

高低空一体化测风激光雷达

孙东松, 李颖颖

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 高时空分辨率的大气风场探测对提高数值天气预报的准确性、大气动力学过程的研究、气候研究等具有很重要的意义。介绍了基于双 Fabry-Perot 标准具的直接接收激光多普勒测量原理。提出了 40 km 的高低空大气风场同时观测的技术方法。给出了利用大气气溶胶和分子散射信号的 Mie-Rayleigh 多普勒测风激光雷达的系统结构, 并分析了工作波长、望远镜口径、扫描天顶角和标准具参数等激光雷达系统参数。研究了扫描角度误差、气溶胶后向散射信号、大气温度对风场探测精度的影响。分析了雷达系统的总体性能, 得出在 40 km 高度处, 当距离分辨率为 500 m、时间分辨率为 30 min 时, 水平风速探测精度优于 6 m/s, 可以满足有关应用的要求。

关键词: 激光雷达; 风; 大气; 气溶胶; 瑞利散射; Fabry-Perot 标准具

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)02-0237-06

Doppler lidar for both high and low altitude wind detection

SUN Dong-song, LI Ying-ying

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

Abstract: High resolution wind observations are critical for improving the accuracy of numerical weather prediction, atmospheric dynamics and processes and climate studies. Principle of direct detection Doppler lidar based on dual Fabry-Perot etalon was introduced. The technique for measuring wind profile up to 40 km height was proposed, where both Mie and Rayleigh backscattering signals were simultaneously detected. The configuration of this Mie-Rayleigh Doppler wind lidar was described and the system parameters such as work wavelength, telescope aperture, scanning zenith angle, etalon parameter were analyzed. The effects of scanner uncertainty, the aerosol backscatter and atmospheric temperature on wind accuracy of the wind lidar were evaluated. The total performances of the lidar system were analyzed to get an accuracy of better than 6 m/s with 500 m range resolution and 30 min temporal resolution at 40 km altitude, which can meet the requirements of concerned applications.

Key words: Lidar; Wind; Atmosphere; Aerosol; Rayleigh scatter; Fabry-Perot etalon

0 引言

大气风场的主动遥感技术主要包括: 多普勒雷达、声雷达、激光多普勒雷达。其中, 激光雷达是目前唯一能够在大的地球空间范围内进行直接多普勒探测的遥感工具, 可以填补微波雷达探测的空白区域, 机动灵活的车载多普勒激光雷达可以满足地域和区域的大气参数探测需求, 适应多种用途和联合观测的需要。目前国际上的激光多普勒雷达体制包括相干探测^[1-2]和直接探

测, 其中直接探测基本上都是利用 FP 标准具的边缘技术^[3-6]。星载多普勒测风激光雷达工程已经在 ESA 启动, 并计划 2008 年发射^[7]。文中在测量气溶胶和分子散射信号的基础上, 设计了一套测风激光雷达系统, 并对各影响参数进行分析, 实验验证了该系统的测风性能。

1 多普勒测量原理

直接接收多普勒测量可以采用边缘技术进行检

收稿日期: 2007-06-03; 修订日期: 2007-08-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(CX0201)

作者简介: 孙东松(1962-), 男, 江苏江阴人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达、大气遥感、成像激光雷达方面的研究。

Email: dssun@aiofm.ac.cn

测,边缘技术已经从理论和实验证明是比较有效的多普勒频移测量方法^[8]。

1.1 气溶胶散射的多普勒测量

在利用 FP 标准具检测大气气溶胶粒子散射光信号的多普勒频率时,需要将激光发射脉冲的频率位于标准具透过率曲线的一个边缘处,如图 1 所示。假设大气气溶胶后向散射光的频谱与发射激光的频谱近似相同(实际略有展宽),则入射光的谱分布可以表示为高斯型,即:

$$f_{\text{Mic}}(\nu) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi \Delta\nu_L}} e^{-\frac{4\ln 2}{\Delta\nu_L^2} \nu^2} \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu_L$ 是激光谱的宽度。如果标准具的透过率是 $h(\nu-\nu)$, 则标准具的出射光为:

$$I(\nu) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{Mic}}(\nu) h(\nu-\nu) d\nu \quad (2)$$

式中: I_0 是入射光的光强。当发射激光和接收光信号分别入射到标准具后,径向多普勒频移可以确定为:

$$\nu = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{I(\nu_r)}{I(\nu_{r0})} - \frac{I(\nu_l)}{I(\nu_{l0})} \right) \left(\frac{dI(\nu)}{d\nu} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: $I(\nu_r)$ 和 $I(\nu_{r0})$ 分别是散射光输出的光信号; $I(\nu_l)$ 和 $I(\nu_{l0})$ 分别是发射激光光强。

为了提高测量精度,一般采取分双边缘技术,即采用两个标准具,透过率曲线的分布如图 1 所示。两

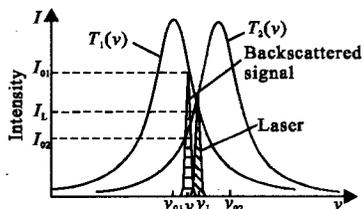


图 1 双标准具气溶胶散射多普勒测量原理

Fig.1 Dual FP etalon for aerosol Doppler analysis

个频谱分布相同而中心分离的 FP 标准具谱在峰值透过率为 50% 处交叠,如果发射激光的频率位于它们的交叉点处,则两个 FP 标准具的输出光信号相同;如果接收的散射光信号相对于发射激光频率存在一个频移,这时两个标准具的输出光信号不同,根据其差异的大小可以确定多普勒频移量。定义频率响应函数为两个标准具输出光信号的比值:

$$R(\nu_d) = \frac{I_1(\nu_1 + \nu_d)}{I_2(\nu_2 + \nu_d)} \quad (4)$$

式中: $\nu_1 = \nu_l - \nu_{l0}$ 和 $\nu_2 = \nu_r - \nu_{r0}$ 是激光中心频率分别与两个标准具频谱中心的距离。因此, R 是多普勒频移的单值函数,根据公式(5)的反函数可以确定多普勒频移的大小,这时 R 的速度灵敏度为:

$$\theta_\nu = \frac{2}{\lambda R(\nu)} \frac{dR(\nu)}{d\nu} \quad (5)$$

于是,大气径向风速可以表示为:

$$\nu = \frac{R(\nu_d) - R(0)}{\theta_\nu R(0)} \quad (6)$$

式中: $R(\nu_d)$ 和 $R(0)$ 分别是接收光信号和激光发射信号在两个标准具通道的信号比值。

1.2 分子散射的多普勒测量

由于分子散射与发射激光线宽相比宽很多,因此为了获得高速度灵敏度,双标准具的中心分别位于分子散射谱的两侧,如图 2 所示。由于多普勒频移引起的气溶胶散射光分配在两个标准具内的信号也是变化的,因此在利用这种原理进行多普勒测量时需要考虑米散射的影响。

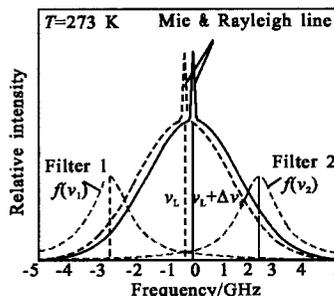


图 2 利用分子散射的多普勒测量原理

Fig.2 Molecular scatter Doppler measurement

分子散射通道标准具的输出光信号是瑞利散射和米散射之和,米散射信号谱远离标准具的谱中心,所以米散射信号的积分可以用平均值代替。假设分配到每个标准具的信号相同,分别表示为瑞利散射信号的光强 I_r , 和米散射信号的光强 I_a , 则两个标准具的输出信号为:

$$I_i(\nu) = I_r \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{Ray}}(\nu-\nu) h_i(\nu-\nu_i) d\nu + I_a h_i(\nu-\nu_i) \quad (7)$$

式中: $i=1,2$ 为通道数。 f_{Ray} 是宽度为 $\Delta\nu_r$ 的高斯瑞利信号谱分布。类似于 Mie 散射的测量过程,定义频率响应函数为两个标准具输出光信号的比值:

$$R(\nu_d) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_r T_1(\nu_1 + \nu_d) + I_a h_1(\nu_1 + \nu_d)}{I_r T_2(\nu_1 + \nu_d) + I_a h_2(\nu_1 + \nu_d)} \quad (8)$$

$$T_i(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{Ray}(v-v)h_i(v-v_i)dv \quad (9)$$

式中: v_i 和 v_d 分别是发射激光中心频率和多普勒频率。当选取适当的标准具参数并满足下式:

$$\frac{1}{T_i(v_i)} \frac{dT_i(v_i)}{dv} = \frac{1}{h_i(v_i)} \frac{dh_i(v_i)}{dv} \quad (10)$$

即气溶胶散射和分子散射的速度灵敏度相同,这时响应函数 R 不受气溶胶信号的影响。于是,径向风速表示为:

$$v_{LOS} = \frac{R(v_d) - R(0)}{R(0)\theta_v} \quad (11)$$

2 系统参数

直接接收的大气风场探测激光雷达可以同时分析气溶胶和分子散射信号,对于不同的探测高度将采取不同的探测媒介。由于气溶胶散射主要在对流层,分子散射覆盖整个大气空间,因此结合二者探测手段可以实现高低空大气风场的同时观测。表 1 给出了实现探测高度 0.1~40 km 范围的测风激光雷达探测参数。根据这样的探测参数,设计了测风激光雷达系统。

表 1 测风激光雷达探测参数

Tab.1 Parameters for wind lidar

Item	Parameter
Detect altitude	0.1~40 km
Velocity range	0~100 m/s
Resolution	30 m@0.1~10 km
	100 m@10~20 km 500 m@20~40 km
Accuracy	3 m/s@10 km, 6 m/s@40 km
Scanning range	360°(horizon)×90°(vertical)
Probe duration	5 min/profile (@10 km)
	30 min/profile (@40 km)

2.1 工作波长

分子散射信号与气溶胶散射相比波长依赖关系不同,分子散射与波长的 4 次方的倒数成正比,而气溶胶散射则近似与波长的 1.3 次方的倒数成正比,所以分子散射在短波长信号强度较大,气溶胶散射则在长波长的信号较强。气溶胶主要集中在低对流层,在对流层之上迅速减小。气溶胶后向散射的测风激光雷达系统不能测量高空的风场参数。而分子散射信号覆盖整个大气层,探测高度可达 20 km 以上。因此,采用 1 064 nm 激光探测边界层(0~2 km)的大气风场;采用 355 nm 激光探测大于 2 km 高度的大气风场。

2.2 风速反演方式

为了获得水平风场廓线分布,对于单站激光雷达系统必须沿不同的方向发射激光获得各个方向的径向风速。这里采用 4 波束方法确定水平风速廓线,如图 3 扫描方式。

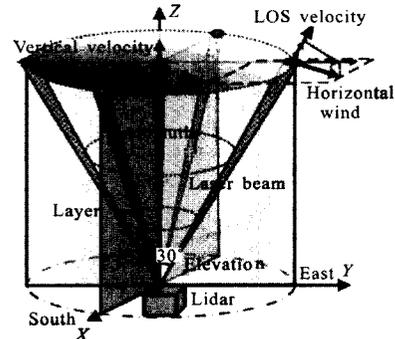


图 3 激光束扫描图

Fig.3 Scanning diagram of laser beam

获得 4 个正交方向的径向风速后,可以采用下面反演方案计算风场矢量分布。如果 I_1, I_2 分别表示两个标准具接收的信号,则定义两通道信号的比值为:

$$R_i = \frac{I_{1i}}{I_{2i}} \quad i=N,S,E,W \quad (12)$$

由于双通道标准具透过率曲线的对称性,水平风速的两个垂直分量分别表示为:

$$v_x = \frac{(R_w - R_E)}{(R_w + R_E)} \cdot \frac{1}{\theta_v \cdot \sin\phi}$$

$$v_y = \frac{(R_w - R_S)}{(R_w + R_S)} \cdot \frac{1}{\theta_v \cdot \sin\phi} \quad (13)$$

式中: v_x 和 v_y 分别为东西方向和南北方向的风速分量; ϕ 为扫描天顶角。根据矢量合成关系,水平风速 v 和风向 θ 分别为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$\theta = \arctan \frac{v_y}{v_x} - \frac{\pi}{2} \cdot \text{sign}(v_x) \quad (14)$$

式中:定义北为零度,顺时针为正方向。

2.3 接收望远镜口径和扫描天顶角

根据激光雷达方程,接收信号强度分别与激光脉冲的能量和接收天线面积成正比。为了最大限度提高接收信噪比,尽量增大激光发射能量和增大望远镜有效面积,两者是等效的,采用 355 nm 的脉冲输出能量为 350 mJ、0.2 nm 窄带滤光片,可以计算 40 km 高度处、在晴空白昼背景下的风速测量误差,图 4 为风速误差随望远镜口径变化的曲线,当望远镜口径达约

45 cm 时, 40 km 高度的风速误差在白天小于 6 m/s, 夜晚小于 3 m/s。天顶角大有利于提高探测精度, 但是为了达到一定的探测高度作用距离也大, 这样最大作用距离处的信噪比下降。图 5 计算给出了测量误差相对变化量与天顶角的关系, 选取天顶角为 30° 发射激光束。

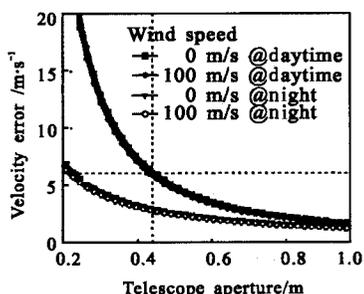


图 4 风速测量误差与望远镜口径关系
Fig.4 Wind error vs telescope aperture

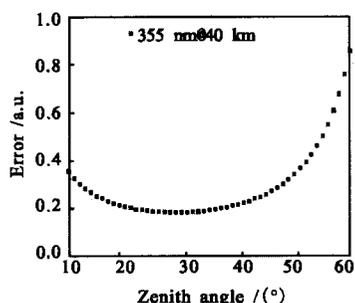


图 5 风速误差与天顶角的关系
Fig.5 Wind error vs zenith angle

2.4 标准具参数

分子探测通道, 接收到的光信号包含分子散射和气溶胶散射。由于以分子散射探测为主, 气溶胶散射是不需要的干扰信号, 但是可以适当选取标准具的参数使分子散射和气溶胶散射对标准具的多普勒灵敏度近似相同。图 6 给出了分子探测通道标准具的分子散

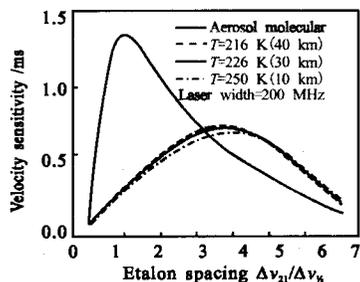


图 6 分子和气溶胶散射的速度灵敏度

Fig.6 Velocity sensitivity of molecular and aerosol signal

射和气溶胶散射的速度灵敏度。如果选取气溶胶和分子散射的速度灵敏度交叉点处, 则多普勒频移测量结

果不受气溶胶散射的影响。根据上面的计算和分析, 分子通道的标准具参数可以确定为 $FSR=12$ GHz, $FWHM=1.7$ GHz, 两个标准具通道间隔为 5.1 GHz。

2.5 系统结构

根据气溶胶和大气分子的垂直分布特点, 即低对流层或边界层(约 2 km 以下)的气溶胶浓度较大而高对流层的气溶胶浓度较小。为了获得足够的信噪比, 该系统应该对气溶胶和分子散射都能进行多普勒测量。激光雷达的系统参数见表 2。

图 7 是该方案的总体光电流程原理。采用单纵模、窄带宽、高能量的 Nd:YAG 脉冲激光, 产生 1 064 nm 和 355 nm 的两个波长激光输出, 经过扩束镜后, 光束的发散角压缩到 <0.1 mrad, 利用光学反射镜片, 使光束

表 2 高低空一体化测风激光雷达系统参数

Tab.2 Parameters for wind lidar system

Item	Parameter	
Transmitter	Nd:YAG	
Wavelength	355 nm	1 064 nm
Energy	400 mJ	100 mJ
PRF	30 Hz	
Pulse width	~10 ns	~7 ns
Divergence	0.5 mrad	
Telescope	Cassegrain	
Diameter	45 cm	
FOV	0.2 mrad	
Efficiency	>80%	
Scan range	360°×90°	
Receiver	PMT	Si:APD
Q.E.	20%	18%
I.F. BW	0.2 nm	0.5 nm
FP FSR	12 GHz	3.5 GHz
FP FWHM	1.7 GHz	0.12 GHz
FP center gap	5.1 GHz	0.15 GHz
FP transmission	>60%	

与接收望远镜同轴发射, 并通过二维扫描系统指向探测区域。大气中的气溶胶和分子的后向散射光沿光束方向再经过二维扫描后被一个大口径(f450)光学望远镜接收, 该望远镜采用 Cassegrain 结构并将散射光汇聚到位于焦点的多模光纤。光纤将光信号导入接收机的输入端。接收机对入射的光束进行准直, 使光束转换为平行光。利用窄带干涉滤光片抑制白天测量时强的背景光噪声。

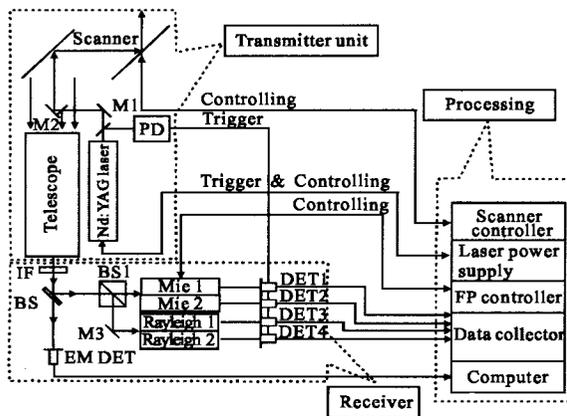


图 7 多普勒测风激光雷达系统框图
Fig.7 Diagram of wind lidar system

3 性能分析

风速测量精度指的是水平风速的测量精度, 而水平测量精度是通过投影关系的径向风速测量获得, 于是水平风速测量误差为:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{\theta_v (S/V) \sin\theta} \quad (15)$$

式中: 速度灵敏度 θ_v 在测量范围内基本是常数; θ 是激光发射天顶角; S/V 为探测信噪比。

3.1 系统探测精度

根据风速反演方法可计算 40 km 高度处的测量精度, 采用表 2 的系统参数, 图 8 给出了速度测量误差的计

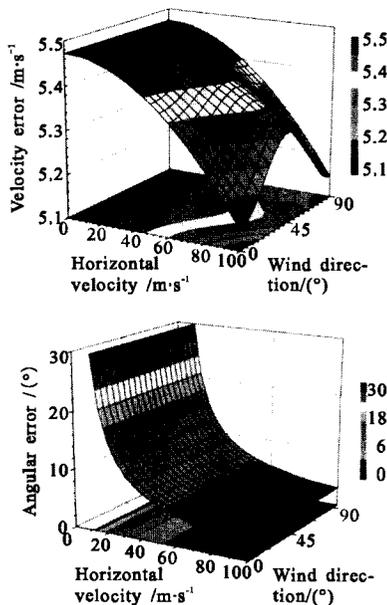


图 8 40 km 高度处风速和风向角度误差图
Fig.8 Wind and direction error at 40 km

算结果。由此可见, 风速测量误差小于 5.5 m/s; 当风速大

于 20 m/s 时, 风向误差小于 12°; 当风速大于 50 m/s 时, 风向误差小于 6°。

3.2 扫描角度误差影响

扫描系统在扫描过程中, 光束指向存在一定的角度误差。假定扫描系统 4 个扫描方向上的定向偏差都在 $-\alpha \sim +\alpha$ 范围内均匀随机变化。利用蒙特卡罗方法模拟结果表明: 当水平风速为 100 m/s、 $\alpha=1^\circ$ 时, 引起的水平风速误差不超过约 1.745 m/s, 风向误差不超过 1°, 如图 9 所示。

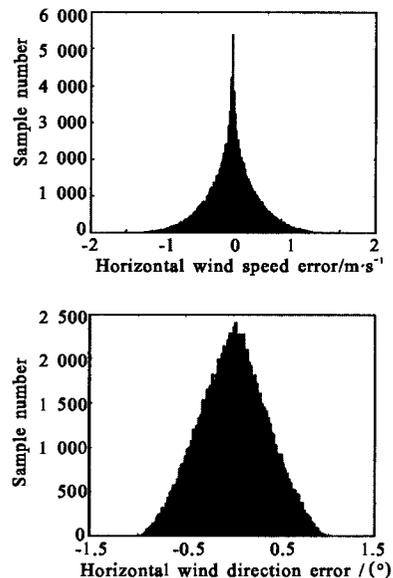


图 9 水平风速和风向误差

Fig.9 Horizontal velocity and wind direction error

3.3 后向散射比的影响

在设计标准具参数时考虑了气溶胶信号对风速测量精度的影响, 即标准具对分子散射信号和气溶胶散射信号的速度灵敏度在零风速下相同, 但是随着多普勒频移(径向风速)或温度的变化, 速度灵敏度产生一定的偏差, 即偏离优化条件。可以给出由于气溶胶信号的影响产生的速度反演误差公式为:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{\theta_v \sin\theta} \left(\frac{T_{2m}}{T_{1m}} - \frac{T_{2m} + (R_b - 1)T_{2a}}{T_{1m} + (R_b - 1)T_{1a}} \right) \quad (16)$$

式中: R_b 为大气后向散射比。图 10 给出了不同后向散射比条件下引起的速度误差和在不同风速下径向风速误差随后向散射比的变化。可以看出: 风速误差随后向散射比的增大而迅速增大, 对于大风速这种影响也较大。对于 335 nm 波长, 后向散射比在 0~10 km 高度范围可能达到 1.2, 如果有云层还会更大, 当后向散射比达到 1.1 时, 风速反演误差达到 0.04 m/s。

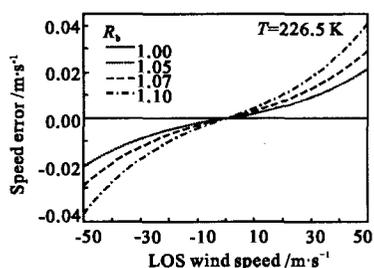


图 10 后向散射比对速度误差影响

Fig.10 Velocity error from scattering ratio

3.4 大气温度的影响

温度对分子的后向散射谱宽产生最直接的影响,分子散射信号的速度灵敏度在不同的温度下也不相同,同样会产生不同温度下分子散射与气溶胶散射的速度灵敏度不同。根据数值计算和分析得出,反演误差随温度变化趋势一致,说明温度影响起主导作用;温度误差 10° 时,测量误差小于 0.05 m/s ,见图 11。

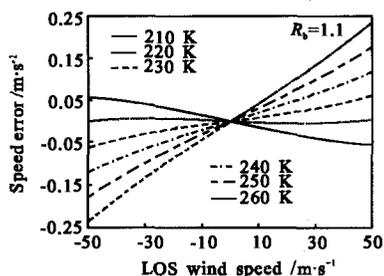


图 11 不同温度的风速误差变化

Fig.11 Wind error from temperature uncertainty

4 结论

目前,高空风场(20 km 以上)的实时遥感只有激光雷达可以完成,而且由于大气粒子垂直分布的特点也只有直接接收方法可以实现这种大气探测。文中设计的测风激光雷达可以实现 $0.1\sim 40 \text{ km}$ 范围的大气风场分布观测。根据分析计算,激光雷达系统仪器误差和大气温

度、大气气溶胶引起的误差均不超过 0.2 m/s ;风场测量误差主要是由探测误差产生,即由接收信噪比引起,根据计算这个误差小于 5.5 m/s 。风向误差随风速大小变化,在高空风速大于 15 m/s 时,风向误差小于 10° ;当风速大于 50 m/s 时,风向误差小于 6° 。实验证明,对于 40 km 高空的风速测量,系统满足有关应用需求。

参考文献:

- [1] HALL F F Jr, HUFFAKER R M, HARDESTY R M, et al. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar[J]. *Appl Opt*, 1984, 23:2503-2506.
- [2] HUFFAKER R M, HARDESTY R M. Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO_2 coherent laser systems[C]//*Proceedings of IEEE*, 1996, 84:181-204.
- [3] SOUPRAYEN C, GARNIER A, HERTZOG A, et al. Rayleigh/Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. instrument setup, validation and first climatological results[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(12):2410-2421.
- [4] GENTRY B M, CHEN H, LI S X. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(17):1231-1233.
- [5] YOE J G, RAJA M K, HARDESTY R M, et al. Ground Winds 2000 field campaign: demonstration of new Doppler lidar technology and wind lidar data intercomparison[C]//*Proceedings of SPIE, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III*, 2002, 4893:327-336.
- [6] SUN D, ZHOU J, HU H. Wind lidar development at Hefei of China [C]// *Proceedings of 22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004) ESA SP-561*, 2004: 119-122.
- [7] HELIE RE A, ARMANDILLO E, DURAND Y, et al. Lidar instruments for ESA earth observation missions [C]//*Proceedings of 22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004), ESA SP-561*, 2004: 11-14.
- [8] KORB C L, GENTRY B M, LI S X, et al. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(15):3097-3104.