

直接测风激光雷达频率跟踪技术及对流层 平流层大气风场观测

方志远^{1,2,3}, 赵明^{1,3}, 杨昊^{1,2,3}, 邢昆明^{1,2}, 王邦新^{1,2}, 陈剑锋^{1,2,3}, 邓旭^{1,2,3}, 程亮亮^{1,2,3}, 谢晨波^{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)

摘要: 为了实现高精度连续探测对流层和平流层大气风场, 搭建了一台直接测风激光雷达系统对对流层和平流层大气风场进行探测。该系统基于双边缘法布里-珀罗标准具的瑞利散射多普勒测风原理, 使用转台式探测结构, 通过频率跟踪的手段对频率漂移进行跟踪, 确保测风的精度。实验结果表明, 该系统对对流层和平流层大气风场探测效果良好, 频率跟踪的范围为 ± 50 MHz, 可以大大减小频率漂移带来的风速误差。经过系统的稳定运行和长时间的观测, 在 40 km 处测得的径向风速随机误差为 8 m/s。径向风速合成为水平风速后, 随机误差在 38 km 处最大为 10 m/s 左右。该系统白天探测高度为 25 km, 夜晚探测高度为 38 km。与探空数据对比, 风速误差均小于 10 m/s, 其中风速误差在 ± 5 m/s 的范围内的数据量约占 75.8%, 探测的风向误差与探空气球的趋势基本一致, 误差范围在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间, 在 15° 范围内的数据量约占 58.6%。将实测数据与探空数据进行统计分析, 结果具有良好的一致性。该系统可以为对流层和平流层大气风场的探测提供数据支撑。

关键词: 直接测风激光雷达; 大气风场; 法布里-珀罗干涉仪; 瑞利散射

中图分类号: P412.25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220412

Frequency tracking technology of direct wind lidar and observation of atmospheric wind field in troposphere and stratosphere

Fang Zhiyuan^{1,2,3}, Zhao Ming^{1,3}, Yang Hao^{1,2,3}, Xing Kunming^{1,2}, Wang Bangxin^{1,2}, Chen Jianfeng^{1,2,3},
Deng Xu^{1,2,3}, Cheng Liangliang^{1,2,3}, Xie Chenbo^{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)

Abstract: In order to continuously detect the tropospheric and stratospheric wind field with high accuracy, a direct wind lidar system is built to detect the tropospheric and stratospheric wind field. Based on the Rayleigh scattering Doppler wind measurement principle of the double edge Fabry-Perot etalon, the system uses a rotary

收稿日期: 2022-06-17; 修订日期: 2022-08-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA17040524); 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)

作者简介: 方志远, 男, 博士生, 主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。

导师简介: 谢晨波, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达大气遥感和环境监测方面的研究。

table detection structure, and tracks the frequency drift by means of frequency tracking to ensure the accuracy of wind measurement. The experimental results show that the system has a good detection performance on the tropospheric and stratospheric atmospheric wind field, and the frequency tracking range is ± 50 MHz, which can greatly reduce the wind speed error caused by frequency drift. After the stable operation of the system and long-time observation, the random error of radial wind speed measured at 40 km is 8 m/s. After the radial wind speed is combined into horizontal wind speed, the maximum random error at 38 km is about 10 m/s. The detection altitude of the system is 25 km in the daytime and 38 km at night. Compared with the sounding data, the wind speed error is less than 10 m/s, and the data volume within the range of ± 5 m/s accounts for about 75.8%. The detected wind direction error is basically consistent with the trend of the sounding balloon, the error range is of 10° to 20° and the data volume within the range of 15° accounts for about 58.6%. The measured data and sounding data are statistically analyzed, and the results have good consistency. The system can provide data support for the detection of tropospheric and stratospheric atmospheric wind fields.

Key words: direct wind lidar; atmosphere wind field; Fabry-Perot interferometer; Rayleigh scattering

0 引言

大气风场是深入研究大气动力学、全球大气活动和空间环境预警的重要参数之一^[1]。长期以来,由于对流层和平流层大气的复杂及变化多端,探测较为困难^[2]。目前,人们通过多种手段来测量大气风场,并取得了积极的进展。风场数据主要来自无线电探空仪、探空火箭、微波雷达及卫星遥感等,但这些手段存在连续性差、时空分辨率低等问题^[3]。多普勒测风激光雷达作为唯一能够对大范围三维风场实现高精度、高时空分辨率探测的工具^[4],具有空间分辨率高、连续测量、机动性好等特点,成为近年来大气探测领域的研究热点,应用前景十分广阔^[5]。

多普勒测风激光雷达可分为相干探测激光雷达和直接探测测风激光雷达^[5]。相干探测多普勒激光雷达系统具有很高的探测灵敏度,目前已广泛用于风电场、机场航空等领域。由于大气湍流对激光相干性的破坏,以及只能利用气溶胶米散射信号,它的有效探测距离受到限制。而直接测风激光雷达可以针对不同的高度,使用不同的方式进行探测,若仅以气溶胶为探测目标,则可以探测低层大气风场;若仅以大气分子为探测目标,则可以探测中高层大气风场。因此,直接探测多普勒激光雷达具有覆盖对流层和平流层高度范围风场探测的潜力。

法国普罗旺斯重点实验室建立的基于法布里-珀罗标准具的双边缘探测技术的 532 nm 瑞利-米多普勒激光雷达系统 (OHP) 探测范围 25~60 km,改进后的第

二代系统探测范围 8~50 km^[6];美国 NASA Goddard 航天中心大气实验室研制的基于三通道法布里-珀罗标准具双边缘技术的 355 nm 瑞利散射多普勒激光雷达系统 (GLOW) 探测范围 1.8~35 km^[7]。国内直接探测的典型系统有:中国海洋大学刘智深教授组建的基于 532 nm 碘分子吸收谱线边缘鉴频技术的多普勒激光雷达系统,并报道了低对流层风速分布^[4];中国科学院安徽光学精密机械研究所建成的基于法布里-珀罗标准具双边缘技术的 1064 nm 米散射多普勒激光雷达系统,探测范围 0.2~10 km^[8-9];中国科学技术大学研制成功的两套基于三通道法布里-珀罗标准具双边缘技术的 355 nm 瑞利测风激光雷达系统^[10],探测范围分别为 10~40 km 和 15~60 km。

文中研制了一台对流层和平流层多普勒直接测风激光雷达系统,采用旋转转台式探测结构,并采用频率跟踪的方法实现对流层和平流层大气风场的准确测量。详细介绍了系统结构和设计参数,并开展了一系列相关实验。

1 反演方法

直接测风激光雷达的基本原理是利用窄线宽的激光与大气相互作用产生的后向散射回波信号,望远镜系统接收后经过光纤传入接收系统中,由接收系统提取多普勒信息,进而得到大气风场的信息^[11]。

在激光雷达探测过程中,激光与大气粒子之间相互作用。由于粒子的运动造成望远镜接收光的频率发生变化,多普勒频移通过接收和发射光的频率变化

计算得到^[9], 经过计算多普勒频移量可反演粒子的运动速度和方向, 经过合成后即水平大气风场的风速和风向。

从运动参考系中观测到的频率 ν' 为^[10]:

$$\nu' = \nu_0(1 + V \cos \theta_i / c) \quad (1)$$

式中: ν_0 为出射激光频率; V 为散射粒子的运动速度; c 为光速; θ_i 为入射光与移动方向的夹角。

发生频移之后, 多普勒频移 ν_d 为:

$$\nu_d = \nu' - \nu_0 = \nu_0 V (\cos \theta_i + \cos \theta_r) / c \quad (2)$$

式中: θ_r 为激光雷达接收方向与粒子移动方向的夹角。由于激光雷达为收发合置系统, 得到 $\theta_i = \theta_r = \theta$, 公式 (2) 可以简化为^[11]:

$$\nu_d = \nu_0 2V \cos \theta / c = 2V_r / \lambda_0 \quad (3)$$

式中: $V_r = V \cos \theta$ 为矢量径向风速径向分量。

得到一个方向的径向风速后, 通过测量其他四个方向上的径向风速, 从而求得东西南北四个不同方向的径向风速。假设四个方向的径向风速为 V_{rE} 、 V_{rW} 、 V_{rS} 和 V_{rN} , 则水平风速大小 V_h 和方向 γ 分别为^[11]:

$$V_h = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4)$$

$$\gamma = \arctan(V_x / V_y) + \pi \left\{ 1 - \text{sign} \left[(V_y + |V_y|) \cdot V_x \right] \right\} \quad (5)$$

其中, V_x 和 V_y 分别为:

$$V_x = (V_{rE} - V_{rW}) / 2 \sin \theta \quad (6)$$

$$V_y = (V_{rN} - V_{rS}) / 2 \sin \theta \quad (7)$$

在直接测风激光雷达中, 边缘技术是广泛使用的一种频率检测技术, 主要工作原理是将入射光频率的变化转化为光强的变化, 从而实现频率检。法布里-珀罗标准具是一种非常有效的检测多普勒频移量的工具, 可以获得更加准确的对流层和平流层大气风场数据。

在理想且不考虑多普勒频移的情况下, $h(\nu)$ 为真实的双边缘法布里-珀罗标准具的透过率曲线, 计算公式为^[10]:

$$h(\nu) = T_p \left(\frac{1 - R_e}{1 + R_e} \right) \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} R_e^n \cos \left(\frac{2\pi n(\nu - \nu_p)}{\Delta \nu_{FSR}} \frac{1 + \cos \theta_0}{2} \right) \cdot \exp \left[- \left(\frac{\pi n(1 + \cos \theta_0)}{2\Delta \nu_{FSR}} \Delta \nu_R \right)^2 \right] \cdot \text{sinc} \left(\frac{2m_m}{An_{ma}} \frac{1 - \cos \theta_2}{2} \right) \right\} \quad (8)$$

式中: θ_0 为标准具接收光的光束发散角; $\Delta \nu_R$ 为后向散射谱谱宽; ν_0 为出射光频率, $\Delta \nu_{FSR}$ 为自由谱间距; T_p 为

峰值透过率; R_e 为有效反射率。大气中的温度会影响分子之间的热运动和碰撞, 从而影响回波信号的展宽。因此, 温度对于回波信号的影响可以由如下高斯函数表示^[12]:

$$f_{Ray}(\nu) = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi \Delta \nu_r^2}} e^{-\frac{4 \ln 2}{\Delta \nu_r^2} \nu^2} \quad (9)$$

$$\Delta \nu_r = \sqrt{\frac{32kT \ln 2}{\lambda^2 M}} \quad (10)$$

式中: $\Delta \nu_r$ 为瑞利散射光信号的谱宽度; M 为平均大气分子质量; T 为散射分子的温度; k 为玻耳兹曼常数。

为了得到实际测量的多普勒频移, 根据上述公式可得, 实际测量的标准具的透过率 $T_R(\nu)$ 可以表示为^[13]:

$$T_R(\nu) = h(\nu) \otimes f_{Ray}(\nu) \otimes f_{Mie}(\nu) \quad (11)$$

式中: $f_{Ray}(\nu)$ 和 $h(\nu)$ 均可从公式 (9) 和公式 (8) 得到; $f_{Mie}(\nu)$ 为激光发射谱线; “ \otimes ”为卷积符号。

根据标准具的透过率函数, 可以定义频率响应函数。根据实测的透过率大小得到频率响应值, 再利用频率响应函数经过反演后, 可以得到多普勒频移大小, 进而得到反演的径向风速。目前定义频率响应函数有多种方法, 为了在计算风速范围内响应函数和多普勒频移接近线性, 将频率响应函数定义为^[14]:

$$R(\nu, T) = \frac{CT_{R1}(\nu, T) - T_{R2}(\nu, T)}{CT_{R1}(\nu, T) + T_{R2}(\nu, T)} \quad (12)$$

式中: C 为比例修正系数, 用于修正光纤分束器的分束比带来的误差。

图 1 为系统采用的双边缘多普勒直接测风原理图。图中, Etalon1 和 Etalon2 分别代表法布里-珀罗标准具的边缘 1 通道和边缘 2 通道的透过率; EtalonL 为法布里-珀罗标准具的锁定通道的透过率; Laser 代表激光发射谱线; 中间的橙色线代表气溶胶和瑞利散射谱线。当大气后向散射回波信号存在多普勒频移时, 气溶胶和瑞利散射的谱线会随之移动, 边缘 1 和边缘 2 通道的透过率一个增大, 一个减小, 图中阴影部分面积代表透过率曲线、激光发射谱线和散射谱线的卷积, 卷积的面积也会一个增大, 一个减小^[14]。公式 (11) 反映卷积的面积, 代入到公式 (12) 中, 即可以获得不同高度处的多普勒频移, 从而求得径向风速。

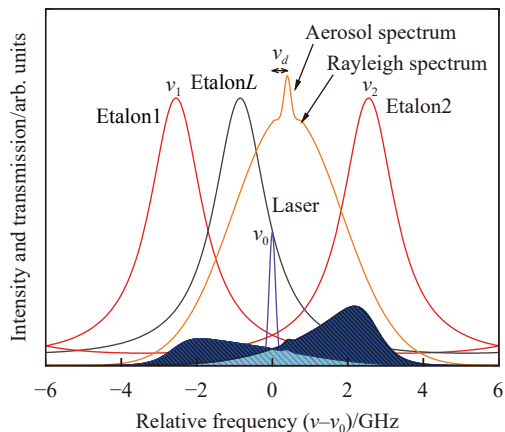


图 1 双边边缘多普勒直接测风测量原理图

Fig.1 Principle diagram of double edge Doppler direct wind measurement

2 系统搭建

对流层和平流层多普勒测风激光雷达系统示意图和实物图分别如图 2(a)、(b) 所示, 整个系统采用转台式设计, 将方舱固定在圆形转台上, 方舱内部包含望远镜、激光器等对应的元器件。

对流层和平流层多普勒测风激光雷达系统结构图如图 3 所示, 种子注入式 532 nm 的激光器发射激光, 大部分激光经过扩束镜入射到大气中, 经过望远镜接收。发射激光的一小部分光经过积分球导入到

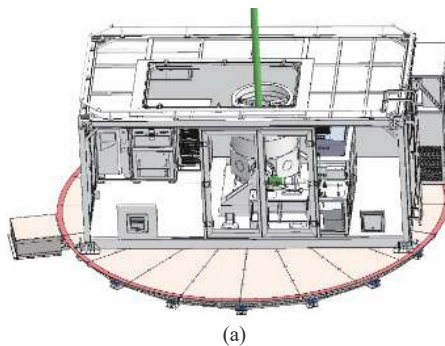


图 2 多普勒直接测风激光雷达系统示意图和实物图

Fig.2 Schematic diagram and physical drawing of Doppler direct wind lidar system

后继光学系统中, 另外一部分光导出经过波长计用于出射激光的频率监测。大气回波信号被大口望远镜

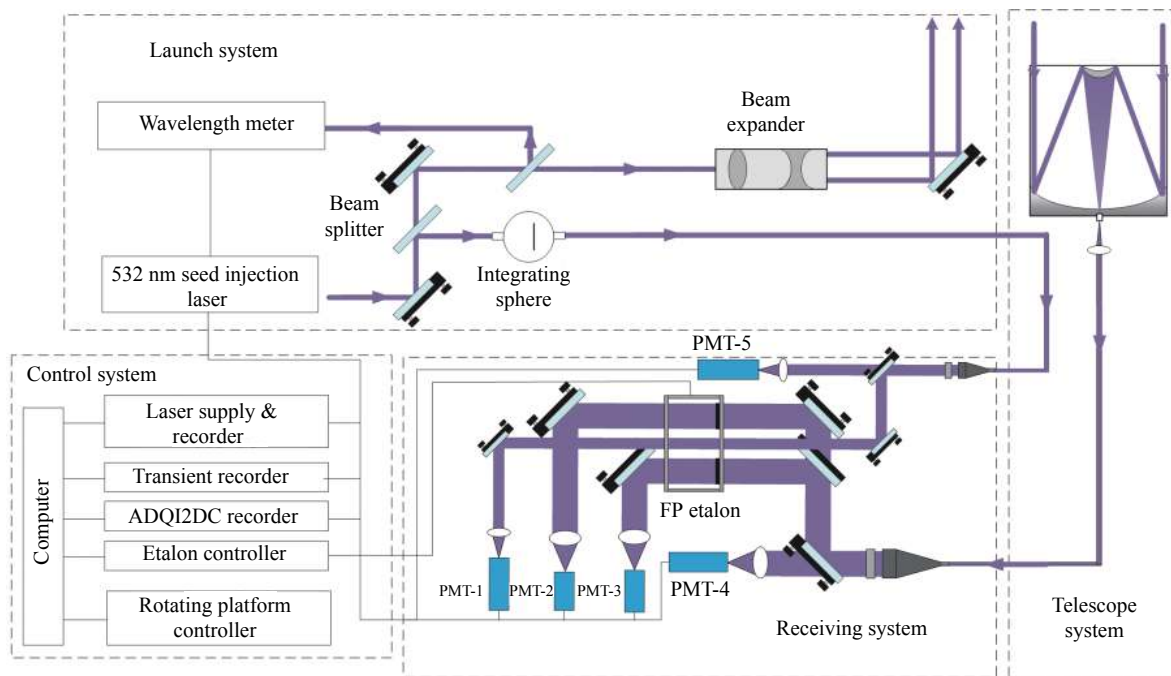


图 3 多普勒直接测风激光雷达系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of Doppler direct wind lidar system structure

镜接收后,经过准直镜和小孔光阑进入光纤。光纤的位置为接收回波信号的焦点位置,进行对应调整之后可将大气回波信号导入到接收机中,经过对应的反射镜片和法布里-珀罗标准具后,由对应的 PMT 探测器接收,再通过瞬态记录仪进行信号采集。在测得一个径向风速后,调整转台方向,测量另一个径向风速。当四个径向风速探测完成后,对径向风速合成即可得到水平风速和风向。

系统的设计性能指标如表 1 所示,风速探测范围 0~100 m/s,高度在 5 km 时,随机风速误差为 1 m/s,高度在 30 km 时,随机风速误差在 5 m/s,垂直分辨率为 300 m,探测时间为 20 min。

接收机的光路图和三维模型图分别如图 4(a)、(b) 所示。从系统的发射部分分出的各路光需要接入到接收机中,用于锁定通道透过率的计算。该接收机系统由可调节的反射镜组成,可以对光路的准直性进行调节。望远镜接收的回波信号经过多模光纤导入到准直镜 1 中,经过准直变成平行光后分为两束光,分光比例为 9 : 1,即 90% 的光进入法布里-珀罗标准具的边缘通道,10% 的光进入瑞利-米通道,进入探测器接收。该通道一方面可以监测激光器的频率抖动

表 1 系统探测指标

Tab.1 System detection index

System parameters	Value
Wavelength/nm	532
Energy/mJ·pulse ⁻¹	800
Measuring range/km	5-35
Telescope diameter/mm	800
Wind velocity range/m·s ⁻¹	0-100
Wind speed detection error	1 m/s@5 km, 5 m/s@25 km
Vertical resolution/m	300
Time resolution/min	20
Scanning range/(°)	360

造成的误差,另一方面在系统运行过程中,可以使用该通道来进行查看回波信号的质量。两个边缘通道的光经过分束镜通过法布里-珀罗标准具,经过反射镜 2 和反射镜 4 进入对应探测器。从激光器导出的光经过准直镜 2 进入接收机,经过分光镜 1 和反射镜 1 进入法布里-珀罗标准具。分光镜 1 的分光比例为 7 : 3,即锁定参考通道接收的光占 30%,法布里-珀罗标准具中的锁定通道接收的光占 70%,从而计算得到锁定通道的透过率。

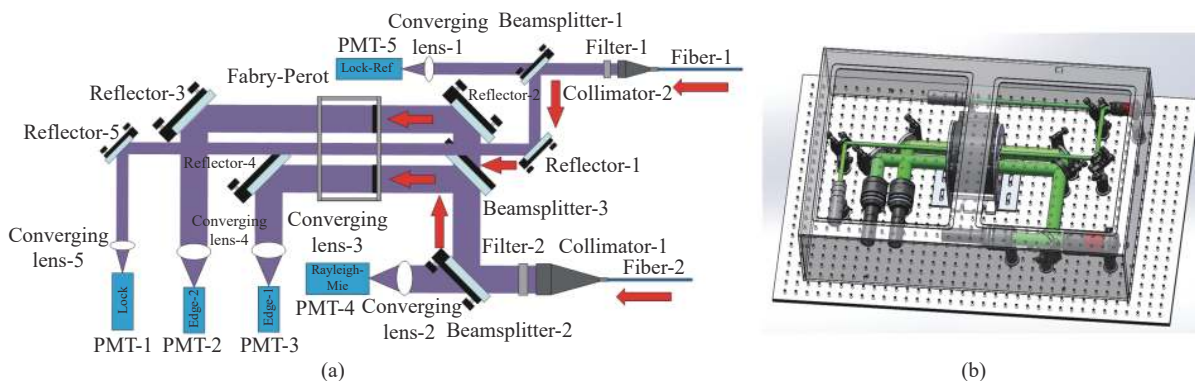


图 4 接收机光路图 (a) 及三维结构图 (b)

Fig.4 (a) Optical path diagram and (b) three-dimensional structure diagram of receiver

通常多普勒直接测风激光雷达采用扫描式结构对风速进行测量,该结构需要多余的反射镜,会影响系统的探测效率。如果采用两个固定方舱正交观测的方案,则成本较高。该系统采用旋转转台式结构,解决了传统的扫描头装置无法适用于大口径激光雷达的难题,且仅需要单个设备方舱,有效地降低了成

本和运维难度。系统选用的转台直径为 6 m,系统定位精度可达到±0.1°,设有绝对零位,可实现 360°任意角度可调。转台的减速电机为变频电机,其转速和运转方向由 PLC 控制,可以实现准确停车,同时尾端装有光电编码器用来检测旋转的角度。

在多普勒激光雷达进行工作时,需要多个硬件进

行协调,因此需要对系统的时序进行设计。系统的工作时序图如图 5 所示。激光脉冲的间隔时间为 33 ms,出射激光的脉宽为 8 ns,激光出光后,激光器的 Q 开关输出上升沿 TTL 电平,此时门控卡开始工作,产生

的方波信号进入到 PMT 探测器中,首先输出低电平,不接收低层信号,随后输出高电平,用于探测高空大气信号。

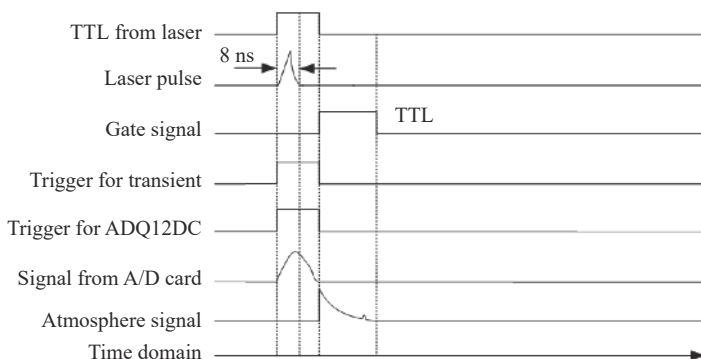


图 5 系统工作时序图

Fig.5 System working sequence diagram

3 频率跟踪方案设计

法布里-珀罗标准具是具有重要科研价值的光学仪器,广泛应用于光学鉴频。该系统采用三通道法布里-珀罗标准具,它具有两个相同大小的边缘通道和一个锁定通道,两个边缘通道的直径为 38 mm,锁定通道的直径为 19 mm。边缘通道用于大气回波信号频率的测量,锁定通道用于出射激光的锁定和测量,再利用回波信号频率和出射激光频率的差值得到多普勒频移量。

根据图 1 所示的测风原理,出射激光的频率位于两边缘通道的交叉点处。但是系统在实际运行过程中由于受到温度和振动的影响,使出射激光的频率发生漂移,进而导致出射激光的频率偏离交叉点位置,从而使风速测量灵敏度下降,进而导致风速测量精度

下降。根据位置进行判断,若偏离锁定点的位置,则需要调整法布里-珀罗标准具的腔长,实现频率的跟踪。

出射激光频率发生漂移主要包含两部分:一部分是由于种子激光器受到温度影响,使得主激光器中的谐振腔在种子光注入时频率不匹配,从而造成频率漂移;另一部分是由于温度变化使法布里-珀罗标准具的腔长发生微小变化,从而导致频率的抖动和漂移。在系统运行时,特别是秋冬季节,昼夜温差变化大,尽管种子激光器和主激光器均配备了温控系统,但是出射激光仍有部分漂移。

图 6 为基于法布里-珀罗标准具的频率跟踪单元流程图。首先扫描出法布里-珀罗标准具的透过率曲线,对其进行标定,将激光器出射激光频率锁定在法布里-珀罗标准具双边缘通道的初始频谱交叉点处。根据锁定通道的透过率,按照选定的一段曲线进行多

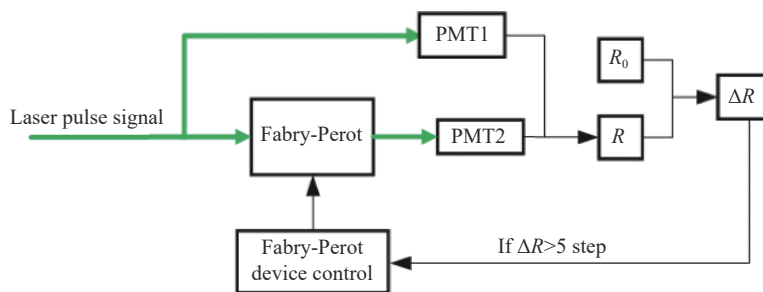


图 6 基于法布里-珀罗标准具的频率跟踪单元流程图

Fig.6 Flow chart of frequency tracking unit based on Fabry-Perot etalon

项式拟合,得到频率跟踪常数,即为法布里-珀罗标准具需要调整的位置。根据该位置调整法布里-珀罗标准具的腔长,将出射激光频率锁定在法布里-珀罗标准具双边缘通道的频谱交叉点处,使边缘通道交叉点跟踪激光频率。

图 7 为 2022 年 2 月 21 日 22:20~00:50 时间段内频率跟踪的结果。图 7(a) 为锁定通道的比值变化,图 7(b) 为频率跟踪的最终结果。从图中可以看出,跟踪频率范围在 ± 50 MHz 以内,因此可以大大减小频率漂移带来的风速误差。

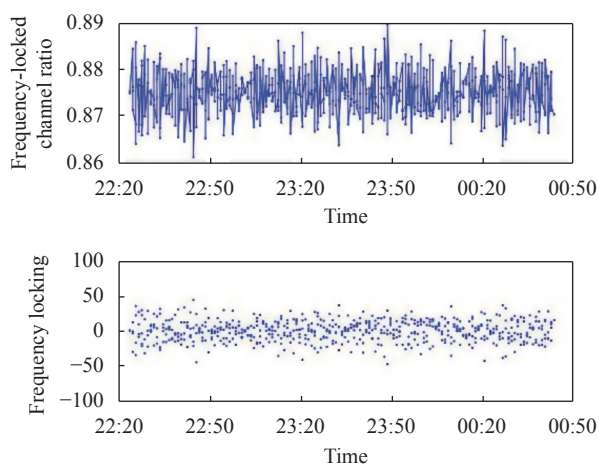


图 7 频率跟踪结果

Fig.7 Results of tracking frequency

4 结果分析

为了验证系统的探测性能,在白天和夜晚对对流

层和平流层多普勒测风激光雷达系统进行探测,图 8(a) 为 2021 年 12 月 28 日 15:14 的水平风向和风速测量结果,图 8(b) 为 2021 年 12 月 30 日 21:05 的水平风向和风速测量结果。从图中可以看出,根据最高高度风速随机误差不大于 5 m/s 的条件,在晴朗天气下,白天的探测高度为 25 km 左右,夜晚的探测高度为 38 km 左右。

图 9 为晴朗天气下对流层和平流层多普勒激光雷达探测风速与探空气球数据的对比廓线。激光雷达廓线为 2021 年 12 月 29 日 22:00 进行观测,探空气球释放的时间为 21:23,二者相距 60 m,探空气球的实际探测高度为 28 km。从图中可以看出,激光雷达的探测廓线与探空气球采集的风速廓线和风向廓线变化趋势基本一致,最高探测高度为 45 km 左右。由于探空数据与激光雷达探测的风速数据分辨率不同,为了计算探空数据与激光雷达系统探测的误差,将探空数据进行插值计算,然后与激光雷达系统探测的风速进行比较,除去高空数据可以得到:在 28 km 以下、与探空气球重合的区域内,风速误差均小于 10 m/s,其中风速误差在 ± 5 m/s 范围内的数据量约占 75.8%,探测的风向与探空气球的趋势基本一致,误差范围在 $10^\circ\sim 20^\circ$ 之间风向误差,在 15° 范围内的数据量约占 58.6%。

图 10 为 2022 年 3 月 7 日不同地区的探空廓线与激光雷达探测数据对比,蓝色线为激光雷达探测廓线,两条探空廓线分别为阜阳和安庆地区探空廓线,

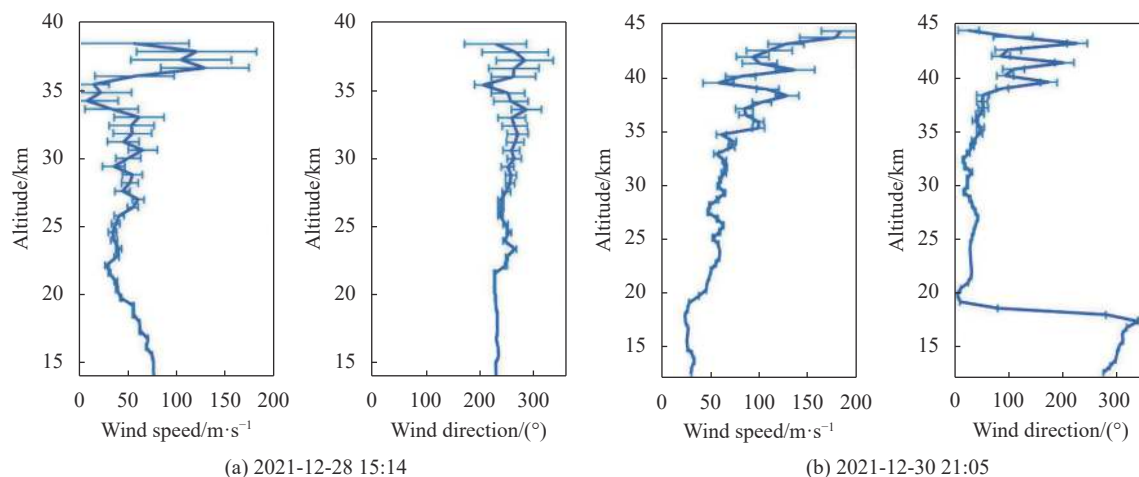


图 8 白天 (a) 和夜晚 (b) 探测的风速和风向

Fig.8 Wind speed and direction detected by (a) day and (b) night

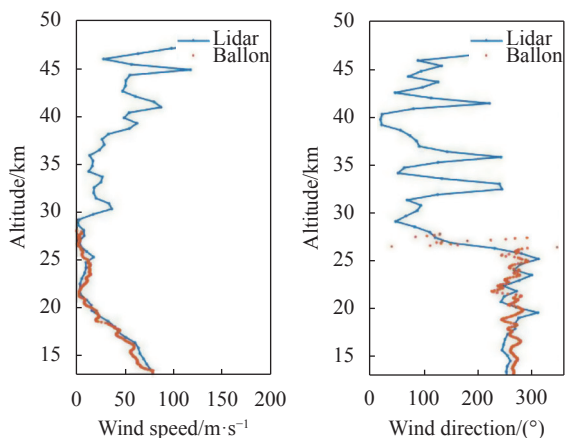


图 9 2021 年 12 月 29 日风场廓线与探空气球对比廓线

Fig.9 Wind field profile and sounding balloon comparison profile on December 29, 2021

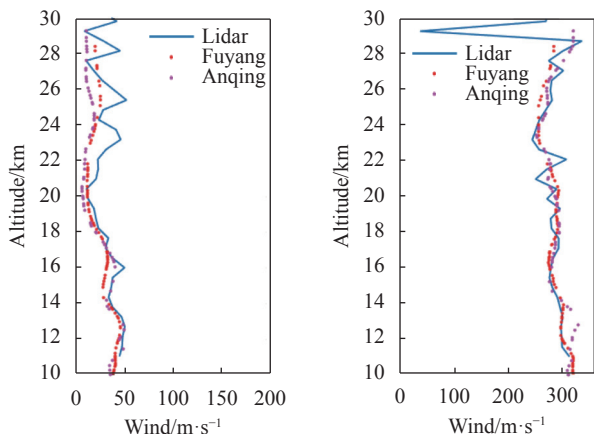


图 10 不同地区的探空廓线与激光雷达数据探测对比

Fig.10 Comparison of sounding profile and lidar data detection in different regions

二者距离合肥分别为 168.1 km 和 152.2 km。从图中可以看出,尽管所隔距离较远,激光雷达所测得的风速廓线与二者之间的探空数据变化趋势一致,风向也与探空廓线基本相同,说明在同一时间段内,对流层和平流层之间的大气的变化趋势相同。

5 结论

为了准确获取对流层和平流层大气风场的数据,搭建了一台多普勒直接测风激光雷达系统,采用转台式探测结构对径向风速进行探测,并使用频率跟踪的手段,保证探测精度。实测结果显示,出射激光的最大偏移量在 50 MHz 以内,可以大大减小风速的测量

误差。最终实验结果表明,该激光雷达白天探测高度为 25 km,夜晚探测高度为 38 km。在 28 km 以下、与探空气球重合的区域内,风速误差均小于 10 m/s,风向与探空气球的趋势基本一致,满足系统的设计要求。将所测的数据与安庆和阜阳的探空廓线进行对比,激光雷达所测得的风速廓线和风向廓线与二者之间的探空数据变化趋势一致,说明在同一时间段内,对流层和平流层之间大气的变化趋势相同,为研究不同地区的对流层和平流层之间的大气风场提供参考。

参考文献:

- [1] Crutzen P J. The International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC) summary of an established project of the IGBP [R]. Germany: Max Planck Institute for Chemistry, 1991: 233-243.
- [2] Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. Advanced Atmospheric Physics [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [3] Shen Fahua, Wang Zhongchun, Liu Chenglin, et al. Detection of atmospheric wind field by Mie scattering Doppler lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1537-1541. (in Chinese)
- [4] Shi Jiexiang, Song Xiaoquan, Wu Songhua, et al. Doppler lidar telemetry technology for wind turbine vibration [J]. *Optics Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2180-2191. (in Chinese)
- [5] Yuan Jinglong, Xia Haiyun, Wei Tianwen, et al. Identifying cloud, precipitation, windshear, and turbulence by deep analysis of the power spectrum of coherent Doppler wind lidar [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37406.
- [6] Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16(11): 1273-1276.
- [7] Gentry B M, Chen H L, Einadui F. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): Validation and performance [C]/Proceedings of SPIE, 2001, 4484: 74-81.
- [8] Dong Jihui, Cha Hyun-Ki, Kim Duk-Hyeon, et al. Doppler LiDAR measurement of wind in the Stratosphere [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2010, 14(3): 199-203.
- [9] Zheng Jun, Sun Dongsong, Chen Tingdi, et al. Scanning Rayleigh Doppler lidar for wind profiling based on non-polarized beam splitter cube optically contacted FPI [J]. *Current*

- Optics and Photonics*, 2018, 2(2): 195-202.
- [10] Shen Fahua, Shu Zhifeng, Sun Dongsong, et al. Rayleigh scattering Doppler lidar wind field inversion method [J]. *Journal of Physics*, 2011, 60(6): 192-198. (in Chinese)
- [11] Chen Jie, Tong Yicheng, Xiao Da, et al. Study on inversion method of atmospheric aerosol extinction backscatter ratio [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1305-1316. (in Chinese)
- [12] Li Yiyue, Hu Shuling. Turbulence spectrum decomposition of lidar using independent component analysis [J]. *Optics Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1029-1037. (in Chinese)
- [13] Yang Bin, Mo Zusi, Liu Haijiao, et al. Research on abrupt signal processing method of atmospheric detection lidar (*Invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20211117. (in Chinese)
- [14] Zhuang Peng, Shen Fahua, Wang Bangxin, et al. Study on Rayleigh meter scattering wind lidar based on Fabry-Perot interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1210001. (in Chinese)