

一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法

葛焯 胡以华 舒嵘 洪光烈

A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator in differential absorption lidar

Ge Ye Hu Yi-Hua Shu Rong Hong Guang-Lie

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 020702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.020702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有限远共轭显微镜光镊设计和误差分析

[Design and error analysis for optical tweezers based on finite conjugate microscope](#)

物理学报.2013, 62(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.100701>

基于金银合金薄膜的近红外表面等离子体共振传感器研究

[Study of Au-Ag alloy film based infrared surface plasmon resonance sensors](#)

物理学报.2013, 62(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060703>

基于多重散射强度和偏振特征的舰船尾流气泡激光探测方法

[Laser detection method of ship wake bubbles based on multiple scattering intensity and polarization characteristics](#)

物理学报.2013, 62(6): 060704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060704>

光镊轴向阱位操控及器件安装误差对径向阱位操控的影响

[Influences of axial position manipulation and misalignments of optical elements on radial trap position manipulation](#)

物理学报.2012, 61(21): 210701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.210701>

镀膜长周期光纤光栅的单峰宽带滤波特性

[Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings](#)

物理学报.2012, 61(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200702>

一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法*

葛焱¹⁾ 胡以华¹⁾²⁾ 舒嵘¹⁾ 洪光烈^{1)†}

1)(中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

2)(解放军电子工程学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2014年7月17日收到; 2014年9月5日收到修改稿)

提出了一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法. 详细介绍了该稳频方法的工作原理和实验装置, 并在理论上对该方法的稳频精度及其影响因素进行了分析. 利用该方法, 在实验中将种子光激光器稳定在水汽的吸收峰中心 (935.6849 nm) 处, 频率抖动的标准差小于 8 MHz. 测试了种子注入后的光学参量振荡器输出的脉冲光的频率抖动, 测试结果表明, 脉冲光频率能够与种子光保持一致, 频率抖动的标准差小于 28.7 MHz, 该稳频结果完全能够满足差分吸收激光雷达的需求.

关键词: 频率稳定, 光学参量振荡器, 差分吸收激光雷达

PACS: 07.60.-j, 42.82.-m, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.64.020702

1 引言

脉冲式差分吸收激光雷达是一种新型的大气探测设备, 它可以远距离探测大气中微量气体的分布和其他气象要素^[1-3]. 这种设备需要高能量、窄线宽的脉冲激光作为光源, 特别是对脉冲激光频率的稳定性要求很高, 需要其波长长期稳定在待测气体的吸收峰中心^[4,5]. 目前大多采用种子注入的光学参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO)^[2,6], 通过腔模锁定技术, 可以使输出的脉冲光频率与种子注入光保持一致^[7], 因此脉冲光频率的稳定度直接由种子光频率的稳定度决定, 需要将种子激光器长期稳定在待测气体的吸收峰中心.

目前最常用的种子激光器频率稳定手段是频率调制稳频技术. 其基本原理是: 通过腔外或者腔内调频技术调制激光的频率, 利用光电探测器探测通过气体池后的光强, 然后将探测到的信号与调制信号混频以获得误差信号, 从而将激光稳定到气体池吸收峰的中心. 然而该方法存在一些缺点: 若采

用腔内调节技术, 则会使输出激光频率一直处于调制状态^[8-10]; 若采用腔外调制, 则需要复杂且昂贵的频率调制设备^[11-13]; 而且传统方法的稳频俘获范围 (capture range) 都不大, 如果激光器受到某种干扰使得频率发生了大幅度变化以至于超出了气体吸收峰的范围后, 则会导致失锁现象. 事实上, 该方法更适用于需要连续锁频的场合, 目前尚无一种能够避免上述缺点、简单易行并适用于差分吸收激光雷达中脉冲式 OPO 的种子激光器的频率稳定方法.

本文提出了一种脉冲间隔扫描式的稳频方法, 可用于稳定差分吸收激光雷达中脉冲式 OPO 的种子激光器, 并在实验中成功地将种子激光频率稳定在水汽的吸收峰中心 (935.6849 nm).

2 新型稳频方法原理

本方法可以用图 1 所示的装置实现, 包括: 种子激光器、气体吸收池、光电探测器、数字采集卡和

* 民用航天“十二五”预先研究项目 (批准号: MYHT-201104) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn

伺服控制系统. 种子激光器输出的连续激光一部分作为种子光注入到OPO中, 另一部分输入到气体池中用于频率稳定. OPO通过腔模锁定技术, 可以输出与种子注入光频率一致的单纵模脉冲激光. 可调谐种子激光器可以根据伺服控制系统给出的信号改变输出激光的频率, 而气体池对不同频率激光的透过率不同, 光电探测器将透过气体池的光信号转换为电信号, 数字采集卡将光电探测器输出的电信号数字化后反馈给伺服控制系统, 伺服控制系统根据该反馈信号控制种子激光器使其频率稳定在气体池吸收峰的中心.

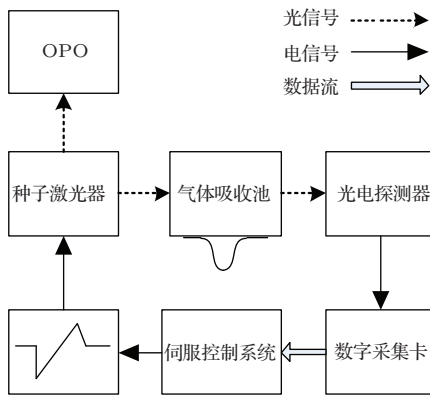


图1 种子激光器的稳频装置

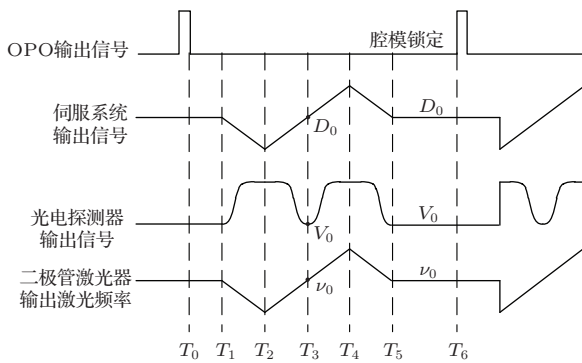


图2 稳频系统的工作时序

整个系统的工作时序如图2所示. T_0 时刻脉冲光发射结束, 延时一段时间后在 T_1 时刻, 伺服控制系统反向扫描至零点. T_2 时刻开始正向扫描, 种子激光器输出的频率同样开始变化, 当激光频率扫描过气体的吸收峰时, 通过气体池后的光强会随着激光频率的变化而变化. 在 T_3 时刻, 激光频率等于气体吸收峰的中心频率 ν_0 , 此时气体对激光的吸收最强, 探测器输出的电信号幅度 V_0 最小, 伺服控制系统记录此时伺服控制系统输出的值 D_0 . 在 T_4 时

刻正向扫描结束, 再次开始反向扫描. 在 T_5 时刻输出值达到 D_0 , 此时激光器的输出频率为 ν_0 , 此后保持该值直至 T_6 时刻, 在 T_5 到 T_6 这段时间内, OPO完成腔模锁定, 保证输出的单纵模脉冲光频率也为 ν_0 .

本方法能够保证种子激光器在OPO的腔模锁定阶段频率保持稳定且无调制; 即使种子激光器的频率受到某种因素的干扰在一定范围内发生跳变, 只要使频率扫描能够覆盖气体池的吸收峰中心, 都不会发生失锁的现象; 而且整个锁频装置简单易行.

3 稳频精度分析

由于气体对于不同频率的光的吸收截面不同, 当种子激光器的波长扫描过吸收峰时, 通过气体池后的光强会有所变化, 用电探测器电路放大后得到的电压信号.

假设探测器电路的等效输入电流噪声为 I_n , 其中包括探测器的噪声和放大器的噪声, 跨阻增益是 R_F , 则总的电压噪声 $V_n = R_F \cdot I_n$.

结合Beer-Lambert定理, 可以得到通过气体池后探测器输出的电压值 V 为

$$V(v) = P_0 \cdot k \cdot \beta \cdot R_F \cdot \exp[-\sigma(v) \cdot N \cdot L], \quad (1)$$

式中 v 是激光的频率; P_0 是输入的光功率; k 是系统的光学效率; β 是探测器的响应度, 单位是 $A \cdot W^{-1}$; R_F 是跨阻放大器的增益; $\sigma(v)$ 是频率为 v 的激光所对应的吸收截面; N 单位体积内吸收气体的分子数密度; L 是光通过气体池的吸收气体长度.

(1)式对 v 求微分可以得到

$$\frac{dV}{dv} = -P_0 \cdot k \cdot \beta \cdot R_F \cdot \tau \cdot \exp(-\tau) \cdot \alpha, \quad (2)$$

式中 $\alpha = \frac{d\sigma/\sigma}{dv}$ 是吸收截面对激光频率的相对变化率, α 在吸收峰的半高处取最大值, 在吸收峰中心处取最小值. 可以认为气体吸收峰符合Voigt线型, 多普勒展宽和压力展宽会使得吸收峰的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 增加, 如果FWHM的值越小, 则吸收峰就越尖锐, α 也就越大; $\tau = N \cdot L \cdot \sigma$ 是气体池的光学厚度 (忽略除吸收以外其他消光因素的影响).

当激光频率的变化量 Δv 很小时, 对应的电压的变化量 ΔV 可以近似表示为

$$\Delta V = \frac{dV}{dv} \Delta v. \quad (3)$$

我们认为, 当 $\left| \frac{\Delta V}{V_n} \right| = 1$ 时, 由于频率变化 Δv 引起的探测电压的变化 ΔV 刚好可以被分辨, 因此,

$$\Delta v = \frac{I_n}{P_0 \cdot k \cdot \beta \cdot \tau \cdot \exp(-\tau) \cdot \alpha}. \quad (4)$$

从(4)式中的可以看出, 提高稳频精度可以通过以下几个方面入手:

- 1) 减小探测电路的噪声 I_n ;
- 2) 增大输入光功率 P_0 ;
- 3) 增大系统光学效率 k ;
- 4) 选择合适的探测器, 增大在测量波长处的响应度 β ;
- 5) 采用低压低温气体池以减小多普勒展宽和压力展宽, 增加吸收截面相对激光频率的相对变化率 α ;
- 6) 选择合适的气体池.

分析(4)式可以得到, 当 $\tau = 1$ 时, Δv 取最小值:

$$\Delta v_{\min} = \frac{I_n \cdot e}{P_0 \cdot k \cdot \beta \cdot \alpha}. \quad (5)$$

将(1)式代入(4)式可以得到

$$\Delta v = \frac{V_n}{V \cdot \tau \cdot \alpha} = \frac{1}{\text{SNR} \cdot \tau \cdot \alpha}, \quad (6)$$

式中 $\text{SNR} = V/V_n$ 是探测器输出信号在稳频点的信噪比, 可以根据上式估算系统的稳频精度.

事实上, 还有一些其他因素也会带来误差, 例如同步控制系统、半导体激光器的电流调制效应等, 很难定量地分析这些误差, 但是后续的实验证明这些误差的影响很小, 基本可以忽略不计.

4 实验装置与结果

实验装置的结构如图3所示. 二极管激光器 (Toptica DL100) 通过恒温和恒流驱动电路控制, 能够输出 935 nm 波段的单模连续激光, 输出线宽小于 4 MHz. 调制注入电流可以调制输出激光的频率, 而电流调制电路可以将电压调制信号转化为电流调制信号, 调制电压与输出激光波长的对应关系大约是 $10 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$. 输出激光经过光纤耦合器分成两束, 其中 95% 的能量作为种子光注入到 OPO 中, 剩余 5% 的能量输入到水汽气体池中用于频率稳定. OPO 可以将 532 nm 的脉冲光转换为 935 nm 的脉冲光, 利用干涉法实现腔模锁定, 使得输出激光为单纵模且频率与种子注入光一致,

脉冲重频是 10 Hz. 气体池里面充满了纯水汽, 气压为 2500 Pa, 吸收长度为 1.6 m, 水汽在波长为 935.6849 nm 处有一个较强的吸收峰, 其光学厚度大约为 0.96, 可以作为频率稳定的参考点. 光电探测器采用的是光电二极管, 用于探测通过气体池后的光信号, 并通过跨阻放大器将电流信号放大为电压信号. 系统的伺服控制系统由模数转换器 (analog to digital converter, ADC)、现场可编程阵列 (field programmable gate array, FPGA) 和数模转换器 (digital to analog converter, DAC) 组成. ADC (100 M/14 bit) 对光电探测器输出的电压信号进行采样, 并将数字化后的结果传送给 FPGA. FPGA 通过采样的结果进行反馈控制, 通过 DAC (20 M/12 bit) 输出反馈信号给电流调制电路以调节激光器的输出频率.

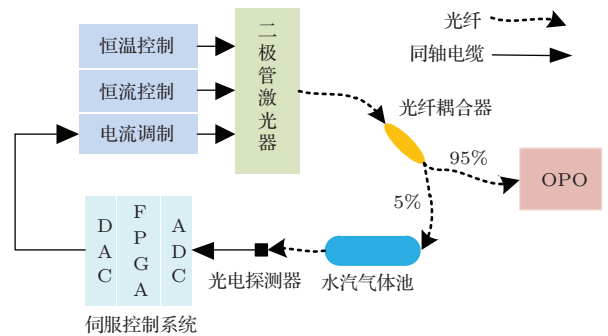


图3 稳频实验装置

系统的波形如图4所示. 利用 OPO 的脉冲信号作为同步触发信号, 脉冲结束后延时 2 ms, FP-GA 控制 DAC 开始扫描程序. DAC 每次步进电压是 10 mV, 对应的波长变化约为 0.1 pm; 整个扫描范围是 0.6 V, 对应的波长变化为 6 pm, 可以覆盖水

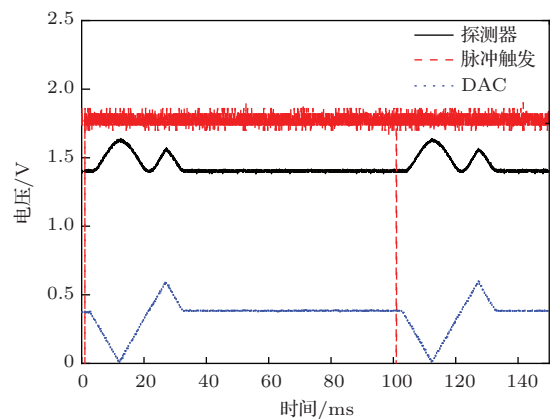


图4 (网刊彩色) 稳频系统的实验波形

汽在 935.6849 nm 处的吸收峰, 整个扫描过程持续 30 ms. 在剩余的 60 ms 内, DAC 输出的控制电压保持在吸收峰的中心波长对应的值, OPO 在此期间完成腔模锁定工作.

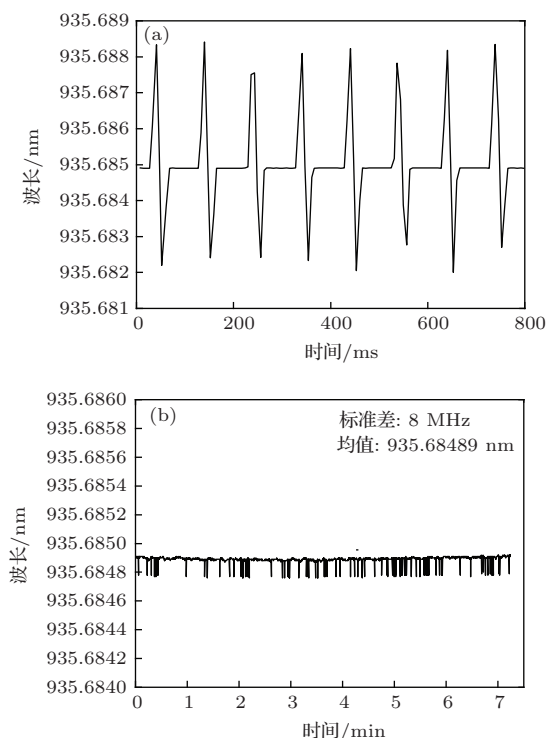


图5 (a) 种子激光器输出激光的波长; (b) 每个周期腔模锁定阶段种子激光器输出激光波长的抽样

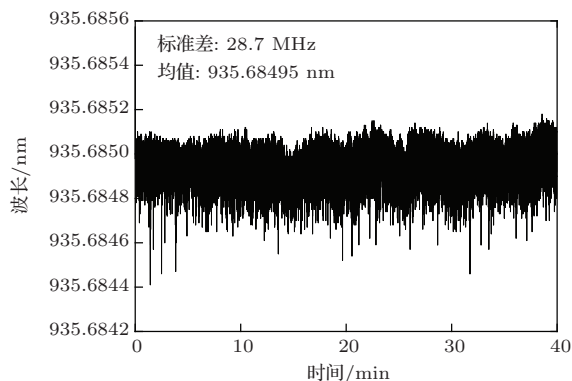


图6 种子光稳频后 OPO 输出脉冲光的波长

利用波长计监视种子激光器的波长, 得到的结果如图 5(a) 所示, 由于波长计的曝光时间为 6 ms, 无法完全真实地反映出激光波长的扫描过程, 但是可以看出波长在腔模锁定阶段十分稳定. 将每个周期腔模锁定阶段的波长抽样出来绘制成曲线如图 5(b) 所示, 对应的频率抖动的标准差为 8 MHz, 可以看到激光波长会出现 0.1 pm 的跳变, 根据上

面的分析, 这是由于在吸收峰处 0.1 pm 的波长变化引起的光强变化过小而无法分辨导致的. 通过 (6) 式可以计算出理论上的稳频精度大约为 0.044 pm, 其中 $SNR \approx 1400$, $\tau \approx 0.96$, $\alpha \approx 0.0168 \text{ pm}^{-1}$, 与实验结果基本符合.

图 6 是种子注入后 OPO 输出的脉冲光的波长测试曲线, 频率抖动的标准差为 28.7 MHz, 中心波长与种子光波长保持一致. 利用该方法得到的稳频精度完全能够满足差分吸收激光雷达探测的要求.

5 结 论

本文提出了一种新型的可用于差分吸收激光雷达中脉冲式 OPO 的种子激光器稳频方法, 在脉冲间隔内完成激光频率的扫描和稳定工作. 该方法能够保证种子激光器输出激光的频率在 OPO 的腔模锁定阶段保持稳定且无调制, 而且稳频俘获范围大, 整个锁频装置简单易行. 利用该方法, 在实验中将种子激光器稳定在水汽的吸收峰 935.6849 nm 处, 频率抖动的标准差小于 8 MHz; 并测试了种子注入后 OPO 输出的脉冲光的频率抖动, 测试结果表明脉冲光频率能够与种子光保持一致, 频率抖动的标准差小于 28.7 MHz, 该稳频结果完全能够满足差分吸收激光雷达的需求.

本文方法中采用气体吸收池作为外部频率参考器件, 在中心波长处透过率最小, 如果采用标准具作为外部频率参考器件, 在中心波长处透过率最大, 同样可以用该方法进行频率稳定, 并且在理论上可以得到更高的稳频精度. 具体效果还有待进一步研究.

感谢导师胡以华教授的悉心指导和陈滔博士的讨论.

参考文献

- [1] Romanovskii O A 2006 *Proc. SPIE* **6594** 65940D
- [2] Poberaj G, Fix A, Assion A, Wirth M, Kiemle C, Ehret G 2002 *Appl. Phys. B* **75** 165
- [3] Amediek A, Fix A, Wirth M, Ehret G 2008 *Appl. Phys. B* **92** 295
- [4] Ambrico P F, Amodeo A, Girolamo P D, Spinelli N 2000 *Appl. Opt.* **39** 6847
- [5] Ansmann A 1985 *Appl. Opt.* **24** 3476
- [6] Fix A, Weiss V, Ehret G 1998 *Pure Appl. Opt.* **7** 837

- [7] Velarde L, Engelhart D P, Matsiev D, LaRue J, Auerbach D J, Wodtke A M 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 063106
- [8] Koch G J, Dharamsi A N, Fitzgerald C M, McCarthy J C 2000 *Appl. Opt.* **39** 3664
- [9] Smith J A, Brown A T, Chu X, Huang W, Wiig J 2008 *Opt. Eng.* **47** 114201
- [10] Zhao Y T, Zhao J M, Huang T, Xiao L T, Jia S T 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1316
- [11] Yoshida M, Kasai K, Hongo J, Nakazawa M 2007 *Proc. SPIE* **6453** 645311
- [12] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [13] Cheng B, Wang Z Y, Wu B, Xu A P, Wang Q Y, Xu Y F, Lin Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104222

A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator in differential absorption lidar*

Ge Ye¹⁾ Hu Yi-Hua¹⁾²⁾ Shu Rong¹⁾ Hong Guang-Lie^{1)†}

1) (Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

2) (State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(Received 17 July 2014; revised manuscript received 5 September 2014)

Abstract

A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator (OPO) in differential absorption lidar (DIAL) is proposed in this paper. The operating principle and the experimental setups are introduced in detail, and the accuracy of the frequency stabilization method and influence factors are also analyzed. The frequency of the seed laser is locked to an absorption line of water vapor (935.6849 nm) in the experiment, and the measured standard deviation of the frequency jitter is less than 8 MHz. The frequency of the seeded OPO signal is recorded thereafter. The standard deviation less than 28.7 MHz with the same frequency according to the seed laser is achieved, which is well applicable to DIAL.

Keywords: frequency stabilization, optical parametric oscillator, differential absorption lidar

PACS: 07.60.-j, 42.82.-m, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.64.020702

* Project supported by the Civil Aerospace Pre-Research Program of "12th Five-Year" Plan of China (Grant No. MYHT-201104).

† Corresponding author. E-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn