使其左右各调整一两次,激光器就能在几秒内完成快速重新锁定。图 4 所示是激光器失锁重锁过程中饱和吸收信号的变化图,激光器受到某种干扰,饱和吸收信号突然从 2.35 V 变为 2.80 V,在重新锁定程序的作用下,激光频率在大约 4 s 之内被重新锁定。

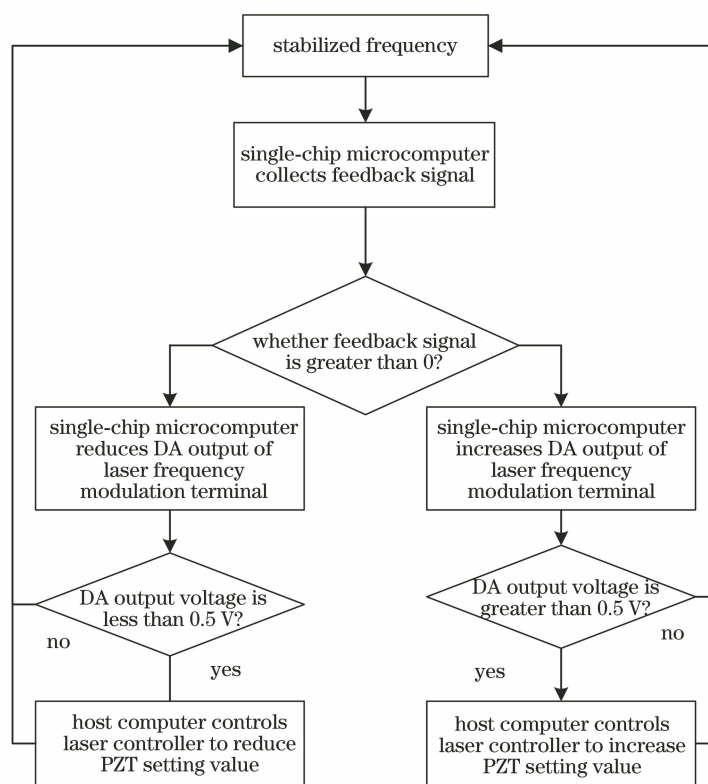


图 3 双反馈 PZT 流程图

Fig. 3 Flow chart of dual feedback PZT

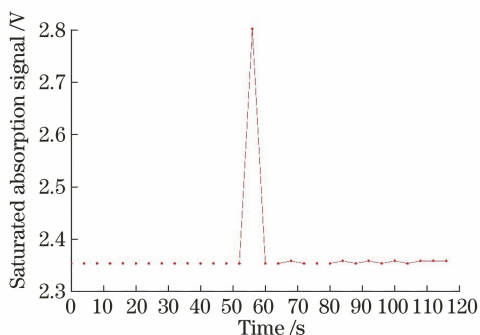


图 4 激光器失锁重锁过程中饱和和吸收信号的变化

Fig. 4 Variance of saturated absorption signal during lock loss and re-lock of laser

### 3 应用验证

所设计的全自动稳频系统已成功应用于可搬运喷泉原子钟。可搬运喷泉原子钟通过公路从上海被运输至北京计量院,受温度,湿度和运输过程等的影响,运达后与在上海相比,激光器 PZT 工作点有十几伏的偏差,测试人员点击“开启自动稳频”键,完全不需要人工干预,自动稳频系统在几分钟之内就顺利找到了激光器的工作点,完成了自动稳频。图 5 为该稳频系统采集到的典型饱和吸收信号和误差信号,当找到所需要的峰时,系统自动建立反馈,开始

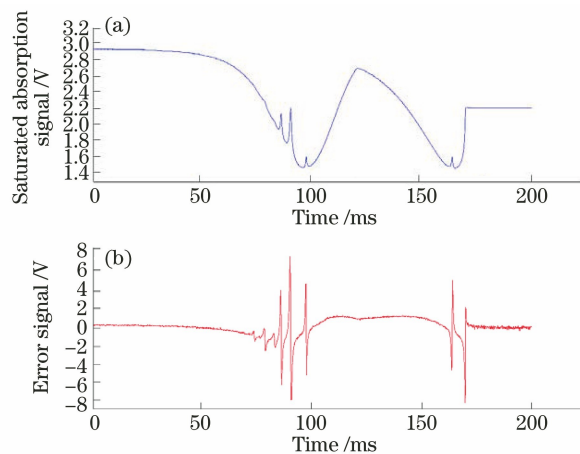


图 5 找峰过程中的饱和吸收曲线与误差信号曲线。

(a)饱和吸收曲线;(b)误差信号曲线

Fig. 5 Saturated absorption curve and error signal curve during peak search. (a) Saturation absorption curve; (b) error signal curve

进行稳频。

在可搬运冷原子喷泉钟连续闭环运行一个月的过程中,激光器频率锁定饱和吸收信号随时间的变化曲线如图 6 所示,其中吸收信号的峰值在 2.15 V 左右,该信号维持在 1.9 V 以上表示激光器始终处于锁定状态。可以看出,在连续一个月的过程中,激

光器稳频系统始终保持锁定状态,没有失锁。在第6天和第15天附近,饱和吸收信号在向下漂移的情况下,有一个向上的拐点,可以推测,自动稳频系统在这两个时间点对激光器工作点进行了自动重置,使工作点的漂移得到了及时校正,保证了激光器能够长期保持频率稳定。

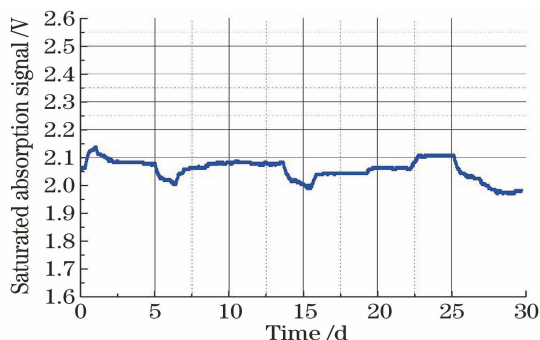


图6 喷泉原子钟闭环运行过程中饱和吸收信号随时间的变化曲线

Fig. 6 Variance of saturated absorption signal with time during closed-loop operation of fountain atomic clock

在一个月内的稳频过程中,记录的误差信号如图7所示,其峰峰值约为0.5 V。可以根据误差信号来计算激光频率相对于铷泡饱和吸收峰的频率稳定度。饱和吸收的交叉峰和相邻的  $F=2 \rightarrow F'=3$  主跃迁峰相隔 133 MHz,其中  $F, F'$  分别为跃迁前、后精细能级的量子数。通过计算可得交叉峰鉴频曲线线性部分的宽度大约为 8.14 MHz,斜率为 2.01 V/MHz。得到斜率后,通过将稳频过程中采集到的误差信号转换为频率,即可计算出激光器频率相对于铷泡的频率稳定度。图8给出了激光器的频率稳定度情况,其中  $\sigma$  为激光频率的阿兰方差,  $\tau$  为积分时间。可以看出,激光频率对饱和吸收峰的跟随程度长期保持在  $2.3 \times 10^{-13}$  左右,表明系统具有很高的稳定性和可靠性。

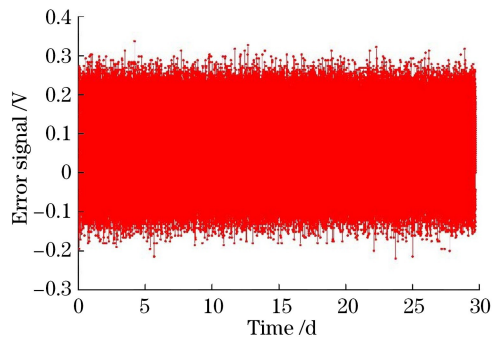


图7 稳频过程中的误差信号

Fig. 7 Error signal during frequency stabilization

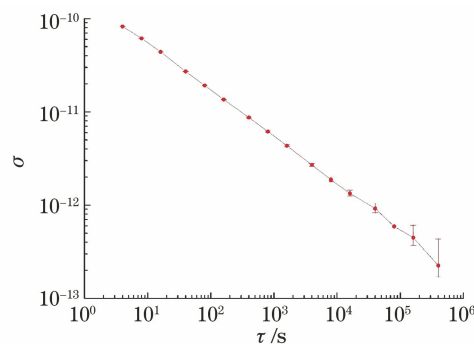


图8 激光器的频率稳定度

Fig. 8 Laser frequency stability

基于该自动稳频系统,在北京和上海两地分别进行了可搬运冷原子喷泉钟的闭环工作。图9给出了闭环结果,红实线和绿色虚点线分别是搬运前后短期稳定度的线性拟合曲线。当平均时间超过 100000 s 时,长期稳定度达到  $10^{-16}$  量级,并继续下降。

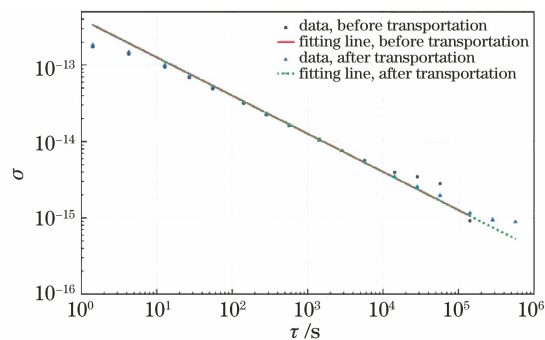


图9 喷泉原子钟在上海和北京的闭环结果

Fig. 9 Closed-loop results of fountain atomic clock in Shanghai and Beijing

## 4 结 论

基于商用外腔半导体激光器构建了一套自动稳频系统,该系统可实现自动找峰和锁频功能,即使失锁也能快速重新锁定。该系统已被成功应用于可搬运铷喷泉原子钟,实验结果表明,该系统在搬运至其他地点后,仍可快速锁定。该系统减少了喷泉钟连续运行过程中的激光失锁情况的发生,有效提高了可搬运铷喷泉原子钟的运行率,对可搬运铷喷泉原子钟的长期稳定度进入  $10^{-16}$  量级起到了关键作用。

## 参 考 文 献

- [1] Clairon A, Salomon C, Guellati S, et al. Ramsey resonance in a Zacharias fountain [J]. Europhysics Letters (EPL), 1991, 16(2): 165-170.
- [2] Vian C, Rosenbusch P, Marion H, et al. BNM-

- SYRTE fountains: recent results [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 833-836.
- [3] Guéna J, Abgrall M, Rovera D, et al. Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(3): 391-409.
- [4] Liu L, Lu D S, Chen W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled  $^{87}\text{Rb}$  atoms [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2760.
- [5] Micalizio S, Godone A, Levi F, et al. Pulsed optically pumped  $^{87}\text{Rb}$  vapor cell frequency standard: a multilevel approach[J]. Physical Review A, 2009, 79(1): 013403.
- [6] Sortais Y, Bize S, Nicolas C, et al. Cold collision frequency shifts in a  $^{87}\text{Rb}$  atomic fountain [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(15): 3117-3120.
- [7] Peng X K, Ren W, Xiang J F, et al. Performance analysis of space cold atomic clock based on *in situ* atomic detection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0802001.  
彭向凯, 任伟, 项静峰, 等. 基于原位探测的空间冷原子钟的性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0802001.
- [8] Wang Q, Wei R, Wang Y Z. Atomic fountain frequency standard: principle and development [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 163202.  
王倩, 魏荣, 王育竹. 原子喷泉频标: 原理与发展 [J]. 物理学报, 2018, 67(16): 163202.
- [9] Guo F, Kong D H, Zhang Q, et al. System development and clock transition spectroscopy detection of transportable  $^{87}\text{Sr}$  optical clock[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0902001.  
郭峰, 孔德欢, 张强, 等. 可移动型铯原子光钟的系统研制与钟跃迁谱线探测 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0902001.
- [10] Li T C, Li M S, Lin P W, et al. Experiments and considerations of realizing cold cesium atomic 74 cm fountain[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003(3): 254-256.  
李天初, 李明寿, 林平卫, 等. 实现 74 cm 铯冷原子喷泉的实验和讨论 [J]. 计量学报, 2003(3): 254-256.
- [11] Li C, Chen H C, Lin Y G, et al. Design of signal generator applied on sideband modulation Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018(3): 401-404.  
李超, 陈华才, 林弋戈, 等. 应用于边带调制 PDH 激光稳频的信号源设计 [J]. 计量学报, 2018(3): 401-404.
- [12] Guo Y, Qiu Q, Wang Y X, et al. Research on stability of Fabry-Perot cavity based on PDH [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0402003.  
郭勇, 邱琪, 王云祥, 等. 基于 PDH 的法布里-珀罗腔稳定性研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0402003.
- [13] Han L, Lin Y G, Yang J, et al. Research and development on laser frequency stabilization based on spectral hole-burning effect [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110003.  
韩琳, 林弋戈, 杨晶, 等. 基于光谱烧孔效应的激光稳频技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110003.
- [14] Zhang Y, Wang Q. Research of automatic frequency stability diode laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0602001.  
张胤, 王青. 自动稳频半导体激光器研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602001.
- [15] Wang X W, Xiang J F, Peng X K, et al. Light source of rubidium cold atomic clock based on fiber laser amplification and frequency doubling [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0914002.  
王新文, 项静峰, 彭向凯, 等. 基于光纤激光放大倍频的冷原子钟光源 [J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0914002.
- [16] Talvitie H, Pietilainen A, Ludvigsen H, et al. Passive frequency and intensity stabilization of extended-cavity diode lasers [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1): 1-7.
- [17] Ren W, Sun Y G, Wang B, et al. Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock [J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3607-3614.