

# 不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达 探测性能分析

范 琪<sup>1</sup>, 朱克云<sup>1</sup>, 郑佳锋<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 周鼎富<sup>2</sup>, 张福贵<sup>3</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;

<sup>2</sup>成都西南技术物理研究所, 四川 成都 610225;

<sup>3</sup>成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225

**摘要** 为了给低空飞行安全气象服务奠定基础, 根据 2015 年 7~9 月国内新研制的全光纤相干激光测风雷达, 联合边界层风廓线雷达和双经纬仪探空气球在我国东北某地获取的探测实验资料, 对比了晴天、阴天、雾霾天和雨天 4 种天气类型下激光测风雷达和风廓线雷达与探空气球风场探测的相关性, 以评估激光测风雷达的测风精度和稳定性。结果表明, 晴、阴和雾霾天条件下, 激光测风雷达测风精度优于风廓线雷达, 其水平风与真值误差的标准差低于风廓线雷达的一半; 雨天条件下, 激光测风雷达探测高度受限, 最大可测高度仅为风廓线雷达的一半, 表明其风场探测受降水衰减影响比风廓线雷达严重。激光测风雷达测风稳定性优于风廓线雷达, 垂向连续高度上其与真值的相关系数变化小且均达到 0.9 以上。晴、阴和雾霾天条件下, 两种雷达测风精度均受大气风速变化影响, 且随大气风速增加呈不同变化趋势。

**关键词** 遥感; 探测性能; 相干激光测风雷达; 风廓线雷达

**中图分类号** TP79

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0210003

## Detection Performance Analysis of All-Fiber Coherent Wind Lidar Under Different Weather Types

Fan Qi<sup>1</sup>, Zhu Keyun<sup>1</sup>, Zheng Jiafeng<sup>1</sup>, Zhang Jie<sup>1</sup>, Zhou Dingfu<sup>2</sup>, Zhang Fugui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>2</sup>Chengdu Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>3</sup>College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China

**Abstract** For the foundation of low altitude flight safety service, based on the detection database collected at the northeast of China from July to September in 2015 and using a Chinese new all-fiber coherent wind lidar combined with a double theodolite pibal and wind profile radar, the wind measurement precision and reliability of this new wind lidar are evaluated by comparing the correlation of laser radar, the wind profile radar and pibal wind detection under clear-air, cloudy, foggy and hazy, and rainy conditions. The results show that, under clear-air, cloudy, foggy and hazy conditions, the wind lidar is more accurate than the wind profiler lidar, and the standard deviation between horizontal wind and real value error is less than a half of wind profiler lidar. During the rainy day, the detection range of wind lidar is limited, and the maximum observed altitude decreases to only half of the wind profiler which shows a severe influence compared with wind profiler under precipitation. The wind lidar results are

**收稿日期:** 2016-08-10; **收到修改稿日期:** 2016-10-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(91537214, 91437113)

**作者简介:** 范 琪(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事全光纤相干多普勒激光雷达方面的研究。

E-mail: 1432091537@qq.com

**导师简介:** 朱克云(1956—), 女, 硕士, 教授, 主要从事数值模拟与资料同化等方面的研究。

E-mail: zhuky@cuit.edu.cn(通信联系人)

more stable than that of the wind profiler. The dataset correlation coefficient, which can reach up to 0.9, between the measured data detected by the wind lidar and the real value has a tiny change. Under clear-air, cloudy, and fog and hazy conditions, the wind accuracy of two lidar are both affected by the variation of wind speed, meanwhile, the change trends are different as the wind speed increases.

**Key words** remote sensing; detection performance; coherent Doppler lidar; wind profile radar

**OCIS codes** 280.3340; 010.0280; 010.3640; 030.1640

## 1 引 言

我国幅员辽阔、天气和地理环境复杂。随着我国空中交通运输量的迅猛增长,低层空中风对空中交通安全的威胁越来越大。2014年我国开始实行低空空域开放政策,使得1000m以下低层空域中飞行剧增。已经从原来的海洋陆地警巡飞行、医疗救护飞行、地矿勘探飞行、国土资源监测飞行、护林防火飞行、输电线路巡视等常规任务飞行拓展到观光旅游飞行、个人商务活动飞行等。这些剧增的飞行量使得低空事故频发,仅2016年1~7月通航就已经发生7起低空飞行事故,造成13人死亡,这些事故有相当部分与低空中流场突变有关,这使得严密监测低空天气、保障低空飞行安全变得迫在眉睫。相干激光测风雷达作为新型的风场探测手段,抗干扰能力强、资料分辨率高,能够提供十分精细的低空三维风场信息,可有效保障飞机的起降安全。同时,在天气研究领域,它也可弥补厘米波天气雷达和分米波晴空风廓线雷达对低空风场探测能力的不足,具有重要的发展潜力<sup>[1-3]</sup>。

对于相干激光测风雷达的发展,国外起步较早,始于20世纪60年代,至今已较为成熟。主要用于机场的安全保障和天气预报,同时还装备于部队,形成战斗力,如美国CTI公司研制的WindTrace<sup>®</sup>激光测风雷达<sup>[4-5]</sup>、法国Leosphere公司研制的WindCube激光测风雷达<sup>[6]</sup>等。我国相干激光测风雷达的研究起步较晚,处于较初步的阶段。如2000年,胡宏伟等<sup>[7]</sup>在理论上推导了地基相干激光测风雷达反演三维风场的速度方位显示(VAD)方法。2010年,李冬梅等<sup>[8]</sup>使用相干激光测风实验装置对模拟风场进行了测量。2012年,竹孝鹏等<sup>[9]</sup>对相干激光测风雷达系统探测的低空视向风速分布进行了分析,结果表明,该系统探测结果较为可靠。2013年,潘静岩等<sup>[10]</sup>将全光纤相干激光测风雷达设备探测结果与超声风速仪和探空气球的探测结果进行对比,结果表明,该设备探测结果与后两种仪器的探测结果较为一致。2015年,刁伟峰等<sup>[11]</sup>用全光纤相干激光测风雷达系统与风廓线雷达进行对比,表明两者水平风速风向探测具有较好的一致性。

从目前国内研究现状来看,尽管对相干激光测风雷达的测风能力开展了一定的分析,但仍然缺乏较细致的对比和验证,特别是与目前气象业务应用中风廓线雷达的对比和分析。本文利用西南技术物理研究所新研制的全光纤相干激光测风雷达在我国东北某地开展的测风实验数据,分析了不同天气类型下激光测风雷达的测风精度和探测性能,为激光测风雷达的业务应用提供参考。

## 2 观测实验和仪器

2015年7~9月西南技术物理研究所我国东北某地开展了边界层风场精细化联合观测实验,其中激光测风雷达为西物所新研制,另外,同址开展对比探测的仪器还包括一部1230MHz的边界层风廓线雷达和带有双经纬仪的探空气球。

该激光测风雷达采用了全光纤相干多普勒体制,雷达系统的光路结构如图1所示。激光发射源采用窄线宽保偏光纤激光器,产生的激光束经过光纤分束器后分为两路,一路作为本振信号输入到相干接收机中,另一路经过声光调制器和脉冲光纤放大器后变为高功率激光信号,由光学天线发射向空中,与大气中的气溶胶粒子碰撞产生后向米氏散射。回波信号经过环形器和本振信号由光纤耦合器混频后经平衡探测器输出电信号,再经A/D转换和频谱信号分析处理后得到一组视向风速信息。系统控制单元利用雷达进行风场扫描,通过VAD扫描合成各方位视向风速从而反演出大气三维风场信息。该雷达可提供径向风、垂直速度、信噪比以及风切变等多种产品,其主要参数如表1所示。该雷达体积小、重量轻、便于移动和携带;可进行平面位置显示(PPI)扫描、距离高度显示(RHI)扫描、等高平面位置显示(CAPPI)扫描和风廓线模式扫描(WPscanning),能通过调整扫描方式较完整地捕捉过境系统,方便业务使用;数据时空分辨率很高,可对风场进行精细化探测。

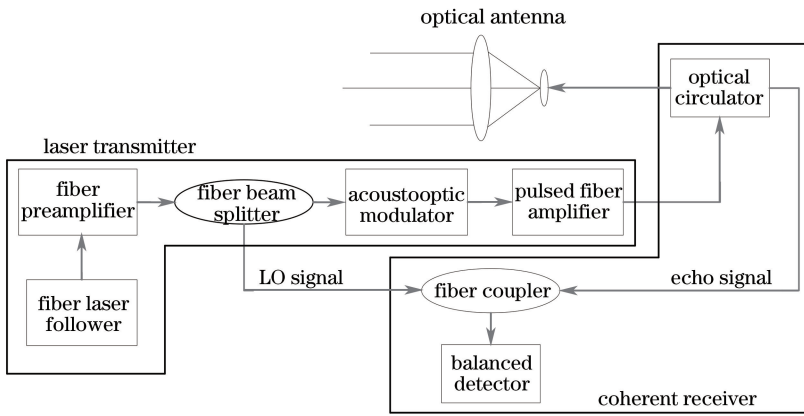


图 1 全光纤相干激光测风雷达系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of all-fiber coherent wind lidar system

风廓线雷达使用的是安徽四创电子股份有限公司生产的 WP-3000M 型边界层风廓线雷达,其时空分辨率分别为 2 min 和 50 m,速度和角度分辨率分别为 1.5 m/s 和 10°。风廓线雷达示踪物为大气湍流,大气中温压湿的湍流脉动会使大气的折射指数发生变化,而雷达发射的电磁波束遇到这些具有不同折射指数的气团时会引起散射,由于大气中的气团是随风移动的,通过测量接收到的散射频率相对于发射频率的多普勒频移就可以间接测量到大气风速,从而获得风场的时空变化信息。

气象业务中常用的探空气球分为大球和小球两种。大球主要探测大气温、压、湿、风,其探测高度可升达离地 30~40 km,但时间分辨率低,非汛期每日只释放两次,汛期增加为每日三次。考虑到激光测风雷达的探测距离以及时间分辨率,观测实验使用双经纬仪小球测风,其探测高度可达 3 km 以上,施放时间次数不限,可测风和云底高,其中测风是将两架经纬仪分别架设在距离已知的两个端点上,同时观测随风飘移的气球,得到气球在空中的仰角和方位角,通过三角函数计算公式确定气球的高度,以求得空中风速风向。探空气球是目前气象业务和研究中不可缺少的工具,其探测数据为传感器实测结果,因此也常作为其他仪器对比和标定的参考对象。

表 1 全光纤相干激光测风雷达主要参数

Table 1 Main parameters of all-fiber coherent wind lidar

Parameter	Value
Power supply /Hz	220/50
Average power /W	≤200
Weight /kg	60.76
Wavelength /μm	1.55
Scanning mode	PPI、RHI、CAPPI、WPscanning
Pitch angle / (°)	0~180
Rotation angle / (°)	0~360
Maximum detection range /km	≥3
Minimum detection range /m	≤45
Range resolution/m	≤30
Time resolution/s	≤2
Angular resolution / (°)	≤0.1
Velocity resolution / (m/s)	≤0.5

### 3 分析方法

#### 3.1 数据的时空同步处理

探空气球施放后在上升过程中不但随风飘移且探测过程需要一定时间,而且在同一时间同一高度探空气球只有一个测风数据,但是激光测风雷达和风廓线雷达始终探测安装位置点的顶空风场,同时测得不同高

度的风场数据。因此,在开展三种仪器资料对比前,首先需要对它们的数据进行时间和空间上的同步处理。

1) 数据时间同步处理:记录探空气球的施放时间,在已知气球上升速度的情况下,计算出其到达相应高度层的时间,选取处于同时刻激光测风雷达和风廓线雷达资料用于对比,确保三种仪器数据的时间一致性。

2) 数据空间同步处理:水平方向,探空气球虽然会随风飘移,但根据大气的连续性特性,在局地范围内相同高度上的大气特性被认为是一致的,因此忽略气球水平飘移的影响。垂直方向,探空气球和激光测风雷达分辨率都为 30 m,但高度不对应,而风廓线雷达分辨率为 50 m,因此需要对激光测风雷达和风廓线雷达数据进行插值,得到与探空气球高度对应的数据,保证三种仪器数据的空间一致性。

### 3.2 探测性能分析方法

受激光性能的局限,天气现象对雷达测风精度和稳定性均有影响。为了研究不同天气类型下激光测风雷达的探测性能,按照晴(总云量小于等于 30%)、阴(中低云量大于等于 80%)、雾霾(雾和霾的混合物,即大量极微细的干尘粒和湿颗粒及微小水滴等不均匀混合于空中,使得水平能见度小于 10 km,相对湿度处于 60%~85%时的视野模糊、大气浑浊、能见度恶化现象)、雨天 4 种天气类型,利用逐小时气象观测记录对 2015 年 7~9 月资料进行天气分类。随后,在相同的天气类型中,利用上述的数据处理方法得到时间和空间同步的三种仪器测风数据。由于探空气球结果为传感器的直接测量,且早已被气象部门广泛用于业务,而激光测风雷达和风廓线雷达的探测结果为反演量。因此,将探空气球的探测结果视为真值,而将激光测风雷达和风廓线雷达的探测结果视为对比值。基于上述考虑,从整体、分高度层、分风速区间三个不同角度出发,通过相关系数(CC,衡量两随机变量之间线性相关程度)、标准差(SD,衡量数据偏离平均值的离散程度)和平均偏差(AD,衡量测量值与真实值的偏差程度),来研究不同天气类型下激光测风雷达和风廓线雷达风场探测的可靠性和稳定性,分析影响两种雷达测风精度的原因。CC、SD 和 AD 的计算公式为

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

$$R_{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2)$$

$$R_{AD} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n}, \quad (3)$$

式中  $x_i$  为两种雷达的测量值, $\bar{x}$  为两种雷达的测量平均值, $y_i$  为探空气球的测量值, $\bar{y}$  为探空气球测量平均值, $n$  为数据个数。

## 4 测风精度和稳定性分析

### 4.1 测风精度分析

将不同天气分类后的激光测风雷达和风廓线雷达数据分别与探空气球数据进行风速和风向的线性拟合并求相关系数和误差的标准差,其结果如图 2 所示。风向在进行分析前需进行过零处理,因为过零前,风向小于 360°,过零后风向大于 0°,若不进行处理,当风有过零现象时,会导致不连续。具体处理方法如下:当两风向相减其差值大于 180°时,选取两风向中数值偏小者给其加 360°,此时风向差会小于 180°,处理后风向会出现大于 360°的情况,确保了风向的连续性。

晴天时,从图 2(a)~(d)中可知,激光测风雷达和风廓线雷达与探空气球风速的 CC 分别为 0.963 和 0.601,SD 分别为 0.405 和 1.224;风向的 CC 分别为 0.981 和 0.931,SD 分别为 11.477 和 30.511,表明在晴天时,激光测风雷达的测风精度要远优于风廓线雷达,而风廓线雷达风向的探测精度优于风速。两种雷达风向在 100°~150°之间(东南方向)均出现空白,表明在实验期间未出现该方位的风。分析原因为该地区位于沿海,其东南方向为海湾,当有暖湿的空气从海面吹向冷的陆地,风速在 2~7 m/s 之间时容易形成平流雾,

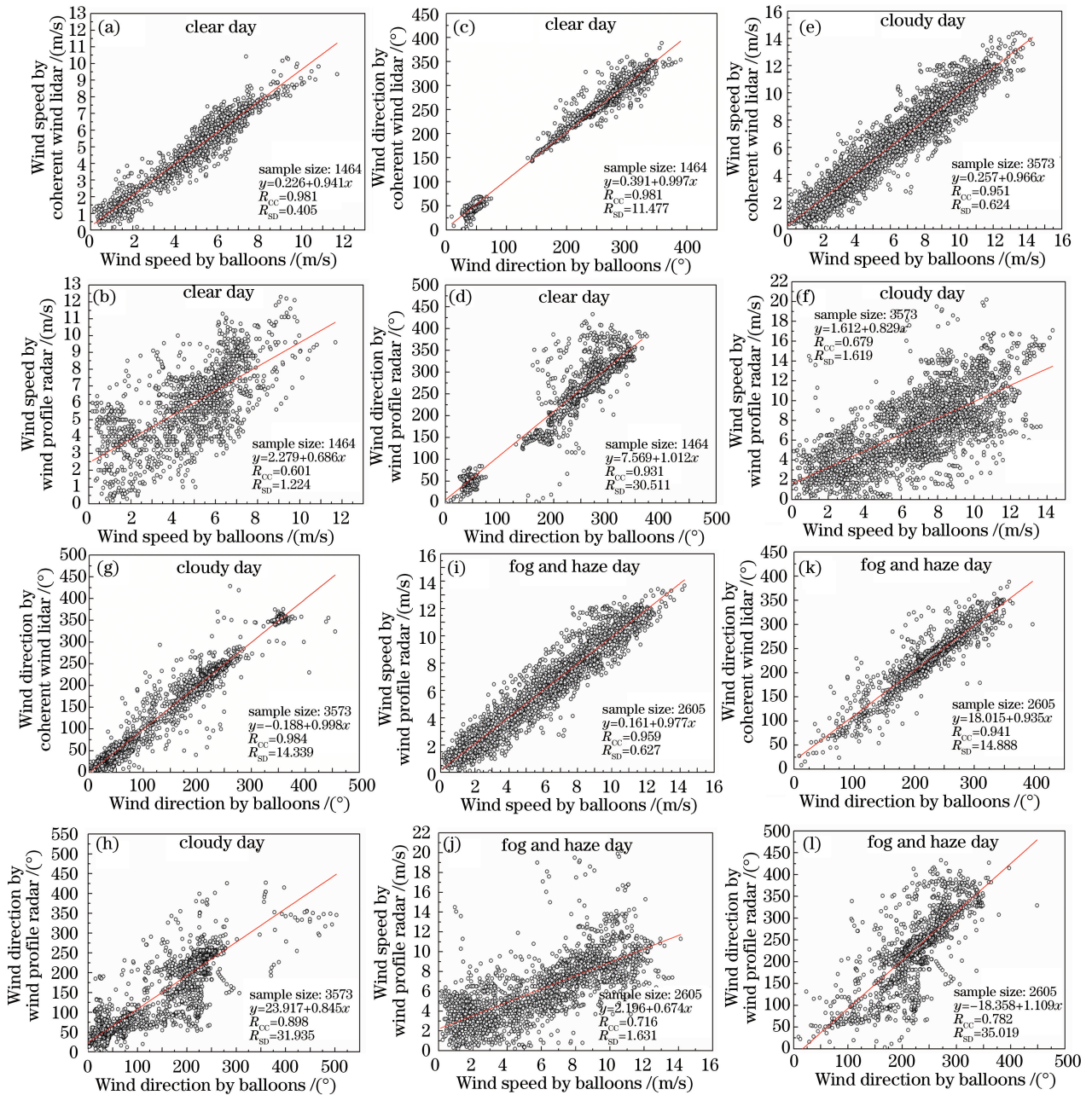


图2 不同天气类型下相干激光测风雷达和风廓线雷达与探空气球测风数据的一元线性拟合。(a)(b)晴天风速；(c)(d)晴天风向；(e)(f)阴天风速；(g)(h)阴天风向；(i)(j)雾霾天风速；(k)(l)雾霾天风向

Fig. 2 Wind data of Coherent wind lidar and wind profile radar separately linearly fitted with the wind data of the balloons under different weather types. (a)(b) Wind speed under clear day; (c)(d) wind direction under clear day; (e)(f) wind speed under cloudy day; (g)(h) wind direction under cloudy day; (i)(j) wind speed under fog and haze day; (k)(l) wind direction under fog and haze day

7~9月是该地平流雾频发季节,因此在晴天时没有出现东南风。

阴天和雾霾天时,从图 2(e)~(h)和(i)~(l)可看出,激光测风雷达和风廓线雷达与探空气球风速的 CC 在阴天分别为 0.951 和 0.679,SD 分别为 0.625 和 1.619;风向的 CC 分别为 0.984 和 0.898,SD 分别为 14.399 和 31.935。雾霾天风速的 CC 分别为 0.959 和 0.716,SD 分别为 0.627 和 1.631;风向的 CC 分别为 0.941 和 0.782,SD 分别为 14.888 和 35.019。可见阴天和雾霾天时,激光测风雷达的风场探测精度仍优于风廓线雷达,且风廓线雷达风向的探测精度仍优于风速。在以上天气类型中,当大气风速较小时,风廓线雷达与探空气球的风速点分布较分散,说明大气风速较小时可能影响风廓线雷达风速探测的一致性。图 3 为小风速和

大风速时(气象业务中, $V \leq 5$  m/s时被认为小风速, $V \geq 12$  m/s 时为大风速)风廓线雷达与探测气球的对比结果,可见两种风速情况下 CC 值分别降至 0.259 和 0.249。说明当 $V \leq 5$  m/s 或 $V \geq 12$  m/s 时,风廓线雷达风场探测的一致性变差,影响风场探测性能。

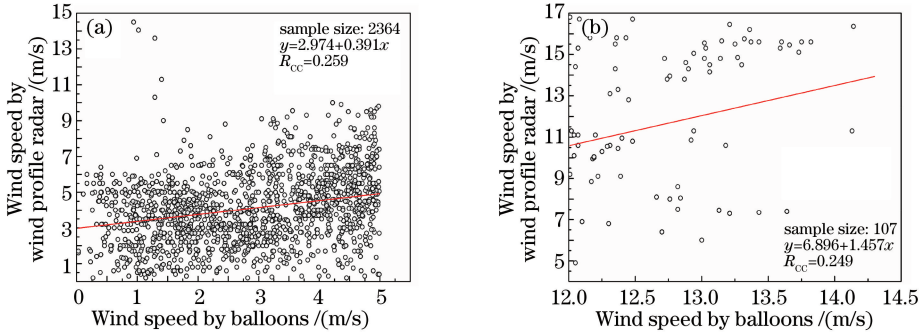


图 3 风廓线雷达与探空气球风速拟合。(a)  $V \leq 5$  m/s; (b)  $V \geq 12$  m/s

Fig. 3 Wind profile radar is fitted with the wind speed of the balloons. (a)  $V \leq 5$  m/s; (b)  $V \geq 12$  m/s

雨天时,由于实验期间收集到的降水发生时次数很少,且多在凌晨或者午夜等仪器非工作时段,受限于样本数量,选择雷达风矢产品分析雨天的探测性能。选取 2015 年 9 月 18 日一次短时雷雨降水过程,此次降水开始于 14:30,持续约 1 h,两种雷达风矢产品如图 4 所示。

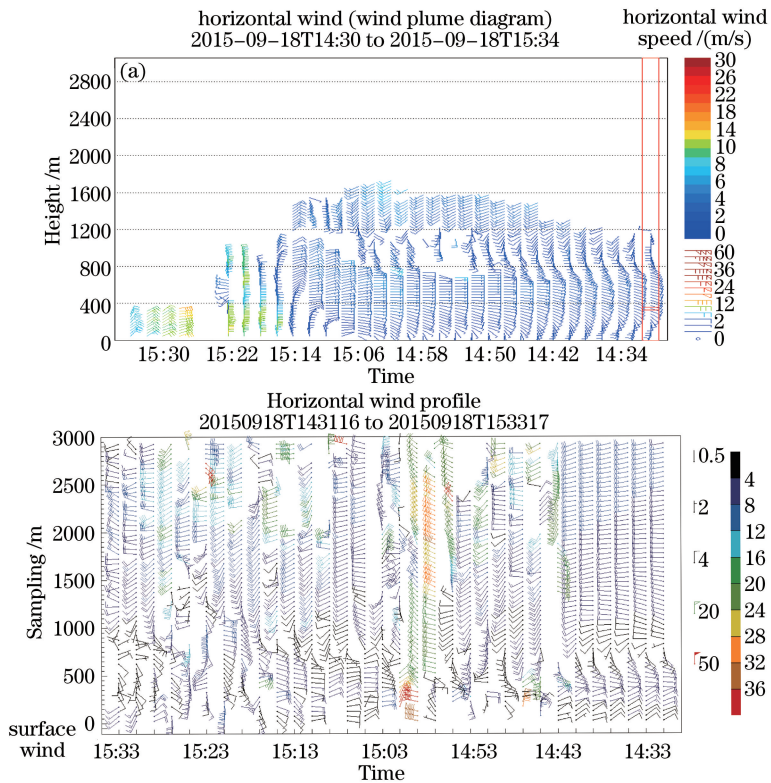


图 4 雨水平风的时间-高度剖面图。(a) 相干激光测风雷达;(b) 风廓线雷达

Fig. 4 Time-height profile of a horizontal wind during precipitation. (a) Coherent wind lidar; (b) wind profile radar

从图 4(a)和(b)中可看出,当降水较弱时,激光测风雷达受降水衰减影响大,其风矢变化连续性较差,局部出现断层,探测高度较低,最大探测到 1725 m,最小衰减为 0 m,不能很好地反映降水天气的风场特征。降水较强时,大气对流旺盛,降水信号对风廓线雷达风谱信号造成污染且不易剔除,导致风谱估计产生误差,使其风矢变化杂乱无章、出现很多异常大值和断层,降低了风场探测的可靠性。值得注意的是,在稳定性降水情况下,风廓线雷达可从风谱中剔除降水信号,只对湍流信号进行计算,依然可以得到较可靠的风场数据,且降水还会使风廓线雷达返回信号变强,使其探测高度不降反增。

## 4.2 测风稳定度分析

低空风切变对安全飞行的威胁很大<sup>[12-15]</sup>。中国科学院大气物理研究所根据 1979 年 8 月~1980 年 7 月的低空测风资料,统计了不同强度风切变出现的频率,其中中等等级的风切变都出现在 280 m 高度下;强烈等级的风切变主要出现在 120 m 高度下;严重等级的风切变基本只出现在 65 m 高度以下。而航空活动中,大多数飞机的决断高度为 60 m(决定飞机是否复飞的规定高度),因此垂直指向连续高度上风场的精准和稳定探测对保障安全飞行十分关键。

由于探空气球最低探测高度仅有 60 m,因此以 60 m 为起始高度,每隔 30 m 增加一个高度,通过分析垂直指向连续高度上激光测风雷达和风廓线雷达与探空气球风场探测一致性的波动情况,以判定不同天气类型下两种雷达测风稳定性的优劣,结果如图 5 所示。

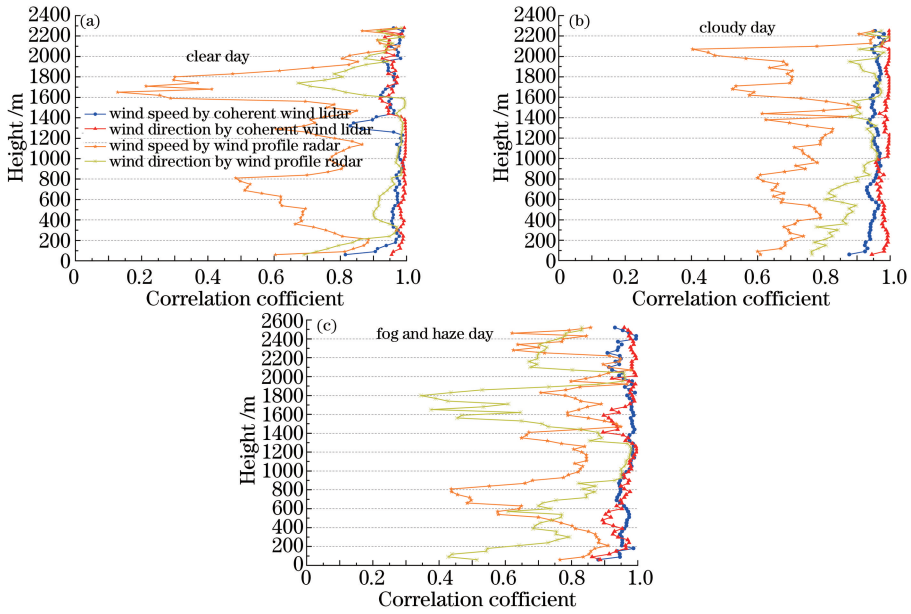


图 5 不同天气类型下测风相关系数随探测高度增加的变化特征。(a) 晴天;(b) 阴天;(c) 雾霾天

Fig. 5 Change characteristics of wind correlation coefficient with the increase of detection height under different weather conditions. (a) Clear day; (b) cloudy day; (c) fog and haze day

晴天时,从图 5(a)可知,在 60 m 处,激光测风雷达和风廓线雷达与探空气球风速的 CC 值分别为 0.815 和 0.604,风向的 CC 值分别为 0.955 和 0.690。可见晴天时在决断高度处,激光测风雷达与探空气球的一致性更好,其测风可信度高。之后随探测高度增加,风廓线雷达风速和风向的 CC 值波动剧烈,且风速波动比风向剧烈;而激光测风雷达风速风向的 CC 值基本处于 0.90 以上,且随高度增加波动较少,其逐高度层测风可信度和风场探测稳定性都明显优于风廓线雷达。在 1320 m 处,两个雷达风速的 CC 值突降为 0.607 和 0.829,统计分析该高度处探空气球的风速数据, $V \leq 5$  m/s 的风速点数占该高度处样本容量的 60.7%,但只有风廓线雷达与真实值之间的偏差较大;风廓线雷达风速和风向的 CC 值在 1650 m 和 1740 m 处突降到最低分别为 0.128 和 0.672,而这两个高度处  $V \leq 5$  m/s 的点数都达到了 62% 以上。因此,相关性下降是由于小风速情况下风廓线雷达可靠性下降的原因引起的。

阴天和雾霾天时,从图 5(b)~(c)可知,在决断高度处,激光测风雷达风场测量可信度依旧优于风廓线雷达。90 m 以上时激光测风雷达风速风向的 CC 值随高度增加少动,数值都在 0.9 以上;而风廓线雷达风速风向的 CC 值却波动剧烈,可见阴天和雾霾天,激光测风雷达逐高度层测风可信度和风场探测稳定性依旧优于风廓线雷达。对两种雷达自身而言,激光测风雷达在雾霾天测风稳定性稍逊于阴天和晴天,风廓线雷达在阴天风向探测稳定性优于雾霾天。阴天,风廓线雷达在 2070 m 处风速的 CC 值突降到最小为 0.404,统计分析这个高度处探空气球的风速数据, $V \leq 5$  m/s 的点数达到了 52% 以上, $V \geq 12$  m/s 的点数有 28.6%,且观测值与真实值之间误差较大。雾霾天,风廓线雷达在 810 m 和 1800 m 处风速风向的 CC 值分别突降到最小为 0.437 和 0.345,而这两个高度处  $V \leq 5$  m/s 的点数分别占该高度处样本容量的 51.8% 和 55.7%,且测风误差依旧较大。

## 5 误差分析

前文已知,在晴天、阴天、雾霾天类型下,当  $V \leq 5 \text{ m/s}$  和  $V \geq 12 \text{ m/s}$  时,风廓线雷达风场探测的一致性变差,而在两种雷达测风 CC 值发生突降的高度,以探空气球测得的风场数据为当时的大气风场信息真值,统计探空气球的风速数据,其中  $V \leq 5 \text{ m/s}$  和  $V \geq 12 \text{ m/s}$  的点数之和占该高度处样本容量的 50% 以上,且观测值与真实值之间的测风误差较大,这说明大气风速的变化可能影响两种雷达的风场探测精度。

为研究大气风速变化对激光测风雷达和风廓线雷达以及其风速和风向探测精度影响程度,分析随天气类型不同,影响强度的变化特征。依旧以探空气球测得的风场数据为真值,分晴天、阴天、雾霾天类型,对探空气球风速进行区间划分:  $0 \leq V \leq 1 \text{ m/s}$ ,  $1 \text{ m/s} \leq V \leq 2 \text{ m/s}$ ,  $2 \text{ m/s} \leq V \leq 3 \text{ m/s}$ ,  $\dots$ ,  $11 \text{ m/s} \leq V \leq 12 \text{ m/s}$ ,  $\dots$ 。以  $0 \leq V \leq 1 \text{ m/s}$  的风速区间为例,区间里每一个点都对应着激光测风雷达、风廓线雷达和探空气球三者的测风数据,求出此区间激光测风雷达和风廓线雷达分别与探空气球风速的平均偏差  $c$  和  $e$ 、风向的平均偏差  $C$  和  $E$ 。依此思路求出  $0 \leq V \leq 1 \text{ m/s}$ ,  $1 \text{ m/s} \leq V \leq 2 \text{ m/s}$ ,  $2 \text{ m/s} \leq V \leq 3 \text{ m/s}$ ,  $\dots$ ,  $11 \text{ m/s} \leq V \leq 12 \text{ m/s}$  等各区间的  $c$ 、 $e$ 、 $C$ 、 $E$ ,以探空气球风速区间为横坐标,分析不同天气类型下,大气风速变化对两种雷达测风精度的影响,如图 6 所示。

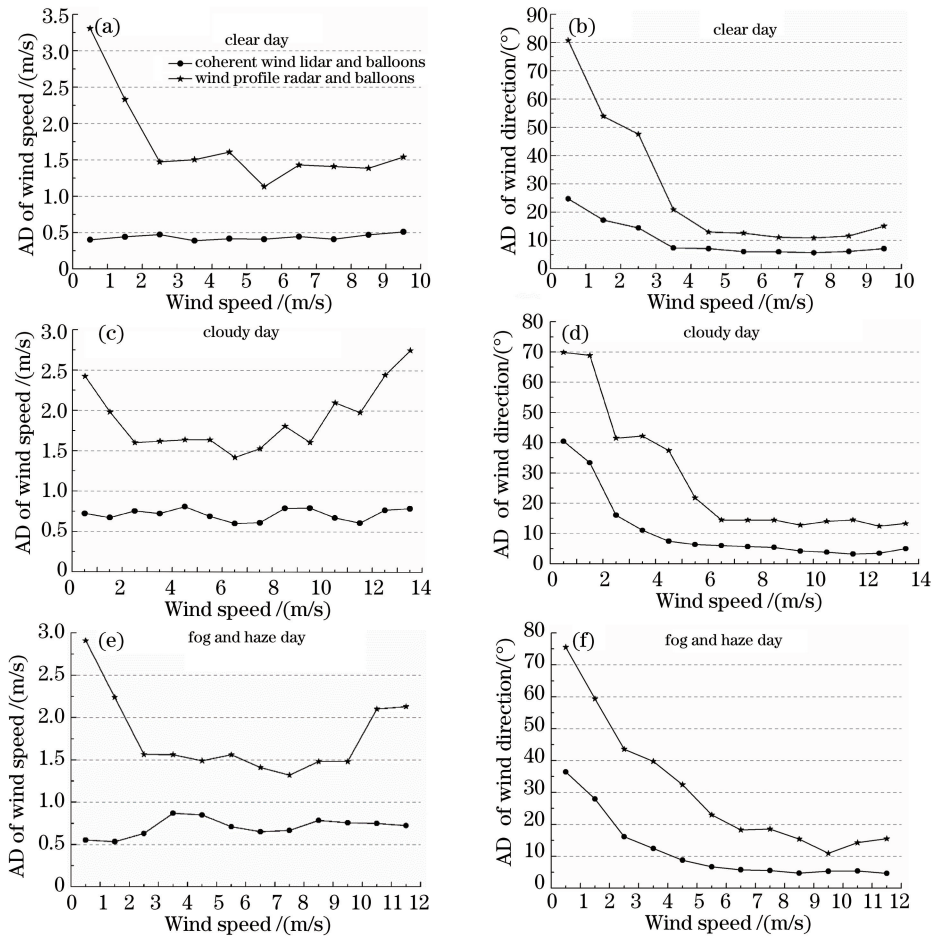


图 6 不同天气类型下风速和风向平均偏差随大气风速增大的变化特征。(a)(b) 晴天;(c)(d) 阴天;(e)(f) 雾和霾天

Fig. 6 Change characteristics of average deviation of wind speed and direction with increase of atmospheric wind velocity under different weather conditions. (a)(b) clear day; (c)(d) cloudy day; (e)(f) fog and haze day

晴天时,从图 6(a)~(b)可知,激光测风雷达风速的 AD 小于风廓线雷达的 1/3,其值少变,稳定在 0.5 m/s 以下,风速探测精度很高,基本不受大气风速变化的影响。而当  $V \leq 2 \text{ m/s}$  时,风廓线雷达风速的 AD 虽从 3.31 m/s 迅速突降至 2.33 m/s,但仍远高于其他风速段的 AD,其风速探测精度受小风速影响较大;当  $V \geq 2 \text{ m/s}$  之后,风廓线雷达风速的 AD 稳定在 1.5 m/s 左右,其风速探测精度提高且基本不受大气风速变化影响。激光测风雷达风向的 AD 明显小于风廓线雷达,随着大气风速增加,两种雷达风向的 AD 都呈



逐渐减小趋势。当  $V \leq 3$  m/s 时,两种雷达风向的 AD 虽迅速突降到  $14.52^\circ$  和  $47.63^\circ$ ,但其值仍远高于其他风速段的 AD,其风向探测精度受小风速影响较大,即大气风速较小时会影响到两种雷达的风场探测精度。分析原因为风速较小时,雷达探测的目标回波信号微弱,极易受杂波污染,影响雷达对信号谱峰的识别,会给风场探测带来不确定性,从而影响雷达的风速风向探测精度。

阴天和雾霾天时,从图 6(c)~(f)可知,激光测风雷达风速的 AD 稳定在约 0.75 m/s,基本不受大气风速变化的影响。当  $V \leq 2$  m/s 时,风廓线雷达风速的 AD 虽迅速减小到 2.0 m/s 以上,但依旧大于其他风速段的 AD,其风速探测精度受小风速影响较大;当  $2$  m/s  $\leq V \leq 10$  m/s 时,风廓线雷达风速 AD 稳定在 1.5 m/s 左右,其探测精度基本不受大气风速变化影响;而由于阴天和雾霾天大气风速相比晴天明显偏大,使得当  $V \geq 10$  m/s 时,风廓线雷达风速的 AD 陡增且最大可达 2.7 m/s,其风速探测精度减小受到大风速影响变大,其原因主要为大气风速较大时,湍流旺盛,风廓线雷达有效探测体积内大气不满足局地均匀各向同性,且较大风速一般出现在高层大气,此时大气回波信号较弱,信噪比较小,使得大气风速较大时风廓线雷达风速探测误差变大,而这种误差有时会严重威胁到飞行安全。阴天和雾霾天条件下,激光测风雷达风向的 AD 远小于风廓线雷达,且随着大气风速增加,两种雷达风向的探测精度都逐渐增大。当  $V \leq 3$  m/s 时,激光测风雷达风向的 AD 迅速突降到  $10^\circ$  以上,其探测精度虽增加但依旧受小风速影响较大,之后随大气风速增加,激光测风雷达风向的 AD 稳定在  $5^\circ$  左右,其风向探测精度很高且基本不受大气风速变化影响。而当  $V \leq 6$  m/s 时,风廓线雷达风向的 AD 才迅速突降至  $20^\circ$  以上,其探测精准度虽增加但仍受小风速影响,且所受影响比激光雷达大,之后随风速增加,其风向的 AD 稳定在  $15^\circ$  左右,才基本不受大气风速变化的影响。

## 6 结 论

研究了 2015 年 7~9 月国内新研制的全光纤相干激光测风雷达联合边界层风廓线雷达和双经纬仪探空气球在我国东北获取的探测实验资料,通过对比晴天、阴天、雾霾天和雨天 4 种天气类型下,激光测风雷达与探空气球和风廓线雷达风场探测的相关性,评估了激光测风雷达的测风精度和稳定性。结果表明,晴、阴和雾霾天类型下,激光测风雷达测风 CC 值在 0.941~0.984 之间,水平风速、风向 SD 值最大不超过 0.63 m/s 和  $14.89^\circ$ 。而风廓线雷达测风 CC 值最大仅有 0.931,且其水平风速、风向 SD 值超出激光测风雷达两倍。可见这些天气类型下,激光测风雷达测风精度远优于风廓线雷达,而两种雷达风场探测精度排序为晴、阴、雾霾天。雨天,激光测风雷达探测高度最大仅为风廓线雷达的一半,最小甚至为 0,其风场探测受降水衰减影响比风廓线雷达严重。晴、阴和雾霾天类型下,激光测风雷达垂直指向连续高度上的 CC 值稳定少变基本处于 0.9 以上;而风廓线雷达 CC 值却波动剧烈其值最小可达 0.128。可见这些天气类型下,垂直指向连续高度激光测风雷达测风稳定性远优于风廓线雷达,其自身稳定性排序为阴、晴、雾霾天,而风廓线雷达测风稳定性雾霾天最差,晴、阴天基本一致。杂波干扰较多、返回信号较弱、信噪比较小和风场不均匀性是影响两种雷达测风精度的主要原因,且随天气类型不同对两种雷达影响强度不同,依次表现为晴、阴、雾霾天,  $V \leq 2$  m/s 和  $V \geq 10$  m/s 时,对风廓线雷达风速探测精度影响变大,使其风速 AD 值最大可达激光测风雷达的 7 倍。激光测风雷达风速探测精度高且基本不受大气风速变化影响,两种雷达风向探测精度都随大气风速增加呈增大趋势,  $V \leq 6$  m/s 时,对风廓线雷达风向探测精度影响较大,使其风向最大平均偏差达到  $80^\circ$  以上。而  $V \leq 3$  m/s 时才对激光测风雷达风向探测精度影响变大,其风向最大 AD 值也不超过  $14.98^\circ$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Michael J K, Rod G F. Parameter trade studies for coherent lidar measurements of wind from space[C]. Proc SPIE, 2007, 6681: 668109.
- [2] Chirster J K, Fredrik A A O, Dietmar L, *et al.* All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55  $\mu\text{m}$  for range, speed, vibration, and wind measurement[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3716-3726.
- [3] Kameyama S, Anto T, Asaka K, *et al.* Compact all-fiber pulse coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [4] Hon K K, Chan P W. Application of LIDAR-derived eddy dissipation rate profiles in low-level wind shear and turbulence alerts at Hong Kong International Airport[J]. Meteorological Applications, 2014, 21(1): 74-85.

- [5] Shun C M, Chan P W. Applications of an infrared doppler lidar in detection of wind shear[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(5): 637-655.
- [6] Werner C H, Flamant P H. Wind infrared Doppler lidar instrument[J]. Optical Engineering, 2010, 40(1): 115-125.
- [7] Hu Hongwei, Hu Qiquan. Lidar for atmospheric wind field beam scanning and inversion of the wind[J]. Applied Laser, 2000, 20(5): 212-215.  
胡宏伟, 胡企铨. 激光雷达对大气风场的光束扫描及风场反演[J]. 应用激光, 2000, 20(5): 212-215.
- [8] Li Dongmei, Zheng Yongchao, Pan Jingyan, *et al.* Study of Doppler wind lidar coherent radar system[J]. Optical Technology, 2010, 36(6): 880-884.  
李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 880-884.
- [9] Zhu Xiaopeng, Liu Jiqiao, Diao Weifeng, *et al.* Study of coherent Doppler lidar[J]. Infrared, 2012, 33(2): 8-12.  
竹孝鹏, 刘继桥, 刁伟峰, 等. 相干多普勒测风激光雷达研究[J]. 红外, 2012, 33(2): 8-12.
- [10] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, *et al.* Coherent wind lidar wind measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1720-1724.  
潘静岩, 邬双阳, 刘 果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7):1720-1724.
- [11] Diao Weifeng, Liu Jiqiao, Zhu Xiaopeng, *et al.* Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least square retrieval method and validation experiment[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0914003.  
刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914003.
- [12] Shun C M, Lau S Y. Implementation of a Doppler light detection and ranging (LIDAR) system for the Hong Kong International Airport [C]. 10<sup>th</sup> conference on Aviation, Range & Aerospace Meteorology, 2002: 255-256.
- [13] Chan P W. Generation of an eddy dissipation rate map at the Hong Kong International Airport based on Doppler lidar data[J]. Atmos Oceanic Technol, 2011, 28(1): 37-49.
- [14] Frehlich R, Hannon S M, Henderson S W. Coherent Doppler lidar measurements of wind field statistics[J]. Boundary Layer Meteorology, 1998, 86(2): 233-256.
- [15] Chan P W, Lee Y F. Application of short-range lidar in wind shear alerting[J]. Journal of Atmospheric and oceanic Technology, 2012, 29(2): 207-220.