

相干激光测风雷达风场测量技术

潘静岩, 鄢双阳, 刘 果, 董光焰, 张鹏飞, 陈 静

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘 要: 研发了一套全光纤化相干多普勒激光测风雷达设备, 并已作为试验样机应用于 XXX 工程中。该激光测风雷达工作于人眼安全波段, 系统结构设计紧凑, 性能可靠, 可实现远距离风速测量。首先对相干激光测风雷达风速测量精度进行了理论分析, 然后采用放置于 103 m 高塔上的超声风向风速仪和探空气球作为雷达指标的测试工具, 对激光雷达进行外场试验, 验证设备的性能。经过试验结果分析, 风速数据相关性达 95% 以上, 标准差优于 0.8 m/s, 风向数据相关性达 98.6% 以上, 标准差优于 5°。与国外相关激光测风雷达测量精度相当, 表明激光测风雷达具有优良的性能, 将成为广泛应用的风场测量工具之一。

关键词: 相干激光测风雷达; 相干探测; 指标测试

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1720-05

Wind measurement techniques of coherent wind lidar

Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, Dong Guangyan, Zhang Pengfei, Chen Jing

(27th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: An all-fiber coherent Doppler lidar was developed, and had been applied to XXX project as a test prototype. Concept of this lidar, which could detect long-distance wind speed, was using eye-safety wavelength, compact-designed and reliable performance. By wind retrieval algorithm based on VAD, the velocity precision of coherent wind lidar was analyzed firstly. To evaluate its performances, this lidar was compared with an ultrasonic wind direction located at the top of the tower (103 m height) and a air exploration balloon. The lidar and ultrasonic wind direction measured wind field distribution simultaneously. Measured data were compared and analyzed, which include velocity data and wind direction data. Data correlation of measured velocity was about 95%, and standard deviation was about 0.8 m/s. Data correlation of measured wind direction was about 98.6%, and standard deviation was about 5°. The results can correspond to the abroad level, which means the lidar has excellent performance and will be one of the widely-used sensors for wind detection instruments in the near future.

Key words: coherent wind lidar; coherent detection; index test

收稿日期: 2012-11-06; 修订日期: 2012-12-08

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 潘静岩(1978-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光相干探测技术方面的研究。Email: jingyan2003@126.com

0 引言

低空大气风场实时高精度测量,在航空安全保障和军事弹道校正等方面具有重要应用。激光多普勒测风雷达以其高角度分辨率、高速度分辨率、高距离分辨率、强抗干扰能力、出色的全天候工作能力并能提供晴空条件下三维风场信息能力,引起了世界多个国家关注和重视^[1]。激光多普勒测风雷达属于主动测量系统,它是利用大气中随风飘动的微小颗粒(气溶胶或者大气分子)对激光的多普勒频移效应,来测量大气风场结构分布的一种现代光电探测技术。其主要特点是采用光学方法对测量空域的风场进行非接触式实时三维测量。在对风场三维测量时,激光雷达扫描器在伺服控制下,对大气中的气溶胶进行扫描,然后通过气溶胶运动产生的多普勒频移确定激光视线方向上的径向风速的序列,利用这些径向风速的序列即可以反演观测视场的大气风场分布^[2-3]。激光多普勒测风雷达分为直接探测式和相干探测式。相干式激光测风雷达因能够以较高的距离分辨率和速度分辨率实时获取风速,在大气风场测量方面具有重要应用。

国外相干多普勒激光探测技术已经成熟,激光测风雷达已经开始装备部队,形成战斗力,如美军在伊拉克战争中,采用战场前沿布设的激光多普勒测风系统测量气象参数,在中程火箭弹发射时进行实时弹道修正,明显提高了火箭弹的命中精度^[4]。同时美国还开发了商业化激光测风雷达产品,分别用于机场导航和天气预报。我国相干探测激光雷达研制工作迄今已历经 40 多年的历史,主要在一些大学和研究机构进行理论探讨和原理性研究,其研究成果还局限于实验室内。相应的单元技术、材料、器件虽已有一定基础,但在系统总体设计与集成、加工调试、试验与测试等方面,由于缺乏有明确应用背景的项目支持,与国外差距较大,目前还未见有完备样机的相关报道。

1961 年, Lhermitte 和 SriVastaVa 等人在局部假设条件下,利用速度方位显示(VAD)方法反演出了大气风场的平均风向、风速以及多个水平散度和垂直速度值,然后应用最小二乘法得到其最佳估计值^[5]。随后 VAD 反演技术在大气风场测量方面得到了应用,成为了目前最广泛应用的风场反演方式之一。文

中在研制的相干激光多普勒测风雷达工程试验样机的基础上,以 VAD 风场反演方式,对相干激光测风雷达风速测量精度进行了理论分析,推导出了四波束相干激光测风雷达的水平风速精度计算公式,并采用标准仪器进行外场试验标定的方式,验证激光雷达设备的性能指标和技术状态。

1 理论分析

大气风场反演要求至少具有三个相互独立的径向速度测量。对于某一空间位置内的特定风场测量来说,最精确的测量方法就是从三个或更多的不同方向测量该点的风速^[6]。近距离风场测量时,可以从一台激光雷达的不同光学天线实现不同方向的测量目的;但远距离风场测试时,从同一台激光雷达实现不同方向的测量方式具有很大的局限性,无法实现有效的风场监测。可采用的方式是多台激光雷达组合的方法。如采用三台激光雷达进行组合。三台雷达分别处于不同的位置,瞄准同一目标区域同时进行测量,从而实现不同方向径向风速测量的目的。但多台激光雷达组合具体实施很不方便,扫描同步问题也难以控制,且加大了系统的设计成本。实际情况下极少采用。目前基于激光雷达的大气风场测量主要利用单一的激光雷达系统,采用 VAD 圆锥扫描技术,采集扫描过程中的径向风速、角度、距离等数据,通过一些假定条件反演出三维风场结构^[7]。

VAD 扫描反演方法是目前风速矢量测量最广泛使用的方式之一。VAD 扫描方式中,在固定仰角的情况下,通过不同的方位扫描,可以获取三个或更多的相互独立的视向风速。然后通过估算每个方位不同距离上的径向风速,实现不同距离上风场的一次性测量。

为了坐标系建立的对称性及数据处理的方便性和实时性要求,激光雷达风场反演时采用四波束 VAD 反演方式,即同一测量距离上以相隔 90°的四个测量点的径向风速(LOS)测量为基础,以地物坐标系作为测量坐标系进行风场测量及反演。其中,激光雷达反演坐标系的 x 轴正方向指向地理东方, y 轴正方向指向北方, z 轴正向指向天顶。坐标系建立如图 1 所示。其中, ϕ 为构成的圆锥半角, θ 为扫描方位角。A、B、C、D 四点处于同一距离及高度层上。 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。

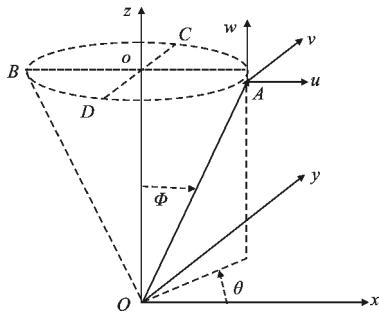


图 1 VAD 扫描反演关系图

Fig.1 VAD 3D scan geometry for a ground-based laser vector wind profiler

在进行风场反演时进行以下假设条件:(1) 风场分布均匀,且随海拔层状分布;(2) 竖直方向上风速为零或非常小。由图 1 所建立的坐标系相对关系可知:

$$\begin{cases} v_A = v_x \sin \phi - v_z \cos \phi \\ v_B = v_y \sin \phi - v_z \cos \phi \\ v_C = -v_x \sin \phi - v_z \cos \phi \\ v_D = -v_y \sin \phi - v_z \cos \phi \end{cases} \quad (1)$$

从而有:

$$\begin{cases} v_x = \frac{(v_A - v_C)}{2 \sin \phi} \\ v_y = \frac{(v_B - v_D)}{2 \sin \phi} \\ v_z = -\frac{(v_A + v_B + v_C + v_D)}{4 \cos \phi} \end{cases} \quad (2)$$

由于 v_A 、 v_B 、 v_C 、 v_D 的径向风速精度相同,均为 σ ,因此,xyz 坐标系下沿坐标轴的风速测量精度有:

$$[\sigma[x], \sigma[y], \sigma[z]] = [\sigma[u], \sigma[v], \sigma[w]] =$$

$$[1/\sqrt{2} \sin(\phi), 1/\sqrt{2} \sin(\phi), 1/\sqrt{2} \sin(\phi)]\sigma \quad (3)$$

相干激光测风雷达径向风速测量精度依据目标类型不同而不同。对于气溶胶等分布式目标来说,根据 Cramer-Rao 边界条件,1.5 μm 波段相干激光测风雷达,以 15° 圆锥半角 VAD 方式扫描,200 ns 高斯脉冲时,其径向风速测量精度优于 20 cm/s (CNR=0 dB 时)。因此合成水平风速的理论精度为:

$$\sigma_v = \frac{\sigma}{\sqrt{2} \sin \phi} = \frac{0.20}{\sqrt{2} \sin 15} = 0.55 \text{ m/s} \quad (4)$$

2 相干激光测风雷达简介

全光纤化相干激光测风雷达由两部分组成:激光雷达主机和显控计算机。系统采用模块化设计,使得系统结构十分紧凑、稳定性好。雷达主机箱尺寸

500 mm×500 mm×350 mm。在系统设计上为了提高抗干扰能力,结构上采用分腔设计方案,将弱强电进行物理分离,弱电和强电分别处于不同腔内并采取屏蔽措施。为了提高设备环境适应性,系统设计中加入了温度控制措施,能够有效的控制系统的温度工作范围。

设计中,相干激光测风雷达激光发射机由 1.5 μm 波段人眼安全的单频激光器、高消光比 AOM 调制器及脉冲激光放大器组成。在光路设计上采用全光纤化的设计方案,实现光信号的传输和接收。通过转台旋转,实现不同方向上 LOS 风速的测量。信息处理系统经过数据采集、滤波、解算,完成风场测量。为了提高系统的测量精度,消除激光稳定性带来的影响,系统还设置了校正单元,能够实时自动校正径向风速测量误差。

3 实验测量与数据分析

为了评价设备的性能,需要对设备的性能指标进行测量,尤其是最关注的风速和风向精度指标。试验测量时,将激光雷达与高精度超声风速仪和气象局探空气球进行数据比对。由于超声风速仪的风速测量精度可达 0.01 m/s,因此,能够很好的满足测量的要求,达到验证激光雷达性能的目的。

3.1 外场测试方案

3.1.1 与超声风速仪同时进行风场测量

在与超声风速仪进行数据比对时,激光测风雷达安装于地面,测量中心方向垂直于地面朝向天顶,即测量以竖直方向为中心的一定区域的风场分布。超声风速仪放置于高塔上,高塔总高度 110 m。激光雷达安装点与高塔之间的水平距离 50 m。经调校,激光雷达坐标轴 X 轴正方向指向正东方,Y 轴正方向指向正北方,并进行水平调节。为了较好的进行数据比对,超声风速仪设置了三台,三台的高度分别为 95 m、103 m、110 m,且分别标记为 1#、2#、3#。风速测量时以 2# 为比较对象,1#、3# 用于观测风场层状分布状态。测量时的位置关系如图 2 所示。

试验测量时,激光雷达以 2# 风速仪所在的高度层为比较测量区域目标,通过测量该距离段的风速数据与 2# 风速仪测量数据进行比较,检验设备的测试性能。由于风速仪与激光雷达时间分辨率不同(超声风速仪刷新率 30 Hz 以上),因此,测量时以一段时间内的风速数据平均值作为比较对象。

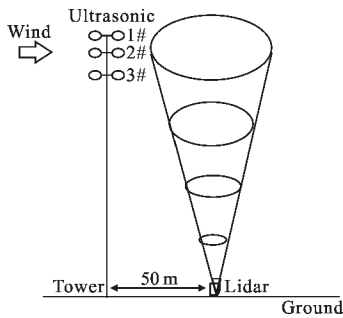


图 2 风速测量位置关系图

Fig.2 Spatial position relationships of wind measurement

3.1.2 与探空气球同时进行风速测量

探空气球进行风场测量时,气球从地面开始释放。释放后的气球在空气浮力的作用下不断抬升,从而实现从低层到高层的风场测量。而激光雷达则不同,激光雷达发射激光,可一次实现从低层到高层的风速测量。在与探空气球进行试验对比时,由于气球随风飘动,不同时间点,气球的空位位置不同,因此,需要根据气球所在的空间位置,对不同高度层风场数据进行比对。与探空气球进行试验比对的测量关系如图 3 所示。

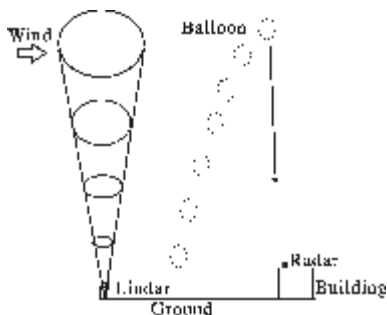


图 3 风速测量关系图

Fig.3 Diagram of spatial position relationships

3.2 外场试验测量结果及分析

2012 年 4 月 11 日到 17 日,激光测风雷达与超声风速仪进行了多时间段的测量,比对了不同风速情况下的设备测量情况。为了消除两测量设备时间分辨率的不同步问题,试验进行了一段时间的数据平均(平均时间 10 min)。试验时水平风速测量的数据比对情况如图 4 所示。

图中,横坐标为超声风速仪测量数据,纵坐标为激光雷达测量数据。细实线为数据拟合后的结果。拟合后的数据斜率为 1.007, R^2 为 0.907。从而可知,两种设备/仪器测量结果的数据相关性达 95.2%。通过对测量数据的误差分析可知,激光雷达风速精度标

准差为 0.78 m/s。

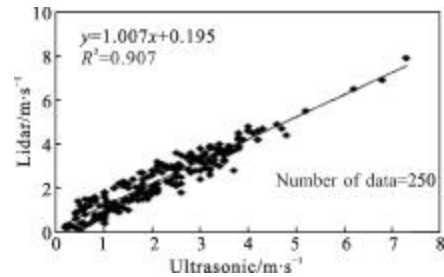


图 4 风速测量数据

Fig.4 Velocity comparison of lidar and an ultrasonic wind direction

除了对水平风速指标进行测量反演外,激光雷达还利用测量的风速结果进行了风向的反演。风向的测试结果比对情况如图 5 所示。

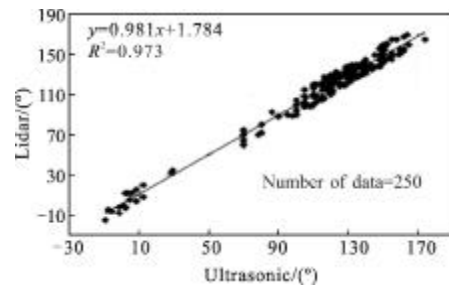


图 5 风向测量数据

Fig.5 Direction comparison of lidar with an ultrasonic wind direction

图中,横坐标为超声风速仪风向测量数据,纵坐标为激光雷达风向测量数据。细实线为数据拟合后的结果。拟合后的数据斜率为 0.981, R^2 为 0.973。从而可知,两种设备/仪器风向测量结果的数据相关性达 98.6%。通过风向测量结果的误差分析可知,激光雷达风向精度标准差为 4.2°。

通过激光雷达与标准超声风速仪的风速、风向测量数据的比较可知:

(1) 激光雷达风速测量精度标准差 0.78 m/s,与理论分析的风速测量精度 0.55 m/s 的指标相当,表明激光雷达风速精度指标与理论计算吻合。

(2) 目前国外成熟且正在使用的相干激光测风雷达,如美国的 WindTracer、VALIDE 等相干激光测风雷达,其风速测量精度标准差约 1 m/s^[8](已安装与洛杉矶国际机场及香港国际机场),研制的激光测风雷达设备 0.78 m/s 的风速测量精度指标与国外技术指标相当,表明该激光雷达达到了一定的技术先进性。

(3) 目前国内研制的直接探测的激光测风雷达,其风

速测量精度约 $3\text{m/s}^{\text{测}}$ 。研制的相干激光测风雷达 0.78 m/s 风速测量精度指标与其相比,指标更高,性能更优越。

激光测风雷达除采用超声风速仪进行指标测试外,还与气象局探空气球进行了风速比对试验。试验在2012年6月5日进行。在气象局进行探空气球释放的同时激光雷达进行测量,将激光雷达在各高度层的测量数据与探空气球测量数据进行比对,验证设备的性能。试验测量时的场景如图6所示。



图6 与探空气球风速测量试验场景

Fig.6 Test scenario of velocity comparison

试验测量时,由于探空气球从近地面开始测量,而地面建筑物(尤其高楼)对气球的测量影响较大,因此,试验测量时以气球距离地面一定高度为开始比较点。此外,由于气球会随风飘动,在较高层风场测量时,探空气球距离释放点的水平位置已相距较远(几公里以外),二者的测量时间性已相差较大,因此,数据量仅选取一定的测量高度区间进行数据比对。该试验选择的高度区间为 $240\sim 630\text{ m}$ 。激光雷达与探空气球的风速数据比对情况如图7所示。

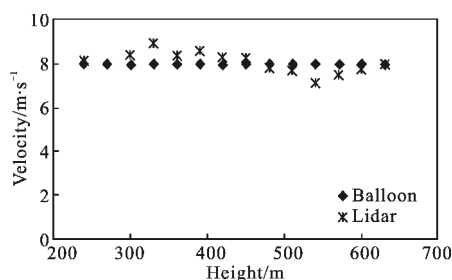


图7 与探空气球风速测量数据比较

Fig.7 Velocity comparison of lidar and air exploration balloon

从数据比对结果可以看出,激光雷达设备与探空气球的风速测量数据吻合的较好,风速测量标准差在 0.5 m/s 。但由于探空气球的风速测量精度相对较粗(精度为 1 m/s),因此,与探空气球的风速数据比

较仅仅作为性能指标的参考。

4 结论

研制了一套全光纤相干激光测风雷达设备,并已应用于XXX工程中进行实际环境测量,测量结果良好。激光测风雷达研制完成后,进行了多天的性能优化和指标标定,并进行了15天的自然野外试验,验证了设备的性能。

在相干激光风场测量试验中,激光测风雷达与超声风速仪进行了外场自然大气风速风向测量,风速测量标准差优于 0.8 m/s ,风向精度测量标准差优于 5° ;与气象局探空气球进行了风速测量比对,风速测量标准差在 0.5 m/s 。由于激光测风雷达的指标标定耗费大量的人力、物力、财力,标定场所、设备的实施均耗费较长的周期,因此,目前的比较数据量还有限。下一步工作重点将激光雷达设备与国外同类激光测风雷达进行多时间段风速测量数据比对,完善系统标定试验方案。

参考文献:

- [1] Zhang Fangpei, Xue Haizhong, Hu Yongzhao, et al. Coherent doppler wind lidar[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 1045-1046. (in Chinese)
- [2] Asaka K, Yanagisawa T, Hirano Y. $1.5\ \mu\text{m}$ eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement [C]//SPIE, 2001, 4153: 321-328.
- [3] Lai Dong, Chen Yong, Zhou Dingfu, et al. Beam scanning of lidar and the simulation of the improved VAD inversion methods [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 584-585. (in Chinese)
- [4] Wang Jinxue, Dehring Michael T, Hovis Floyd E. Doppler wind lidar technology development and demonstration [C]// Proceedings of the AIAA, 2005, 6772.
- [5] Wang Jun. A retrieval study of two-dimensional wind field from single-doppler radar data [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004, 5: 3-8. (in Chinese)
- [6] Takashi Fujii, Tetsuo Fukuchi. Laser Remote Sensing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 550-575.
- [7] Jiang Lihui, Zhuang Zibo, Li Yong. Accuracy analysis for low attitude wind retrieval [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35: 252-254. (in Chinese)
- [8] Petter Lindelöw. Fiber based coherent lidars for remote wind sensing [D]. Denmark: Electro Science Technical University of Denmark, 2007: 23-29.
- [9] Sun Dongsong, Yang Zhao, Xue Guogang. Performance analysis of direct detection Doppler lidar for wind measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 116-118. (in Chinese)