

多普勒测风激光雷达数据处理方法分析

王邦新¹, 孙东松¹, 钟志庆¹, 夏海云², 沈法华², 周小林¹, 董晶晶¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 介绍了基于双 Fabry-Perot 标准具的测风激光雷达的工作原理, 分析了大气分子散射对风速测量的影响, 并给出了相应的数据处理方法。模拟并分析了两种不同迭代初值在 1~3 次迭代时产生的系统测量误差, 给出了 1 km 和 5 km 处风速的测量误差。利用自行研制的一台多普勒测风激光雷达对合肥地区对流层风场进行测量, 并用两种方法处理了实验数据。结果表明, 改进的数据处理方法是切实可行的。

关键词: 激光雷达; 米散射; 瑞利散射; 风; 数据处理

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)03-0373-04

Analysis of data processing method for Doppler wind lidar

WANG Bang-xin¹, SUN Dong-song¹, ZHONG Zhi-qing¹, XIA Hai-yun²,SHEN Fa-hua², ZHOU Xiao-lin¹, DONG Jing-jing¹

(1. Institute of Anhui Optics and Fine Mechanics, Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The measured principle of Doppler wind lidar based on a dual Fabry-Perot etalon is described. The effect of atmospheric molecular scattering on the measurement of wind speed are analyzed, and the corresponding data processing methods are shown. Measured error with 1~3 times iterative of two difference iterative values are simulated and analyzed. The measurement errors of wind speed at 1 km and 5 km altitude are given. The Doppler wind lidar developed by ourselves is used to measure the troposphere wind field in Hefei and the experimental datum are processed using two different methods. Results indicate that the improved method is feasible.

Key words: Lidar; Mie scattering; Rayleigh scattering; Wind; Data processing

0 引言

自 1964 年 Yeh 和 Cummins 首次证实利用激光多普勒技术(LDV)可测定水流速度后^[1], 多普勒激光雷达已逐步成为精确测量三维风场的强有力工具^[2]。目前可以采用相干探测和非相干探测(直接探测)两种方法来实现对多普勒频移量的测量。相干探测是利用散射的多普勒频移信号与激光本征频率信号在探测器上进行差拍的原理, 对产生的差频信号进行处理分

析得到多普勒频率; 直接探测是光信号直接入射到高分辨率的干涉滤光器中进行多普勒频率检测。从全球风场的测量来看, 直接探测多普勒激光雷达技术相对相干技术来说存在一定的优势^[3]。直接探测多普勒激光雷达主要采用边缘检测^[4-5]和条纹图像^[6]两种频移测量技术。边缘检测技术采用最多的是 Fabry-Perot 干涉仪^[7-9]。

描述了基于双 Fabry-Perot 标准具的测风激光雷

收稿日期: 2006-10-20; 修订日期: 2006-12-10

基金项目: 中国科学院百人计划资助项目(202032403130); 中国科学院知识创新工程资助项目(CX0201)

作者简介: 王邦新(1979-), 男, 山东安丘人, 硕士生, 主要从事多普勒测风激光雷达的研究工作。Email: bxwang@163.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, 主要从事多普勒测风激光雷达的研究。Email: dssun@aiofm.ac.cn

达的工作原理、大气分子散射对风速测量的影响以及数据处理的方法。改进了 Korb 提出的处理方法,并比较了两种处理方法引起的测量误差。理论模拟了实际接收信号的风速测量误差,并给出了初步的测量结果,论证了数据处理方法的有效性。

1 测风原理

激光雷达向大气发射激光脉冲,并接收大气的后向散射回波信号。由于风的作用,接收的大气后向散射回波信号(包含气溶胶散射信号和大气分子散射信号)相对于发射激光频率产生一定的多普勒频移,该多普勒频移与激光雷达径向风速之间的关系为:

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

式中: V_r 是径向风速; λ 是激光波长, $\Delta\nu$ 是多普勒频移。

测风的基本原理如图 1 所示。两个高精度高分辨率的标准具 Etalon-1 和 Etalon-2 的频谱中心分开一定的频率间隔,出射激光频率标定在两个标准具频谱的交叉点上。发射的激光脉冲经过大气中运动的分子和气溶胶散射,被望远镜接收随即进入双标准具检测系统。如果多普勒频移为零或风速为零时,两个标准具的输出信号相等;当后向散射信号存在多普勒频移时,通过两个标准具的输出信号强度就存在一定的差值,由该差值就可以得到多普勒频移。

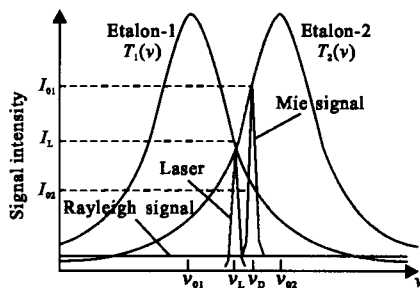


图 1 气溶胶散射信号测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of the aerosol backscattered signal measurement

在只考虑气溶胶后向散射信号的前提下,定义两标准具的透过率之比为:

$$R(\Delta\nu) = \frac{T_2(\nu_2 + \Delta\nu)}{T_1(\nu_1 + \Delta\nu)} \tag{2}$$

式中: $T_1(\nu)$ 和 $T_2(\nu)$ 分别为标准具透过函数和气溶胶后向散射谱的卷积; ν_1 和 ν_2 是发射激光中心频率 ν_L 分别与两个标准具频谱中心 ν_{01} 和 ν_{02} 的距离, $\nu_1 = \nu_L - \nu_{01}$, $\nu_2 = \nu_L - \nu_{02}$; $\Delta\nu$ 为多普勒频移。径向风速可改写为:

$$V_r = \frac{\lambda}{2} R^{-1}(\Delta\nu) \tag{3}$$

式中: $R^{-1}(\Delta\nu)$ 表示 $R(\Delta\nu)$ 的反函数。

2 数据处理方法及其分析

由于大气后向散射信号中含有气溶胶后向散射信号和大气分子后向散射信号,为了减小测量误差,应该扣除大气分子后向散射的影响。以下分别给出了大气分子后向散射对测量风速的影响以及相应的数据处理方法和误差分析。

2.1 大气分子后向散射对测量结果的影响

望远镜接收到的大气后向散射信号含有气溶胶后向散射信号和大气分子散射信号两部分。图 2 给出了温度为 230 K,大气分子后向散射系数与气溶胶后向散射系数相同时,分子散射和气溶胶散射信号在两个标准具上的透过率曲线。可以看出,分子散射信号的透过率在 15%~20%之间变化。图 3 给出了大气分

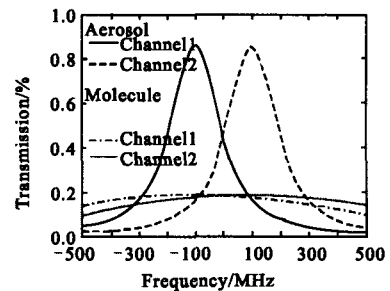


图 2 分子散射和气溶胶散射信号的透过率曲线

Fig.2 Transmittance curves of molecular and aerosol signal

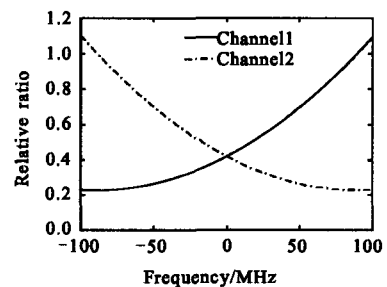


图 3 分子散射信号与气溶胶信号的比值

Fig.3 Ratio of molecular backscattered and aerosol signal

子散射信号透过率与气溶胶后向散射信号透过率的比值。图中实线和点划线分别为两种信号在 Etalon-1 和 Etalon-2 上的透过率之比。由于此时大气分子后向散射系数与气溶胶后向散射系数相同,图中实际给出了瑞利散射信号与气溶胶后向散射信号的比值。在可探测的速度动态范围内,比值在 20%~110%之间变化,因此不能把瑞利散射信号简单看成是一个不变的背景信

号,在数据处理过程中需要扣除。

2.2 数据处理方法

根据 Korb 提出的理论公式^[10]有:

$$\begin{cases} I_{S1} = I_A(\Delta v)T_1(v_1 + \Delta v) + I_M(\Delta v)f_1 I_R(v_1 + \Delta v) \\ I_{S2} = I_A(\Delta v)T_2(v_2 - \Delta v) + I_M(\Delta v)f_2 I_R(v_2 - \Delta v) \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{S1} 和 I_{S2} 为实际接收的两个信号通道的信号强度; I_M 为回波信号中的大气分子散射信号的强度; T_1 和 T_2 为气溶胶信号在两标准具上的透过率; f_1 和 f_2 为分子散射频谱与两标准具透过率峰值重合时,分子散射频谱与标准具透过率函数的卷积; I_R 为分子散射频谱的响应值。公式(4)后半部分为实际接收信号中瑞利后向散射信号的贡献。

$$R(\Delta v) = \frac{I_{S2} - I_M(\Delta v)f_2 I_R(v_2 - \Delta v)}{I_{S1} - I_M(\Delta v)f_1 I_R(v_1 + \Delta v)} \quad (5)$$

可以看出,分式的分子和分母都已经扣除了瑞利散射信号的影响,由于 Δv 是要求解的结果,故采用迭代的方法来逐次扣除瑞利信号求解多普勒频移量。迭代的步骤为:

- (1) 选择适当的 Δv 初值,代入公式(5)求得多普勒频移 Δv , 作为一阶 $\Delta v^{(1)}$;
- (2) 把 $\Delta v^{(1)}$ 代回公式(5), 计算得到二阶多普勒频移 $\Delta v^{(2)}$;
- (3) 返回第二步继续迭代。

迭代直至多普勒频移收敛于某一点。

2.3 迭代初值的选取及误差分析

实际处理过程中,选择合理的迭代初值是至关重要的。Korb 在处理中采用迭代初值为 $\Delta v=0$ 的方法,改进后采用迭代初值 $\Delta v = R^{-1}(I_{S2}/I_{S1})$ 。下面对两种迭代初值引起的处理误差进行模拟。

模拟中假设发射激光脉冲的频率初值位于两标准具透过率交叉处,且利用表1中给出的激光雷达的系统参数,给出了对应的处理误差,如图4所示。

模拟中,假设大气温度为 230 K,大气分子后向散射系数与气溶胶后向散射系数相同。图4(a)和(b)分别给出了迭代初值 $\Delta v=0$ 和 $\Delta v = R^{-1}(I_{S2}/I_{S1})$ 时数据处理过程引入的风速误差。图中,点划线、虚线和实线分别表示一次迭代、二次迭代和三次迭代的情况。当迭代初值为 $\Delta v=0$ 时,二次迭代和三次迭代的速度误差分别小于 0.7 m/s 和 0.15 m/s; 迭代初值为 $\Delta v = R^{-1}(I_{S2}/I_{S1})$ 时,二次迭代和三次迭代的速度误差分别小于 0.2 m/s 和 0.03 m/s。后者明显优于前者,下面采用后

者进行模拟分析。

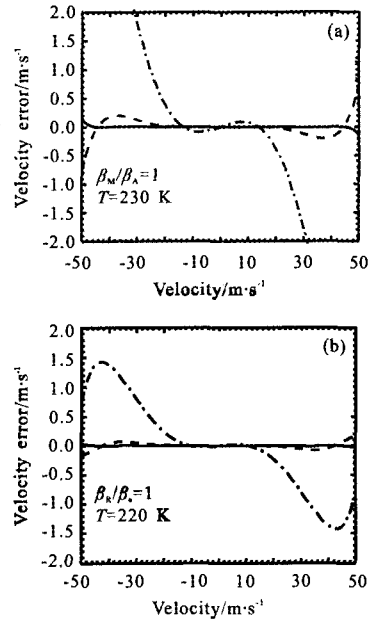


图4 两种迭代初值引起的速度误差
Fig.4 Velocity error of two difference iterative values

表1 测风激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters of the Doppler wind lidar system

System parameter	Value
Wavelength	1 064 nm
Energy	200 mJ/pulse
Scanning angle	45°
Spatial resolution	30 m
Aperture	300 mm
Receiver FOV	0.15 mrad
Coefficient	50%
Bandwidth	0.5 nm
Quantum coefficient	18% @ 1 064 nm

根据雷达系统参数,采用1976年美国大气标准和晴天气溶胶模型^[11],数值估算了1 km 和 5 km 处实际接收信号的风速测量误差,如图5所示。

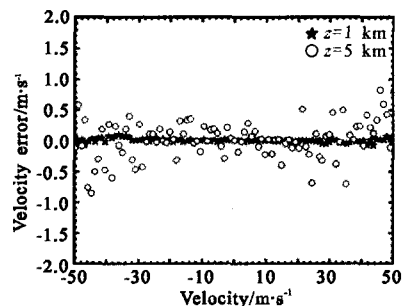


图5 1 km 和 5 km 处风速的测量误差
Fig.5 Measurement errors of wind speed at 1 km and 5 km altitude

估算中采用 200 个激光脉冲累计, 选择迭代初值为 $\Delta v = R^{-1}(I_{S2}/I_{S1})$ 进行了二次迭代。可以看出, 在 1 km 和 5 km 处风速测量误差分别小于 0.2 m/s 和 1 m/s, 满足系统风速误差为 1.5 m/s 的设计要求。

3 对流层风场的初步测量结果

中国科学院安徽光学精密机械研究所已建成了采用上述原理的多普勒测风激光雷达。该激光雷达以 45° 天顶角指向大气层, 并从正东方向开始间隔 120° 顺时针依次测量三个方位的径向风速, 从而得到水平风速廓线。图 6 给出了该激光雷达在 2006 年 2 月 24

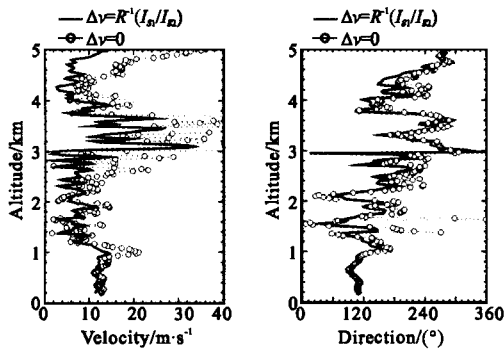


图 6 水平风速和风向的初步测量结果及两种方法的比较

Fig.6 Primary results of horizontal wind velocity and wind direction and two methods' comparison

日下午 4 点测得水平风速的垂直廓线及改进前后两种处理方法的对比结果。可以看出, 改进前后风速结果有明显不同。改进前的风速结果变化较大, 且较离散; 改进后风速结果变化平缓, 且不会产生较大的离散点。从改进后的结果可以看出, 在 1 km 以下, 风速变化不明显, 1~3 km 风速变小, 且较稳定。在 3 km 附近有明显的风切变特征, 3~4 km 风速变化较大, 4 km 以上风速变化缓慢, 且随高度略有增加。在 3 km 以下风向变化不明显, 3 km 以上风向变化较大, 3 km 处有明显的风切变特征。

4 结论

描述了基于双 Fabry-Perot 标准具的测风激光雷达的工作原理、大气分子散射对风速测量的影响以及数据处理方法。改进了 Korb 提出的处理方法, 并对两种处理方法进行了比较。结果表明, 迭代初值为

$\Delta v = R^{-1}(I_{S2}/I_{S1})$ 时可明显改善数据处理的精度。通过实际系统的模拟得出实际接收信号的风速测量误差在 1 km 和 5 km 处分别小于 0.2 m/s 和 1 m/s, 满足系统的设计要求。给出了合肥地区对流层径向风速的初步测量结果, 证明了数据处理方法的可行性。

参考文献:

- [1] YEH Y, CUMMINS H Z. Localized fluid flow measurements with a He-Ne laser spectrometer [J]. *Appl Phys Lett*, 1964, 4 (10): 176-178.
- [2] BAKER W, EMMITT G D, ROBERTSON F, et al. Lidar-measured wind from space: a key component for weather and climate prediction [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1995, 76(6): 869-888.
- [3] FLESIA C, KORB C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 432-440.
- [4] CHANIN M L, Garnier A, Hauchecorne A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16(11): 1273-1276.
- [5] ZHONG Zhi-qing, SUN Dong-song, WANG Bang-xin, et al. Doppler wind lidar based on Fabry-Perot Etalon [J]. *Infrared and Laser Engineering* (钟志庆, 孙东松, 王邦新, 等. 基于 Fabry-Perot 标准具的多普勒测风激光雷达. 红外与激光工程), 2006, 35(6): 687-690.
- [6] ABREU V J. Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis [J]. *Appl Opt*, 1979, 18(17): 2992-2997.
- [7] KORB C L, GENTRY B M, LI S X. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(24): 5976-5983.
- [8] SOUPRAYEN C, GARNIER A, HERTZOG A, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation and first climatological results [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(12): 2410-2421.
- [9] BRUCE M G, CHEN Huai-lin. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): Validation and Performance [C] // *Proceedings of SPIE, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring II*, 2001, 4484: 74-81.
- [10] KORB C L, GENTRY B M, LI S X, et al. Theory of the Double-Edgetechnique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(15): 3097-3104.
- [11] MCCLATCHEY R A, AGATI A P D'. Atmospheric Transmission of Laser Radiation, AFGL-TR-78-0029 [R], 1978: 24.