

文章编号: 1001-4322(2008)06-0881-04

瑞利散射多普勒测风激光雷达的校准*

沈法华¹, 顾江², 董晶晶¹, 杨洋³, 孙东松¹(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 常熟理工学院物理与电子科学系, 江苏常熟 215500;
3. 承德石油高等专科学校, 河北承德 067000)

摘要: 在进行实际风速测量之前,对于新研制的测风激光雷达系统进行校准,可以验证并提高风速测量的准确性。根据瑞利散射多普勒激光雷达的测量原理,提出了利用瑞利散射谱和米散射谱之间的关系,采用运动硬目标实现对瑞利散射多普勒测风激光雷达进行校准的方法。设计了对瑞利散射多普勒测风激光雷达进行校准的实验系统,并给出了详细的校准步骤。

关键词: 瑞利散射; 多普勒频移; 测风激光雷达; Fabry-Perot 标准具; 校准**中图分类号:** TN958.98**文献标识码:** A

大气风场的测量在改进数值天气预报模型、提高天气预报的准确性、保障飞机和船只的安全、保障工农业生产安全、大气动力学与气候学的研究、空气质量预报等方面具有重要的意义。测风激光雷达则是目前进行大气风场测量的最有效的工具之一,国内外已研制了多台测风激光雷达系统^[1-4]。为了保证激光雷达风场测量的准确性,需要对其进行正确合理的定标。而对于瑞利散射测风激光雷达,由于大气分子后向散射谱的特殊性,直接对其风速标定比较困难,在考虑频移量产生的同时还需要考虑目标散射谱和大气分子散射谱的一致性。卜令兵等人提出利用声光频移器产生多普勒频移量、构建气室作为散射目标的方法^[5]。本文利用瑞利散射谱和米散射谱之间的关系,通过实验与理论相结合的方法可以比较方便简捷地对瑞利散射多普勒测风激光雷达进行校准。

1 瑞利散射多普勒测量原理

基于双边缘技术的瑞利散射多普勒测量基本原理如图1所示,双 Fabry-Perot 标准具频谱分别位于瑞利散射光谱的两翼,初始发射激光频率锁定在两个标准具频谱的交叉点附近。多普勒频移前后两个标准具的输出信号不同,根据两个标准具输出信号比值的变化可以确定后向散射信号的多普勒频移量。

由图1可知,标准具的输出光信号是瑞利散射信号和米散射信号之和。如果使入射到每个标准具的信号相同,分别用 I_R 和 I_M 表示瑞利散射信号光强和米散射信号光强,则两个标准具的输出信号为

$$I_i(\nu) = I_R f_R(\nu) \otimes h_i(\nu - \nu_i) + I_M f_M(\nu) \otimes h_i(\nu - \nu_i) \quad (1)$$

式中: \otimes 表示卷积; h_i 为标准具透过率函数, $i=1, 2$ 为通道数; $f_M(\nu)$ 为气溶胶后向散射谱; $f_R(\nu)$ 为分子后向散射谱。

定义频谱响应函数为两个标准具输出光信号的比值,即

$$R(\nu_D) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_R T_{1,R}(\nu_1 + \nu_D) + I_M T_{1,M}(\nu_1 + \nu_D)}{I_R T_{2,R}(\nu_1 + \nu_D) + I_M T_{2,M}(\nu_1 + \nu_D)} \quad (2)$$

式中: $T_{1,M}$, $T_{1,R}$ 分别为米散射信号和瑞利散射信号经过标准具的透过率函数; $T_{i,M}(\nu) = f_M(\nu) \otimes h_i(\nu - \nu_i)$;

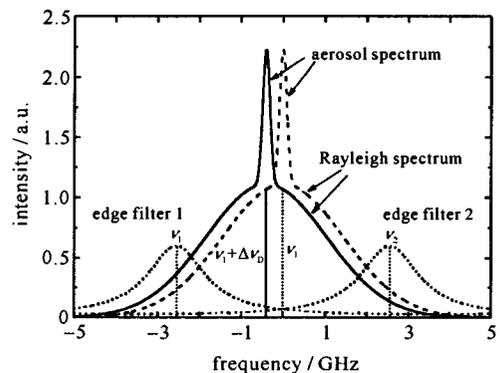


Fig. 1 Principle of Doppler shift measurement based on double edge technique for Rayleigh backscatter

图1 基于双边缘技术的瑞利散射多普勒测量原理

* 收稿日期:2007-10-10; 修订日期:2008-05-04

基金项目:河北省自然科学基金资助课题(D2006000659)

作者简介:沈法华(1981—),男,汉族,江苏盐城人,博士研究生,主要从事测风激光雷达研究; sfh81914@tom.com.

$T_{1,R}(\nu) = f_R(\nu) \otimes h_i(\nu - \nu_i)$; ν_i 和 ν_D 分别是发射激光中心频率和多普勒频率。

比值 R 在小的多普勒范围内近似成线性, 则径向风速为

$$v_r = S(\nu_D) / \theta_\nu \tag{3}$$

式中: $S(\nu_D) = [R(\nu_D) - R(0)] / R(0)$, 为响应函数相对改变量; $\theta_\nu = [2 / \lambda R(\nu)] dR(\nu) / d\nu$, 为 R 的速度灵敏度。

2 瑞利散射多普勒激光雷达校准方法

2.1 理论分析

频率为 ν 的激光由光纤耦合至准直系统后, 发散角为 $2\theta_0$, 其入射到标准具的透过率函数为^[6]

$$h(\nu) = \frac{2}{\theta_0^2} \int_0^{\theta_0} \frac{T_0 \theta d\theta}{1 + 4(\nu_{FSR} / \pi \Delta\nu_{1/2})^2 \sin^2(\pi \nu \cos\theta / \nu_{FSR})} \tag{4}$$

式中: T_0 为标准具峰值透过率; ν_{FSR} 为标准具的自由谱范围; $\Delta\nu_{1/2}$ 为标准具频谱半高宽。

气溶胶和分子后向散射谱近似为高斯谱, 分别为^[6]

$$f_M(\nu) = (1 / \pi \Delta\nu_i^2)^{1/2} \exp(-\nu^2 / \Delta\nu_i^2) \tag{5}$$

$$f_R(\nu, T_a) = [1 / \pi(\Delta\nu_i^2 + \Delta\nu_r^2)]^{1/2} \exp[-\nu^2 / (\Delta\nu_i^2 + \Delta\nu_r^2)] \tag{6}$$

式中: $\Delta\nu_i = \delta\nu / \sqrt{4 \ln 2}$, $\delta\nu$ 为激光发射谱宽; $\Delta\nu_r = (8kT_a / M\lambda^2)^{1/2}$, k 为玻耳兹曼常数, T_a 为大气分子的温度, M 为分子质量。由于气溶胶散射谱增宽很小, 故近似等于激光发射谱。

由高斯函数卷积的性质及式(5), (6)得

$$f_R(\nu, T_a) = f_M(\nu) \otimes G(\nu, T_a) \tag{7}$$

其中: $G(\nu, T_a) = (1 / \pi \Delta\nu_r^2)^{1/2} \exp(-\nu^2 / \Delta\nu_r^2)$, 所以

$$T_{i,R}(\nu, T_a) = T_{i,M}(\nu) \otimes G(\nu, T_a) \tag{8}$$

图 2 给出了米散射信号经过标准具的透过率函数, 以及利用式(8)得出在特定温度下的瑞利散射光经过标准具的透过率函数。由于研制的瑞利散射多普勒激光雷达用于测量 20~40 km 高度的大气风场, 而在高层大气, 气溶胶成分非常少, 主要是以运动的大气分子作为探测对象, 另一方面, 通过理论优化计算得出, 当实际标准具参数为 $\Delta\nu_{1/2} = 1.7$ GHz, $\nu_{FSR} = 12$ GHz 以及两个标准具的峰值间隔为 5.1 GHz 时, 气溶胶散射和瑞利散射的速度灵敏度在 20~40 km 高度和风速测量动态范围内近似相等, 这时响应函数 R 将基本不受气溶胶信号的影响, 为 $R_R = T_{1,R} / T_{2,R}$; 反之, 在对多普勒激光雷达速度校准时, 常用的方法是采用已知速度的运动硬目标(如转动的转盘)作为散射目标, 而硬目标散射信号谱可以近似为纯气溶胶后向散射谱, 此时响应函数为 $R_M = T_{1,M} / T_{2,M}$, 所以要用硬目标对瑞利散射多普勒测风激光雷达进行校准或定标, 就必须利用瑞利散射谱和气溶胶散射谱之间的相互关系。图 3 给出了纯瑞利散射和纯米散射的频率响应函数, 对应的纯瑞利散射和纯米散射的速度灵敏度 θ_{v-R} 和 θ_{v-M} 如图 4 所示。定义

$$\Delta S(\nu_D) = S_R(\nu_D) - S_M(\nu_D) \tag{9}$$

式中: $S_R(\nu_D)$ 和 $S_M(\nu_D)$ 分别为纯瑞利散射和纯米散射时的响应函数相对改变量, 图 5 给出了 ΔS 和 S_M 的函数关系图。实际校准测量中得到的是纯米散射的响应函数相对改变量 S_M , 通过 ΔS 和 S_M 的函数关系就可以得

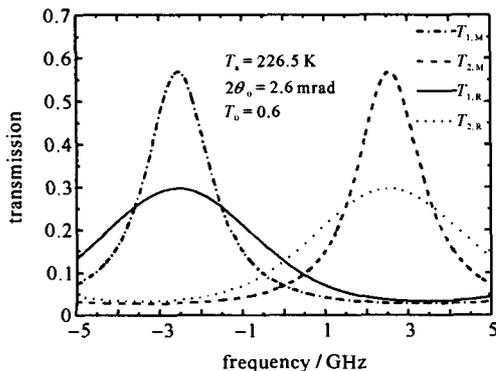


Fig. 2 Etalon response for aerosol and molecular backscatters

图 2 米散射信号和瑞利散射信号通过标准具的透过率

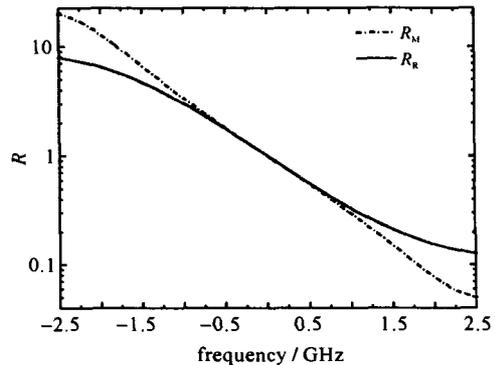


Fig. 3 Frequency response for Rayleigh and Mie backscatters, respectively

图 3 纯瑞利散射和纯米散射的频率响应函数

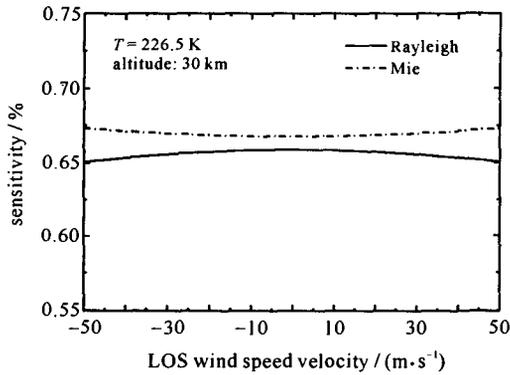


Fig. 4 Velocity sensitivity for pure Rayleigh and Mie backscatters

图 4 纯瑞利散射和纯米散射的速度灵敏度

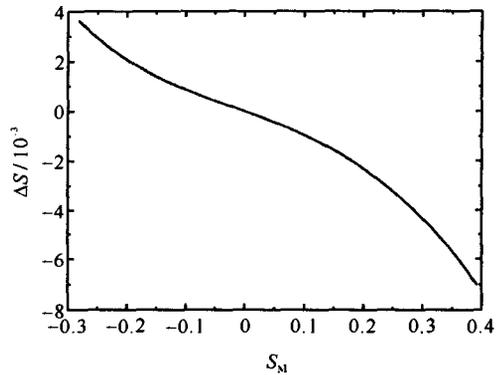


Fig. 5 Relationship between ΔS and S_M

图 5 ΔS - S_M 的函数关系图

出 S_R , 则根据式(3), (9)得

$$v_r = (S_M + \Delta S) / \theta_{vR} \tag{10}$$

这样利用式(8), 从米散射谱的透过率算得瑞利散射谱的透过率, 进而得到纯瑞利散射的速度灵敏度, 以及由纯米散射的响应函数相对改变量得出纯瑞利散射的响应函数相对改变量, 再由式(10)可得到径向速度。

2.2 校准系统设计

多普勒激光雷达校准系统的设计如图 6 所示。激光器发射 355 nm 的脉冲激光通过分束镜后, 大部分光能耦合至发射光纤, 通过发射准直器入射到一个转速可控的转盘边缘, 散射光通过接收准直器耦合到接收光纤, 先经过 50 m 的光纤延时, 再经过 1×2 光纤一端和准直系统入射到标准具的两个边缘通道, 测量出发射激光初始频率 ν_0 对应的响应函数 $R_M(\nu_D)$; 一小部分光作为参考光直接由 1×2 光纤另一端进入到标准具的两个边缘通道, 测量出发射激光初始频率 ν_0 对应的响应函数 $R_M(0)$, 则可根据式(10)可求得多普勒频移量 ν_D 对应的径向速度 v_r 。另外有一小部分光进入到另一个 1×2 光纤一端, 利用光纤的后向散射将脉冲光展宽成连续光, 从 1×2 光纤另一端经过准直系统入射到标准具的锁定通道, 用来锁定发射激光频率。根据光的多普勒频移公式可得转盘边缘的线速度为

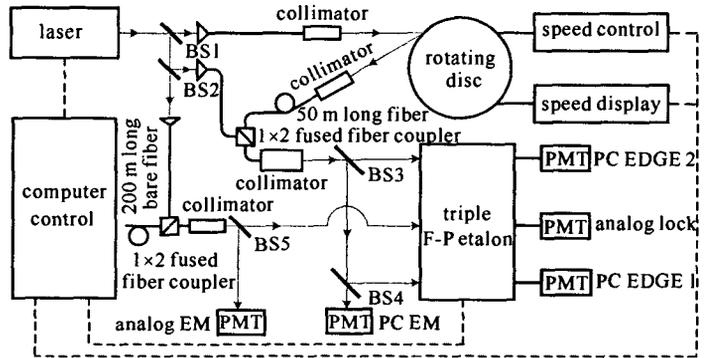


Fig. 6 Schematic of the Doppler lidar verifying instrument

图 6 多普勒激光雷达校准系统工作原理图

其中 θ, α 分别为发射准直器和接收准直器轴线与转盘切向速度的夹角, 其事先可测得。再利用关系式 $\nu_D = 2v_r/\lambda$ 和式(10), 式(11)变为

$$v = \lambda \nu_D / (\cos\alpha + \cos\theta) \tag{11}$$

$$v = 2(S_M + \Delta S) / (\cos\alpha + \cos\theta) \theta_{vR} \tag{12}$$

另一方面, 转盘转动频率 f 可用电子学 M/T 测速方法测量, 则转盘边缘的线速度为

$$v_0 = 2\pi r f \tag{13}$$

式中: r 为转盘半径。通过改变转盘转速测量一系列的 (ν_0, v) , 可以作出两者的相关图, 通过实验结果就可以对雷达系统进行校准。

2.3 校准步骤

对于 Fabry-Perot 标准具, 改变标准具的腔长等效于改变发射激光频率, 实际的标准具由 3 个压电陶瓷 (PZT) 控制 (X, Y 调制调节标准具两个平板的平行度, Z 调制调节腔长)。实验中直接用脉冲光作为入射光源, 利用信号发生器的三角波作为 PZT 的输入电压 (Z 调制信号) 扫描标准具的腔长。对采集到的边缘通道的两列离散数据能量归一化之后, 拟合得到脉冲光经过标准具的透过率函数, 即等于气溶胶散射光经过标准具的透过率函数 $T_{i,M}(\nu)$, 其理论曲线如图 2 点画线所示, 然后根据式(8)算得在特定温度下的瑞利散射光经过标准具的透过率函数 $T_{i,R}(\nu)$, 如图 2 实线所示。再根据透过率函数进一步算得纯气溶胶散射和纯瑞利散射时的频率

响应函数 R_R 和 R_M 及其响应函数的相对改变量 S_R 和 S_M , 进一步求得 R_R 的速度灵敏度 θ_{-R} 及 S_M 和 ΔS 的函数关系, 分别如图 3~5 所示。预设一个转盘转速, 通过实验测得 $R_M(0)$ 和 $R_M(v_D)$, 求得 S_M , 与测得的 θ, α 一并代入到式(12)算得转盘边缘的线速度 v ; 另一方面, 用电子学的方法测得转盘边缘的线速度 v_0 , 逐步改变转盘转速测量一系列的 (v_0, v) 对雷达系统进行校准。对瑞利散射测风激光雷达的校准流程图如图 7 所示。

3 结论

要得到已知速度且速度可连续改变的、具有瑞利散射谱特征的散射目标比较困难, 所以对于瑞利散射测风激光雷达, 直接对其进行校准具有很大的难度。利用瑞利散射谱和米散射谱之间的理论关系, 采用速度可控的运动硬目标, 可以间接地实现对瑞利散射多普勒激光雷达校准。该方法避开了直接定标所遇到的困难及校准系统复杂性可能引入的系统误差, 因此比较简单适用。

参考文献:

- [1] Garnier A, Chanin M L. Description of a Doppler Rayleigh lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Appl Phys B*, 1992, **55**: 35-40.
- [2] Gentry B M, Chen H L, Steven X L. Wind measurements with 355 nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(17):1231-1233.
- [3] Irgang T D, Hays P B, Skinner W R. Two-channel direction-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(6):1145-1155.
- [4] Sun D S, Zhong Z Q, Zhou J, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar[J]. *Opt Rev*, 2005, **12**(5):409-414.
- [5] 卜令兵, 陈卫标, 刘继桥. 瑞利测风激光雷达的标定装置: 中国, ZL200520045040.4[P]. 2006-12-27. (Bu L B, Chen W B, Liu J Q. Verifying attachment for calibration of Rayleigh wind lidar; China, ZL200520045040.4. 2006-12-27)
- [6] 夏海云, 孙东松, 沈法华, 等. 双边缘技术多普勒测风激光雷达标准具的优化[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(11):1774-1778. (Xia H Y, Sun D S, Shen F H, et al. Optimization of etalon parameters in direct detection Doppler wind lidar. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11):1774-1778)

Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar

SHEN Fa-hua¹, GU Jiang², DONG Jing-jing¹, YANG Yang³, SUN Dong-song¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China;

2. Department of Physics and Electronics Science, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

3. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China)

Abstract: Before making wind measurements, it is vital to calibrate the new developed Doppler wind lidar system, which can demonstrate and improve the validity of the lidar system. Based on the principle of wind measurement, a new method for the calibration of Rayleigh Doppler wind lidar taking advantage of the relationship between Rayleigh scattering spectrum and Mie scattering spectrum is proposed. This method uses a moving hard target to calibrate the Rayleigh Doppler wind lidar. The experimental system is designed for Rayleigh Doppler lidar calibration and the detailed processes are given as well.

Key words: Rayleigh scattering; Doppler shift; Wind lidar; Fabry-Perot etalon; Calibration

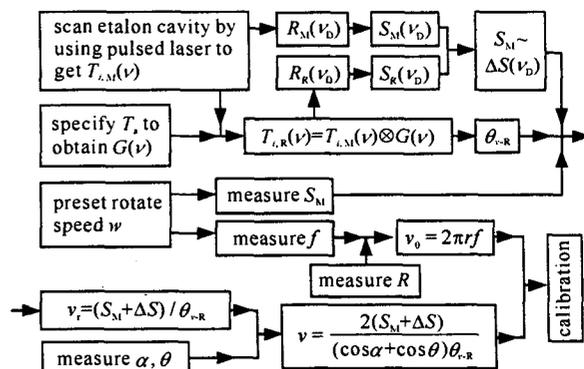


Fig. 7 Flow chart of the calibration for Rayleigh Doppler wind lidar

图 7 瑞利散射测风激光雷达校准流程图