第33卷 第10期
2006年10月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol.33, No.10
October, 2006

文章编号: 0258 7025(2006)10 1412 05

应用于测风激光雷达的多普勒校准仪

夏海云[1,2], 孙东松[2], 钟志庆[2], 王邦新[2], 董晶晶[2], 沈法华[1], 陈 敏[1], 周小林[2]
([1] 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006; [2] 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 测风激光雷达作为一种测速工具,系统的多普勒校准是验证测量准确性的关键步骤之一。针对车载、机载测风激光雷达的校准要求,设计了便携式多普勒校准仪。其基本原理是:利用已知目标的运动速度,与激光雷达系统测得的目标运动速度比较,得到系统的速度校准曲线。研制的多普勒校准仪自身系统相对误差为1%,小于激光雷达测量误差;其多普勒散射信号频谱展宽小于0.7 MHz,可以等效为气溶胶的后向散射谱。径向速度的连续调节范围可达±50 m/s。实验结果显示:当探测光子数接近2000时,激光雷达测速的精度为0.6 m/s。

关键词 测量;激光雷达;测风激光雷达;多普勒校准
中图分类号 TN 958.98 文献标识码 A

Design of Verifying Attachment for Calibration of Wind Lidar

XIA Hai-yun[1,2], SUN Dong-song[2], ZHONG Zhi-qing[2], WANG Bang-xin[2], DONG Jing-jing[2], SHEN Fa-hua[1], CHEN Ming[1], ZHOU Xiao-ling[2]
([1] *School of Physical Science and Technology, SooChow University, Suzhou, Jiangsu* 215006, *China*
[2] *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Anhui, Hefei* 230031, *China*)

Abstract Using dual Fabry-Perot (F-P) interferometer as frequency discriminator, direct detection Doppler lidar has been becoming a prominent and popular meteorological technique to measure atmospheric winds. To be a measurement tool, calibration of the system is a key procedure. A portable verifying attachment is designed for the convenient calibration of lidar systems mounted on mobile vehicles. The basic principle is to make a comparison between velocity measured by lidar system and the preset velocity of the revolving disk. The designed relative error of the verifying attachment is 1%, the dynamic range of velocity is greater than ±50 m/s, the maximum spectral broadening corresponds to the designed target has a width of 0.7 MHz, which is approximate to the aerosol circumstance. Lidar experimental results show that an accuracy of 0.6 m/s can be obtained for 2000 detected photons.

Key words measurement; laser lidar; wind lidar; Doppler calibration

1 引 言

测风激光雷达是最近20年发展起来的测量风场信息的新方法,有地基、车载、机载以及星载多普勒测风激光雷达。直接测风激光雷达对气溶胶和大气分子后向散射信号进行测量,其测量范围可以覆盖整个地球空间的对流层和平流层。目前,对测风激光雷达进行校准的主要办法是将测风激光雷达测得的风场数据与同一时间、同一地点微波气象雷达、声雷达或者探空仪测得的风场数据进行比较[1~3]。由于各种测量方法本身存在误差,甚至有些方法的测量精度低于测风激光雷达的测量精度,以上校准较为粗略。另一种方法就是对已知硬目标的速度和测风激光雷达测得的速度进行比较。较早的实验有B. M. Gentry 等的沿直线导轨移动的硬目标[4]以

收稿日期: 2005 12 13; 收到修改稿日期: 2006 05 12
基金项目: 中国科学院知识创新工程基金(Cx0201)和中国科学院百人计划基金(202032403130)资助项目。
作者简介: 夏海云(1980—),男,江苏人,苏州大学物理科学与技术学院硕士研究生,主要从事测风激光雷达方面的研究工作。E mail: Haiyunxia@126.com
导师简介: 孙东松(1962—),男,江苏人,中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员,博士,主要从事激光遥感方面的研究工作。E mail: Dssun@aiofm.ac.cn
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及Z. S. Liu 等的转动硬目标[5]。前者因为机械振动较大，并未对大速度的情形进行校准；后者转盘直径600 mm，距离雷达37.5 m。本文设计的多普勒校准仪因采用全光纤器件，具有稳定、精确、便携、可程序控制等特点，易于对移动式测风激光雷达进行周期性的常规校准工作。

2　直接测风激光雷达原理

基于法布里 珀罗(F-P)标准具的直接测风激光雷达采用双边缘技术，具有高测量精度、高空间分辨率、可反演三维风场信息等特点，成为目前国际上主流的大气风场测量方法之一。

直接测风激光雷达的系统结构如图 1 所示。激光出射后，很少一部分能量的光被分出作为参考光，其余的光经过二维扫描系统指向大气被探测区域。大气后向散射信号经二维扫描系统由望远镜接收并耦合到传输光纤。传输光纤的另一端输入到接收机的准直镜，信号经滤光片，在入射到标准具之前分出一部分作为能量探测并耦合到硅雪崩光电二极管光子计数探测器 SPC1(Single Photon Counter 1)。法布里 珀罗标准具为双通道结构，两通道的透射光由三棱镜分离后分别被耦合到光子计数探测器 SPC2 和 SPC3。探测器的输出信号经采集卡计数后送入计算机进行数据处理。由计算机完成对标准具、采集卡、二维扫描以及激光电源的整体控制。

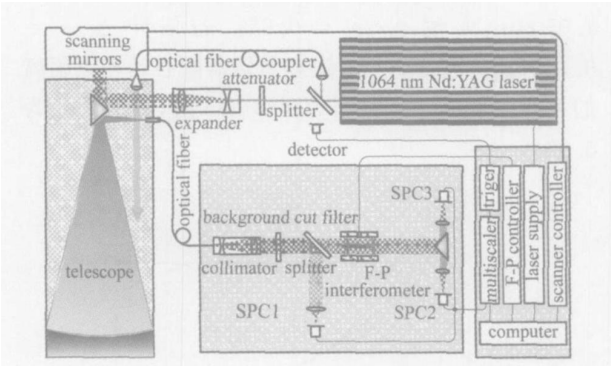

图 1　直接测风激光多普勒雷达结构图

Fig. 1　Schematic of direct detection Doppler lidar

出射激光频率设在双通道对气溶胶后向散射信号的响应曲线的交点位置附近。后向散射信号的多普勒频移 ν_s 为

$$\nu_s = \frac{2v_r}{c}\nu, \tag{1}$$

其中 v_r 为径向风速，c 为光速，ν 为出射激光频率。分别测量大气后向散射信号和出射激光相对于每一个通道的透过率。透过率的变化可以反演多普勒频移 ν_s，从而得到激光束指定方向的径向风速[6]。实际测风时，通过连续扫描的方法，在多个方位角测得径向风速，可反演矢量风场。

3　多普勒校准仪的设计

首先考虑光路是否可以采用收发同置结构。如图 2 所示，工作波长1064 nm时，聚四氟乙烯标准板的半球反射率 $\rho_{2\pi}=0.9716$。圆盘半径 $r=100$ mm，脉冲光束经光阑后呈矩形光斑，高为 $\phi=5$ mm，圆盘中心到光束的距离为 $l=85$ mm。

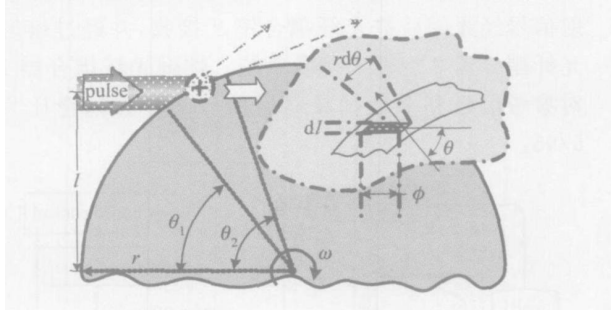

图 2　圆盘边缘被照明的光斑

Fig. 2　Illuminated pattern on the brim of the disk

假设入射光束为平面波，则通量密度 F_i 为

$$F_i = \frac{1}{2}E_i H_i = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\xi}{\mu}}E_i^2, \tag{2}$$

式中 ξ，μ 分别为介电常数和磁导率，E_i 为入射光的电场强度。辐射通量为

$$P_i = F_i \cdot \phi r(\sin\theta_2 - \sin\theta_1), \tag{3}$$

因为圆盘边缘的照度不等，故需采用微分方法。入射到面积元 ϕdl 上的能流密度为

$$d\Phi_i = F_i\phi dl = F_i\phi \cdot \cos\theta \cdot r d\theta, \tag{4}$$

设定向圆锥反射率为 ρ，则探测准直镜接收的后向散射功率为

$$d\Phi_r = \rho d\Phi_i = f_{r,d}\int_{\omega_d}\cos\theta' d\omega_d \cdot d\Phi_i, \tag{5}$$

其中，θ' 为反射面元的法线与探测视线夹角，ω_d 为探测准直镜的接收视场，若假设目标是标准朗伯体，则 $f_{r,d}=\rho_{2\pi}/\pi$。设计估算时，ω_d 很小，在反射面元内 $\cos\theta'$ 可以近似为常数，$\int_{\omega_d}\cos\theta' d\omega_d = \cos\theta' \cdot \omega_d$，且 $\theta=\theta'$，准直镜接收与发射的功率比为

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_i} = \frac{\rho_{2\pi}}{\pi}\omega_d \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2}\cos^2\theta d\theta}{\sin\theta_2 - \sin\theta_1} = -48.5\ \text{dB}。 \tag{6}$$

目前能提供的光纤准直器的最低反射率为

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

-60 dB。若采用收发同置结构，由于准直镜自身反射引起的信噪比 SNR 为 14，对应的径向速度测量误差[7] 为1.78~3.56 m/s。

为了解决以上矛盾，采用发射和接收光路分离结构，如图 3 所示，出射激光束被耦合到 2×1，分束比为 5/95 的熔融光纤耦合器 1 的输入端。实验发现两输入端有较强的串扰信号，可以利用串扰信号作为参考光。参考光经熔融光纤耦合器 2 后输入接收系统的准直镜。在参考信号光路上安装可调衰减器，以调节参考光相对于多普勒信号的强度。光纤耦合器 1 中，另外 95%的输出光经过延时装置后由准直镜输出。出射光经过光阑后照射在转盘的边缘，转盘转动使得散射光发生多普勒频移。部分散射信号经光阑后被光纤耦合镜 2 接收，并经过熔融光纤耦合器 2 后输入接受系统。熔融光纤耦合器 2 对参考信号和多普勒频移后信号的光强耦合比为 5/95。

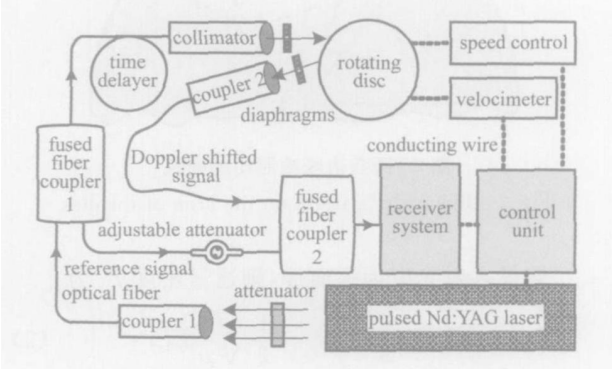

图 3 多普勒校准仪结构原理图

Fig. 3 Schematic of Doppler verifying attachment

表 1 多普勒校准仪系统参数

Table 1 Parameters of the verifying attachment

Item		Value
Motor	Rated rotate speed	6000 r/min
	Rotation control	PWM
Collimator	Beam divergence	9 mrad
	Beam diameter	4.4 mm
	Back reflection	35 dB
	Focal length	11 mm
Slit	Adjustable width	0.1~3.0 mm
Disk (C_2F_4)	Diameter	200 mm
	Height	6 mm

考虑耦合效率，系统中均采用芯径105 μm的多模光纤。光纤各输出端采用斜面 FC/APC(Fiber Connector/Angled Patch Cord)连接器，以降低端面后向反射。多普勒校准仪系统的其他参数如表 1 所示。

通过脉宽调制技术 PWM (Pulse Width Modulation)可以连续调节并设定转盘的正反向转速。考虑系统稳定性，电机运转采用速度补偿模式，转速范围为 300~6000 r/min，若选择转盘圆心到准直镜光轴的距离为 $l=85$ mm，那么在出射光束方向，径向分速的可调范围为±(2.7~53.4) m/s。

因 C_2F_4 材质盘在高速旋转时形变较大，故转盘中心基架采用硬铝材料，边缘镶嵌聚四氟乙烯环。在转盘半径80 mm处安装光电门，使用 8051 单片机电路测量其转速。

记入射光束与圆盘上入射点切线所成的角为 α，径向速度可以表示为

$$v_r = \omega \cdot r \cdot \cos\alpha。 \tag{7}$$

使用 8051 单片机计数测量径向速度，由(7)式可得速度的相对误差

$$\frac{\Delta v_r}{v_r} = \frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\sin\alpha \cdot \Delta\alpha}{\cos\alpha}, \tag{8}$$

其中，角度误差主要来自两方面：实验时的测量误差 $\Delta\alpha_1$，使用线列探测器进行精确调整，使 $\Delta\alpha_1 \leqslant 0.1$ mrad；由于光束有一定宽度，转盘边缘被照射的部分相对圆心角 $\Delta\alpha_2$，它与狭缝宽度、光束发散角、圆心到光束的距离 l 有关。取狭缝宽度为0.8 mm，狭缝到转盘边缘距离为27 mm，光束半发散角为 0.45 mrad，则光束照射转盘边缘的实际宽度为 1.05 mm。实测 $\Delta\omega/\omega = 0.2\%$，若估计 $\Delta r/r = 0.1\%$，径向速度的相对误差与转盘圆心到光束距离的关系如图 4 所示。当 $l=85$ mm 时，相对误差为 0.86%。

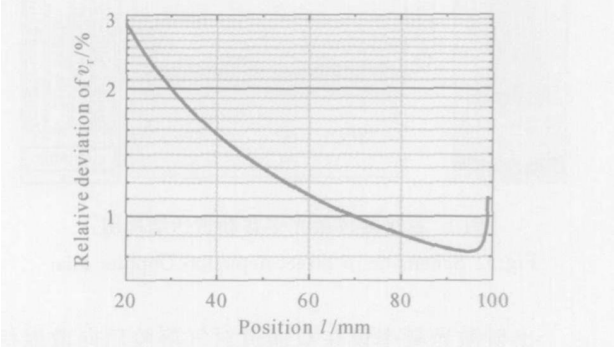

图 4 径向速度相对误差随位置的变化

Fig. 4 Deviation of radial velocity for position l

考虑多普勒频移后散射信号的频谱展宽效应，由公式(1)和(7)得

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\Delta v_s = \frac{2}{\lambda} v_r \cdot \left[\frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta(\cos\alpha)}{\cos\alpha} \right], \quad (9)$$

其中，$\Delta(\cos\alpha)$ 来自三方面：实验时的测量误差 $\Delta\alpha_1$，使用线列探测器进行精确调整，可以使 $\Delta\alpha_1 \leqslant 0.1$ mrad；光束有一定宽度，转盘边缘被照明的弧段对应圆心角 $\Delta\alpha_2$；光纤准直镜出射光束的半发散角 $\Delta\alpha_3 = 0.45$ mrad。如果通过狭缝后照射圆盘边缘的光束宽度记为 Δl，则

$$\Delta(\cos\alpha_1) = \sin\alpha \cdot \Delta\alpha_1, \quad (10)$$

$$\Delta(\cos\alpha_2) = \frac{\Delta l}{2l}, \quad (11)$$

$$\Delta(\cos\alpha_3) = \sin\alpha \cdot \Delta\alpha_3, \quad (12)$$

$$\Delta(\cos\alpha) = \{ \sum_{1}^{3} [\Delta(\cos\alpha_i)]^2 \}^{1/2}, \quad (13)$$

由公式(9) ~ (13) 知，在确定入射位置 d 后，频谱展宽是狭缝宽度和径向速度的函数。当 $l = 85$ mm，$\lambda = 1064$ nm，$\Delta\omega/\omega = 0.2\%$，仍然估计 $\Delta r/r = 0.1\%$ 时，频谱展宽随狭缝宽度和径向速度变化的等高线如图 5 所示。当狭缝宽度小于0.56 mm时，在径向速度 0 ~ ±53.4 m/s 范围内，频谱展宽不大于 0.7 MHz。这与气溶胶的频谱展宽效应类似[8]。

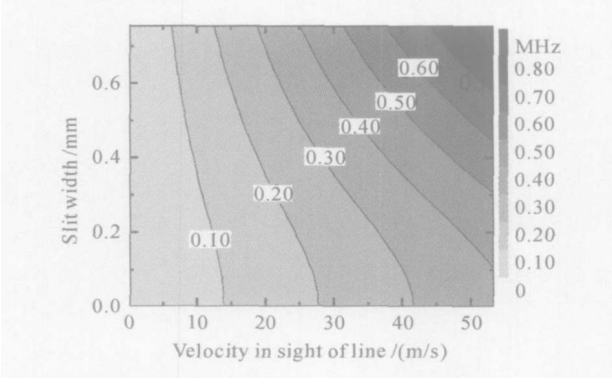

图 5　频谱展宽等高线图

Fig. 5　Contour line of spectral broadening

4　实　验

图 6 为研制的激光测风雷达校准仪的实物照片，是由光纤输入输出的全封闭器件，尺寸为 346 mm×285 mm×175 mm。若选择 10 个速度点进行校准，完成一次校准耗时3.5 min。

实验时，发射光纤准直镜、接收光纤准直镜的光轴与切线速度夹角的余弦值分别为 $\cos\alpha = 0.826$ 和 $\cos\theta = 0.979$，则由方程(1) 可得测速激光雷达测得转盘的边缘速度 v 为

$$v = -\frac{\lambda_0}{\cos\alpha + \cos\theta} \Delta\nu, \quad (14)$$

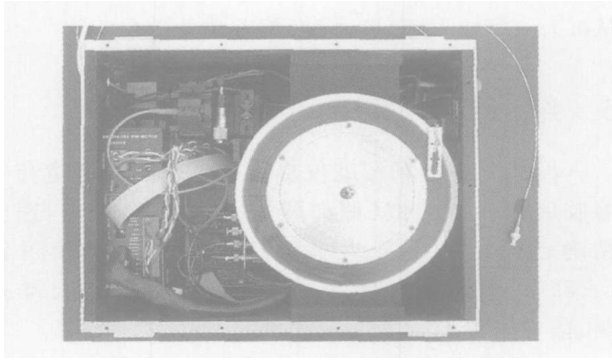

图 6　校准仪实物照片

Fig. 6　Photo of the verifying attachment

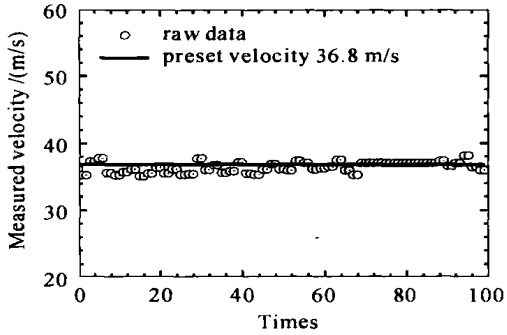

图 7　对某一设定速度的测量结果

Fig. 7　Measured result for a preset velocity

由校准仪的测速装置测得的边缘速度为

$$v = \omega r = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot r, \quad (15)$$

其中 n 为实测转速。当探测累计光子数接近 2000 时，激光雷达对某一设定速度进行 100 次测量的结果如图 7 所示。设定速度为36.8 m/s，测得速度平均值为36.4 m/s，标准偏差为0.7 m/s。

对多个设定速度进行测量的结果如图 8 所示，线形拟合的斜率值为1.01，各点偏离拟合曲线的值

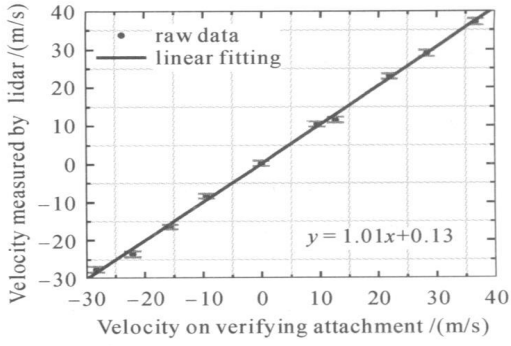

图 8　比较实验结果得出的校准曲线

Fig. 8　Calibration curve obtained by comparision between two results

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从0.1~0.9 m/s变换，标准偏差值为0.6 m/s。

5 结 论

设计的多普勒校准仪提供了一个频谱展宽与气溶胶展宽特性类似(频谱展宽小于0.7 MHz)，速度精确已知(相对误差小于1%)，速度连续可调(±50 m/s)的硬目标。并且开发了相应的自动控制、信号采集及数据处理软件。

由于采用全光纤器件搭建光路，系统具有全封闭性、高稳定性、结构紧凑的特点，易于对地基、车载、机载测风激光雷达进行周期性校准。对已建成的地基测风激光雷达校准结果显示：在累计光子数接近2000时，测风激光雷达的测量精度可达0.6 m/s。

参 考 文 献

1 Matthew J. McGill, Wilbert R. Skinner, Todd D. Irgang. Validation of wind profiles measured with incoherent Doppler lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(9): 1928~1939

2 Stephen A. Chou, R. Kent Gooderich. Radar wind profiler radial velocity: A comparison with Doppler lidar [J]. *J. Appl. Meteorology*, 2002, **41**(2): 1277~1282

3 Bruce M. Gentry, Huailin Chen, Steven X. Li. Wind measurements with 355 nm molecular Doppler lidar [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1231~1233

4 Bruce M. Gentry, C. Laurence Korb. Edge technique for high accuracy Doppler velocimetry [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5770~5777

5 Z. S. Liu, W. B. Chen, T. L. Zhang *et al.*. An incoherent Doppler lidar for ground-based atmospheric wind profiling [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **64**: 561~566

6 C. Laurence Korb, Bruce M. Gentry, S. Xingfu Li *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3097~3104

7 Dongsong Sun. Mie-Reyleigh Doppler wind lidar with two double-edge interferometers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(4): 296~300

8 G. Benedetti-Michelangeli, F. Congeduti, G. Fiocco. Measurement of aerosol motion and wind velocity in the lower troposphere by Doppler optical radar [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 906~910

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net