

文章编号: 0258-7025(2009)05-1075-05

# 利用取样积分实现激光饱和吸收一次谐波稳频

林弋戈<sup>1,2</sup> 陈伟亮<sup>1,2</sup> 李天初<sup>1,2</sup> 林平卫<sup>2</sup> 王 平<sup>2</sup> 刘年丰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081; <sup>2</sup>中国计量科学研究院, 北京 100013)

**摘要** 对激光器进行频率调制,检测原子分子饱和吸收信号中的一次谐波成分得到频率误差信号,反馈控制可以实现激光频率的稳定。介绍了取样积分提取一次谐波信号的原理和利用单片机实现的取样积分和数字比例积分微分(PID)控制的技术。相对于传统的锁相放大和模拟 PID 技术,取样积分和数字 PID 结构简单,可靠性高,调试方便,实现难度大大降低。建立的 Cs 原子饱和吸收外腔半导体激光(ECDL)稳频系统,估算相对频率波动优于  $1.2 \times 10^{-9}$  (p-p),平均锁定时间可达 7 天,并实现了自动扫描饱和吸收峰、自动锁定和意外失锁的自动重新锁定功能。

**关键词** 激光技术; 饱和吸收; 取样积分; 一次谐波; 稳频

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1075

## First Harmonic Saturated Absorption Frequency Stabilization of Lasers Using Sampling Integration Technique

Lin Yige<sup>1,2</sup> Chen Weiliang<sup>1,2</sup> Li Tianchu<sup>1,2</sup> Lin Pingwei<sup>2</sup>

Wang Ping<sup>2</sup> Liu Nianfeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)  
(<sup>2</sup>National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

**Abstract** If the frequency of a laser is modulated sinusoidally, the first harmonic component of saturated absorption signal can be used as error signal to stabilize the frequency of the laser. We introduce the principle of using sampling integration technique to obtain the first harmonic signal and the realization of sampling integration and digital proportional-integral differential (PID) controller by means of a microprocessor. Compared to traditional lock-in amplifiers and analog PID controllers, the new technique is more reliable in performance, simpler in construction and easier to be realized. An external-cavity diode laser (ECDL) frequency stabilization system is built with this sampling integration based on Cs atom saturated absorption. Relative frequency fluctuation better than  $1.2 \times 10^{-9}$  (p-p) can be achieved and the average locking duration is about 7 days. The system can also automatically scan the saturated absorption peaks, lock to the desired peak and resume locking when lock is broken by accident.

**Key words** laser technique; saturated absorption; sampling integration; first harmonic; frequency stabilization

### 1 引 言

随着半导体技术的飞速发展,半导体激光器的性能得到了极大的提高。通过引入外腔以及其他光反馈技术<sup>[1]</sup>,半导体激光器得到了窄线宽输出和良好的频率短期稳定性。但是此类激光器自由运转时,仍然有频率起伏和长期漂移。为了抑制激光器的长期漂

移,通常把激光频率锁定到稳定的频率参考上,比如选择高稳定度的 F-P 腔为参考<sup>[2]</sup>,或者选择原子分子的吸收谱线作为参考<sup>[3~5]</sup>,采用偏振光谱技术<sup>[3]</sup>、射频调制光谱技术<sup>[4]</sup>或声光偏频<sup>[5]</sup>等方法实现锁定。为了满足在如激光冷却原子<sup>[6]</sup>等物理研究中对激光器的要求,通常把原子分子精细跃迁谱线作为参考,利用饱和吸收技术稳频来改善其中长期频率稳定性。

收稿日期: 2008-05-16; 收到修改稿日期: 2008-09-04

基金项目: 国家 973 计划(2005CB724500)资助项目。

作者简介: 林弋戈(1977—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事时间频率基准研究。E-mail: linyige@nim.ac.cn

导师简介: 李天初(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事时间频率基准和稳频激光研究。E-mail: litch@nim.ac.cn

## 2 原 理

饱和吸收技术是一种非线性光谱技术,能够在多普勒背景中分辨出超精细跃迁谱线。在超精细跃迁谱线中心附近对激光器进行频率调制时,奇次谐波曲线呈色散线型,可以用来锁定激光频率<sup>[7]</sup>。

为了检测信号中的奇次谐波成分,需要采用相敏检测技术,通常采用锁相放大技术来实现。锁相放大器是利用互相关原理设计的一种同步相干检测仪<sup>[8]</sup>,用来从噪声中检测出有用信号。对于频率调制饱和吸收稳频系统,对频率误差信号采用传统的放大电路处理,已经可以得到满意的信噪比,在系统中使用锁相放大器主要是利用了其相敏检波器(简称 PSD)的功能。PSD 的核心包括一个乘法器和一个积分器,用模拟乘法器和运算放大器自制的 PSD 存在动态范围有限、直流漂移难抑制等问题,制作调试比较困难;商品化的通用锁相放大器的指标能满足要求,但是价格昂贵。近年来,基于高速 A/D 数据采集技术和高速数字乘法器(DSP 结合 FPGA)的数字相敏检波器(DPSD)<sup>[9]</sup>得到了很快的发展,但是要实现饱和吸收稳频系统中快速伺服的要求,应用起来有一定难度。

取样积分(sampling integration)技术是另一种利用互相关检测原理实现从噪声中提取周期信号的技术。其核心是取样器和积分器,其原理是利用噪声具有随机性,通过对周期信号某相位点多次取样并累积的方法,达到提高信噪比的目的。根据取样积分技术的原理,其中的取样器可以由 A/D 转换电路中的采样保持器担当,积分器可以通过数字累加的办法实现,不需要乘法运算,可以利用较低的硬件要求来实现相敏检测。

用取样积分技术实现一次谐波相敏检测的原理如图 1。

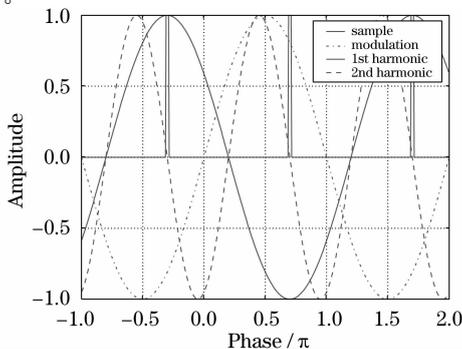


图 1 取样积分方法中相位检测的原理

Fig. 1 Principle of phase sensitive detection using sampling integration technique

设调制信号为  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega_0 t)$ , 其中  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ ,  $T_0$  为调制信号周期。

加上频率调制后的饱和吸收信号中一次谐波信号为  $U_s(t) = U_1 \cdot \sin(\omega_0 t - \varphi)$ , 其中  $\varphi$  为一次谐波信号相对于调制信号的相位延迟。

A/D 转换器采样触发脉冲信号为

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \delta\left(t - nT_0 - \frac{\theta}{2\pi} \cdot T_0\right) + \delta\left(t - nT_0 - \frac{\theta}{2\pi} \cdot T_0 + \frac{T_0}{2}\right) \right], \quad (1)$$

其中  $\delta(t)$  函数为脉冲函数,  $\theta$  为采样信号相对于调制信号的相位延迟。

取周期采样

$$U(n) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ U_1 \cdot \sin\left[\omega_0 \left(nT_0 + \frac{\theta}{2\pi} \cdot T_0\right) - \varphi\right] - U_1 \cdot \sin\left[\omega_0 \left(nT_0 + \frac{\theta}{2\pi} \cdot T_0 - \frac{T_0}{2}\right) - \varphi\right] \right\}, \quad (2)$$

(2)式可化简得

$$U(n) = 2U_1 \sum_0^{\infty} \sin(\theta - \varphi). \quad (3)$$

可见,当  $\theta - \varphi = 2n\pi + \frac{\pi}{2}$  时  $U(n) = 2U_1$ 。每个

周期的采样值的绝对值与一次谐波的幅度成正比,采样值的符号正负代表采样信号与一次谐波呈同相或反相。如果一个周期的信号信噪比不够好,可以累加数个周期的采样(既取样积分),直至信号信噪比满足要求。在一次谐波每个周期的  $\pi/2$  和  $3\pi/2$  处两次采样相减有以下几个优点:第一,每个调制周期两次采样可以加快积分速度,有利于快速伺服;第二,正负半周各采样一次并相减,可以减小光强变化产生的直流电平的影响,并消除零点漂移的影响;第三,由图 1 可知,对于二次谐波等偶次谐波来说,这两个采样脉冲采集的是同一相位的信号,相减为零,因此可以抑制偶次谐波的影响。

饱和吸收稳频原理基于一次谐波幅度与频率偏移呈色散形函数关系<sup>[3]</sup>。在色散曲线的线性区域,一次谐波幅度与频率偏移成正比。一次谐波的符号代表了频率偏移的方向。显然,上述取样积分信号的幅度与频率偏移成正比,其符号代表了频率偏移的方向。

得到代表频率误差的一次谐波采样积分数值之后,可以把这个数值通过 D/A 转换器变成模拟电压,然后通过模拟比例积分(PI)控制器来反馈控制频率。但是数字比例积分微分(PID)控制器具有比

模拟 PID 控制器更加优异的抗干扰能力,而且进行 PID 参数调试时更加灵活方便。在利用微处理器完成 PSD 功能时,由于硬件消耗少,有大量的时间可以用来进行 PID 运算,由频率误差计算得到频率控制量后,通过 D/A 转换器变成电压控制激光器的压电陶瓷(PZT),实现闭环锁频。

### 3 实验装置

实验原理如图 2 所示,外腔半导体激光器采用 NEW FOCUS 的 TLB-7000 系列,波长 852 nm。其输出首先经过光学隔离器以防止光反馈,经  $\lambda/2$  波片 HP1 调节偏振方向,使光的绝大部分由 PBS1 反射输出,供激光冷却实验使用。约  $240 \mu\text{W}$  的光透过 PBS1,给饱和吸收光路使用。透射光束经  $\lambda/2$  波片 HP2 调节偏振方向,使一部分光从 PBS2 透射并通过铯泡,作为抽运光,另一部分光从 PBS2 反射并经 M2 反射通过铯泡,作为参考光,再由 M3 反射进入探测器 PD2。抽运光通过  $\lambda/4$  波片 QP1 和中性衰减片 NDF,由反射镜 M1 反射回来,作为探测光。调节  $\lambda/4$  波片 QP1 使探测光在 PBS2 上反射,进入探测器 PD1。

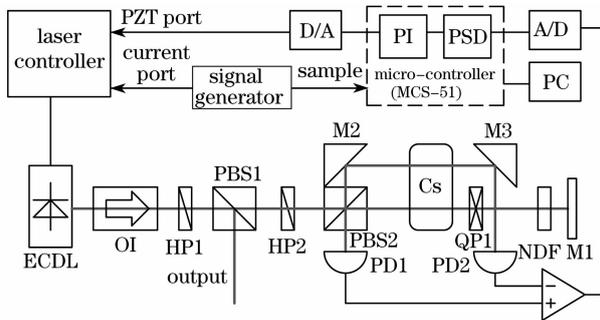


图 2 稳频系统原理图

Fig. 2 Configuration of the experimental system

信号发生器采用自制的简易 DDS (Direct Digital Synthesis),生成正弦波和采样触发脉冲,原理如图 3 所示。控制器采用 Atmel 公司的 ATmega8 单片机,预先将正弦波波形数据存储在片内存储器中。运行时,按时序依次把波形数据送到 8 位 D/A 转换器 AD558,经模拟带通滤波器后,生成正弦波。正弦波的频率可通过程序调节,幅度可通过电位器调节。同时由单片机的 IO 口产生采样触发脉冲,触发脉冲相对于正弦波相位可调,调节

步距为  $3.6^\circ$ 。

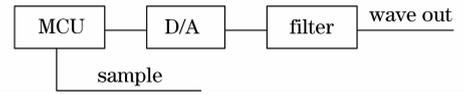


图 3 调制信号源系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the modulation signal source

稳频控制系统采用 STC89C58 单片机(MCU),扩展了 16 位 A/D 转换器 AD976,16 位 D/A 转换器 AD669 以及键盘显示和 RS-232 串行通信电路。探测光和参考光分别由 PD1 和 PD2 接收,产生的光电流经 I/V 转换器和差分电路,得到消除了大部分多普勒背景的饱和吸收信号(图 4)。单片机接收信号源的采样脉冲信号,控制 A/D 所需要的相位采集信号,相减得到频率误差信号,经 PID 计算,得到 PZT 控制量,通过 D/A 输出控制激光器。

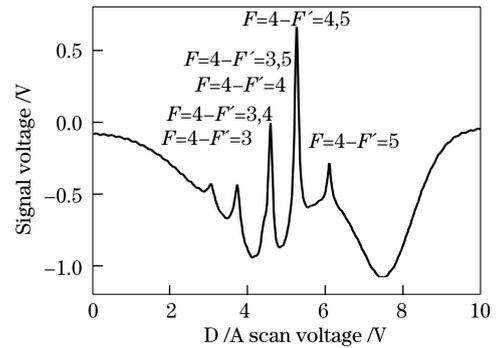


图 4 部分消除多普勒背景的饱和吸收信号

Fig. 4 Saturated absorption signal with Doppler background partially removed

### 4 实验结果

在不加调制信号时,由 D/A 扫描 PZT 电压和 A/D 采样,可以得到部分消除多普勒背景的铯原子  $D_2$  线饱和吸收信号,如图 4 所示。

由于功率加宽等加宽机制,饱和吸收谱线的半峰全宽(FWHM)约为 20 MHz,大于铯原子的自然线宽。调节信号发生电路参数,输出频率 500 Hz,峰峰值幅度为 1.2 V 的正弦波,加在激光器控制器的电流调制端口,由 D/A 扫描 PZT 电压并进行误差计算,得到铯原子  $D_2$  线的鉴频曲线如图 5 所示。

其中  $F=4-F'=4,5$  以及  $F=4-F'=5$  的曲线放大如图 6 所示,两个饱和吸收峰之间的间隔约为 126 MHz,计算  $F=4-F'=4,5$  交叉线鉴频曲线线性部分的宽度大约 8.7 MHz,斜率 79 mV/MHz。进行闭环锁定时,单片机首先扫描激光器频率得到鉴频曲线,并自动找到  $F=4-F'=4,5$  的饱和吸收

峰,控制 PZT 通道的电压,使激光器输出波长移到饱和吸收峰附近,启动 PID 计算,实现闭环锁定。

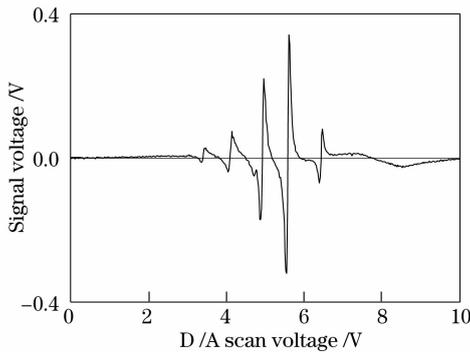


图 5 一次谐波鉴频曲线

Fig. 5 Dispersive line shape produced by this configuration

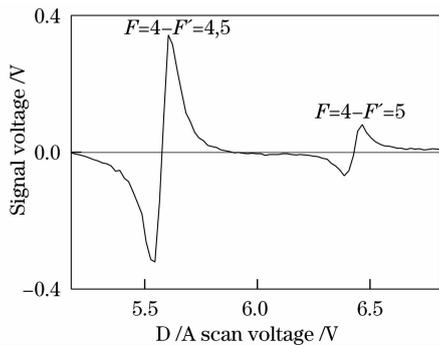


图 6 鉴频曲线局部

Fig. 6 Part of Fig. 5

在系统开环和闭环时的频率误差信号如图 7。前 6 s 为系统闭环时的误差信号,后 7 s 为系统开环时的误差信号。可见稳频系统大大改善了激光频率的秒级频率起伏和长期频率漂移。闭环时 6 s 内的误差信号电压峰-峰(p-p)起伏为 34.7 mV,除以鉴频曲线斜率得到频率峰-峰(p-p)起伏约为 440 kHz,相对频率起伏为  $1.2 \times 10^{-9}$ 。当系统由于强烈干扰而失锁时,系统能够在 100 ms 内识别,在 3 s 时间内自动扫描饱和吸收峰并锁定到正确的吸收峰上。在控温稳定度  $\pm 0.5$  K 的实验室中,本系统实现了平均大于 7 天的不失锁连续稳频。最终的失锁原因一般由于激光器的频率漂移超出了系统 PZT 通道的频率控制范围(约 1.5 GHz)。

## 5 结 论

介绍了一种应用取样积分原理实现相敏检波的带调制饱和吸收稳频方法,该方法利用成熟的单片机技术,采用与以往不同的检测手段和数字 PID 控制技术,以较低的硬件要求实现了高可靠性的 ECDL 稳频系统。这种可靠性对于冷原子喷泉钟需

要每天 24 h 连续运行的系统是尤为重要的。

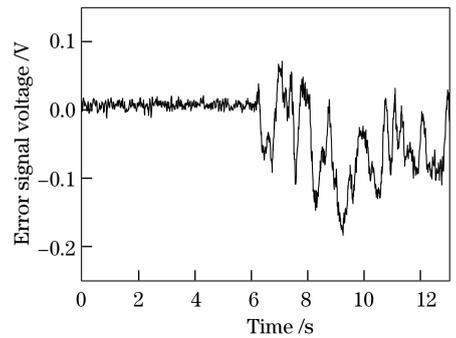


图 7 系统闭环与开环时误差信号的比较

Fig. 7 Comparison of the error signal with system being locked and unlocked

本实验系统采用的是 500 Hz 的调制频率,这种低频调制限制了该系统在某些领域中的应用。采用集成 DDS 芯片或可编程逻辑芯片(CPLD)技术提高调制频率,可以扩展该方法的应用范围。另一个可能的方法,可以从激光器分出一部分光,用声光调制器(AOM)移频,把频率调制信号加在 AOM 上,实现激光器的无调制偏频输出。

对于声音和振动有很强的抗干扰能力,但是如果激光器的频率漂移超出了 PZT 控制端口的控制范围(约 1.5 GHz),系统仍然会失锁。对于 TLB-7000 系列 ECDL,可以通过 RS-232 接口发送控制命令,在 150 GHz 范围内对激光频率进行调节。本系统如果可以利用其主控单片机通过 RS-232 接口对激光频率进行粗调,则可以进一步提高系统的可靠性,实现更长时间的无失锁连续运行。

## 参 考 文 献

- 1 C. E. Wieman, L. Hollberg. Using diode lasers for atomic physics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(1):1~20
- 2 Yang Haijing, Wang Yanhua, Zhang Tiancai *et al.*. Modulation-free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):316~320  
杨海菁,王彦华,张天才等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光频率锁定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3):316~320
- 3 Ma Jie, ZhaoYanting, Zhao Jianming *et al.*. Frequency stabilization of an external cavity diode laser using polarization spectroscopy without frequency modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1605~1608  
马 杰,赵延霆,赵建明等. 利用偏振光谱对外腔式半导体激光器实现无调制锁频[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1605~1608
- 4 Zhao Jianming, Yin Wangbao, Zhao Yanting *et al.*. Frequency locking of a semiconductor laser via radio-frequency modulation spectrum[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 935~938  
赵建明,尹王保,赵延霆等. 采用射频频率调制光谱实现半导体激光器稳频[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 935~938
- 5 Dou Haipeng, Dong Lei, Zhang Lei *et al.*. Modulation-free laser frequency locking by acousto-optic frequency-shifting for dense wavelength division multiplexing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1375~1378

- 窦海鹏,董磊,张雷等. 密集波分复用激光光源的声光偏频无调制频率锁定[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1375~1378
- 6 Li Tianchu, Li Mingshou, Lin Pingwei. NIM4 laser cooling-cesium atomic fountain clock; a new generation of time and frequency primary standard [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(3): 193~197
- 7 A. J. Wallard. Frequency stabilization of helium-neon laser by saturated absorption in iodine vapor [J]. *J. Phys. E: Scient. Instr.*, 1972, 5(9): 926~930
- 8 Zeng Qingyong. *Weak Signal Testing [M]*. 2nd Version Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994. 53~56  
曾庆永. 微弱信号检测[M]. 第二版, 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 53~56
- 9 Zhang Xinfu, Liu Fu, Dai Yisong. Study on DPSD algorithm performance with parameter selection [J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 1998, 28: 40~45  
张新发, 刘富, 戴逸松. DPSD算法性能研究及参数选择 [J]. 吉林工业大学学报, 1998, 28: 40~45

## **Chinese Optics Letters (《中国光学快报》)2009 年“Nanophotonics”和 “Digital and Computer-Generated Holography” 专题征稿启事**

*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于 2009 年 10 月在正刊上推出“Nanophotonics”(“纳米光子学”)专题,特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Metamaterials; negative index, cloaking and nonlinear phenomena
- Materials synthesis; molecular architectures for photonic applications, eg. carbon nanotubes, DNA and dendrimers
- Nanofabrication techniques; eg. multiphoton polymerization and nanoimprint technology
- Nanocharacterization methods and instrumentation; Near-field techniques, super-resolution and high temporal resolution
- Nanosensors; resonators and field enhancement strategies for improved sensitivity
- Photonic crystals; spatial and temporal dispersion phenomena with applications and nonlinear effects
- Plasmonics; localized and propagating surface modes, metallodielectrics, fishnet structures
- Quantum confined structures; quantum dots to quantum wells with applications to sources and detectors
- Nanostructures for energy; Dye-sensitization, plasmonic enhancement, organic and carbon based nanomaterials, quantum structures

Feature Editors:

Joseph W. Haus, Director

Electro-Optics Program, University of Dayton, Dayton, USA

Yiping Cui

Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing, China

截稿日期:2009 年 5 月 30 日

*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于 2009 年 12 月在正刊上推出“Digital and Computer-Generated Holography”(“数字与计算全息”)专题,特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Digital holography theory and systems
- Phase unwrapping
- Computer generated holograms
- Spatial light modulators for holography
- Holographic optical elements
- 2D and 3D pattern recognition
- Three-dimensional imaging and processing
- Three-dimensional display
- 2D-3D content conversion
- Shape and deformation measurement
- Holographic imaging and microscopy
- Holographic Optical Micro-Manipulation

Feature Editor:

Ting-Chung Poon, Ph. D., Professor

Bradley Department of Electrical and Computer Engineering

Virginia Tech

Blacksburg, Virginia 24061 USA

截稿日期:2009 年 7 月 15 日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“专题(上述两个专题的具体名称)投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission,备注中写明具体专题名称,推荐用此方式投稿),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。