

激光与光电子学进展

基于光学锁相环的三波长大范围快速移频研究

赵延会¹, 杨敏², 于广礼^{2,3}, 丁建永^{1,2}, 陈卫标^{1,3*}, 胡芳仁^{1**}¹南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210046;²南京先进激光技术研究院先进全固态激光技术研发中心, 江苏 南京 210038;³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 三频比率技术是钠多普勒激光雷达探测大气中层顶区温度和风场的重要技术, 实现三频比率技术要求发射的三束 589 nm 波长激光(f_+ , f_0 , f_-) 频率稳定、频率切换速度快以及两个频率(f_+ , f_-) 相对中心频率(f_0) 偏频锁定 630 MHz。为满足上述技术需求, 提出一种基于光学锁相环(OPLL)实现三频比率技术的方案。利用 OPLL 实现偏频锁定, 偏频锁定范围为 $\pm(200\sim 2500)$ MHz, 最小步进为 200 kHz, 拍频信号抖动在 ± 50 Hz 以内。通过设置移频值和改变误差信号的极性, 使从激光器波长不断变化, 实现三波长输出。优化 PID(proportional, integral, derivative) 电路, 提高了拍频信号的稳定性, 减小了频率切换时间, 切频时间小于 10 ms。实验结果表明, 该 OPLL 系统可以实现三个频率快速切换锁定, 满足三频比率技术需求。

关键词 偏频锁定; 光学锁相环; 快速切频; 三频比率技术

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230954

Three-Wavelength Wide-Range Fast Frequency Shift Based on Optical Phase-Locked Loop

Zhao Yanhui¹, Yang Min², Yu Guangli^{2,3}, Ding Jianyong^{1,2}, Chen Weibiao^{1,3*}, Hu Fangren^{1**}¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, Jiangsu, China;²Advanced All Solid State Laser Technology R&D Center, Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210038, Jiangsu, China;³Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Three-frequency ratio technology is important for sodium Doppler lidar to detect the temperature and wind field in the mesosphere. To realize this technology, three emitted lasers with 589 nm wavelength (f_+ , f_0 , f_-) should be frequency stable, the frequency switching speed should be fast and the two frequencies (f_+ , f_-) should be frequency locked to 630 MHz relative to the central frequency (f_0). In order to meet the above technical requirements, a scheme based on optical phase-locked loop (OPLL) is proposed to realize three-frequency ratio technology. The OPLL is used to realize frequency offset locking. The frequency offset locking range is $\pm(200\sim 2500)$ MHz, the minimum step is 200 kHz and the jitter of the beat signal is within ± 50 Hz. By setting the frequency shift value and changing the polarity of the error signal, the wavelength of the slave laser is constantly changed, and the three-wavelength output is realized. The PID (proportional, integral, derivative) circuit is optimized to improve the stability of the beat signal, reduce the frequency switching time and the frequency cutting time is less than 10 ms. The experimental results show that the OPLL system can realize fast switching and locking of three frequencies and meet the technical requirements of three-frequency ratio technology.

Key words offset locking; optical phase-locked loop; fast frequency cut; three-frequency ratio technology

1 引言

温度和风场作为大气探测的重要数据, 是探索气

候变化、研究大气化学、预报空间天气等的重要参数和依据^[1-2]。中层顶区存在着大量钠、钾、钙、铁等金属原子^[3], 其中钠原子的含量和散射截面较高。以钠原子

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-04-20; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-07-12

通信作者: *wbchen@mail.shnc.ac.cn; **hufr@njupt.edu.cn

为示踪物研制的三频钠多普勒激光雷达可高精度地同时探测中层顶区的温度和风场。然而,钠多普勒激光雷达发射的三束 589 nm 波长脉冲激光被要求长期锁定在钠原子 D_{2a} 谱线的峰值点处和两翼处,两处的波长频率相差 630 MHz。为减少钠含量本身变化对探测结果的影响,还需要这三束脉冲激光能够快速循环切换^[4]。利用饱和吸收技术可以将 589 nm 波长激光长期锁定在钠原子 D_{2a} 谱线的峰值点上^[5]。对于两翼处的波长,有两种方式获得:第一种是直接对 589 nm 波长激光移频 ± 630 MHz^[6];第二种是先对 1064 nm 波长激光移频 ± 630 MHz 得到三束 1064 nm 波长激光,再将三束 1064 nm 波长激光与 1319 nm 波长激光和频得到三束 589 nm 波长激光。

钠激光雷达自 1969 年的基于染料技术发展到现在,其性能不断提升,探测目标由一个提升到温度、风场和大气动量通量三个目标^[9-10],获得了众多大气中的高层科研数据和观测资料。目前,国际上钠荧光激光雷达仍然将一对级联声光移频器和波长选择器^[11]作为其移频系统实现三波长输出。声光移频器对峰值点处波长进行移频,得到两翼处的波长;波长选择器对三个频率进行快速选择。2009 年,中国科学院空间科学与应用研究中心研发了我国首台钠多普勒激光雷达^[12],该激光雷达可同时进行大气中层温度和风场的探测,它利用移频 $+630$ MHz 和 -630 MHz 的两个声光移频器作为移频系统对 1064 nm 波长激光移频。2017 年夏媛等^[13]设计的全固态钠多普勒激光雷达的移频系统由两个声光移频器和光纤开关组成,声光移频器对 1064 nm 波长激光移频 $+585$ MHz 和 -585 MHz,光纤开关对三束 1064 nm 波长激光快速选择。移频系统采用全光纤连接,光路受环境干扰小,系统更加稳定。目前市售的声光移频器很难满足对 1064 nm 或 589 nm 波长移频 630 MHz,系统应用还是主要依赖定制进口器件,而且

声光移频器的移频值越大效率越低。

为了实现三波长频率快速切换锁定,本文设计了一种钠多普勒激光雷达的移频系统,利用光学锁相环(OPLL)^[14-15]技术对 1064 nm 波长激光快速移频 ± 630 MHz 获得三波长。该 OPLL 系统可以实现 $+(200\sim 2500)$ MHz 和 $-(200\sim 2500)$ MHz 范围的移频。通过单片机(CPU)周期性地修改误差信号极性,可以使从激光器周期性地正移频和负移频,实现三波长输出。优化系统中的 PID (proportional, integral, derivative) 电路,增加了频率锁定时的稳定性,并减小了误差信号到激光器的时间,缩短了从激光器波长切换时间,实验测得波长快速切换时间小于 10 ms。该 OPLL 系统结构简单、频率稳定性高、移频范围可选、频率切换快,能够满足三频比率技术对三频脉冲激光的要求。

2 OPLL 系统设计

2.1 OPLL 基本原理

OPLL 是由电学锁相环演变而来的,是一种反馈系统,其基本结构^[16]如图 1 所示。光电探测器(PD)将主激光器(master laser)和从激光器(slave laser)的拍频光信号转换成拍频电信号,拍频电信号输入到鉴频鉴相器(PFD)中与参考信号做对比,根据对比结果输出误差信号,经过环路滤波器(loop filter)^[17]滤除误差信号高频噪声,误差信号的低频部分作为反馈信号(feedback signal)以调节从激光器的波长,使拍频信号发生改变。不断地将拍频电信号与参考信号进行对比,输出反馈信号调节从激光器,当两激光器的频率相对锁定时,拍频电信号的频率等于参考信号的频率。假设主激光器输出的波长是稳定的,待系统锁定时,从激光器将与主激光器保持固定的频差,该频差大小即为参考信号频率。改变参考信号频率可以使拍频信号发生改变,便实现了两个激光器不同范围的偏频锁定。

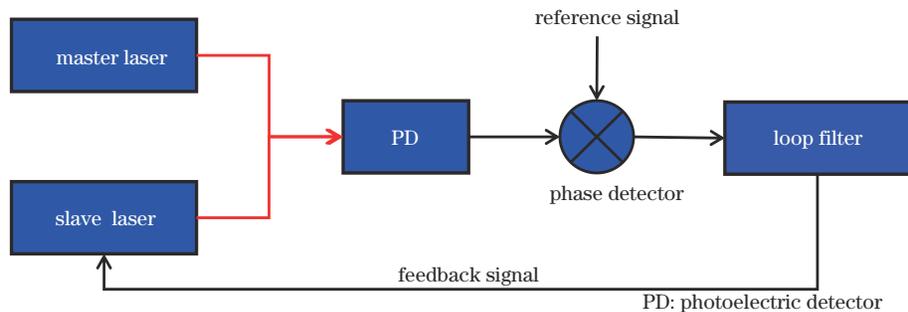


图 1 OPLL 基本原理图

Fig. 1 Basic schematic diagram of OPLL

2.2 实验装置

基于 OPLL 的三波长快速切频锁定系统如图 2 所示。将分布式自反馈(DFB)激光器^[18]作为主激光器和从激光器,主激光器利用激光稳频技术进行频率稳

定,从激光器利用压控恒流源驱动,控制电压注入到从激光器上的电流,驱动电路可外接调制信号。为了方便监测波长,用分束器(beam splitter)将主激光器和从激光器各分为两束光,一束光用于监测,另一束光经过

耦合器(optical coupler)输出拍频光信号。

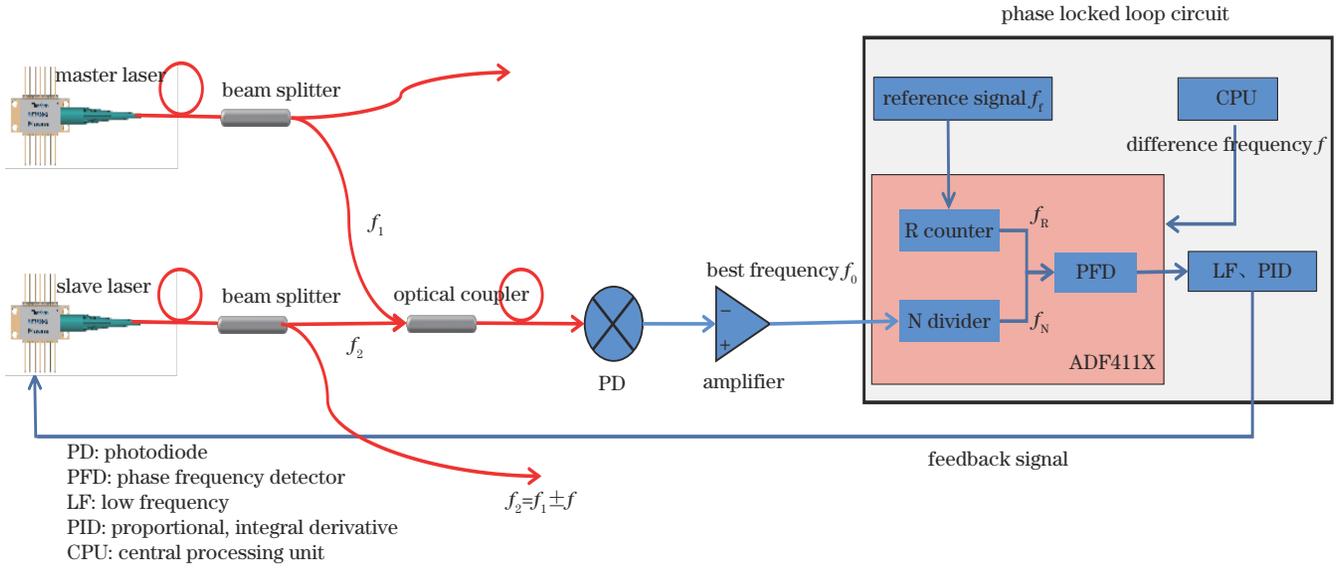


图2 基于OPLL的三波长输出系统

Fig. 2 Three-wavelength output system based on OPLL

假设主激光器和从激光器输出两个沿 z 轴传播的单色波,频率分别为 ω_1 和 ω_2 ,那么它们的波函数为

$$E_1 = a \cos(k_1 z - \omega_1 t), \quad (1)$$

$$E_2 = a \cos(k_2 z - \omega_2 t), \quad (2)$$

式中: a 为振幅; k_1, k_2 为相位。两束光合成后的光波强度为

$$I = 4a^2 \cos^2(k_m z - \omega_m t) = 2a^2 [1 + \cos 2(k_m z - \omega_m t)], \quad (3)$$

式中: $\omega_m = (\omega_1 - \omega_2)/2$; $k_m = (k_1 - k_2)/2$ 。根据式(3)可知拍频频率^[19-20]为 $2\omega_m$ 。

使用PD将此拍频光信号转换成拍频电信号(best frequency),但由于拍频电信号功率小于 -10 dBm,无法满足PFD的输入功率要求,需要将功率进行放大。采用的射频放大器(amplifier)为Mini-Circuits生产的ZX60-3018G-S+,放大后功率提升至 -2 dBm。

PFD采用ADI公司生产的ADF411X频率合成器芯片,该芯片主要由低噪声数字PFD、可编程基准N分频器(N divider)和参考R分频器(R counter)等构成。低相位噪声的PFD对波长稳定性影响小。可编程基准N分频器由两个可编程的A、B计数器以及双模预分频器P组成,可对拍频信号进行N分频。参考R分频器可对参考信号(reference signal)进行R分频^[21]。正如上述通过改变参考信号频率可以实现不同范围的偏频锁定,保持参考信号不变,对拍频信号进行N分频,改变N分频值,同样可以实现不同频率锁定。

参考信号频率选为 20 MHz,分频值 R 设为 100 ,参考频率 F_r 经过R分频器分频后得到基准频率 f_R :

$$f_R = F_r / R = 200 \text{ kHz}. \quad (4)$$

分频值 R 确定后,N分频器的分频值 N 主要由差

频 f (difference frequency) 确定,设定差频 f 后可以确定 N 分频值:

$$N = PB + A, \quad (5)$$

$$K = f / (f_r \cdot P), \quad (6)$$

式中: B 取式(6)计算时的整数部分; A 取式(6)计算时的余数部分; P 选取 $8/9, 16/17, 32/33$ 和 $64/65$ 中的一个值。

拍频信号 f_0 经过 N 分频后得到倍频信号 f_N :

$$f_N = f_0 / N. \quad (7)$$

根据式(5)~(7)可知,分频值 N 的大小由差频值 f 确定。当系统锁定后, $f_R = f_N$, 此时可以得到拍频频率 $2\omega_m$ 等于差频 f , 主激光器的频率为 f_1 , 从激光器的频率 $f_2 = f_1 \pm f$ 。通过上位机与CPU进行通信,修改差频 f 便可使拍频频率 $2\omega_m$ 发生改变,实现不同范围的频率锁定。

控制误差信号极性,使系统反馈性质(正反馈或负反馈)改变,从激光器进行正移频锁定和负移频锁定,从而实现三波长输出。误差信号极性变化的电路图如图3所示,经过RC(resistor-capacitance)滤波电路(loop filter)滤除误差信号(error signal)的高频噪声,误差信号的低频部分被运算放大器U1、U2分别进行同相放大和反相放大,同相放大不改变误差信号极性,反相放大改变误差信号极性。同相放大和反相放大的信号分别输入到模拟开关S1的通道1和通道2,模拟开关S1接收CPU发送的开关指令(switth order),导通通道1或通道2。通道1导通时,误差信号极性为正,反馈系统为正,从激光器正移频;通道2导通时,误差信号极性为负,反馈系统为负,从激光器负移频,这样便实现了从激光器的正移频和负移频。

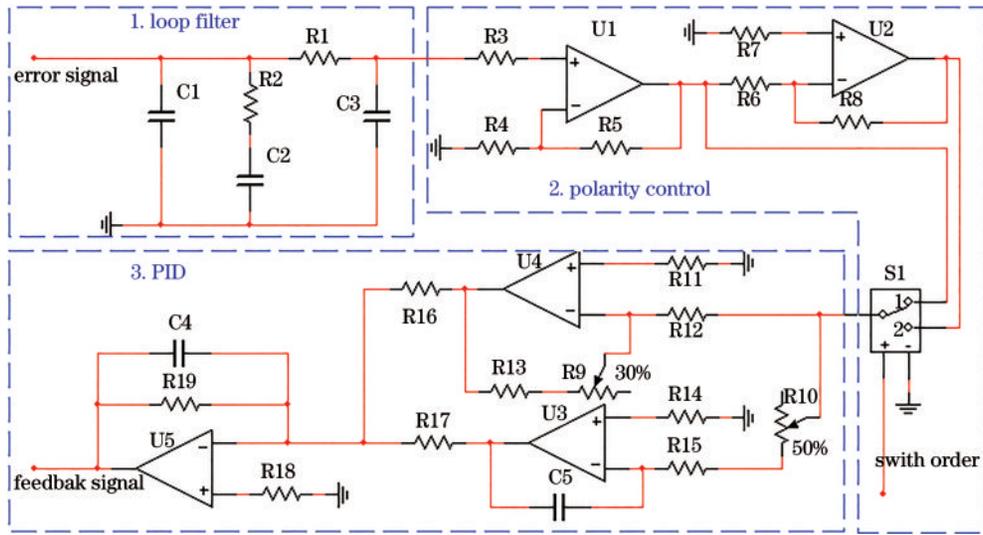


图 3 OPLL系统的反馈回路
Fig. 3 Feedback loop of OPLL system

脉冲振荡会造成系统频率不稳定,为减小电流过冲引起的脉冲振荡,反馈回路中加入PID电路。PID电路虽然可以减小脉冲振荡,但是过长的积分时间会导致反馈时间变长,影响频率切换时的锁定时间。优化PID参数,使积分时间缩短,整个系统反馈时间延长,从激光器切频时间缩短到2~8 ms。

3 实验结果与分析

实验中主激光器作为基于固态和频技术的钠多普勒激光雷达的1064 nm波长激光器,采用碘分子边线稳频^[22-23]进行频率稳定。采用德国Highfinesse波长计WS7测得其频率如图4所示,主激光器中心频率为281.6224578 THz,2 h内频率稳定性为 2.048×10^{-7} THz。

首先验证锁相环系统的移频范围,设置误差信号极性为负,整个系统为负反馈系统,分别测试移频-200 MHz和-2500 MHz的频率稳定性,锁定后从激光器的频率如图5所示。图5(a)为设定移频200 MHz

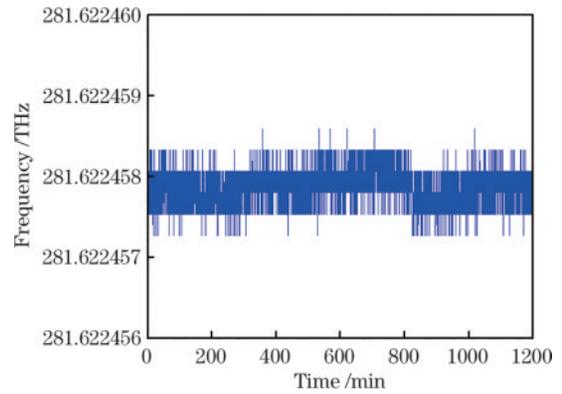


图 4 主激光器频率
Fig. 4 Frequency of master laser

时从激光器的频率,中心频率为281.6222586 THz,2 h内频率稳定性为 3.615×10^{-7} THz。主激光器的平均频率与从激光器的平均频率相差199.2 MHz,与设定移频200 MHz近似。设置移频2500 MHz时,从激光器的频率如图5(b)所示,其中心频率为281.6199573 THz,2 h内频率稳定性为 $4.516 \times$

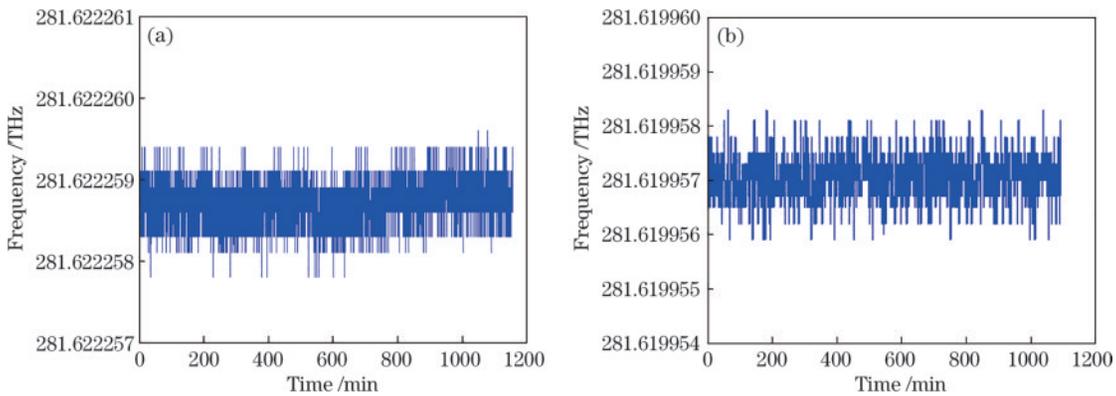


图 5 从激光器频率。(a)差频200 MHz时的从激光器频率;(b)差频2500 MHz时的从激光器频率
Fig. 5 Frequency of slave laser. (a) Slave laser frequency at difference frequency of 200 MHz; (b) slave laser frequency at difference frequency of 2500 MHz

10^{-7} THz。主激光器的平均频率与从激光器的平均频率相差 2500.5 MHz,与设定移频 2500 MHz 近似。同理,将锁相环修改为正反馈系统,即可实现 +200 MHz 和 +2500 MHz 的移频。因此,该 OPLL 系统移频范围可达 $\pm(200\sim 2500)$ MHz。通过微调设置值可以降低移频设置值与实际值之间的误差,该 OPLL 系统的最小移频步进为 200 kHz,可以将误差降低到 100 kHz 或者 100 kHz 以下。

图 5 并不能直观反映出 OPLL 系统的锁定稳定性,因此对拍频信号的频率稳定性进行了测试。从激光器频率的稳定主要取决于 PID 电路的比例单元 P 值, P 数值过大反馈信号会有较高的振荡,造成拍频信号不稳。采用美国 Tektronix 公司的频率计数器 FCA3000 测试 P 值优化前后的拍频信号,表 1 为优化 P 值前拍频信号的稳定性,表 2 为优化 P 值后拍频信号

表 1 P 值优化前的拍频稳定性

Time /ms	Peak-to-peak value /kHz	Allan deviation /kHz	Standard deviation /kHz
1	1117.40	170.26	164.46
100	968.88	155.65	150.39
1000	0.33	0.04	0.05

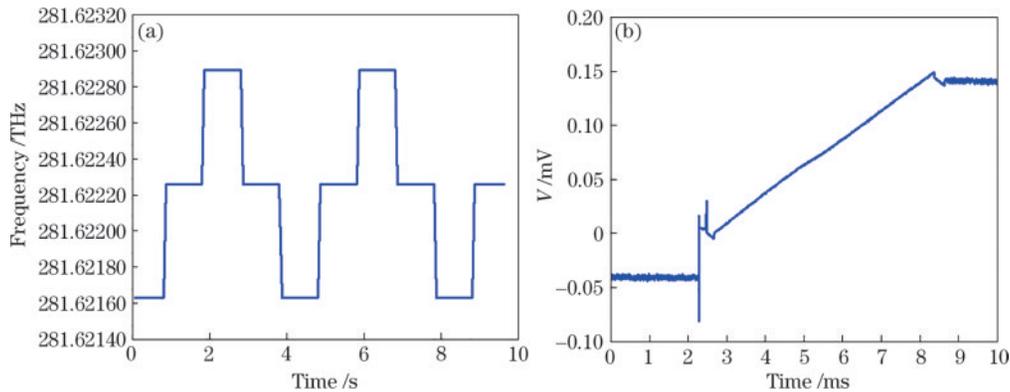


图 6 快速切频锁定的三波长。(a)从激光器输出三波长;(b)切频时间

Fig. 6 Three-wavelength of fast frequency cut locking. (a) Slave laser output three wavelengths; (b) frequency switching time

根据器件手册描述: PFD 可以在百微秒的时间内实现拍频信号与参考信号频率相等;模拟开关 S1 导通速度为百纳秒。对于整个系统来说,这两个器件的响应时间可以忽略。实验发现,影响整个环路中频率锁定时间的主要是 PID 电路的响应速度。PID 电路积分时间过长导致误差信号转换成反馈信号的时间加长,从而导致反馈信号作为调节电压控制从激光器的电流变化变慢。优化 PID 积分时间后,切频速度提高,实验测得反馈信号的电压变化如图 6(b) 所示,反馈电压变化时间约为 6 ms。反馈电压控制从激光器的电流响应时间为百微秒,可忽略。该反馈电压的变化时间(6 ms)即是从激光器的每一次波长的变化时间。实验多次测得的从激光器每次波长变化时间在 2~8 ms。进一步减少 PID 电路积分时间,可实现更快速度的频率切换。

表 2 P 值优化后的拍频稳定性

Time /ms	Peak-to-peak /kHz	Allan deviation /kHz	Standard deviation /kHz
1	941.81	148.24	113.06
100	62.88	12.32	10.51
1000	0.04	0.01	0.01

的稳定性。对比三个时间段内的峰峰值、艾伦方差和标准差,可以看到三个参量有明显改善,1000 ms 时的标准差降到 10 Hz 内,拍频信号的稳定性进一步提升。

该系统的移频值和误差信号的极性由 CPU 控制,在一个周期内差频值先设为 630 MHz,再设为 200 MHz。模拟开关 S1 选择误差信号极性为负的通道 2 导通,两个波长各持续 1 s;2 s 时设置移频 630 MHz,模拟开关 S1 选择通道 1 导通,波长持续 1 s;3 s 时设置移频 200 MHz,模拟开关 S1 导通通道 1,波长持续 1 s。周期性设置移频值和选择通道 1 或 2 导通,从激光器三波长循环输出如图 6(a) 所示。各波长持续时间由 CPU 内部计数器控制,波长持续时间可调。通过 CPU 设置多个移频值和选择通道 1 或 2 导通,可以使从激光器输出多个波长。

4 结 论

本文介绍了一种实现三波长快速切换锁定的 OPLL 系统。设计的 OPLL 系统偏频锁定范围为 $\pm(200\sim 2500)$ MHz,通过周期性设置差频值和改变误差信号的极性,使从激光器周期性地正移频和负移频,进而输出三束不同激光。优化 PID 参数,减小比率单元 P 值和积分时间,拍频稳定性提高,频率计数器测得 1000 ms 时拍频信号的标准差为 0.01 kHz,频率切换时间缩短到约 6 ms。该系统激光偏频锁定范围宽、拍频信号稳定、频率切换速度快,可以三波长循环输出或多波长循环输出,在激光多波长循环输出场合具备极高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 邹旭, 杨红, 符运良, 等. 2018 年 4 月钠层激光雷达观测特性研究[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2019, 32(4): 420-423.
Zou X, Yang H, Fu Y L, et al. Study on sodium layer lidar characteristics during April 2018[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2019, 32(4): 420-423.
- [2] 宋娟. 双波长激光雷达的研制与探测研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2005.
Song J. Development and detection of dual-wavelength lidar[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [3] Gardner C S. Performance capabilities of middle-atmosphere temperature lidars: comparison of Na, Fe, K, Ca, Ca^+ , and Rayleigh systems[J]. Applied Optics, 2004, 43(25): 4941-4956.
- [4] 夏媛, 程学武, 李发泉, 等. 应用于窄带钠风温探测激光雷达的稳频和移频方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 102801.
Xia Y, Cheng X W, Li F Q, et al. Laser frequency stabilization and shifting applied in narrowband sodium lidar system for wind and temperature measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 102801.
- [5] 闫召爱, 胡雄, 郭商勇, 等. 钠原子 D_2 线无多普勒饱和和荧光光谱的测量[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1036-1040.
Yan Z A, Hu X, Guo S Y, et al. Sodium atoms D_2 line doppler-free saturation fluorescence spectra measurements [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1036-1040.
- [6] Kaifler B. Na Lidar at ALOMAR-electrooptic improvements, analysis algorithms, and selected atmospheric observations 80 to 100 km above Northern Norway[D]. Germany: Ulm University, 2009.
- [7] Bowman M R, Gibson A J, Sandford M C W. Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar[J]. Nature, 1969, 221(5179): 456-457.
- [8] She C Y, Vance J D, Kawahara T D, et al. A proposed all-solid-state transportable narrow-band sodium lidar for mesopause region temperature and horizontal wind measurements[J]. Canadian Journal of Physics, 2007, 85(2): 111-118.
- [9] She C Y, Latifi H, Yu J R, et al. Two-frequency lidar technique for mesospheric Na temperature measurements [J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(7): 929-932.
- [10] She C Y, Yu J R. Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region[J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21(17): 1771-1774.
- [11] White M A. A frequency-agile sodium lidar for the measurement of temperature and velocity in the mesopause region[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1999.
- [12] 胡雄, 闫召爱, 郭商勇, 等. 钠荧光多普勒激光雷达测量中间层顶区域大气温度[J]. 科学通报, 2011, 56(3): 247-253.
Hu X, Yan Z A, Guo S Y, et al. Measurement of atmospheric temperature at the top of the mesosphere by sodium fluorescence Doppler lidar[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(3): 247-253.
- [13] 夏媛. 全固态钠层风温探测激光雷达关键技术研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2017.
Xia Y. Research on key technologies of all-solid-state sodium layer wind temperature detection lidar[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [14] Enloe L H, Rodda J L. Laser phase-locked loop[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(2): 165-166.
- [15] Appel J, MacRae A, Lvovsky A I. A versatile digital GHz phase lock for external cavity diode lasers[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(5): 055302.
- [16] 石宏霄. 光学锁相环技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
Shi H X. Research on optical phase-locked loop technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [17] 史雪儿. 光学锁相环路滤波技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
Shi X E. Research on loop filtering technology of optical phase-locked loop[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [18] 王建, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 单段式分布式反馈半导体激光器光学锁相环研究[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401001.
Wang J, Chen D J, Cai H W, et al. Optical phase-locked loop of single section distributed feedback semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401001.
- [19] 张超超, 王建波, 殷聪, 等. 光学锁相环的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210156.
Zhang C C, Wang J B, Yin C, et al. Research progress of optical phase-locked loop[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210156.
- [20] 张超超, 王建波, 殷聪, 等. 基于光学锁相环的高稳定性激光稳频方法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(9): 1154-1160.
Zhang C C, Wang J B, Yin C, et al. Research on frequency stabilization method of high stability laser based on optical phase-locked loop[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(9): 1154-1160.
- [21] 孟增明. 冷原子高效磁阱转移和用于拉曼耦合的光学锁相环系统的研究[D]. 太原: 山西大学, 2016.
Meng Z M. Study on efficient magnetic trap transfer of cold atoms and optical phase-locked loop system for Raman coupling[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.
- [22] 房春奇. 1064 nm 窄线宽稳频全固态激光技术与工程化研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
Fang C Q. Research on technology and engineering of 1064 nm narrow linewidth stable frequency all-solid-state laser[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [23] 卞正兰. 多普勒测风雷达激光稳频与锁相技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
Bian Z L. Research on laser frequency stabilization and phase-locking technology of Doppler wind radar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.