

直接探测多普勒激光雷达的光束扫描和风场测量

王邦新, 沈法华, 孙东松, 钟志庆, 夏海云, 刘东, 周小林, 董晶晶, 李颖颖

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:介绍了直接探测多普勒激光雷达的系统结构和主要参数,给出了该系统进行大气风场测量的光束扫描方法,详细推导了三维风场的计算公式,给出了其风速和风向误差的求解方法。在径向风速均为 1 m/s 和扫描角度误差均为 1°的情况下,水平风速和风向的误差分别为 1.155 m/s 和 0.707°。给出了合肥地区对流层风场的测量结果,结果表明,采用该方法测量大气风场是切实可行的。

关键词:激光雷达; VAD 技术; 风场; 误差

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)01-0069-04

Beam scanning and wind field measurement of direct-detection Doppler lidar

WANG Bang-xin, SHEN Fa-hua, SUN Dong-song, ZHONG Zhi-qing,

XIA Hai-yun, LIU Dong, ZHOU Xiao-lin, DONG Jing-jing, LI Ying-ying

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract:The structure and primary parameters of direct-detection Doppler lidar are described. The beam scanning method of atmospheric wind measurement is given, and computing formula of the three dimension wind field is derived. The solution method of errors of wind velocity and wind direction is presented. Errors of LOS velocity and scanning angle of these directions are 1 m/s and 1°; the errors of horizontal wind velocity and wind direction are 1.155 m/s and 0.707°, respectively. Results of troposphere wind field measurement are given. It indicates the method of wind field measurement is feasible.

Key words:Lidar; VAD technique; Wind field; Error

0 引言

大气风场的测量对大气动力学和全球大气运动,以及对能量、水、气溶胶、化学和其他空气物质圈的深入了解具有重要的意义。为了提高全球气候变化分析能力和数值天气预报能力,迫切需要可靠的、精确的风场分布数据。为满足各个方面的要求,陆续发展了各种各样的测量手段,满足风场测量要求的技术只有多普勒激光雷达。多普勒激光雷达从工作原理上可分为相干和非相干(直接接收)两种。20世纪60年代末

开始的激光多普勒测量采用相干工作方式,并在80年代得到了迅速发展。但是相干激光雷达系统以气溶胶作为多普勒探测介质,且结构复杂、造价较高,不能实现全球范围内的风场观测,因此,商业发展前景受到了限制。相反,直接探测激光雷达系统结构简单、技术较成熟、造价相对低、商业开发前景好,同时可以进行气溶胶和分子散射的多普勒测量^[1],实现全球范围的风场观测。该激光雷达主要采用边缘检测^[2]和条纹图像^[3]两种频移测量技术。边缘检测技术采用最多的是 Fabry-Perot 干涉仪^[4-6]。

收稿日期:2006-08-14; 修订日期:2006-09-10

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(CX0201)

作者简介:王邦新(1979-),男,山东安丘人,硕士生,主要从事 Doppler 测风激光雷达的研究工作。Email:bxwang@163.com

导师简介:孙东松(1962-),男,江苏江阴人,研究员,博士,博士生导师,主要从事激光雷达大气遥感、成像激光雷达方面的研究。

Email:dssun@aiofm.ac.cn

文中简要介绍了安徽光学精密机械研究所自行研制的一台基于气溶胶散射的直接探测多普勒激光雷达系统。给出了该系统进行大气风场测量的方式,详细推导了三维风场的计算公式,并分析了其引起的风速和风向误差。给出了合肥地区对流层风场观测的典型结果,并作了详细的分析。

1 直接探测多普勒激光雷达系统

直接探测多普勒激光雷达由激光发射单元、二维扫描单元、回波信号接收单元、信号探测和数据采集单元及控制单元五部分组成,其结构如图 1 所示。该系统采用中心波长为 1 064 nm 的种子注入式 Nd:YAG 激光器作为激光光源,发射的激光束经八倍扩束后进入光学望远镜及二维扫描单元指向大气探测区域。大气散射回波信号经过扫描单元和望远镜接收系统耦合到光纤中,经过光纤传输进入准直镜后成为平行光,经窄带滤光片滤除背景光,并由 20%反射、80%透射的分束片分成两部分。20%的反射信号由直角反射棱镜分成两束,分别由光子计数探测器接收作为能量探测通道;80%的透射信号经过双 Fabry-Perot 标准具的两个通道后由直角反射棱镜分为两束,由相应的光子计数探测器接收作为信号探测通道。光子计数探测器将光信号转换为电信号后,输入光子计数卡

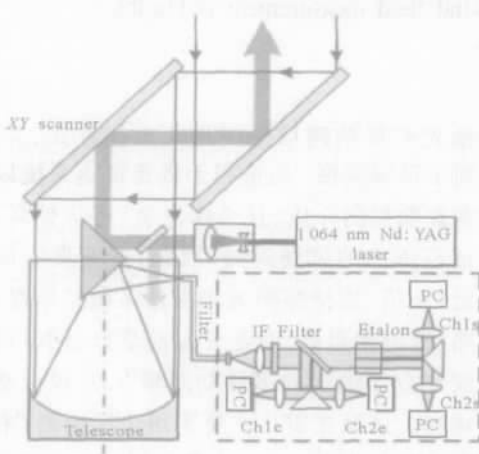


图 1 直接探测多普勒激光雷达光学结构

Fig.1 Diagram of optical system for direct-detection Doppler lidar

内,最后由工控机中的主程序对采集的数据进行储存和处理,并实时显示测量的信号强度廓线、风速和风向。控制单元通过 RS232 串口分别控制激光器、二维扫描单元和双 Fabry-Perot 标准具工作,起着系统的整

体协调作用。该系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 直接探测多普勒激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters of the direct-detection Doppler lidar system

System parameter	Value
Scanning angle	45 (fixed)
Wavelength	1 064 nm
Energy	200 mJ/pulse
Repeat frequency	50 Hz
Pulse width	8 ns
Telescope effective aperture	300 mm
Telescope optical efficiency	85%
View field	0.15 mrad
Laser beam diameter	6 mm
Laser divergence angle	0.5 mrad
Filter bandwidth /transmission	0.5 nm/>80%
F-P etalon FOV	<1 mrad
F-P etalon peak transmission	>60%
Detector quantum coefficient	18%

2 光束扫描方法及其三维风场合成

目前,多普勒雷达的扫描方式主要有 VAD^[7-9]和 DBS 两种技术^[10-11]。与传统的 VAD 技术不同,直接探测多普勒激光雷达多采用具有固定仰角和相同间隔方位角的三个或四个波束的扫描方式,其中按方位角多采用每相隔 90 进行四次径向风速测量的扫描方式^[4,11]。为了实现风场分布的快速测量,下面分析了三波束扫描及风场合成方法,并计算了该方法的风速和风向误差。

2.1 三波束扫描方法

假设大气风场在扫描时间内分布均匀,扫描方式如图 2 所示。以正东方向为 x 轴正方向,正北方向

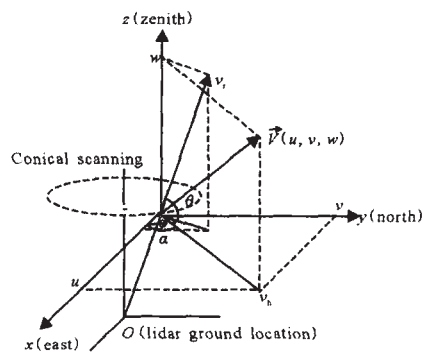


图 2 直接探测多普勒激光雷达扫描图

Fig.2 Diagram of beam scanning for direct-detection Doppler lidar
为 y 轴正方向,指向天顶的方向为 z 轴正方向建立坐

标系。设径向风速为 v_r , 扫描仰角和方位角分别为 φ 和 θ 。风场矢量在坐标轴上的分量分别为 u, v 和 w 。由几何关系可得:

$$v_r = u \cos \theta \cos \varphi + v \sin \theta \cos \varphi + w \sin \varphi \quad (1)$$

三波束扫描方法是将扫描仰角固定, 假设三个扫描方位角分别为 θ_1, θ_2 和 θ_3 , 三个扫描方向的径向风速分别为 v_{r1}, v_{r2} 和 v_{r3} , 则有:

$$\begin{cases} v_{r1} = u \cos \theta_1 \cos \varphi + v \sin \theta_1 \cos \varphi + w \sin \varphi \\ v_{r2} = u \cos \theta_2 \cos \varphi + v \sin \theta_2 \cos \varphi + w \sin \varphi \\ v_{r3} = u \cos \theta_3 \cos \varphi + v \sin \theta_3 \cos \varphi + w \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

故风速矢量的三个分量可分别表示为:

$$\begin{cases} u = \frac{(v_{r1} - v_{r2})(\sin \theta_3 - \sin \theta_1) - (v_{r1} - v_{r3})(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}{\cos \varphi [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_2 - \theta_3) + \sin(\theta_3 - \theta_1)]} \\ v = \frac{(v_{r1} - v_{r2})(\cos \theta_1 - \cos \theta_3) - (v_{r1} - v_{r3})(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\cos \varphi [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_2 - \theta_3) + \sin(\theta_3 - \theta_1)]} \\ w = \frac{v_{r1} \sin(\theta_2 - \theta_3) + v_{r2} \sin(\theta_3 - \theta_1) + v_{r3} \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin \varphi [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_2 - \theta_3) + \sin(\theta_3 - \theta_1)]} \end{cases} \quad (3)$$

水平风速 v_h 和风向 α (以正北方为起点顺时针旋转) 可分别写为:

$$v_h = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan(v/u) \quad (5)$$

自行研制的系统采用 45° 固定仰角和以正东方向为起始点顺时针间隔 120° 的方法进行三个波束的扫描, 故水平风速可简化为:

$$\begin{cases} u = (\sqrt{2}/3)(2v_{r1} - v_{r2} - v_{r3}) \\ v = (\sqrt{6}/3)(v_{r3} - v_{r2}) \\ w = (\sqrt{2}/3)(v_{r1} + v_{r2} + v_{r3}) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 风速和风向误差

假设每一个径向风速的误差分别为 $\Delta v_{r1}, \Delta v_{r2}$ 和 Δv_{r3} , 则合成的水平风速误差 Δv_h 可表示为:

$$\Delta v_h^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial v_h}{\partial v_{ri}} \Delta v_{ri} \right)^2 \quad (7)$$

由公式(4)和(6)可得:

$$\frac{\partial v_h}{\partial v_{ri}} = \frac{\partial v_h}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v_{ri}} + \frac{\partial v_h}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial v_{ri}} \quad (8)$$

其中, $\frac{\partial v_h}{\partial u} = \frac{u}{v_h}, \frac{\partial v_h}{\partial v} = \frac{v}{v_h}$ 。水平风速的误差 Δv_h 最终

可写为:

$$\Delta v_h = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{u}{v_h} \frac{\partial u}{\partial v_{ri}} + \frac{v}{v_h} \frac{\partial v}{\partial v_{ri}} \right) \Delta v_{ri} \right]^2} \quad (9)$$

假设扫描角度的误差分别为 $\Delta \theta_1, \Delta \theta_2$ 和 $\Delta \theta_3$, 则合成的水平风向误差 $\Delta \alpha$ 可表示为:

$$\Delta \alpha^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \right)^2 \quad (10)$$

由公式(3)和(5)可得:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} = \frac{\partial \alpha}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \theta_i} + \frac{\partial \alpha}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \theta_i} \quad (11)$$

其中, $\frac{\partial \alpha}{\partial u} = \frac{-v}{v_h^2}, \frac{\partial \alpha}{\partial v} = \frac{u}{v_h^2}$ 。水平风向的误差 $\Delta \alpha$ 最终

可写为:

$$\Delta \alpha = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{-v}{v_h^2} \frac{\partial u}{\partial \theta_i} + \frac{u}{v_h^2} \frac{\partial v}{\partial \theta_i} \right) \Delta \theta_i \right]^2} \quad (12)$$

假设每个径向风速的测量误差为 1 m/s, 每个方位的扫描误差为 1°; 则水平风速的测量误差为 1.155 m/s, 三波束扫描方法造成的水平风向误差为 0.707°, 满足系统设计的要求。

3 对流层风场测量

中国科学院安徽光学精密机械研究所已经研制成功了第一台基于双边缘技术的直接探测多普勒测风激光雷达, 并进行了大量的风场测量, 积累了丰富的风场数据。图 3 给出了该激光雷达在 2006 年 4 月 24 日晚 23 点 20 分测得水平风速(图(a))和风向(图(b))以及测量信号的距离平方校正信号的垂直廓线(图(c))。从图中可以看出, 在近地面风速较大, 大约为 15 m/s。随着高度的增加, 风速逐渐减小, 在 2 km 左右风速接近 0 m/s, 四五千米处风速较小, 且变化比较平缓。从距离平方校正信号曲线上可以看出, 在 5~8 km 信号较弱,

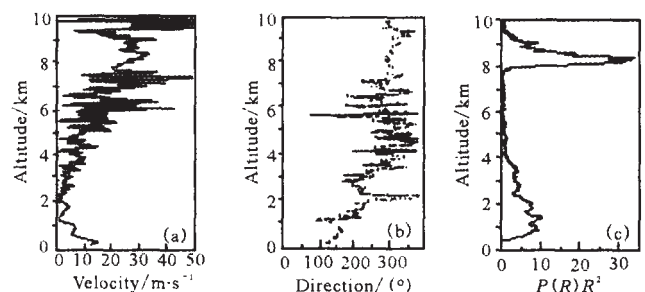


图 3 水平风速和风向测量结果

Fig.3 Measuring results of horizontal wind velocity and wind direction

天空中气溶胶浓度较小, 由于该雷达系统的测速媒质为气溶胶, 因此风速廓线在这一区域离散较大, 不能作为有效数据进行分析。由于 8 km 左右出现卷云, 在八九千米处也获得了很好的风场数据。从风向图上可以看出, 在 1 km 以下, 风向有明显的改变, 一二千米风向逐渐由东风变成西南风。在二三千米之间风向有一个突变, 表现出明显的风切变特征。

图 4 给出了 2006 年 4 月 24 日 24 h 的水平风场的时空分布。从图 4(a) 给出的水平风速中可以看出, 24 h 内风速变化比较平缓, 在凌晨 4 点 30 分到早晨

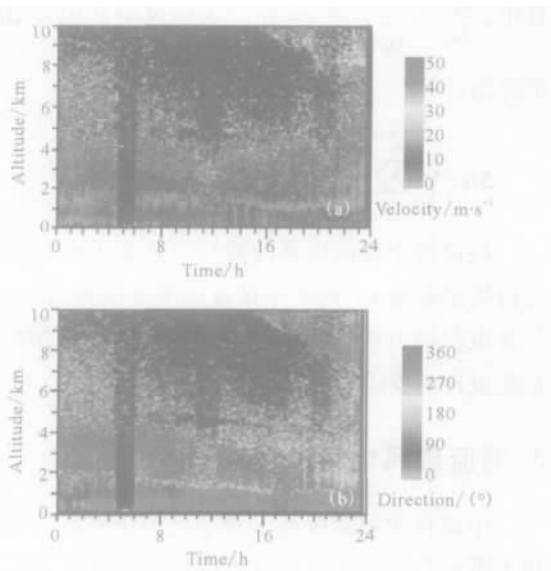


图 4 2006 年 4 月 24 日水平风场时空分布

Fig.4 Distribution of horizontal wind field at Apr.24, 06

7 点之间由于突然起雾, 影响了测量的距离; 16 点以后由于高空卷云的出现, 探测高度达到 10 km 左右。从图 4(b) 的风向时空分布上可以看出, 在凌晨 1 点左右, 风向发生了明显的变化, 其他测量时间内风向基本保持不变; 从空间分布上可以看出, 在 24 h 测量时间内, 2 km 左右存在一个清晰的风向切变带, 风向变化比较明显。

4 结论

简要介绍了自行研制的基于气溶胶散射的直接探测多普勒激光雷达系统, 给出了系统的主要参数。描述了该系统的三维风场测量方法, 给出了相应的计算公式, 并分析了该测量方法引起的风速和风向误差。在

径向风速均为 1 m/s 和扫描角度误差均为 1° 的情况下, 水平风速和风向的最大误差分别为 1.155 m/s 和 0.707° 给出了合肥地区对流层大气风场的测量结果和时空分布, 论证了该激光雷达系统测量对流层风场的能力。

参考文献:

- [1] SUN Dong-song. Mie-Rayleigh Doppler wind lidar with two double-edge interferometers [J]. Chinese J of Lasers B (English Edition), 2002, 11(4):296-300.
- [2] CHANIN M L, GARNIER A, HAUCHECORNE A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. Geophys Res Lett, 1989, 16(11):1273-1276.
- [3] ABREU V J. Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis [J]. Appl Opt, 1979, 18(17):2992-2997.
- [4] KORB C L, GENTRY B M, LI S X, et al. Edge technique Doppler Lidar Wind measurements with high vertical resolution [J]. Appl Opt, 1997, 36(24):5976-5983.
- [5] SOUPRAYEN C, GARNIER A, HERTZOG A, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. instrumental setup, validation and first climatological results [J]. Appl Opt, 1999, 38(12):2410-2421.
- [6] GENTRY B, CHEN Hui-lin. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): validation and performance [C]// Proceedings of SPIE, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring II, 2001, 4484:74-81
- [7] LHERMITTE R M, ATLAS D. Precipitation motion by pulse Doppler [C]// Preprints Ninth Weather Radar Conf Amer Meteor Soc, 1961: 218-223.
- [8] CATON P G. The measurement of wind and convergence by Doppler radar [C]// Preprints Tenth Weather Radar Conf Amer Meteor Soc, 1963: 290-296.
- [9] BROWNING K A, WEXLER R. The determination of kinematics properties of a wind field using Doppler Radar [J]. J Applied Meteor, 1968, 7(1):105-113.
- [10] BALSLEY B B, GAGE K S. On the use of radars for operational wind profiling [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1982, 63 (9): 1009-1018.
- [11] ECKLUND W L, CARTER D A, BALSLEY B B. A UHF wind profiler for the boundary layer: brief description and initial results [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1988, 5(3):432-441.