

采用温控和碘吸收池技术的发射激光稳频技术

李 路^{1,2,3,4}, 庄 鹏^{1,2,3*}, 谢晨波^{1,2,3}, 王邦新^{1,2,3}, 邢昆明^{1,2,3}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;
3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;
4. 皖西学院 机械与车辆工程学院, 安徽 六安 237012)

摘 要: 多普勒测风激光雷达通过分析系统回波信号的多普勒频移反演出风速, 为提高风场探测精度, 从稳频技术方面展开研究。在稳频过程中, 分别采取措施消除激光频率的长期漂移和短期抖动。针对激光频率的长期漂移, 设计并研制了种子激光器温控箱, 通过水浴的控温方式大大减小了激光频率的长期漂移, 将激光频率稳定在 ± 50 MHz 以内; 针对激光频率的短期抖动, 采用以碘分子吸收池为核心器件的稳频系统, 通过半导体控温方式对碘分子吸收池精确控温, 控温精度达 0.03 $^{\circ}\text{C}$, 提高了稳频精度, 将激光频率进一步稳定在 ± 8 MHz 以内, 满足 ± 10 MHz 以内的设计精度要求。通过搭建多普勒测风激光雷达系统, 对发射激光稳频装置进行系统验证, 连续 4 组风场观测结果表明: 系统探测高度为 17 km, 绝大部分方差在 4 m/s 以下, 满足测风激光雷达测量指标的要求。

关键词: 多普勒测风激光雷达; 激光频率漂移; 稳频; 碘分子吸收池; 温控
中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200289

Laser frequency stabilization technology using temperature control and iodine absorption cell technology

Li Lu^{1,2,3,4}, Zhuang Peng^{1,2,3*}, Xie Chenbo^{1,2,3}, Wang Bangxin^{1,2,3}, Xing Kunming^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China;
4. Faculty of Mechanical and Automotive Engineer, West Anhui University, Lu'an 237012, China)

Abstract: Doppler wind measurement lidar reverses the wind speed by the Doppler frequency shift of the echo signal of the system. In order to improve the detection accuracy of the wind field, the research was carried out from the aspect of frequency stabilization technology. During the frequency stabilization process, measures were taken to eliminate the long-term drift and short-term jitter of the laser frequency. For the long-term drift of the laser frequency, a temperature control box for the seed laser was designed and developed, which greatly reduced the long-term laser frequency shift by controlling the temperature of the water bath. The laser frequency was stabilized within ± 50 MHz. For short-term jitter of the laser frequency, a frequency stabilization system with an

收稿日期: 2020-11-15; 修订日期: 2021-01-13

基金项目: 民用航空“十三五”技术预先研究项目 (D040103); 中国科学院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目 (KP-2019-05); 安徽省 2017 年度高层次科技人才团队项目 (010567900)

iodine molecular absorption cell as the core device was adopted to accurately control the temperature of the iodine molecular absorption cell through semiconductor temperature control, with a temperature control accuracy of $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, the frequency stabilization accuracy was improved, and the laser frequency was further stabilized within $\pm 8\text{ MHz}$ to meet the design accuracy requirements within $\pm 10\text{ MHz}$. Through the establishment of Doppler wind measurement lidar system, the launching laser frequency stabilization device was verified. The observation results of 4 consecutive sets of wind field show that the detection height of the system was 17 km, and most of the variances were below 4 m/s. It meets the requirements of wind lidar measurement indicators.

Key words: Doppler wind measurement lidar; laser frequency drift; frequency stabilization; iodine molecular absorption cell; temperature control

0 引言

测风激光雷达是近 30 年发展起来的风场探测手段,与传统的微波雷达、探空气球以及声雷达等探测技术相比,其测量精度提高、适应性广泛、时空分辨率高、时间上可连续监测,具有较大的优势^[1]。测风激光雷达采用多普勒测量原理,利用回波信号频率与发射激光频率之差求得由大气风场引起的多普勒频移,进而可以得到径向风速^[2]。

由激光雷达测风原理可知,若发射激光频率在测量期间发生改变,将直接影响测量精度,因此在风场探测之前必须将发射激光频率稳定在 $\pm 10\text{ MHz}$ 以内,然而,实际测风激光雷达中应用的激光器发射频率会存在长期漂移和短期抖动,直接影响风场测量的性能参数。由于测风激光雷达要求激光器出射窄脉冲、频率稳定的激光,采用种子注入技术能压缩脉冲宽度,提高频率的稳定性,由于种子激光器采用压电陶瓷(PZT)对种子激光波长进行调谐,因此温度会影响种子激光波长的稳定性,从而影响主激光器出射激光波长的稳定^[3]。

欧空局星载测风激光雷达于北京时间 2018 年 8 月 23 日顺利发射升空,并完成在轨测试,该系统设计了独立的用于种子激光器的稳频控制系统,采用对激光频率进行扫描并反馈的方法,稳频效果良好^[4]。

中国海洋大学与中国科学院空间技术中心所研制的测风激光雷达系统中^[5-6],都采用碘分子吸收池对发射激光波长进行稳定。将种子激光器出射的 532 nm 连续光引入稳频系统,利用碘分子陡峭的吸收谱线将频率稳定在半高处。这种方法的优点在于种子激光器出射的为连续光,对采集的要求降低,但是这种方法稳定的仅是种子激光器频率,而主激光器出射的脉

冲光却不得而知。王国成等^[7]采用三级温控方法(系统整体结构、种子激光器以及 F-P 标准具分别进行温控)对直接测风激光雷达进行稳频,满足测风误差小于 1 mm/s 的要求。

基于笔者所在课题组的研究适用于长期外场实验,昼夜温差大,对测风激光雷达系统长期稳定性提出了更苛刻的要求,因此文中利用种子激光器温控技术和基于碘分子吸收池的稳频系统将发射激光频率稳定,并利用 F-P 标准具进行频率锁定,搭建测风激光雷达系统进行实验验证。

1 多普勒测风激光雷达激光稳频原理

1.1 种子注入原理

多普勒测风激光雷达的测风精度要求激光器具有能量高和频率特性好的特点,目前常用的高功率窄线宽的激光器多采用种子注入技术压缩其脉冲激光器的线宽,即用一个低功率的激光器来控制高功率激光器的激光频率,来获得窄线宽、单纵模的高功率激光输出。

种子注入原理如图 1 所示,图中的竖线表示主激光器谐振腔的纵模,尖角表示种子激光器的注入信号频率。设注入信号的频率为 ν_i ,主激光器谐振腔中离注入信号频率最近的纵模频率为 ν_c 。当种子信号进入主激光器时,与主激光器自身的本征模形成振荡。如果注入信号的线宽足够窄,比主激光器谐振腔的纵模间隔小得多,则最靠近注入信号频率的纵模受到激发与之发生共振,在种子注入信号的基础上增长,而其他模式仍在自发辐射噪声的基础上增长,由于注入信号场强度比噪声场强度大得多,所以频率为 ν_c 的模式占绝对优势,最终实现单纵模输出。

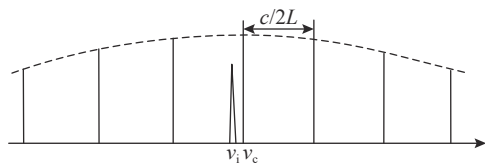


图 1 种子注入原理

Fig.1 Principle of seed injection

1.2 碘分子吸收原理

碘分子的 X→B 态跃迁在可见光波段有 20000 条吸收线, 其中在 532 nm 附近, 碘池吸收线相对于 Nd:YAG 激光器二倍频光的波长较为匹配, 所以可以利用碘分子吸收池作滤波和频率鉴别, 实验中用 1111 号吸收线作为频率稳定的吸收线。

利用碘分子吸收线进行激光稳频, 主要是通过扫描得出碘分子吸收池的透过率曲线, 利用透过率曲线的陡峭边缘将激光频率锁定在其半高位置。当激光频率发生改变时, 对应的透过率将会发生变化, 将透过率的相对变化作为差分信号进行放大处理, 利用探测器检测到光强的变化, 并作为驱动信号反馈给种子激光器, 种子激光器通过调节出射波长将频率稳定在锁定位置, 整个过程形成一个反馈闭环系统^[8-9]。

2 环境温度对种子激光器频率影响

对于测风激光雷达, 发射激光的线宽和频率的稳定性将很大程度影响测风的精度, powerlite9030 激光器经种子注入后的线宽为 90 MHz, 远小于 FP 标准具的频谱宽度, 二者卷积后, 对 FP 标准具透过率谱的半高宽影响很小。该激光器在长期工作过程中, 由于其内部产热没有及时传递出去, 导致激光频率发生漂移, 故在测风实验之前, 需要先对激光器在室温环境下进行实时监测, 文中将出射激光分出 1% 的能量进入波长计的耦合透镜中, 对发射激光进行 4 h 的连续监测结果, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 在 4 h 连续监测过程中, 激光频率漂移为 3.1 GHz, 主要因为由于激光器本身产热没有及时地传递出去, 导致温度升高使得内部 PZT 腔长发生变化以及 Heater 的温度升高, 从而发生激光频率漂移现象。对于多普勒测风激光雷达来说, 需要激光器出射频率稳定在±10 MHz 以内控制精度, 如何有效地将激光器产生的热量传递出去, 是控制激光器激光频率长期漂移最有效的途径。

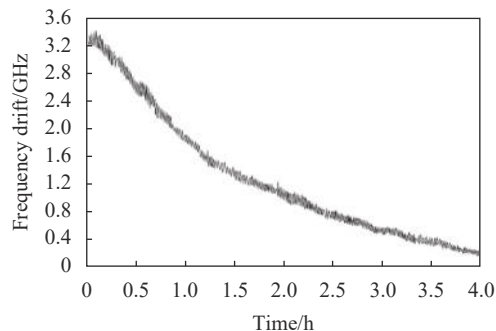


图 2 主激光器实测的频率漂移图

Fig.2 Measured frequency drift diagram of the main laser

3 种子激光器温控方案设计

为了抑制激光器发射频率的长期漂移, 设计并研制一款种子激光器温控箱, 其实物如图 3 所示, 该温控箱采用“水浴”的形式对种子激光器进行控温, 主要包括两部分: 一部分是水循环温控箱, 其作用是提供循环水并控制循环水的温度, 如图 3 所示, 水循环上的控制面板可以设置水流的温度, 以及显示的当前水流的温度, 其温度控制精度达到±0.1 °C, 显示温度精度为 0.01 °C; 另一部分是恒温箱体, 由于铝的导热性好, 故利用铝管流通循环水, 种子激光器产生的热量辐射到铝板, 通过铝板和铝管将进行热量传递, 再通过水循环的方式来热量传递, 从而实现控温的效果, 其中为了避免种子激光器与铝板接触, 出现传热不均匀的情况, 文中采用殷钢材料圆柱底座作为种子激光器的支撑, 来隔离与铝板接触。这种温控箱是利用恒温水循环的方式来使得种子激光器周围环境温度得到稳定。

图 4 所示的是利用种子激光器温控箱研究种子激光器环境温度变化对发射激光频率的影响。图中

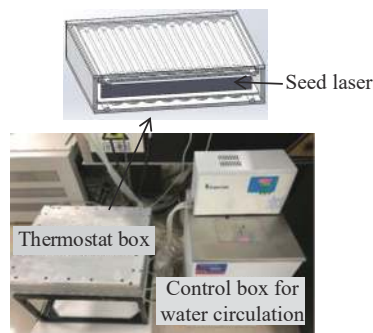


图 3 “水浴”温控实物图

Fig.3 Picture of "water bath" temperature control box

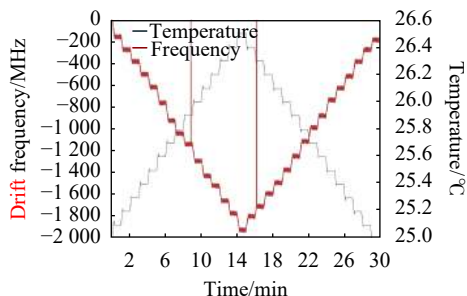


图 4 温度变化对激光频率影响

Fig.4 Effect of temperature change on laser frequency

黑线所示的是温度变化曲线,在实验期间,设置温控箱初始温度为 25.00 °C,每隔 1 min 改变一次温度,每次增加 0.1 °C,从图中可以看出,在发出温度改变指令后,大约在 13 s 之后达到设定温度,在发出下个温度调节指令前,温度保持恒定,在温度达到 26.50 °C 时,每隔 1 min 减小 0.1 °C,同样在大约在 13 s 之后温度保持稳定。在监测温度的同时,利用波长计监测发射激光频率的变化,如图中红色曲线所示,在初始温度 25.00 °C 时,设此时激光频率为相对零位,可以看出当温度升高时,激光频率减小,往长波方向漂移,反之,激光频率增大,图中两次频率跳变为激光器跳模所致,在风场测量时应将跳模时刻的数据剔除。在工作温度发生变化时,激光频率随温度变化而变化,当温度恒定时,激光频率也随之趋于稳定,可见温控箱对种子激光器环境温度的稳定速度很快。从图中变化趋势可以得出,当种子激光器环境温度改变 1 °C,发射激光频率将改变约 1.372 GHz。

加入温控箱之后,对种子激光器进行 6 h 连续监测实验,如图 5 所示,发射激光频率偏移 1.1 GHz,较没加温控箱减少约 64.5%,效果明显;在 2 h 以后,种子激光器温度达到相对稳定状态,激光频率趋于稳定,主要在±50 MHz 范围内抖动。但对于多普勒测风

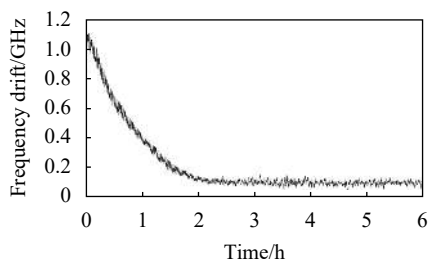


图 5 加入温控后发射激光的频率漂移

Fig.5 Frequency shift of the laser after adding temperature control

激光雷达来说,该频率稳定精度仍会引起较大的测量误差,需要进一步压缩频率抖动。

4 基于碘分子吸收池稳频系统设计

在抑制了激光频率长期漂移的基础上,为了进一步控制激光频率的短期抖动,即±50 MHz 范围内抖动,设计了基于碘分子吸收池的稳频系统,文中采用 1111 号吸收线进行频率稳定,采用的碘池长度为 25 cm,温度控制在 70 °C。

基于碘分子吸收池稳频系统的原理就是将激光波长锁定在 1111 线边缘的半高宽位置,利用 1111 吸收谱线的陡峭性,当激光频率抖动时,透过碘吸收池的光强就会有明显的变化,根据光强的变化量就可以得知激光频率的变化量,随即反馈给计算机,通过调节种子激光器中 PZT 电压将激光频率调到 1111 线边缘的半高宽位置,即完成频率稳定。

稳频系统实验装置如图 6 所示,约有 1% 的发射光进入稳频单元。实验前首先要扫描碘分子 1111 吸收线的频谱曲线。通过等步长调节种子激光器的 PZT 电压来实现激光频率扫描,波长计可探测激光波长数值。经分束装置,一束光经过一 25 cm 长,温度控制在 (70±0.03) °C 的碘蒸气池,被 PMT1 接收;另一束光直接被 PMT2 探测,由于两个探测器所探测为脉冲信号,低速采集卡很难采集到完整的脉冲波形,这就会导致测量误差,最终导致稳频效果不佳,因此文中实验采用采样率为 1 GHz 的高速采集卡对脉冲信号进行采集,并将脉冲信号点进行积分运算,得到准确的脉冲信号强度,提高了稳频精度。由 PMT1 和 PMT2 的信号比值可得到未经归一化的碘分子 1111 吸收谱线,如图 7 所示。

设定吸收线高频一侧两通道比值为 0.48 处为频率锁定,当激光频率偏离零点时,该比值会偏离参考值,并且在一定频率范围内,与激光频率偏移量呈近似线性的变化关系。以该比值的偏移量作为误差信号:

$$e = R - R_0 = a \cdot \Delta\nu \tag{1}$$

式中: R 和 R_0 分别为两通道比值的测量值和设定参考值; $\Delta\nu$ 为频率偏移; a 为对锁频斜边进行线性拟合得到的系数,为 0.475。

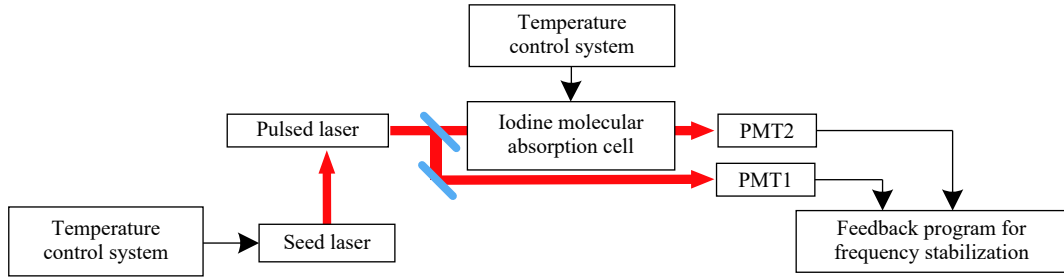


图 6 稳频系统实验装置图

Fig.6 Experimental device diagram of frequency stabilization system

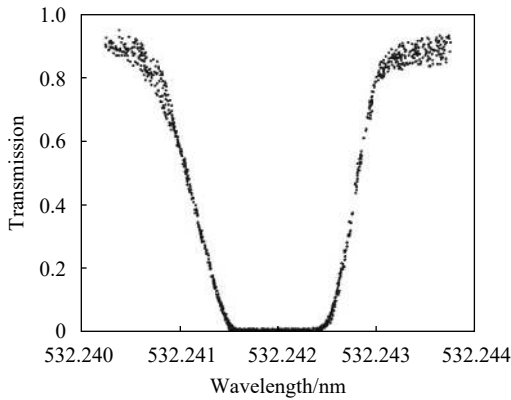


图 7 温度为 70 °C 碘分子 1111 吸收线

Fig.7 1111 absorption line of iodine molecules at 70 °C

由于碘分子的热运动会对得到的谱线有一定影响。温度较低时，薄气室中的分子密度比较小，和激光束作用的分子数较少，严重影响饱和吸收的信号强度；而温度过高时，又会增强由分子碰撞导致的压力增宽，使获得的信号线宽展宽，不利于获得理想的鉴频效果。因此，通过对碘分子池进行温度控制，降低分子无规则热运动的影响，进而有利于抑制压力增宽，同时也有利于获得高信噪比的饱和吸收信号。为了便于对吸收池进行均匀控温，利用空气升温对碘管进行加热，将碘管用夹具固定，悬浮在空中，减小接触，如图 8 所示为稳频系统实物图，其中碘分子吸收池采用半导体加热，通过智能 PID 精确控温，其控温精度可达 ± 0.03 °C，碘管两侧留有通光口，用窗片密封并镀有 532 nm 增透膜以保证控温精度。

激光器稳频实验中，通过调节种子激光器的 PZT 晶体的电压来改变输出光的频率。改变电压的优点在于调节的速度很快，而且电压相对于温度而言较为容易控制，只是通过调节电压的方法改变频率的范围比较小。由于前期已经通过“水浴”温控技术将出射

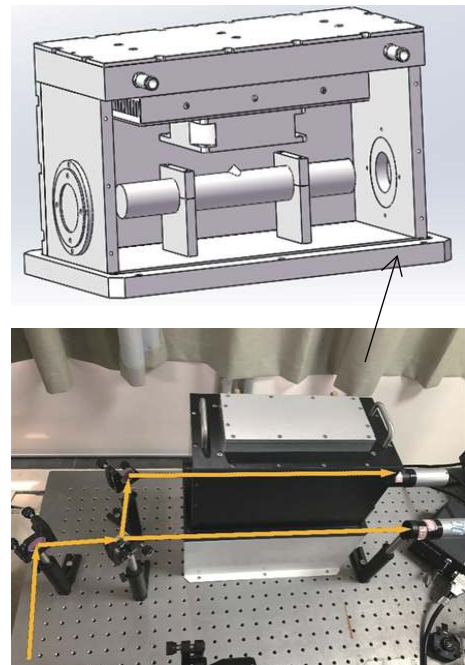


图 8 稳频系统实物图

Fig.8 Picture of frequency stabilization system

激光的频率稳定在较小的变化范围内，因此仅仅采用 PZT 调节完全可以满足小范围频率的改变。

通过改变 PZT 晶体电压改变波长，需要知道波长 (或者频率) 与电压变化之间的关系，可以通过实验测量得到。在种子激光器的软件中输入不同的电压，改变激光器的出射光的波长，利用波长计测量出射光的波长，结果如图 9 所示。

图 9 中的横坐标为电压的调节值，纵坐标对应 532 nm 输出的激光频率的相对变化。直线为进行线性拟合的结果，可以看到电压的变化与频率相对改变基本成线性的关系，电压改变 1 V 对应大约 180 MHz 的频率相对变化。但是在实验中可以发现，这个关系并不是绝对准确，其误差较大，原因是激光出射的光

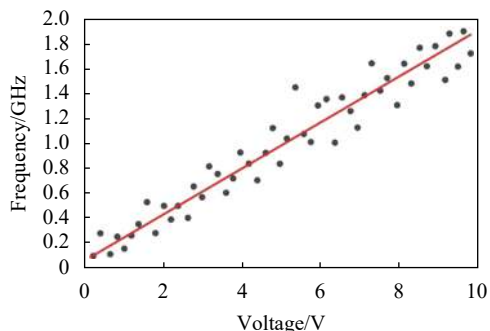


图 9 种子激光器 PZT 电压与激光频率的关系

Fig.9 Relationship between PZT voltage of seed laser and laser frequency

的能量受到非常多的因素的制约,包括其自身的状态和环境的变化。因而对激光频率的稳定并不能完全按照这个比例进行控制,利用软件进行频率稳定的时候,需要引入 PID 算法,使控制更加精确。

激光器的结构和参数比较复杂,很难得到精确的数学模型。对于这类被控对象,在工程控制领域,广泛应用 PID (比例—积分—微分) 控制技术^[10]。比例控制是最简单的控制方式,它输出一个与输入误差信号成比例的反馈信号,但当仅有比例控制时,会存在稳态偏差。引入积分控制可将误差信号随时间累积,产生积分项输出,从而减小甚至消除稳态偏差。而微分控制属于超前校正,一般应用于惯性较大的被控对象,因激光频率对 PZT 电压的调节很敏感,在此不采用。综上,采用基于计算机软件的数字 PI(比例积分)控制方案来稳定激光频率:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

式中: $e(t)$ 为输入的误差信号; K_p 和 K_i 分别为比例系数和积分系数; $u(t)$ 为输出的反馈信号,用来调节种子激光器的 PZT 电压,即把反馈值与原来的 PZT 电压值相加,作为新的 PZT 电压值:

$$U = U_0 + u \quad (3)$$

5 长时间稳频实验结果

稳频系统搭建完成后,开展了种子注入式脉冲激光器的频率稳定实验,实验中每组采集 200 个脉冲进行平均,将 PMT1 和 PMT2 的比值作为输入信号,对输入信号进行 PI 运算,由 RS232 串口向种子激光器输出反馈信号,调节 PZT 电压,从而调节激光频率

回到设定的零点。如图 10 中所示,是该次实验的频率稳定结果,在长达 4 h 内,频率最大偏移小于 8 MHz。

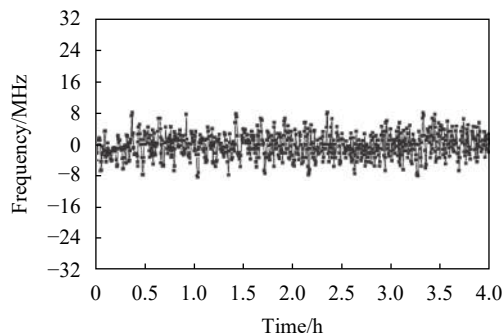


图 10 4 h 内的频率稳定效果

Fig.10 Frequency stabilization within 4 h

6 F-P 标准具频率锁定结果及径向风速测量

6.1 相对锁频结果

通过稳频技术将激光频率锁定在 ± 8 MHz 之内,如图 10 所示,激光频率在 ± 8 MHz 范围内抖动,使得风速测量误差可达到 2 m/s 误差,故需要利用 F-P 标准具频谱与激光器频率进行相对锁定技术,即当出射激光频率偏移两个边缘通道频谱交叉点时,锁频程序将根据出射激光频率的偏移量自动调节 FP 标准具腔长,使得 FP 标准具的两个边缘通道频谱交叉点重新移动至出射激光频率所在位置。

图 11 所示为 4 h 内的频率锁定结果。从图中可以看出,在 4 h 内,由于采用了发射激光频率稳定技术,F-P 标准具腔长最大移动量为 7.4 MHz,即两个步长(1 个步长对应 3.7 MHz),且绝大部分时间激光频率稳定在一个步长之内,由此可以侧面验证发射激光

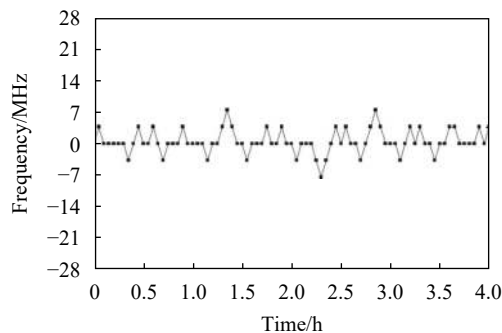


图 11 采用锁频技术 4 h 内的频率锁定结果

Fig.11 Result of using frequency lock technology for 4 h

频率的稳定性。

6.2 风场观测结果

在研究稳频和锁频技术的基础上,搭建了基于三通道 F-P 标准具的 532 nm 瑞利-米多普勒测风激光雷达系统。系统出射激光波长为 532 nm, 能量为 400 mJ, 重复频率为 30 Hz, 采用口径为 300 mm 的卡塞格林望远镜接收回波信号, 并通过芯径 0.2 mm、数值孔径为 0.11 的多模光纤将回波信号传送至接收机中, 视场为 0.1 mrad。在 2020 年 5 月 18 日晚进行径向风速测量, 获得连续 4 组同一方向径向风速, 测量时天顶角为 27.18°, 在空间分辨率为 75 m, 时间分辨率 2 min 的情况下, 观测结果如图 12 所示。

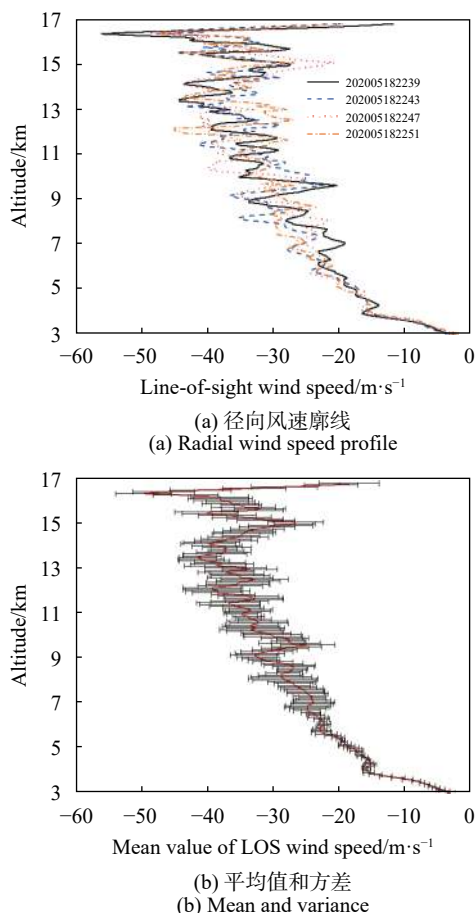


图 12 连续 4 组同一方向径向风速观测结果

Fig.12 Four consecutive observations results of radial wind velocity in the same direction

由图 12 可知, 4 组连续探测的径向风速廓线吻合度较好, 探测高度可到 17 km, 绝大部分方差小于 4 m/s, 最大方差为 4.8 m/s; 该方差由雷达系统风场测量不确定误差和 8 min 内探测区域大气风速变化两部

分构成, 验证了系统的稳定性。

7 结 论

由测风激光雷达原理可知, 若发射激光频率在测量期间发生改变, 将直接影响测量精度, 因此在风场探测之前首先将发射激光频率稳定。发射激光频率存在长期漂移和短期抖动, 通过对种子激光器进行温控来减小激光频率的长期漂移, 为此设计并研制出一款种子激光器温控箱, 通过“水浴”控温的方式使激光频率在±50 MHz 以内抖动, 针对激光频率的短期抖动, 设计了以碘分子吸收池为核心的稳频反馈系统, 将激光频率稳定在碘分子谱线的半高处, 最终将发射激光频率稳定在±8 MHz 以内, 满足±10 MHz 以内设计要求; 通过 F-P 标准具进行相对锁频将出射激光频率始终稳定在两个边缘通道交叉点附近; 通过对同一方向径向风速多次测量得到: 利用稳频技术和锁频技术, 可以使得径向风速多次测量的方差在 4.8 m/s 之内, 整个测风激光雷达系统的探测高度可达 17 km。

参考文献:

- [1] Gao Jian, Zhou Anran, Sun Dongsong, et al. An identification method of seed laser injection in Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0230001. (in Chinese)
高健, 周安然, 孙东松, 等. 多普勒激光雷达中种子激光注入的一种鉴别方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 0230001.
- [2] Guo Wenjie. Several key technologies of 532 nm rayleigh doppler lidar and gravity waves study by lidar observation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
郭文杰. 532 nm 瑞利多普勒激光雷达若干关键技术和大气重力波观察研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [3] Zheng Jun. Laser frequency locking of Rayleighdoppler lidar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
郑俊. 瑞利多普勒激光雷达中的激光频率锁定技术的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [4] Ma Fumin, Cheng Yong, Yang Zehou, et al. Latest development of laser Doppler wind measurement technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 180003. (in Chinese)
马福民, 程涌, 杨泽后, 等. 激光多普勒测风技术最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 180003.

- [5] Zheng Jun. Development of the stabilized lidar receiver for all-day Rayleigh wind lidar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
郑俊. 瑞利测风激光雷达高稳定昼夜探测光学接收机的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [6] Guo Wenjie, Yan Zhaoai, Hu Xiong, et al. Long-term frequency stabilization system in 532 nm wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130004. (in Chinese)
郭文杰, 闫召爱, 胡雄, 等. 532 nm 测风激光雷达长时间稳频系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S1): S130004.
- [7] Wang Guocheng, Zhang Feifei, Qian Zhengxiang, et al. Frequency stabilization method in direct detection Doppler wind lidar under field experiment conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906004. (in Chinese)
王国成, 张菲菲, 钱正祥, 等. 直接测风激光雷达外场实验稳频方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0906004.
- [8] Dong Junfa, Liu Jiqiao, Bi Decang, et al. Optimal iodine absorption line applied for spaceborne high spectral resolution lidar [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5413.
- [9] Yan Qing, Yuan Meng, He Tiantian, et al. Pulse laser frequency locking method based on molecular absorption [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1028005. (in Chinese)
闫庆, 袁萌, 何甜甜, 等. 基于分子吸收的脉冲激光锁频方法研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1028005.
- [10] Baumgarten G, Fiedler J, Hildebrand J, et al. Inertia gravity wave in the stratosphere and mesosphere observed by Doppler wind and temperature lidar [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10929-10936.



第一作者简介: 李路 (1987-), 男, 博士生, 2017 年入学中国科学技术大学攻读博士学位, 研究方向: 激光雷达技术。在《红外与激光工程》和《光子学报》期刊发表 EI 论文 2 篇。Email: lilu201205@163.com



通讯作者简介: 庄鹏 (1991-), 男, 博士生, 2015 年入学中国科学技术大学攻读硕士学位, 2017 年转为硕博连读生, 研究方向: 测风激光雷达技术。在《中国激光》期刊发表 EI 期刊 1 篇。Email: pzhuang007@163.com



导师简介: 谢晨波, 博士, 研究员, 博士生导师、激光雷达技术研究室主任。主要从事激光大气遥感理论和激光雷达探测技术方面的研究工作。承担和参加 863 国家高技术研究发展计划、973 国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金、国家公益性行业 (气象) 科研专项子项目、科技部基础性工作专项重点项目、中国科学院重点部署项目、中国科学院战略性先导科技专项等科研项目。在国际 *Appl. Opt.*, *JOSK*, *GRL* 和国内《光学学报》、《强激光与粒子束》、《光谱学与光谱分析》、《红外与激光工程》等光学期刊上发表 30 余篇论文, 国家发明专利 2 项, 企业标准 2 项, 参与撰写专著 1 本, 2014 年安徽省科学技术一等奖 (排名 8)。Email: cbxie@aiofm.ac.cn