

# PDH 激光稳频控制技术研究

卞正兰<sup>1,2</sup> 黄崇德<sup>1,2</sup> 高 敏<sup>1</sup> 董作人<sup>1</sup> 刘继桥<sup>1</sup> 蔡海文<sup>1</sup> 瞿荣辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 针对多普勒测风激光雷达系统的应用需求, 研制了一套结构紧凑、操作灵活的 Pound-Drever-Hall (PDH) 激光稳频系统。直接数字频率合成器 (DDS) 产生激光器高频相位调制信号, 模拟混频器解调激光器的频率漂移信息, 高集成度的数字信号处理器 (DSP) 作为稳频控制系统的核心, 负责整个稳频系统的总线控制、信号处理及比例积分微分 (PID) 伺服等。实验表明, 在 2.5 h 内激光器的相对频率漂移不超过  $\pm 17$  kHz, 其均方根 (RMS) 误差为 5 kHz, 绝对频率稳定度优于 200 kHz。在主动对法布里-珀罗干涉仪 (FPI) 施加 6 Hz 固定扰动时, 系统能够在 30 ms 内迅速恢复稳定。满足直接探测多普勒测风雷达系统中 0.1 m/s 测风精度的应用需求。

**关键词** 激光技术; PDH 稳频; 法布里-珀罗干涉仪; 共振频率; 数字信号处理; 伺服控制

**中图分类号** TH248.1; TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0302001

## Research on Control Technique for Pound-Drever-Hall Laser Frequency Stabilizing System

Bian Zhenglan<sup>1,2</sup> Huang Chongde<sup>1,2</sup> Gao Min<sup>1</sup> Dong Zuoren<sup>1</sup>  
Liu Jiqiao<sup>1</sup> Cai Haiwen<sup>1</sup> Qu Ronghui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A laser frequency stabilizing system for Doppler lidar wind measurement is developed, which has the advantages of compact structure and flexible operation. The radio frequency modulating signal is generated by the direct digital frequency synthesizer (DDS), the laser frequency drifts are demodulated by the analog mixer, and the functions of the bus controlling, signal processing and proportional-integral differential (PID) servo controlling are implemented by the high integrate chip of digital signal processor (DSP) as the heart of the frequency stabilizing system. The measured laser frequency drifts are less than  $\pm 17$  kHz during 2.5 h, and whose root mean square (RMS) error is 5 kHz, and absolute frequency stability is better than 200 kHz. The anti-interference performance is also measured. The system will take 30 ms to get back into stabilization when a regular disturbance with the frequency of 6 Hz is put on the Fabry-Perot interferometer (FPI). The system can be applied to Doppler lidar wind measurement.

**Key words** laser technique; PDH frequency stabilization; Fabry-Perot interferometer; resonant frequency; digital signal process; servo control

**OCIS codes** 140.3425; 140.3580; 140.3600; 140.3518; 140.3570; 280.3640

## 1 引 言

多普勒测风激光雷达因其具有高分辨率、三维

观测等优点在全球大气风场分布探测中得到广泛的应用<sup>[1~3]</sup>, 种子注入激光器作为多普勒测风雷达的

收稿日期: 2011-10-09; 收到修改稿日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61108028、61178031)资助课题。

作者简介: 卞正兰(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事光电检测与控制方面的研究。E-mail: zlbian@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子器件与信息系统技术等方面的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

发射光源,其频率稳定性直接影响了整个测风雷达系统的风场探测性能<sup>[4~6]</sup>。根据种子注入原理,种子注入激光器的频率噪声在低频段主要受到种子光频特性的影响<sup>[7,8]</sup>,因此,在多普勒测风雷达系统中,发射光源频率稳定性的研究工作主要集中在对1064 nm全固态单频种子激光器稳频特性的研究。

原子分子饱和吸收法和 Pound-Drever-Hall (PDH)技术是目前激光稳频系统中最主要的两种稳频方法,然而在1064 nm波段没有合适的分子吸收线可选作频率参考,若选择532 nm波长的碘分子超精细结构谱线,则需对1064 nm激光进行倍频,此方案无疑增加了系统的复杂程度<sup>[9]</sup>。PDH稳频技术选择不受波长限制的法布里-珀罗干涉仪(FPI)作为频率参考标准,且具有系统抗干扰能力强、不易失锁、稳定度高等优点,成为多普勒测风激光雷达系统中激光稳频的首选方案。

针对这样的应用需求,X. Sun等<sup>[10]</sup>于2008年已经研制出一套PDH激光稳频桌面实验系统,以其自主研发的共焦FPI(自由光谱范围374 MHz,精细度220,线宽1.7 MHz)<sup>[11]</sup>作为激光频率参考,搭建了紧凑的光学结构,利用计算机及采集卡完成了伺服控制功能,结果显示系统的激光频率漂移在1 h内不超过±55 kHz。该套系统已经原理性实现了PDH激光稳频,然而为了满足实际机载应用的需求,本文主要对基于数字信号处理器(DSP)的PDH激光稳频控制技术进行了深入研究,实现了具有灵活控制功能的自动激光稳频系统。

选取高集成度的DSP代替计算机及采集卡,高分辨率直接数字频率合成器(DDS)代替电光相位调制(EOM)射频(RF)驱动模块,设计数字化智能反馈控制系统。DSP作为稳频控制系统的核心,负责整个电学系统的总线控制、信号处理和比例积分微分(PID)伺服等,实现激光器的快速自动稳频。实验对稳频系统的稳定性及抗干扰特性进行了检测,为其在多普勒测风激光雷达中的应用提供了依据。

## 2 系统原理与结构

PDH稳频技术<sup>[12,13]</sup>选择光学谐振腔的共振频率 $\omega_0$ 作为参考频率标准,对激光频率进行射频EOM,产生分布在激光频率两侧,幅度相等且相位相反的两个边带。高速光电探测器于谐振腔反射端探测此双边带与载波的拍频信号为

$$P = 2\sqrt{p_c p_s} \text{Im}[F(\omega)F^*(\omega + \delta) - F(\omega)F^*(\omega - \delta)] \sin \delta, \quad (1)$$

式中 $p_c$ 为载波光功率, $p_s$ 为每个边带光功率, $\delta$ 为激光相位调制频率, $F(\omega)$ 及 $F(\omega \pm \delta)$ 分别为载波及双边带在谐振腔端面的反射系数。当激光频率 $\omega$ 对准参考腔谐振频率 $\omega_0$ 时,上下边带与载波拍频电流大小相等且相位相反,探测器输出 $P$ 为零;反之,两侧边带经过参考腔反射后其反对称性被破坏,上下边带与载波拍频电流不再抵消,此时探测器输出包含激光频率与参考腔谐振频率偏差信息的差拍信号。伺服控制系统根据此差拍信息反馈控制激光器腔长,实现激光频率的稳定。

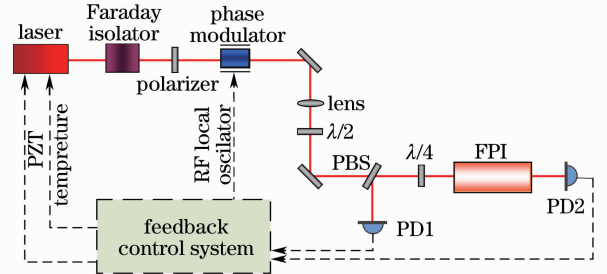


图1 PDH稳频系统结构图

Fig. 1 Setup of PDH laser frequency stabilization

研制的PDH激光稳频系统如图1所示,激光依次经过法拉第隔离器和起偏器后进入由反馈控制系统驱动的EOM进行相位调制。透镜用于调节激光的模式与FPI的模式匹配, $\lambda/2$ 波片将相位调制后的激光偏振态旋转 $90^\circ$ 后经偏振分束棱镜(PBS)和 $\lambda/4$ 波片产生圆偏振光垂直入射至FPI中。PD1探测由FPI反射后再次经过 $\lambda/4$ 波片和PBS的线偏振光,用作鉴频信号。反馈控制系统根据此鉴频信号反馈调节激光器的温度和压电陶瓷(PZT),将激光频率锁定在FPI谐振峰处。PD2将FPI的透射光经光电转换后送至电学控制系统,用于稳频监控。

## 3 反馈控制系统设计

反馈控制<sup>[14]</sup>系统具有自动补偿由于系统内部和外部干扰所引起的系统误差的能力,可有效提高系统稳定性和精度,该系统主要由控制器、执行机构、控制对象和反馈装置四部分组成<sup>[15]</sup>,如图2所示。在研制的PDH稳频控制系统中,Innolight公司自带激光器驱动电路的Nd:YAG单纵模全固态激光器作为执行机构和控制对象,高速光电探测器及模拟解调单元构成反馈装置,基于DSP的数字电路模块作为控制器,在外界对激光器产生扰动时,激光频率抖动经反馈装置送回控制器,控制器根据反馈信息与设定值的偏差不断调整激光器的驱动信

号,从而抑制外界干扰使激光频率趋于稳定。

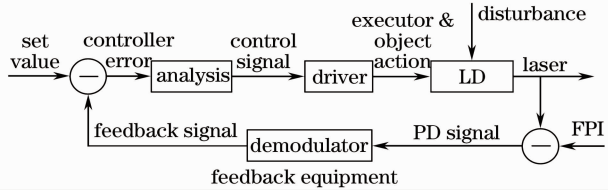


图 2 反馈控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of the feedback control system

### 3.1 反馈装置

反馈装置中高速光电探测器探测激光载波与调制边带的拍频信号,经模拟混频器解调后产生反馈信号。该装置中混频芯片选用Minicircuits公司低

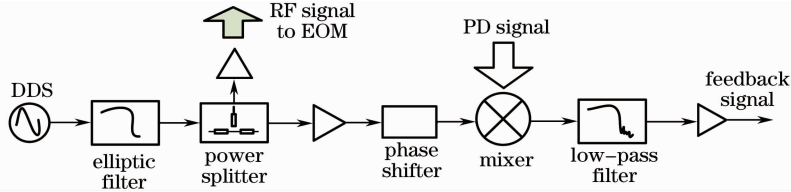


图 3 反馈装置电路

Fig. 3 Circuits of the feedback equipment

反馈装置电路设计如图 3 所示,DDS 产生 30 MHz 的正弦信号,经射频功分器分成两路,一路用于驱动 EOM,对激光相位进行调制。另一路作为本振,与 FPI 反射信号混频。移相器用于补偿两路不同的相位延迟,混频后的信号经低通滤波及放大后,产生能直接反映激光器频率变化的偏差信号反馈至系统控制器,作为控制系统抑制激光频率抖动的依据。

### 3.2 控制器

数字控制技术相比于模拟控制具有结构简单、控制灵活、抗干扰性强等优点,因此采用基于高集成度 DSP 的数字控制方式。DSP 的信号处理速度直接影响了控制系统的环路带宽,然而系统环路带宽受激光器 PZT 响应的限制,Innolight 公司 Nd:YAG 单纵模全固态激光器的 PZT 响应带宽小于 100 kHz,因此 TI 公司 TMS320F2812 可满足系统设计需求。

控制器可以选择控制粘贴在激光晶体上的 PZT 来调节激光器腔长,实现激光器中心频率的调节,亦可以选择控制激光晶体的温度,改变激光中心频率。通常 PZT 的调制速率高,但调谐范围小,而温度的调制速率低,但调谐范围大,因此采用先粗调温度,再细调 PZT 的方法,使激光频率逐次接近 FPI 谐振频率。

数模(D/A)转换是实现激光器温度及 PZT 控

变频损耗的 ADE-1,混频器的本振输入信号为激光相位调制信号,激光相位调制频率的选择直接影响了稳频系统的性能。当调制频率大小接近 FPI 线宽时,稳频系统具有最高的鉴频灵敏度,当调制频率高于 FPI 线宽时,在 FPI 共振频率附近出现很陡的线性鉴频区,依然具有较高的鉴频灵敏度,并且调制频率越高,系统捕获范围和锁定带宽越大,激光器的低频幅度噪声<sup>[16]</sup>也可有效避免,因此选取相位调制频率为 30 MHz。低成本、低功耗及高分辨率 DDS 产生该相位调制信号。ADI 公司 AD9851 以 70 MHz 采样时无杂散动态范围(SFDR)大于 43 dB,足以产生高信噪比的 30 MHz 正弦信号。

制的重要手段,该类芯片的选择直接影响了系统的稳频精度。根据激光器温度调谐系数 3 GHz/V,温度调谐范围 30 GHz,选择 ADI 公司 AD5545 直接驱动激光器的温度,激光器温度调谐精度达 229 kHz;激光器 PZT 调谐系数 1.8 MHz/V,PZT 调谐范围 ±100 MHz,选择 AD5545 经 15 倍放大后驱动 PZT,PZT 调谐精度达 2 kHz。在不考虑其他影响因素时,通过协调控制激光器的温度和 PZT,系统稳频精度可达 2 kHz。

图 4 详细显示了控制器的电路设计,DSP 控制 AD1 采集反馈信号,经信号处理后,控制激光器的温度和 PZT 调谐单元,将激光器频率锁定在 FPI 共振峰处。AD2 获取 FPI 透射信号,用于对激光频率及透射功率的长期监控,为系统的性能测试提供了依据。

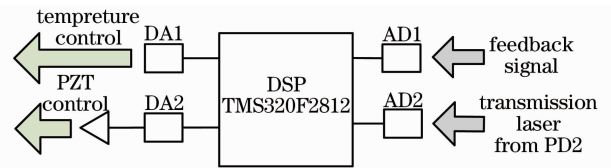


图 4 控制器电路

Fig. 4 Circuits of the controller

## 4 结果与分析

激光频率稳定需经过温度粗扫描、设定温度、

PZT 细扫描、PID 控制等重要过程。温度粗扫描时，调节激光晶体的温度，使激光器频率在  $\pm 70$  MHz 范围内以 200 kHz 步进扫描，实验所测的 FPI 透射谱及鉴频曲线如图 5 所示，图中鉴频曲线线性区分别与 FPI 共振频率及两边带一一对应，当激光频率对准 FPI 共振频率时，鉴频灵敏度为  $0.96$  V/MHz，当激光频率与 FPI 共振频率偏差 30 MHz 时，鉴频灵敏度为  $0.43$  V/MHz，显然当激光频率对准 FPI 共振频率时，系统鉴频灵敏度最高。

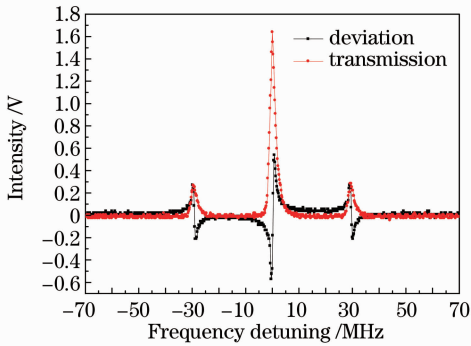


图 5 包含双边带的 FPI 透射谱和误差信号  
Fig. 5 FPI transmission spectrum with side bands and PDH error signal

扫描激光器 PZT，当激光频率扫至 FPI 共振峰附近时启动数字 PID 伺服控制，系统进入稳频状态，实验所测的 FPI 透射光强及激光器与 FPI 频率偏差信号如图 6 所示，从图中可以看出，从开启 PID 至系统频率稳定所需时间大概为  $200 \mu\text{s}$ ，同时可以发现，系统处于稳频状态时，FPI 透射光最强，并且幅度比较稳定。

当激光器与 FPI 锁定后，有必要对整个稳频系统的稳定性做长期的监测。图 7 显示了 2.5 h 内系统稳定度的测量结果，从图中可以看出，在 2.5 h 内激光器的相对频率漂移不超过  $\pm 17$  kHz，其均方根 (RMS) 误差为 5 kHz。由于 FPI 本身受到温度等外界扰动的影响，其共振频率会发生变化，尽管系统中

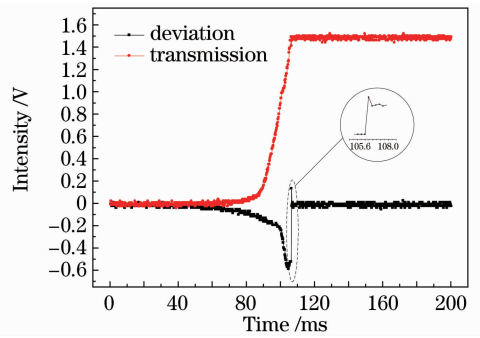


图 6 稳频时 FPI 透射光强与误差信号  
Fig. 6 FPI transmission and PDH error signal during frequency stabilization

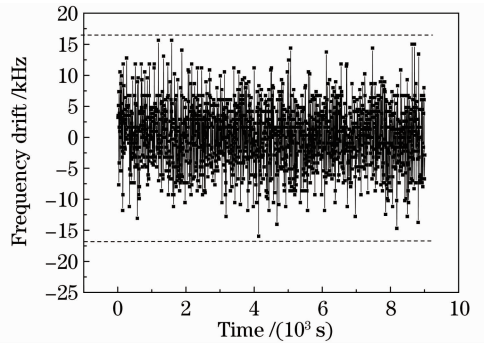


图 7 2.5 h 激光频率漂移

Fig. 7 Laser frequency drifts in 2.5 h

采用双层温控箱(将 FPI 置于绝热材料制成的开有光学窗口的双层盒子中，使用两套温控系统分别对内外箱体进行温控，温控精度达  $0.01$  K)对其控制，但其共振频率仍然存在不可避免的微小波动，大概 140 kHz。因此，整个系统的绝对频率稳定度小于 200 kHz。

稳频系统应用于多普勒测风雷达系统中，户外工作环境恶劣，因此其抗干扰能力是该稳频系统在实际应用中的重要指标，直接影响了测风雷达系统的稳定性和可靠性。实验中，对 FPI 外加频率为 6 Hz 的固定扰动，所测得的误差信号如图 8(a) 所示，图 8(b) 为其中一个扰动的细节图，从图中明显

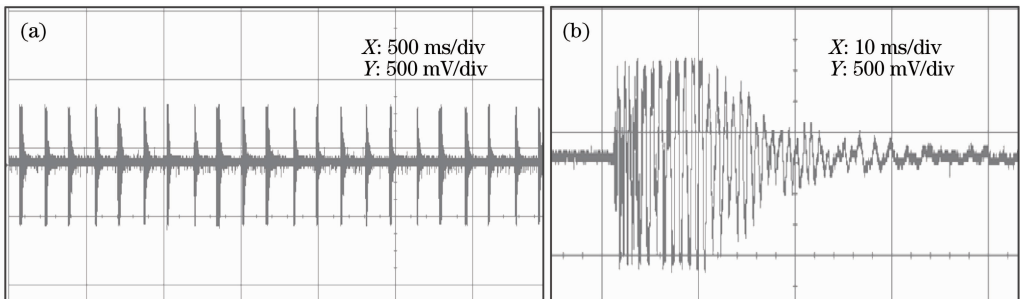


图 8 稳频系统扰动实验

Fig. 8 Disturbance experiment of frequency stabilization system

可以看出当系统受到外界干扰时,误差信号从零点突变至 $\pm 450$  mV,在 30 ms 内又逐渐返回零点,表明系统具有很强的抗干扰能力。

## 5 结 论

针对多普勒测风激光雷达系统的应用需求,在前期工作的基础上研制了一套全自动 PDH 激光稳频系统。高集成度的 DSP 代替计算机及采集卡,高分辨率的 DDS 代替 EOM 射频频驱动模块,设计数字化智能反馈控制系统。DSP 作为稳频控制系统的心脏,负责整个电学系统的总线控制、信号处理和 PID 伺服等,实现激光器的快速自动稳频。实验结果显示,相比于前期桌面系统,该系统不仅结构更加紧凑,操作更加灵活,并且频率稳定性有了很大提高。桌面系统于 1 h 内相对频率漂移 $\pm 50$  kHz,该系统于 2.5 h 内激光器的相对频率漂移不超过 $\pm 17$  kHz,其 RMS 误差约 5 kHz,绝对频率稳定度优于 200 kHz。在主动对 FPI 施加 6 Hz 固定扰动时,系统能够在 30 ms 内快速恢复稳定。该系统不仅稳频精度高,抗干扰性强,而且结构紧凑,操作简单,满足直接探测多普勒测风雷达系统 0.1 m/s 测风精度的应用需求<sup>[17]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 M. L. Chanin, A. Garnier, A. Hauchecorne *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, **16**(11): 1273~1276
- 2 D. Rees, I. S. Mcdermid. Doppler lidar atmospheric wind sensor: reevaluation of a 355-nm incoherent Doppler lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28): 4133~4144
- 3 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertaog *et al.*. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. instrumental setup, validation, and first climatological results [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2410~2421
- 4 C. L. Korb, B. M. Gentry, S. X. Li *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J].

- Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3097~3104
- 5 B. M. Gentry, H. Chen, S. X. Li. Wind measurement with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1231~1233
- 6 F. Shen, H. Cha, J. Dong *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 593~597
- 7 A. D. Farinas, E. K. Gustafson, R. L. Byer. Frequency and intensity noise in an injection-locked, solid-state laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(2): 328~334
- 8 R. Barillet, A. Brilllet, R. Chiche *et al.*. An injection-locked Nd:YAG laser for the interferometric detection of gravitational waves[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(2): 162~169
- 9 E. Inbar, V. Mahal, A. Arie. Frequency stabilization of Nd:YAG lasers to <sup>133</sup>Cs<sub>2</sub> sub-Doppler lines near 1064 nm[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1598~1604
- 10 X. Sun, J. Liu, J. Zhou *et al.*. Frequency stabilization of a single-frequency all-solid-state laser for Doppler wind lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 679~680
- 11 Sun Xutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun *et al.*. Confocal Fabry-Perot interferometer for frequency stabilization of laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 孙旭涛,刘继桥,周军等.激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 12 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optics resonator[J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 13 E. D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2000, **89**(1): 79~87
- 14 R. C. Dorf, R. H. Bishop. Modern Control Systems (8th ed) [M]. Xie Hongwei, Zou Pengxing, Zhang Ming *et al.* Transl. Beijing: Higher Education Press, 2001. 469~471
- R. C. Dorf, R. H. Bishop. 现代控制系统(第八版)[M]. 谢红卫, 邹鹏兴, 张明等译. 北京: 高等教育出版社, 2001. 469~471
- 15 R. C. Dorf, R. H. Bishop. Modern Control Systems (8th ed) [M]. Xie Hongwei, Zou Pengxing, Zhang Ming *et al.* Transl. Beijing: Higher Education Press, 2001. 1~12
- R. C. Dorf, R. H. Bishop. 现代控制系统(第八版)[M]. 谢红卫, 邹鹏兴, 张明等译. 北京: 高等教育出版社, 2001. 1~12
- 16 C. C. Chen, M. Z. Win. Frequency noise measurement of diode-pumped Nd:YAG ring lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(11): 772~774
- 17 K. Nicklaus, V. Morasch, M. Hofer *et al.*. Frequency stabilization of Q-switched Nd:YAG oscillators for airborne and spacerborne lidar system[C]. *SPIE*, 2007, **6451**: 64511L