

引用格式: ZHANG Shuhong, YUN Peter, YANG Tao, et al. Power Stability of a Semiconductor Laser Used in Atomic Clocks [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0914002

张树宏, 云恩学, 杨涛, 等. 用于原子钟的半导体激光器功率稳定研究[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0914002

用于原子钟的半导体激光器功率稳定研究

张树宏^{1,2}, 云恩学², 杨涛¹, 郝强², 王鑫²

(1 西北大学 物理学院 现代物理研究所, 西安 710027)

(2 中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

摘要: 基于声光调制器作为反馈器件设计了原子钟常用波段 780 nm 激光器的功率锁定构型。通过低噪声设计和参数优化实现了关键噪声源的抑制和激光器功率锁定。实验结果表明, 在 20~10 000 Hz 频偏范围内, 激光的相对强度噪声得到有效抑制。尤其在 1 300 Hz 频率处, RIN 抑制达到 20 dB。同时, 中期 (9 000 s) 功率相对稳定性由 $\pm 0.754\%$ 提升 78 倍至 $\pm 0.009 68\%$ 。根据 CPT 原子钟的典型参数, 激光相对强度噪声对原子钟频率稳定度影响仅为 $2.1 \times 10^{-14} @ 1 \text{ s}$ 。另外, 中期稳定度由无锁定情况下的 4.67×10^{-2} 提高到锁定状态下的 8.67×10^{-5} , 得到了较好的改进, 有利于改善原子钟中期频率稳定度。

关键词: 激光器; 原子钟; 相对强度噪声; 声光调制器; 功率稳定性

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215009.0914002

Power Stability of a Semiconductor Laser Used in Atomic Clocks

ZHANG Shuhong^{1,2}, YUN Peter², YANG Tao¹, HAO Qiang², WANG Xin²

(1 Institute of Modern Physics, School of Physics Northwest University, Northwest University, Xi'an 710027, China)

(2 National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: Based on using the Acousto-optic Modulator (AOM) as a feedback device, we design the power locked setup of the 780 nm laser in the common band of atomic clocks. Through low-noise design and parameter optimization, the suppression of key sources of the noise and the laser power locking are achieved. In the frequency deviation range of 20~10 000 Hz, the relative intensity noise of laser beam is effectively suppressed. Especially at the frequency of 1 300 Hz, 20 dB suppression of RIN has been reached. At the same time, the relative power stability in the mid-term (9 000 s) has been increased 78 times from $\pm 0.754\%$ to $\pm 0.009 68\%$. According to the typical parameters of CPT atomic clock, the influence of relative intensity noise of the laser on the frequency stability of an atomic clock is only $2.1 \times 10^{-14} @ 1 \text{ s}$. In addition, the mid-term stability improved from 4.67×10^{-2} in unlocked state to 8.67×10^{-5} in locked state, and it will be helpful to improve the intermediate period frequency stability of the atomic clock.

Key words: Laser; Atomic clock; Relative intensity noise; Acousto-optic modulator; Power stability

OCIS Codes: 140.3490; 140.3425; 230.1040

0 引言

半导体激光器, 因其窄线宽、大功率、低功耗、小型化等优点, 逐渐成为原子钟的重要核心器件之一。激

基金项目: 国家自然科学基金(No.U1731132)

第一作者: 张树宏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光器的功率稳定性研究。Email: 911670020@qq.com

导师(通讯作者): 云恩学(1982—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为高性能 CPT 原子钟。Email: yunenxue@ntsc.ac.cn

杨涛(1976—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为量子气体动力学。Email: yangt@nwu.edu.cn

通讯作者: 王鑫(1982—), 女, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为量子频标。Email: wangxin@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-05-31

<http://www.photon.ac.cn>

光功率的高频率波动会降低鉴频信号信噪比,影响基于激光的微波原子钟短期频率稳定度。其低频变化会通过光频移等效应影响原子钟的长期稳定度。譬如基于连续激光的相干布局囚禁(Coherent Population Trapping, CPT)原子钟^[1]实现的短稳 $1.7 \times 10^{-13}/s$ ^[2]和连续激光抽运铷钟^[3]获得的短稳 $1.4 \times 10^{-13}/s$ ^[4],主要限制因素都是激光功率噪声。基于脉冲激光的原子钟,可以获得更高斜率的鉴频信号,同时可以减小激光功率噪声引起的光频移敏感系数,但是激光功率噪声仍然不能忽视。如在脉冲CPT原子钟达到的短稳 $2.3 \times 10^{-13}/s$ ^[5]和脉冲光抽运(Pulsed Optically Pumped, POP)原子钟实现的短稳 $1.2 \times 10^{-13}/s$ ^[6],激光功率噪声影响依然较大,主要是因为光开关(如声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM))引起的功率噪声恶化^[7]。激光功率的长期波动,是CPT和POP等原子钟长稳变差的主要原因,如在POP原子钟里^[8],激光功率0.7%/天的波动,就限制了原子钟的长期稳定度在 $1.6 \times 10^{-14}/\text{天}$ 的水平。因而,提升激光功率稳定性对研制高性能微波原子钟显得非常迫切。

目前有多种方法可实现半导体激光器输出激光功率稳定。非线性变换抑制方法,即通过工作在饱和区间的半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)来实现噪声抑制^[9],但由于放大波长的限制,该方法在原子钟方面的应用较少。被动式的敏感参量隔离方法也可以提高激光功率稳定性^[10],但是系统较为复杂。主动式负反馈方法,包括采用电流或温度的反馈来进行激光功率锁定(会牺牲激光的频率稳定性,较难应用于原子钟)^[11],以及更常用的外部调制器来施加反馈,如电光调制器(Electro-optic Modulator, EOM)^[12],光弹性调制器^[13]和声光调制器^[14-16]等。其中基于声光调制器的功率锁定,因其较快的响应时间、驱动信号相对于EOM需要的高压信号更容易获得、成本低(约为EOM的1/10),同时较高的衍射效率(可大于90%)使得激光利用率较高,得到广泛研究和应用。针对高性能微波原子钟的应用,如小型化、低功耗等方面的考虑,我们选用AOM来实现激光功率起伏的抑制。

基于AOM的激光功率锁定,通过控制声光调制器的射频功率来改变其一级(或高次)衍射光或者0级光(载波)的光强,实现激光功率的稳定。目前,德国马普实验室从事引力波探测的WILLKE B小组通过AOM实现了激光功率噪声抑制,相对强度噪声达到世界最好水平^[14],在100 Hz~1 kHz范围内达到 $1.8 \times 10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。但是该方案用到了体积较大且置于真空中的模式滤波环形腔(mode clean cavity),不适用于小型化原子钟。法国巴黎天文台从事高性能CPT原子钟研究的GUÉRANDÉL S小组通过AOM的激光功率锁定,实现了RIN在1 Hz~100 kHz频带范围内达到 $2.2 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$ 较好水平^[16]。但是可以看到,这两个小组都采用了AOM的0级光作为被控制和稳定的对象,没有考虑到0级光光束的空间分布结构的不均匀性和噪声差异性,这在一定程度上会限制功率稳定的效果,而我们的方案采用一级衍射光来进行功率锁定,其通断消光比在30 dB以上且光斑呈现较好的高斯分布,有效地避免了这一问题。另外,AOM还可作为光开关,其一级衍射光可以用来实现高消光比的光脉冲,探测脉冲光强可实现脉冲激光的功率锁定,这样就同时实现了光开关和激光功率稳定的功能,而载波(零级光)不能实现光开关的功能。不过,一级衍射光也会带来频率移动。在有些应用中,如果不希望频率移动,这可以通过另一个AOM进行频率补偿。但是在我们的CPT或POP原子钟的应用中,希望频率移动,以便用来补偿钟泡和参考泡之间的缓冲气体频移引起的光学频移,这样只用一个AOM就同时实现了激光功率稳定和移频,节省了器件。因此,相比于AOM的零级光,一级衍射光更适用于我们的实验。基于此构型,本文优化了光路结构、电压基准滤波环路、电路伺服环路参数等,实现了激光功率的稳定,其RIN在20~10 000 Hz内得到有效抑制,中期稳定性也得到提升,这将为研制高性能CPT和POP等原子钟提供重要设计参考。

1 实验原理及装置

1.1 声光调制器工作原理

声光调制器的主要构成部分为声光介质和压电换能器。当换能器由驱动源的某种特定载波频率驱动时,换能器会产生同一频率的超声波并传入声光介质,此时介质的折射率将发生变化,当光束通过介质时由于发生相互作用而产生衍射,进而改变了光的传播方向。

声光衍射可以分为拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射两种情况。激光腔外使用的声光调制器一般采用布拉格型,衍射角为

$$\sin \theta_d \approx \theta_d = (\lambda_0/v) f_1 \quad (1)$$

布拉格一级衍射效率 η 为

$$\eta = I_1/I_T = \sin^2(\Delta\psi/2) \quad (2)$$

$$\Delta\psi = (\pi/\lambda_0) \sqrt{2LM_2 P_a/H} \quad (3)$$

式中, λ_0 为激光波长, v 为超声波在介质中的速率, f_1 为超声波频率, n 为介质折射率, I_1 为一级衍射光强度, I_T 为入射光强度, L 为声光互作用长度, H 为声光互作用宽(高)度, P_a 为超声波功率, M_2 为声光材料的品质因数。

由此可知, 当外加信号幅度或功率通过驱动电源作用到声光器件时, 超声强度随此信号变化, 衍射光强也随之变化, 即在小于饱和射频功率范围以内, 有单调递增关系, 从而可实现对激光的振幅或功率的控制。

1.2 装置组成及原理

激光功率稳定实验装置如图 1 所示。基于 780 nm 的 DFB 激光器 (Eagleyard Photonics, GF-01034), 通过温度控制器 (Thorlabs, TED200C) 对 DFB 激光管的温度进行精密温控, 使其温度波动 ≤ 2 mK/day。同时通过低噪声电流源 (Thorlabs, LDC202C) 对其供电, 使其工作电流 (~ 100 mA) 远大于其阈值电流 (~ 30 mA), 这两个措施使得激光管的输出激光光强的稳定性得以提高, 在自由运行状态下可以达到较小的相对强度噪声 (RIN)。

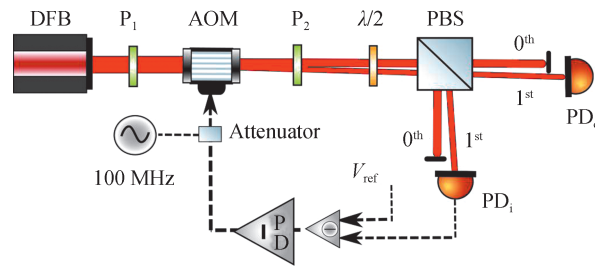


图 1 激光功率锁定的实验装置

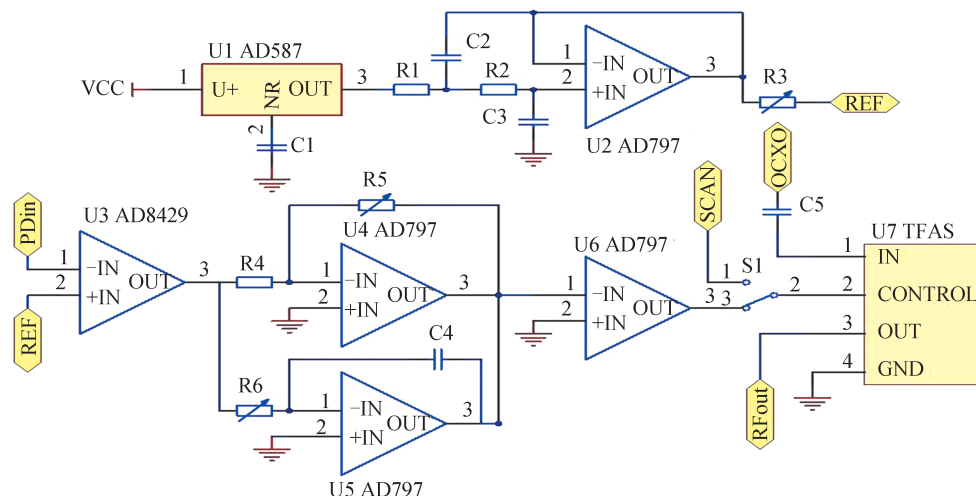
Fig. 1 Experimental setup for laser power locking

整体光路与 [16] 类似, 主要区别在于本文采用了 AOM (Gooch&Housego, 3100-125) 的 1 级衍射光而非 0 级光作为被控制和稳定的对象。因 1 级衍射光光斑直径不大于 0 级光, 且光束空间分布均匀性要优于 0 级光, 有利于实施功率稳定实验。AOM 前后各设置一个高消光比的偏振片 P_1 和 P_2 , 其中 P_1 用于对 AOM 入射激光束进行起偏和偏振纯化, P_2 用于消除 AOM 衍射光偏振态变化对误差信号带来的干扰。

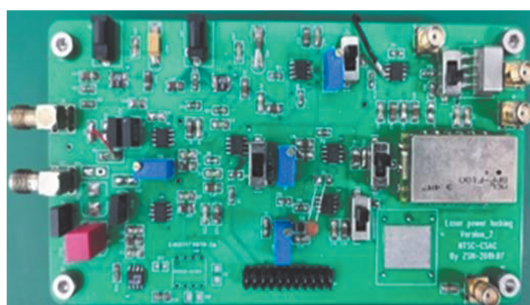
偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) 将 1 级衍射光分出一部分来探测, 用于锁定激光功率, 称为内环路。另一部分用作激光功率稳定的效果监测或后续实验, 称为外环路。两部分的相对光强通过 PBS 前的半波片来调节。根据理论分析^[16], 两部分光强比为 1:1 时, 激光功率锁定效果最接近散弹噪声极限, 但根据外环路可用激光光强以及要达到的不同噪声极限, 光强比可能偏离这一值。环路内的 1 级衍射光经光电探测器 (Thorlabs, PDA36A2) PD_1 转换为电信号, 并与低噪声基准电压 (Linear Technology, AD587) 进行比较, 其差值即为误差信号。经由比例积分 (Proportional-Integral, PI) 电路调理后, 误差信号反馈于射频功率控制器 (Mini circuits, TFAS-1SM+), 通过调节 AOM 的射频驱动功率, 实现 AOM 1 级衍射光的锁定。这里考虑到 AOM 的衍射效率、AOM 和微波器件的易获得性, AOM 的驱动射频频率选为 100 MHz。我们实验发现射频频率在 $100 \text{ MHz} \pm 20 \text{ MHz}$ 内, 并不影响我们的功率锁定效果。

1.3 低噪声电压基准

参考基准电压的噪声是限制激光功率稳定达到散粒噪声水平的重要影响因素。在保持较高输出电压 (≥ 5 V) 的条件下 (本实验中的输出电压为 7.93 V), 为使参考基准电压输出较低噪声, 在基准电压源的输出端增加一个有源低通滤波器来实现噪声抑制并提高其驱动负载能力, 图 2(a) 是激光功率稳定伺服电路原理图, 其上半部分是滤波器结构^[17], 即有源二阶低通滤波器。在该滤波器的设计中, 首先采用超低噪声的运算放大器 AD797 来减小放大器带来的噪声。然后采用 $4.7 \mu\text{F}$ 和 $10 \mu\text{F}$ 的铝箔电容, 这为滤波器提供了非常低



(a) Schematic diagram of power stabilized servo circuit



(b) Physical diagram of the power stabilized PCB board

图2 功率稳定电路原理图及PCB板实物图
Fig. 2 Power stability circuit schematic diagram and PCB physical diagram

的截止频率。与通常的钽电容或电解电容相比,它们具有良好的容积效率、低漏电流,并且对工作电压和温度的敏感性大为降低;另外,为了减小基准电压的中长期漂移,该伺服电路全部采用了低温漂电阻(温度系数 ≤ 2 ppm/ $^{\circ}$ C)。图2(b)为该伺服电路的PCB板实物图,尺寸为15 cm \times 7.5 cm。

测试了三种不同的基准电压芯片在滤波前后的噪声性能:AD587-10、LT1021-10和LTZ1000-7,如图3所示。可以看出,滤波前,LTZ1000相对噪声最大,LTZ1000在低频处(≤ 500 Hz)的表现略优于AD587。滤波后,三种电压基准的相对电压噪声均有较大幅度降低,与LTZ1000相比,AD587和LT1021滤波后的相对电压噪声更低,且在40~200 Hz处AD587的相对电压噪声略低于LT1021,因此本实验选用的电压基准为AD587。

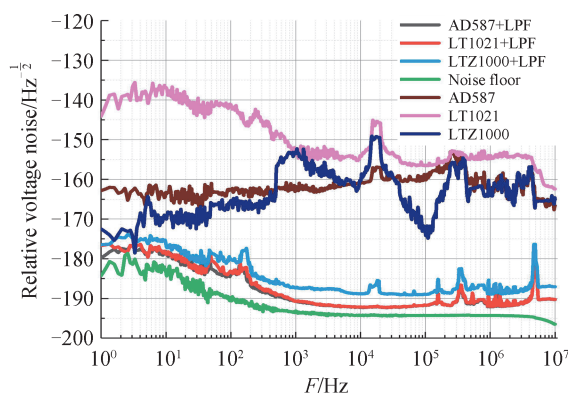


图3 三种电压基准芯片相对电压噪声比较
Fig. 3 Comparison of the relative voltage noise of three voltage reference chips

2 实验结果与分析

实验装置搭建后,通过调节环路参数,包括内外环路探测器光功率大小、光电探测器增益、伺服控制模块的参数及AOM的初始射频功率大小,最终观察反馈效果,锁定反馈环路。为了便于调节和优化反馈环路的PID参数,采用性能相近但更加实时处理和显示的动态信号分析仪(SR785)来测量相对强度噪声。

如图4所示,黑线、蓝线和绿线分别表示激光器自由运行时、开启反馈环路后 in-loop 和开启反馈环路后 out-loop 的相对强度噪声,棕线和红线分别表示光电探测器和 SR785 的本底噪声,黄线表示电压基准(REF)噪声(相对于图3中的滤波后的 AD587 的噪声水平有所恶化,主要是 PD 信号通过运放 AD8429 的串扰耦合进来),紫线表示散粒噪声。散粒噪声表示为^[14]

$$S_q = \sqrt{2e/I_{in} + 2e/I_{out}} \quad (4)$$

式中,基本电荷量 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, I_{in} 和 I_{out} 分别是内环路和外环路中的总光电流。由使用手册可知,光电探测器的电阻 $R = 1.51 \times 10^3 \text{ V/A} = 1.51 \text{ k}\Omega$,光电探测器测得的内外环路电压都设置为 6.52 V ,由此可知 I_{in} 和 I_{out} 均为 4.318 mA ,计算可得散粒噪声 S_q 为 $3.85 \times 10^{-10} \text{ Hz}^{-1/2}$ (-188 dB/Hz)。由图4可知,在 $20 \text{ Hz} \sim 10\,000 \text{ Hz}$ 频率范围内相对强度噪声明显变小,特别地, $f = 1\,000 \text{ Hz}$ 时, in-loop 的相对强度噪声由 -139.4 dB/Hz ($1.07 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$) 降低到 -166 dB/Hz ($5.01 \times 10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$),成功实现了 27 dB 噪声的抑制; $f = 1\,300 \text{ Hz}$ 时, out-loop 的相对强度噪声由 -139.8 dB/Hz ($1.02 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$) 降低到 -159.1 dB/Hz ($1.12 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$),成功实现了 20 dB 噪声的抑制。在 100 Hz 处 in-loop 的相对强度噪声由 -130.4 dB/Hz ($3.01 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$) 降低到 -156 dB/Hz ($1.58 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$),成功实现了 26 dB 噪声的抑制; out-loop 的相对强度噪声由 -130.4 dB/Hz ($3.01 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$) 降低到 -145 dB/Hz ($5.62 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$),成功实现了 15 dB 噪声的抑制。根据原子钟的典型参数^[1,18],计算得到 100 Hz 处 out-loop 的相对强度噪声对 CPT 原子钟的短稳影响仅为 $2.1 \times 10^{-14} @ 1\text{s}$ 。法国巴黎天文台 GUÉRANDEL S 小组^[16]的研究处于国际较高水平,我们与其相比, in-loop 在 $1\,000 \text{ Hz}$ 和 100 Hz 处的相对强度噪声均好于 GUÉRANDEL S 小组的 -158.5 dB/Hz 和 -155 dB/Hz ; out-loop 在 $1\,300 \text{ Hz}$ 处的相对强度噪声好于 GUÉRANDEL S 小组的 -152 dB/Hz ,在 100 Hz 处的相对强度噪声略低于 GUÉRANDEL S 小组的 -147 dB/Hz ,由此表明此功率稳定方法切实有效。

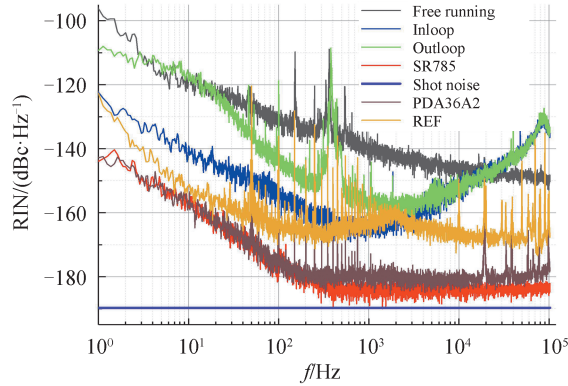


图4 激光功率锁定前后噪声分析
Fig. 4 Analysis of noise before and after laser power locking

从图4可以看出,在激光功率稳定实验中普遍存在一个问题,即在反馈带宽以内,即使分束器的分束比为 $1:1$, out-loop 的噪声通常都高于 in-loop 的噪声。这主要是由于两路探测噪声相互独立,许多不同的技术噪声源是导致环路内噪声和环路外噪声之间的差异的主要原因。这些技术噪声源主要包括光电探测器内部的低频噪声、电阻热噪声、温度波动、光电探测器偏置电压波动、散射光、电子接地噪声等。

而在低频段 ($< 100 \text{ Hz}$) out-loop 的噪声较 in-loop 的噪声更进一步恶化,主要原因有:

1) 电子噪声^[17]。图1中绿色虚线框内的噪声源对两个探测器的影响不同,因此对两种探测器产生不同的噪声贡献。例如,外环路探测器(PD_o) 在独立的测量中可以探测到高电子噪声,但在内环路探测器(PD_i) 中探测不到。

2) 波束指向波动^[14]。许多环境因素会影响光束并导致功率波动,例如灰尘颗粒通过光束路径下落或机械部件的振动、温度变化和气流等导致折射率波动,都可能产生光束抖动,且 out-loop 和 in-loop 的光束指向波动并不相同,导致噪声差异。

3) 偏振波动^[19]。由于分束器的分光比对温度、湿度有一定敏感性(~ 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$),因此温度波动将引起分光比变化,即入射到 in-loop 和 out-loop 的光强会发生变化,且是此消彼长相反的变化,譬如环路内探测器 in-loop 感知光强变小(环路外探测器 out-loop 感知光强变大),伺服环路无法区分激光光束本身功率变化还是分束器分束比变化引起的功率变化,将会统一的认为是整体光束光强变小,因此增大 AOM 的射频驱动功率来补偿,进而实现环路内的激光功率稳定,但是环路外的探测器的功率将进一步增大,即这部分噪声无法抑制,表现为 out-loop 的噪声明显高于 in-loop 的噪声,因为分束器的分束比变化是低频变化,在 RIN 噪声的低频段就表现得尤为突出。

利用 24 位高精度采集卡(NI, USB-4431)在时域上对环路内外光电探测器的电压信号分别进行了长时间的测量与记录,结果如图 5(a)所示,黑线代表激光器自由运行时输出电压值的起伏,其峰峰值起伏为 $\pm 0.754\%/2.5$ h;绿线代表反馈后 out-loop 的电压值起伏,其峰峰值起伏为 $\pm 0.009\ 68\%/2.5$ h,电压值起伏相比降至约为 1/78。图 5(a)的插图 of 反馈后 out-loop 的局部放大,可以观测到反馈后的电压信号变化范围为 7.932 8~7.933 5 V,峰峰值起伏 < 1 mV,有效地改善了激光功率的不稳定性。图 5(b)表示反馈前后电压变化的阿伦偏差图。黑线表示激光器自由运行时的阿伦偏差图,1 s 时的稳定度为 5.01×10^{-5} ,之后则发生较大漂移,8 192 s 时的稳定度为 4.67×10^{-2} ,稳定性明显变差;绿线表示反馈后 out-loop 的阿伦偏差图,1 s 时的稳定度为 4.49×10^{-5} ,1~8 192 s 内稳定度均为 10^{-5} 量级,稳定性得到了较大提高。从图 5(b)可以看出,反馈后(绿线)的激光功率在 100 s 后也出现长期漂移,主要原因是采用的基准电压芯片 AD587 的长期稳定度受温度变化、器件老化和电压波动等环境因素的影响。另外,放大器的零点漂移和光路受环境变化引发的长期漂移也会导致激光功率的长期漂移。

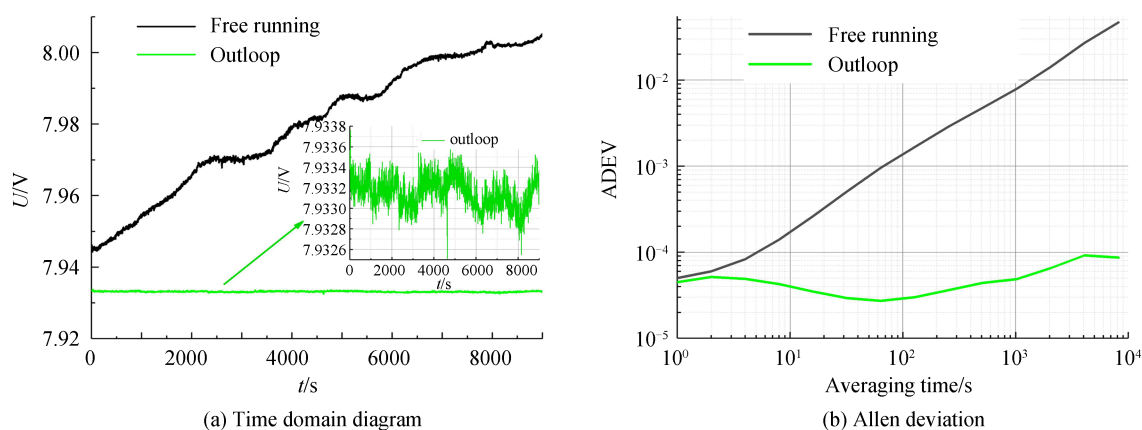


图 5 反馈前后激光功率稳定性的时域图及阿伦偏差图

Fig. 5 Time domain diagram and Allen deviation of laser power stability before and after feedback

3 结论

通过对相关噪声的抑制和参数优化,实现了基于 AOM 的 1 级衍射光的激光功率稳定,其相对强度噪声在 20~10 000 Hz 得到明显抑制,特别是在 1 300 Hz 频率处,实现了 20 dB 的抑制;在原子钟的典型调制频率 100 Hz 处,噪声抑制达 15 dB,对 CPT 原子钟的短稳影响仅为 2.1×10^{-14} @1 s。同时,其中期稳定度由无锁定情况下的 4.67×10^{-2} 提高到 8.67×10^{-5} ,也得到较好的改进,有利于改善原子钟中期频率稳定度。该构型装置简易、成本较低、性能可靠,可应用于 CPT 原子钟和 POP 等原子钟,通过钟跃迁信号信噪比的改进和光频移的减小,提升其短期和中长期频率稳定性能,是下一代星载原子钟的有力候选方案。

参考文献

- [1] VANIER J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review[J]. Applied Physics B, 2005, 81: 421-442.
- [2] ABDEL HAFIZ M, BOUDOT R. A coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock based on push-pull optical

- pumping[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118: 124903.
- [3] VANIER J, MANDACHE C. The passive optically pumped Rb frequency standard: the laser approach[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87: 565-593.
- [4] BANDI T, AFFOLDERBACH C, STEFANUCCI C, et al. Compact high-performance continuous-wave double-resonance rubidium standard with 1.4×10^{-13} $\tau^{-1/2}$ stability[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2014, 61(11): 1769.
- [5] ABDEL HAFIZ M, COGET G, YUN P, et al. A high-performance Raman-Ramsey Cs vapor cell atomic clock[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121: 104903.
- [6] MICALIZIO S, CALOSSO C E, GODONE A, et al. Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection[J]. *Metrologia*, 2012, 49: 425-436.
- [7] TRICOT F. Analyse et réduction des sources d'instabilité de fréquence dans une horloge CPT compacte[D]. Sorbonne Université, 2017.
- [8] ALMAT N, GHARAVIPOUR M, MORENO W, et al. Long-term stability analysis toward $<10^{-14}$ level for a highly compact POP Rb cell atomic clock[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2020, 67(1): 207-216.
- [9] HAKIMI F, MOORES J D. RIN-reduced light source for ultra-low noise interferometric fibre optic gyroscopes[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(3): 205-207.
- [10] TRAD NERY M, DANILISHIN S L, VENNEBERG J R, et al. Fundamental limits of laser power stabilization via a radiation pressure transfer scheme[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3969-3972.
- [11] MARTIN K W, PHELPS G, LEMKE N D, et al. Compact optical atomic clock based on a two-photon transition in rubidium[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9: 014019.
- [12] LIU Fang, WANG Chun, LI Liufeng, et al. Long-term and wideband laser intensity stabilization with an electro-optic amplitude modulator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45(C):775-781.
- [13] DUAN L, FANG J, LI R, et al. Light intensity stabilization based on the second harmonic of the photoelastic modulator detection in the atomic magnetometer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32481-32489.
- [14] JUNKER J, OPPERMAN P, WILLKE B. Shot-noise-limited laser power stabilization for the AEI 10 m Prototype interferometer[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 755-758.
- [15] LAYER H P. Acoustooptic modulator intensity servo[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(17): 2947-2949.
- [16] TRICOT F, PHUNG D H, LOURS M, et al. Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 113112.
- [17] SEIFERT F. Power stabilization of high power lasers for second generation gravitational wave detectors[D]. Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover, 2009.
- [18] YUN P, TRICOT F, CALOSSO C E, et al. High-performance coherent population trapping clock with polarization modulation[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7: 014018.
- [19] KWEE P, WILLKE B, DANZMANN K. New concepts and results in laser power stabilization[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102: 515-522.