

入射光斑对双 F-P 标准具测风激光雷达的影响

夏海云¹, 孙东松², 董晶晶², 沈法华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: 在直接测风激光雷达的接收光路中安装 CCD 监视器, 发现了入射到标准具上光斑的形状及其强度分布对标准具透过率曲线产生的影响。理论分析表明: 入射光斑影响了双 Fabry-Perot 标准具的频谱间距和透过率曲线的形状, 双边缘直接测风激光雷达由此将引入较大的系统误差。另外, 由于强度分布的随机性, 使系统的校准常数失去实际意义。通过在传导光纤上安装扰模器, 并在反演风速时引入强度分布函数, 可以减小光斑引起的误差。理论和实验表明, 文中方法对直接探测测风激光雷达的精度有直接影响。

关键词: 激光雷达; 风; 直接探测; 光斑

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)03-0377-05

Illumination effects on the dual Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar

XIA Hai-yun¹, SUN Dong-song², DONG Jing-jing², SHEN Fa-hua²

(1.School of Instrument Science & Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083,China;
2.Institute of Anhui Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031,China)

Abstract: An updated prototype wind lidar system is discussed. A CCD camera is mounted behind the Fabry-Perot interferometer in the receiver of the direct-detection Doppler lidar. It is found that the shape of the illumination pattern and intensity distribution on the interferometer affect obviously its transmission curves. These phenomena result in a large system error in the inversion of wind velocity. However, by setting a mode scrambler on the transfer fiber and introducing intensity distribution function in the data processing, these effects can be reduced. Theoretical analysis and experiments are performed. All results show that the method proposed has a substantial effect on the system accuracy.

Key words: Lidar; Wind; Direct detection; Illumination

0 引言

随着对风场信息重要性的逐步认识, 及其在大气光学、气象和气候研究以及航空航天等领域中的应用, 测风激光雷达在近 20 年发展迅速, 并有超越传统测风方法的趋势。目前测风激光雷达可分为相干探测^[1]和直

接探测两种。直接探测又可以分为条纹技术^[2-3]和边缘技术^[4-5]。条纹技术采用 Fabry-Perot 标准具或 Fizeau 干涉仪产生干涉条纹, 通过条纹重心的偏移测定大气散射信号的多普勒频移量, 因而在利用红外波段对大气米散射进行多普勒测量中占有优势。边缘技术中, 除前述两种干涉仪外, 还可以采用碘吸收线、光栅、棱镜、

收稿日期: 2006-08-20; 修订日期: 2006-10-12

基金项目: 装备技术创新研究项目

作者简介: 夏海云(1980-), 男, 江苏丹阳人, 博士生, 从事测风激光雷达方面的研究工作。Email: Haiyunxia@126.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, 从事多普勒测风激光雷达的研究。Email: Dssun@aiofm.ac.cn

Michelson 或 Mach-Zehnder 干涉仪等高分辨率的鉴频器。激光器的出现和发展促动了 Fabry-Perot 标准具的深入研究^[6-7], 而双边缘技术^[8]的发展使 Fabry-Perot 标准具成为当前测风激光中主要使用的鉴频器之一。在已建成的测风激光雷达的长期观测中, 发现入射到标准具上的光斑对标准具的透过率产生较大影响, 文中理论分析了该影响的来源。通过在接收机中加入扰模器, 并在反演风速时引入强度分布函数, 降低了由光斑导致的系统误差。

1 实验

基于双 Fabry-Perot 标准具的直接法测风激光雷达的系统结构如图 1 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被耦合到传导光纤中, 先后经过光纤合束装置、光纤扰模器后直接进入测风激光雷达的接收系统, 该部分能量的出射激光

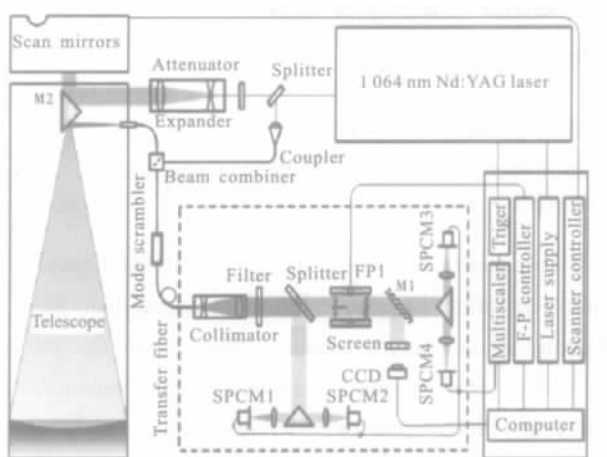


图 1 直接探测测风激光多普勒雷达结构图
Fig.1 Schematic of direct-detection wind lidar

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。由二维扫描仪和望远镜接收部分大气后向散射信号并将其耦合到传导光纤中。同参考光束一样, 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, 从而测得由风速导致的多普勒频移量, 由此可以反演该指定方向的径向风速。通过

空间三维扫描, 最终可以反演大气风场信息。图 1 示出多普勒雷达系统结构^[9]。首先, 在标准具的后继光路中安装了移动式反射镜 M1, 它使入射光经过标准具后照射在硫酸纸屏上, 由 CCD 观测光斑分布情况; 其次, 为了使光斑强度分布均匀, 在连接光学天线和接收机的传导光纤上安装了光纤扰模器; 最后, 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, 所以使用两个单光子计数探测器 (Single Photon Counting Module) SPCM1 和 SPCM2 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 SPCM1 和信号检测探测器 SPCM3 对应标准具的左半通道(1 通道), 能量检测探测器 SPCM2 和信号检测探测器 SPCM4 对应标准具的右半通道(2 通道)。

实验结果如图 2 所示。上排三幅图依次为环形光斑在扰模器作用下逐渐均匀化, 下排三幅图为星形光斑的情形。显然, 在扰模器的作用下, 入射光斑的强度分布变得均匀化, 但由此并不能保证入射光在左右通道上的辐射功率相等。

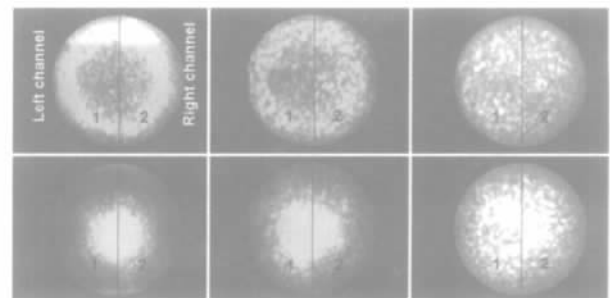


图 2 扰模器对不同光斑作用的照片

Fig.2 Illumination patterns under the function of scrambler

2 理论分析

当考虑入射光束呈星状光斑时, 光斑边缘对应的发散角为 θ_0 , 并且假设光强在整个入射光斑内均匀分布, 标准具透过率可以近似表示为:

$$H_1(v) = \frac{2}{\theta_0} \int_0^{\theta_0} h(v, \theta) \cdot \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中: $h(v, \theta)$ 为理想 Fabry-Perot 标准具的透过率:

$$h(v, \theta) = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi} \sin^2\left(\frac{\pi v}{FSR} \cos\theta\right)} \quad (2)$$

式中: 腔长为 42.856 mm; 双通道腔长差 30.4 nm, 对应双通道频谱间距约 200 MHz^[9]; 对应波长的反射率

R=0.866; 光束通过标准具的光损耗 L=0.25%; 自由谱间距 FSR=3.5 GHz; F 为精细度。

图 3 给出了入射光斑在标准具的左右通道对称分布时,不同发散角 θ_0 对应的双通道透过率曲线。从图中可以看出:光斑影响了透过率曲线的形状和频率中心的位置。当光斑对称分布时,双通道透过率曲线的频率中心向高频方向移动的大小相等。如果入射光斑分布不对称,则标准具双通道透过率曲线的频率中心向高频方向移动的大小将不等,从而引起双通道峰值间距的变化,这将直接导致风速测量误差。

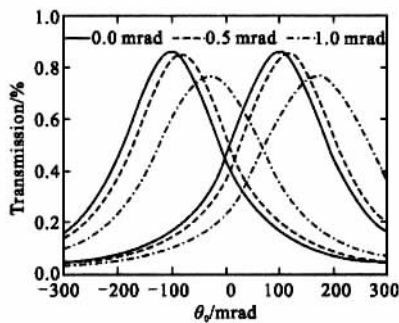


图 3 透过率随发散角变化

Fig.3 Etalon transmission changes with beam divergence

若入射光束呈环状光斑时,设光环内径对应的发散角 θ_1 , 光环外径对应的发散角 $\theta_2=1$ mrad, 并且假设光强在整个入射光斑内均匀分布,标准具透过率可以近似表示为:

$$H_1(\nu) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} h(\theta) \cdot \sin\theta d\theta / \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \quad (3)$$

图 4 显示了星状光斑时,透过率峰值和半高宽(FWHM)随 θ_0 的变化,图 5 显示了环状光斑时,透过率峰值和半高宽随 θ_1 的变化。图 4 中 $\theta_0=1$ mrad 和图 5 中 $\theta_1=0$ mrad 时的透过率曲线参数相同,此时正是入射光斑均匀充满整个标准具平面的情况。

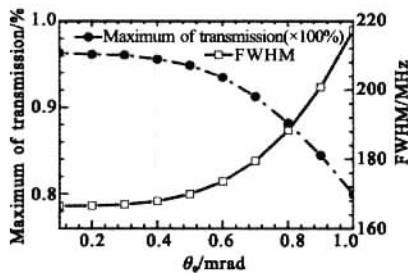


图 4 透过率参数随星状光斑中 θ_0 变化

Fig.4 Transmission parameters change with θ_0

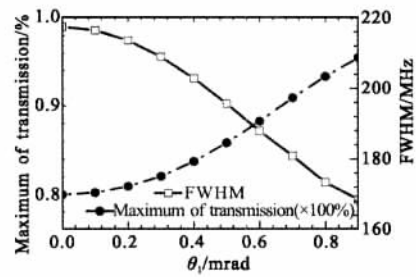


图 5 透过率参数随环状光斑中 θ_1 变化

Fig.5 Transmission parameters change with θ_1

3 数据分析

在光斑尽量均匀的前提下,工作波长 1 064 nm 脉冲光入射,通过扫描 PZT 电压的方式可以测量标准具的透过率曲线。4 个单光子计数探测器(SPCM)的输出结果如图 6 所示:SPCM1 和 SPCM3 对应标准具

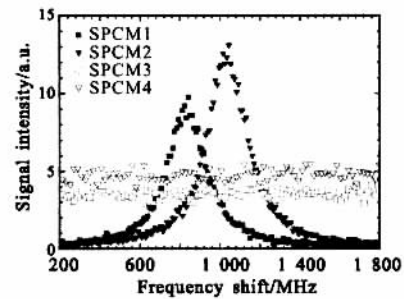


图 6 4 通道探测器输出的光子计数率

Fig.6 Signal intensity of the four channels

的左通道,此时左通道入射光的辐射功率较弱;SPCM2 和 SPCM4 对应标准具的右通道,右通道辐射功率较强。由上述 4 个探测器的输出结果可以分别计算标准具 1、2 通道的透过率曲线,如图 7 所示。对图 7 中的数据采用 Vogit 拟合的结果为:1 通道透过率峰

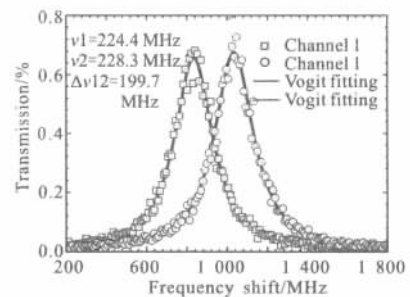


图 7 光斑均匀时双通道标准具的透过率曲线

Fig.7 Transmission curves with uniform illumination

值 65.4%, 半高宽 228.2 MHz, 拟合相关系数 0.991; 2 通道透过率峰值 66.7%, 半高宽 224.4 MHz, 拟合相

关系数 0.989, 双通道频谱间距 199.7 MHz。图 8 是光斑不均匀的情况下测得的透过率曲线: 1 通道透过率峰值 70.2%, 半高宽 229.6 MHz, 拟合相关系数 0.974; 2 通道透过率峰值 68.7%, 半高宽 241.4 MHz, 拟合相关系数 0.977, 双通道频谱间距 225.9 MHz。

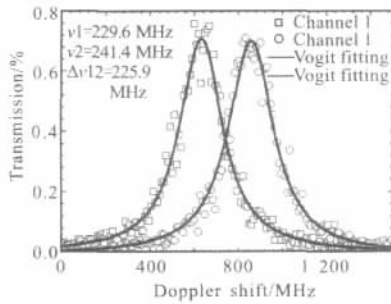


图 8 光斑不均匀时双通道标准具的透过率曲线

Fig.8 Transmission curves with nonuniform illumination

由上述可知: 光斑均匀时测得的透过率曲线更为理想。但是双通道入射光的辐射功率并不相等, 如果能量检测通道未采用双通道光路, 则无法准确测得透过率曲线。

4 数据处理方法

针对基于双 F-P 标准具的直接测风激光雷达, Korb 等人提出了系统的数据反演方法^[10], 由于所采用标准具的结构差异, 并未考虑光斑的影响并简单描述 c_1 、 c_2 、 c_3 为校准常数。为讨论方便, 这里与 Korb 使用相同的符号。系统调试时, 在移除标准具后, 测得能量 1、能量 2、信号 1、信号 2 通道的光能量耦合效率分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 。考虑到入射光斑左右通道非对称性的影响, 风速反演时引入光强分布函数:

$$\eta_i = a_2 \cdot I_{EM1i} / (a_2 \cdot I_{EM1i} + a_1 \cdot I_{EM2i}) \quad (4)$$

式中: i 表示实际测量时的逐个高度分辨单元; I_{EM1i} 、 I_{EM2i} 分别为实际测风时每一高度分辨单元对应的能量 1 通道、能量 2 通道上接收信号的强度。能量检测的总强度可以表示为:

$$I_{EMi} = I_{EM1i} + I_{EM2i} \quad (5)$$

风速反演时, 定义校准变量为:

$$\dot{c}_{1i} = \eta_i \cdot t \cdot a_3, \dot{c}_{2i} = (1 - \eta_i) \cdot t \cdot a_4, \dot{c}_{3i} = (a_1 + a_2) \cdot r \quad (6)$$

式中: r 、 t 为标准具前置分束镜的反射率和透射率。

在以上定义基础上, 使用文中的 \dot{c}_{1i} 、 \dot{c}_{2i} 、 \dot{c}_{3i} 分别代替参考文献[8]中的 c_1 、 c_2 、 c_3 , 则得到考虑光斑分布后的双边缘风速反演公式。

为了说明以上改进的必要性, 2006 年 2 月 2 日晚上进行了两组重复性的对比实验。在 22:00 与 22:20 的两次实验中, 使用扰模器并采用文中提出的考虑光斑分布后的方法反演径向风速; 在 22:10 与 22:30 的两次实验中, 未使用扰模器且仅采用参考文献[8]中 Korb 等人提出的方法反演径向风速。分别对 22:00 与 22:10、22:20 与 22:30 的实验结果进行对比, 如图 9 所示。从两组对比的结果中都能发现, 是否考虑光斑分布对径向风速的反演结果有很大影响。两次实验中, 在 1 km 高度内, 两种方法的平均差别都大于 10 m/s。而同时段 (22:00 ~22:30)、同地点 (117° 41' E, 31° 54' 19' N) 地面中尺度自动站在 30 m 高度测得的风速为 0~0.9 m/s。图 9 中, 240 m 高度处对 22:00 的径向

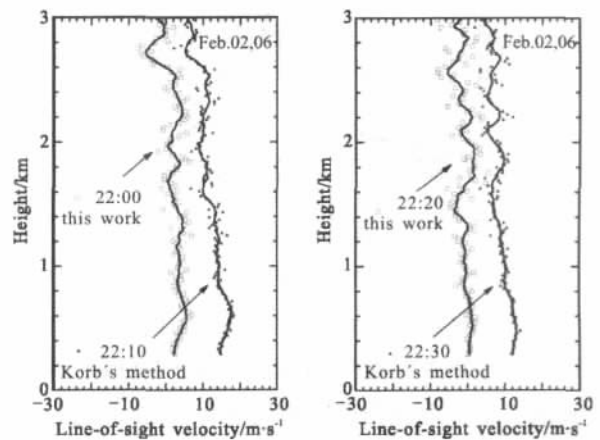


图 9 不同反演方法测得的风速结果

Fig.9 Velocity measurements with different inversion solution

风速反演结果为 1.3 m/s, 22:20 的径向风速结果为 0.2 m/s; 但是, 240 m 高度处对 22:10 的径向风速反演结果达 12.6 m/s, 22:30 反演径向风速的结果为 11.2 m/s, 显然不符合当时的实际情况, 这是因为这两次数据反演中并未考虑光斑影响。通过以上对比可知: 使光斑均匀并在数据反演中引入光斑分布函数后, 反演的风速结果更接近实际情况。然而, 整个高度上测得风速的准确性有待与其他测风方法测得的风速进行比较方可被证。需注意的是: 文中引入光斑分布函数的必要性来源于实验中 F-P 标准具采用双半圆结构, 因而图 9 中的差别并不说明 Korb 等人提出的数据处理方法有误 (Korb 实验中采用的标准具为双圆型结构)。

5 结论

实验发现基于双边缘技术的直接测风激光雷达中, 入射光斑不但影响标准具双通道透过率函数的准

确测量,而且如果不考虑光强分布,风速反演时将会产生较大的误差。通过硬件改进使得光斑均匀并在数据反演时引入光强分布函数,可以减弱这种影响。实验结果表明:当采用光子计数方式测量弱信号时,文中提出的方法使得测量透过率曲线更精确;数据反演时考虑光强分布后,测得水平风速更加接近实际情况。

参考文献:

- [1] MENZIES R T, HARDESTY R M. Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields[J]. Proc IEEE, 1989, 77(3): 449-462.
- [2] REES D, MEDERMID I S. Doppler lidar atmospheric wind sensor: reevaluation of a 355-nm incoherent Doppler lidar[J]. J Appl Opt, 1990, 29: 4133-4144.
- [3] ABREU V J, BARNES J E, HAYS P B. Observation of winds an incoherent lidar detector[J]. J Appl Opt, 1992, 31: 4509-4514.
- [4] CHANIN M L, GARNIER A, HAUCHECORNE A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. J Geophys Res Lett, 1989, 16: 1273-1276.

- [5] 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.
- [6] VAUGHAN J M. The Fabry-Perot Interferometer [M]. Philadelphia: Adam Hilger, 1989.
- [7] HERNANDEZ G. Fabry-Perot interferometers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [8] SUN Dong-song, LIU Dong, XIA Hai-yun, et al. Low tropospheric wind profile from a 1.06 μm Doppler Lidar [J]. Infrared and Laser Engineering (孙东松, 刘东, 夏海运, 等. 1.06 μm 多普勒激光雷达的低对流层风场测量. 红外与激光工程), 2007, 36(1): 52-56.
- [9] 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.
- [10] XIA Hai-yun, SUN Dong-song, ZHONG Zhi-qing, et al. Analysis and performance of the Fabry-Perot etalon for a Doppler direct detection wind Lidar [J]. Laser & Infrared (夏海云, 孙东松, 钟志庆, 等. 测风激光雷达中 F-P 标准具的分析及性能检测. 激光与红外), 2006, 36(1): 29-31.

(上接第 360 页)

位置的变化较大,很难满足系统的设计要求,通过闭环控制后可以达到较好的控制效果,满足系统的设计要求。

5 结论

针对激光测距仪上小角度摆动扫描控制系统的特殊要求,通过采用有限转角无刷直流电机和挠性枢轴连接以及对光栅位置信号进行电学细分和 PID 控制策略,来提高系统的性能。实验表明,对于摆动扫描控制系统,采用此方法可以获得较好的控制效果。针对激光测距摆动扫描控制系统进行了分析仿真与实现,对于更小电流驱动和摆幅更小的控制系统,有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] SOTO-ROMERO G, BONY F, SIMONNE J J, et al. Micro Infrared Earth Sensor project: an integrated IR camera for earth remote sensing [C]//Proceedings of SPIE, Sensors, systems, and Next-Generation Satellites V, 2001, 4540: 176-187.
- [2] ZHAO Jian-hui, LI Xiao-ming, LIU Yan-lei, et al. New algorithm for high accuracy infrared earth wave [J]. Infrared and Laser Engineering (赵建辉, 李晓明, 刘艳雷, 等. 一种高

精度红外地球波算法与硬件实现. 红外与激光工程), 2006, 35: 19-25.

- [3] CHEN Zhi-bin, LIANG Yan. Full-automatic testing technology about resolution of aiming system of laser range finder [J]. Infrared and Laser Engineering (陈志斌, 梁艳. 激光测距机瞄准系统分辨率全自动检测系统. 红外与激光工程), 2004, 33(5): 453-457.
- [4] O' NEIL R R, GIBSON J J. Infrared Earth Limb and Terrestrial Background Measurements from the MSX Satellite, AIAA-2005-267 [R], 2005: 267-274.
- [5] YANG Lei, ZHOU Bai-zhao. Research on the high accuracy oscillating scan technology [D]//Changsha: National University of Defense Technology (杨磊, 周伯昭. 高精度摆动扫描技术研究. 长沙: 国防科学技术大学), 2005.
- [6] QIN He-ping, WAGN Ping. Research on the high accuracy swing scanning and control technology [C]//The Nation Twelfth Space and Motion Control Technique Academic Conference (秦和平, 王萍. 高精度摆动扫描电机与控制系统研究. 全国第十二届空间及运动体控制技术学术年会论文), 2006: 511-516.
- [7] LI Zhi-bin, ZHANG Zhan, WU Hong-xin, et al. The FPGA implementation of adaptive controller for infrared horizon sensor swing scanning device [J]. Journal of Astronautics (李智斌, 张湛, 吴宏鑫, 等. 红外地平仪摆动扫描装置自适应控制器的 FPGA 实现. 宇航学报), 2000, 21(4): 49-54.