

基于分子吸收的脉冲激光锁频方法研究

闫庆^{1,2,3}, 袁萌², 何甜甜², 陈宁², 刘晶晶², 辛文辉², 王骏^{1,2}, 华灯鑫^{1,2,3*}

¹西安理工大学陕西省机械制造装备重点实验室, 陕西 西安 710048;

²西安理工大学激光雷达遥感研究中心, 陕西 西安 710048;

³教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 为满足瑞利高光谱激光雷达对脉冲激光发射单元频率稳定性的需求, 提出基于分子吸收的脉冲激光锁频方法。基于碘分子吸收光谱原理, 采用 GHz 量级峰值保持电路、比例积分微分 (PID) (proportional integration differential 控制算法和精度为 ± 0.02 K 的控温系统, 构建一套脉冲激光锁频系统。首先, 利用 BBO (β -BaB₂O₄) 晶体倍频的 532 nm 连续激光测量精确温控的碘分子吸收池, 获得其 1109 线在不同温度下的吸收光谱, 进而确定了鉴频曲线; 其次, 利用鉴频曲线的拟合方程获得通过碘分子吸收池后脉冲激光能量变化与频移量之间的定量关系及测量灵敏度; 最后, 利用 PID 控制算法对比频率设定值与频移量之间的差异, 将该差异以电压形式反馈于种子激光器, 通过种子激光器的频率改变补偿脉冲激光的频率漂移, 继而实现脉冲激光的动态锁频。实验结果表明: 在 25 min 内脉冲激光的频移小于 ± 2.2 MHz, 瑞利高光谱激光雷达测风误差小于 ± 0.6 m/s, 测温误差小于 ± 0.5 K。

关键词 遥感; 脉冲激光锁频; 分子吸收光谱; 大气参量探测

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1028005

Pulse Laser Frequency Locking Method Based on Molecular Absorption

Yan Qing^{1,2,3}, Yuan Meng², He Tiantian², Chen Ning², Liu Jingjing²,

Xin Wenhui², Wang Jun^{1,2}, Hua Dengxin^{1,2,3*}

¹ Shaanxi Province Machinery Manufacturing Equipment Key Laboratory,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

² Centre for Lidar Remote Sensing Research, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

³ Key Laboratory of NC Machine Tools and Integrated Manufacturing Equipment of Xi'an University of Technology, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Pulsed laser frequency locking method based on molecular absorption is proposed to meet the requirement of Rayleigh high spectral resolution lidar for the frequency stability of pulsed laser emission unit. We construct a pulse laser frequency locking system based on the principle of iodine molecule absorption spectrum, using the GHz magnitude peak holding circuit, proportional integration differential (PID) control algorithm and temperature control system with accuracy of ± 0.02 K. First, the accurate temperature-controlled iodine molecular absorption pool is measured by using BBO (β -BaB₂O₄) crystal frequency-multiplied 532 nm continuous laser, and the absorption spectra of its 1109 line at different temperatures are obtained, so as to determine the frequency discrimination curve. Second, using the fitting equation of frequency discrimination curve, the quantitative relationship between the change of pulse laser energy and the frequency shift and the measurement sensitivity are obtained. Finally, the PID control algorithm is used to compare the difference between the set value of frequency and frequency shift, and the difference is fed back to the seed laser in the form of voltage. The frequency shift of the pulse laser is compensated by changing the frequency of the seed laser, and then the dynamic frequency locking of the pulse laser is realized. The experimental results show that the frequency shift of the pulsed laser is less than ± 2.2 MHz within 25 min, which can make Rayleigh high spectral resolution lidar achieve wind measurement error less than ± 0.6 m/s and temperature measurement error less than ± 0.5 K.

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(41627807, 61605157, 61575159, 41875034)、陕西省自然科学基金(2018JQ4046)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS094)

* E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

Key words remote sensing; pulse laser frequency locking; molecular absorption spectrum; atmosphere parameters detection
OCIS codes 280.3340; 280.6780; 140.3425; 120.0280

1 引 言

在气象学中,温度、风场和气溶胶是描述大气状态的重要特征参量,也是气象预报和云系降水潜力的关键评测参量。因此,大气温度、风场和气溶胶的全天时、高时空分辨率探测^[1-3],对于研究云的形成、降水及大气污染物的扩散机理、提高大气环境预警与预报准确度、研究全球气候变暖对策等具有极其重要的研究意义^[4-6]。近年来,高光谱激光雷达作为一种具有高时空分辨率、高探测灵敏度和高光谱分辨率的主动遥感探测技术,已被广泛应用于大气特征参量探测、激光大气传输、全球气候预测、大气环境监测等研究领域^[7-9]。通常,在光谱分辨率为476.1 MHz,波长为355 nm的条件下,大气气体吸收线半峰全宽中多普勒加宽处于 0.01 cm^{-1} 量级;在光谱分辨率为2999.4 MHz,波长为355 nm的条件下,压力加宽为 0.1 cm^{-1} 量级。以法布里-珀罗标准具和碘分子吸收池作为分光器件的高光谱激光雷达,其光谱分辨率可达百MHz量级^[10]。然而,作为高光谱激光雷达激励源的脉冲激光的中心频率漂移会直接影响高分辨率分光器件的可靠性。因此,脉冲激光中心频率的稳定性是提高大气温度、风场和气溶胶探测精度的重要条件。为提高激光发射系统输出激光的频率稳定性,刘继桥课题组^[11-12]针对多普勒测风激光雷达和高光谱分辨率气溶胶探测激光雷达的应用需求,结合碘分子吸收谱线分别搭建了两套结构紧凑的 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统。Liu等^[13]和Wu等^[14-15]利用碘分子吸收光谱对种子激光器频率进行锁定,锁频后可以实现频率漂移小于百kHz的目的。然而,上述锁频系统都是针对种子激光器输出的连续激光进行锁频,而非对作为激光雷达激励光源的脉冲激光进行锁频。

因此,本文针对脉冲激光的锁频方法进行研究。利用精确控温的分子吸收池作为鉴频器,再采用GHz峰值保持电路获得脉冲激光能量峰值,通过比例积分微分(PID)控制算法对比频率设定值与频移量之间的差异。反馈控制程序根据差异计算出相应的控制信号,并反馈到种子激光器,对种子激光器输出频率进行调谐。种子激光器通过种子注入对脉冲激光器输出激光频率进行调谐,使其输出激光频率漂移逐渐减小并稳定在 $\pm 2.2\text{ MHz}$ 。根据探测理论

可知,等效风速探测误差小于 $\pm 0.6\text{ m/s}$,温度探测误差小于 $\pm 0.5\text{ K}$ 。

2 基本原理

当光辐射通过原子蒸气,其辐射频率相应于原子由基态跃迁到较高能态所需能量的频率时,原子吸收入射光的能量后发生共振吸收,产生原子吸收光谱。由于存在原子热运动,原子吸收谱线并不是一条理想的直线,而是分布在一定频率范围内的展宽线。这种由原子热运动产生的展宽称为多普勒展宽。

多普勒归一化线型函数是以 ν_0 为中心且频率呈对称分布的高斯型函数,可表示为^[16-17]

$$g(\nu) = \frac{c}{\nu_0} \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{1}{2}} \times \exp \left[-\frac{mc^2}{2KT\nu_0^2} (\nu - \nu_0)^2 \right], \quad (1)$$

式中: K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; m 为分子质量; ν_0 为中心频率; c 为光速; ν 为原子吸收光频率。多普勒线型如图1所示。图中 $k_D(\nu_0)$ 为中心频率处归一化分布率, $\Delta\nu_D$ 为分布率谱线的半峰全宽(D为Doppler缩写)。

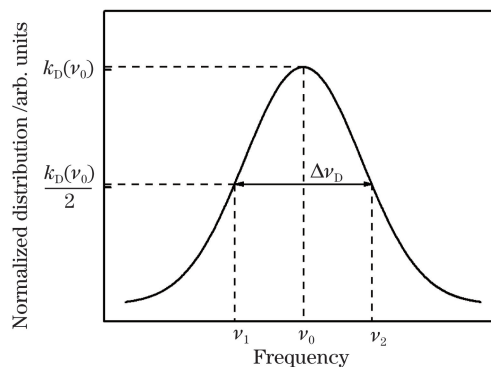


图1 多普勒线型图

Fig. 1 Doppler line graph

激光在通过碘蒸气时被吸收,根据朗伯-比尔定律,假设入射碘蒸气的激光频率为 ν ,光强为 I ,经过碘池长度为 l 的碘蒸气吸收后的光强可表示为

$$I(\nu) = I_0 \exp[-\Gamma g(\nu)l], \quad (2)$$

式中: Γ 为积分吸收系数; $g(\nu)$ 为碘蒸气在频率 ν 处的归一化吸收线型。碘蒸气吸收谱线可表示为

$$k(\nu) = \frac{I}{I_0} = \exp \left\{ \frac{-\Gamma l}{\nu_0} \left(\frac{mc^2}{2\pi KT} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{mc^2}{2KT\nu_0^2} (\nu - \nu_0)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

式中： $k(\nu)$ 为碘池对入射频率为 ν 的激光的相对透过率。

碘分子在 532 nm 波长附近具有多条吸收谱线。由于碘分子吸收 1109 线侧翼的线性好,且线性范围较大,因此常被用来在锁频系统中进行鉴频^[18]。图 2 为仿真得到的 328 K 时长度为 100 mm 碘池 1109 吸收线。当激光频率为 ν_1 时,碘池相对透过率为 $k_1=k(\nu_1)$,当激光频率为 ν_2 时,碘池相对透过率为 $k_2=k(\nu_2)$ 。激光频率 ν 与碘池相对透过率 k 具有线性关系,如图 2 所示,这样就可将对激光频率变化的探测转化为对透过碘池后激光强度变化的探测,线性区斜率为碘分子吸收线的鉴频灵敏度。由于温度决定多普勒展宽谱线的线形,见(1)式,进而影响碘分子吸收线的鉴频灵敏度,因此,需要对不同温度下的碘分子吸收谱线进行比较,挑选鉴频灵敏度较大的线性区进行鉴频。

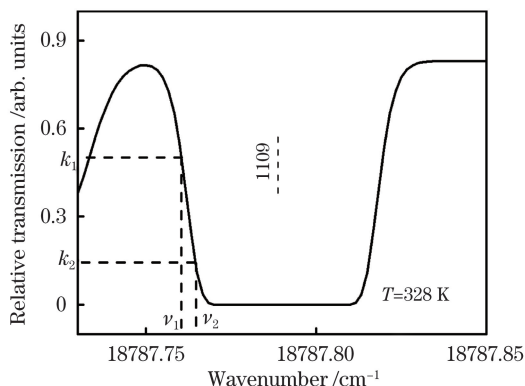


图 2 碘分子吸收 1109 线

Fig. 2 1109 line of iodine absorption

PID 控制是对实测值与目标值之间的偏差进行比例、积分和微分变换,并根据这三项的和计算出相应的反馈控制信息,加载到执行机构上,对执行机构进行调控,不断减小偏差^[19]。其算法为

$$m(t) = K_p \left[\epsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right], \quad (4)$$

式中： $\epsilon(t)$ 为偏差； K_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数。

比例系数 K_p 用于调节控制作用的强弱,比例系数越大,控制作用越强,系统稳态误差越小。但过大的比例系数不仅不会起到控制作用,反而会使系统不稳定。当系统存在稳态误差时,积分控制项数值逐渐增大,积分控制作用会逐渐增强,使系统的稳态误差不断减小,最终实现稳态误差的消除。当稳态误差为零时积分控制项就会为零,积分控制作用停止。微分控制项是对偏差求导,得到偏差变化的速

度和方向。因此,微分控制项可以预测偏差,产生超前的校正作用,从而加快系统响应速度,改善系统的动态性能。

3 实验系统设计

图 3 为脉冲激光锁频系统方案。种子激光器 (seeder) 为一台线宽为 1 kHz 的超窄线宽激光器,通过种子注入实现 Nd:YAG 脉冲激光器输出与种子激光同频的高功率单纵模脉冲激光。二倍频后分束镜 BS_1 分出 50% 能量用于锁频系统。 BS_2 再将 50% 能量 532 nm 单纵模脉冲激光分为两路,反射光束经过碘分子吸收池后用光电探测器 PD_1 探测其能量。透射光束用光电探测器 PD_2 探测能量。使用两块峰值采样保持电路分别提取两路激光脉冲能量峰值,利用测控系统将两路峰值电平作除法,以获得碘池相对透过率。PID 算法根据碘池实时相对透过率与设定的目标透过率之间的偏差计算出相应的控制信号,通过采集卡模拟输出端口反馈给种子激光器。反馈控制信号不断调谐种子激光器输出的激光频率,进而使 Nd:YAG 脉冲激光器输出的激光频率偏差不断减小并稳定在设定范围内,最终实现锁频。

图 4 为对 100 mm 碘池在不同温度下的吸收谱线进行测量的实验系统。窄线宽种子激光器 (seeder) 输出 1064 nm 单纵模激光经保偏分路器 (PBS) 后分为两路,其中一路用波长计监测其波长,另一路经掺镱光纤放大器 (YDFA) 放大后,用 BBO (β -BaB₂O₄) 倍频晶体倍频。因为倍频效率有限,经过倍频得到的 532 nm 连续激光中依然存在 1064 nm 的激光。因此,采用一片 532 nm 窄带滤光片对 1064 nm 的激光进行滤除,再经分束镜分为两路,一路经过碘池吸收并用光电倍增管 PMT_1 探测其能量,另一路直接用光电倍增管 PMT_2 探测其能量。示波器对 PMT_1 和 PMT_2 输出的两路电压值作除,获得碘池的相对透过率。

在碘池吸收谱线测量实验和脉冲激光动态锁频系统中探测碘池相对透过率时,均是对经过碘池吸收和未经过碘池吸收的激光能量进行探测并作除得到碘池的相对透过率。这种作除获得相对透过率的方法可以消除入射激光能量变化对相对透过率的影响。同时,由于所使用的两个 PMT 型号相同,两个 PD 型号也相同,因此作除会将光电转换系数约掉。故碘池吸收谱线测量实验中用到的光电转换器件与锁频系统的不同也不会使碘池相对透过率的探测产生差异。

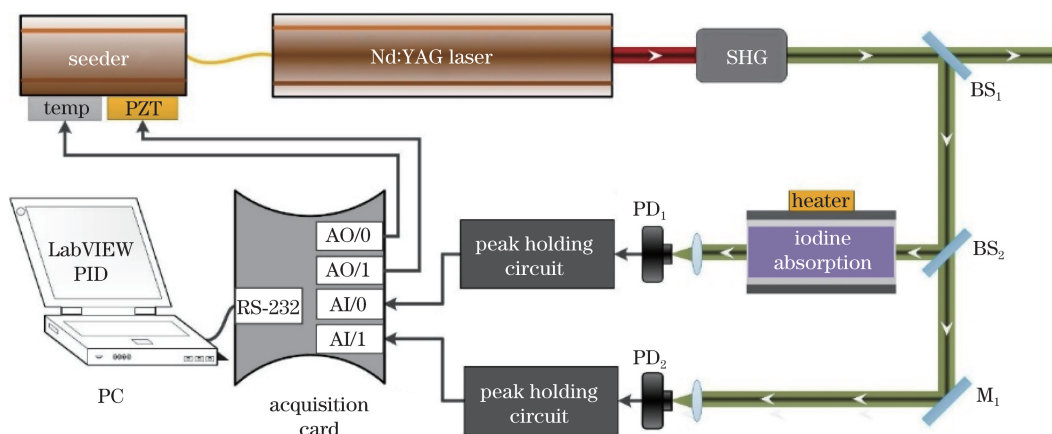


图 3 脉冲激光动态锁频系统图

Fig. 3 Diagram of pulse laser dynamic frequency locking system

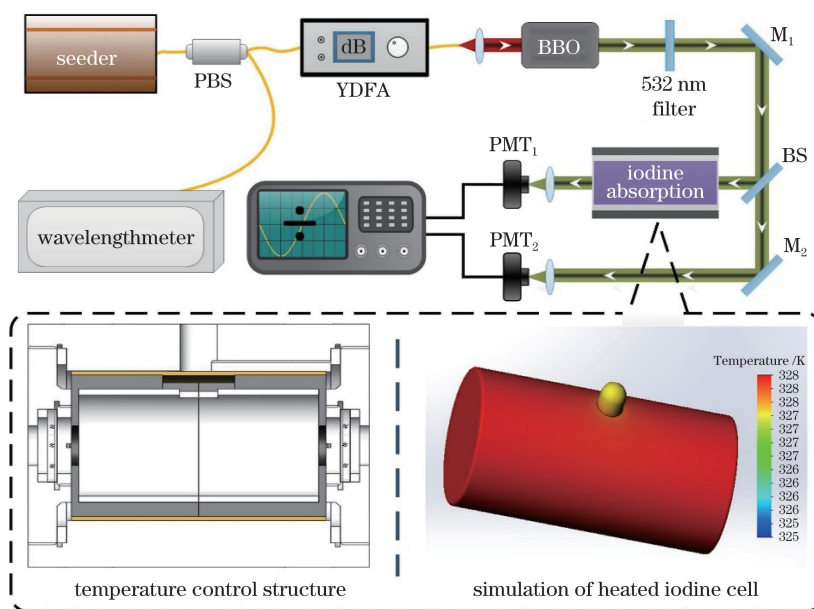


图 4 碘池吸收谱线测量实验系统图

Fig. 4 Schematic of the measurement setup of the iodine cell absorption line

为满足碘池可产生不同浓度碘蒸气的要求,碘池中应保证有足够的碘固体。因此在对碘池进行加热时碘池内部仍存在未升华的碘固体,这些碘固体会堆积在温度较低的位置。为避免碘固体堆积在透光端面而降低透过率,在对碘池进行加热时应使透光端面的温度较高。碘池温控结构中的电热膜没有直接对碘池进行加热,而是加热硬铝材质的外壳,其热导率为 $193 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,再由外壳对碘池进行加热。外壳相比电热膜可以覆盖碘池的部分透光端面,因此在加热碘池时可以形成均匀的温度场。此外,碘池加热结构两端密封的设计也可阻止碘池端面与外界进行热交换。在温控结构侧壁中间的碘指位置设计一个直径为 8 mm 的通孔可降低该处的温度。对加热结构进行热仿真,结果显示碘池加热结

构对碘池进行加热时由于碘指处开有通孔,会与外界空气形成热交换,因此温度会比碘池整体温度低 1 K ,使碘固体堆积在该处。

吸收谱线是碘分子的固有属性,温度会影响碘分子的热运动强度,进而影响碘分子吸收谱线的多普勒展宽,因此,环境温度的不稳定会给碘池带来鉴频误差。为减小鉴频误差,碘池需要进行高精度的温控。图 5(a)为在 30 min 内测量得到的碘池外壁的温度变化数据,可以看出碘池的控温精度可达 $\pm 0.02 \text{ K}$,由于温度不稳定带来的鉴频误差小于 $\pm 0.25 \text{ MHz}$ 。图 5(b)为碘池在加热过程中透光端面的图片,可以看出在加热过程中未升华的碘固体没有在碘池端面堆积,而是堆积在碘指部位(箭头所指位置),与仿真结果一致。

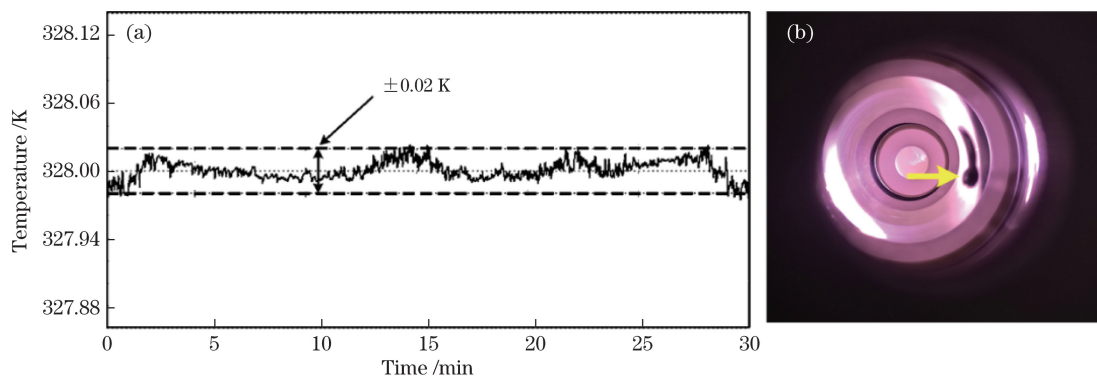


图 5 碘池温控效果。(a)温度稳定性;(b)碘池端面

Fig. 5 Temperature control effect of iodine cell. (a) Temperature stability; (b) end face of iodine cell

根据碘分子吸收谱线鉴频原理,为获得脉冲激光的实时频率,需要将经过碘池吸收的探测光能量信号与未经过碘池吸收的参考光能量信号作除,以获得碘池对每一个脉冲激光的相对透过率。由于脉冲激光的脉宽只有 8 ns,脉宽占空比为 8×10^{-8} ,如图 6(a)所

示,因此,如果直接对两路脉冲激光能量信号作除,就无法获得有用信息。采用 2 块 GHz 量级峰值保持电路对两路脉冲峰值保持 99 ms,用峰值能量表征脉冲能量,如图 6(b)所示。采集峰值电平并在控制程序中作除法,可实现对脉冲激光频移的实时检测。

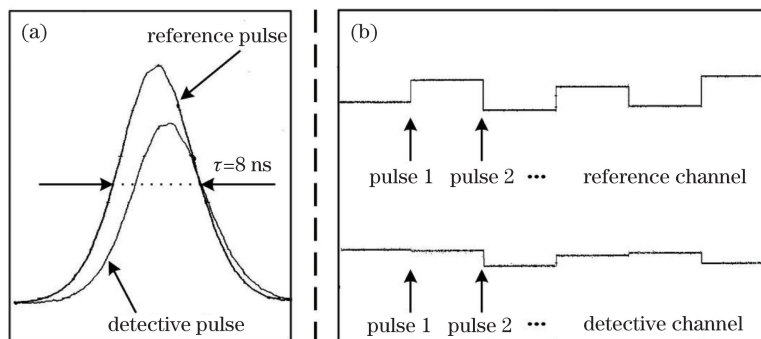


图 6 激光能量信号。(a)脉冲激光能量信号;(b)峰值保持后的电平信号

Fig. 6 Laser energy signal. (a) Pulsed laser energy signal; (b) level signal after peak holding

4 结果与讨论

4.1 实验结果

实验测量得到了 6 个温度点下 100 mm 碘池 1109 吸收线,如图 7(a)所示。

实验结果显示,随着温度升高,碘分子吸收谱线的半峰全宽增大,峰值吸收率不变,吸收强度变大,饱和吸收率几乎不变,与仿真结果具有相同的变化规律,如图 7(b)所示。通过对不同温度下线性区进行线性拟合可得到不同线性区的拟合优度和斜率。

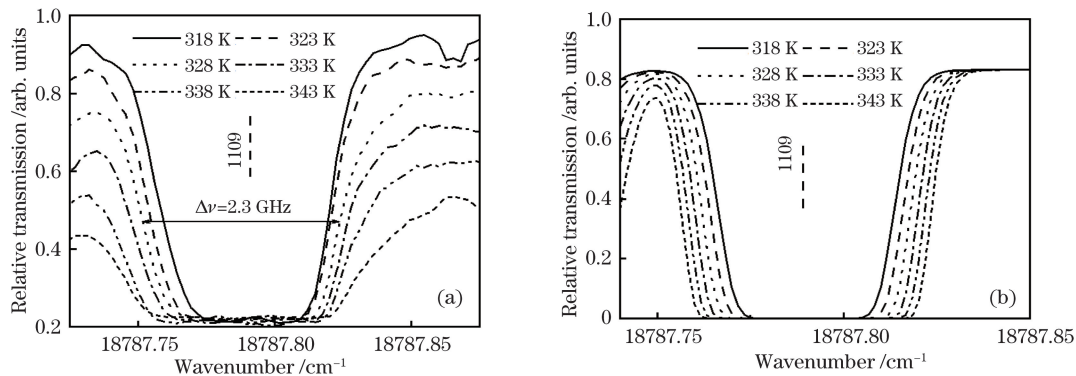


图 7 不同温度下的碘池 1109 线。(a)实验结果;(b)仿真结果

Fig. 7 Absorption spectra of 1109 line for iodine cell at different temperatures. (a) Experimental results; (b) simulation results

综合比较线性区线性拟合优度、斜率及线性区大小,最终选择 328 K 时碘分子吸收 1109 线左翼线性区进行鉴频,此线性区大小为 400 MHz,拟合优度为 0.99874,斜率为 -0.001 。

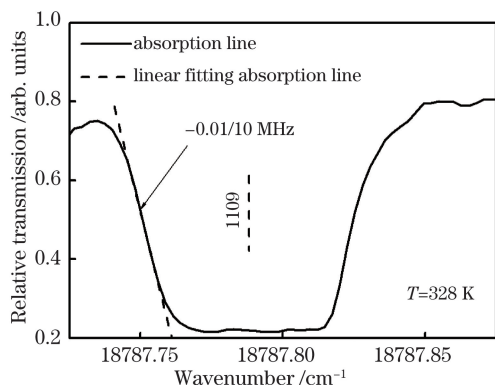


图 8 328 K 下的碘分子吸收 1109 线

Fig. 8 1109 line of iodine molecule absorption at 328 K

对 328 K 时碘分子吸收 1109 线左翼线性区进行线性拟合,可得到该段线性区的表达式为

$$k(\nu) = -0.001\nu + 548428, \quad (5)$$

式中: $k(\nu)$ 为碘池相对透过率; ν 为入射激光频率。

$k(\nu)$ 对 ν 求微分可得

$$\Delta k = -0.001\Delta\nu. \quad (6)$$

由(6)式得到该段线性区的鉴频灵敏度为 0.001,在锁频系统工作时,根据实时相对透过率的偏差 Δk ,可由(6)式计算得到实际频率偏差 $\Delta\nu$ 。

系统中使用的可调谐种子激光器可以通过改变电压陶瓷(PZT)传感器电压和晶体温度来控制电压对输出激光频率进行调谐。PZT 电压对输出激光频率的调谐系数为 2 MHz/V,即

$$\Delta\nu' = 2\Delta V, \quad (7)$$

式中: ΔV 为加载在 PZT 上的电压; $\Delta\nu'$ 为 PZT 加载电压为 ΔV 时对应的输出激光频率调谐量。当通过改变 PZT 电压对激光频率偏差进行校正时,应满足

$$\Delta\nu' = -\Delta\nu. \quad (8)$$

将(6)、(7)式代入(8)式得

$$\Delta V = 500\Delta k. \quad (9)$$

(9)式表明,当锁频系统测得碘池的相对透过率偏差为 Δk 时应向种子激光器 PZT 加幅值为 ΔV 的电压。此时,可以将比例系数 K_p 的值设定为 500, T_i 与 T_d 的值设置为 0。对 K_p 的值进行微调,使系统仅在比例项反馈工作时达到较好的控制状态。再依次将 T_i 与 T_d 的值进行微调,最终实现系统的最优控制状态。

种子激光器晶体温度对输出激光频率的调谐系

数为 -3 GHz/V。使用与上述相同的方法可计算出晶体温度反馈调谐激光频率 PID 通道中比例系数 K_p' 的初始值为 1/3。

分别对无锁频控制时脉冲激光频率漂移和有锁频控制时脉冲激光频率漂移进行测量。实验室温度为 (299 ± 1) K,湿度小于 25%。将锁频点设定在碘分子吸收 1109 线左翼线性区中点处。碘池温度控制在 (328 ± 0.02) K。实验结果显示无锁频控制时激光器在 15 min 内的频率漂移超过 90 MHz,在有锁频系统控制作用时激光器的频率漂移在 15 min 内小于 ± 5 MHz,如图 9 所示。

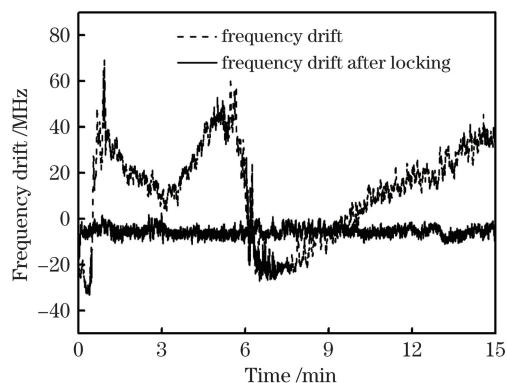


图 9 激光器频率漂移

Fig. 9 Frequency drift of laser

为提高信噪比,激光雷达在采集数据时会累积一定脉冲进行平均。这种数据采集方式会减小激光器频率漂移对实验结果的影响。通过结合激光雷达的这种数据采集方式,对锁频后激光频率漂移数据进行移动平滑处理(窗口大小为 500 点),处理结果可以为激光雷达提供与其采集数据时的频率偏差,在数据反演时可进行数据校正。图 10 为经过移动平滑后的 25 min 内的脉冲激光频率漂移,频率漂移小于 ± 2.2 MHz。

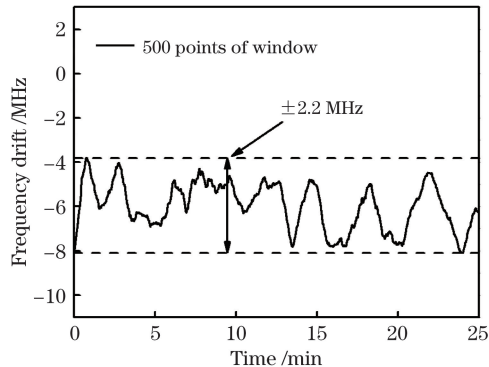


图 10 25 min 内 500 点移动平滑后的稳频结果

Fig. 10 Frequency drift after 500-points moving smoothing in 25 min

4.2 结果分析

多普勒测风激光雷达的基本原理是利用粒子的多普勒效应。当运动中的粒子受到中心频率为 ν_0 的入射激光照射时,由于多普勒效应,散射光的频率 ν 将偏离 ν_0 ,产生的多普勒频移 $\Delta\nu$ 可表示为^[20]

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \cos \phi, \quad (10)$$

式中: V 是垂直于发射光束和接收的散射光束这两个单位矢量所构成夹角的平分线的速度分量; ϕ 为散射角; λ 为入射激光中心波长; ν_0 为入射激光中心频率; ν 为散射光频率。

对于激光雷达系统,通常 $\phi = 0$ 。因此,只要测得发射光束和粒子后向散射光的频移就可计算出径向风速值,可表示为

$$V = \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta\nu = \frac{\lambda}{2} \cdot (\nu - \nu_0). \quad (11)$$

将 V 对 ν_0 求微分可得

$$dV = -\frac{\lambda}{2} d\nu_0. \quad (12)$$

(12)式描述了多普勒测风激光雷达风速测量误差 dV 与激光频率漂移 $d\nu_0$ 的关系。其关系如图 11 所示。

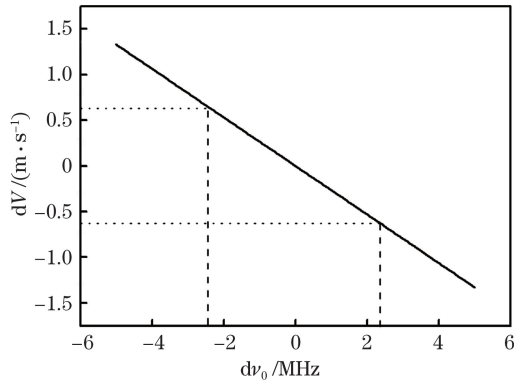


图 11 激光雷达测风误差与激光频率漂移的关系

Fig. 11 Relationship between wind measurement error of lidar and frequency drift of laser

由图 11 可知,若激光频率漂移范围为 ± 2.2 MHz,用 532 nm 波段激光进行探测,则此时引起风速测量误差 $dV = \pm 0.6$ m/s。

高光谱瑞利测温激光雷达利用瑞利散射线宽与温度的依存性测量大气温度。大气分子的散射辐射由分子的热运动引起,分子热运动产生多普勒频移,而且跃迁速度分布与麦克斯韦-玻尔兹曼关系决定的温度有关,因此大气分子的温度决定瑞利散射的谱线宽度。多普勒谱线(瑞利散射谱线)半峰全宽 $\Delta\nu_t$ 与温度 T 的关系为

$$\Delta\nu_t = \sqrt{\frac{32KT \ln 2}{m\lambda_0^2}}, \quad (13)$$

式中: K 为玻尔兹曼常数; m 为分子质量; λ_0 为发射激光波长。

用瑞利散射谱宽 $\Delta\nu_t$ 表示大气温度 T 的表达式为

$$T = \frac{\Delta\nu_t^2 \cdot \lambda_0^2 \cdot m}{32K \cdot \ln 2}. \quad (14)$$

在激光雷达分光系统中,利用高分辨率分光器,如扫描法布里-波罗(F-P)干涉仪对瑞利信号进行扫描测量,得到瑞利谱宽 $\Delta\nu_t$ 后通过(14)式反演大气温度 T 。在扫描测量瑞利谱宽时激光中心频率的漂移会引起瑞利谱宽测量误差。

假设在测量瑞利后向散射谱左翼时中心频率未发生漂移。当扫描 F-P 干涉仪扫描至谱线右翼时,如图 12 所示,若此时激光频率向高频方向漂移至 ν_1 ,漂移量为 $\Delta\nu_1$,则此时测得的谱线半峰全宽为

$$\Delta\nu_{t1} = \Delta\nu_t + \Delta\nu_1. \quad (15)$$

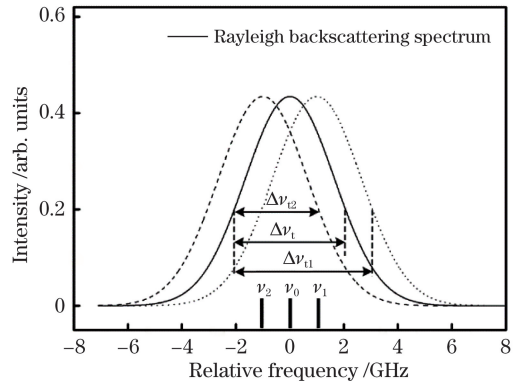


图 12 激光频率漂移对瑞利后向散射谱线半峰全宽测量的影响

Fig. 12 Effect of laser frequency drift on half-height full-width measurement of Rayleigh backscattering spectra

若激光频率向低频方向漂移至 ν_2 ,漂移量为 $\Delta\nu_2$,则此时测得的谱线半峰全宽为

$$\Delta\nu_{t1} = \Delta\nu_t - \Delta\nu_2. \quad (16)$$

可以看出,分光系统测得瑞利后向散射谱宽的误差小于或等于激光频率最大漂移。为求得高光谱激光雷达测量温度的误差与激光频率漂移的关系,如图 13 所示,将(14)式中的 T 对 $\Delta\nu_t$ 微分可得

$$dT = \frac{m \cdot \lambda_0^2 \cdot \Delta\nu_t}{16K \cdot \ln 2} \cdot d\Delta\nu_t. \quad (17)$$

由图 13 可知,当激光频率漂移小于 ± 2.2 MHz 时,高光谱瑞利测温激光雷达的测温误差小于 ± 0.5 K。

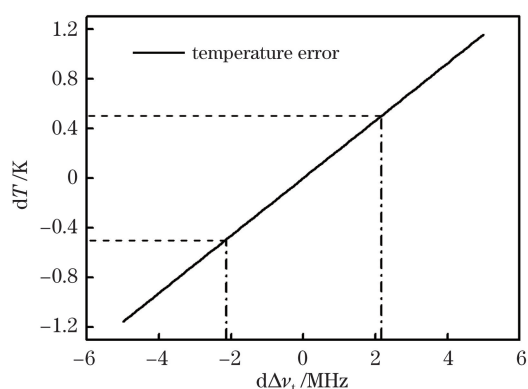


图 13 激光雷达测温误差与激光频率漂移的关系

Fig. 13 Relationship between temperature measurement error of lidar and laser frequency drift

5 结 论

为提高高光谱激光雷达激光发射系统输出的激光频率稳定性,搭建基于碘分子吸收谱线鉴频的脉冲激光锁频系统,该系统利用碘分子饱和和吸收谱线侧翼对脉冲激光进行鉴频。利用 PID 反馈控制种子激光器输出激光频率,最终实现对脉冲激光器输出激光频率的动态调谐,得到频率漂移在 25 min 内小于 ± 2.2 MHz 的激光输出,达到了高光谱瑞利测温激光雷达激光发射系统输出激光频率稳定性小于窄带滤波器半峰全宽的要求,实现的风速测量误差小于 ± 0.6 m/s,温度测量误差小于 ± 0.5 K。同时,本锁频系统可提供与激光雷达数据同步的激光频率偏差,在反演时进行校正可进一步减小测温误差。由于锁频系统,尤其是锁频系统中的脉冲激光器在工作时易受环境温度的影响,因此,目前想要达到长时较好的稳频效果需要有一个稳定的外部环境。后期会对锁频系统进行封装,为锁频系统营造一个较为稳定的环境,以实现更好的锁频效果。

参 考 文 献

- [1] Gong X, Hua D X, Li S C, *et al.* Design and optimization of all-fiber rotational Raman spectroscope for temperature measurement based on sampled fiber Bragg grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(7): 073601.
 巩鑫, 华灯鑫, 李仕春, 等. 基于取样光纤布拉格光栅的全光纤拉曼测温分光系统设计及优化[J]. *物理学报*, 2016, 65(7): 073601.
- [2] Liu J, Hua D X, Li Y. Rotational Raman lidar for daytime-temperature profiling of the atmospheric boundary layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 755-759.

刘君, 华灯鑫, 李言. 大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 755-759.

- [3] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Near forward light scattering characteristics of airborne particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0529001.
 吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0529001.
- [4] Sun Y Y, Dong H, Bi Z H, *et al.* Inter-comparison of models for radiative transfer in the atmosphere[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(2): 149-153.
 孙毅义, 董浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(2): 149-153.
- [5] Bo G Y, Liu D, Wang B X, *et al.* Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.
 伯广宇, 刘东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- [6] Wang Y F, Gao F, Zhu C X, *et al.* Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328004.
 王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328004.
- [7] Liu B, Zhang J, Lu M, *et al.* Research progress of laser radar applications[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 117-122.
 刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. *激光与红外*, 2015, 45(2): 117-122.
- [8] Li J M, Lv Q Y, Zhang M, *et al.* Effects of atmospheric dynamics and aerosols on the fraction of supercooled water clouds[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(3): 1847-1863.
- [9] Wang J, Yuan M, Chen N, *et al.* Continuous tunable cavity Fabry-Perot interferometer by using potassium dideuterium phosphate with two ring electrodes[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4425-4430.
- [10] Shao J F, Hua D X, Wang L, *et al.* Full-time lidar system for ultraviolet high spectral Rayleigh temperature measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0601003.
 邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0601003.
- [11] Bian Z L, Huang C D, Gao M, *et al.* Research on

- control technique for pound-drever-hall laser frequency stabilizing system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0302001.
- 卞正兰, 黄崇德, 高敏, 等. PDH 激光稳频控制技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302001.
- [12] Du J, Sun Y G, Chen D J, *et al.* Research of a compact iodine-stabilized diode laser at 1064 nm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701006.
- 杜娟, 孙延光, 陈迪俊, 等. 小型化碘稳频 1064 nm 半导体激光器研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701006.
- [13] Liu Z S, Wu S H, Liu B Y. Seed injection and frequency-locked Nd:YAG laser for direct detection wind lidar [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 541-545.
- [14] Wu S H, Liu Z S, Liu B Y. Automatic laser frequency stabilization to iodine absorption line [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(4): 530-536.
- [15] Wu S H, Liu Z S, Liu B Y. Dual-wavelength laser frequency locking for the direct-detect wind lidar [J]. Journal of Modern Optics, 2006, 53(3): 333-341.
- [16] Deng B. Principle, technology and application of atomic absorption spectrometry [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 29-30.
- 邓勃. 原子吸收光谱分析的原理、技术和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 29-30.
- [17] Liang K. Research on atmospheric temperature measured system based on Brillouin scattering lidar [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 37-39.
- 梁琨. 基于布里渊激光雷达的大气温度测量系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 37-39.
- [18] Du L F, Yang G T, Cheng X W, *et al.* Design and realization of frequency locking system and laser velocity measuring system based on Doppler wind lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2562-2568.
- 杜丽芳, 杨国韬, 程学武, 等. 基于多普勒测风激光雷达的锁频系统与激光测速系统的设计与实现 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2562-2568.
- [19] Yang S Z, Yang K C, Wu B, *et al.* Control foundation of mechanical engineering [M]. 6th ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011: 214-218.
- 杨叔子, 杨克冲, 吴波, 等. 机械工程控制基础 [M]. 6 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 214-218.
- [20] Jiao M X, Feng Q B, Wang M, *et al.* Sensing and measuring with lasers [M]. Beijing: Science Press, 2014: 312-314.
- 焦明星, 冯其波, 王鸣, 等. 激光传感与测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 312-314.