夏俊荣,王普才,闵敏. 2011. 新型多普勒测风激光雷达 Windcube 的风参数观测与验证 [J]. 气候与环境研究,16(6):733-741. Xia Junrong, Wang Pucai, Min Min. 2011. Observation and validation of wind parameters measured by Doppler wind lidar Windcube [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(6):733-741.

新型多普勒测风激光雷达 Windcube 的 风参数观测与验证

夏俊荣^{1,2} 王普才¹ 闵敏^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室,北京 100029

2 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要 2007年12月11~14日,中国科学院大气物理研究所与法国 Leosphere 公司在该研究所位于北京市 北三环和北四环之间的325m气象塔试验场内联合开展了一次测风激光雷达Windcube 的外场演示试验。Windcube 观测数据随后与325m气象塔上的风杯风速仪测得的风速资料进行了对比,结果是:由两种手段获得的所 有6层匹配高度(63m、80m、100m、120m、160m和200m)上的10min风速平均值一致性很好,相关系 数都达到或超过0.98。使用矢量法对6层高度上的风向资料进行平均,得到风向的10min平均值,两者的相 关系数均达到0.99。与国产测量低层大气风廓线的高精度多普勒激光雷达相比,Windcube 的风速测量精度稍 优,风向表现相当。验证结果表明,该型多普勒测风激光雷达是一款观测结果可靠、机动性能良好的低层大气 风廓线测量仪器。

关键词 Windcube 多普勒测风激光雷达 风速 风向
 文章编号 1006 - 9585 (2011) 06 - 0733 - 09 中图分类号 X16 文献标识码 A

Observation and Validation of Wind Parameters Measured by Doppler Wind Lidar Windcube

XIA Junrong^{1,2}, WANG Pucai¹, and MIN Min^{1,2}

Abstract A field performance of Doppler wind lidar Windcube (released by Leosphere Company) was conducted by Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS) and Leosphere Company (from France) at the 325-m meteorological tower site (a part of IAP, located between 3rd North Ring Road and 4th North Ring Road) from 11 December to 14 December 2007. The intercomparison of wind speed and wind direction obtained by Windcube and wind cup anemometers (fixed in the meteorological tower) shows that: 1) 10-min averaged wind speed is highly consistent between two types of wind data at six matched levels (63 m, 80 m, 100 m, 120 m, 160 m, and 200 m), the correlation coefficients all equal or exceed 0. 98. 2) 10-min averaged wind direction is calculated

¹ Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2010-02-09 收到, 2011-10-13 收到修定稿

资助项目 北京市科学委员会大气污染控制专项基金 Z005190042791,国家自然科学基金资助项目 40875084,国家重点基础研究发展 计划项目 2006CB403702

作者简介 夏俊荣,男,1980年出生,博士研究生,主要从事米散射激光雷达遥感研究。E-mail: xiajunr03@126.com

with the vector method, the correlation coefficients of averaged wind direction at the six levels are 0.99. 3) In comparison with domestic Doppler wind lidar, Windcube performs slightly better in wind speed measuring, and equally well in wind direction measuring. The intercomparison indicates that Windcube is a reliable and swift mobile system mea-suring wind profile at low levels.

Key words Windcube, Doppler wind lidar, wind speed, wind direction

1 引言

风速是重要的气象参数之一,风速监测在气 象天气预报、航空航天航海、气候变化研究、国 防安全以及风能开发等很多领域都有着重要的应 用价值。自 Yeh and Cummins (1964) 首次利用激 光束的多普勒效应测量流体速度以来,多普勒测 风激光雷达得到了长足的发展。多普勒测风激光 雷达利用光的多普勒效应,测量激光光束在大气 中返回的光波信号的多普勒频移来反演空间的风 速分布。与传统的测风手段相比,多普勒测风激 光雷达有着较高的时空分辨率以及能够提供风场 的三维信息等突出的优点,已经得到了越来越多 的应用。美国、欧洲诸国以及日本都在该领域投 入了大量的研究,研制出多种多普勒测风激光雷 达,用于探测对流层或平流层的风场信息。Huffaker (1970) 建立了一台 CO_2 相干激光雷达系统, 可探测距离 35 m 处的径向风速(Huffaker et al., 1970)。Post et al. (1981) 报导了一台可以探测 10 ~20 km 之间风速的激光雷达系统。NASA 与 NOAA 等多个组织于 1998 年联合推出一台 CO2 相干激光雷达系统,能够探测从地面到 30 km 高 度范围的风场 (Rothermel et al., 1998)。前面所 述的雷达系统都是地基的,由下而上观测,1999 年法国与德国合作研制成功机载多普勒测风激光 雷达系统, 自上而下观测, 获得整个对流层内三 维矢量风场,该工作也为后来的星载多普勒测风 激光雷达计划积累了经验(Werner et al., 2001)。 国内方面,我国第一台非相干多普勒测风激光雷 达在 2002 年研制成功,可探测 7 km 以下的风廓 线 (Liu et al., 2002)。2007年我国第一台车载多 普勒测风激光雷达研制成功,该激光雷达在2008 年奥运会青岛帆船赛的气象保障服务中发挥了重 要作用(刘智深等, 2006; 刘秉义, 2008; Liu et al., 2008)。孙东松等(2004)也研制出波长 1.06 μm 的多普勒测风激光雷达,可探测 10 km 以下三维风场分布 (钟志庆等, 2006; 王邦新等, 2007)。

2007 年 12 月,中国科学院大气物理研究所 (简称大气所)与法国 Leosphere 公司一起开展了 一次多普勒测风激光雷达 Windcube 的外场演示试 验,并利用该研究所 325 m 气象塔上的分层风杯 风速仪观测数据对激光雷达测得的风廓线数据进 行了验证。

2 试验仪器及试验场地

Windcube 是由法国 Leosphere 公司与法国 Aerospace Research Agency (ONERA) 共同研制 推出的新型多普勒测风激光雷达系统(外观见图 1),通过测量激光光束打到空气中颗粒物(尘、 云中的水滴、雾、气溶胶、盐晶以及生物质燃烧 产生的气溶胶等)再反射回来的光波的多普勒频 移来测量 40~200 m 高度风速廓线(属于相干激 光雷达系统),垂直分辨率为20m(可调),测量 范围还可扩展到400m高度,设计测量精度达0.2 m•s⁻¹(详细参数见表 1), 2 s 即可获取 1 条风 廓线数据,而且能够实时显示。整套系统仅重 45 kg,并结实耐用。该系统即插即用、高度自动化、 所需维护工作量很小,而且与其它很多激光雷达 对环境温度的要求比较苛刻不同,其对环境温度 的要求很低,应用起来非常方便快捷。此外该激 光雷达系统发射的激光脉冲符合人眼安全标准。

实际上由多普勒激光雷达直接测到的是径向 风。雷达以 θ_{las} 的角度(θ_{las} 为15°或30°)向上做圆 锥扫描(见图2),获取圆锥面上的径向风速 V_r , 提取东南西北4个方位角上的径向风速 $V_{r,270}$ 、 $V_{r,0}$ 、 $V_{r,90}$ 、 $V_{r,180}$,再结合扫描圆锥角 θ_{las} ,利用 三角函数关系即可得到水平风速 V_h (包括u、v分量)、风向 α 以及垂直风速w,具体如下

$$u=\frac{V_{\rm r,90}+V_{\rm r,270}}{2{\rm sin}\theta_{\rm las}},$$



图 1 (a) 大气所 325 m 气象塔; (b) 多普勒测风激光雷达 Windcube 与大气所气象塔相对位置; (c) Windcube 外观特写 Fig. 1 (a) 325-m meteorological tower of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS); (b) location of Windcube and 325-m meteorological tower; (c) close shot of Windcube

$$v = rac{V_{\mathrm{r},0} + V_{\mathrm{r},180}}{2\mathrm{sin} heta_{\mathrm{las}}}$$

表 1 Windcube 主要技术参数				
Table 1 Main technical parameters of Windcube				
激光波长	1.54 μm			
脉冲频率	10 kHz			
脉冲能量	10 µJ			
测量范围	40~200 m			
数据输出频率	0.5 Hz			
空间分辨率	20 m			
扫描圆锥角	15°或 30°			
测风精度	$0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$			
测风范围	$0\sim 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$			
环境温度要求	−10~40 °C			
尺寸	800 mm \times 550 mm \times 550 mm			
重量	45 kg			

$$w = rac{V_{
m r,0} + V_{
m r,90} + V_{
m r,180} + V_{
m r,270}}{4 \cos heta_{
m las}},
onumber \ V_{
m h} = \sqrt{u^2 + v^2},
onumber \ lpha = \arctan(v/u).$$

2007 年 12 月 11~14 日在大气所气象观测铁塔园 区,由 Leosphere 公司与大气所联合进行了一次 风速测量对比试验。参与对比试验的仪器是多普 勒测风激光雷达 Windcube 与大气所的 325 m 气象



图 2 Windcube 测风示意图 Fig. 2 Sketch map of wind measuring by Windcube

塔上的 15 层风杯风速仪。气象塔 15 层风杯风速 仪所在的高度由低到高分别为 8 m、16 m、32 m、 47 m、63 m、80 m、100 m、120 m、140 m、160 m、180 m、200 m、240 m、280 m 和 320 m。为 便于比较验证,观测前对 Windcube 的参数进行了 相应的设置,设置输出风速数据高度由低到高分 别为 47 m、63 m、80 m、100 m、120 m、140 m、 160 m、180 m 以及 200 m,共 9 层。Windcube 放 置在气象塔以东约5m的空地上(见图1),激光 束以设定的扫描圆锥角向上扫描。气象塔在15个 分层各有2套同样的风杯风速仪,分置在气象塔 的东西两侧。试验期间的主导风向是西北风,所 以本文选取气象塔西侧的风杯数据进行分析。

3 结果分析

试验从 12 月 11 日 12 时(北京时间,下同) 开始,一直持续到 14 日 14 时。气象塔与 Windcube 相匹配的高度有 9 层(但气象塔上有几层的 风杯没有观测资料,实际匹配高度层只有 6 个), 选择 63 m 与 160 m 高度上的风速资料为代表来 分析。

由 Windcube 系统获取的风速资料的时间分辨 率是 2 s,而风杯风速仪的风速资料的时间分辨率 为 20 s,为了比较方便,将两个数据系列都进行 了 10 min 平均处理。风速平均采用的是简单的算 术平均法,风向平均采用的是矢量平均法(具体 方法见后文)。从图 3 可见,在 63 m 高度上由两 种手段测得的风速变化曲线的数值和趋势都比较 一致,相关系数 R 达 0.98,并通过了显著性水平 为 0.01 的双侧检验(two-tailed test)。160 m 高 度上的对比结果(如图 4 所示)显示,两条风速 曲线趋势高度一致,相关系数更高(达 0.99,也 通过了显著性水平为 0.01 的双侧检验),这应该



图 3 (a) Windcube 与风杯风速仪在 63 m 高度上测得的风速对比 及(b) 两者的相关

Fig. 3 (a) Comparison of wind speed measured by Doppler wind lidar Windcube and cup anemometers at 63-m level and (b) their correlation



图 4 同图 3, 但为 160 m Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 160-m level

是由于 160 m 高度上风速受场地周边高层建筑物 影响较小的缘故。由图 3 和图 4 还能看出,在风 速>1.0 m • s⁻¹时,63 m 及 160 m 高度上 Windcube 的表现很好,但在低风速 (<1.0 m • s⁻¹) 条件下,63 m 高度上 Windcube 的测值有整体稍 偏大的现象,160 m 高度上表现良好。考察所有6 层匹配高度(其余4层的图略)发现,低风速条 件下低层(100 m 以下)Windcube 测值稍偏大, 高层(100 m 以上)吻合较好,风速>1.0 m • s⁻¹ 时所有高度都比较一致。

6 个高度上的数据都高度集中在 1:1 线附近, 相关系数都在 0.98 以上,且都通过了显著性水平 为 0.01 的双侧检验(见表 2)。两种手段测得的风 速平均偏移量很小,最大也仅有 0.14 m·s⁻¹ (200 m高度),120 m以下均方根偏差在 0.30 m·s⁻¹ 左右,120 m以上升高至接近 0.60 m·s⁻¹。与刘 秉义 (2008)的结果相比,Windcube 的风速测量 精度还有一定的提高(其风速平均偏移量以及均 方根误差分别为 0.1 m·s⁻¹、1 m·s⁻¹左右)。

737

在处理风向平均时需要特别注意风向过北 (即风向变化跨0°)时导致结果失真的问题。常用 的平均风向处理方法有算术平均法、标量平均法、 矢量法以及单位矢量法4种。算术平均法是最简 单的方法,但不能解决风向变化跨0°的问题。标 量平均法是美国环保局推荐使用的方法,该方法 能够较好解决上述问题,但在风向有大于360°的

表 2	Vindcube 与风杯风速仪的风速结果对比
Table	Comparison of wind speed measured by Doppler wind lidar Windcube and cup anemometers

高度/m	拟合关系式	相关系数 R	样本数 n	平均偏移量 $/m \cdot s^{-1}$	均方根偏差 $/m \cdot s^{-1}$	显著性水平
63	y = 1.0082x - 0.0869	0.98	362	-0.06	0.31	0.01
80	y=1.0172x+0.0184	0.99	362	0.08	0.30	0.01
100	y = 1.0256x - 0.0164	0.99	362	0.09	0.30	0.01
120	y=1.0614x-0.156	0.99	362	0.13	0.33	0.01
160	y = 1.0269x - 0.0762	0.99	362	0.05	0.58	0.01
200	y=0.9903x+0.2011	0.98	303	0.14	0.56	0.01





转向量时,可能会出现较大的误差。矢量法是计 算平均风速最准确的算法,计算时需要输入风速 以及风向值,使用矢量法不会有风速跨0°以及风 向转向量大于 360°时前面提到的问题。单位矢量 法是矢量法的简化,不需要风速值,只需风向值即可。本文选用矢量法对风速资料进行平均处理 (邱传涛和李丁华,1997)。

这里仍选取 63 m 与 160 m 高度上的风向数据



图 6 同图 4, 但为风向 Fig. 6 Same as Fig. 4, but for wind direction

作为代表,计算得到 10 min 的平均风向,计算结 果见图 5 及图 6。为了考察两种手段测量风向结果 的相关性,考虑到风向具有 360°的周期,因此对 位于 0°或 360°附近的数据进行加减 360°的处理, 使类似于 1°和 358°这样的结果变为 1°和-2°或者 361°和 358°,两者回归实际差别 3°而不是 357°。

从图 5a 和 5b 以及图 6a 和 6b 可以看出 63 m 与 160 m 高度平均风向的吻合程度也较高,散点 图显示两者的相关系数都在 0.99 以上,而且数据 都集中在 1:1 线附近。表 3 给出了所有匹配高度 上的平均风向的比较:所有高度上的相关系数都 为 0.99,两组风向数据的平均偏移量基本都在 10°以下,均方根偏差都在 20°以内,且均方根偏 差随高度增加有降低的趋势,这可能是由于高层 风向受周边高层建筑物影响较小的原因。风向的 表现与刘秉义(2008)的结果相当(两项指标分 别为16°、7.1°)。

试验期间主导风向是西北风,但铁塔园区的 地形条件非常复杂,低层受地形的影响较大。由 图 5b 能够看到 63 m 处虽然西北风占主导地位, 但有时也会出现东风(90°左右),图 6b 显示 160 m 处东风的出现频次明显较 63 m 低。当东风出现 时,由于受铁塔塔体阻挡的原因西侧的风杯风速 测值会低于东侧的风杯测值,而我们在处理数据 时一律采用的是西侧的风杯数据,所以会导致低 风速条件下低层(<100 m)Windcube 的风速测

表 3	Windcube 与风杯风速仪的风向结果对比
Table 3	Comparison of wind direction measured by Doppler wind lidar Windcube and cup anemometers

高度/m	拟合关系式	相关系数 R	样本数 n	平均偏移量	均方根偏差	显著性水平
63	y=0.9916x+0.1555	0.99	450	-1°	19°	0.01
80	y=0.9797x+2.0819	0.99	450	-2°	15°	0.01
100	y=1.012x+8.2057	0.99	449	-11°	11°	0.01
120	y=0.9947x+8.2168	0.99	450	-7°	11°	0.01
160	y=0.9771x+3.8213	0.99	450	-1°	10°	0.01
200	y=1.0048x+0.344	0.99	394	1°	10°	0.01

值整体稍偏大的现象,高层(>100 m)影响不大。

4 总结与讨论

2007年12月11~14日,中国科学院大气物 理研究所与法国 Leosphere 公司联合在前者所属 的铁塔园区进行了一次成功的风速测量对比试验。 参与对比试验的仪器是由 Leosphere 公司研制的 先进多普勒测风激光雷达 Windcube 以及大气所的 325 m 气象塔上的风杯风速仪。两者测得的 10 min 风速平均值比较一致,相关系数都达到或超 过 0.98,10 min 风向的平均值也很一致,相关系 数都达 0.99。考虑到试验场地周围高楼林立,风 速变化非常复杂,在这种不利的条件下 Windcube 仍有这样的表现实属难得,这充分展示了这款测 风激光雷达的可靠性以及实用价值。此外 Windcube 还可以测量空气垂直速度,但由于 325 m 气 象塔的风杯风速仪没有相应的数据,所以在这里 没有进行相应的对比验证。

此次对比试验显示了 Windcube 激光雷达测量 低层大气风场参数的优良性能。Windcube 的两款 升级产品现已研制出,升级后的探测高度分别达 到 2 km 与 5 km。由于具有测量可靠、机动灵活、 安装与维护简单、高度自动化以及对人眼安全等 突出优点,该测风激光雷达将在天气观测、航空 航天航海、气候变化研究、国防安全以及风能开 发等多个领域有巨大的应用潜力。

致谢 感谢法国 Leosphere 公司 Alexandre Sauvage 博士 提供 Windcube 测风激光雷达。感谢中国科学院大气物理 研究所李爱国高级工程师提供气象塔风速资料以及为激光 雷达风参数测量提供方便。

参考文献 (References)

- Huffaker R. 1970. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurements [J]. Appl. Opt., 9: 1026-1039.
- Huffaker R, Jelalian A, Thomson J, et al. 1970. Laser Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. Proc. of the IEEE, 58: 322 326.
- 刘秉义. 2008. 车载测风激光雷达性能优化和风场反演 [D]. 中国 海洋大学博士学位论文, 110pp. Liu Bingyi. 2008. Performance optimization and wind field retrieval for mobile wind lidar [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Ocean University of China, 110pp.
- Liu Z, Wu D, Liu J, et al. 2002. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with iodine filter [J]. Appl. Opt., 41 (33): 7079-7086.
- 刘智深,刘金涛,张凯临,等. 2006. 车载非相干测风激光雷达 [P]. 中国专利,专利号 200420037835, 2006 - 2 - 22. Liu Zhishen, Liu Jintao, Zhang Kailin, et al. Incoherent mobile wind lidar [P]. 200420037835, 2006 - 2 - 22.
- Liu Z, Liu B, Wu S, et al. 2008. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. Optics Letters, 33 (13): 1485-1487.
- Post M, Richter R, Hardesty R, et al. 1981. NOAA's pulsed, coherent IR Doppler lidar characteristic sand data [C]. Proc. of the SPIE, 300: 60-65.
- 邱传涛,李丁华. 1997. 平均风向的计算方法及其比较 [J]. 高原 气象,16 (1):94-98. Qiu Chuantao, Li Dinghua. 1997. The calculation algorithms for average wind direction and their comparison [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (1):94-98.
- Rothermel J, Oliver L, Banta R, et al. 1998. Remote sensing of multi-level wind fields with high-energy airborne scanning coherent Doppler lidar [J]. Optics Express, 2 (2): 40-50.
- 孙东松,钟志庆,迟如利,等. 2004. 1.06 μm 直接接收米散射测 风激光雷达的性能分析 [J]. 激光与红外,34 (6):412-415. Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, Chi Ruli, et al. 2004. Performance and analysis of 1.06 μm direct detection wind lidar [J]. Laser and Infrared (in Chinese), 34 (6):412-415.

6期夏俊荣等:新型多普勒测风激光雷达 Windcube 的风参数观测与验证No.6XIA Junrong, et al. Observation and Validation of Wind Parameters Measured by Doppler Wind ...741

- 王邦新,孙东松,钟志庆,等. 2007. 多普勒测风激光雷达数据处 理方法分析 [J]. 红外与激光工程,36 (3):373-376. Wang Bangxin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. 2007. Analysis of data processing method for Doppler wind lidar [J]. Infrared and Laser Engineering (in Chinese),36 (3):373-376.
- Werner C, Flamant P, Reitebuch O, et al. 2001. Wind infrared Doppler lidar instrument [J]. Opt. Eng., 40 (1): 115-125.

Yeh Y, Cummins H. 1964. Localized fluid flow measurements with

a He-Ne laser spectrometer [J]. Appl. Phys. Lett., 4: 176 - 178.

钟志庆,孙东松,王邦新,等. 2006. 基于 Fabry - Perot 标准具的 多普勒测风激光雷达 [J]. 红外与激光工程,35(6):687-690. Zhong Zhiqing, Sun Dongsong, Wang Bangxin, et al. 2006. Doppler wind lidar based on Fabry - Perot etalon [J]. In-frared and Laser Engineering (in Chinese), 35(6):687-690.