

多普勒测风激光雷达风廓线探测精度对比分析

吴 格, 赵一鸣, 马勋鹏, 柳佳欣, 边 吉, 曹恩达
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 在晴空干洁的大气条件下, 多普勒测风激光雷达能够以较高的时间、空间分辨率, 获得大气三维风场信息。为验证北京遥测技术研究所研制的 WINDLE LIDAR 型多普勒测风激光雷达探测的准确性, 2020 年 4 月~5 月, 用该雷达在北京市南郊观象台和 L 波段探空雷达进行同时同址对比观测。2022 年 6 月~7 月, 用该雷达与北京遥测技术研究所的 WINDLE U7 相干测风激光雷达进行同时同址对比观测。通过对数据进行相关性分析, 得到对比结果如下: 1) 垂直探测距离大于 5 km, 最大探测高度可达 8.5 km; 2) 与 L 波段探空雷达对比, 风速和风向数据拟合总相关系数分别为 0.990 和 0.998。总体风速和风向的系统偏差、标准偏差分别为 0.114 m/s 和 3.078°、0.489 m/s 和 3.969°, 二者具有较好的一致性; 3) 与 WINDLE U7 雷达对比, 风速和风向数据拟合总相关系数分别为 0.999 和 0.999。总体风速和风向的系统偏差和标准偏差分别为 0.209 m/s 和 1.077°、0.255 m/s 和 1.220°, 可以看出该雷达系统的优越性。

关键词: 测风激光雷达; L 波段探空雷达; 风廓线

中图分类号: P415.2; TN959.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0086-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220914001

引用格式: 吴格, 赵一鸣, 马勋鹏, 等. 多普勒测风激光雷达风廓线探测精度对比分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 86-97.

Comparative analysis of wind profile detection accuracy of Doppler wind lidar

WU Ge, ZHAO Yiming, MA Xunpeng, LIU Jiabin, BIAN Ji, CAO Enda
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Doppler wind lidar can obtain three-dimensional wind field information with high temporal and spatial resolution in clear and clean atmosphere. In order to verify the detection accuracy of the WINDLE LIDAR coherent Doppler wind lidar developed by Beijing Research Institute of Telemetry, from April to May, 2020, the lidar and L-band sounding radar were used for synchronous comparative observation at the Southern Suburb Observation of Beijing. From June to July, 2022, this lidar is compared with WINDLE U7 lidar of Beijing Research Institute of Telemetry at the same site. Through the correlation analysis of the data, the comparison results are as follows: 1) The vertical detection distance is greater than 5 km and the maximum detection height is 8.5 km. 2) Compared with L-band sounding radar, the total correlation coefficients of wind speed and direction data fitting are 0.990 and 0.998 respectively. The system deviation and standard deviation of the overall wind speed and direction are 0.114 m/s and 3.078°, 0.489 m/s and 3.969° respectively, which have good consistency. 3) Compared with WINDLE U7, the total correlation coefficients of wind speed and direction data fitting are 0.999 and 0.999. The system deviation and standard deviation of the overall wind speed and direction are 0.209 m/s and 1.077°, 0.255 m/s and 1.220° respectively. The superiority of the lidar system can be seen.

Keywords: Wind lidar; L-band sounding radar; Wind profile

Citation: WU Ge, ZHAO Yiming, MA Xunpeng, et al. Comparative analysis of wind profile detection accuracy of Doppler wind lidar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 86-97.

引 言

人类生活的各种活动都会受到大气条件的影响。风速信息是大气的重要信息之一, 所以对它

进行实时并且精确的监测和记录是非常关键的。相干测风激光雷达能够在晴空干洁大气条件下获得大气三维风场信息, 以其高探测精度、性能稳定、高时空分辨率等优势, 成为了目前测量大气风场的

最有效手段之一。在气象观测、大气遥感、航空航天飞行保障、风力发电等领域有着广泛的应用。

在目前的气象探测业务中,气象梯度塔以风杯作为传感器,探测精度高,具有持续探测能力,但其探测高度有限;L波段探空雷达的探测高度范围大,但其探测精度稍差、探测频次低,无法提供平均风速数据;微波雷达普遍波长较长,晴空探测效果差,多用于云雨等聚集性大分子团形成回波信号;声雷达具有较近的探测距离,同时受气温影响较大^[1];多普勒测风激光雷达作用于气溶胶粒子,它弥补了现有设备晴空探测能力不足的缺陷,是实现晴空风场测量的重要工具。因此,分析研究多普勒测风激光雷达风廓线的探测精度,可以为数值天气预报、气象气候学等领域提供技术支撑^[2]。

L波段探空雷达在各级气象台站中得到了广泛应用,是我国目前高空风场探测的主要装置。本文对北京遥测技术研究所研制的WINDLE LIDAR型多普勒测风激光雷达(以下简称为“WINDLE LIDAR雷达”)与同时间、同地址的L波段探空雷达探测的风廓线进行对比,从不同角度讨论了探测精度。还将该雷达与北京遥测技术研究所的WINDLE U7相干测风激光雷达(以下简称为“WINDLE U7雷达”)进行了同时同址对比观测,进一步印证了该雷达系统的优越性。

1 测风原理与对比方法

1.1 系统组成

如图1所示,WINDLE LIDAR雷达利用激光器发射脉冲,通过光纤分束器分为两路。一路输出本振光到平衡探测器;另一路通过光纤放大器

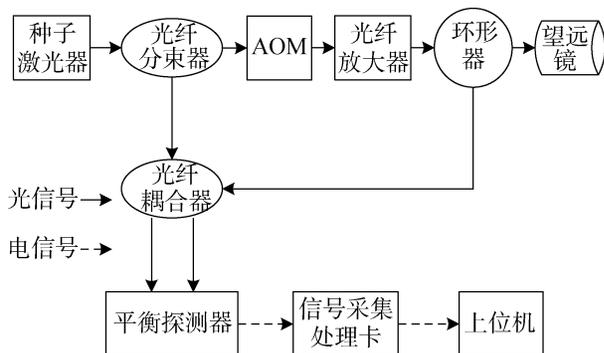


图1 系统原理框图

Fig.1 Systematic block diagrams

从望远镜发出,与风中的气溶胶粒子发生米散射,形成回波信号^[3]。望远镜接收的回波信号与本振光进行拍频,获得多普勒频移中频光信号。中频光信号经探测器变为电信号,将电信号送入信号采集与处理单元,经过放大、A/D转换、功率谱估计等操作后得到径向风速。改变激光束方向得到多个方向的径向风速,利用矢量风速反演最终得到大气风场信息。WINDLE LIDAR雷达的主要技术参数见表1。

表1 系统参数

Table 1 System parameter

参数	指标
波长	1 550 nm
俯仰角扫描范围	0~180°
最大扫描角速度	≥40(°)/s
空间分辨率	30 m
时间分辨率	1 s
风速测量范围	0-60 m/s
风速精度	≤0.5 m/s
风向精度	≤5°(V>5 m/s时,均方根误差)
功耗	<600 W
最大探测距离	>10 km
最大探测高度	>5 000 m

1.2 大气风廓线反演

相干多普勒测风激光雷达能够探测光束传输方向上的径向风速。要想得到三维风场分布,需要获取不同探测方向上的径向风速。因此,相干多普勒测风激光雷达通常具有光束扫描功能。假定区域风场均匀的条件下,常用VAD (Velocity Azimuth Display)方法来合成矢量风场。在多普勒测风激光雷达系统中,使用VAD合成方法时,采用了风廓线扫描方式,扫描光束的俯仰角固定,方位角均匀分布在0~360°,矢量风速反演示意图如图2所示。

设定扫描俯仰角为 φ ,扫描方位角为 $\theta_i (i=1,2,3,\dots,n)$,矢量风场为 $V=(V_z, V_x, V_y)$, V_z, V_x, V_y 分别代表垂直风速,水平风速在正东方向上的分量,水平风速在正北方向上的分量^[4]。 $S_i=\{\sin \varphi, \cos \varphi \cos \theta_i, \cos \varphi \sin \theta_i\}$, V_n 是在方位角 θ_i 探测方向上的径向风速,则风速矢量 V 与径向风速 V_n 之间关系可以表达为(1)式

$$V_n = S_i \cdot V \quad (1)$$

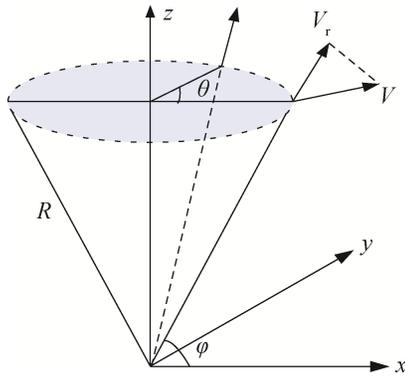


图2 VAD反演算法

Fig.2 VAD retrieval algorithm

\hat{V}_{ri} 是 θ_i 方向上的径向风速估计值, 并满足式 (1) 的概率密度函数

$$PDF(\hat{V}_{ri}|V) = \frac{(1-b)}{\sqrt{2\pi}g} \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{ri}-S_i \cdot V)^2}{2g^2}\right] + \frac{b}{B_v} \quad (2)$$

其中, b 代表反演有误的径向风速所占的比例, B_v 是风速带宽, g 是反演后得出正确的径向风速的方差。

假设使用 n 个不同方位角上所获取的径向风速来合成矢量风场, 那么, 径向风速的估计值在不同的探测方向上是相互独立的, 因此这 n 个径向风场的联合概率密度分布可以表示为

$$PDF(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rn}|V) = \prod_{i=1}^n PDF(\hat{V}_{ri}|V) \quad (3)$$

联合概率密度函数解析表达式

$$PDF(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rn}|V) \approx \frac{1}{(\sqrt{2\pi}g)^n} \exp\left[-\frac{1}{2g^2} \sum_{i=1}^n (\hat{V}_{ri}-S_i \cdot V)^2\right] \quad (4)$$

因此矢量风场的估计只可以通过求得联合概率密度的最大值获取

$$\max[PDF(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rn}|V)] = PDF(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rn}|\hat{V}) \quad (5)$$

当取最大值, 获得的解析表达式为

$$\nabla \sum_{i=1}^n (\hat{V}_{ri}-S_i \cdot V)^2|_{V=\hat{V}} = 0 \quad (6)$$

因此通过多普勒测风激光雷达测量同一圈层的径向风速, 进而反演整个雷达上空的三维风场信息

$$\hat{V} = \left(\sum_{i=1}^n S_i S_i^T\right)^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{V}_{ri} S_i \quad (7)$$

由公式可知, 由此得到同一高度圈层的径向风

场数据, 进而反演整个雷达上空的三维风场信息。

1.3 分析方法

1.3.1 雷达探测模式

在 WINDLE LIDAR 雷达系统中, 使用 VAD 算法时, 采用了风廓线扫描模式, 扫描光束通常以 $56\sim 70^\circ$ 俯仰角发射, 扫描时俯仰角固定不变而方位角作 360° 旋转, 此工作模式主要用于探测雷达上空的风廓线 (水平风速、风向、垂直风速) 信息。风廓线扫描模式如图 3 所示。在雷达开始探测后, 通过多个不同方位角上所获取的径向风速进行反演, 径向风速的更新时间为 1 s 。每当径向数据刷新一次之后, 会使用最新的几组径向数据进行实时反演, 风廓线处理时间约为 0.1 s 。径向风速的测量和风廓线的反演之间采用的是并行的处理方式, 风廓线在反演的时候, WINDLE LIDAR 雷达依旧在运行, 同时在采取下一组数据, 可以确保风廓线反演和径向探测同步进行。

同理, WINDLE U7 雷达也使用风廓线扫描模式, 在实时性处理方面, 与 WINDLE LIDAR 雷达一样, 且两台雷达的空间分辨率和时间分辨率均为 30 m 和 1 s 。

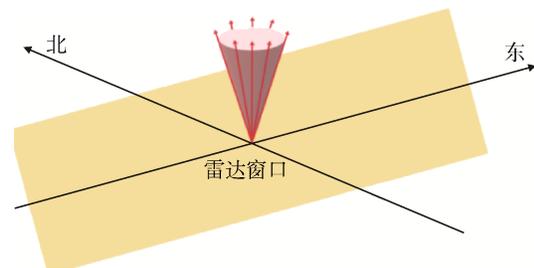


图3 风廓线扫描模式示意图

Fig.3 Schematic diagram of wind profile scanning mode

探空气球使用 GTS1 型数字探空仪, 可测量大气温度、气压和湿度等参数, 其风廓线数据产品垂直分辨率为 $10\text{ m}^{[5]}$ 。L 波段的 GFE (L) 1 型二次测风雷达用于风廓线测量, 其风廓线数据的风速测量精度为 1 m/s (风速 $< 10\text{ m/s}$)、 10% (风速 $> 10\text{ m/s}$)、风向精度为 5° (风速 $> 25\text{ m/s}$)、 10° (风速 $< 25\text{ m/s}$)^[6]。L 波段探空雷达和 WINDLE LIDAR 雷达使用不同的模式测量风廓线, WINDLE LIDAR 雷达的风廓线扫描模式可以提供探测范围内所有高度的风速和风向数据, 分辨率约为 1 s 。探空气球在上升过程中依次测量不同高

度的数据^[7]。所以,在进行对比前,要对其数据进行同步处理。

1.3.2 时间、空间同步处理

探空气球覆盖的高度由每组 WINDLE LIDAR 雷达风廓线测量时间的开始和结束决定。在此期间选取 WINDLE LIDAR 雷达风廓线在该高度范围内的数据点,与探空气球数据相匹配以确保两套雷达数据的时间具有一致性。在水平方向上,探空气球会随着大气中的风进行飘动,但是,根据大气的连续性特性,局部范围内同一高度的大气特性被认为是一致的,因此忽略气球水平移动的影响^[8]。垂直方向上, WINDLE LIDAR 雷达的分辨率为 30 m,探空气球分辨率是 10 m,因此,需要对探空气球的数据进行插值,获得与 WINDLE LIDAR 雷达高度对应的数据,以确保两套雷达数据具有空间一致性。

L 波段探空雷达和 WINDLE LIDAR 雷达的探测数据比对方法总结如下:

① 获取 WINDLE LIDAR 雷达 1 分钟的数据和 L 波段探空雷达的秒级数据做比对,并保存参与平均的秒间隔数据。

② 比对数据以不同高度分层统计,以 WINDLE LIDAR 雷达的垂直距离库厚度为基准(垂直高度 30 米),将气球定位测风的秒间隔数据按照不同高度置于各个分层内。

③ 对各个高度分层内的 L 波段探空雷达数据进行平均。

④ 以分层中心处 L 波段探空雷达数据的实际探测时间为中心,前后各取 30 s 的 WINDLE LIDAR 雷达数据一起进行平均,得到该高度水平风速和风向的 1 分钟平均结果。

1.3.3 数据处理

为了更好的分析 WINDLE LIDAR 雷达的性能,必须对数据进行匹配和筛选,尽可能减小引入的比对误差。由于探空气球的测量结果已被气象部门应用于气象业务,而 WINDLE LIDAR 雷达的探测结果是反演量。故探空气球的探测数据被认为是真值, WINDLE LIDAR 雷达的探测数据被认为是对比值。通过相关系数、系统偏差和标准偏差,来验证 WINDLE LIDAR 雷达用于风场探测的可靠性,分析影响 WINDLE LIDAR 雷达探测精度的原因^[9]。数据处理过程主要有以下几步:

① 对数据进行初步整理和计算,每次的测试

数据,都应按照以下公式计算差值

$$X = A - A_0 \quad (8)$$

式中, X 为 WINDLE LIDAR 雷达一次测量的差值, A 为 WINDLE LIDAR 雷达的测量值, A_0 为探空气球的测量值。

② 剔除粗大误差,主要是剔除 L 波段探空雷达返回的无效数据、WINDLE LIDAR 雷达数据质量控制后的无效数据和经校正或补测确认的人为误差。

本次对比测量次数较多,因此假设雷达一次测量的差值服从“正态分布”,并采用“ 3σ 准则”对粗大误差进行剔除^[10],具体方法如下:先将其中一组差值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_n$ 的最大数 x_k 假定为粗大误差,剔除后计算系统偏差 \bar{x} 和标准偏差 s ; 如果差值 x_k 落在 $(\bar{x} - 3s, \bar{x} + 3s)$ 区间外,将其认为是粗大误差,并进行剔除,否则保留;如果检验后粗大误差确为 x_k ,则重新选取绝对值最大的数,继续进行检验,直到这一组差值中不再含有粗大误差;重新计算剔除粗大误差后的系统偏差和标准偏差,所得到的计算结果作为该组差值的统计结果。

③ 插值,关于剔除点后的补齐问题,用垂直方向的连续 3 点,按照拉格朗日内插,公式如下:

$$X = \frac{(h-h_2)(h-h_3)}{(h_1-h_2)(h_1-h_3)} X_1 + \frac{(h-h_1)(h-h_3)}{(h_2-h_1)(h_2-h_3)} X_2 + \frac{(h-h_1)(h-h_2)}{(h_3-h_1)(h_3-h_2)} X_3 \quad (9)$$

其中, X 为需要插值的气象要素, h 为需要插值的任何高度, X_1, X_2, X_3 为相邻三个高度上已知的某气象要素值, h_1, h_2, h_3 为相邻三个高度上已知的高度值。

④ 将探空气球数据和 WINDLE LIDAR 雷达数据进行风向和风速的线性拟合,并求相关系数、系统偏差和标准偏差。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

$$D = \left| \frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i}{n} \right| \quad (11)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (12)$$

其中, n 为数据个数, x_i 为 WINDLE LIDAR 雷达的测量值, y_i 为探空气球的测量值, \bar{x} 为 WINDLE

LIDAR 雷达的测量平均值, \bar{y} 为探空气球的测量平均值。

2 风廓线对比观测实验

多普勒测风激光雷达本身的探测精度受方位/俯仰角测量精度、频率提取精度和信噪比等影响。由于探空气球的测量结果已被气象部门应用于气象业务, 所以设计实验对 WINDLE LIDAR 雷达整体精度进行验证。探空气球携带仪器姿态稳定, 具有飞行时间长, 施放不受地域和气候因素影响等优点, 但随着高度的增加, 漂移距离也在增大, 由此会引入较大的误差。李伟等对 2004 年全国的探空气球空间漂移进行了分析。结果表明: 探空气球上升过程中, 从低层到高层漂移量呈增大的趋势, 在 500 hPa 高度附近出现明显的漂移(青藏高原地区除外)^[11]。所以该实验的比对结果可能会大于实际精度。李林蔚等对测量风速产生误差的原因进行分析, 得出风速误差随着信噪比减小而增大的结论^[12]。而且信噪比造成的误差是随机的, 因此, 设计与 WINDLE U7 雷达的对比实验来对误差进行分析验证。

2.1 与 L 波段探空雷达观测实验

为了验证 WINDLE LIDAR 雷达的探测精度, 2020 年 4 月~5 月, 在中国气象局北京市南郊观象台气象观测场(代码 54 511), 用 L 波段探空雷达和 WINDLE LIDAR 雷达进行了长时间的风廓线同步测量实验。本次实验将 WINDLE LIDAR 雷达与 L 波段探空雷达放置于同一平台, 比对设备距 L 波段探空雷达小于 10 米。在为期 20 天(2020 年 4 月 16 日至 5 月 5 日)的观测实验中, 在探空气球每日施放时(7:15 和 19:15)进行 WINDLE LIDAR 雷达同步观测, 总计观测到 40 个有效时段。WINDLE LIDAR 雷达通过跟踪探空气球的方位角、俯仰角和距离信息来计算探空气球在爬升过程中的运动速度和方位, 从而实现对风速和风向的测量。

2.2 与 WINDLE U7 测风雷达观测实验

为进一步印证 WINDLE LIDAR 雷达的探测精度, 2022 年 6 月~7 月, 在北京遥测技术研究所永丰产业园办公楼楼顶(116.26°E, 40.07°N), 使用 WINDLE LIDAR 雷达和北京遥测技术研究所的 WINDLE U7 雷达进行了风廓线同步测量。两台雷达放置于同一平台, 距离小于 10 米, 全天进行同步观测。WINDLE U7 雷达风廓线数据的空间分辨率为

30 m, 时间分辨率为 1 s, 风速测量精度 ≤ 0.5 m/s, 风向测量精度 $\leq 5^\circ$ 。

3 实验探测数据对比分析

3.1 与 L 波段探空雷达进行对比

3.1.1 探测数据总体对比

自 2020 年 4 月 16 日开始至 2020 年 5 月 5 日, 在北京南郊气象局观测场, 以 L 波段探空雷达 7:15 和 19:15 所测风场数据为标准, 对 WINDLE LIDAR 雷达开展对比观测实验, 通过获得的风速风向实验数据, 进行相关性分析。

风向角度变化具有周期性, 需要先进行处理再进行分析讨论, 否则会存在不连续现象。本文做如下处理: 当两风向相减差值的绝对值大于 180° 时, 为了保证风向的连续性, 给风向角度偏小者加 360° , 那么这时的风向差会小于 180° , 处理后风向会大于 360° ^[13]。整体比对数据时序结果见图 4, 图 5 为风速比对数据散点图, 图 6 是将风速小于 5 m/s 的数据剔除后的水平风向对比散点图。这是由于 0~5 m/s 风速的相关性较差, 受下垫面和小尺度扰动影响较大, 会导致风不稳定。在矢量反演时假设风场是均匀的, 不考虑雷达系统中的测量误差, 风的不均匀性是影响雷达数据质量的主要因素^[14]。

从时序图中可以看出, 两种观测设备的风速、风向比对数据基本吻合。从散点图可以看出, 有风速、风向可对比的统计点共 4 782 对, 风速和风向的相关系数、系统偏差、标准偏差分别为 0.990 和 0.998、0.114 m/s 和 3.078°、0.489 m/s 和 3.969°。通过统计分析可知, WINDLE LIDAR 的数据与 L 波段探空雷达数据之间有着较明显的相关性特征。

3.1.2 按时间分组测风数据对比

在一天的不同时刻, 大气中的气溶胶分布不同, 回波信号存在差异。因此, 将获得的数据根据不同的观测时间分组进行对比, 按照 L 波段雷达探空气球施放的时间^[15], 分为 7:15 和 19:15 两组进行对比, 按照“ 3σ 准则”进行数据剔除, 得到系统偏差 S 、标准偏差 D 和相关系数 R , 对比统计结果如下表 2 所示。图 7 和图 8 为 WINDLE LIDAR 雷达与 L 波段探空雷达风廓线比对结果示意图。通过统计分析, WINDLE LIDAR 雷达平均有效探测高度大于 5 km; 7:15 和 19:15 风速的相关系数、系统

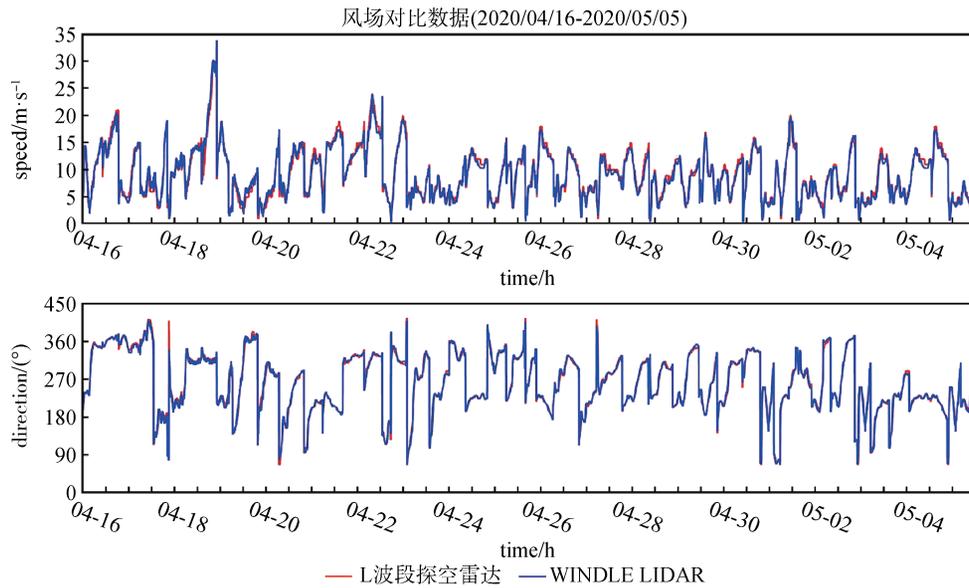


图4 风速、风向对比数据时序图

Fig.4 Time series diagram of wind speed and wind direction comparison data

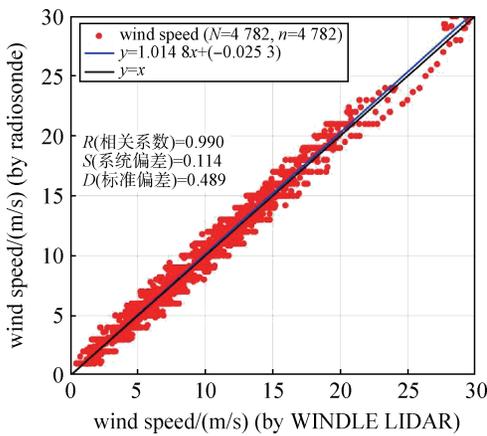


图5 风速对比数据散点图

Fig.5 Scatter plot of wind speed comparison data

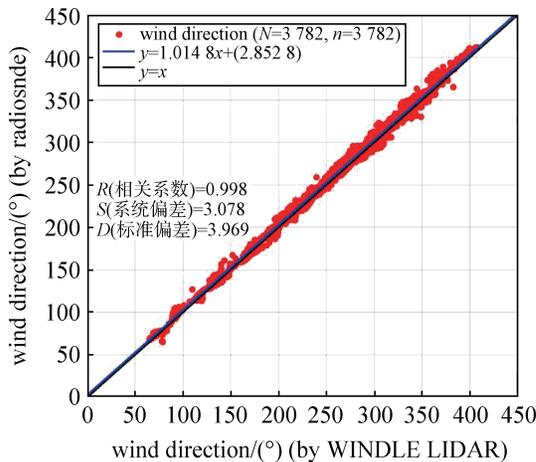


图6 风向对比数据散点图

Fig.6 Scatter plot of wind direction comparison data

偏差、标准偏差分别为0.987和0.992、0.108 m/s和0.140 m/s、0.492 m/s和0.466 m/s，7:15和19:15风向的相关系数、系统偏差、标准偏差分别为0.998和0.997、2.774°和3.545°、4.196°和3.819°。两个时间段的数据均与探空气球比较接近，具有较好的一致性，并没有表现出明显的时刻差异。

表2 按时间分组对比统计结果

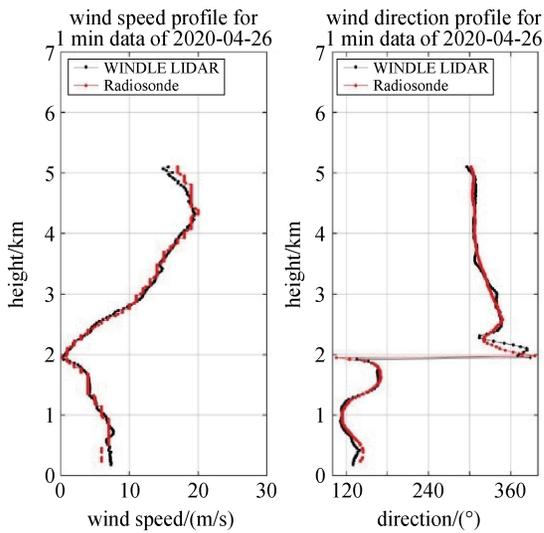
Table 2 Comparison of statistical results by time group

	样本数	相关系数	系统偏差	标准偏差
风速(7:15)	2 638	0.987	0.108 m/s	0.492 m/s
风向(7:15)	2 638	0.998	2.774°	4.196°
风速(19:15)	2 144	0.992	0.140 m/s	0.466 m/s
风向(19:15)	2 144	0.997	3.545°	3.819°

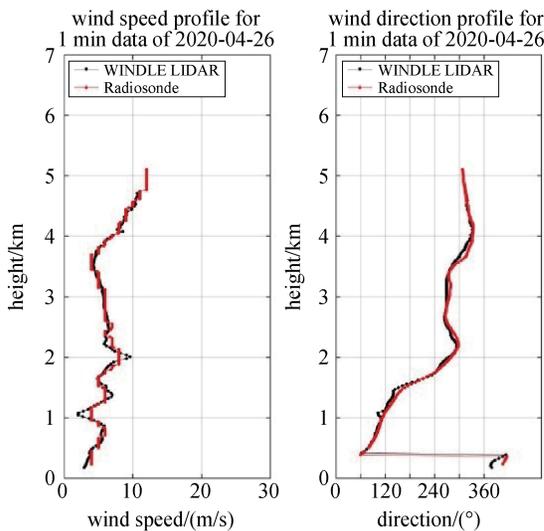
3.1.3 按风速分组测风数据对比

为了对比L波段探空雷达和WINDLE LIDAR雷达在不同风速条件下的差异情况，将所获得的数据以L波段探空雷达测量所得的水平风速作为标准进行分组^[16]，对比情况见表3。

从表中可以看出，风速在5 m/s~10 m/s、10 m/s~15 m/s以上2组数据中，有较好的相关性，且风速在15 m/s以下时，系统偏差和标准偏差均较小。风速在20 m/s~25 m/s、大于25 m/s以上2组数据中，相关性较差，标准偏差值明显增大。在风速较小的情况下，风向相关性均较高，当风速大于20 m/s



(a) 7:15 的风廓线对比
(a) Comparison of wind profiles at 7:15



(b) 19:15 的风廓线对比
(b) Comparison of wind profiles at 19:15

图 7 风廓线对比(2020年4月26日)

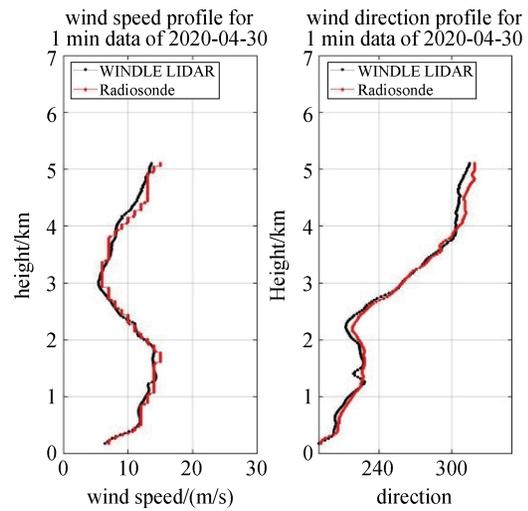
Fig.7 Wind profile comparison(April 26, 2020)

时, 风向相关性减弱, 且系统偏差和标准偏差均有所增大。

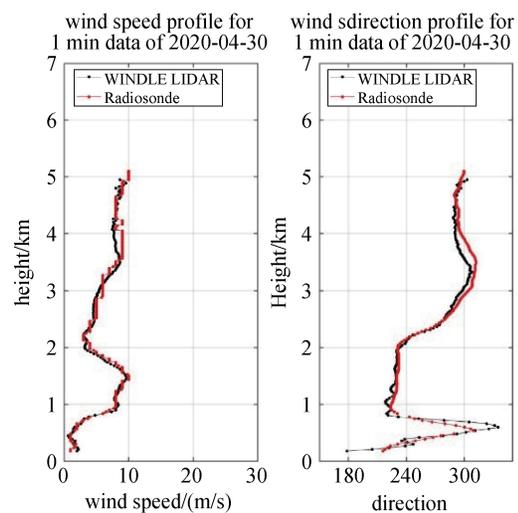
3.2 与 WINDLE U7 测风雷达进行对比

3.2.1 探测数据总体对比

两台雷达的垂直分辨率相同, 在剔除粗大误差后, 进行了风廓线对比如图 9 所示。通过多组数据统计分析, 可以得出, WINDLE LIDAR 雷达平均有效探测高度大于 5 km, 天气情况较好的情况下, 最大探测高度可达 8.5 km。图 9 中 6.5 km 到 8 km 处的空白, 可能是天气较为干净, 垂直探测时, 该区域没有气溶胶或者云。



(a) 7:15 的风廓线对比
(a) Comparison of wind profiles at 7:15



(b) 19:15 的风廓线对比
(b) Comparison of wind profiles at 19:15

图 8 风廓线对比(2020年4月30日)

Fig.8 Wind profile comparison (April 30, 2020)

将两台雷达的数据进行风速和风向的线性拟合, 画出了水平风速、风向对比的散点图。如图 10 和图 11 所示。图 10 中有风速、风向可对比的统计点共 119 468 对, 风速和风向的相关系数、系统偏差、标准偏差分别为 0.999 和 0.999、0.209 m/s 和 1.036°、0.255 m/s 和 1.946°, 说明两台雷达有着较强的一致性。图 11 是将风速小于 5 m/s 的数据剔除后的水平风向对比散点图, 同样是因为小风速的数据受局地影响很大, 导致风场不稳定。在剔除风速小于 5 m/s 的数据后, 风向的相关系数、系统偏差、标准偏差为 0.999、1.077°和 1.220°, 对比剔除前后的数据, 风向的标准偏差明显减小。

表3 按风速分组对比统计结果

Table 3 Group comparison statistics by wind speed

	样本数	相关系数	系统偏差	标准偏差
≤5 m/s	763	0.857	0.074	0.546
风向	763	0.994	1.154	7.616
5 m/s-10 m/s	1 717	0.901	0.062	0.602
风向	1 717	0.997	2.957	4.711
10 m/s-15 m/s	1 399	0.900	0.223	0.585
风向	1 399	0.998	3.183	3.176
15 m/s-20 m/s	586	0.862	0.487	0.680
风向	586	0.998	2.942	2.931
20 m/s-25 m/s	215	0.656	0.108	1.094
风向	215	0.905	2.831	4.070
>25 m/s	42	0.742	0.396	0.858
风向	42	0.829	5.053	5.780

3.2.2 按高度分组测风数据对比

风廓线探测精度在不同高度上存在差异，为获取在不同高度下两台雷达测风对比差异的情况，

将对数据分为6个高度层进行讨论：1 000 m以下、1 000~2 000m、2000~3 000 m、3 000~4 000 m、4 000~5 000 m以及5 000 m以上，同时对剔除风速小于5 m/s前后不同高度层的风向数据。统计结果如表4所示。

对不同高度的水平风速进行分析：5 km以下所有高度层的相关系数很高，风速系统偏差和标准偏差较小，在0.1 m/s~0.25 m/s左右，系统偏差最大为0.243 m/s，标准偏差最大为0.252 m/s。当高度大于5 km后，相关系数、系统偏差和标准偏差明显变差。

对不同高度的水平风向进行分析：高度小于1 km时，风向的标准偏差较大，为3.803°。1 km~5 km的4个高度层的相关系数较高，系统偏差在1°左右，标准偏差在1°~1.7°左右，3 km~4 km时标准偏差最大，为1.685°。当高度大于5 km时，相关系数降低，系统偏差和标准偏差没有明显变化。

对剔除风速小于5 m/s前后不同高度的风向进

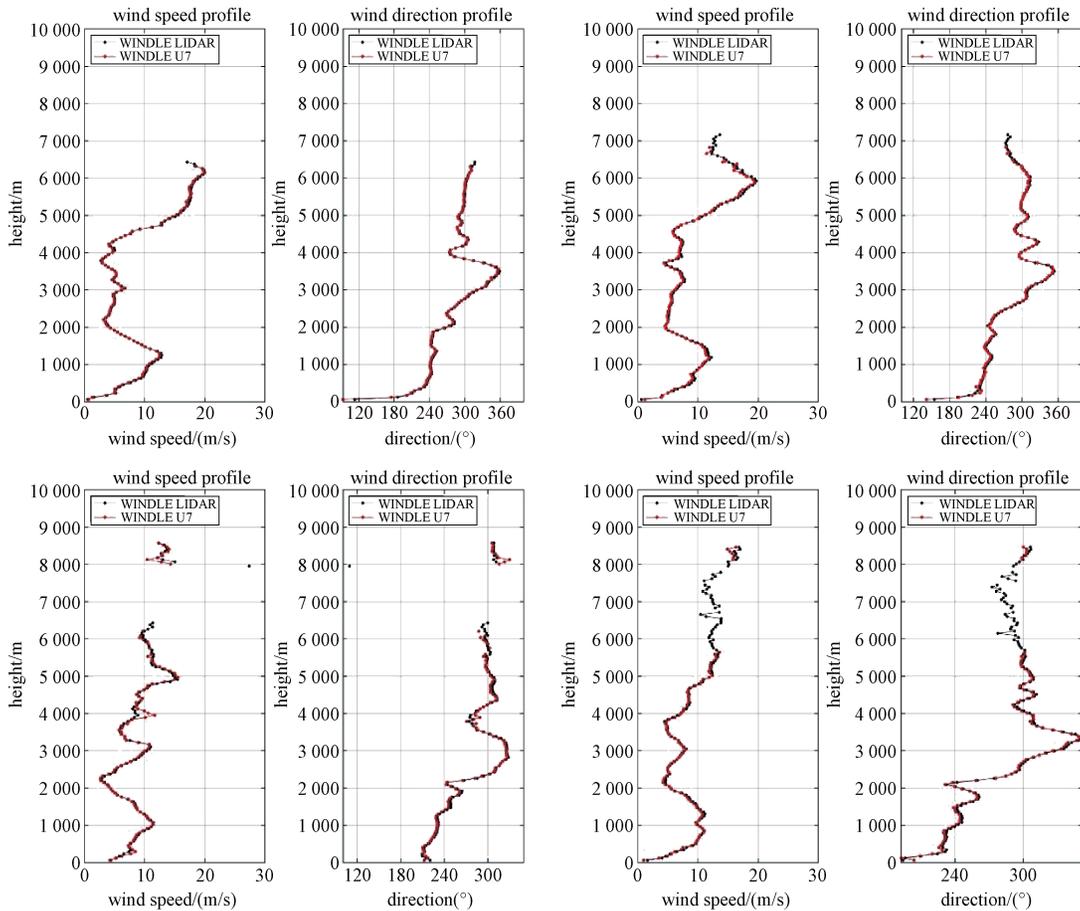


图9 风廓线对比

Fig.9 Wind profile comparison

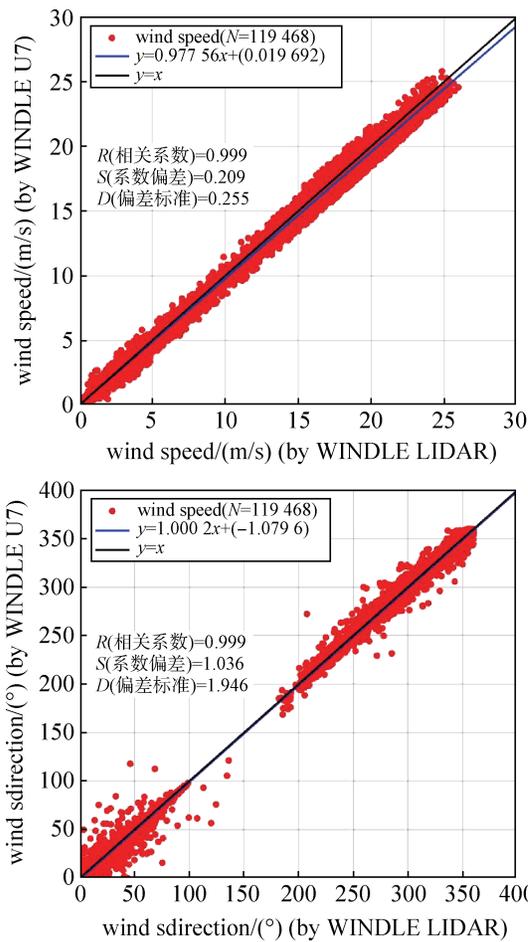


图 10 水平风速、风向对比散点图

Fig.10 Horizontal wind speed and wind direction comparison scatter plot

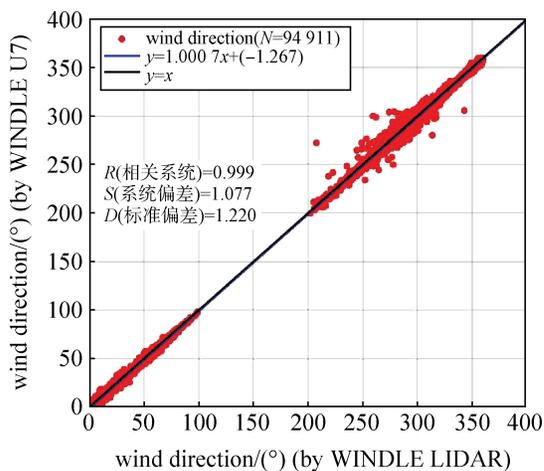


图 11 水平风向对比散点图

Fig.11 Horizontal wind direction comparison scatter plot

行分析: 剔除前后, 所有高度层的相关系数没有明显变化, 系统偏差略有增加, 标准偏差明显降

表 4 按高度分组对比统计结果

Table 4 Statistical results by height group

高度层	样本数	相关系数	系统偏差	标准偏差	
≤1 000 m	风速	17 922	0.997	0.151	0.206
	风向	17 922	0.999	1.062	3.803
	风向*	10 286	0.999	1.221	1.288
1 000~2 000 m	风速	19 326	0.998	0.105	0.146
	风向*	13 306	0.999	1.153	1.030
2 000~3 000 m	风速	19 401	0.997	0.130	0.122
	风向*	14 936	0.998	1.082	0.859
3 000~4 000 m	风速	17 924	0.998	0.149	0.161
	风向*	13 591	0.998	1.076	1.002
4 000~5 000 m	风速	19 148	0.998	0.243	0.252
	风向*	17 170	0.994	1.028	1.094
≥5 000 m	风速	25 747	0.981	0.419	0.384
	风向*	25 747	0.983	1.021	1.276
	风向*	25 747	0.983	1.021	1.276

注:*代表将风速小于5 m/s的数据剔除后的统计结果。

低, 1 km 以下风向的标准偏差由 3.803° 降到 1.288°, 说明 1 km 以下风场不太稳定, 小尺度扰动和下垫面对其有较大的影响。从样本数量可以看出, 高度越高, 剔除的风速小于 5 m/s 的数据越少, 5 km 以上没有剔除数据, 说明高度越高, 风速越大。

为验证本文所采用的技术手段和方法在时间和空间分辨率的准确性, 分别从个例和统计两个维度进行分析。随机选取测试期间三个时刻的风廓线个例进行比对, 如图 12 所示。在探测高度较高时, 由于测风激光雷达观测数据的信噪比较低, 所以选择 4 000 m 以下高度进行比对。可以看出两条风廓线的整体吻合度很高, 且风速偏差分布在 -0.35 m/s 到 0.35 m/s 之间。

从统计的维度进行比对, 计算实验期间两台雷达在各高度层获取的平均风速, 以及二者之间的系统偏差和标准偏差, 具体结果如图 13 所示。两台雷达获取的各高度层平均风速之间的系统偏差和标准偏差基本上都位于 0~0.3 m/s 区间内, 在 500 m 以下高度的标准偏差较大, 主要原因可能源于二者探测原理和观测地点因周边建筑和地形

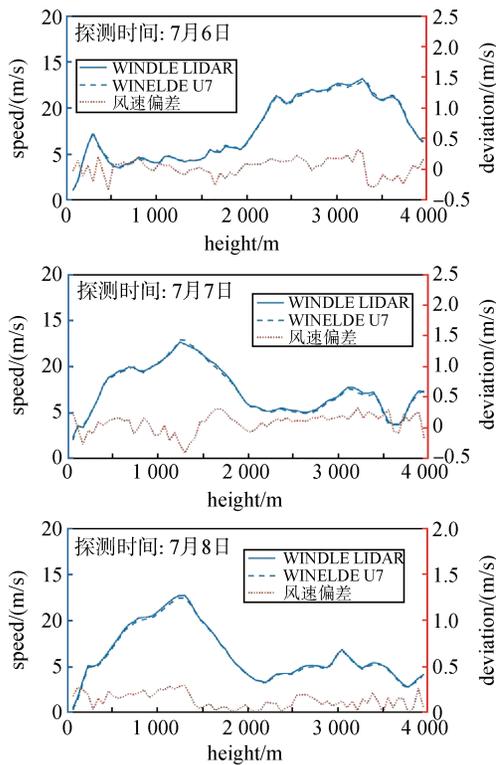


图 12 风廓线及其偏差对比个例图

Fig.12 Example of wind profile and its deviation comparison

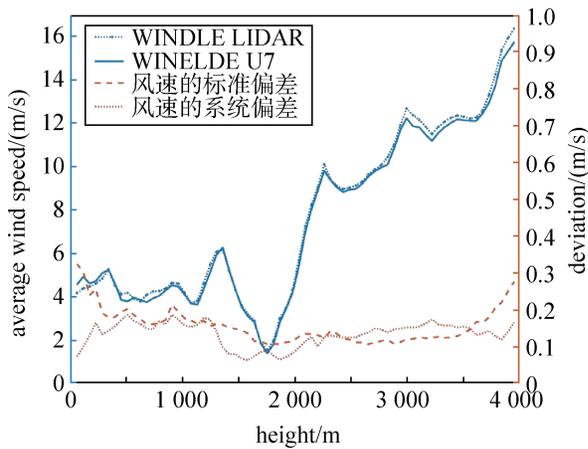


图 13 风速及其系统偏差和标准偏差随高度分布图

Fig.13 Distribution of wind speed and its system deviation and standard deviation with height

产生低层局部环流和湍流等影响^[7], 测风结果会出现较大差异。随着高度增加, 二者风速的标准偏差逐渐减小, 在 3 500 m 以上高度层有明显增大, 可能由于该高度区间内的匹配数据样本量较少, 造成了较大的误差。图 14 为风速、风向的系统偏

差和标准偏差随高度的分布情况, 同样可以反映上述变化趋势。随着高度的增加, 无论是风速还是风向, 标准偏差均呈现先减小后增大的趋势。

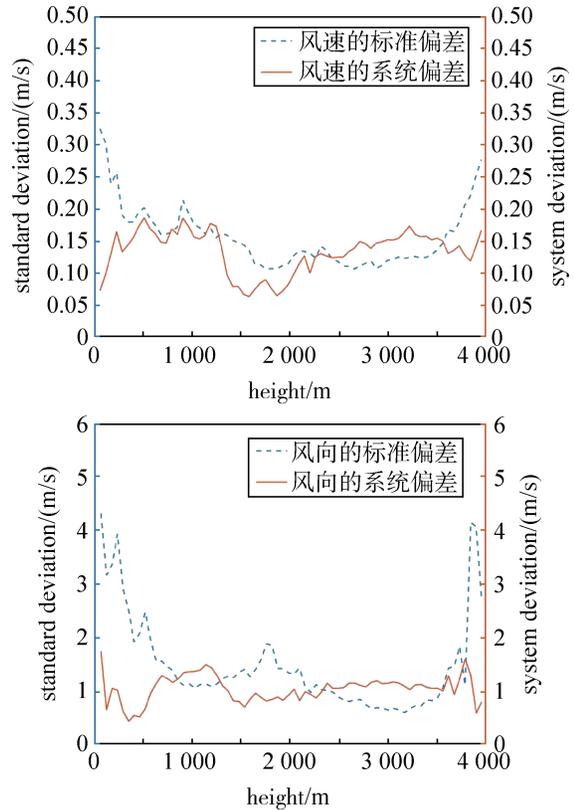


图 14 风速、风向的系统偏差和标准偏差随高度分布图

Fig.14 Distribution of systematic deviation and standard deviation of wind speed and direction with height

4 误差分析

探测精度除了受计算方法本身的影响以外, 还会受到探空设备的影响。可能产生的误差来源, 分析如下:

① 本文初始探空资料的主要获取手段是施放探空气球, 探空气球本身存在误差: 风速测量精度为 1 m/s (风速 < 10 m/s)、10% (风速 > 10 m/s), 风向精度为 5° (风速 > 25 m/s)、10° (风速 < 25 m/s) ^[6]。

② 时间、空间存在不同步问题, 本文虽然已经对时空同步进行了处理, 但不可能做到完全一致。受气流影响, 探空气球在爬升过程中, 会发生不定向水平飘移, 而 WINDLE LIDAR 雷达的位

置则是在固定不动的。当 L 波段探空雷达与 WINDLE LIDAR 雷达同址时, 近地面层风场的复杂性和高空采样空间的不一致会对测风的准确性产生一定的影响^[18]。同理, 在北京遥测技术研究所永丰产业园办公楼楼顶对比测试的两台雷达也无法完全做到时空一致。

③ WINDLE LIDAR 雷达和 WINDLE U7 雷达两台设备本身也存在误差。除此之外, 在 500 m 以下的高度, 因观测地点周边建筑和地形产生低层局部环流和湍流等影响, 测风结果也会出现较大差异。在探测高度较高时, 由于激光雷达观测数据的信噪比偏弱, 获得可信的观测数据量减少, 同样会对风向、风速一致性比对造成不利影响。

综上所述, 探测误差是在合理范围内的, 可以看出 WINDLE LIDAR 型多普勒测风激光雷达系统的优越性。

5 结束语

通过对 40 组 L 波段探空雷达和 WINDLE LIDAR 雷达探测风廓线的数据进行对比分析, 可得如下结论: WINDLE LIDAR 雷达每天 7:15 和 19:15 与 L 波段探空雷达进行同步观测, 40 组风廓线平均有效探测高度大于 5 km; 二者风速和风向的相关系数、系统偏差、标准偏差分别为 0.990 和 0.998、0.114 m/s 和 3.078°、0.489 m/s 和 3.969°, 可以看出, 两者具有较好的一致性。对比两台测风雷达的观测数据, 可以得到: 垂直探测距离大于 5 km, 最大探测高度可达 8.5 km。风速和风向的相关系数、系统偏差、标准偏差分别为 0.999 和 0.999、0.209 m/s 和 1.077°、0.255 m/s 和 1.220°。通过与两种不同类型的雷达设备进行对比, 可以较全面地验证北京遥测技术研究所研制的 WINDLE LIDAR 型多普勒测风激光雷达系统性能的优越性。

参考文献

- [1] 董佳. 基于 FPGA 的相干测风激光雷达实时信号预处理实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] 邵楠, 陈玉宝, 步志超, 等. 非相干多普勒激光雷达探测风廓线精度分析[J]. 量子电子学报, 2018, 35(3): 344-352.
SHAO N, CHEN B Y, BU Z C, et al. Accuracy analysis of wind profile detected by incoherent Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(3): 344-352.
- [3] 周永升. 相干多普勒测风激光雷达关键技术研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2017.
- [4] 王章军. 基于分子滤波器和 Fe 玻尔兹曼方法的高低空测风测温激光雷达系统[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [5] 陈玉宝. 基于镜频抑制零差技术的相干多普勒测风激光雷达关键技术研究及数据分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019. DOI:10.27248/d.cnki.gnjqc.2019.000747.
- [6] 赵萌, 郭磐, 芮训豹, 等. 低信噪比下相干多普勒激光雷达风场矢量反演算法[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 278-288.
ZHAO M, GUO P, RUI X B, et al. Wind-Field vector retrieval method at low signal-to-noise ratio for coherent doppler lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 278-288.
- [7] 刘秉义, 冯长中, 陈玉宝, 等. 车载测风激光雷达风廓线同步观测实验[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 52-56.
LIU B Y, FENG C Z, CHEN Y B, et al. Synchronous observation of wind profiles with mobile Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 52-56.
- [8] 范琪, 朱克云, 郑佳锋, 等. 不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达探测性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 320-329.
FAN Q, ZHU K Y, ZHENG J F, et al. Detection performance analysis of all-fiber coherent wind lidar under different weather types[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 320-329.
- [9] 朱莘, 王成刚, 严家德, 等. 北京城市复杂下垫面条件下三种边界层测风资料对比[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 794-801.
ZHU P, WANG C G, YAN J D, et al. Comparison of three kinds of wind data in boundary layers under complex surface conditions in Beijing[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5): 794-801.
- [10] 古红萍. 风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气中的分析和应用及数值模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007.
- [11] 李伟, 李书严, 王建凯, 等. 中国地区高空气象探测气球空间漂移分析[J]. 气象学报, 2010, 68(3): 421-427.
- [12] 李林蔚, 陈亚军, 弓宇恒. 激光测风雷达反演风场产品在冬运会的适用性分析[J]. 现代电子技术, 2022, 45(13): 93-98. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2022.13.018.
- [13] 王章军, 王睿, 李辉, 等. 基于相干多普勒测风激光雷达的南极中山站低空大气风场应用研究[J]. 极地研究, 2022, 34(1): 11-19. DOI:10.13679/j.jdyj.20210057.
WANG Z J, WANG R, LI H, et al. Applied research on

- low-altitude wind field using coherent Doppler wind lidar at Zhongshan Station, Antarctic[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2022, 34(1): 11-19. DOI: 10.13679/j.jdyj.20210057.
- [14] 刘瑞婷, 阮征, 魏鸣, 等. 风的空间不均匀分布对风廓线雷达数据质量影响研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 229-236. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2016.02.009.
- LIU R T, RUAN Z, WEI M, et al. The analysis of influence on wind measurement by inhomogeneous wind distribution with wind profile radar[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(2): 229-236. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2016.02.009.
- [15] 吴蕾, 陈洪滨, 康雪. 风廓线雷达与L波段雷达探空测风对比分析[J]. 气象科技, 2014, 42(2): 225-230.
- WU L, CHEN H B, KANG X. Comparison between wind profiler and L band upper-air meteorological sounding system[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(2): 225-230.
- [16] 张滢, 刘正勇, 邹旭东, 等. CFL-16B 对流层风廓线雷达与L波段二次测风雷达数据对比分析[C]//第十二届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集, 2018: 181-186.
- [17] 李林, 张治国, 杜传耀, 等. 多普勒测风激光雷达与L波段探空对比分析[J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(5): 494-505.
- LI Lin, ZHANG Zhiguo, DU Chuanyao, et al. Inter-comparison of wind measurements between Doppler wind lidar and L-band radiosonde[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2022, 17(5): 495-505.
- [18] 王丽吉, 陈晔峰, 吴书成, 等. 对风廓线雷达和L波段雷达探空观测的水平风场的一致性评估[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(5): 593-600.
- WANG L J, CHEN Y F, WU S C, et al. Consistency assessment of the horizontal wind field based on the data from the wind profiler radar and the L-band upper-air meteorological sounding[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2020, 47(5): 593-600.

[作者简介]

吴格 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为测风激光雷达信号处理。

赵一鸣 1983年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达总体设计。

马勋鹏 1989年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为测风激光雷达总体设计。

柳佳欣 1994年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达数据反演。

边吉 1991年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达光机结构设计。

曹恩达 1994年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达光学系统设计。

(本文编辑: 潘三英)