

瑞利散射多普勒测风激光雷达系统误差分析

唐磊¹, 吴海滨², 孙东松³, 舒志峰³

- (1. 合肥师范学院 物理与电子工程系, 安徽 合肥 230031;
2. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230031;
3. 中国科技大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 系统全面地分析了各种影响因素对瑞利散射多普勒测风激光雷达系统误差的影响, 确定了透过率曲线校准精度对系统测量误差起主要作用, 同时必须考虑激光频率锁定误差、气溶胶及大气温度估计误差对系统测量误差的影响。实验结果表明: 温度和后向散射比相同时, 由校准参数差异引起的系统误差比理论值增加 10 倍以上; 后向散射比相同时, 系统误差随温度估计误差和多普勒频率增大而增大; 大气温度估计误差 5 K, 校准误差产生的径向速度测量误差随高度和多普勒频率变化, 在 18 km 左右达到峰值, 最大值 1.4 m/s。

关键词: 激光雷达; F-P 标准具; 瑞利散射; 多普勒频率; 系统误差

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3570-07

Analysis of system accuracy for Rayleigh backscattering Doppler wind lidar

Tang Lei¹, Wu Haibin², Sun Dongsong³, Shu Zhifeng³

- (1. Department of Physics and Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230031, China;
2. School of Physics and Material Sciences, Anhui University, Hefei 230031, China;
3. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: All factors affecting the system error were comprehensive taken into account for Rayleigh Doppler wind lidar in this paper. The calibration accuracy of the transmission curve parameters of the three-channel Fabry-Perot etalon contributes mostly effect to the system error, and the tracking accuracy of laser frequency, aerosol and the estimation error of atmosphere temperature contributing to the system error must be taken into account simultaneously. Experiment results demonstrate that the system error calculated by the calibration parameters error is 10 times bigger than it calculated by the design parameters when the atmosphere temperature and the backscattering ratio are unchanged. The system error increases with the estimation error of atmosphere temperature and the Doppler frequency when the backscattering ratio is constant. The system error produced by the calculation accuracy of the transmission parameters increase with the altitude and the Doppler shift with local maximum value 1.4 m/s at 18 km altitude.

收稿日期: 2014-03-13; 修订日期: 2014-04-15

基金项目: 国家 863 计划; 安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2013A223)

作者简介: 唐磊(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光遥感信息控制与处理方面的研究。 Email: tanglei_66@163.com

Keywords: lidar; Fabry-Perot etalon; Rayleigh backscattering; Doppler shift; system accuracy

0 引言

精确的大气空间风场分布可以极大地提高大气环境变化的预测能力、提高数值天气预报的准确性。全球范围内的大气风场数据也是深入研究大气动力学、全球大气活动和空间环境预警的最主要参数之一,空间风场分布测量的研究已经成为激光雷达大气遥感应用的热点之一。

1989年,Chanin等人^[1]首次使用基于分子散射的双边缘技术测风系统测量水平风速的一维分量分布,探测高度25~60 km。在NASA Goddard Space Flight Center的Korb及同伴自1992年以来一直致力于边缘技术研究^[2]。1997年,Korb等人^[3]使用双边缘技术进行边界层风测量,白天和晚上雷达测量数据与无线电探空仪和光学经纬仪测量结果对比显示了极好的一致性(半小时平均,2 km高度速度误差小于2 m/s)。美国密西根大学的空间物理研究实验室和密西根航天中心一直致力于非相干条纹成像技术测风激光雷达系统的研制。采用了CCD干涉条纹成像技术决定多普勒频移,优点是避免了分别考虑米散射和瑞利散射的多普勒测量^[4]。美国NASA/GSFC于2000年9月研制成功的GLOW系统,是一套基于双边缘检测技术的车载测风激光雷达^[5]。测量的有效大气风廓线从1.8~35 km的高度,垂直分辨率178 m,风速测量误差在0.4~6 m/s之间。其采用的是F-P标准具检测的双边缘技术。

基于F-P标准具的双边缘瑞利信号检测技术目前已成为国际上中高层大气风场测量普遍采用的手段。2009年底国内首台利用F-P标准具检测的瑞利散射测风激光雷达系统样机在合肥研制成功。系统设计采用高速度灵敏度的非相干频率检测-强度信号的速度检测方案,针对10~40 km对流层顶和平流层大气风场观测,40 km高度探测精度6 m/s^[6]。

1 系统误差分析

全面分析系统原理与结构及平流层风场观测实

验,综合考虑影响系统误差的因素主要有三个方面:首先,三通道F-P标准具透过率曲线校准误差的影响;其次,系统运行过程中参数变化产生的影响;最后,径向风速反演过程中产生的误差。还有系统电噪声、热噪声、光子计数和模拟探测器的计数差异等诸多因素产生的系统误差等,各因素相互影响、相互干扰,影响系统整体性能,制约系统测量精度。

1.1 三通道F-P标准具透过率曲线校准误差的影响

三通道F-P标准具透过率曲线校准过程中,由于入射光束发散角、标准具两平行板平行度及器件的个体缺陷等因素导致实际校准得到的标准具透过率曲线的FWHM、峰值透过率和有效反射率与理论设计值相比总存在一定差距,使系统测量速度灵敏度降低,误差增大。以2010年5月12日透过率曲线校准结果为例,如图1所示,校准误差主要表现为FWHM增大、两边缘通道峰值不相等、FSR减小及锁定通道峰值偏低等。忽略其他因素影响仅考虑速度灵敏度降低使系统测量误差增大了18.3%;另外,标准具透过率曲线理论设计参数使得气溶胶和分子信号测量的速度灵敏度相等,如图2所示,因此不需要考虑气溶胶信号对系统测量误差的影响,但实际校准的气溶胶和分子信号速度灵敏度关系如图3所示。由图可见气溶胶信号速度灵敏度增大,瑞利信号速度灵敏度减小,气溶胶和瑞利散射信号的速度灵敏度不相等,使气溶胶信号成为干扰信号,对径向风速反演结果产生较大影响^[7-8]。

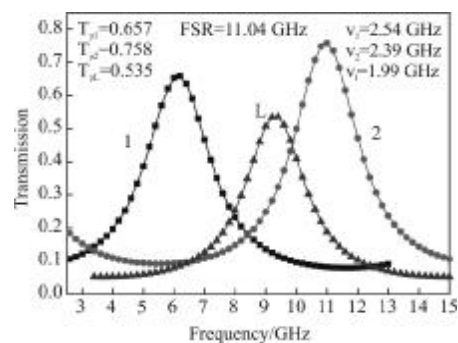


图 1 2010 年 5 月 12 日 F-P 标准具透过率曲线校准结果

Fig. 1 Calibrated result of the three-channel Fabry-Perot etalon parameters on 12 May, 2010

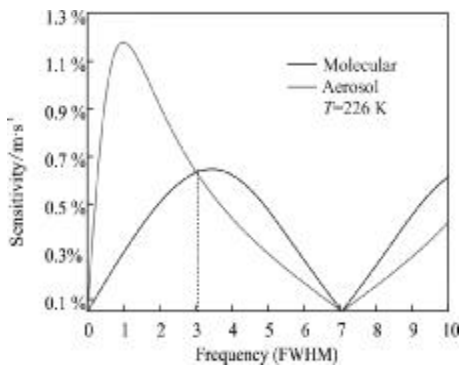


图 2 气溶胶和分子信号速度灵敏度理论设计值
Fig.2 Design values for aerosol and molecular signal velocity sensitivity

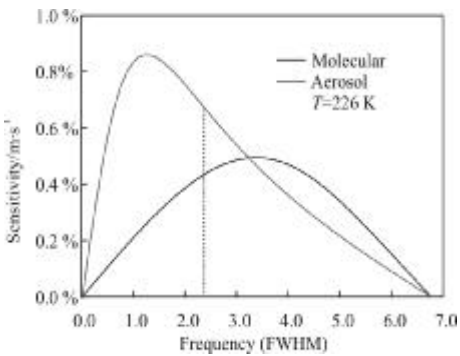


图 3 实际校准得到的气溶胶和分子信号速度灵敏度
Fig.3 Calibrated values for aerosol and molecular signal velocity sensitivity

标准具透过率曲线参数理论设计时为了避免气溶胶信号的干扰，使气溶胶和瑞利后向散射信号速度灵敏度相等，径向速度反演时实际只考虑了瑞利信号：

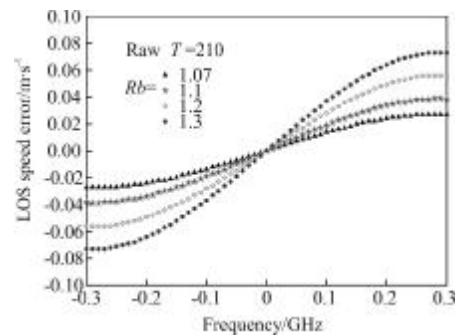
$$V_r(v_d, T, R_b) = \frac{R_r(v_d, T, R_b) - R(0)}{R(0)} \frac{1}{\theta_v} \quad (1)$$

式中： R_r 为瑞利后向散射信号的响应函数； $R(0)$ 为零多普勒频移时的响应函数，一般情况下 $R(0)=1$ ； θ_v 为速度灵敏度； T 为大气温度； R_b 为后向散射比； v_d 为多普勒频率。如果气溶胶和分子后向散射信号速度灵敏度不相等，则响应函数应包含气溶胶散射信号的影响，径向速度计算误差等于：

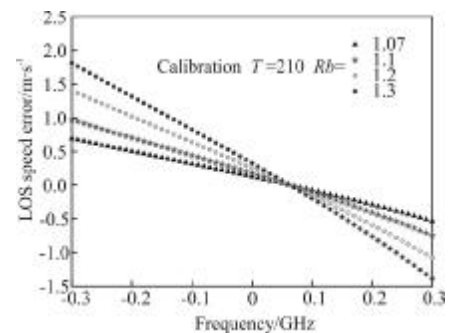
$$\Delta(v_d, T, R_b) = \frac{R(v_d, T, R_b) - R_r(v_d, T, R_b)}{\theta_v} \quad (2)$$

式中： R 为气溶胶和瑞利信号总的速度灵敏度。图 4 是分别利用标准具透过率参数理论设计值和校准值

根据公式(2)计算的径向速度测量误差随后向散射比和多普勒频移的变化关系。由图可见：径向速度测量误差随后向散射比和多普勒频移的增大而增大，说明气溶胶信号使径向速度测量误差增大；相同条件下使用理论设计值和实际校准值计算径向速度测量误差，校准值比理论设计值增大 10 倍以上，且由于两信号通道峰值透过率、带宽不相等导致误差关于零点不对称，即零多普勒频移时就存在误差，平均约 0.3 m/s，不同方向相同多普勒频移时径向速度测量误差不相等。图 5 所示是速度不同时径向速度测量误差随后向散射比的变化关系，根据美国标准大气 1976 模型，10~40 km 后向散射比最大不超过 1.07。由图可见 10 km 以下气溶胶浓度较大，误差较大，10~40 km 随气溶胶浓度降低误差逐渐减小；校准值比设计值引起的误差更大，数倍增长。



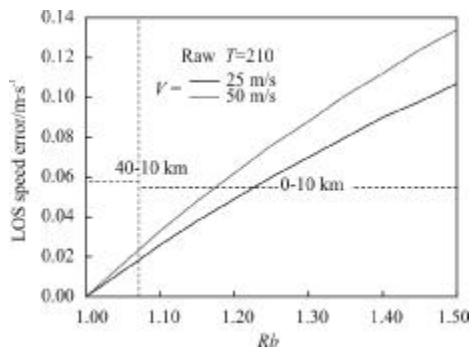
(a) 使用标准具设计参数计算径向速度误差
(a) LSE calculated by design parameters



(b) 使用标准具校准参数计算径向速度误差
(b) LSE calculated by calibration parameters

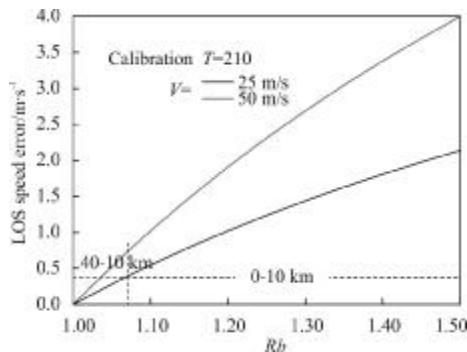
图 4 不同后向散射比时径向速度测量误差随多普勒频率的变化关系图

Fig.4 LOS speed error (LSE) as a function of Doppler frequency at different backscattering ratio



(a) T=210 K 使用设计参数计算径向速度误差

(a) LSE calculated by design parameters at T=210 K



(b) T=210 K 使用校准参数计算径向速度误差

(b) LSE calculated by calibration parameters at T=210 K

图 5 风速不同时径向速度测量误差随温度和后向散射比的变化

Fig.5 LSE as a function of temperature and backscattering ratio at different LOS speed

1.2 系统运行参数变化产生的影响

系统运行参数变化主要是指激光频率锁定误差引起的径向速度测量误差,激光频率偏离两边通道透过率曲线交叉点位置,偏离速度测量的高灵敏度区域所带来的径向速度反演误差^[9],如图 6 所示。由图可见,在±50 m/s 测量动态范围内,只考虑灵敏度变化,由于激光频率漂移产生的相对于零风速时的误差在 0~1.3%以内。另外,激光频率锁定对于分子散射多普勒激光雷达还有更重要的意义,因为激光频率漂移会导致 offset 变化,引起气溶胶和分子散射信号的速度灵敏度偏离透过率曲线交叉点位置,一个增大一个减小,使气溶胶信号成为干扰信号,影响径向速度反演精度,其结果与上述相同。

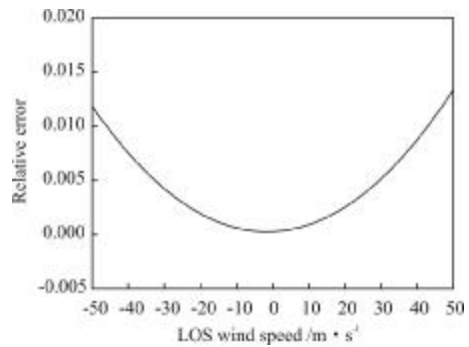


图 6 激光频率引起的径向速度反演误差

Fig.6 Relative error produced by laser frequency shift along with LOS wind speed

1.3 径向速度反演中的误差

1.3.1 温度与气溶胶对系统测量误差的影响

分子后向散射谱宽与温度有关,温度不同瑞利后向散射谱通过标准具的透过率曲线不同,相应的速度灵敏度也不同,如图 7 所示。由标准具优化设计可知,温度 226 K 对应峰值间距 5.13 GHz、零多普勒频移时气溶胶和分子信号速度灵敏度相等,误差最小。后向散射比一定,温度不同、多普勒频率增大时径向速度测量误差增大,如图 8 所示。由于透过率曲线的校准误差,校准值与设计值相比产生误差更大且不对称;210 K 时误差最小,是因为峰值间距最终选择 5.1 GHz,对应温度 210 K,系统测量的速度灵敏度最高;温度不同时系统测量误差相差较大,由图 8(a)、(b)可见 Rb = 1.07、多普勒频移 300 MHz 时产生的误差分别增大至 0.2 m/s 和 0.8 m/s,因此径向风速反演时必须考虑温度的影响。由于实际温度很难测量,因此,使用美国标准大气 1976 模式温度反演径向速度。

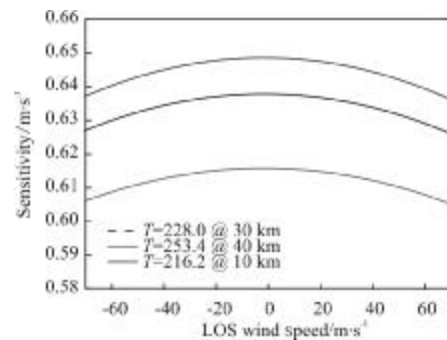
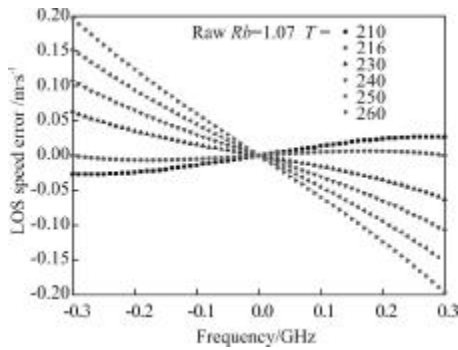
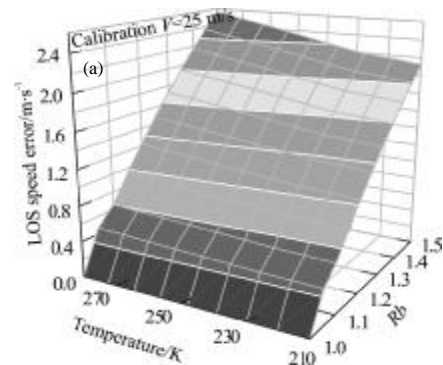


图 7 不同温度时的瑞利散射信号的速度灵敏度

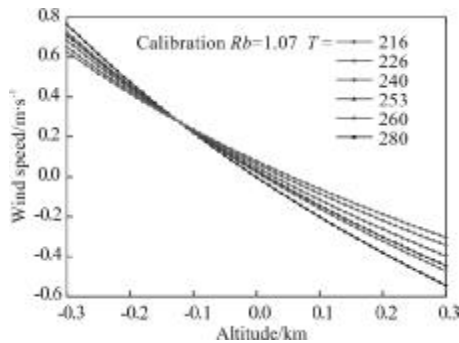
Fig.7 Speed sensitivity of Rayleigh signal at different atmosphere temperatures



(a) $R_b=1.07$ 使用设计参数计算径向速度误差
(a) LSE calculated by design parameters at $R_b=1.07$



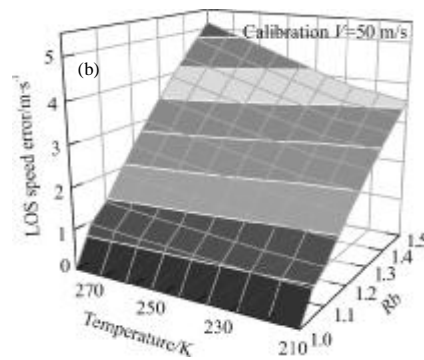
(a) $V=25$ m/s 使用校准参数计算径向速度误差
(a) LSE calculated by calibration parameters at $V=25$ m/s.



(b) $R_b=1.07$ 使用校准参数计算径向速度误差
(b) LSE calculated by calibration parameters at $R_b=1.07$

图 8 后向散射比一定时径向速度测量误差随温度和
和多普勒频率的变化

Fig.8 LSE as a function of atmosphere temperature and Doppler shift at constant backscattering ratio



(b) $V=50$ m/s 使用校准参数计算径向速度误差
(b) LSE calculated by calibration parameters at $V=50$ m/s

图 9 速度一定时径向速度测量误差随温度和后向散射比的变化
Fig.9 LSE as a function of atmosphere temperature and backscattering ratio at different LOS speed

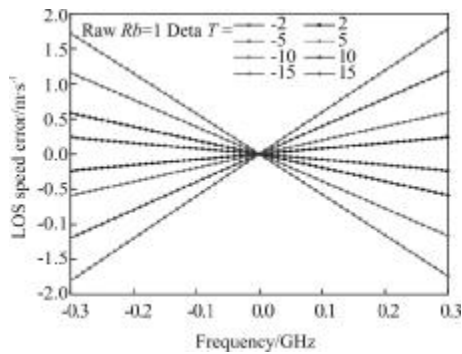
多普勒频移一定,即径向风速一定时综合考虑系统测量误差随模式温度和气溶胶浓度的变化情况如图 9 所示。径向速度 $V=25$ m/s 和 50 m/s 不同时,径向速度测量误差增加一倍;径向风速越大,透过率曲线校准误差产生的径向速度测量误差也更大, $V=25$ m/s 时最大误差 2.5 m/s, $V=50$ m/s 时最大误差 5 m/s,比设计值增加 3 倍。由图 9 (a)和 (b)还可以看出,温度增大引起的径向速度测量误差小于后向散射比增大引起的径向速度测量误差,主要是由于校准参数的带宽增加导致速度灵敏度降低及气溶胶和分子信号速度灵敏度不相等所致。

1.3.2 模式温度与实际温度偏差对系统测量误差的影响

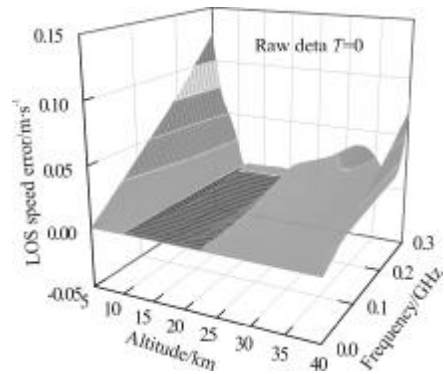
美国标准大气 1976 模式温度可以基本反映大

气温度的变化情况,但与实际大气温度仍会存在一定差距。不考虑气溶胶信号对风速反演误差的影响,温度 $T=210$ K,温度偏差 2 K、5 K、10 K 和 15 K,考察径向速度误差随多普勒频率的变化情况,如图 10 所示。由图可见模式温度与实际温度偏差对径向速度测量误差有较大影响,误差随温度差、多普勒频移增大而增大;由图 10 (b)可以看出向正多普勒频移和负多普勒频移方向变化,误差相差较大,300 MHz 比 -300 MHz 处误差最大相差 1.2 m/s,零多普勒频移处有一固定误差,随温度偏差大小不等,最大超过 0.5 m/s。在风速反演时应尽可能缩小模式温度与实际温度偏差,提高透过率曲线校准精度,减小风速反演误差。

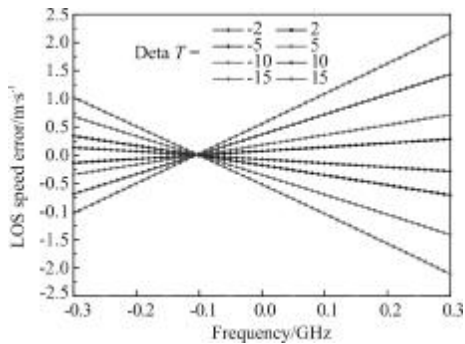
图 11 显示了大气温度估计偏差和米散射信号引起的径向速度测量误差随多普勒频移和探测高度的变化关系。图 11 (a)显示的是不考虑大气温度



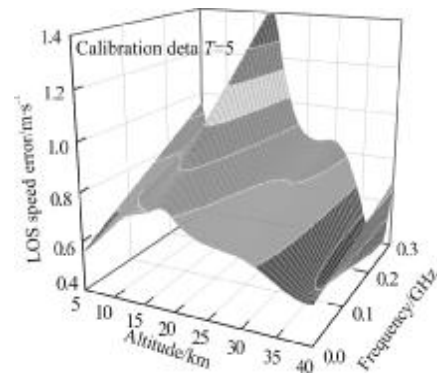
(a) 使用设计参数计算径向速度误差
(a) LSE calculated by design parameters.



(a) 使用设计参数计算径向速度误差
(a) LSE calculated by design parameters



(b) 使用校准参数计算径向速度误差
(b) LSE calculated by calibration parameters



(b) $\Delta T=5\text{ K}$ 使用校准参数计算径向速度误差
(b) LSE calculated by calibration parameters at $\Delta T=5\text{ K}$

图 10 径向速度测量误差随模式温度与实际温度差值的变化
Fig. 10 LSE versus Doppler shift at different atmosphere temperature estimation error

图 11 径向速度测量误差随多普勒频率和高度的变化关系
Fig. 11 LSE as a function of Doppler shift and altitude at constant atmosphere temperature estimation error

估计偏差只考虑米散射信号的影响, 由图可见5~40 km 两个明显的峰值区域, 即 10 km 以下较强米散射信号引起的速度误差和 40 km 左右低信噪比引起的速度误差; 图 11 (b) 是利用透过率曲线校准参数, 考虑大气温度估计偏差米散射信号产生的误差随探测高度和多普勒频率的变化关系。由图可见, 由透过率曲线校准误差产生的径向速度测量误差在 18 km 左右达到峰值, 最大值 1.4 m/s, 此后向两边衰减, 10 km 以下和 40 km 左右处误差极值仍然存在, 小于中间峰值; 考虑大气温度估计偏差与不考虑相比, 误差整体提高了 0.5 m/s。分析透过率曲线校准参数峰值误差出现在 18 km 处的原因见图 8, 主要是由于米散射信号速度灵敏度高于瑞利散射信号速度灵敏度近 50% 所致。

1.4 其他因素对径向风速反演误差的影响

其他影响瑞利径向速度反演误差的主要因素包

括 Rayleigh-Brillouin 散射和大气压强随高度变化的影响。瑞利散射测风激光雷达设计指标是针对 10~40 km 高度风场测量, 此时米散射信号很弱, 后向散射比最大不超过 1.07, 因此正常情况下可以忽略 Rayleigh-Brillouin 散射的影响。当激光雷达测量高度延伸到 10 km 以下时必需考虑 Rayleigh-Brillouin 散射的影响。图 12 所示是由 Tenti 等人 1974 年提出的 S6 模型描绘的大气后向散射谱^[10], 波长为 532 nm, 大气温度为 288 K。该模型考虑了 Brillouin 散射对后向散射光谱的贡献, 综合考虑了温度和压强对光谱的影响, 是目前最准确的描述双原子分子散射的模型^[11]。温度 T 和压强 P 用参数 Y 来描述:

$$Y=0.23\{[T(k)+111]/T^2(k)\}[P(\text{atm})\lambda(\text{nm})] \quad (3)$$

不同 Y 值时的后向散射谱如图 12 所示, Brillouin 散射使后向散射谱增宽和峰值降低, 10 km 以下由此引起的速度误差据统计一般不小于 5%。

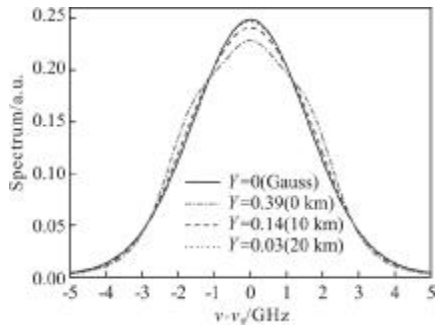


图 12 S6 模型下不同 Y 值时的大气后向散射谱

Fig. 12 Atmosphere backscattering spectrum under S6 model at different Y values

2 结 论

国内首台基于 F-P 标准具的双边缘瑞利检测技术的多普勒激光雷达系统样机在合肥研制成功, 解决了国内中高层大气风场探测手段有和无的问题。文中详细介绍了激光发射系统、光电接收系统、望远镜、二维扫描头以及控制系统的结构、参数及技术解决方案。在系统分析各关键部分结构的基础上, 充分考虑各种因素对系统误差的影响, 确定了影响系统误差的三个主要因素: F-P 标准具透过率曲线校准误差、系统运行过程中的参数变化及径向风速反演过程中气溶胶和大气温度估计误差。利用实际校准的透过率曲线参数与理论设计值进行对比计算, 在不同后向散射比和温度条件下, 证实了透过率曲线校准精度对系统测量误差起主要作用, 同时必须考虑频率锁定误差、气溶胶、大气温度及大气温度估计误差对系统测量误差的影响。

参考文献:

- [1] Chanin M L, Gariner A, Hauchecorne A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16: 1273-1276.
- [2] Korb C L, Gentry B, Weng C. The edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds[J]. *Appl Opt*, 1992, 31: 4202-4213.
- [3] Korb C L, Gentry B M, Li S X. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Appl Opt*, 1997, 36: 5976-5983.
- [4] Fischer K, Abreu V, Skinner W, et al. Visible wavelength Doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night[J]. *Opt Eng*, 1995, 34: 499-508.
- [5] Gentry B, Chen H. Tropospheric wind measurements obtained with the goddard lidar observatory for winds (GLOW): validation and performance [C]//Proceedings of the International Symposium on Optical Science and Technology, 2001, 4484: 74-81.
- [6] Lei Tang, Shu Zhifeng, Dong Jihui, et al. A mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(8): 726-731. (in Chinese)
- [7] Hu Dongdong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, et al. Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar receiver [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 369-374. (in Chinese)
- [8] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, et al. Application of triple Fabry-Perot etalon for Rayleigh wind lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1474-1478. (in Chinese)
- [9] Tang Lei, Wu Haibin, Sun Dongson, et al. Dynamic frequency tracking system for Doppler lidar wind measurement based on Rayleigh scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1049-1053. (in Chinese)
- [10] Miles R, Lempert W, Forkey J, Laser Rayleigh scattering[J]. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 33-51.
- [11] Tenti G, Boley C D, Desai R C. On the kinetic model description of Rayleigh-Brillouin scattering from molecular gases[J]. *Can J Phys*, 1974, 52: 285-291.