

文章编号: 1007-5461(2006)03-0325-05

接收光路光束发散角对多普勒测风激光雷达 测量精度的影响

迟如利, 胡明勇, 钟志庆, 孙东松, 周 军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 介绍了已研制的基于 Fabry-Perot 标准具直接探测多普勒激光雷达的风速测量原理, 讨论了接收光路光束发散角对测风激光雷达系统测量精度的影响。数值计算结果表明当接收光路光束发散角小于 1 mrad 时, 由于光束发散引起的多普勒速度测量相对误差可以控制在 5% 之内, 并在实测光路发散角的基础上分析了系统的测量误差, 结果显示, 在 5 km 时最大测量速度误差为 0.6 m/s。

关键词: 大气光学; 激光雷达; 多普勒频移; 风; Fabry-Perot 标准具; 光束发散角

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

1 引 言

测风激光雷达是测风的有效手段。它能够对大气风场进行连续、实时、快速的遥感监测, 具有很高的时空分辨率, 能为数值天气预报和气象动力学的研究提供三维风场数据^[1~3]。它是向大气发射激光脉冲并测量不同距离上返回信号的多普勒频移来反演出大气的径向风速。多普勒频移是大气气溶胶或大气分子沿激光雷达径向的相对运动产生的, 对应于测量流体的平均速度。目前可以采用相干探测和直接探测两种方法来实现对多普勒频移量的测量^[4]。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; 对于直接探测, 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。在我们已研制的这台测风激光雷达中, 采用了双通道 Fabry-Perot 标准具作为滤波器, 利用双边缘技术^[5,6]来进行多普勒频率的检测, 从而反演出大气在激光雷达径向上的速度。

双边缘技术在大气分子和气溶胶散射的多普勒测量中具有明显的优点, 可以通过比较进入两个通道的相对信号强度的大小决定多普勒频移。在利用边缘技术时, 通常的理论推导和设计是假设了平行光入射到标准具, 但是实际的光学系统不可能满足这个条件。本文分析了在实际非平行光入射条件下, 光束发散对多普勒风场测量误差的影响, 并以光路调整完毕后实测的光路发散角计算了研制的测风激光雷达的测量误差, 为系统测量精度的可靠性提供了依据。

2 测风激光雷达多普勒测量原理

激光雷达向大气发射激光脉冲, 并接收大气的后向散射信号。由于风的作用, 接收的大气后向散射信号(包含气溶胶和分子散射)相对于发射激光频率产生了多普勒频移, 该多普勒频移与雷达径向风速的关

系为

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \Delta\nu, \quad (1)$$

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

在研制的激光雷达中, 是利用双 Fabry-Perot(以下简称 F-P) 标准具来检测接收信号的多普勒频移量。F-P 标准具是由两个平行的玻璃平板组成。当以平行光入射, 光在腔内进行多次反射和折射后, 透射光的透过率可表示为

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

其中 L 是光通过标准具的损耗, R 是平板内表面的反射率, n 是平板间介质的折射率, ν 是入射光频率, θ 是入射光与标准具反射表面法线的夹角, F 是精细度, d 是标准具腔长。

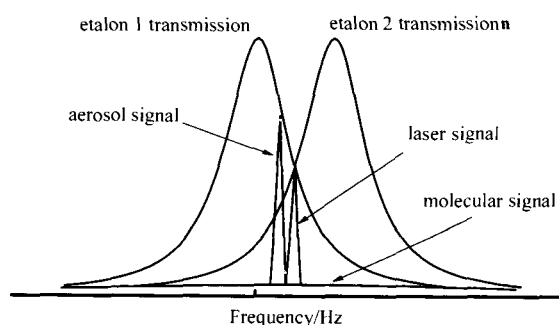


Fig.1 Principle of Doppler measurement with the double edge technique

两个高分辨率高精度的 F-P 标准具的频谱分布相同而中心以一定间隔分离, 并在相对透过率约 50% 处交叠, 如图 1 所示。出射激光的频率固定在两个谱线的交叉点处, 当激光直接通过标准具时, 两个 F-P 标准具的透射光的相对强度相同, 此时的激光频率称为参考光频率。如果雷达径向的风速为零, 则接收到的大气后向散射光信号的频率与参考光的频率相等, 这时后向散射光通过两个标准具后的输出光信号相对强度相等; 如果雷达径向的风速不为零, 接收到的大气后向散射光信号的频率相对于参考光的频率会有一个

频移, 这时两个标准具的输出光信号相对强度不同。可以用两个光信号的差异来确定多普勒频移量。进而由 (1) 式来确定雷达径向上的风速。实际测量中, 接收到的大气后向散射信号不仅包含米(或气溶胶) 散射信号, 还有瑞利(或分子) 散射信号, 但由于瑞利散射谱很宽, 在多普勒频移的范围内近似不变, 可以作为背景光扣除, 则多普勒频移只引起气溶胶(或 Mie) 散射光输出信号的变化。

3 光束发散角对系统测量误差的影响

理想的 F-P 标准具由两个完全平行平板组成, 当平行光入射时, 出射光会产生干涉条纹。由 (2) 式可知, 当入射光偏离垂直入射时, 谱的中心位置将改变, 如图 2。当入射光束与 F-P 标准具表面法线的交角增大时, 谱线的中心向高频方向移动, 而且这种移动随角度增加迅速加快。

对于实际的激光雷达系统, 大气后向散射光由望远镜接收, 经过准直镜准直后入射到标准具上。但经过准直后的光束并非平行光, 存在一定的发散角, 这时标准具的频谱中心、透过率峰值及谱宽都将发生改变。在发散角为 $2\theta_0$ 入射时, 透过率可以表示为

$$H(\nu) = \frac{1}{\pi\theta_0^2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_0} h(\nu, \theta) \theta d\theta. \quad (3)$$

由上式可得标准具透过率随光束发散角的变化图, 如图 3 所示。从图中可以看出, 随着光束发散角的增加, 不仅透过率的频谱展宽, 而且透过率也下降。

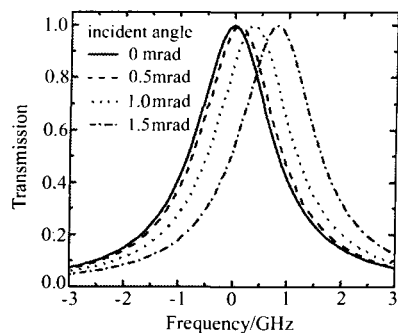


Fig.2 Etalon spectrum for varied incident angle

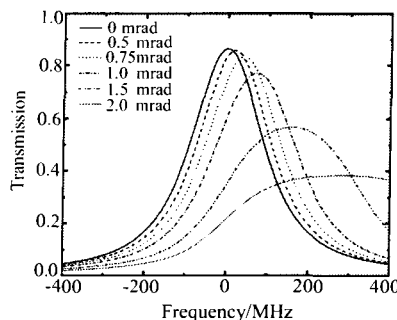


Fig.3 Etalon spectrum for varied beam divergence

系统的测量误差可以由下式估算 [7]

$$\varepsilon_V = \frac{1}{\varphi_V(S/N)}, \quad (4)$$

式中 φ_V 是速率灵敏度, 即单位速率变化引起的透过率变化; S/N 是系统的测量信噪比, 对于大气测量激光雷达, 可表示为

$$\frac{S}{N} = \frac{\sqrt{n}H(\nu)n(z)}{\sqrt{H(\nu)n(z) + n_B + n_D}}, \quad (5)$$

式中 n 是探测累积脉冲数, $n(z)$ 是接收光子数, n_D 是暗电流光子数, n_B 是背景光子数。如果接收信号在散粒噪声极限下, 由上式得信噪比正比于 F-P 标准具透过率的开平方。

对于基于 Mie 散射的多普勒测量, 零多普勒(激光发射频率)频率位于标准具透过率谱的半高度 (FWHM) 位置, 这个位置的速度灵敏度最大。因此可以计算在发散光束入射时的速度灵敏度和透过率的偏差, 再通过 (4) 式计算所导致的系统测量误差。根据 (3) 式可给出在一定光束角入射下的速率灵敏度和对应的透过率

$$H_0 = \frac{1}{2}H(\nu_0) \quad \text{when} \quad \left. \frac{dH(\nu)}{d\nu} \right|_{\nu=\nu_0} = 0, \quad (6)$$

$$\text{和} \quad \varphi_V(\theta) = \frac{1}{\lambda H(\nu)} \left. \frac{dH(\nu)}{d\nu} \right|_{\nu=\nu_0}, \quad (7)$$

式中 ν_0 是以一定发散光束入射下透过率谱的中心频率, H_0 是响应透过率的半高度值。利用数值计算可以得到相应的数值解。

4 误差计算与结果分析

由 (4) 式可知系统的测量误差由速率灵敏度和信噪比误差决定。入射到 F-P 标准具光束的发散角影响了透过率分布和速率灵敏度, 根据 (4) 式可以知到, 速率灵敏度的大小直接影响了测量精度, 同时透过率的变化改变了接收信号光子数, 即影响接收信噪比, 从而也间接地影响系统测量精度。所以光路发散角直接影响了测风激光雷达系统的测量精度。根据研制的这台测风激光雷达的设计参数 (见表 1), 并利用 (3)~(7) 式, 我们数值计算和分析了由于接收光路光束发散角带来的系统测量误差。结果发现, 当入射光束的发散角在 1~2 mrad 范围时, 相对误差明显从 5% 增加到 40% 左右, 发散角为 3 mrad 时相对误差达到 60%; 当发散角小于 0.5 mrad 时, 相对误差的变化小于 1%。如果系统由于光束发散角引起的测量误差控制在 5% 以内, 则入射到标准具上的接收光路发散角要在 1 mrad 之内。

Table 1 Parameters of the Mie Doppler wind lidar

	Parameter	Value
Transmitter	Wavelength	1064 nm
	Energy	200 mJ/pulse
	PRF	50 Hz
Receive	Diameter of telescope	300 mm
	Field of view	0.15 mrad
	Filter bandwidth	0.5 nm
	Detector type	Si:APD
	Etalon FSR	3.5 GHz
	Etalon Finesse	21
	Etalon FWHM	170 MHz
System	Zenith angle	45°
	Vertical resolution	30 m
	Optical coefficient	80%
	Velocity dynamic range	±50 m/s

在实际光路组装完毕后,对入射到标准具前的接收光路发散角进行了调校。调校后的光路发散角经检测为 0.125 mrad,满足系统测量误差对光路发散角的要求。我们以实测的接收光路发散角,计算了风场测量精度随风速的变化以及随高度的变化,如图 4、图 5 所示。

由图 4 可以看出,在同一高度(取 $z=5$ km, $S/N=162.2$,计算中的有关大气参数取自 1976 年美国中纬度标准大气模式)上,测量的速度误差随着实测风场速度(或多普勒频移量)的增大而增大。对于 100 发激光脉冲的平均,风速为 0 m/s 时的测量误差为 0.25 m/s,而当径向风速为 50 m/s 时的测量误差接近 0.6 m/s。同时,对于同一高度,随着脉冲次

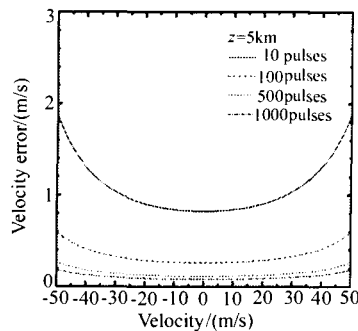


Fig.4 Velocity error distribution at the same height with variational pulses

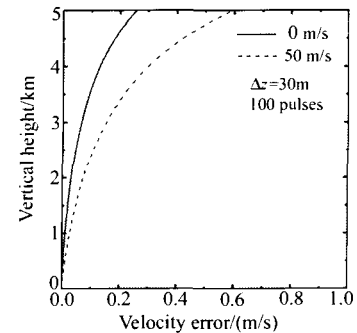


Fig.5 Error of radial wind velocity vs. vertical height with 100 pulses

数的累加,测量误差分布在减小,对 $z=5$ km,分别对于 10, 100, 500 和 1000 发脉冲的平均,在最大测量速度时的测量误差分别由 1.89 m/s, 0.59 m/s, 0.27 m/s 下降到 0.19 m/s。考虑到系统的测量时间和对精度的要求,在实际测量时的采样点数可以取 100 或 500 发脉冲平均。图 5 给出了空间分辨率为 30 m,取 100 发脉冲平均时,在两种速度测量极限(分别为 0 m/ 和 50 m/s)情况下,测量误差随着高度的分布情况,可以看出,对同一种速度的测量而言,随着高度的增加,测量误差跟着增大。

5 小 结

本文简要介绍了利用双 F-P 标准具测风原理,讨论了光束发散角对测风激光雷达系统测量误差的影响。并以实际光路的发散角讨论了风速的测量误差随着被测风速的变化以及随着高度的分布。结果显示,在取多发脉冲的情况下,风速测量误差较小,完全能够满足高精度风场的测量要求,为气象学和大气动力学提供高精度风场数据。

参考文献:

- [1] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, *et al.* Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, 76(6): 869-888.
- [2] Imaki Masaharu, Sun Dongsong, Kobayashi Takao. Direct-detection Doppler lidar for two-dimensional wind field measurement of the troposphere [C] // *Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring 3* [M]. *Proc. SPIE*, 2003, 4893: 303-310.
- [3] McGill Matthew J, Hart William D, McKay Jack A, *et al.* Modeling the performance of direct-detection Doppler lidar systems including cloud and solar background variability [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(30): 6388-6397.
- [4] McGill Matthew J, Skinner Wilbert R, Irgang Todd D. Validation of wind profiles measured with incoherent Doppler lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(9): 1928-1939.
- [5] Korb C Laurence, Gentry Bruce M, Weng Chi Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(21): 4202-4213.
- [6] Korb C Laurence, Gentry Bruce M, S Li Xingfu, *et al.* Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(15): 3097-3104.
- [7] Korb C L, Gentry B, Li S X. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36: 5976-5983.

Accuracy affected by the receiving beam divergence angle in a Doppler wind lidar

CHI Ru-li, HU Ming-yong, ZHONG Zhi-qing, SUN Dong-song, ZHOU Jun

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

Abstract: The principle of wind measurement for a direct detection Doppler wind lidar developed with a Fabry-Perot etalon is described. The measurement error of the system is affected by the receiving beam divergence angle. The numerical calculation for the Doppler wind lidar system has shown that the percentage error is increased slowly to 5% for the beam divergence less than 1mrad. The analysis results for the measured beam divergence angle indicate that the error in the velocity dynamic range is less than 0.6 m/s up to 5 km.

Key words: atmospheric optics; lidar; Doppler shift; wind; Fabry-Perot etalon; beam divergence angle

作者简介: 迟如利 男, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研究生, 研究方向为激光大气探测。