

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2024.01.002

# 一种基于多普勒原理的相干测风激光雷达及其外场应用

顾桃峰<sup>1</sup>, 岳海燕<sup>2\*</sup>, 王四化<sup>3</sup>, 伍光胜<sup>1</sup>, 冯厚文<sup>4</sup>, 唐梓恒<sup>5</sup>,  
庄鹏<sup>5,6,7</sup>, 康宝荣<sup>5</sup>, 谢晨波<sup>5,6,7</sup>

(1 广州市突发事件预警信息发布中心, 广东 广州 511430;

2 广州市气象台, 广东 广州 511430;

3 广州市黄埔区气象局, 广东 广州 510700;

4 广州市气象局观测预报处, 广东 广州 511430;

5 安徽蓝科信息科技有限公司, 安徽 合肥 230031;

6 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;

7 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 精确观测大气风场在气象、军事、航空航天等领域具有十分重要的意义。相干测风激光雷达能够实时有效地进行大气矢量风场探测。为此研制出一款基于多普勒原理的相干测风激光雷达, 并进行外场观测验证了其性能。该系统可探测垂直上空45~3000 m的水平风场以及垂直气流, 最大可探测风速为60 m/s。分析比对了该雷达于2021年10月16日08:00—20日00:00在广州市黄埔区气象局观测的数据与同时段同地点微波风廓线雷达的观测数据, 结果表明二者具有良好的一致性。重点分析了2021年10月18日10:00—20日00:00的典型观测数据, 进一步验证了该相干测风激光雷达所测数据的准确性。该雷达在风场探测上的应用将为气象参数监测和预报精度的提高以及极端灾害性天气的预警提供实时数据支撑。

**关键词:** 激光雷达; 多普勒; 相干测风; 风场比对

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2024)01-022-016

## A coherent wind lidar based on Doppler principle and its field application

GU Taofeng<sup>1</sup>, YUE Haiyan<sup>2\*</sup>, WANG Sihua<sup>3</sup>, WU Guangsheng<sup>1</sup>, FENG Houwen<sup>4</sup>,  
TANG Ziheng<sup>5</sup>, ZHUANG Peng<sup>5,6,7</sup>, KANG Baorong<sup>5</sup>, XIE Chenbo<sup>5,6,7</sup>

(1 Guangzhou Emergency Early Warning Release Center, Guangzhou 511430, China;

2 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430, China;

3 Guangzhou Huangpu Meteorological Administration, Guangzhou 510700, China;

4 Guangzhou Division of Monitoring and Networking, Guangzhou 511430, China;

5 Anhui Lanke Information Technology Co., Ltd, Hefei 230031, China;

6 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Machinics, HFIPS,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

7 Advanced Laser Technology Anhui Provincial Laboratory, Hefei 230000, China)

**基金项目:** 广州市科技计划项目 (202206010016), 安徽省2017年度高层次科技人才团队项目 (01056790), 2019年安徽省科技重大专项 (201903c08020013), 中国科学院A类战略性先导科技专项 (XDA17040524), 安徽省教育厅自然科学重点项目 (KJ2021A0945), 广东省科技计划项目 (2019B121201002)

**作者简介:** 顾桃峰 (1982-), 江苏苏州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象探测技术、气象信息技术的研究。E-mail: 453131480@qq.com

**收稿日期:** 2022-05-13; **修改日期:** 2022-06-29

**\*通信作者:** E-mail: 260894529@qq.com

**Abstract:** Accurate observation of atmospheric wind field is of great significance in meteorology, military, aerospace and other fields. Coherent wind lidar can detect the atmospheric vector wind field effectively and in real time. A coherent wind lidar based on the Doppler principle is developed in this work, and its performance is demonstrated in field observations. The system can detect the horizontal wind field and vertical airflow with a vertical altitude from 45 m to 3000 m and its maximum detectable wind speed is 60 m/s. The observation data of the lidar at Huangpu District Meteorological Bureau in Guangzhou, China, from 08:00 on October 16, 2021 to 00:00 on October 20, 2021, is analyzed and compared with that of the microwave wind profile lidar at the same location during the same period, and it shows that the two observation data are in good agreement. Finally, the typical observation data from 10:00 on October 18 to 00:00 on October 20, 2021, are selected for key analysis to further verify the accuracy of the data measured by the coherent wind lidar. The application of the developed lidar in wind field detection will provide real-time data support for the improvement of meteorological parameter monitoring and forecast accuracy, as well as the early warning of extreme disastrous weather.

**Key words:** lidar; Doppler; coherent wind measurement; wind profile comparison

## 0 引言

广州市地处珠江三角洲北缘, 濒临南海, 其地势东北高西南低, 地形差异明显, 同时属于亚热带季风区, 面临极端台风、暴雨、强对流等灾害天气的风险高。风向、风速是重要的气象资料, 低层三维风场和温度场与对流风暴的生成、发展及消亡密切相关。内陆地区常规气象观测站的分布仍不足以监测、分析和预报中小尺度暴雨云团现象。为加强对中小尺度暴雨云团发展机制的认识, 提高预报预警能力, 尤其是在复杂地形下需要更高时空分辨率的对流层低层三维风场, 才能更好地与中上层大气背景风场集成来精细化研究区域内三维风场变化特征。

我国早期的风场测量设备有探空气球、测风塔、声雷达、微波风廓线雷达等。探空气球和测风塔属于点式测风仪器, 无法连续得到大气风场廓线; 声雷达探测距离较近, 一般为几百米; 微波风廓线雷达距离分辨率较低且体积庞大, 无法满足现代气象发展对风场精确连续测量的需求。测风激光雷达作为一种新型的主动大气遥感设备, 是利用大气中气溶胶粒子对激光的多普勒频移效应来测量大气风场<sup>[1,2]</sup>。从工作原理上多普勒激光雷达主要分为相干和非相干探测两种, 非相干探测同时利用大气分子和气溶胶作为示踪物, 对于大气边界层内风场的测量, 其空间分辨率较高, 但时间分辨率较低, 并且容易受到气溶胶分布变化影响。而具有高灵敏度、高时间分辨率特点的相干探测, 对大气边界层内的风场测量更为精准。相干测风与传统的测风手段相比, 具有较高的时空分辨率、更高的风场测量精度、更短的响应时间、更高的灵敏度和能够提供详尽的三维风场信息等优点, 在国际上得到了广泛的应用<sup>[3-5]</sup>。2014年, Wu等<sup>[6,7]</sup>报道了其研制的用于风能研究和开发利用的 1.55  $\mu\text{m}$  全光纤相干测风激光雷达。夏海云等<sup>[8]</sup>研制了基于双一标准具直接探测的地基测风激光雷达, 该雷达系统对靶盘径向转速测量的标准误差为 60 m/s, 探测高度可达 10 km。Pearson等<sup>[9]</sup>使用 HALO Photonics Streamline 测风激光雷达 (一种相干多普勒激光雷达) 测量垂直风速, 使用外差检测来测量反向散射光的多普勒频移。因此, 相干测风激光雷达作为一种有效的大气风场探测设备, 可以实现对

大气风场信息的精准采集和测量,满足了人们在实际生活和科学研究中对大气风场测量的需求。本文介绍了一款自主研发的相干测风激光雷达,对其探测原理和系统结构进行详细介绍,并将其置于广州市黄埔区气象局进行观测,对观测数据和典型数据进行分析比对,验证其数据准确性。最后对其在极端天气的气象监测及预报等领域的应用进行了展望。

## 1 探测原理

相干测风激光雷达对大气风场的测量主要基于多普勒效应<sup>[10-12]</sup>。图1为相干测风激光雷达的测量原理图。激光器发射一束中心频率为 $\nu_x$ 、波长为 $\lambda$ 的脉冲激光,通过望远镜射向大气。激光与大气中粒子相互作用,产生后向散射光,其频率与入射光的频率存在偏移(即多普勒频移)<sup>[13-16]</sup>。假设粒子的风速大小 $V$ 、粒子的后向散射方向夹角为 $\alpha$ ,基于多普勒效应的原理,由粒子运动引起的多普勒频移量 $\nu_d$ 可以表示为

$$\nu_d = \nu_r - \nu_x = \frac{2V \cos \alpha}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 $\nu_r$ 为接收模块接收到的后向散射光频率, $V \cos \alpha$ 为风速在望远镜视向的分量。

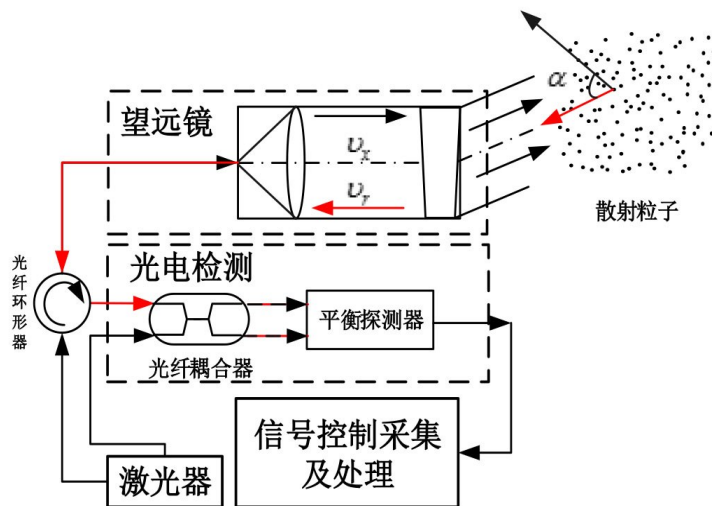


图1 相干测风激光雷达测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of coherent wind lidar measurement principle

由于风速带来的多普勒频移量较小,很难直接测量,需要光电检测模块将高频信号光调制为易于探测且携带频移量的中频信号后,才能获得多普勒频移量,进而反演风速,最终获得大气风场信息<sup>[16,17]</sup>。

准确估计回波信号的频率,从而计算出多普勒频移量,最终得到精确的风速信息是相干测风激光雷达系统的重点。目前相干测风激光雷达回波频率估计算法除了自适应滤波估计算法<sup>[18]</sup>外还有脉冲对算法(PP)<sup>[19]</sup>,PP算法的计算速度最快,但精度较低,一般用于处理高信噪比的信号;还有精度最高的最大似然估计算法(ML)<sup>[20]</sup>,但其算法复杂且计算量大,速度较慢;最大似然离散谱峰值估计算法(ML DSP)<sup>[21]</sup>相比PP算法提升了精度,但也同时提升了运算量。由于ML DSP算法计算量较少,且精度较高,运算速度快,符合本系统的要求,因此本系统最终选用了ML DSP算法。

ML DSP算法基于快速傅里叶变换(FFT),对于一个脉冲的一个距离门,其中包含 $M$ 点信号,为获得周

期图中的多普勒频移的位置信息, 对其做 FFT 处理<sup>[15,22]</sup>。用周期图表示为

$$P(m) = \frac{T_s}{M} \left[ \sum_{k=0}^{M-1} Z_k \exp\left(-j \frac{2\pi mk}{M}\right) \right]^2, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (2)$$

式中采样时间间隔和后向散射信号分别用  $T_s$  和  $Z_k$  表示。

对  $N$  发激光脉冲进行累积平均后, 可获得对应的周期图为

$$\hat{P}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P(m, n). \quad (3)$$

在图中找寻最大值点位相对应的频谱位置, 进而估算出风速, 计算公式为

$$v_{\text{MLDSP}} = \frac{\lambda}{2} \left\{ \left[ \underset{i=0,1,\dots,M-1}{\arg \max} P(m_i) \right] \frac{f_s}{M} - f_{\text{AOM}} \right\}, \quad (4)$$

式中采集卡采样频率用  $f_s$  表示, 激光器 AOM 所产生的频移量则用  $f_{\text{AOM}}$  表示。

整体系统的信号处理流程为: 首先将采集卡开启时间与激光脉冲发射时间做同步处理, 回波信号与本振光拍频后进行采集, 将接收回波信号时的距离门对应风速的空间分辨率; 随后对每个距离门内的信号进行功率谱估计, 累加平均并扣除噪声后得到频谱信息; 最后对频谱进行进一步校正, 代入式 (1) 中得到各个距离门处的风速。

在测量系统中加入二维扫描装置, 以测量固定方位的径向风速为基础, 采用速度方位显示 (VAD) 的四波束反演方式, 分别对应于固定仰角的正北、正东、正南和正西方向, 具体反演大气风场风速的示意图如图 2 所示。相干测风激光雷达以天顶角  $\varphi$ 、方位角  $\theta$  进行四个方位的扫描, 获得四个方向上的径向风速, 通过合

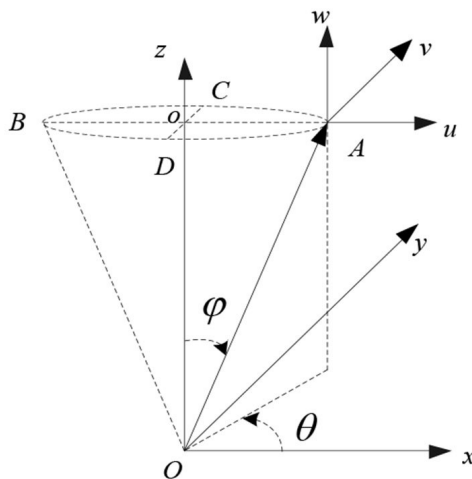


图 2 VAD 方法反演大气风场风速的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VAD method for retrieving wind speed in atmospheric wind field

成反演出水平风速、水平风向以及垂直气流组成。图中  $V_A, V_B, V_C, V_D$  分别为沿  $O_A, O_B, O_C, O_D$  方向的四个径向速度值,  $u, v$  分别代表水平风速在  $x$  轴、 $y$  轴上的分量,  $w$  表示垂直方向的风速, 得到大气风场与测量点处的关系为<sup>[23]</sup>

$$\begin{cases} V_A = u \sin \varphi + w \cos \varphi \\ V_B = -u \sin \varphi + w \cos \varphi \\ V_C = v \sin \varphi + w \cos \varphi \\ V_D = -v \sin \varphi + w \cos \varphi \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} u = \frac{V_A - V_B}{2 \sin \varphi} \\ v = \frac{V_C - V_D}{2 \sin \varphi} \\ w = \frac{V_A + V_B + V_C + V_D}{4 \cos \varphi} \end{cases}. \quad (6)$$

通过计算出相应的径向风速, 结合不同扫描方向下径向风速大小, 合成三维的矢量风场, 获取相应风廓线分布。

## 2 系统设计

图3为相干多普勒测风激光雷达系统结构图。其中激光发射单元采用全光纤结构的脉冲激光器, 望远镜收发单元采用透射式光学望远镜系统, 通过光纤耦合方式分别与激光发射单元及光电检测单元进行光信号的传输。使用透射式望远镜, 是因为其盲区小, 能够提高底层风场的探测能力和系统的成像能力, 同时透射式望远镜还兼具轻量化和小型化的优点, 利于配合楔镜实现发射激光光束在水平方向上的扫描。

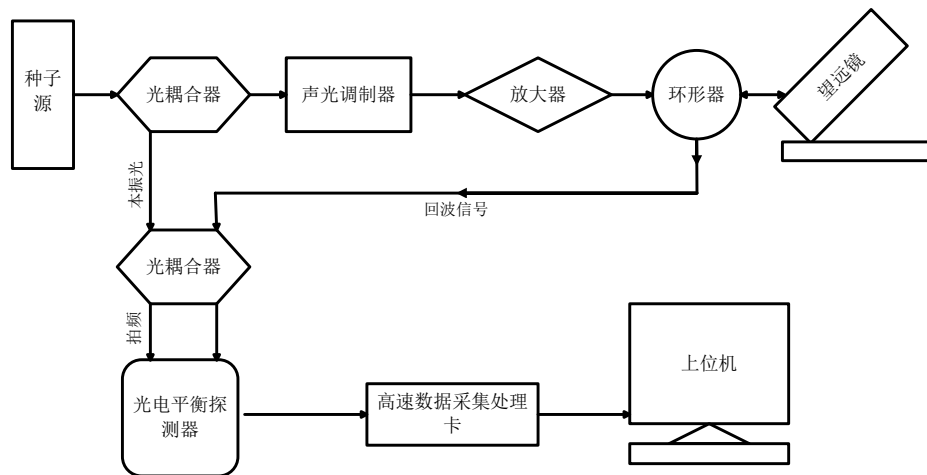


图3 相干测风激光雷达具体系统构成

Fig. 3 Schematic diagram of coherent wind lidar system structure

相干测风激光雷达系统在工作中分为三个步骤: 激光发射、大气回波信号接收和信号转换、采集与处理。在激光脉冲发射过程中, 由触发信号控制器发出重复频率 10 kHz、脉冲宽度 300 ns 的脉冲触发信号驱动声光调制器 (AOM)。AOM 产生的 80 MHz 正弦脉冲信号调制连续种子激光产生激光脉冲, 产生的线偏振激光脉冲经掺铒光纤放大器放大后由脉冲输出尾纤输出。尾纤输出光束经望远镜扩束到 100 mm 后, 输送至大气中。在大气回波信号接收过程中, 发射到大气中的激光脉冲受到气溶胶粒子散射后, 后向散射回波信号通过望远镜到达环形器, 从环形器输出。环形器的第三端口与耦合器的一个输入端相连, 耦合器的另外一



端连接种子源输出的连续参考光。二者在耦合器处进行拍频, 拍频后的光信号按 1:1 分为两束, 进入平衡光电探测器的两输入端, 将光信号转换成电信号。在信号转换、采集与处理过程中, 数据采集设备设置固定的空间分辨率将电信号划分为不同的高度层进行采集, 并将采集的带有风速信息的电信号数据通过数据处理单元实时处理成频谱数据, 存入工控机内的频谱数据库中, 再利用实时矢量风场合成算法即可得到大气风场分布。

相干多普勒测风激光雷达系统的主要技术参数如表 1 所示。综合考虑了大气窗口、光纤的损耗、光纤激光器的市场成熟度以及人眼安全等因素, 该系统采用 1550 nm 作为发射激光波长。通过对系统各部件参数的模拟设计以及实验验证, 该系统可探测 45~3000 m 的水平风场以及垂直气流的空间分布, 最大可探测风速为 60 m/s。考虑到各种复杂的天气条件以及运输安装方便, 已完成高低温试验以及振动仿真。该系统总体质量小于 30 kg, 可在 -10~50 °C 宽温范围下工作, 并且整机具备 IP65 的防护等级, 测试系统和成品外观图如图 4 所示。

表 1 相干测风激光雷达设计参数

Table 1 Design parameters of coherent wind lidar

Technical parameter	Value
Wavelength/nm	1550
Measuring range of height/m	45-3000
Measuring range of wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )	0-60
Measuring range of wind direction/(°)	0-360
Repetition frequency/MHz	400
Horizontal wind direction error/(°)	≤ 10
Horizontal wind speed error/(m·s <sup>-1</sup> )	≤ 0.8 (V ≤ 10 m·s <sup>-1</sup> )
Vertical flow error/(m·s <sup>-1</sup> )	≤ 0.5
Detection blind spot/m	≤ 45
Spatial resolution/m	30/60/90
Operating temperature/°C	-10-50
Weight/kg	≤ 30

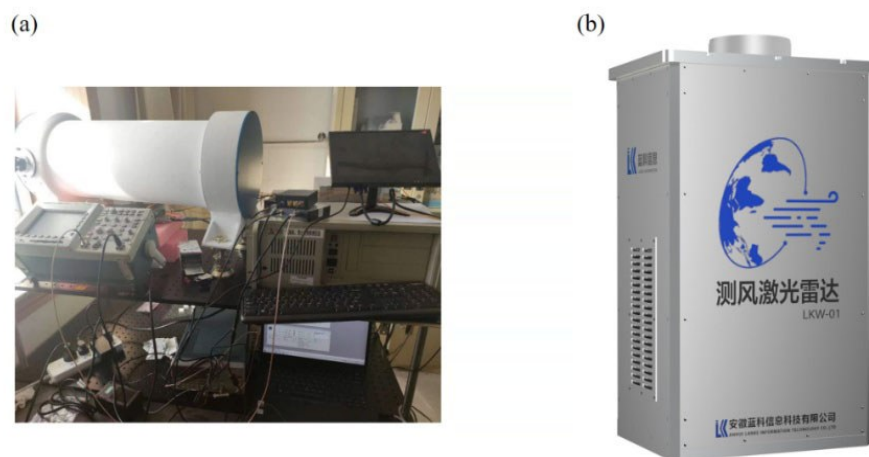


图 4 相干测风激光雷达实物图。(a) 实验件; (b) 外观图

Fig. 4 The physical picture of coherent wind lidar. (a) Experimental set; (b) appearance

### 3 数据比对及观测分析

#### 3.1 数据统计对比

2021年10月,相干测风激光雷达在广州市黄埔区进行连续观测,现场图如图5所示。距离相干测风激光雷达系统60 m处有一台微波风廓线雷达,与相干测风激光雷达进行同期监测比对。为了验证相干测风激光雷达数据的准确性,选取10月16日08:00—20日00:00的观测数据进行对比。通过理论计算和实验得到信噪比(SNR)大于-25 dB为有效信号,按此标准,在对比前将相干测风激光雷达的异常或无效数据剔除。微波风廓线雷达的探测高度为150~9000 m,时间分辨率为6 min,150~2790 m高度的垂直分辨率为120 m。由于相干测风激光雷达与微波风廓线雷达时间分辨率和垂直分辨率不对应,难以直接进行数据比对。因此在时间和垂直高度上分别对相干测风激光雷达数据采取了均值处理、线性插值,从而使两个雷达的时间分辨率和垂直分辨率相同。以微波风廓线雷达为标准,计算分析相干测风激光雷达观测数据的偏差与一致性。



图5 广州市黄埔区相干测风激光雷达系统现场图

Fig. 5 Scene picture of coherent wind lidar system in Huangpu District, Guangzhou City

10月16—20日黄埔区站点相干测风激光雷达与微波风廓线雷达不同高度水平风速风向对比结果如表2所示,相应的水平风速概率密度分布图及风向玫瑰图如图6—9所示。水平风速相关性分析中,相关系数后加“\*”号,说明在0.05水平上显著相关,即两组数据显著性相关的概率为95%。观测期间主要为多云转晴天气,不同高度水平风速的相关系数随着高度的增加先增大后减小,其中650~1210 m处的相关系数均在0.8以上,观测数据较为一致,两者水平风速概率密度曲线(图6、图7)变化趋势一致,均符合风速变化规律。随着高度增加,数据量减少,同一高度水平风速监测结果偏差较大,可能原因是探测高度越高激光能量衰减较多,2190 m以上观测数据为弱相关或不相关。水平风向通过风向相符率进行表征,风向相符率为相干测风激光雷达与微波风廓线雷达两者相符的次数与总次数的比值,采用16个方位的风向,风向夹角为 $22.5^\circ$ ,以正北为 $0^\circ$ ,相干测风激光雷达风向的准确度为 $\pm 10^\circ$ ,因此,相干测风激光雷达对应的风向范围为 $338.76^\circ \sim 21.25^\circ$ 、 $1.26^\circ \sim 43.75^\circ$ ,以此类推,若相干测风激光雷达风向满足,则说明两者风向相符。对510~2190 m高度范围的同一高度水平风向差进行分析,小于 $30^\circ$ 的占比为34.45%,风向相符率最高为41.5%,随着高度上升,风向相符率逐渐降低。风向玫瑰图(图8、图9)显示高频风向误差明显,分析其误差原因,在

等高度对比时两设备分辨率不同、发生风向切变等现象, 均会影响风向对比结果。

表 2 2021 年 10 月 16—20 日黄埔区站点不同高度下相干测风激光雷达与微波风廓线雷达测得的水平风速风向对比

Table 2 Comparison of horizontal wind direction and wind direction at different heights between coherent wind lidar and wind profiler radar from October 16 to 20, 2021 at station in Huangpu District

Height/m	Number of sample	Pearson correlation coefficient	Wind direction coincidence rate/%
510	175	0.686*	41.5
650	173	0.837*	31.4
790	176	0.850*	32.5
930	177	0.902*	33.7
1070	177	0.910*	38.2
1210	173	0.829*	30.3
1350	168	0.687*	32.5
1490	165	0.675*	29.2
1630	161	0.620*	25.8
1770	158	0.547*	20.2
1910	153	0.521*	21.3
2050	150	0.482*	17.9
2190	140	0.348*	13.4

注: \*表示在 0.05 水平上显著相关

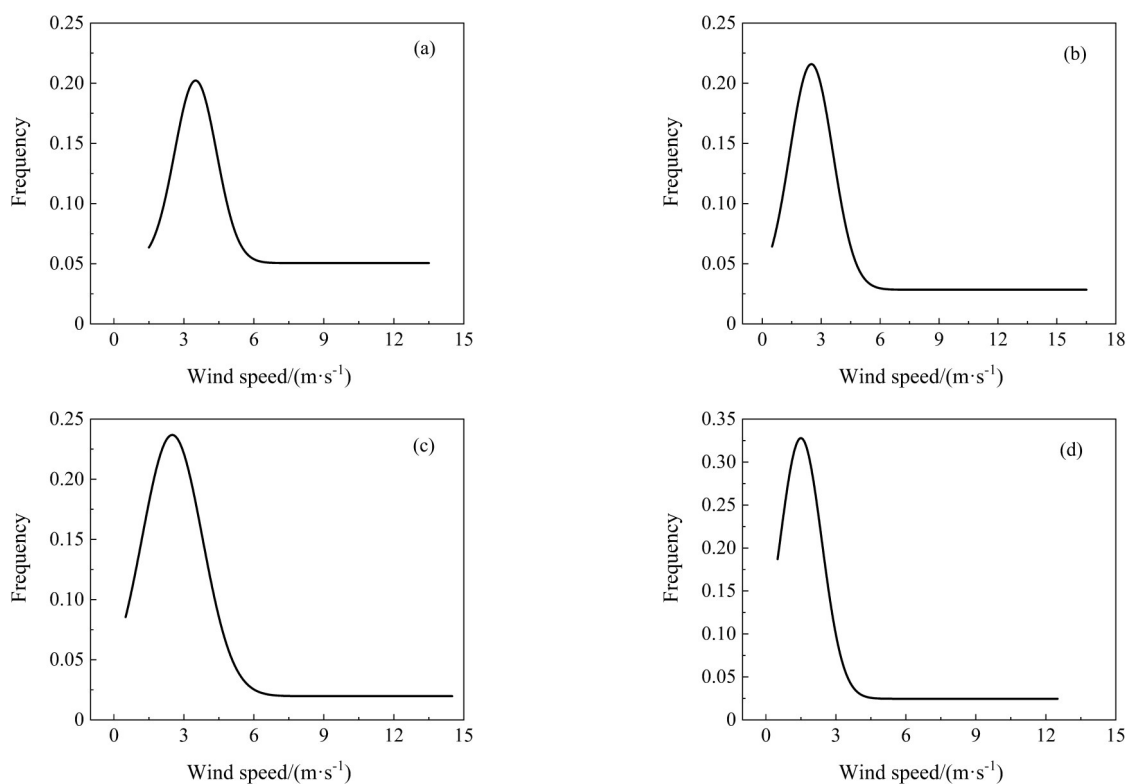


图 6 相干测风激光雷达不同高度处水平风速概率密度分布图。(a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m

Fig. 6 Probability density distribution diagram of horizontal wind speed of coherent wind lidar at different heights.

(a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m



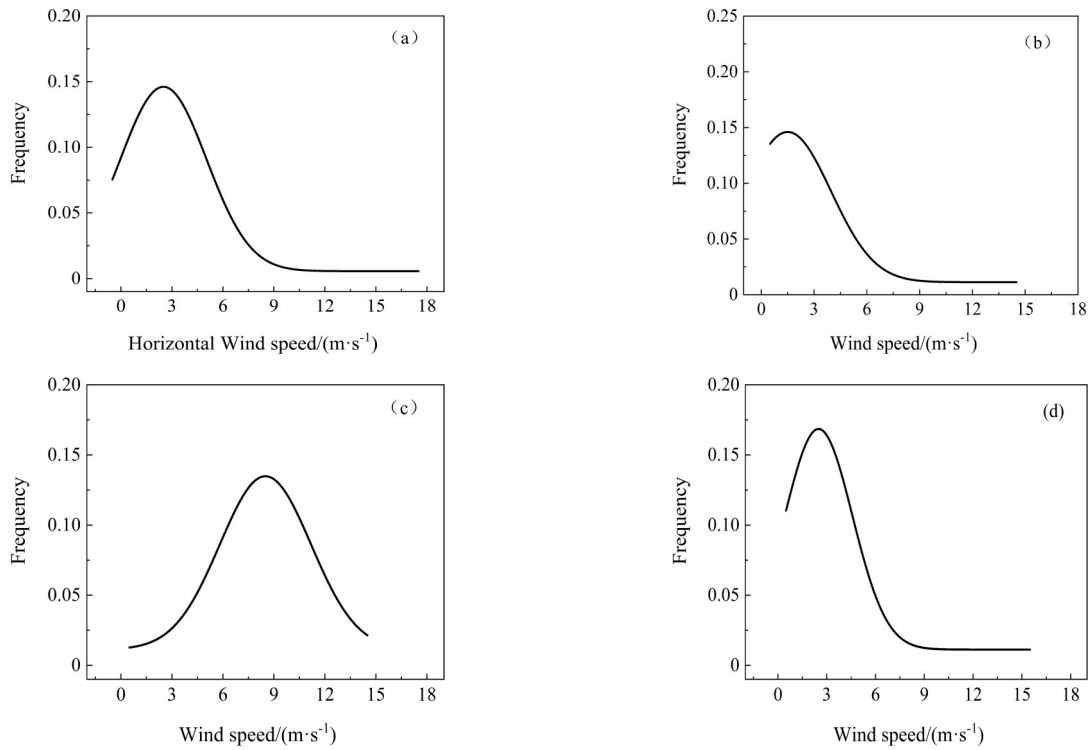


图 7 风廓线雷达不同高度处水平风速概率密度分布图。(a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m  
 Fig. 7 Probability density distribution diagram of horizontal wind speed of wind profiler radar at different heights.

(a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m

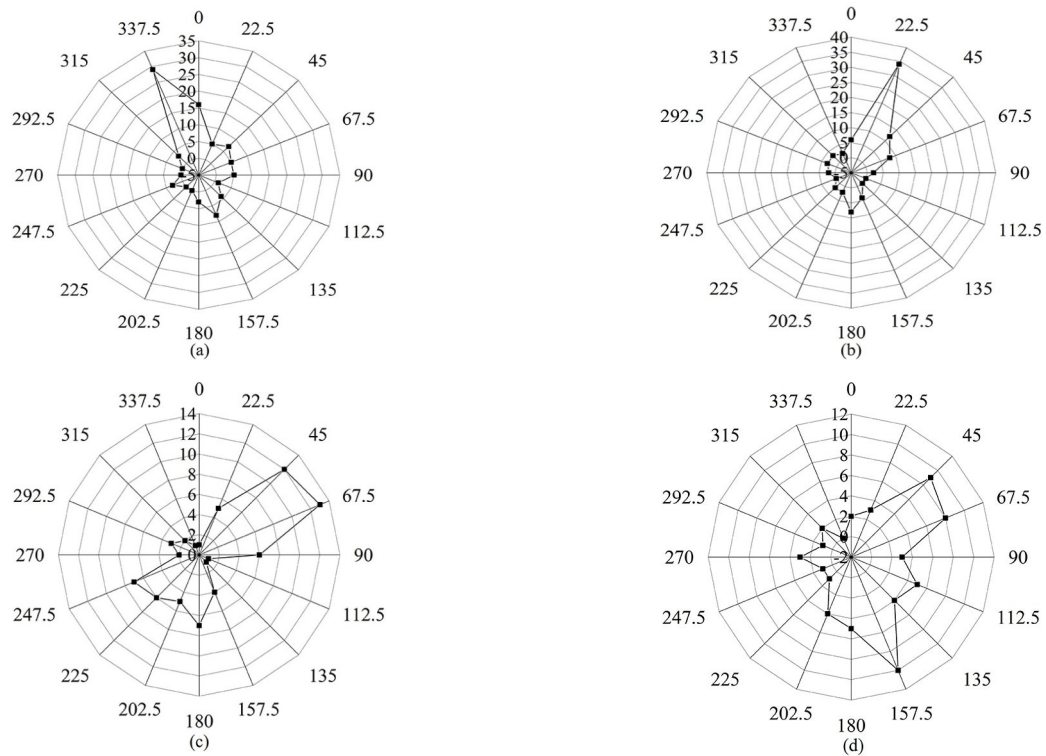


图 8 相干测风激光雷达不同高度处风向玫瑰图。(a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m

Fig. 8 Wind direction rose diagram of coherent wind lidar at different heights. (a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m

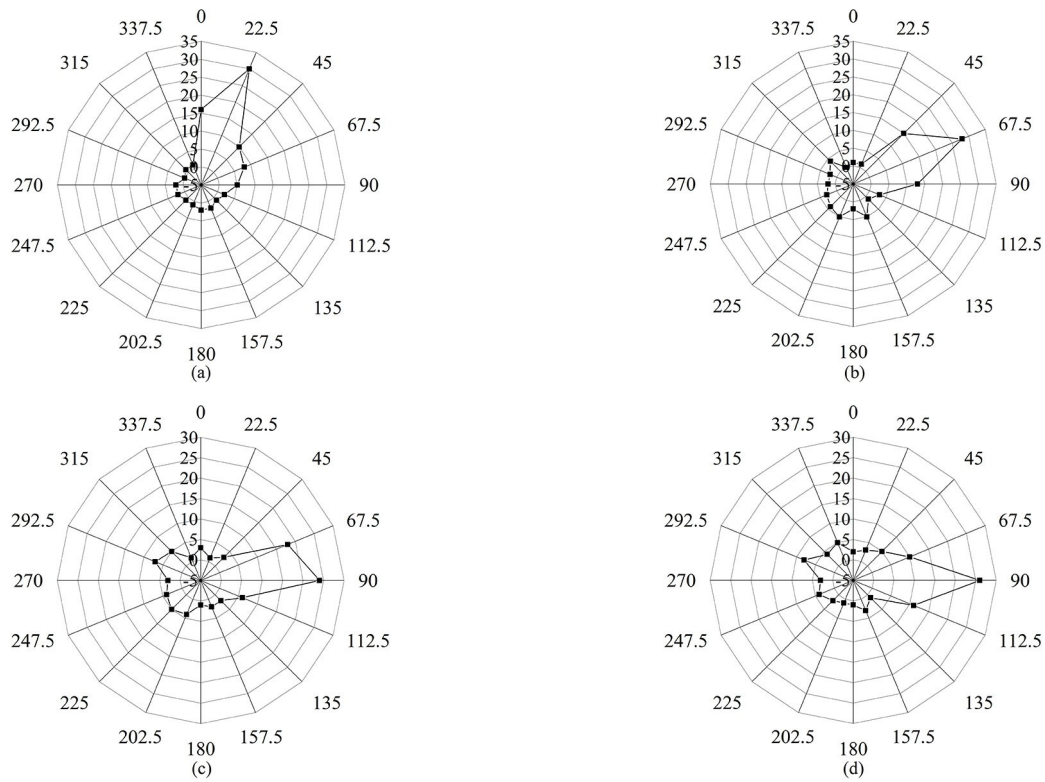


图 9 风廓线雷达不同高度处风向玫瑰图。(a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m

Fig. 9 Wind direction rose diagram of wind profiler radar at different heights. (a) 510 m; (b) 1070 m; (c) 1490 m; (d) 2050 m

同时, 16日相干测风激光雷达探测高度低, 高层数据缺失导致结果不够理想, 其可通过垂直廓线对比再次进行分析, 结果如图10、图11、表3所示。结果可知, 在510~2350 m高度范围内, 两台雷达对比结果较为一致。风速间呈强相关性, 皮尔逊相关系数为0.901, 两台雷达风速差值的均值绝对值为0.814 m/s, 相对误差为7.39%, 标准相对误差为1.060 m/s, 误差值较小。两台雷达风向的差值均值为23.81°, 风向均为顺时

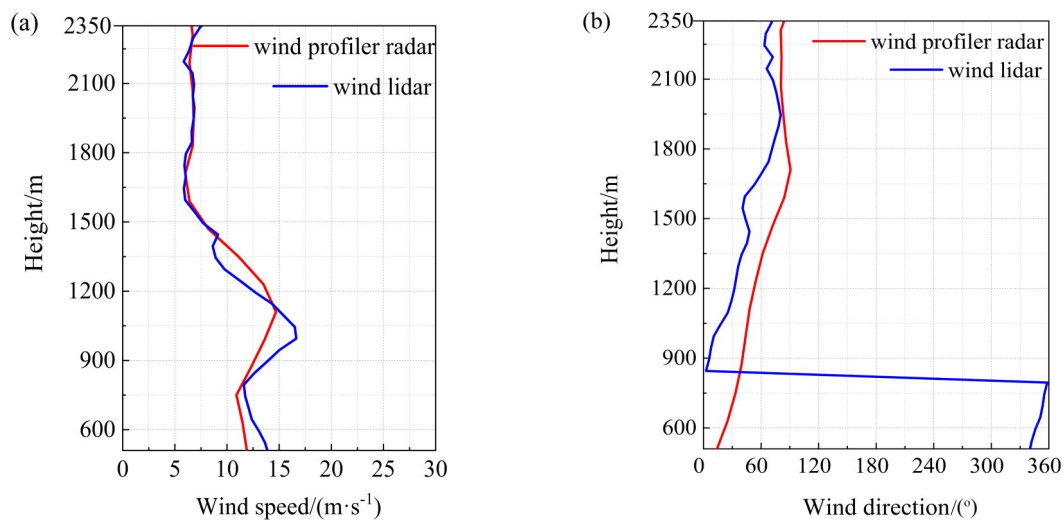


图 10 2021年10月16日22:48 风廓线雷达与相干测风激光雷达水平风速 (a) 与风向廓线 (b) 对比

Fig. 10 Comparisons of horizontal wind speed profiles (a) and wind direction profiles (b) between wind profile radar and coherent wind lidar at 22:48 on October 16, 2021

针螺旋上升,变化趋势较为一致,相干测风激光雷达风向标准差大,变化幅度较大,其主要差异体现在800 m以下,激光雷达低层回波容易受地物、风场不均匀性等干扰的影响导致误差相对较大,而800 m以上风向皮尔逊相关系数为0.918,高度相关,有较好的一致性。

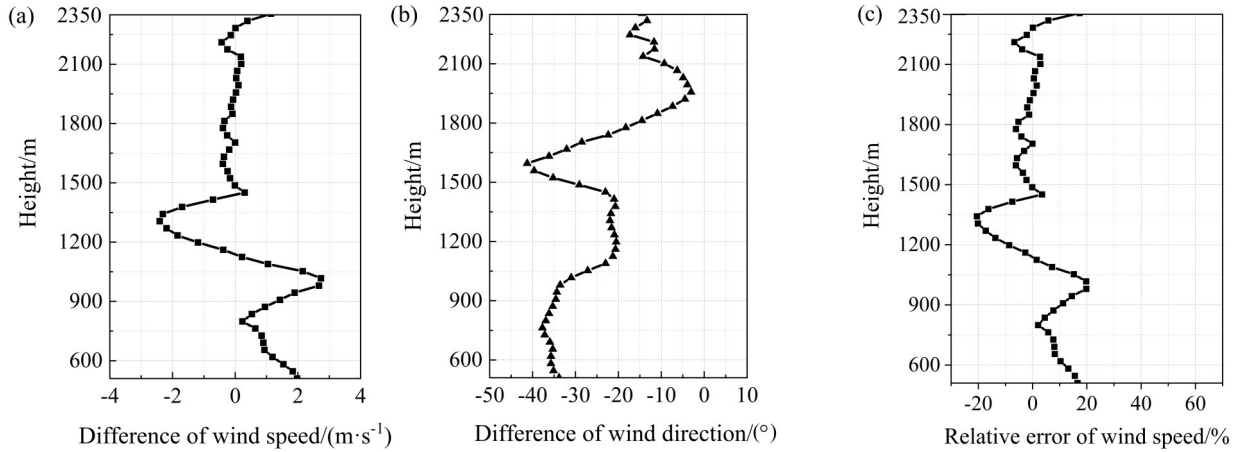


图 11 2021年10月16日22:48 风廓线雷达与相干测风激光雷达水平风速差(a)与风向差(b)及风速相对误差(c)

Fig. 11 Difference of horizontal wind speeds (a) and wind directions (b) and relative error of wind speed (c) between wind profiler radar and coherent wind lidar at 22:48 on October 16, 2021

表 3 2021年10月16日22:48 风廓线雷达与相干测风激光雷达水平风速及风向廓线对比

Table 3 Comparisons of horizontal wind speed profiles and wind direction profiles between wind profiler radar and coherent wind lidar at 22:48 on October 16, 2021

Parameter	Height/m	Pearson correlation coefficient	Mean absolute difference	Relative error/%	Standard error
Wind speed	510-2350	0.901	$0.814 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	7.39	$1.060 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Wind direction		0.918 (> 800 m)	$23.81^\circ$	—	—

两台设备同时测量同一时空的风速风向,由于测得数据分布特征未知,统计学差异性分析方法中选择Wilcoxon检验法对2个相关样本进行统计差异分析,样本量为52,结果如表4所示。由表可知,风速的Wilcoxon检验因子 $P = 0.299$ ,大于0.05,由于风向变化存在周期性,线性回归处理后风向的检验因子 $P = 0.190$ ,大于0.05,说明两台雷达测量结果没有明显的差异性,进一步说明两台雷达对垂直高度风向风速的测量结果较为一致。

表 4 2021年10月16日22:48 风廓线雷达与相干测风激光雷达水平风速及风向廓线非参数检验结果

Table 4 Non-parametric test results of horizontal wind speed profiles and wind direction profiles between wind profile radar and coherent wind lidar at 22:48 on October 16, 2021

Parameter	Instrument type	Number of samples	Mean value	Standard deviation	Maximal value	Minimal value	Wilcoxon test factor $P$
Wind speed	Wind profiler radar	52	9.528	3.020	14.548	6.020	0.299
	Coherent wind lidar	52	9.720	3.495	16.579	5.902	
Wind direction	Wind profiler radar	52	62.320	23.129	90.378	14.100	0.190
	Coherent wind lidar	52	100.817	117.200	358.968	1.638	



### 3.2 典型天气过程应用

通过相干测风激光雷达与微波风廓线雷达比对, 可知相干测风激光雷达对近地面的风场观测表现较好, 监测结果较为一致。为了对监测结果进行科学分析, 选取 18 日 10:00—19 日 00:00 时段的典型观测数据进行说明, 期间主要为多云天气, 探测高度相对较高, 资料较为完整, 能够很好地表现风速以及风向的变化情况。18 日存在冷空气影响, 19 日天气回暖, 可监测到明显的风场变化及差异。图 12 和图 13 所示为 18 日 10:00—19 日 00:00 的连续观测结果, 图中箭头方向表示风吹去的方向。该时段相干测风激光雷达系统探测

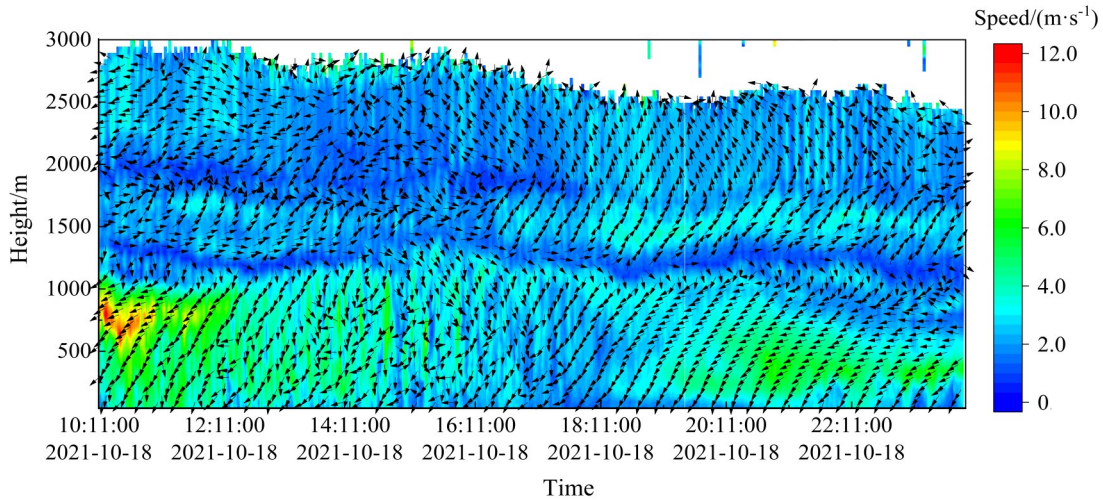


图 12 2021 年 10 月 18 日 10:00—19 日 00:00 水平风速风向时间序列图

Fig. 12 Time series plot of horizontal wind speed and wind direction from 10:00 on October 18, 2021 to 00:00 on October 19, 2021

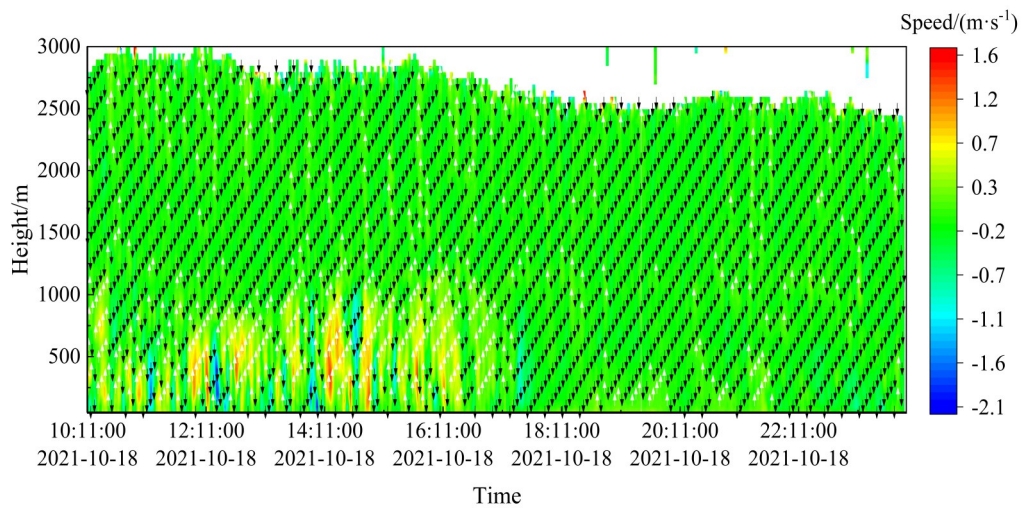


图 13 2021 年 10 月 18 日 10:00—19 日 00:00 垂直风速风向时间序列图

Fig. 13 Time series plot of vertical wind speed and wind direction from 10:00 on October 18, 2021 to 00:00 on October 19, 2021  
 高度接近 3000 m。18 日 14:00 之前, 1000 m 高度以下低层为北东北风, 10:19 左右 800 m 高度处最大风力为 11 m/s, 大风维持时间较短, 其后逐渐衰减, 存在东东北风向东北风的水平切变, 垂直风向为向下。中高层 1000 m 以上整体风速较小, 小于 3 m/s, 为弱风带, 风向较为杂乱。低层风向为东北风, 中高层为西南风, 高层为东南风, 受到冷平流影响, 风向由低到高呈逆时针变化。14:00—17:00 低层风向有些杂乱, 中高层风向转为一致的南风风向。17:00 后低层风向逐渐转为一致的东北风, 说明此时冷空气前端已经从东北方

向扩散影响该地区,近地面环境温度明显受到影响,浓度值整体较低,近地面环境温湿度变化趋势如图14所示。17:00后1500 m高度风向存在明显的切变,风速相对较小,上层和下层风速大,水平风向的垂直切变明显,由东北风切变为西南风。

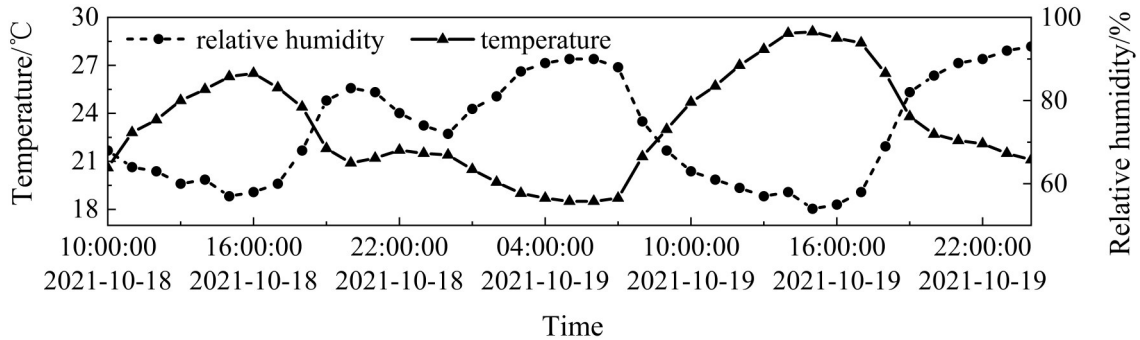


图14 2021年10月18日10:00—20日00:00近地面温湿度时间序列图

Fig. 14 Time series plot of temperature and relative humidity at the near surface from 10:00 on October 18, 2021 to 00:00 on October 20, 2021

垂直风向上午时段风向变化频繁,中午时间段风速相对较大,而且随时间推移其垂直对流高度明显上升,于15:00最高达1200 m,夜间风向主要为垂直向下,风速相对较小。主要原因为监测时间为晴天天气,随着上午太阳辐射作用逐渐加强,垂直方向热对流加强,其垂直方向速度相应加强、扩展高度也逐渐升高。中午时间段太阳辐射最强烈,该时刻气流垂直运动速度也最强、扩展高度相应最高,中午过后,太阳辐射减弱,其热对流活动逐渐减弱,气流垂直运动速度的强度和扩展高度随之降低。

图15所示为10月19日00:00—20日00:00水平风速风向连续观测结果,该时段探测高度为2400 m。00:00—06:00时间段,200 m高度以下风速较小,200~590 m高度存在风速相对较大的东北风,最大风

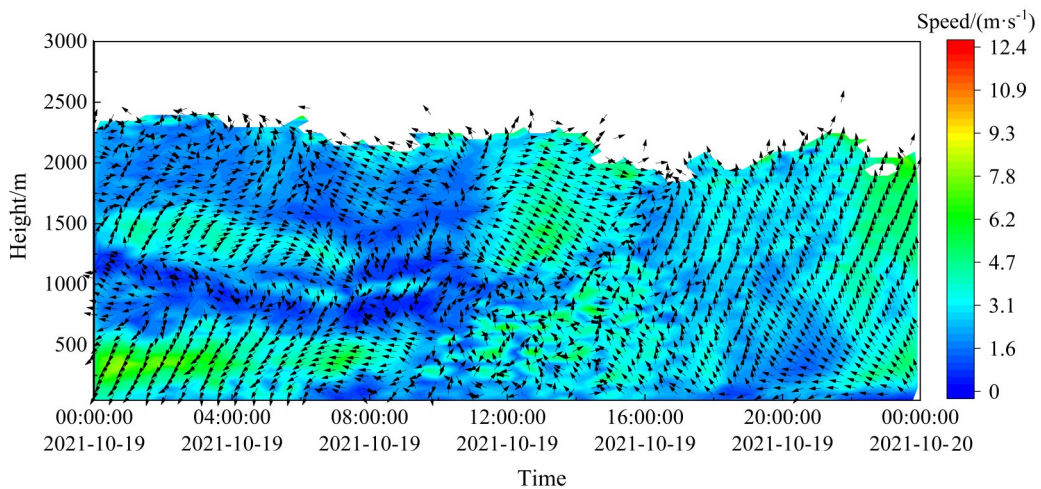


图15 2021年10月19日00:00—20日00:00水平风速风向时间序列图

Fig. 15 Time series plot of horizontal wind speed and wind direction from 00:00 on October 19, 2021 to 00:00 on October 20, 2021

速为6.6 m/s,风速随时间推移逐渐减弱。500~1200 m高度范围风速较小,为弱风带过渡区,主要为东南风,04:00后水平切变为东北风。1200~1700 m高度范围风速为3~5 m/s,主要为南西南风向,02:00左右存在水平风向切变,南西南风向切变为西西南风向,持续时间相对较短。有研究表明,高层大气湍流强度小,较低层大气稳定<sup>[24]</sup>。1700 m高度以上风速较小,风向杂乱无章,05:00后转变为一致的南风。06:00后



低层 300 m 高度水平风向出现切变, 风向由东北风呈逆时针旋转向中心辐合变化, 存在气旋影响。1200~1700 m 高度主要为北风风向, 其他高度层风向较为杂乱, 主要为弱风带。中午时间段 1200 m 以下热对流强烈, 风向较为杂乱, 1200~2000 m 风速平稳, 主要为西北风向。午后至夜间时间段, 均为南风风向, 近地面为东南风, 存在暖气团影响, 风速变化幅度相对较小。

图 16 为 10 月 19 日 00:00—20 日 00:00 垂直风速风向连续观测结果。由图可见, 垂直风向存在明显的日变化趋势, 中午时间段风速相对较大, 对流强度大, 扩展高度高, 其他时间段对流不明显。上午时间段对流程度次之, 低层风速最大, 01:00 左右 800 m 高度存在水平风垂直切变, 此时垂直对流加强, 说明水平风向的垂直切变一定程度上能够加强垂直对流, 同时, 垂直切变能够破坏夜间形成的稳定层, 加速对流影响。

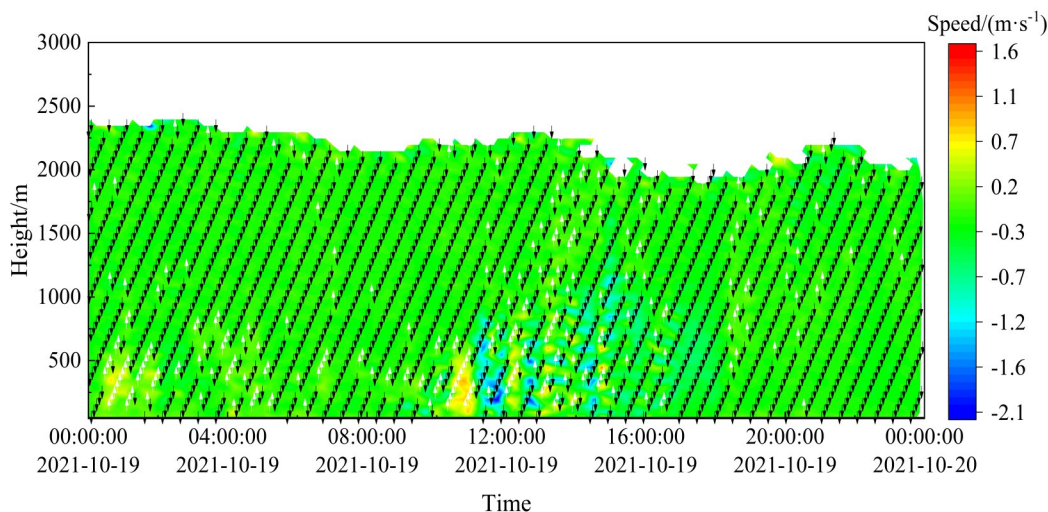


图 16 2021 年 10 月 19 日 00:00—20 日 00:00 垂直风速风向时间序列图

Fig. 16 Time series plot of vertical wind speed and wind direction from 00:00 on October 19, 2021 to 00:00 on October 20, 2021

## 4 结 论

近年来, 极端天气频频出现, 提高气象预测预警能力能有效加强应对措施, 才能够以常态化、制度化、科学化的方式来应对。开发了一款相干测风激光雷达系统, 该系统基于多普勒效应, 能够精准探测垂直上空 45~3000 m 范围内的水平风场和垂直气流。系统主要分为三个子系统: 激光发射系统、回波信号接收系统、信号采集与处理系统, 通过发射的 1550 nm 波长激光与大气气溶胶发生弹性散射, 由于风的作用, 使得回波信号中携带了多普勒信息, 回波信号通过望远镜接收到达平衡探测器与激光器发出的本振光进行拍频, 由高速采集卡进行采集, 再利用 ML DSP 算法将时域信号转换成频域信号, 最终得到各个高度的水平风场。

2021 年 10 月 16—20 日将相干测风激光雷达放置在广州 (黄埔) 国家基本气象站进行连续风场观测, 为验证该系统数据的准确性, 与同地点的微波风廓线雷达所测数据进行一致性比对, 同时对监测过程中风场变化过程进行分析, 结果显示:

1) 510~2190 m 高度范围内水平风速的相关系数随着高度的增加呈先增大后减小的趋势, 其中 650~1210 m 高度区间相关系数均在 0.8 以上, 比对结果较为一致, 高度增高时相关系数减小与激光能量有关。水平风向相符率最高为 41.5%, 小于 30° 的占比为 34.45%, 对比时两台设备分辨率不同、发生风向切变等现象

均会产生误差影响比对结果。

2) 在510~2350 m高度范围内,两台雷达垂直风廓线对比结果较为一致。风速间相关系数为0.901,风速绝对差值为0.814 m/s,相对误差为7.39%。风向的绝对差值为23.81°,800 m以下受地物、风场不均匀性等干扰误差相对较大,800 m以上相关性较好相关系数达到0.918。通过Wilcoxon检验法验证两台雷达同时间垂直廓线测量结果没有明显的差异性。

3) 选取了两段连续观测的风场图谱,对其垂直高度上风速风向特征进行分析,能够很好地表现风场变化情况。其中18日10:00—19日00:00时段风场存在多层结构,受东北方向冷平流影响,近地面环境温度低。19日06:00左右存在气旋影响,风向由东北风呈逆时针旋转向中心辐合变化。垂直风向变化明显,中午时段对流扩展高度高。

## 参考文献:

- [1] Bai B, Wu Q R, Zhou X Y. Discussion on the application of lidar technology in atmospheric environment monitoring [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2021(9): 56-57.  
白彬, 吴庆瑞, 周轩宇. 浅谈激光雷达技术在大气环境监测中的应用 [J]. *资源节约与环保*, 2021(9): 56-57.
- [2] Fu J, Li J, Wu Q. Application and prospect of Doppler lidar in the wind field observation [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(4): 172-179.  
傅军, 李洁, 吴强. 激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望 [J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(4): 172-179.
- [3] Imaki M, Kobayashi T. Ultraviolet high-spectral-resolution Doppler lidar for measuring wind field and aerosol optical properties [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(28): 6023-6030.
- [4] Liu Z S, Chen W B, Hair J W, et al. Proposed ground-based incoherent Doppler lidar with iodine filter discriminator for atmospheric wind profiling [J]. *Optics & Photonics*, 1996, 2833: 128-135.
- [5] Wang L, Chen K, Chen X, et al. Calibration of frequency discriminator and application for Doppler lidar based on fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 201003.
- [6] Wu S H, Yin J P, Liu B Y, et al. Coherent Doppler lidar to investigate wind turbulence [J]. *SPIE Newsroom*, 2014: 1-3.
- [7] Wu S H, Yin J P, Liu B Y, et al. Characterization of turbulent wake of wind turbine by coherent Doppler lidar [C]. *SPIE Proceedings, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIV*. Beijing, China. SPIE, 2014.
- [8] Xia H Y, Sun D S, Shen F H, et al. Direct detection Doppler wind lidar with twin-channel Fabry-Perot interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(z3): 273-278.  
夏海云, 孙东松, 沈法华, 等. 基于双F-P标准具的直接探测测风激光雷达 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(z3): 273-278.
- [9] Pearson G, Davies F, Collier C. Remote sensing of the tropical rain forest boundary layer using pulsed Doppler lidar [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(201): 5891-5901.
- [10] Gao Y, Liu B L, Xu A R, et al. Research and application of wind acoustic radar technology in wind speed measurement [J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(19): 126-131.  
高阳, 刘宝良, 许傲然, 等. 测风声雷达技术在风速测量中的研究与应用 [J]. *电子设计工程*, 2021, 29(19): 126-131.
- [11] Zuo J H, Jia Y D, Zhang X Q, et al. Frequency estimation algorithm of coherent Doppler wind lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(5): 554-558.  
左金辉, 贾豫东, 张晓青, 等. 相干多普勒测风激光雷达的频率估计算法 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(5): 554-558.

- [12] Dai Y J. *Laser Radar Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 191-192.  
戴永江. 激光雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 191-192.
- [13] Zheng T, Wei F, Meng F, *et al.* Research on technology of 1550 nm all-fiber continuous wave coherent Doppler wind lidar [J]. *E3S Web of Conferences*, 2021(261): 01038.
- [14] Wang G N, Liu B Y, Feng C Z, *et al.* Data quality control method for VAD wind field retrieval based on coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 147-154.  
王贵宁, 刘秉义, 冯长中, 等. 相干测风激光雷达 VAD 风场反演的数据质量控制方法 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 147-154. .
- [15] Jia X D. *Development of 1.55  $\mu\text{m}$  Coherent Wind Lidar Prototype* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.  
贾晓东. 1.55  $\mu\text{m}$  相干测风激光雷达样机的研制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [16] Chen Z. *Research on All-fiber Coherent Wind LIDAR* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2016.  
陈震. 全光纤相干测风激光雷达研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
- [17] Wang C. *1.5  $\mu\text{m}$  Wavelength All-fiber Multifunctional Coherent Doppler Wind Lidar* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.  
王冲. 1.5  $\mu\text{m}$  波长全光纤多功能相干多普勒测风激光雷达 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [18] Punalard R, Lorsawatsiri A, Loetwassana W, *et al.* Direct frequency estimation based adaptive algorithm for a second-order adaptive FIR notch filter [J]. *Signal Processing*, 2008, 88(2): 315-325.
- [19] Abeysekera S S. Performance of pulse-pair method of Doppler estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(2): 520-531.
- [20] Frehlich R. Performance of maximum likelihood estimators of mean power and Doppler velocity with *A priori* knowledge of spectral width [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(11): 1702-1709.
- [21] Hardesty R M. Performance of a discrete spectral peak frequency estimator for Doppler wind velocity measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(5): 777-783.
- [22] Jing X M. *Performance Simulation of Laser Coherent Wind Measurement Technology* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.  
金效梅. 激光相干测风技术的性能仿真研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [23] Chu Y F, Liu D, Wang Z Z, *et al.* Basic principle and technical progress of Doppler wind lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(5): 580-600.  
储玉飞, 刘东, 王珍珠, 等. 多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展 [J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 580-600.
- [24] Yang Y J, Yim S H L, Haywood J, *et al.* Characteristics of heavy particulate matter pollution events over Hong Kong and their relationships with vertical wind profiles using high-time-resolution Doppler lidar measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 9609-9623.