

基于双F-P标准具的直接探测测风激光雷达

夏海云^{1,2}, 孙东松², 沈法华², 董晶晶², 钟志庆², 王邦新², 周小林², 李颖颖²

(1.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;
2.中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 研制了基于双 F-P 标准具直接探测的地基测风激光雷达。简要回顾了双边缘直接探测技术, 介绍了系统结构与控制。为验证系统测量结果的准确性, 研制了多普勒校准仪。在 ± 40 m/s 动态范围内的校准实验表明: 当累计光子数达到 2 000 时, 测风激光雷达系统对靶盘径向转速测量的标准误差为 0.6 m/s。风场观测初步对比实验时, 测风激光雷达的测量结果与风廓线测量结果一致。给出了 24 h 连续大气风场观测的结果: 风场观测的垂直分辨率为 21.2 m, 每个径向观测的累积时间 1 min, 当激光雷达扫描视场内有云层时, 测风激光雷达的探测高度可达 10 km。

关键词: 激光雷达; 直接探测; F-P 标准具

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)增 C-0273-06

Direct detection Doppler wind lidar with twin-channel Fabry-Perot interferometer

XIA Hai-yun^{1,2}, SUN Dong-song², SHEN Fa-hua², DONG Jing-jing², ZHONG Zhi-qing², WANG Bang-xin²,
ZHOU Xiao-lin², LI Ying-ying²

(1.School of Instrument Science and Photo-electronics Engineering, Beihang University,100083,Beijing,China.

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

Abstract: A ground direct detection Doppler wind lidar system which uses double-edge technique to measure wind profiles from the surface into the lower stratosphere has been developed. The basic principles of using double-edge technique with a twin-channel Fabry-Perot interferometer are given. The lidar structure and system operation are introduced. The lidar measurements are validated by comparing them with preset velocities on a uniquely designed verifying attachment. Experiment results show that an accuracy of 0.6 m/s can be obtained for 2 000 detected photons within a dynamic range of ± 40 m/s. Inter-comparison experiments are also carried out between Doppler wind lidar and wind profiler radar. Good agreement is obtained. A example of 24 h continuous observation of wind field is given, the measured wind profiles with a vertical spatial resolution of 21.2 m and averaging time of 1 min for each line-of-sight can extend into 10 km depending on the aerosol concentration.

Key words: Lidar; Direct detection; Fabry-Perot interferometer

收稿日期: 2006-08-15

作者简介: 夏海云(1980-), 男, 江苏丹阳人, 硕士研究生, 从事测风激光雷达光机设计与信号处理研究。

0 引言

测风激光雷达的社会、经济以及科研价值正越来越被人们重视^[1]。测风激光雷达对提高长期天气预报的准确性、风暴预报的准确性、改进气候研究模型、军事环境预报、预报可能的生化武器释放环境以提高国防安全等方面具有重大意义。欧共体、美国、日本的多家研究机构已经建成地基、车载、机载测风激光雷达系统，星载测风激光雷达系统也在积极准备中。

直接探测方法中，边缘技术将激光出射频率锁定在鉴频器陡峭边缘上，因而较小的频移将导致较大的信号强度变化^[2]。双边缘技术是边缘技术的有效改进：一方面承袭了单边缘技术的优点；另一方面提高了测量灵敏度并且可以分别反演回波信号中的瑞利和气溶胶成分，从而能够消除瑞利背景噪声的影响^[3]。

文中简要回顾了双边缘测风技术，描述了测风激光雷达的系统结构与系统控制，给出了风场观测结果。

1 测量原理

使用高分辨率的双通道 Fabry-Perot 标准具(FPI)可实现基于双边缘技术的大气风场直接探测。出射激光束以设定方位指向大气被探测区域，大气风场使得大气气溶胶粒子和大气分子整体移动，使得大气回波信号发生多普勒频移。根据出射激光在双边缘 F-P 标准具上的透过率，可测定出射激光频率。由于多普勒频移，大气后向散射信号在双边缘 F-P 标准具上的透过率将发生变化。根据透过率的变化可以直接差分测量多普勒频移量 $\Delta\nu$ 。其与径向风速 V 的关系为：

$$V = \frac{2}{\lambda} \Delta\nu \tag{1}$$

图 1 为风场三维扫描示意图。风场观测时，激光束以 45° 仰角，向东方向测得第一个径向风廓线 V_1 。保持仰角不变，顺时针每转过 120° 方位角依次测得径向风廓线 V_2 、 V_3 。每扫描一周，可以计算三维风场信息如下：

$$V_H = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 - V_1V_2 - V_2V_3 - V_1V_3} \tag{2}$$

$$V_z = \frac{\sqrt{2}}{3} (V_1 + V_2 + V_3) \tag{3}$$

$$\theta = -\arctan\left(\frac{\sqrt{3}(V_3 - V_2)}{2V_1 - V_2 - V_3}\right) - \frac{\pi}{2} \text{sign}\left(\frac{\sqrt{2}}{3}(2V_1 - V_2 - V_3)\right) \tag{4}$$

式中： V_H 、 V_z 分别为大气风场水平分量 and 垂直分量； $\theta \in [-\pi, \pi]$ 为水平风向，向南为零度，顺时针为正方向。一般而言 V_z 较小，如果长时间观测到风场垂直分量较大，则可能是测风激光雷达系统本身出现了故障。基于大气气溶胶后向散射的测风激光雷达实际工作时还受到大气气溶胶分布的影响。为分析测量误差，定义系统

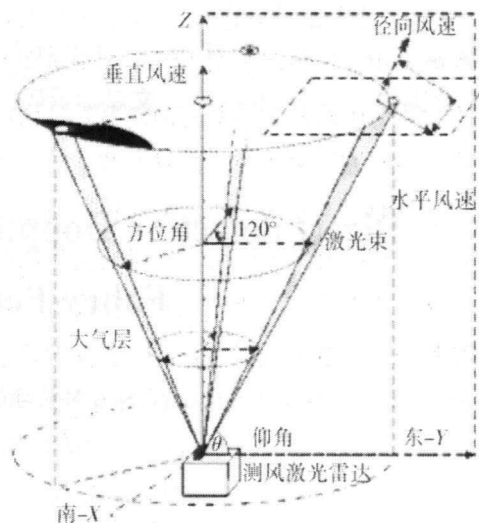


图 1 三维扫描示意图
Fig.1 Lidar viewing geometry

响应函数为:

$$F(\nu) = \frac{\tau_1(\nu)}{\tau_2(\nu)} \quad (5)$$

式中: $\tau_1(\nu)$ 、 $\tau_2(\nu)$ 分别为气溶胶信号对应于双通道 F-P 标准具的透过率。测量灵敏度 Θ 定义为单位速度引起的系统响应函数的相对变化:

$$\Theta = \frac{1}{F} \frac{dF}{d\nu} = \frac{1}{\tau_1} \frac{d\tau_1}{d\nu} - \frac{1}{\tau_2} \frac{d\tau_2}{d\nu} \quad (6)$$

当采用光子计数探测方式时, 暗计数噪声很小, 夜间信号主要受自身量子涨落的影响。基于大气气溶胶后向散射的测风激光雷达系统中, 回波信号还包含瑞利背景噪声。记双边缘测量中的信噪比为 S/N , 径向风速测量误差可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{1}{(S/N)\Theta} \quad (7)$$

由公式 (2)、(4) 可知水平风速、风速方向的测量误差分别为:

$$\Delta V_z = \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial V_z}{\partial V_i} \varepsilon_i \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \Delta \theta = \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \theta}{\partial V_i} \varepsilon_i \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

综上所述, 径向风速测量误差与系统灵敏度和实际信噪比有关, 当气溶胶后向散射系数相对于大气分子后向散射系数较小时, 由于信噪比较低, 测量误差将增大。

2 系统结构与控制

基于双 Fabry-Perot 标准具的直接探测测风激光雷达的系统结构如图 2 所示。激光器发出一束激光, 其能量的很小一部分被分束镜分出并耦合到传导光纤中, 经过光纤合束装置、光纤扰模器后直接进入测风激光雷达的接收系统, 其光作为参考光, 用于测量出射激光的初始频率。大部分能量的出射激光先后经过扩束镜装置、反射棱镜 M2、二维扫描仪后以预设的方位角和天顶角指向大气被探测区域。探测区域内, 气溶胶粒子或大气分子的平均运动速度导致了大气后向散射信号发生多普勒频移。二维扫描仪和望远镜接收大气后向散射信号并将其耦合到传导光纤中。同参考光一样, 大气后向散射信号先后经过光纤合束装置、光纤扰模器后进入测风激光雷达的接收系统。接收系统中, F-P 标准具作为鉴频器, 可以对参考光和大气后向散射信号的频率进行差分测量。在标准具的后继光路上安装了移动式反射镜 M1, 它使得入射光经过标准具后照射在硫酸纸屏上, 由摄像机观测光斑分布情况。为了使得光斑强度分布均匀, 在连接光学天线和接收机的传导光纤上安装了扰模器。由于标准具双通道采用左右半圆形结构, 考虑到光斑入射强度在标准具的左右两通道上分布不等, 所以使用探测器 1 和探测器 2 分别检测入射到标准具左右通道的信号强度。其中, 能量检测探测器 1 和信号检测探测器 3 对应标准具的左半通道(1 通道), 能量检测探测器 2 和信号检测探测器 4 对应标准具的右半通道(2 通道)。

图 3 为计算机控制框图, 系统中计算机主要功能为系统控制与数据处理。首先, 输入初始化参数后, 计算机通过 RS232 串口通信管理标准具控制单元、二维扫描仪控制单元、激光器及其电源与水冷却系统、系统同步触发模块, 并通过 PCI 总线管理多通道数字采集卡。其中, 触发模块本身由激光器输出的同步信号触发。在上述过程中, 计算机向各个子系统发送指令, 同时接收有关返回信息。其次, 计算机控制数据的采集并进

行处理: 计算机通过数字采集卡接收光子计数探测器的输出信号, 对信号处理后, 显示风速廓线并保存数据。

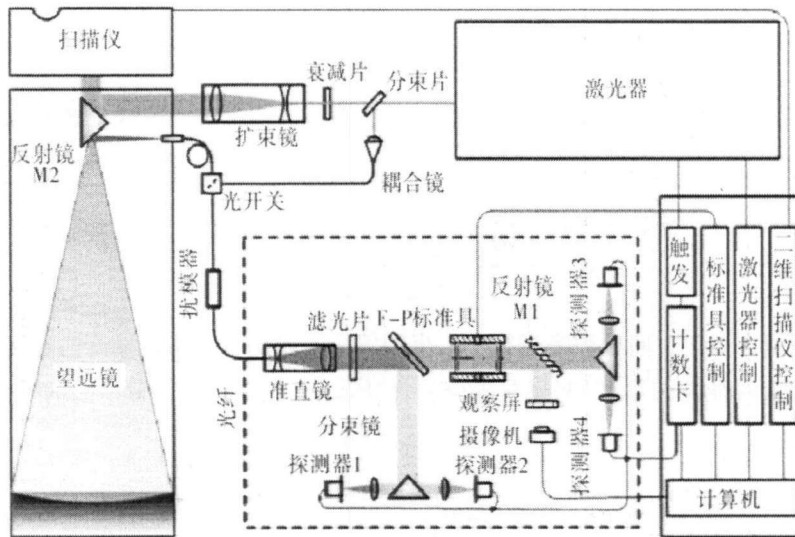


图 2 直接探测测风激光多普勒雷达结构图

Fig.2 Schematic of direct-detection wind lidar



图 3 控制系统方案

Fig.3 System controlling diagram

3 实验观测

建成的测风激光雷达于 2005 年 11 月开始风场观测。雷达系统对实验室内转动靶盘的校准测试结果表明^[4]: 累计光子数 2 000 时, 在 ± 40 m/s 动态范围内, 雷达测速误差小于 0.6 m/s。从长期观测中, 发现标准具上的入射光斑将导致较大的系统误差, 在硬件上安装多模光纤抗模器, 并在数据处理中引入光强分布函数, 可以减小光斑导致的系统误差^[5]。由于安光所地处合肥市航道上 ($35^{\circ}54'N, 117^{\circ}09'E$), 长期以来无法使用无线电探空测风仪进行对比实验。2006 年 7 月 15 日, 尽管大气能见度很低, 还是与新建成的风廓线仪进行了对比实验, 结果如图 4 所示。

受雷雨天气影响, 12: 40 时的有效探测高度为 1.7 km, 12: 50 的有效探测高度仅为 1.5 km。从比较结果来看: 12: 40 时, 激光雷达测得的水平风速和风向与风廓线仪测得结果较一致。然而 12: 50 时, 在 0.8~1.3 km 高度, 两者测得的风向偏差较大。这可能是两者的时间分辨率不同引起的: 测风激光雷达完成一个周期扫描的时间为 4.5 min (每个径向 3 000 发脉冲累计), 风廓线仪的时间分辨率为 10 min, 若在这段时间内发生低空

风切变, 则两台雷达测得结果不一致。另外, 风廓线仪在近地面测得的风速明显偏离测风激光雷达测得的风廓线, 这是由于风廓线仪受到地表建筑回波的干扰。

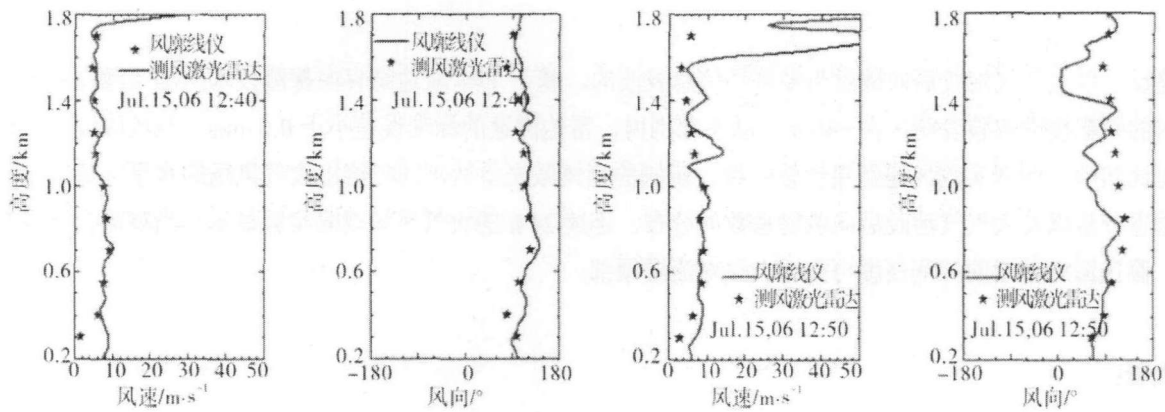


图 4 测风激光雷达与风廓线仪观测结果的对比实验

Fig.4 Horizontal wind and direction profiles measured by wind profiler radar and wind lidar

图 5 为 2006 年 4 月 24 日的观测结果。在 4: 20~5: 50 时段内, 由于大雾, 测风激光雷达暂停工作。图 5(a)、图 5(c)分别为大气风场水平分量和水平风向的二维(时间-高度)分布图。由图可知: 在 2 km 高度上下的风速大小和风向均发生了明显变化。图 5(b)为大气风场垂直分量的二维分布图, 在大部分时间与高度上, 垂直速度分量小于 2 m/s, 值得注意的是 2 km 左右的高度层上的垂直速度较大 (>6 m/s)。根据 KLETT J D 和 FERNALD F G 提出的反演方法^[6, 7], 在同时段反演气溶胶后向散射系数分布, 如图 5(d)所示(图中数据为气溶胶后向散射系数的对数值)。对比图 5(b)与图 5(d)可知: 2 km 高度处气溶胶后向散射系数很小, 该高度层上垂直速度较大是由低信噪比导致测量误差较大而引起的。

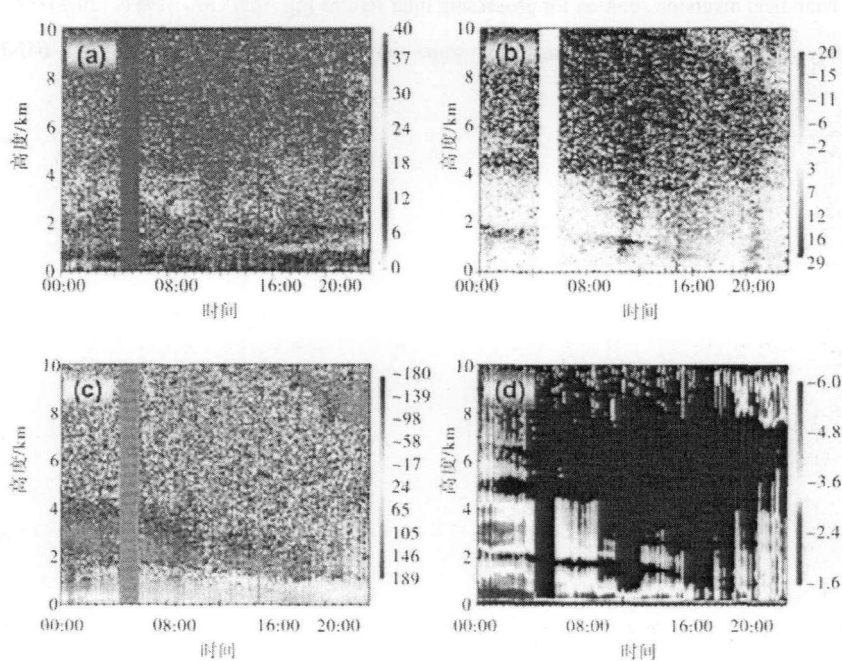


图 5 连续 24 小时风场观测结果与气溶胶分布

Fig.5 24 h observation of wind field

4 结 论

建设了以大气气溶胶后向散射为多普勒信息载波的, 基于 FPI 双边缘直接探测技术的测风激光雷达。实验室内的硬靶校准实验表明: 在 ± 40 m/s 动态范围内, 雷达测速的标准误差小于 0.6 m/s。与风廓线仪进行了初步对比实验, 两者实测风速结果比较一致。研制的测风激光雷达可同时给出大气风场的水平分量、水平风向、垂直分量以及大气气溶胶后向散射系数的分布。连续 24 h 的大气风场观测实验显示: 当观测视场内云层时, 测风激光雷达的探测高度可接近大气对流层顶部。

参考文献:

- [1] World Meteorological Organization. Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas[R]. WMO Satellite Reports SAT-21. WMO/TD, No.913, 1998.
- [2] KORB C L, GENTRY B M, WENG C Y. Edge technique theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. J Appl Opt, 1992, 31: 4202-4213.
- [3] KORB C L, GENTRY B M, LI S, et al. Theory of the double-edge technique for doppler lidar wind measurement[J]. Applied Opt, 1998, 37: 3097-3104.
- [4] XIA Hai-yun, SUN D, DONG J, et al. Illumination effects to the dual Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36 (2) (to be published).
- [5] XIA Hai-yun, SUN D. A design of verifying attachment for calibration of wind lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33 (10) (to be published).
- [6] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211-220.
- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. Appl Opt, 1984, 23: 652-655.