

正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统设计

苏娟^{1,2} 焦明星¹ 马源源¹ 邢俊红¹

¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院精密仪器系, 陕西 西安 710048

²西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 分析了传统 Pound-Drever-Hall (PDH) 激光稳频方法的工作原理, 设计了一种基于正交解调原理的 PDH 激光稳频方案。该方案采用直接数字频率合成器同时产生两路频率均为 10 MHz 的正弦和余弦信号, 其中正弦信号分为两路: 一路用于驱动电光相位调制器以产生相位边带, 另一路与余弦信号一起作为相位解调的参考信号。经相位调制后的激光束耦合进入 F-P 参考腔, 所产生的光外差干涉信号由光电探测器进行探测, 其输出信号分别与两路正交参考信号进行混频, 经低通滤波后得到误差信号的两个正交分量, 二者经 A/D 转换后进入微处理器进行正交相敏检波运算, 即可得到 PDH 稳频系统的误差信号。建立了正交解调 PDH 激光鉴频实验系统, 对 F-P 参考腔的腔长进行线性扫描, 观察到了鉴频曲线, 其鉴频灵敏度为 1.82 V/MHz, 最大频率变化量为 5.48 MHz。实验结果表明, 所设计的正交解调 PDH 稳频方案可行。

关键词 激光器; 激光稳频; Pound-Drever-Hall; 正交解调; 直接数字频率合成器; 鉴频曲线

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0316001

Design of Pound-Drever-Hall Laser Frequency Stabilization System Using the Quadrature Demodulation

Su Juan^{1,2} Jiao Mingxing¹ Ma Yuanyuan¹ Xing Junhong¹

¹Department of Precision Instruments, School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

²Key Laboratory of Photoelectric Logging and Detecting of Oil and Gas, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The principle of operation of the traditional Pound-Drever-Hall (PDH) method for laser frequency stabilization is analyzed. Based on the principle of quadrature demodulation, a scheme of PDH laser frequency stabilization is designed, in which both sine and cosine signals with the same frequency of 10 MHz are generated simultaneously by making use of a direct digital synthesizer. The sine signal is divided into two parts, one is used to drive an electro-optic modulator to produce the phase sidebands, and the other together with the cosine signal is used as the reference signals for the phase demodulation. The phase-modulated laser beams are coupled into the reference Fabry-Perot cavity, and the optical heterodyne interference signal is detected by a photo-detector, whose output is mixed respectively with the two orthogonal reference signals to get the two quadrature components of the error signal after low-pass filtered. By the A/D conversions, the two quadrature components are transmitted to the microprocessor to perform the algorithm of orthogonal phase sensitive detection so that the error signal of the PDH frequency-stabilized system is obtained. A system of the PDH laser frequency discrimination using quadrature demodulation method is established and investigated experimentally, and by linearly sweeping the cavity-

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51175421, 61205135)

作者简介: 苏娟(1975—), 女, 博士研究生, 主要从事激光稳频和光电检测技术方面的研究。E-mail: sjsu@xsyu.edu.cn

导师简介: 焦明星(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事全固态激光器和激光传感与测量技术方面的研究。

E-mail: jiaomx@xaut.edu.cn(通信联系人)

length of the reference Fabry-Perot cavity, a curve of frequency discrimination is observed, with a sensitivity of 1.82 V/MHz and a maximum frequency change of 5.48 MHz. Experimental results show that the scheme of the PDH laser frequency stabilization system using the quadrature demodulation method is indeed feasible.

Key words lasers; laser frequency stabilization; Pound-Drever-Hall; quadrature demodulation; direct digital frequency synthesizer; curve of frequency discrimination

OCIS codes 140.3425; 140.3580; 140.3518; 140.3570

1 引 言

窄线宽稳频激光器是光原子钟、高分辨激光光谱测量和光外差干涉测量等系统的重要光源。Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频方法以其伺服响应快、噪声低、不易失锁等优点,成为目前窄线宽稳频激光器常用的一种稳频方法,并被认为是提高窄线宽激光器性能的基本方法之一^[1-8]。

在传统 PDH 稳频方法中,采用移相器使得光电探测器输出与参考信号保持固定相位关系,以获得理想的鉴频曲线。当激光频率发生漂移时,手动调节模拟移相器,同时观察低通滤波器输出,信号出现峰值时可以确定相移大小^[9],这种基于人眼观察和手动调节的方法会产生较大的误差。另一方面,数字移相器需要在系统中加入相位检测和移相控制单元,引入了一部分相位误差,降低了系统的稳频精度。此外,混频器的直流偏置使得作为鉴相器的混频低通单元输出与本振信号经过两条路径的相位差不成比例关系,通过相位补偿并不能获得精确的误差信号,从而影响混频器甄别频率漂移信号的效率,并产生信号失真^[10],即一部分幅噪信息会被鉴频系统误判为激光频率漂移信息,从而给激光谐振腔引入错误的反馈信息,使得激光频率锁定出现偏差。

本文设计了一种基于正交解调原理的 PDH 激光稳频系统方案,采用正交相敏检波方法检测信号,在检测频率漂移的同时,可计算出两路信号的相位差,不使用移相器,避免了移相器带来的稳频误差。

2 PDH 稳频系统工作原理

2.1 PDH 稳频系统组成及工作原理

传统 PDH 激光稳频系统组成如图 1 所示。从激光器发出的单频激光束依次通过法拉第隔离器(ISO)和起偏器(P)后,进入电光相位调制器(EOM)进行相位调制。本地振荡器(LO)产生正弦信号,并通过 EOM 驱动单元(EOM-DR)为 EOM 设置合适的工作点。经 EOM 调制后的激光载波及其边带从偏振分束棱镜(PBS)透射后变为 p 偏振光,再经四分之一波片(QWP)透射后变为圆偏振光,并耦合进入 F-P 参考腔。经 F-P 参考腔反射的激光载波及其边带再次透过 QWP 后变为 s 偏振光,经 PBS 反射后在光探测器(PD)上进行光外差干涉,干涉信号经过互阻放大器(I/V)后由选频放大器(FSA)提取本振频率附近极窄带宽的信号。本振信号经过移相器(PS)补偿其通过不同路径的相位差,再与 FSA 输出信号在混频器(MIX)中进行混频,经低通滤波后得到激光频率漂移误差信号,该信号通过比例积分微分(PID)控制单元和压电陶瓷(PZT)驱动单元(PZT-DR)反馈调节激光腔长,将激光频率锁定在 F-P 参考腔的谐振峰中心频率处。

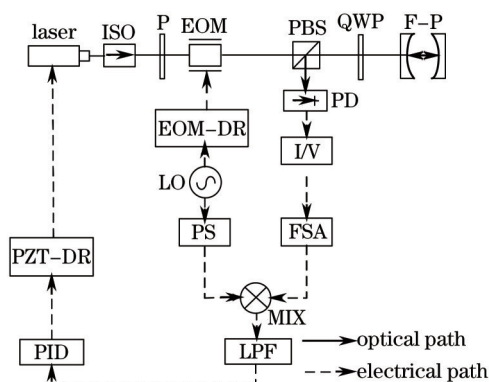


图1 传统 PDH 稳频系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of traditional PDH system for frequency stabilization

经 EOM 调制的激光光场可以表示为

$$E_{\text{inc}} = E_0 \exp[j(\omega t + \beta \sin \Omega t)], \quad (1)$$

式中 E_0 为光场强度, ω 为激光角频率, Ω 为调制频率, β 为调制度。采用贝塞尔函数可将(1)式展开为如下形式:

$$E_{\text{inc}} = E_0 \{ J_0(\beta) \exp(j\omega t) + J_1(\beta) \exp[j(\omega + \Omega)t] - J_1(\beta) \exp[j(\omega - \Omega)t] \}, \quad (2)$$

式中 $J_0(\beta)$ 和 $J_1(\beta)$ 分别为零阶和一阶贝塞尔函数。经调制后的激光束,其两边带激光直接从 F-P 参考腔的第一个腔镜反射回来,载波激光进入参考腔内形成谐振并反射回来。

从 F-P 参考腔反射回来的激光光波场可以表示为

$$E_{\text{ref}} = E_0 \{ F(\omega) J_0(\beta) \exp(j\omega t) + F(\omega + \Omega) J_1(\beta) \exp[j(\omega + \Omega)t] - F(\omega - \Omega) J_1(\beta) \exp[j(\omega - \Omega)t] \}, \quad (3)$$

式中 $F(\omega)$ 为 F-P 参考腔的反馈系数。由光探测器 PD 探测到的光功率可以表示为

$$P_{\text{ref}} = P_c |F(\omega)|^2 + P_s \{ |F(\omega + \Omega)|^2 + |F(\omega - \Omega)|^2 \} + 2\sqrt{P_c P_s} \{ \text{Re}[F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)] \cos \Omega t + \text{Im}[F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)] \sin \Omega t \} + (2\Omega \text{ term}) \quad (4)$$

式中 P_c 为载波功率, P_s 为每个一阶边带功率,且 $P_c = J_0^2(\beta)P_0$, $P_s = J_1^2(\beta)P_0$ 。包含 $\sin \Omega t$ 和 $\cos \Omega t$ 的项反映了反射光的相位。若激光频率与 F-P 参考腔的谐振频率相同,则载波反射光与入射光同相,两边带光波相位相反,光探测器 PD 探测不到调制频率的信号;如果激光频率偏离 F-P 参考腔的谐振频率,载波反射光有相移,两边带光波相位不反相,光探测器 PD 的输出包含调制频率的信号^[11-13]。

若激光调制频率远大于 F-P 参考腔的频带宽度,则(4)式中 $\cos \Omega t$ 项可忽略不计。激光频率漂移信号 ε (PDH 误差信号)可以表示为

$$\varepsilon = -2\sqrt{P_c P_s} \text{Im}[F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)]. \quad (5)$$

对 F-P 参考腔进行线性扫描,可得到误差信号的色散型谱线。以调制频率为 10 MHz, F-P 参考腔的自由光谱范围为 375 MHz,绘制归一化 PDH 误差信号如图 2 所示。

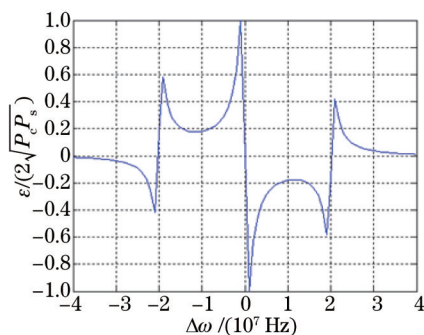


图 2 归一化 PDH 误差信号

Fig.2 Normalized PDH error signal

检测 PDH 误差信号的方法通常采用对本振信号进行移相,补偿其通过两条路径的相位差,然后与光探测器 PD 的输出信号进行混频和低通滤波^[14-17]。传统 PDH 稳频系统采用模拟或数字移相器实现移相。

3 正交解调 PDH 稳频方案设计

3.1 正交解调算法

对于任一实信号,其频谱都具有共轭对称性,能够由其正频率分量或负频率分量完整描述。一个实信号 $x(t)$ 的正频率分量所对应的解析信号 $z(t)$ 是一个复信号,其实部为原信号,为 $x(t)$ 的同相分量;虚部为原信号的希尔伯特变换,为 $x(t)$ 的正交分量。通过解析信号可获得原信号 $x(t)$ 的瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率^[18]。

设某一待测信号 $x(t) = s(t) + n(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) + n(t)$, $n(t)$ 为零均值高斯噪声。 $n(t)$ 与参考信号不相关,检波后为零。对于实的窄带信号 $s(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$,其希尔伯特变换为 $H[s(t)] = -A \cos(\omega_0 t + \varphi)$,因此 $s(t)$ 的解析表示为

$$z(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) - jA \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (6)$$

由欧拉公式可知

$$z(t) = A \exp[j(\omega_0 t + \varphi - 90^\circ)] = A \exp[j(\varphi - 90^\circ)] \exp(j\omega_0 t). \quad (7)$$

(7)式乘以 $\exp(-j\omega_0 t)$, 记为 $z_b(t)$, 可得:

$$z_b(t) = A \exp[j(\omega_0 t + \varphi - 90^\circ)] \exp(-j\omega_0 t) = A \exp[j(\varphi - 90^\circ)] = A[\sin \varphi - j \cos \varphi] = I + jQ, \quad (8)$$

式中 $I = A \sin \varphi$ 为同相分量, $Q = -A \cos \varphi$ 为正交分量。于是, 窄带信号的振幅和相位可以分别表示为

$$A = \sqrt{(A \sin \varphi)^2 + (A \cos \varphi)^2} = \sqrt{I^2 + Q^2}, \quad (9)$$

$$\varphi = \arctan(I/Q). \quad (10)$$

在 PDH 稳频系统中, A 的正负决定着激光频率漂移的方向。在正交解调 PDH 稳频系统中, 激光频率偏离 F-P 参考腔谐振频率的方向由同相分量 I 的符号决定。正交解调算法简图如图 3 所示。

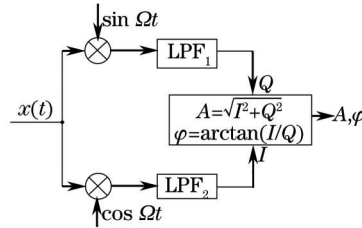


图 3 正交解调算法示意图

Fig.3 Schematic diagram of quadrature demodulation algorithm

3.2 稳频系统组成

正交解调 PDH 稳频系统组成如图 4 所示。激光束经过光隔离器 ISO 和起偏器 P 之后, 其线偏振光的偏振方向与 EOM 晶体内的电场方向相同, 并进入 EOM 进行相位调制。由直接数字频率合成器(DDS)产生两路正交参考信号, 一路为正弦信号, 另一路为余弦信号。其中正弦信号除了作为解调参考信号外, 还同时作为 EOM 驱动器的输入信号。两路参考信号由同一个 DDS 模块产生, 保证了参考信号的幅度一致性和相位正交性。经过相位调制的激光束透过 PBS 和 QWP 后变为圆偏振光, 并耦合进入 F-P 参考腔。由光电探测器 PD 探测激光载波和边带反射光的外差干涉信号, 干涉信号经过 I/V 转换后, 由 FSA 进行选频放大, 再对调制频率信号进行提取和放大处理, 该信号与两路正交参考信号分别在两个混频器(MIX₁ 和 MIX₂)内进行混频, 两路输出信号分别经两个低通滤波器(LPF₁ 和 LPF₂)处理, 得到频率漂移误差信号的同相分量和正交分量, 这两个直流分量经同步 A/D 采集后进入 ARM 处理器, 并根据(9)式计算得到频率漂移的误差信号。由于两个混频器直流偏置和特性不一致、两路参考信号幅度不一致和正交相位误差等因素所引起的系统检测误差, 通过数字处理算法予以消除。同时, 在 ARM 处理器内进行数字 PID 运算, 得到 PZT 控制信号, 该控制信号经 D/A 转换为模拟信号, 作为 PZT 驱动单元的输入信号, 用于调节激光腔长, 从而将激光频率锁定到 F-P 参考腔的谐振频率处。

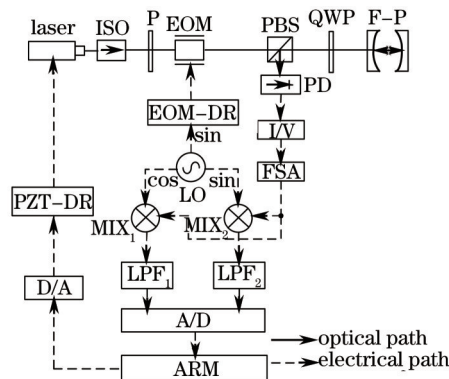


图 4 正交解调 PDH 激光稳频系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of quadrature-demodulation-based PDH system for laser frequency stabilization

4 正交解调PDH稳频方案可行性研究

为了验证上述正交解调PDH激光稳频系统研究方案的可行性,建立如图4所示实验系统。稳频激光器采用长春新产业光电技术有限公司生产的1064 nm单频全固态激光器(型号为MSL-III-1064 nm-50 mW),输出功率为50 mW。由DDS芯片产生频率为10 MHz、幅度为500 mV的正弦和余弦信号作为解调参考信号,其中正弦信号同时也作为EOM的驱动信号。采用Newport公司生产的4003型EOM对1064 nm单频激光进行相位调制,调制度约为0.9。稳频基准采用精细度为421、自由光谱范围为375 MHz的F-P参考腔,并给F-P参考腔施加一个幅度为10 V、频率为100 Hz的锯齿波电压信号,以对F-P参考腔的腔长进行线性扫描。光探测器PD的输出信号经过带宽为200 kHz的选频放大网络后,其输出信号幅度为200 mV,该信号与DDS产生的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为120。

实验测得了正交解调PDH稳频系统的PDH误差信号同相分量和正交分量的变化曲线,如图5所示。对F-P参考腔进行线性扫描,在一个扫描周期内,可认为本振信号在两条路径上的相位差为常数。因此,PDH误差信号的同相分量和正交分量与PDH误差信号具有相同的色散谱线形态。由于同相分量和正交分量的数值差异,两路输出的幅值不同;两路信号从结构相同的不同电路输出,线型略有不同,但都能够反映激光频率相对于参考腔谐振频率的变化规律。

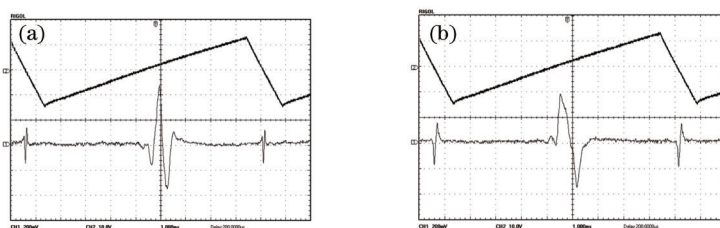


图5 PDH误差信号的(a)同相分量和(b)正交分量变化曲线

Fig.5 Experimental curves of (a) in-phase and (b) orthogonal components of the PDH error signal

对图5 PDH稳频系统误差信号的同相分量和正交分量进行同步采样,采样频率 $f_s=100$ kHz,采样点数 $N=1000$,并将采样数据传至上位机进行检波运算,计算得到正交解调PDH稳频系统的鉴频曲线如图6所示。从图6可以看出,当F-P参考腔腔长线性变化时,正交解调PDH稳频系统的误差信号具有色散谱线形态,即能够反映激光频率与F-P参考腔谐振频率之间的关系。鉴频曲线中两个边带处的频率为10 MHz,据此可以计算出PDH稳频系统误差信号的最大频率变化量为5.48 MHz,鉴频灵敏度为1.82 V/MHz。

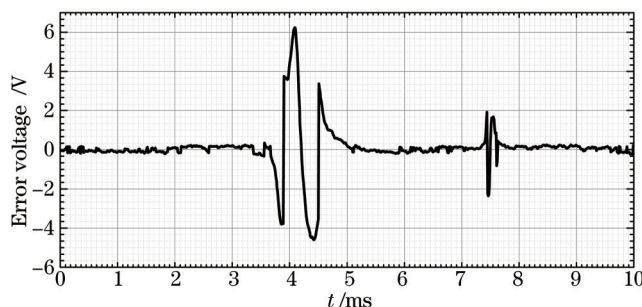


图6 正交解调PDH稳频系统鉴频曲线

Fig.6 Frequency discrimination curve of quadrature demodulation PDH system for frequency stabilization

正交解调PDH稳频方案采用正交解调方法分别获得PDH误差信号的同相分量和正交分量,通过检波算法获得PDH误差信号。光路和反馈控制方法与传统PDH稳频方案相同。

实验系统通过线性扫描F-P参考腔的腔长,获得了鉴频曲线,验证了设计的正交解调PDH稳频方案的可行性。目前正在开展数字PID控制算法研究、闭环反馈控制系统设计等工作。

5 结 论

为了避免移相器的使用而带来的移相误差和附加相移,消除混频器直流偏置带来的鉴频失真问题,设

计了基于正交解调原理的PDH激光稳频系统研究方案,并建立了相应的鉴频实验系统。实验获得了鉴频曲线,其鉴频灵敏度为1.82 V/MHz,最大频率变化量为5.48 MHz,实验结果表明所设计的正交解调PDH激光稳频方案是可行的。

参 考 文 献

- 1 S A Webster, M Oxborrow, P Gill. Subhertz linewidth Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 2004, 29(13): 1497-1499.
- 2 Jiang Yanyi, Bi Zhiyi, Xu Xinye, *et al.*. Two-hertz-linewidth Nd:YAG lasers at 1064 nm stabilized to vertically mounted ultra-stable cavities[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(6): 2152-2155.
- 3 M G Tarallo, N Poli, M Schioppo, *et al.*. A high-stability semiconductor laser system for a ^{88}Sr -based optical lattice clock[J]. Appl Phys B, 2011, 103(1): 17-25.
- 4 H Chen, Y Jiang, Z Bi, *et al.*. Progress and trend of narrow-linewidth lasers[J]. Science China-Technological Sciences, 2013, 56(7): 1589-1596.
- 5 A Foltynowicz, P Masłowski, A J Fleisher, *et al.*. Cavity-enhanced optical frequency comb spectroscopy in the mid-infrared application to trace detection of hydrogen peroxide[J]. Appl Phys B, 2013, 110(2): 163-175.
- 6 Y Jiang, S Fang, Z Bi, *et al.*. Nd:YAG lasers at 1064 nm with 1-Hz linewidth[J]. Appl Phys B, 2010, 98(1): 61-67.
- 7 Q F Chen, A Nevsky, S Schiller. Locking the frequency of lasers to an optical cavity at the 1.6×10^{-17} relative instability level[J]. Appl Phys B, 2012, 107(3): 679-683.
- 8 Hou Lei, Han Hainian, Zhang Long, *et al.*. A narrow linewidth diode laser at 243 nm[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(13): 134205.
侯磊, 韩海年, 张龙, 等. 243 nm 稳频窄线宽半导体激光器[J]. 物理学报, 2015, 64(13): 134205.
- 9 Jiang Xiao, Zhang Chen, Cai Wenqi, *et al.*. Frequency stabilization system of diode laser for cold atom experiment[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 82-86.
江晓, 张晨, 蔡文奇, 等. 冷原子实验用的半导体激光器稳频系统[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 82-86.
- 10 Du Qiang, Huang Wenhui, Sun Darui, *et al.*. Frequency stabilization of mode-locked laser for Thomson scattering X-ray source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 467-471.
杜强, 黄文会, 孙大睿, 等. 汤姆逊硬 X 射线源中锁模脉冲激光稳频方法[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 467-471.
- 11 R W P Drever, J L Hall, F V Kowalski, *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Appl Phys B, 1983, 31(2): 97-105.
- 12 E D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. Am J Phys, 2001, 69(1): 79-87.
- 13 Ch Salomon, D Hils, J L Hall. Laser stabilization at the millihertz level[J]. J Opt Soc Am B, 1988, 5(8): 1576-1587.
- 14 F M Schmidt, W Ma, A Foltynowicz, *et al.*. Highly sensitive dispersion spectroscopy by probing the free spectral range of an optical cavity using dual-frequency modulation[J]. Appl Phys B, 2010, 101(3): 497-509.
- 15 Zheng Gongjue, Dai Dapeng, Fang Yinfei, *et al.*. Locking of optical transfer cavity based on PDH technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121401.
郑公爵, 戴大鹏, 方银飞, 等. 基于PDH技术的光学传递腔的锁定[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121401.
- 16 A Cygan, D Lisak, P Masłowski, *et al.*. Pound-Drever-Hall-locked, frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(6): 063107.
- 17 Hu Yongqi, Dong Jing, Huang Junchao, *et al.*. Frequency noise suppression of single-frequency laser by all-fiber ring resonator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802012.
胡永奇, 董靖, 黄军超, 等. 利用全光纤环形谐振器实现对单频激光器频率噪声的抑制[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802012.
- 18 Yang Xiaoniu. Software-Defined Radio: Principles and Practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 48-53.
杨小牛. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 48-53.

栏目编辑: 张雁