

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.009

# 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频技术实验研究

江 飞, 焦明星, 苏 娟, 邢俊红, 刘 芸

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了提高激光器的频率稳定度, 设计了基于正交解调原理的 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频系统。该系统采用直接数字频率合成器同步产生三路同频正弦和余弦信号, 其中一路正弦信号用作电光相位调制器的驱动信号, 另两路正弦和余弦信号同时用作相位解调的参考信号。解调所得 PDH 稳频系统的误差信号用于反馈调节激光器腔长, 使得激光器频率自动稳定到 Fabry-Perot (F-P) 参考腔的谐振频率上。建立了正交解调 PDH 稳频实验系统, 实验结果表明, 在 1.5 h 稳频时间内, 激光器的频率漂移不超过  $\pm 0.13$  MHz, 根据 Allan 方差计算得到其频率稳定度优于  $1.2 \times 10^{-11}$ 。这种稳频激光器可用作合成波绝对距离干涉测量系统的理想光源。

**关键词:** 激光频率稳定度; Pound-Drever-Hall 方法; 正交解调; 电光相位调制; F-P 参考腔

**中图分类号:** TN248

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2022)04-0533-05

## Experimental investigations of laser frequency stabilizing techniques using quadrature-demodulated Pound-Drever-Hall method

JIANG Fei, JIAO Mingxing, SU Juan, XING Junhong, LIU Yun

(Faculty of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to improve the laser frequency stability, a Pound-Drever-Hall (PDH) frequency stabilizing system is designed according to the principle of quadrature demodulation. The system uses the direct digital synthesizer to synchronously generate the three sine and cosine signals at the same frequency, of which one sine signal is used to drive an electro-optic modulator to produce the phase sidebands, and the other sine and cosine signals simultaneously used as the reference signals for the phase demodulation. The obtained error signal of the system can be fed back to adjust the laser cavity-length so that the laser frequency can be stabilized automatically to the resonant frequency of the Fabry-Perot reference cavity. An experimental system for the quadrature-demodulated PDH frequency stabilization is established, the experimentally investigated results have shown that the laser frequency drift is less than  $\pm 0.13$  MHz during a period of 1.5 h, and that the laser frequency stability of better than  $1.2 \times 10^{-11}$  is obtained by the Allan variance. Such a frequency-stabilized laser can be used as an ideal light source for the synthetic-wave absolute-distance interferometry.

**Key words:** laser frequency stability; Pound-Drever-Hall method; quadrature demodulation; electro-optic phase modulation; Fabry-Perot reference cavity.

单频固体激光器在激光干涉测量、激光光谱学、太赫兹波产生等领域具有广阔的应用前景, 引起了国内外专家学者浓厚的研究兴趣, 并取得了一系列重要的研究成果<sup>[1-4]</sup>。在众多稳频方法中, Pound-

Drever-Hall (PDH) 稳频技术以其伺服响应快、噪声低、频率稳定度高等诸多优点, 成为目前激光器常用的一种稳频方法<sup>[5-14]</sup>。

PDH 稳频技术以 Fabry-Perot (F-P) 参考腔的

**收稿日期:** 2022-03-27; **网络出版日期:** 2022-08-11

**网络出版地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220809.1655.002.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51875455, 61805196, 61805195); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JM-095)

**第一作者:** 江飞, 男, 博士生, 研究方向为固体激光器稳频技术。E-mail: jiangfei@stu.xaut.edu.cn

**通信作者:** 焦明星, 男, 博士, 教授, 研究方向为全固态激光器和激光传感与测量技术。E-mail: 2237663196@qq.com

谐振频率作为稳频基准,F-P参考腔的腔长稳定性决定了激光频率的稳定性,因此一些研究小组主要从事于研究F-P参考腔的材料选择、结构设计以及安装方式等方面内容<sup>[15-16]</sup>。为了降低PDH稳频系统中的噪声,一些学者致力于研究PDH稳频技术中的剩余幅度调制问题<sup>[17]</sup>。另外还有部分研究小组提出并研究了一种数字PDH稳频方案<sup>[18]</sup>。

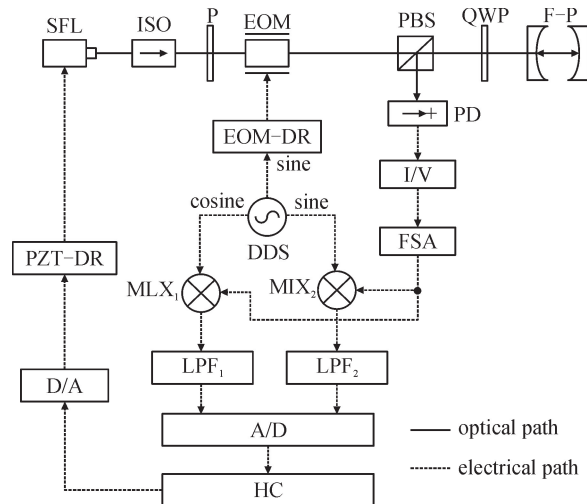
传统PDH稳频技术采用移相器对本振信号进行移相,补偿该信号与光电探测器(PD)输出信号之间的相位差,然后这两路信号进行混频滤波,从而得到系统的频率漂移误差信号。然而由于PD输出信号相位的时变性使得移相器无法实时精确补偿该相位差,并且混频器的直流偏置噪声混杂在PDH稳频系统的误差信号中,当采用该误差信号反馈调节激光器的腔长时,会降低PDH稳频系统的频率稳定度。

2018年,本课题组报道了一种正交解调PDH频率追踪系统。由于系统所用单频全固态激光器的腔长不可调节,因此在其设计方案中,将频率追踪系统所得的误差信号反馈输入至粘结在F-P参考腔腔镜上的压电陶瓷管(PZT)中,用于调节F-P参考腔的腔长,从而使得F-P参考腔的谐振频率可以追踪激光器的频率漂移<sup>[19-21]</sup>。本文建立了基于正交解调原理的可调谐单频Nd:YAG激光器PDH稳频系统,并开展了相应的稳频实验研究。实验过程中将正交解调PDH稳频系统的频率纠偏信号反馈输入至粘结在激光器输出耦合镜上的PZT中,用于调节激光器的腔长,使得激光器的输出激光频率成功地稳定到F-P参考腔的某一谐振频率上,从而实现了激光器的频率稳定。实验所得结果验证了该正交解调PDH稳频方案的可行性。

## 1 正交解调PDH稳频系统组成

正交解调PDH稳频系统组成见图1。单频激光器(SFL)采用激光二极管(LD)泵浦单频Nd:YAG激光器,其中光纤耦合LD的中心波长为808 nm。从LD尾纤出射的808 nm泵浦光经耦合透镜组汇聚到Nd:YAG晶体的左端面,该端面蒸镀有对1 064 nm振荡激光高反,同时对808 nm泵浦光增透的双色介质膜,作为激光谐振腔的后反射镜,而Nd:YAG晶体的右端面蒸镀有对1 064 nm振荡激光增透的介质膜。沿透镜组的光轴并在Nd:YAG晶体的右侧依次放置F-P标准具和球面输出耦合镜,输出镜蒸镀1 064 nm激光部分透射介质膜(透射率为2.2%),这样Nd:YAG晶体的双色介质膜与输出镜的部分透射介质膜构成了平凹稳定腔。谐振

腔内包含有激光增益介质Nd:YAG晶体和激光单纵模选择元件F-P标准具,实现了1 064 nm激光在谐振腔内以单纵模振荡,从而获得了1 064 nm单频激光输出。PZT与输出耦合镜粘接在一起,因此通过微调激光器的腔长,从而实现单纵模激光频率的调谐。



SFL:单频激光器;ISO:光隔离器;P:起偏器;EOM:电光相位调制器;DDS:直接数字频率合成器;EOM-DR: EOM驱动;PBS:偏振分光棱镜;QWP:四分之一波片;PD:光电探测器;I/V:流压转换器;FSA:选频放大器;MIX:混频器;LPF:低通滤波器;A/D:模数转换器;HC:上位机;D/A:数模转换器;PZT-DR:压电陶瓷驱动。

图1 正交解调PDH稳频系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the quadrature-demodulated PDH frequency stabilizing system

从激光器输出耦合镜输出的单频激光束首先依次通过光隔离器(ISO)和起偏器(P),然后进入电光相位调制器(EOM)中进行相位调制。系统采用直接数字频率合成器(DDS)同步输出两路正弦信号和一路余弦信号,其频率均为10 MHz。其中一路正弦信号用作电光相位调制器的驱动信号,另外两路正弦和余弦信号同时用作相位解调的参考信号。相位调制后在激光载波两侧会产生幅度一致、相位相反的正负一阶调制边带,然后该调制激光束依次经过偏振分光棱镜(PBS)和四分之一波片(QWP)后垂直入射至F-P参考腔,由F-P参考腔反射后再次通过QWP和PBS并在PD处进行光外差干涉。输出的外差干涉信号经流压(I/V)转换后,输入至选频放大器(FSA)中进行放大和选频,获得10 MHz调制频率信号。该信号与两路参考信号分别在混频器MIX<sub>1</sub>和MIX<sub>2</sub>内进行混频,其两路输出信号分别通过低通滤波器LPF<sub>1</sub>和LPF<sub>2</sub>后获得PDH误差信号的同相分量和正交分量。经模数(A/D)转换器后采集进上位机(HC)中进行数字相敏检波运算和比例积分(PD)运算得到正交解调PDH稳频系统的频

率纠偏信号。该信号经数模(D/A)转换器后输入至压电陶瓷驱动单元(PZT-DR),利用 PZT-DR 的信号放大和信号叠加功能,该控制信号输入至粘结在激光器输出镜上的 PZT 中,反馈调节激光器腔长,将激光频率稳定到 F-P 参考腔谐振频率上。

## 2 实验研究与结果

### 2.1 实验装置

按照图 1 所示稳频系统结构图,建立了正交解调 PDH 稳频实验系统。光纤耦合 LD 的最大输出功率约为 9 W,输出尾纤的长度为 1 m,其芯径和数值孔径分别为  $100\ \mu\text{m}$  和 0.22。耦合透镜组的焦距均为 15 mm,因此泵浦光在 Nd:YAG 晶体左端面的汇聚光斑大小约为  $100\ \mu\text{m}$ 。Nd:YAG 晶体的尺寸为  $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 5.5\ \text{mm}$ ,其中  $\text{Nd}^{3+}$  离子的掺杂浓度为 1.1%,晶体的两通光面均为平行平面,其左端面所镀双色介质膜对 808 nm 泵浦光的透射率为 95%,对 1 064 nm 振荡激光的反射率为 99.9%,右端面所镀介质膜对 1 064 nm 振荡激光的透射率为 99.9%。球面输出耦合镜的直径为 10 mm,其曲率半径为 100 mm。熔融石英 F-P 标准具的尺寸为  $\phi 8\ \text{mm}\times 0.5\ \text{mm}$ ,其两通光面所镀介质膜对 1 064 nm 振荡激光的反射率均为 90%。压电陶瓷管 PZT 的尺寸为  $\phi 12\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}$ ,其最大驱动电压不超过 300 V。激光谐振腔的几何腔长约为 30 mm。对上述系统元件进行集成并采用热电制冷器 TEC 对整个激光器系统进行温控,温度控制在  $20.5\ ^\circ\text{C}$ 。该单频 Nd:YAG 激光器的输出功率约为 48 mW。

实验中由 DDS 芯片同步输出三路频率为 10 MHz、幅度为 500 mV 的正弦和余弦信号。采用 Newport 公司生产的 4003 型谐振式 EOM 对单频激光进行相位调制。F-P 参考腔的自由光谱范围为 375 MHz,精细度为 421,并采用幅度为 15 V<sub>pp</sub>、频率为 100 Hz 的锯齿波电压信号对参考腔进行线性扫描。光电探测器 PD(Thorlabs, PDA10CF)的带宽为 150 MHz,其输出信号经带宽为 200 kHz、放大倍数为 4 的选频放大网络后与两路参考信号进行混频和滤波处理,混频滤波网络的放大倍数约为 100。采用 16 位的 AD7606 对误差信号进行同步采集,其最大采样率为 200kSPS。PZT-DR 采用哈尔滨溶质纳新公司生产的 RH12 型双通道压电陶瓷驱动电源。

### 2.2 鉴频特性

为了获得正交解调 PDH 稳频系统的鉴频曲线,实验过程中将一个频率为 100 Hz、幅度为 15 V<sub>pp</sub> 的锯齿波电压信号加载到粘结在 F-P 参考腔

腔镜上的 PZT 中,从而对 F-P 参考腔的腔长进行周期性扫描。实验测得 PDH 误差信号的同相分量和正交分量的变化曲线见图 2。图 2(a)和(b)中的上半部分图形均为锯齿波电压信号,下部分图形分别表示误差信号的两个分量。可以看出,误差信号的同相分量和正交分量均能够反映激光频率相对于 F-P 参考腔谐振频率的变化规律。其中同相分量和正交分量曲线与 F-P 参考腔谐振频率的变化方向相反,这说明 PD 输出信号与解调参考信号之间的相位差处于第二或第四象限。由于同相分量和正交分量是由两路独立的解调电路输出,因此观测到的两路解调输出曲线形态略有不同。

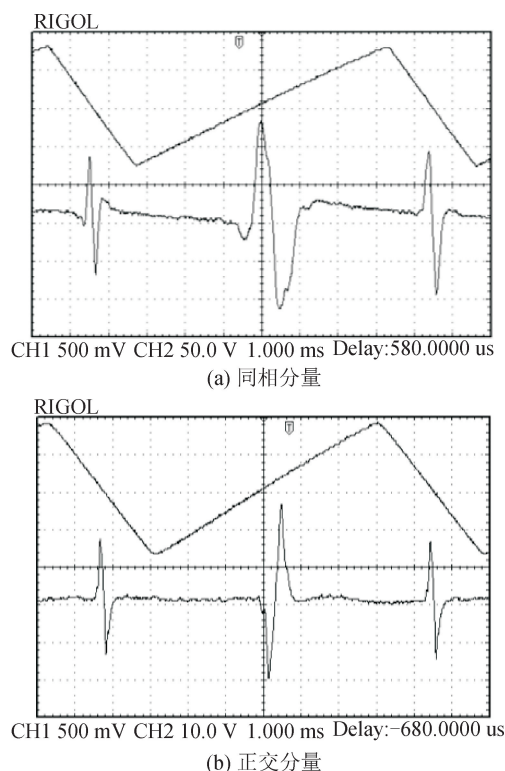


图 2 PDH 误差信号的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of the PDH error signal  
注:横轴 t/ms,纵轴 A/mV。

实验中采用 AD7606 同步采集 PDH 误差信号的同相分量和正交分量,并传输到上位机中进行数字相敏检波运算,采样频率  $f_s = 100\ \text{kHz}$ ,采样点数为 1 000,计算得到正交解调 PDH 稳频系统的鉴频曲线见图 3。从图中可以看出,所得到的鉴频曲线与传统 PDH 稳频系统的鉴频曲线形态相似,均具有色散谱线形态。

由图 3 计算得到正交解调 PDH 稳频系统误差信号的线性动态范围为 4.33 MHz,鉴频灵敏度约为 551.95 mV/MHz。



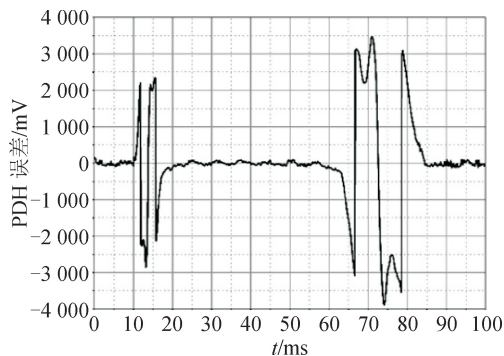


图3 正交解调 PDH 稳频系统鉴频曲线  
Fig. 3 Frequency discriminating curve of the quadrature-demodulated PDH system

## 2.3 稳频特性

### 2.3.1 实验方法

正交解调 PDH 稳频实验过程一共包含两个步骤。第一步,对单频 Nd:YAG 激光器的腔长进行预调节,使得其单纵模激光模谱处于鉴频信号的线性动态范围之内。具体操作步骤为将叠加有可调直流电压信号的锯齿波信号加载到 PZT-DR 上,与此同时从示波器上可以观测到单纵模激光透过 F-P 参考腔的透射模谱。根据观测到的单纵模激光模谱,逐渐减小锯齿波信号的幅度,同时微调直流电压信号的大小,使得激光模谱始终处于 F-P 参考腔的线宽范围之内。第二步,加载 PDH 误差信号反馈调节激光器腔长以稳定激光频率。当锯齿波信号的幅度减小为零时,此时立即将正交解调 PDH 稳频系统的频率纠偏信号输入到 PZT-DR 单元。通过 PZT-DR 单元的信号相加功能,将叠加有可调直流电压信号的 PDH 控制信号输入至粘结在激光器输出镜上的 PZT 中,反馈调节激光器腔长,使得激光频率锁定 F-P 参考腔谐振频率。

### 2.3.2 实验结果

从实验上成功地将激光频率稳定到 F-P 参考腔的谐振频率上,稳频时长约 1.5 h。稳频后正交解调 PDH 稳频系统的误差信号变化见图 4。从图 4 可看出,当误差信号取最大偏移电压 71 mV 时,计算得到相应的最大激光频率漂移量为 0.13 MHz,即在 1.5 h 时间内激光器的频率漂移不超过  $\pm 0.13$  MHz。

采用 Allan 方差<sup>[22-23]</sup>公式计算得到稳频激光器的频率稳定度,其公式为:

$$S_{\nu} = \frac{1}{\bar{\nu}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\nu_{2i} - \nu_{2i-1}}{2} \right)^2} \quad (1)$$

式中: $N$  为取样测量的次数; $\bar{\nu}$  为激光器的平均频率; $\nu_{2i}$  为稳频激光器的瞬时频率,它等于稳频激光器的频率波动量与 F-P 参考腔的谐振频率之和。

因此式(1)可转变为:

$$S_{\nu} = \frac{1}{\bar{\nu}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta\nu_{2i} - \Delta\nu_{2i-1}}{2} \right)^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta\nu_{2i}$  为稳频激光器的频率波动值,它等于稳频激光器的 PDH 误差大小与鉴频灵敏度的比值。因此式(2)可转变为:

$$S_{\nu} = \frac{1}{\bar{\nu}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\epsilon_{2i} - \epsilon_{2i-1}}{2D} \right)^2} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{2i}$  表示稳频激光器的 PDH 误差,即为图 4 纵坐标数据; $D$  表示 PDH 稳频系统的鉴频灵敏度。

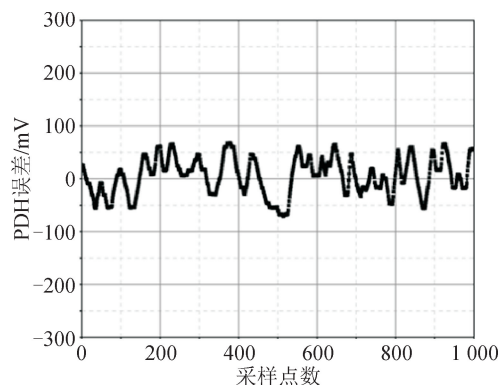


图4 激光频率稳定后的误差信号  
Fig. 4 Error signal by the frequency-stabilized laser

由于单频 Nd:YAG 激光器的平均频率可取为  $2.82 \times 10^{14}$  Hz,取样测量次数为 500,因此根据式(3),计算得到单频 Nd:YAG 激光器的频率稳定度优于  $1.2 \times 10^{-11}$ 。

## 3 讨论

上述实验结果表明基于正交解调原理的 PDH 稳频方案确实可行。对实验结果进行分析可得影响激光频率稳定度的因素主要包括以下几点:单频激光束在电光相位调制过程中产生的剩余幅度调制, A/D 采集模块的量化噪声以及外界环境因素造成的 F-P 参考腔的腔长不稳定等。下一步的研究工作将从这几方面展开或采用一台精细度更高的 F-P 参考腔以提高正交解调 PDH 稳频系统的频率稳定度。

## 4 结论

建立了基于正交解调原理的 PDH 稳频系统,并开展了稳频实验研究。实验获得了 PDH 稳频系统的鉴频曲线,计算可得其线性动态范围为 4.33 MHz,鉴频灵敏度为 551.95 mV/MHz。实验过程中通过将误差信号反馈调节激光器的腔长,成功地将单频 Nd:YAG 激光器的输出激光频率稳定到 F-P 参考腔

的谐振频率上,稳频时长约 1.5 h。在稳频时间内激光器的频率漂移不超过 $\pm 0.13$  MHz,根据 Allan 方差计算得到其频率稳定度优于 $1.2 \times 10^{-11}$ 。实验结果表明正交解调 PDH 稳频方案是可行的。

#### 参考文献:

- [1] WU Hanzhong, ZHANG Fumin, MENG Fei, et al. Absolute distance measurement in a combined-dispersive interferometer using a femtosecond pulse laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(1): 015202.
- [2] ZHAO Yan, ZHANG Haiwei. Displacement measurement method based on laser self-mixing interference in the presence of speckle[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(5): 051201.
- [3] DAI Shutao, JIANG Tao, WU Hongchun, et al. Tunable narrow-linewidth 226 nm laser for hypersonic flow velocimetry [J]. *Optics Express*, 2020, 45(8): 2291-2294.
- [4] POUNCEY J C, LEHR J M. Absorption of 1535-nm laser pulses in insulating oils[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(6): 2175-2179.
- [5] MORIYA P H, SINGH Y, BONGS K, et al. Sub-kHz-linewidth VECSELS for cold atom experiments [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 15943-15953.
- [6] WANG H M, XU Z S, MA S C, et al. Artificial modulation-free Pound-Drever-Hall method for laser frequency stabilization[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5816-5819.
- [7] YANG Ruitao, POLLINGER F, HU Pengcheng, et al. Analysis of a highly efficient phase-locking stabilization method for electro-optic comb generation[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(16): 4839-4848.
- [8] DAI Jian, CHEN Zenghui, WANG Xiaoyang, et al. Accurate optical vector network analyzer based on optical double-sideband suppressed carrier modulation[J]. *Optics Communications*, 2019, 447: 61-66.
- [9] IDJADI M H, AFLATOUNI F. Integrated Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system in silicon[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1209.
- [10] ANDREOU S, WILLIAMS K, BENTE E A J M. Frequency stabilization of an InP-Based integrated diode laser deploying electro-optic tuning[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(24): 1983-1986.
- [11] YAO Yuan, JIANG Yanyi, MA Longsheng. Optical frequency division[J]. *National Science Review*, 2020, 12(7): 1801-1802.
- [12] CHEN Xiaotong, JIANG Yanyi, LI Bo, et al. Laser frequency instability of  $6 \times 10^{-16}$  using 10-cm-long cavities on a cubic spacer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 030201.
- [13] JIN Li, HANG Chao, JIANG Yanyi, et al. Towards generation of millihertz-linewidth laser light with  $10^{-18}$  frequency instability via four-wave mixing[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(5): 051104.
- [14] 焦明星,冯其波,王鸣,等. 激光传感与测量[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [15] DAVILA-RODRIGUEZ J, BAYNES F N, LUDLOW A D, et al. Compact, thermal-noise-limited reference cavity for ultra-low-noise microwave generation [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1277-1280.
- [16] SPENCER D T, DAVENPORT M L, KOMLJENOVIC T, et al. Stabilization of heterogeneous silicon lasers using Pound-Drever-Hall locking to  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ring resonators [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13511-13517.
- [17] DESCAMPEAUX M, FEUGNET G, BRETENAKER F. New method for residual amplitude modulation control in fibered optical experiments [J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36211-36225.
- [18] 耿伟彪,胡姝玲,邵洪峰. 基于 FPGA 数字相位调制光外差激光稳频系统设计[J]. *激光技术*, 2014, 38(5): 665-668.  
GENG Weibiao, HU Shulin, SHAO Hongfeng. Design of laser frequency stabilization systems based on FPGA and Pound-Drever-Hall technique [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 665-668.
- [19] SU Juan, JIAO Mingxing, JIANG Fei. Pound-Drever-Hall laser frequency locking technique based on orthogonal demodulation [J]. *Optik*, 2018, 168: 348-354.
- [20] 苏娟,焦明星,马源源,等. 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统设计[J]. 2016, 43(3): 244-249.  
SU Juan, JIAO Mingxing, MA Yuanyuan, et al. Design of Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system using the quadrature demodulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 244-249.
- [21] 苏娟,焦明星,江飞,等. 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 348-354.  
SU Juan, JIAO Mingxing, JIANG Fei, et al. Research on laser frequency stabilization techniques using orthogonally demodulated Pound-Drever-Hall method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 348-354.
- [22] 蓝信钜,等. 激光技术[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [23] 刘英乾,陈强,薛仁魁,等. 修正的阿伦方差对调相闪烁噪声的抑制[J]. *中国空间科学技术*, 2019, 39(4): 68-72.  
LIU Yingqian, CHEN Qiang, XUE Renkui, et al. Study on the inhibition effect of modified Allan variance on Flicker PM noise [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2019, 39(4): 68-72.

(责任编辑 王绪迪)