

拉曼激光光学锁相环参数设计及仿真

李 丁, 马慧娟, 茹 宁, 王 宇

(北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术国防科技重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 光学锁相环(Optical Phase-locked Loop, OPLL)技术是实现激光相位相干的有效方法。鉴于环路滤波器参数直接影响光学锁相环系统的整体性能, 提出了一种二阶无源环路滤波器参数的优化方法。首先, 根据相角裕度定义及系统开环传递函数的数学模型, 推导出环路滤波器参数设计的公式, 并设计了一种基于 MATLAB 的参数优化算法。然后, 为精确地设计拉曼激光光学锁相环参数, 设计了消多普勒饱和吸收谱实验, 并对激光器的压电陶瓷端口反馈增益参数进行测量。在锁相闭环控制系统性能仿真中, 得到了单位阶跃响应的超调量为 6.53%, 调节时间为 0.584 μs 。最后, 对拉曼激光光学锁相环各个模块进行 Simulink 建模并仿真, 仿真结果表明锁相环能够实现对拉曼光相位锁定且锁定时间为 2 μs , 因此, 验证了锁相环参数设计方法的正确性。在工程应用中, 为光学锁相环的参数设计提供了重要参考价值。

关键词: 光学锁相环; 环路滤波器; 参数设计; 仿真; 拉曼激光

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0406007

Parameters design and simulation of Raman laser optical phase-locked loop

Li Ding, Ma Huijuan, Ru Ning, Wang Yu

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The optical phase-locked loop (OPLL) technology is an effective-method to realize the phase coherent of laser beam. In consideration of the loop filter influence on OPLL, a new method was presented to obtain the optimized parameters of a second order passive loop filter. Firstly, a formula was deduced to design the parameters according to the definition of phase angle margin and mathematical model of open-loop transfer function. Based on MATLAB software, a parameter optimization algorithm was formulated. Secondly, in order to calculate the parameters of Raman laser optical phase-locked loop precisely, a experiment of Doppler-free absorption spectrum was designed to get the accurate gain parameter from the piezoelectric ceramic to feedback the laser. The overshoot and regulation time of unit step response were about 6.53% and 0.584 μs , respectively, in the systematic performance simulation of closed-loop optical phase-locked system. Finally, by using Simulink tools to establish models and simulating the optical phase-locked loop system module, the lasers' phase was locked at a high speed

收稿日期: 2017-11-15; 修订日期: 2017-12-13

基金项目: 国防军工技术基础项目(JSJC20122205C001)

作者简介: 李丁(1989-), 男, 研究生, 主要从事激光频率相位控制方面的研究。Email: dl0714916@126.com

导师简介: 王宇(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事量子计量技术方面的研究。Email: wangyu@cimm.com.cn

with 2 μ s. Therefore, the method of OPLL parameters optimization has turned out reasonable. In addition, certain guidelines can be given for the circuit devise of the optical phase-locked loop in engineering applications.

Key words: optical phase-locked loop; loop filter; parameters design; simulation; Raman laser

0 引言

光学锁相环 (Optical Phase-locked Loop, OPLL) 是锁相环技术^[1]的延伸,一种以电学反馈的方式对光信号相位进行锁定的技术,其目的是通过控制两束激光的相位恒定从而产生相位相干的拉曼激光。由于光学锁相环具有结构简单并能主动抑制激光器的相位噪声等特点,近些年,光学锁相环技术在相干光通信^[2-3]、冷原子物理学^[4-5]等领域得到广泛应用。在卫星间激光通信应用中,基于 OPLL 的相干接收机为实现可靠信号的接收,必须要求激光的相位噪声极低;在光频域反射仪应用中^[6],距离分辨率和测量范围两个重要指标与激光器的相位噪声、扫频范围及相位跟踪性能直接相关;在冷原子干涉重力仪应用中,拉曼光的相位噪声直接影响到重力加速度的测量精度。综上所述,光学锁相环设计意义重大,而环路滤波器的设计直接影响光学锁相环性能。

对于一阶环路滤波器,通常选择闭环时域的设计方法^[7],虽然方法简单,但不能滤除鉴相器输出信号的高次谐波,导致锁相环系统产生严重相位噪声。对于二阶环路滤波器,一般采用开环频域的方法^[8-9],以相角裕度取最大值为条件,根据开环带宽和相角裕度的经验值,计算环路滤波器参数,这种计算方法看似正确,其实是自相矛盾的。

文中根据 OPLL 系统开环传递函数的特征,提出了一种基于 MATLAB 的开环频域优化算法。研究了相角裕度对系统的影响,以及在相同相角裕度的情况下,不同的比例积分调节器相角对系统的影响。为了更准确地设计拉曼激光光学锁相环环路滤波器参数,需要获得可调谐激光器的模型参数。文中介绍了外腔式半导体激光器(External Cavity Diode Laser, ECDL)的压电陶瓷(Piezoelectric Transducer, PZT)端口频率调节增益的测量方法,并进行了测量实验。最后通过对拉曼激光光学锁相环各模块进行 Simulink

建模并仿真,仿真结果表明文中提出环路滤波器参数设计方法的正确性。

1 光学锁相环的原理及模型

光学锁相环是一种闭环负反馈的相位控制系统,通常包括鉴频鉴相器(Phase Frequency Detector, PFD)、环路滤波器 (Loop Filter, LF) 和压控振荡器 (Voltage Control Oscillator, VCO)等模块。其基本原理如图 1 所示,在光学锁相环中,被控对象为可调谐激光器,且控制变量为光信号,需要经过光电探测器转换成电信号后,作为锁相环的输入进行相位锁定 PFD 用于比较参考信号与输出信号的相位差,且在 $(-2\pi, 2\pi)$ 范围, PFD 输出平均电压与相位差呈线性关系。但 PFD 输出的信号携带高次谐波,会引起相位的波动。LF 可以设计成低通滤波器,滤除高频噪声,而且 LF 参数决定锁相环系统的环路带宽,同时也影响系统的性能,是锁相环技术的关键。相位误差信号经过 LF 反馈回可调谐激光器,使得输出信号的相位与参考信号的相位保持同步,从而实现光学锁相。

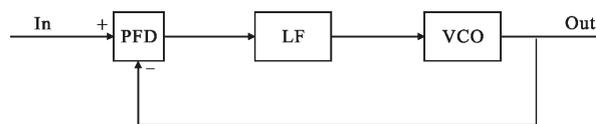


图 1 锁相环控制系统基本原理图

Fig.1 Principle diagram of PLL control system

锁相环控制系统的控制策略是锁相环能否成功锁定相位\锁定时间长短的关键因素。根据图 1 中各模块基本原理可获得锁相环控制系统的数学模型。PFD 的增益设为 K_d , LF 的传递函数由 LF 的结构决定,设为 $G(s)$ 。VCO 的传递函数为 K_0/s ,光锁相环控制变量为相位,而可调谐激光器输出为角频率,需要通过对时间的积分得到相位,因此其模型可看作一个积分环节, K_0 为拉曼激光光源激光器 PZT 端口的频率调节增益。从而可得,光学锁相环的开环传递

函数为:

$$\phi(s) = \frac{K_d K_0 G(s)}{s} \quad (1)$$

2 二阶无源环路滤波器参数设计

常用的二阶无源环路滤波器结构如图 2 所示, 设输入电流为 $i(t)$, 输出电压为 $u(t)$, 根据二阶无源环路滤波器电路模型, 可以得到传递函数 $F(s)$, 如公式(2)所示:

$$F(s) = \frac{1}{C_1 + C_2} \frac{R_1 C_2 s + 1}{s \left(\frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} s + 1 \right)} \quad (2)$$

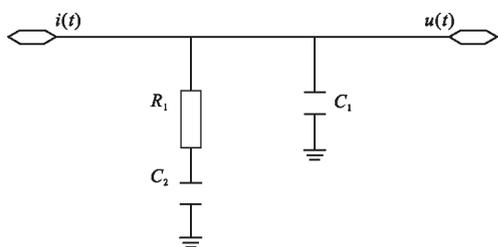


图 2 二阶无源环路滤波器

Fig.2 Two order passive loop filter

将公式(2)代入公式(1)可得系统开环传递函数:

$$G(s)H(s) = K_d \frac{R_1 C_2}{C_1 + C_2} \frac{R_1 C_2 s + 1}{R_1 C_2 s \left(\frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} s + 1 \right)} \frac{K_0}{s} \quad (3)$$

令 $K = K_d K_0 \frac{R_1 C_2}{C_1 + C_2}$, $\tau_1 = R_1 C_2$, $\tau_2 = \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2}$, 可得,

$$G(s)H(s) = K \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_1 s} \frac{1}{\tau_2 s + 1} \frac{1}{s} \quad (4)$$

相角裕度定义为系统 0 dB 开环增益所在频率 (开环带宽 ω_c) 的相位加上 180°。相角裕度是用于评价控制系统相对稳定程度的参数, 从参考文献[10]得知, 当系统的相角裕度为正时, 则该系统是稳定。因此, 二阶环路滤波器通常采用开环频域的方法, 根据相角裕度的定义来设计环路滤波器参数:

$$\angle(G(s)H(s)) + \pi = \varphi \quad (5)$$

$$|G(s)H(s)| = 1 \quad (6)$$

式中: $\angle(G(s)H(s))$ 为开环传递函数相角; φ 为相角裕度; $|G(s)H(s)|$ 为开环传递函数幅值。对于该方法, 变量 φ , ω_c 可以根据经验来设置, 然而两个方程, 有 R_1 , C_1 , C_2 三个变量无法求解。参考文献[8-9]采用以相角裕度取最大值为条件, 即对公式(5)进行求导, 令

导数值为零, 获得关系式, 联合公式(5)、(6)可得参数解。但是自行设置的环路带宽不一定能满足相角最大的条件, 因此自行设置环路带宽的方法可能导致与设计目标矛盾, 不可取。

文中根据公式(5)、(6), 提出了一种合理的计算和优化环路滤波器参数的方法。首先根据公式(4)的数学表达形式, 将其中的比例积分环节提取出来, 视作一个独立比例积分(Proportional-Integral, PI) 调节器。通过给定 PI 相角值 θ , 并联合公式(5)、(6)可解出参数。

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{1}{\omega_c \tau_2}\right) \\ -\theta - \tan(\omega_c \tau_2) - \frac{\pi}{2} + \pi = \varphi \\ K \sqrt{1 + (\tan \theta)^2} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c \tau_2)^2}} \frac{1}{\omega_c} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

为了更进一步优化环路滤波器参数, 文中设计了一种基于 MATLAB 平台的优化算法, 可以方便有效地对参数进行优化。通过对 PI 相角值进行遍历, 以及将相角裕度设置为变量, 可以获得多组不同参数解。因此能够选择锁相环系统性能最优的相角裕度值及 PI 相角值, 进而获得最优环路滤波器参数。

3 PZT 端口增益参数测量

在拉曼激光光学锁相环路滤波器参数设计中, 需要确定 ECDL PZT 频率调节增益。实验采用 780 nm 外腔式半导体激光器作为拉曼光的光源, 由于激光频率太高, 频率测量设备精度有限, 无法直接精确测量激光器的频率。因此, 采用间接的方法测量 PZT 调节增益。由于铷原子具有超精细能级结构, 在探测光和泵浦光与原子的作用过程中, 会形成饱和和吸收谱线。饱和吸收谱线中的每个峰都精确对应一对超精细结构跃迁能级差或者两对超精细结构跃迁能级差的平均值, 因此, 文中通过扫描激光 PZT 端口电压至铷原子出现完整饱和和吸收谱线, 从而获得扫描电压与激光频率的精准对应关系。

根据消多普勒饱和吸收谱机理并设计饱和吸收谱实验装置^[11], 完成 PZT 端口增益的测量。实验光路如图 3 所示, 文中的工作亮点之一在于将消多普勒饱和吸收光路进行小型化、模块化。实验采用 Topptica DL100 外腔式半导体激光器, 并使用配套的 DIGILOCK 软件进行操作和数据采集。首先, 联调调

节激光器控制器的 SC110 OUT 的幅值旋钮和电流旋钮, 将激光器频率调至 384 230.68 GHz 附近。然后, 调节 DIGILOCK 软件中 Scan 模块界面上电压扫描范围, 可以得到铷原子 D2 跃迁谱线, 如图 4 所示, 其中扫描信号为锯齿波, 扫描频率为 10 Hz。

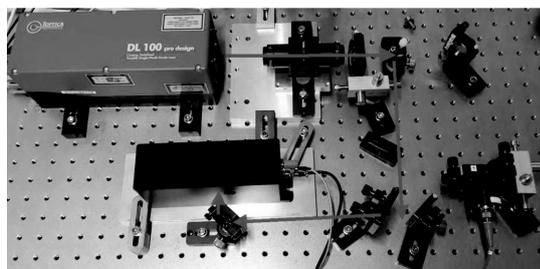


图 3 消多普勒饱和吸收光路图

Fig.3 Optical path of Doppler free saturated absorption

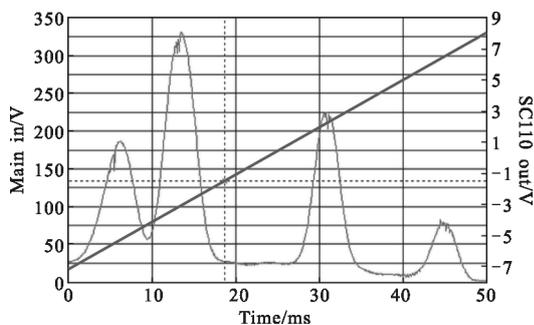


图 4 铷原子消多普勒饱和吸收光谱信号

Fig.4 Doppler-free saturated absorption spectroscopy signal of rubidium vapor

图 4 中曲线表示 ^{87}Rb 原子消多普勒光谱信号, 直线表示 PZT 端口扫描电压, 从而可以得到光谱峰值与扫描电压的对应关系。为了更精准地测量, 实验选取 ^{87}Rb 超精细能级 D2 跃迁谱线来测量激光器 PZT 反馈端口的调节增益。

缩小扫描电压范围, 得到 $^{87}\text{Rb } 5^2\text{S}_{1/2}, F=1 \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}$ 的跃迁谱线, 如图 5 所示。图中纵坐标代表饱和吸收谱峰值电压, 横坐标为 PZT 扫描电压。 $^{87}\text{Rb } 5^2\text{S}_{1/2}, F=1 \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}$ 跃迁谱线中饱和吸收峰所对应的频率是已知的, 因此, 可以得到扫描电压与峰值频率对应关系, 如表 1 所示, 表中第一列峰值频率及扫描电压对应图 5 中右侧起第一个峰, 右侧第二个峰则对应表中第二列, 并以此类推。

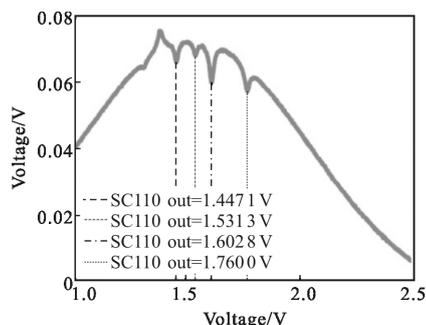


图 5 饱和吸收峰峰值电压-扫描电压曲线

Fig.5 Saturation absorption peak voltage-scan voltage curve

表 1 扫描电压-峰值频率对应表

Tab.1 Scanning voltage and peak frequency corresponding table

Frequency/MHz	384 234 683.234	384 234 647.234	384 234 611.234	384 234 568.234
Scan voltage/V	1.760 0	1.602 8	1.531 3	1.447 1

由于 PZT 能够近似线性调节激光频率, 使用 Origin 软件, 对表 1 中数据进行线性拟合, 拟合直线的斜率即 PZT 的调频增益, 其中扫描信号频率为 10 Hz。

在拉曼激光锁相环中, PZT 环路带宽需要设置为 KHz 量级, 为了精确地设计环路滤波器参数, 需要测量 PZT 调频增益的频率响应。在前面实验的基础上, 改变扫描信号的频率, 测量不同扫描频率的 PZT 端口调节增益。如图 6 所示为 PZT 调频增益的频率响应, 频响曲线近似直线, 取 PZT 的调节增益约为 300 MHz/V, 将该增益参数应用于环路滤波器的参数设计及仿真中。

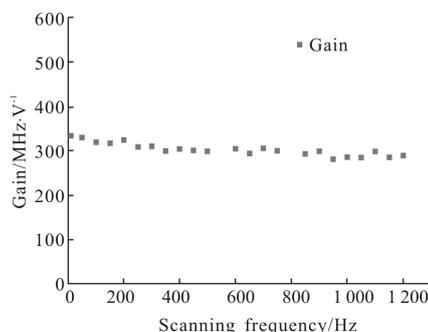


图 6 PZT 调节增益频率响应曲线

Fig.6 PZT regulation gain of frequency-response curve

4 系统仿真及分析

拉曼激光光学锁相环路设计一般采用两路反馈,其中 PZT 反馈环路为慢反馈环路,用于补偿机械振动和温度漂移等造成的频率缓慢而大范围的变化;电流调制反馈环路为快反馈环路,用于捕捉及反馈小范围内频率快速抖动。在实际应用中,将两个环路设计成并联模式,两路控制输出信号相互独立地作用各自反馈端口。电流调制反馈环路的数学模型与 PZT 环路相同,电流调制端口调频增益^[2]在一定范围内也是线性的。对于电流调制端口的调节增益测量与上节 PZT 的测量方法相似,设置 Scan 模块的 Output 为 Main Out,进行测量即可,这里不再赘述。因此,文中仅针对拉曼激光锁相 PZT 环路进行设计及仿真,进而验证文中所提出参数设计方法的正确性。

根据第 3 节提出的参数优化方法对 PI 调节器相角进行遍历,设计 θ 角从 $\pi/100$ 开始,以 $\pi/500$ 为步长,进行递增,相角裕度必须选取为正。给定相角裕度 φ ,通过 MATLAB 解方程,可以获得参数 R_1 、 C_1 、 C_2 的值。为了使锁相环系统性能达到最优,研究调节器相角 θ 及相角裕度 φ 对系统暂态性能的影响。

首先研究相角裕度对系统暂态性能的影响,在优化算法中,给定相角裕度不同的值,运行程序即可获得参数解集。图 7(a)所示,相角裕度分别为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 80° ,选取调节器相角为 9° 的闭环系统阶跃响应曲线。

从图 7(a)中可以看出,相角裕度越大,阶跃响应曲线的波动越小。当相角裕度为 30° 时,超调量很高,导致较大的控制信号出现,会对激光器造成损害。一般要求超调量尽可能地小,系统调整时间也会越短。

同理,研究 PI 相角对系统暂态性能的影响。图 7(b)所示为 PI 相角 θ 分别为 1.8° 、 5.4° 、 9.0° 、 12.6° 、 16.2° ,选取相角裕度为 80° 的单位阶跃响应曲线。从图 7(b)中看出,在相角裕度为 80° 的超调量的基础上,调节器相角越大,系统超调量也越大。表明在获得相同相角裕度的情况下,还可以进一步通过调节参数来微调系统的暂态性能。

通过以上分析,相角裕度和调节器相角都会对系统暂态性能产生影响。根据图 7 中曲线特点,选取相角裕度为 80° ,调节器相角为 9° 的参数值,进行该系统在时域和频域上的性能验证。此种情况参数解为 C_1 约为 0.27 pF , C_2 约为 97 pF , R_1 约为 $2 \text{ k}\Omega$,将该

参数值带入闭环传递函数中,可仿真系统的单位阶跃响应、幅相频特性。图 8(a)所示为系统的单位阶

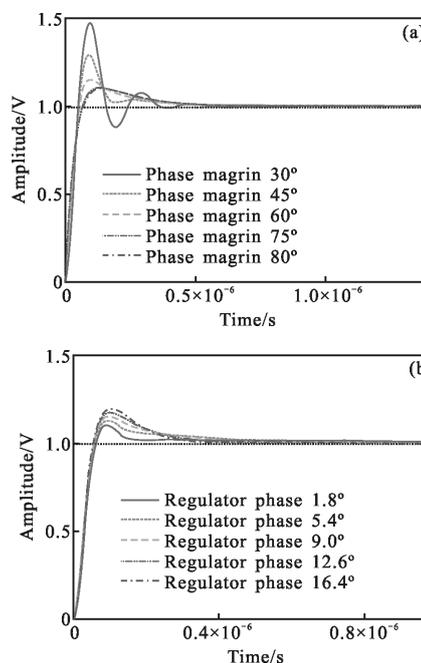


图 7 锁相环系统单位阶跃响应曲线
Fig.7 Unit step response curve of PLL

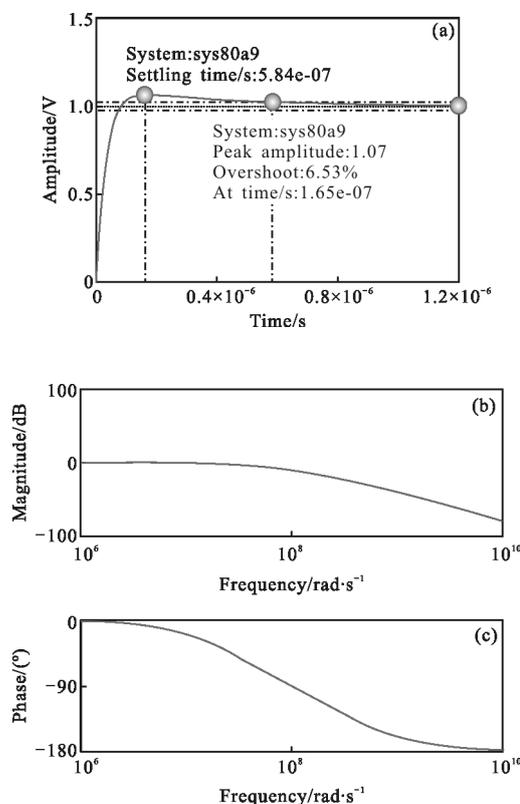


图 8 锁相环系统性能仿真图
Fig.8 Performance simulation of PLL system

阶跃响应,系统的阶跃响应的超调量为 6.53%,调整时间约为 $0.584\mu\text{s}$ 。图 8(b)为闭环系统的伯德曲线图。从伯德曲线图可以看出在开环带宽附近,幅频特性曲线光滑,没有凸起。表明在该参数值下,系统稳定

且暂态性能良好。

同时为了更进一步验证环路滤波器参数的正确性,通过对锁相环系统的各个模块进行 Simulink 建模及仿真,仿真模型如图 9 所示。

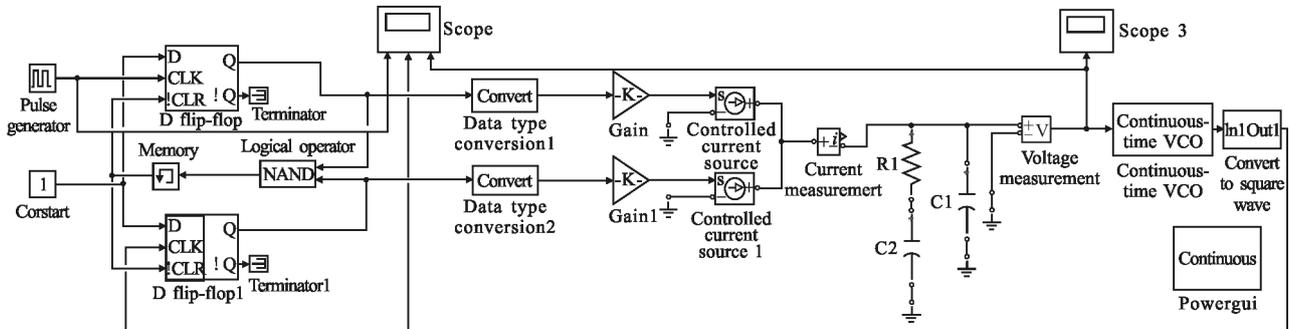


图 9 锁相环 Simulink 仿真模型

Fig.9 Phase locked loop Simulink simulation model

具体参数设置如下:参考信号频率 100 MHz,设电荷泵的电增益 K_d 为 $5\text{e}-5\text{A}$,环路带宽 31.4 MHz。 φ 相角裕度为 80° , θ 调节器相角取 9° , VCO 的调节增益由外腔式半导体激光器 PZT 调节增益测量值代替, K_0 为 300 MHz/V, C_1 约为 0.27 pF, C_2 约为 97 pF, 约为 $2\text{ k}\Omega$ 。

图 10(a1)~(a3)为 Simulink 建模锁相过程曲线,图 10(a1)中曲线为参考信号,图 10(a2)中曲线为 VCO 输出信号,图 10(a3)中曲线则为控制电压信号。最终控制电压稳定在 0.33 V,则代表系统锁相成功且锁定时间约为 $2\mu\text{s}$ 。图 10(b1)~(b3)为锁相环锁定后的波形,从图中可以看出锁相环的仿真效果很好,进而可以验证文中所提出光学锁相环参数设计

方法的正确性。

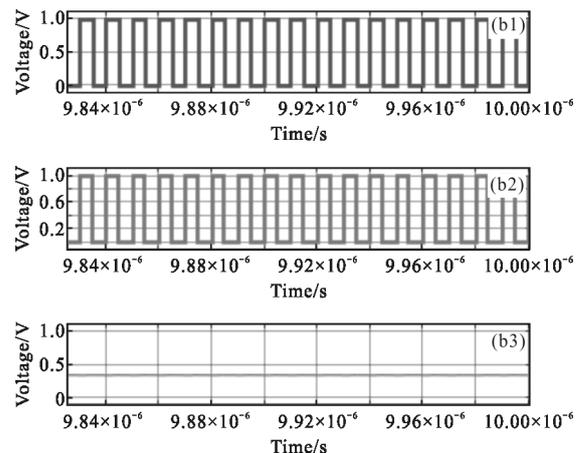
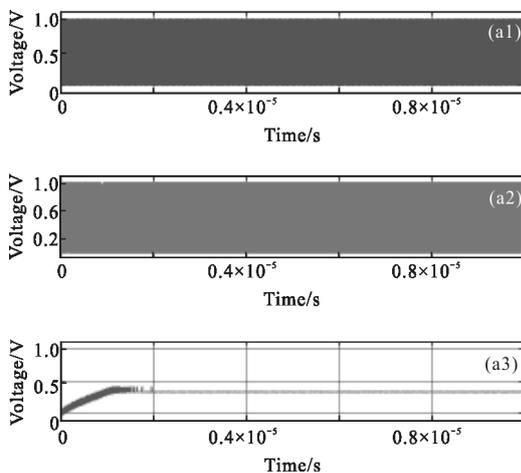


图 10 锁相环 Simulink 建模锁定曲线

Fig.10 Simulink modeling locking curves of PLL



5 结论

文中提出了一种拉曼激光光学锁相环参数设计方法,验证了相角裕度、PI 调节器相角与系统暂态性能超调量的关系。为了精确地设计拉曼激光光学锁相环参数,根据消多普勒饱和吸收谱的机理,设计了饱和吸收谱实验装置,测量了外腔式半导体激光器 PZT 端口的增益参数。最后,通过对拉曼激光光学锁相环系统进行 Simulink 建模及仿真,仿真结果验证了文中提出方法的正确性。与其他设计方法相比,文中方法计算合理并且能够更进一步优化环路滤波器

参数,通过 MATLAB 优化算法,能够同时获取多组参数解,更加方便进行参数对比,可以选取系统性能更优的参数。在工程上应用中,对于光学锁相环路滤波器参数的设计,文中设计方法更加方便而且有效。

参考文献:

- [1] Zheng Jiyu, Zhang Juesheng, Wan Xiping, et al. Phase Locked Technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
郑继禹, 张厥盛, 万心平, 等. 锁相技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [2] Chang Shuai, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, et al. Optical phase-locked loop technology in inter-satellite high-speed coherent laser communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0206004. (in Chinese)
常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206004.
- [3] Park H C, Lu M Z, Bloch E, et al. 40 Gbit/s coherent optical receiver using a Costas loop [J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): B197-B203.
- [4] Meng Zengming, Huang Lianghui, Peng Peng, et al. Raman coupling in atomic Bose-Einstein condensed with phase-locked laser system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 172-177. (in Chinese)
孟增明, 黄良辉, 彭鹏, 等. 光学相位锁定激光在原子玻色-爱因斯坦凝聚中实现拉曼耦合[J]. 物理学报, 2015, 64(24): 172-177.
- [5] Schmidt M, Prevedelli M, Giorgini A, et al. A portable laser system for high-precision atom interferometry experiments[J]. *Applied Physics B*, 2010, 102(1): 11-18.
- [6] Shi Hongxiao. Research on optical phase locked loop [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
石宏霄. 光学锁相环技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [7] Zhang Tao, Zhang Liang. Parameters' design and analysis of the charge pump phase-locked loop's loop filter[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(9): 87-90. (in Chinese)
张涛, 陈亮. 电荷泵锁相环路滤波器参数设计与分析[J]. 现代电子技术, 2008, 31(9): 87-90.
- [8] Lian Jiqing, Chen Dayong, Zhai Hao. Design and optimization of charge pump PLL's loop filter [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2015, 38(1): 38-43. (in Chinese)
廉吉庆, 陈大勇, 翟浩. 电荷泵锁相环路滤波器的设计与优化[J]. 时间频率学报, 2015, 38(1): 38-43.
- [9] He Guojun, Li Rongkuan. Design of CP-PLLs second-order passive loop filter[J]. *Microelectronics*, 2015, 45(2): 184-187. (in Chinese)
何国军, 李荣宽. 电荷泵锁相环 2 阶无源环路滤波器的设计[J]. 微电子学, 2015, 45(2): 184-187.
- [10] Liu Wei. Engineering Design Methods of Automatic Regulating System[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
刘维. 自动调节系统的工程设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [11] Ma Huijuan, Ru Ning, Wang Yu. Comparison between two frequency stabilization methods of external cavity diode laser for atom gravimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0106002.
- [12] Xiao Shumei, Mei Haiping, Huan Honghua, et al. Measuring current-induced frequency modulation ratio in semiconductor diode laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S): 74-77. (in Chinese)
肖树妹, 梅海平, 黄宏华, 等. 半导体激光器电流频率调制率的测量[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(S): 74-77.