

文章编号: 0253-2239(2010)06-1537-05

# 米氏散射多普勒激光雷达探测大气风场

沈法华<sup>1,2</sup> 王忠纯<sup>1</sup> 刘成林<sup>1</sup> 舒志峰<sup>2</sup> 孙东松<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 盐城师范学院物理系, 江苏 盐城 224002  
<sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 介绍了米散射多普勒激光雷达风场探测原理,给出了自行研制的米氏散射多普勒激光雷达的结构系统。该系统与微波雷达进行实验对比,两者测量的水平风速大小和方向的廓线吻合得很好,并且得出在 0.55~2.4 km 高度范围内,系统探测的水平风速大小和风向误差的平均值分别为 1 m/s 和 7°。给出了系统长期风场观测的典型结果,并对风场随时间的演变趋势进行了分析。结果表明,该系统测量数据可靠,可用于低对流层风场分布的常规观测及分析研究。采用 PPI 扫描方式得到了径向风速的空间分布图和水平风速廓线,表明系统通过改进,将有可能具备探测切变风和晴空湍流的能力。

**关键词** 激光雷达;米氏散射;法布里-珀罗标准具

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1537

## Measurement on Wind Field with Mie Doppler Lidar

Shen Fahua<sup>1,2</sup> Wang Zhongchun<sup>1</sup> Liu Chenglin<sup>1</sup> Shu Zhifeng<sup>2</sup> Sun Dongsong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China  
<sup>2</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The basic principle of Mie Doppler lidar for wind measurements is introduced. The structure of self-developed Mie Doppler lidar system is presented. Comparing experiment with a wind profiler is conducted. The horizontal wind speed and direction data from those two instruments show good agreement. From 0.55 to 2.4 km altitude, the average errors of horizontal wind speed and direction are 1 m/s and 7°, respectively. The example of continuous wind observation is given, and the dynamics of wind field is analyzed. The above results indicate that measurements on this Mie Doppler lidar system are reliable, and can be employed for the routine observations and analysis of low tropospheric wind. The space distribution of line-of-sight wind speed and horizontal wind profile are obtained by using PPI scan mode, which indicates that, the system may have the capability of wind shear and clear air turbulence detection.

**Key words** laser lidar; Mie scattering; F-P etalon

## 1 引言

风是数值天气预报和气候研究中最重要参数之一。对流层三维风场的准确测量对数值天气预报、季节到年度气候预报和大气动力学、热力学研究以及与全球气候状态有关的水、化学和气溶胶圈的研究极为重要。此外,准确实时的风场数据可为航空器的起飞和着陆提供安全保障、提高导弹轨道预测的准确性等<sup>[1]</sup>。

与其它风场测量手段相比,直接探测多普勒测风激光雷达<sup>[2]</sup>是目前唯一能够实现全球范围的三维风场进行高精度、高时空分辨率探测的工具。国内从

1997年起开展了对直接探测多普勒测风激光雷达<sup>[3~5]</sup>的相关研究。2006年中国科学院安徽光学精密机械研究所研制成功了基于双法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)标准具的直接探测多普勒测风激光雷达系统<sup>[6~8]</sup>。该系统以气溶胶粒子为探测目标,主要用于测量低对流层的三维风场。本文给出了该系统典型风场探测结果,表明系统具有良好的探测性能。

## 2 测量原理

如图 1 所示,利用频谱分布相同而中心频率分开的两个 F-P 标准具作为边缘滤波器,两个标准具

收稿日期: 2009-06-22; 收到修改稿日期: 2009-09-17

作者简介: 沈法华(1981—),男,博士,讲师,主要从事多普勒测风激光雷达的研究。E-mail: sfh81914@tom.com

的透射率在约半峰全宽处相交。若将发射激光的频率锁定在它们的交叉点处,并假定输入光强相同,则两个标准具的输出光强相同。发射激光经过望远镜和扫描系统入射到大气中,若遇到有宏观平均运动速度(即风速)的大气气溶胶和分子,将产生多普勒频移。被望远镜接收的部分后向散射光经过准直系统后,再被均分入射到这两个标准具上,这时两个标准具的输出光强将有所不同(图 1 中阴影部分面积),根据这两个光强的比值变化可以确定多普勒频移量,从而求得径向风速

$$V_r = \lambda_0 \nu_d / 2, \tag{1}$$

式中  $\nu_d$  为多普勒频移量。

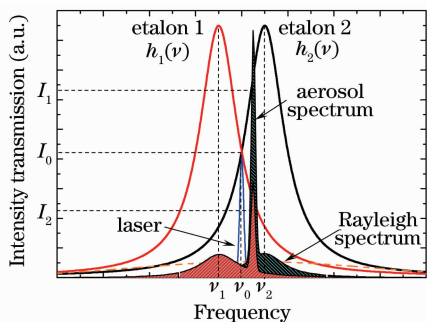


图 1 基于 F-P 标准具的米氏散射多普勒激光雷达风速测量原理

Fig. 1 Principle of Mie Doppler lidar based on for wind F-P etalon measurements

### 3 系统结构及技术参数

系统的总体结构如图 2 所示,它可分为 4 个子系统:发射系统、接收系统、发射接收光学系统和控制系统。发射机采用种子激光注入稳频 Nd:YAG 激光器,产生重复频率为 50 Hz、波长为 1064 nm 的激光用于基于气溶胶散射的大气风场测量。发射激光经过 8 倍扩束镜将发散角压至 0.1 mrad,通过两个导光反射镜和望远镜副镜经由二维扫描系统以预设的方位角和天顶角指向大气被测区域。大气后向散射信号光由 Cassegrain 反射式望远镜接收并耦

合到多模光纤,然后由多模光纤的另一端耦合进入接收机进行频率检测。发射激光在扩束之前,由分束片分出小部分作为参考光直接通过光纤耦合到接收机进行频率检测。由参考光与回波信号光的频率差值就可以得出径向风速的大小。进入到接收机中的光信号先经过准直镜,出来的平行光经过带宽为 0.5 nm,中心波长为 1064 nm 的干涉滤光片后,被透反比为 80/20 的分束片分成两束。透射光入射到双 F-P 标准具的两个通道,出来的光信号由分光棱镜将两个通道的信号分开,再分别用 Perkin Elmer 公司生产的两个 Si:APD 光子计数探测器接收;反射光束由分光棱镜从中间分成两束,也分别用两个 Si:APD 光子计数探测器接收,用于双 F-P 标准具两个通道对应的能量监测。光子探测器的输出信号进入到光子计数卡,再由计算机进行数据处理、存储以及风速反演和结果显示。激光雷达系统的所有单元,包括激光器控制、扫描仪控制、探测器的采集控制以及 F-P 标准具的 PZT 控制等均通过 RS232 串口由计算机控制。系统实物照片和主要技术参数分别如图 3 和表 1 所示。

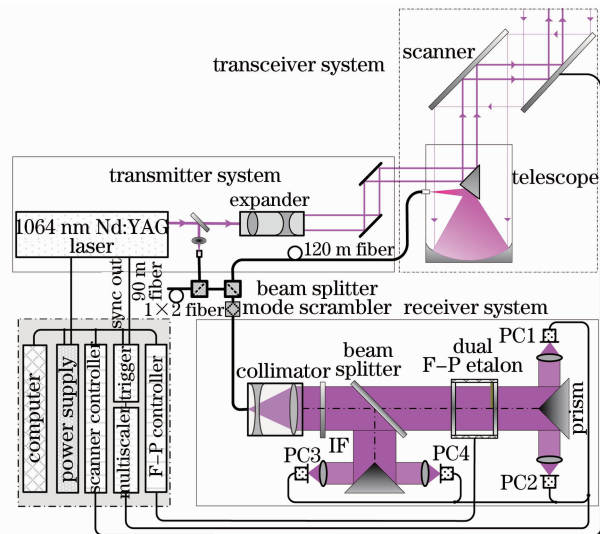


图 2 米氏散射测风激光雷达系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of Mie Doppler wind lidar system

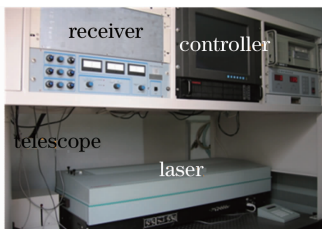
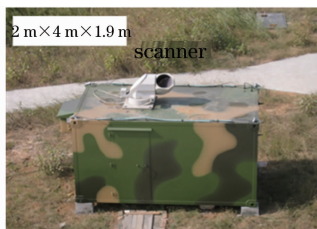


图 3 米氏散射测风激光雷达系统实物照片

Fig. 3 Photos of Mie Doppler wind lidar system

表 1 米氏散射测风激光雷达系统参数  
Table Parameters of Mie Doppler lidar system

Parameter		Value
Nd:YAG laser	Wavelength /nm	1064
	Pulse energy /mJ	200
Continuum8050	PRF/Hz	50
	Cassegrain telescope	Aperture /cm
Scanner	Receiver FOV /mrad	0.15
	Scanning range /( $^{\circ}$ )	360 $\times$ 90
	Zenith angle /( $^{\circ}$ )	45
Dual F-P etalon	FSR /GHz	3.5
	FWHM /MHz	170
	Central offset /MHz	200
SPCM-AQR-14	Quantum efficiency /%	18@1064 nm

## 4 风场测量结果与分析

### 4.1 测风激光雷达与微波雷达探测结果对比

在 2006 年 7 月 15~30 日,米氏散射测风激光雷达与距其 450 m 左右的一台 Airdal6000 型微波雷达进行了实验对比。整个对比实验获得了超过 70 h 的数据。图 4 列举了 7 月 30 日 7:30 的对比结果。在实验过程中,微波雷达的垂直距离分辨率为 150 m、累积时间为 30 min。测风激光雷达采用仰角为  $45^{\circ}$  的 3 波束扫描方式,每个径向风速测量时间为 1 min、距离分辨率为 30 m。每隔 10 min 给出一组合成后的水平风速大小和方向的垂直廓线,垂直距离分辨率为 21.2 m。由于该天有大雾,测风激光雷达探测高度为 2.5 km 左右。因为微波雷达每 30 min 给出一组实验数据,测风激光雷达是每 10 min 给出一组,所以需要测风激光雷达的数据结果在 30 min 内平均。图 4 中实线给出的是激光雷达连续三个 10 min 测得的水平风速大小和方向的平均值和标准偏差。可以看出:7:00~7:30 在 2.5 km 的高度范围内,测量的水平风速大小和方向的标准方差的最大值分别为 2 m/s 和  $30.3^{\circ}$ ,平均值分别为 0.76 m/s 和  $6.2^{\circ}$ 。这些误差包括了系统测量误差和 30 min 的测量期间内大气变化引起的误差。由于在整个测量期间,气候条件比较稳定,所以这些算得的方差数据对于评估系统测量误差是具有参考价值的。为了便于比较,用方格点表示出了微波雷达的测量结果。可以看出在 300 m 以上的高度,激光雷达和微波雷达测得的水平风速的大

小和方向廓线吻合得很好;而在 300 m 以下高度,两者出现偏离。可能是由于微波雷达受到地面杂散波的影响。

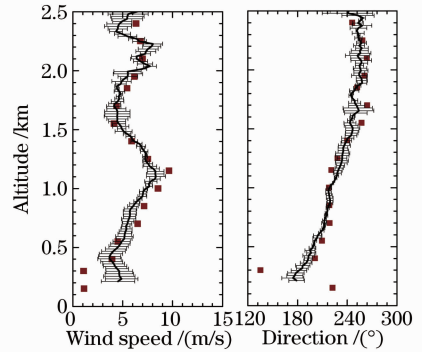


图 4 测风激光雷达和风廓线微波雷达实验数据对比  
Fig. 4 Horizontal wind profiles measured by Doppler wind lidar and wind profiler radar

为了作更进一步的比较,以微波雷达风速数据的时间和空间分辨率将激光雷达的原始实验数据在时间和空间上重新划分并作平均。图 5 给出了 2006 年 7 月 30 日一整天里,在 0.55~2.4 km 高度范围内,由两个雷达测量数据组成的同一高度、同一时间数据对的差值统计结果。从图 5 可看出:两者测量的风速大小和方向的差值分布都近似为高斯分布,风速大小和方向差值的标准方差分别为 1.41 m/s 和  $12.2^{\circ}$ ,这由激光雷达和微波雷达测量误差两部分组成。而当水平风速小于 30 m/s 时,微波雷达的水平风速大小和方向的测量精度分别为 1 m/s 和  $10^{\circ}$ ,由此可得激光雷达的水平风速大小和方向的测量精度分别为 1 m/s 和  $7^{\circ}$ 。风速大小和方向差值的平均值分别为 0.25 m/s 和  $2.4^{\circ}$ ,这说明激光雷达和微波雷达测量的结果存在小的偏差量。

### 4.2 长期水平风场探测结果

图 6 给出了 2008 年 12 月 3~4 日激光雷达连续 36 h 的观测实验结果,探测高度在 3 km 左右。可以看出:在 3 日白天到夜里 23:00 左右,地面风速较小,约为 5 m/s;1 km 高度以上风速较大,为 10 m/s 左右。23:00 之后开始起风,风向也有所变化,到 4 日早上 7:00 左右风速达到最大,最大风速约为 17 m/s,为西北风(风向定义为正南方向为 0,顺时针旋转),高度在 0.8 km 附近。到了 12:00 以后,风速开始逐渐减小。该探测结果和当时观察到的天气变化情况吻合。

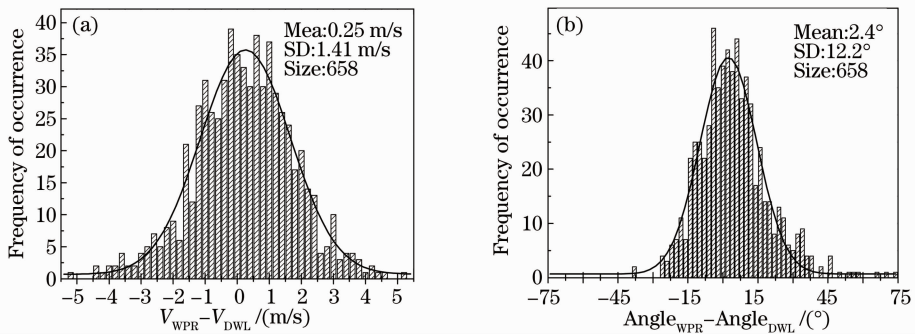


图 5 测风激光雷达和风廓线微波雷达实验数据对比的统计直方图。(a)风速大小;(b)风速方向

Fig. 5 Histogram of differences between pairs of wind data for Doppler wind lidar and wind profiler radar.

(a) wind speed; (b) wind direction

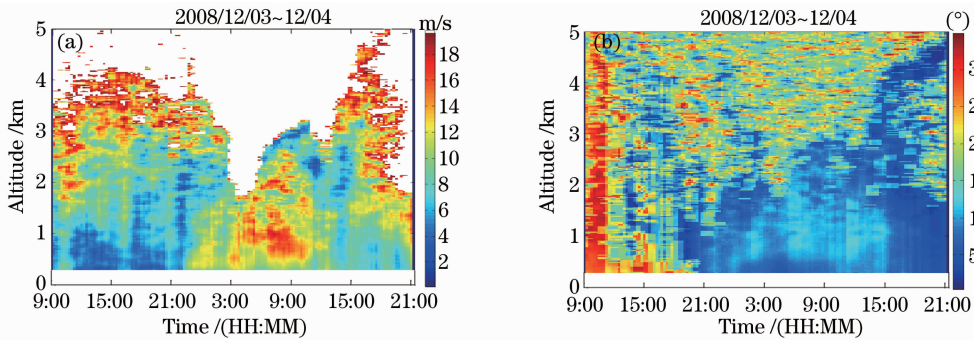


图 6 2008 年 12 月 3~4 日激光雷达探测的(a)水平风速大小和(b)方向随时间的变化

Fig. 6 Time series measured by lidar horizontal of (a) wind speed (b) and direction obtained on Dec. 3~4, 2008

### 4.3 径向风场 PPI 扫描探测结果

图 7 为 2008 年 8 月 5 日,测风激光雷达采用平面位置显示器(PPI)扫描测得的径向风速的连续空间分布图,激光发射仰角  $\phi=10^\circ$ ,方位角从 0(指向东)顺时针方向旋转。每个径向风速测量的累积时间为 20 s,每次径向风速测量结束,扫描仪水平转动  $3.5^\circ$ 。由于雷达置于地面,周围有多个障碍物而无法进行  $360^\circ$ 扫描,整个扫描范围为  $0\sim 152^\circ$ 。通过增加激光脉冲能量等方法减小测量累计时间,并采用连续 PPI 扫描方式可以捕捉风场空间分布的突

变信息,用于机场切变风和晴空大气湍流等的实时探测。图 8 给出了 1.2 km 处不同方位角测得的径向风速及拟合结果,拟合方程为

$$V_r = V_0 + V_h \cos \phi \cos(\theta - \theta_{max}), \quad (2)$$

式中  $V_h$  为水平风速大小; $\theta_{max}$  为水平风速的方向。从图 8 的拟合结果可知:水平风速大小为 5.54 m/s;水平风速方向为  $-4.3^\circ$ 。图 9 给出了水平风速和大小随距离的变化廓线,可以看出该地地面风速在 5 m/s 左右,方向为东东南风。该结果和激光雷达附近铁塔上的风向标的测量结果一致。

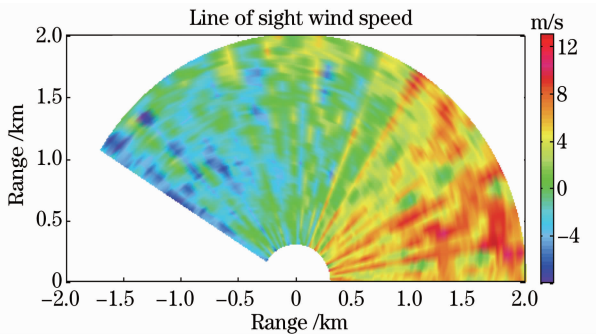


图 7 径向风速连续空间分布图

Fig. 7 Continuous space distribution of the radial wind velocity

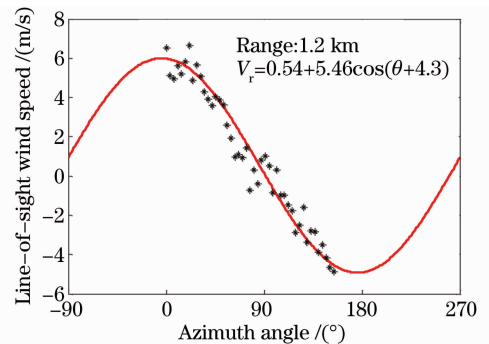


图 8 测量的径向风速数据采用余弦函数的拟合结果

Fig. 8 Result of cosine fitting of the measured radial wind velocity



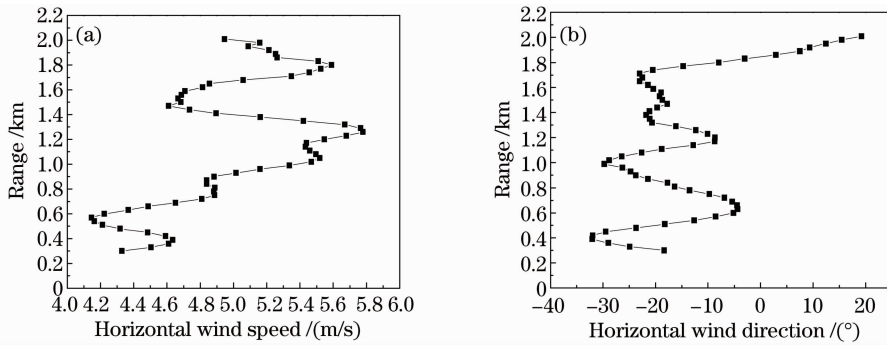


图9 水平风速大小和方向廓线

Fig. 9 Horizontal wind speed and direction profiles

## 5 结 论

介绍了自行研制的米氏散射多普勒测风激光雷达系统结构,给出了该系统与微波雷达的风场对比实验结果、长期风场观测典型结果和 PPI 扫描获得的径向风速空间分布和水平风速廓线,并且对这些结果进行了深入的分析。结果表明该雷达系统风场探测性能良好,可以用于低对流层大气风场长期观测研究;若对系统作进一步改进,提高激光功率并采用连续 PPI 扫描方式,系统将可以具备探测切变风和晴空大气湍流的能力。

## 参 考 文 献

- 1 S. M. Hannon. Autonomous infrared Doppler lidar: airport surveillance application [C]. Proceedings of Ist European Conference on Radar Meteorology, Bologna, Italy, 2000
- 2 W. E. Baker, G. D. Emmitt, F. Robertson *et al.*. Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1995, **76**: 869~888

- 3 Shen Fahua, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Error analysis of wind lidar based on Fizeau interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1761~1765  
沈法华,孙东松,钟志庆等.基于菲佐干涉仪测风激光雷达的误差分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1761~1765
- 4 Pu Lingbing, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. Discrimination of Doppler frequency shift based on Fizeau interferometer and PMT array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 379~383  
卜令兵,刘继桥,陈卫标.基于菲佐干涉仪与多通道光电倍增管阵列的多普勒频移检测技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 379~383
- 5 J. Zhu, Y. Chen, Z. Yan *et al.*. Relationship between the aerosol scattering ratio and temperature of atmosphere and the sensitivity of a Doppler wind lidar with iodine filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 449~453
- 6 D. Sun, Z. Zhong, J. Zhou *et al.*. Accuracy analysis of the Fabry-Pérot etalon based Doppler wind lidar [J]. *Opt. Rev.*, 2005, **12**(5): 409~414
- 7 H. Xia, D. Sun, Y. Yang *et al.*. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29): 7120~7130
- 8 F. Shen, H. Cha, D. Sun *et al.*. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. *Opt. Rev.*, 2008, **15**(4): 204~209