

文章编号: 0258-7025(2010)08-2005-05

# 大气温度对基于瑞利散射双边缘技术激光测风雷达的影响

竹孝鹏 刘继桥 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 根据瑞利散射双边缘技术测风原理, 模拟仿真了不同大气温度下直接探测多普勒激光测风雷达的响应函数曲线, 分析了大气温度对风速测量的影响。仿真结果表明, 对不同的大气温度, 系统有不同的响应曲线, 同时风速越大, 大气温度对风速测量的影响也越大。因此在系统设计中, 需要根据最大风速和风速精度要求, 确定所需大气温度分布精度, 在风速反演中进行温度校正。通过数值仿真的方法, 获得了在不同风速和大气温度下温度误差导致的风速误差估算公式。

**关键词** 激光技术; 多普勒激光测风雷达; 双边缘; 瑞利散射; 温度校正

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2005

## Effects of Atmospheric Temperature on Rayleigh Scattering Doppler Wind Lidar with the Double-Edge-Technique

Zhu Xiaopeng Liu Jiqiao Chen Weibiao

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The response functions of direct-detection Doppler wind lidar at different atmospheric temperatures are simulated based on the principle of the Rayleigh Scattering Doppler wind lidar with the double-edge-technique. The wind speed errors induced by temperature profile changes are analyzed. It is shown that atmospheric temperatures have great impacts on the response functions, and at larger wind speed the temperature will produce greater wind speed error. In order to obtain a reasonable wind speed accuracy, the accurate temperature distribution of atmosphere is required. In this simulation, a formulation to estimate the wind speed errors at different temperatures and wind speeds caused by temperature errors is obtained.

**Key words** laser technique; Doppler wind lidar; double-edge; Rayleigh scattering; temperature-correction

### 1 引 言

多普勒激光测风雷达被认为是测量全球风场分布的有效手段<sup>[1,2]</sup>, 直接探测技术相对于相干探测而言, 具有众多的优势<sup>[3~5]</sup>, 受到了人们广泛关注。直接探测技术主要包括条纹成像技术和边缘检测技术。边缘检测技术中双边缘技术相对于单边缘技术具有更高的灵敏度和信噪比, 是目前常用的多普勒

频移测量技术<sup>[3,6,7]</sup>。法国国家科学研究中心在 1989 年首次采用了基于双法布里-珀罗 (DFP) 标准具的双边缘检测技术测量了 25~50 km 大气风速的垂直分布<sup>[6]</sup>, 此后该技术获得了广泛的发展和应用<sup>[1,6,8~10]</sup>。欧洲空间局正在研制的星载多普勒激光测风雷达 (ALADIN) 将是第一台用于全球风场测量的星载激光测风雷达<sup>[11]</sup>, 也采用了 DFP 双边缘

收稿日期: 2009-12-14; 收到修改稿日期: 2010-01-25

基金项目: 国防科工局民用专项 (5.2.5) 和国家 863 计划 (2006AA12Z126) 资助课题。

作者简介: 竹孝鹏 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事激光测风雷达方面的研究。E-mail: edifiers2008@163.com

导师简介: 陈卫标 (1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间激光器、激光雷达等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn (通信联系人)

检测技术来测量大气分子后向散射(瑞利散射)信号的多普勒频移。

风速测量误差是评价激光测风雷达系统性能的重要参数<sup>[12]</sup>。对于基于瑞利散射的双边缘技术多普勒激光测风雷达而言,大气温度对分子的后向散射信号的频谱宽度有很大影响,因此研究大气温度对风速测量精度的影响并在风速反演过程中进行相应的温度校正具有重要意义。

本文主要是对 DFP 干涉仪双边缘技术测量多普勒频移进行模拟仿真,分析了不同大气温度下的响应函数曲线,并通过仿真研究了大气温度对风速测量精度的影响,有助于在实际系统中根据风速测量误差要求确定对大气温度精度的要求。

## 2 DFP 双边缘技术风速测量原理

双边缘风速测量技术利用两个窄带滤波器对风速导致的多普勒频移进行测量。激光器发射频率稳定的单频激光<sup>[13,14]</sup>入射到大气中,回波信号的多普勒频移会引起其中一个滤波器的透过信号增强,另外一个透过信号减弱,通过测量这两路信号的强度变化,就可以获得多普勒频移的大小和符号,计算相应的径向风速的大小和方向<sup>[4]</sup>,如图 1 所示。

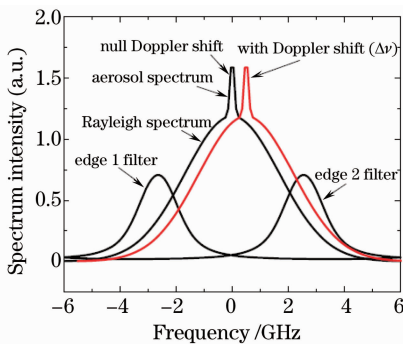


图 1 基于瑞利散射的双边缘激光测风雷达示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the double-edge-technique based on Rayleigh scattering

对于双边缘技术激光测风系统,系统的响应函数  $R(\nu)$  可以定义为

$$R(\nu) = \frac{N_1(\nu) - N_2(\nu)}{N_1(\nu) + N_2(\nu)}, \quad (1)$$

式中  $N_1(\nu)$  和  $N_2(\nu)$  分别是信号光频率为  $\nu$  时两路信号接收到的光子数,利用该响应函数进行风速反演,可以有效地减少背景噪声<sup>[15]</sup>、激光频谱宽度和频谱形状波动的影响<sup>[2]</sup>。

如果响应函数曲线有较好的线性,则风速  $V$  和响应曲线的关系可以表示为

$$V = \frac{c}{2\nu} \frac{R(\Delta\nu) - R(0)}{R(0)\theta}, \quad (2)$$

式中  $c$  为光速,  $\Delta\nu$  为多普勒频移,  $R(0)$  和  $R(\Delta\nu)$  分别表示没有产生多普勒频移和带有多普勒频移的响应函数值,  $\theta = \frac{dR(\nu)}{R(\nu)d\nu}$  为归一化灵敏度。如果响应曲线的线性度较差,风速反演结果就会引入非线性误差,在实际系统中,可以通过标校的方式,对响应曲线进行修正。

噪声对直接探测风速测量性能有很大的影响,其中主要的有散粒噪声和背景噪声。背景噪声可以通过测量的方式获得,并从测量得到的信号中减去背景噪声。因此文中仿真主要考虑散粒噪声,单路通道信噪比可以表示为

$$R_{SNi} = \sqrt{mN_i}, \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

式中  $N_i$  为滤波器的透过信号光子数,  $m$  为对信号的累加次数。

## 3 大气温度对 DFP 激光测风雷达的影响

设激光频率服从高斯分布,并表示为<sup>[9]</sup>

$$I_1(\nu, \nu_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\sigma_1^2}\right], \quad (4)$$

式中  $\nu$  为激光频率,  $\nu_0$  为激光的中心频率,  $\sigma_1$  为频率标准差。设激光的线宽(半峰全宽)为  $\Delta\nu_1$ , 频率标准差  $\sigma_1$  可以表示为

$$\sigma_1 = \frac{\Delta\nu_1}{\sqrt{8\ln 2}}. \quad (5)$$

当激光照射到大气分子时,由于大量大气分子的无规则热运动,会使散射回来的信号产生多普勒展宽,设展宽后的散射信号频谱仍然满足高斯分布,根据(4)式,散射回来的激光信号频率分布可以表示为

$$I_M(\nu, \nu_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_M^2}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_M^2)}\right], \quad (6)$$

式中  $\sigma_M$  为多普勒频谱展宽所引起的频率标准差大小,可以表示为

$$\sigma_M = 2 \frac{\sqrt{kT/M}}{\nu_0}, \quad (7)$$

其中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为大气温度,  $M$  为大气分子的平均质量。由此可以看出,多普勒频谱展宽和大气分子温度密切相关,而不同地区和环境的大气温度的差异较大,尤其是垂直分布。图 2 为 1976 年

美国标准大气 0~30 km 高度温度分布曲线, 温度变化范围将近 80 K。因此在仿真过程中, 必须考虑不同温度对分子后向散射信号频谱宽度的影响。

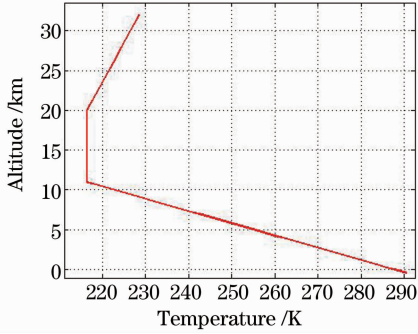


图 2 美国标准大气温度垂直分布

Fig. 2 Atmosphere temperatures profile of American standard atmosphere

望远镜接收到的回波信号经过准直后入射到 DFP 干涉仪, 理想法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪的透射率函数可以表示为一个艾里函数<sup>[16]</sup>

$$h_{\nu} = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + (4F^2/\pi^2) \sin^2(\delta/2)}, \quad (8)$$

式中  $\delta = \frac{4\pi n l}{c} \cos \alpha$  为相邻两反射光或者透射光之间的光程差,  $\alpha$  是入射角,  $l$  为标准具腔长,  $R$  为标准具平板的反射率,  $L$  为标准具平板的吸收和散射损失,  $\nu$  是入射光频率,  $n$  为两平板间的折射率, 通常将 FP 标准具置于空气中,  $n$  可以认为是 1,  $F$  是 FP 标准具的有效精细度。

由于理想的 FP 干涉仪的透射率函数是关于中心频率对称的, 因此透射光信号强度为回波信号和干涉仪透射率函数的卷积, 接收到的信号强度可以表示为<sup>[17]</sup>

$$I(\nu) = A \int_{-\infty}^{\infty} I_m(\nu') h(\nu - \nu') d\nu', \quad (9)$$

式中  $A$  为与系统有关的常数项, 可以通过系统标定获得。

## 4 模拟计算

根据第 2, 3 节所述理论, 对基于瑞利散射的双边缘技术星载激光测风雷达系统进行仿真。通过计算不同温度下的响应函数曲线, 分析大气温度对风速测量精度的影响。系统仿真过程中选择的是背景模式的大气模型, 其气溶胶浓度较低, 如图 3 所示, 且通过对 DFP 鉴频器进行了优化设计, 选择合适的干涉仪参数, 能够减少气溶胶的影响, 因此文中仿真

过程忽略了气溶胶的影响。系统仿真中选择的部分参数如表 1 所示。

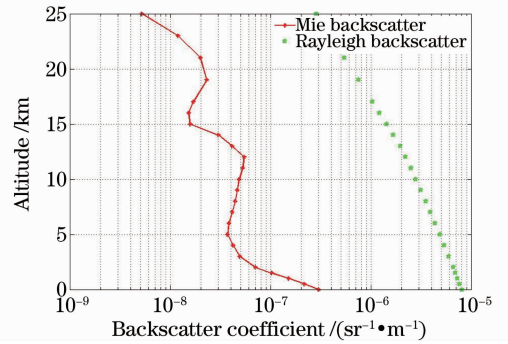


图 3 仿真中采用的大气后向散射系数分布模型

Fig. 3 Atmosphere backscatter coefficients distribution in the simulation

表 1 仿真模拟选用的系统参数

Table 1 System parameters in the simulation

System parameters	Accumulated pulses	1000
	Maximum wind speed / (m/s)	100
	Orbital height /km	400
	Zenith angle / (°)	35
	Diameter of telescope /m	1.5
Transmission system	Beam split ratio	0.5
	Range gate resolution /km	0.5~2
	Wavelength /nm	355
Parameters of the DFP	Pulse energy /mJ	150
	Spectral width /MHz	50
	FWHM /GHz	1.527
	Spacing /GHz	5.1
	Free spectral range /GHz	10.949

在仿真中选择的标准大气的温度分布范围为 216~291 K, 考虑到实际温度有更大的变化范围, 因此误差分析仿真中考虑的大气温度范围为 180~320 K。为了分析温度对双边缘技术测风系统响应曲线的影响, 选择了 310, 280, 250, 220 和 190 K 5 个温度对响应函数曲线进行模拟, 仿真结果如图 4 所示。可以看出, 不同大气温度下的响应函数曲线有较大差别, 大气温度越高, 响应函数曲线的斜率越低, 则系统的灵敏度  $\theta$  就越小; 且风速越大, 不同温度间的响应曲线值差别也就越大, 因此引入的风速误差就越大。如选择响应函数值大小为 0.2743, 对应上述 5 个温度的响应函数曲线反演的风速分别为 -99.98, -93.75, -87.62, -81.84 和 -76.39 m/s, 此时 190 K 和 310 K 温度对应的风速差别约为 24 m/s。因此在风速反演算法中, 必须考虑大气温度对响应函数曲线的影响, 对响应函数曲线进行温度校正, 提高风速反演精度。因此通过对系统的仿真分

析,在实际系统中可以根据最大风速和风速精度的要求,确定所需的大气温度分布精度。

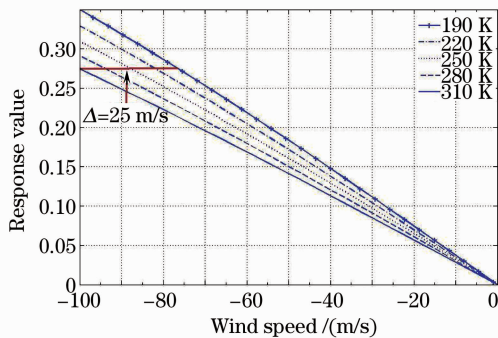


图4 不同温度下的响应函数曲线

Fig. 4 Response functions in different temperatures

在系统仿真中,对相关的 DPF 干涉仪参数进行了优化,使对应响应函数曲线有较好的线性,因此,在不同风速下,相同温度偏差对应的风速测量误差也有较好的线性关系。如 10 km 高度处,温度 240 K 时,不同风速情况下,1 K 温度偏差导致的风速测量偏差曲线如图 5 所示。因此一定温度下不同风速  $V$  的风速测量误差  $V_{\text{error}}$  可以表示为

$$V_{\text{error}} = aV/100, \quad (10)$$

式中  $a$  与大气温度有关。为了获得  $a$  与大气温度的关系,对 180~320 K 之间的温度进行响应曲线函数模拟,仿真结果如图 6 所示。

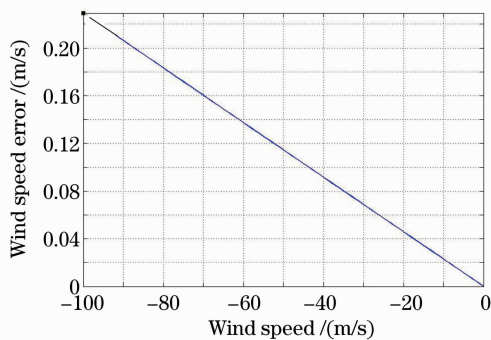


图5 240 K 时不同风速下 1 K 大气温度偏差引起的风速误差

Fig. 5 Wind speed error caused by 1 K temperature difference with wind speed at 240 K

对仿真结果中参数  $a$  与大气温度的关系曲线进行曲线拟合,拟合关系式为

$$a = 1.965943552 \times 10^{-8} T^3 - 1.72090606 \times 10^{-5} T^2 + 4.725588734 \times 10^{-3} T - 0.186. \quad (11)$$

结合(10),(11)式,就可以根据大气温度和系统最大风速的要求,估算大气温度所引入的风速误差。在系统仿真过程中,通过模拟系统干涉仪通道获得的信号强度,利用各垂直高度温度的响应函数曲线

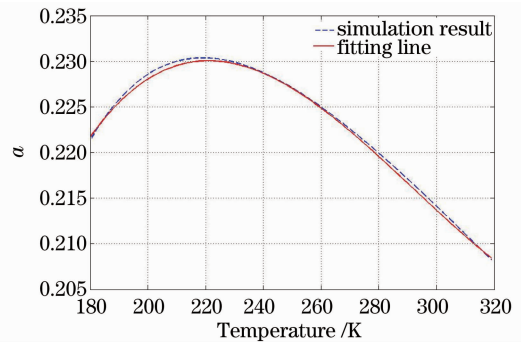


图6 参数  $a$  和温度之间的关系曲线

Fig. 6 Relationship between parameter  $a$  and temperature

进行风速反演,并对风速误差进行分析。如在系统中要求最大风速为 100 m/s 时,大气温度分布为标准大气温度廓线分布模型,大气温度引入的风速误差要求小于 1 m/s,根据(10)和(11)式计算,1 K 温度偏差下最大风速误差为 220 K 温度时 0.231 m/s,因此要求系统的温度精度为 4 K,此时根据公式估算的风速误差约为 0.924 m/s。在仿真过程中,根据需要的高度,对标准大气温度分布进行插值,并分别设置温度偏差  $\pm 4$  K 进行风速反演,输入的大气风速垂直分布模型以及仿真结果如图 7 所示。从仿真结果图中可以看出,在 10 km 附近风速较大时,温度偏差对风速测量精度的影响较大。此时,总的风速误差为 1.15 m/s,其中噪声引入的误差为  $-0.237$  m/s,因此  $+4$  K 温度偏差引入的风速偏差为  $-0.91$  m/s,满足估算值 0.924 m/s。同样,在风速为 26 m/s 时,总风速误差为 0.476 m/s,噪声影响风速误差为 0.247 m/s,因此温度偏差引入的风速误差为 0.23 m/s,满足估算值 0.231 m/s。

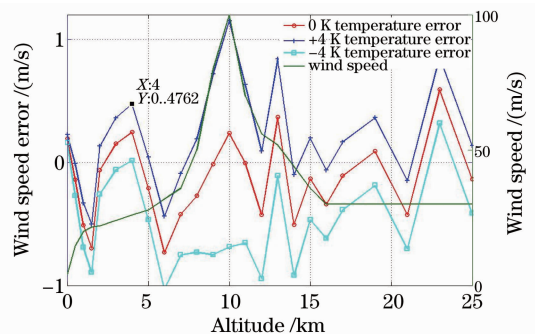


图7 不同温度偏差下风速误差随高度的分布

Fig. 7 Wind speed error profile at different atmospheric temperature deviations

## 5 结 论

主要研究了大气温度对基于瑞利散射的双边缘技术激光测风雷达的影响。不同的大气温度下后向

散射信号光频谱的多普勒展宽不同,响应函数也有差别。通过对星载激光雷达系统的模拟仿真,获得不同大气温度下的响应函数,并分析了温度变化引起的风速测量误差。利用模拟大气参数和系统参数,进行了仿真模拟,结果显示风速越大,大气温度对测量误差影响就越大。通过数值仿真、数据拟合的方法,获得了一定温度和风速下,温度误差导致的风速误差的估算公式。本文的研究有助于在系统设计中,根据最大风速和风速精度要求确定大气温度精度要求,并进行相应的温度校正。

### 参 考 文 献

- W. Baker, G. D. Emmitt, F. Robertson *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
- Wang Chunhui, Li Yanchao, Xu Bo *et al.*. Method and simulation of data quality control in velocity azimuth display inversion of wind lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 515~518  
王春晖,李彦超,徐博等.激光测风雷达速度方位显示反演中数据质量的控制方法与仿真[J].中国激光,2008,**35**(4): 515~518
- C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- Liu Jiqiao. Studies of Direct-Detection Doppler Wind Lidar[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006  
刘继桥.直接探测多普勒测风激光雷达研究[D].上海:中国科学院上海光学精密机械研究所,2006
- C. Flesia, C. L. Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 432~440
- Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-Doppler wind lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1339~1344  
刘继桥,卜令兵,周军等.车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J].中国激光,2006,**33**(10): 1339~1344
- Song Bao'an, Zhao Weijiang, Ren Deming *et al.*. Velocity measurement of hard target in angle-tuned Doppler wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 787~791  
宋宝安,赵卫疆,任德明等.角度调谐的多普勒激光雷达硬目标转速测量[J].光学学报,2008,**28**(4): 787~791
- M. L. Chanin, A. Garnier, A. Hauchecorne *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, **16**(11): 1273~1276
- Fahua Shen, Hyunki Cha, Jihui Dong *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 593~597
- B. M. Gentry, H. Chen, S. X. Li. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1231~1233
- M. Endemann. ADM-Aeolus: the first spaceborne wind lidar [C]. *SPIE*, 2006, **6409**: 64090G
- Bi Haixia, Wu Dong. Effects of Fabry-Perot interferometer temperature change and beam divergence on wind measurements using the double-edge-technique [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, **36**(s2): 136~140  
毕海霞,吴东. Fabry-Perot干涉仪的温度变化以及回波发散角对双边缘激光测风的影响[J].中国海洋大学学报,2006,**36**(s2): 136~140
- Xutao Sun, Jiqiao Liu, Jun Zhou *et al.*. Frequency stabilization of a single-frequency all-solid-state laser for Doppler wind lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 679~680
- Liu Yuan, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1857~1860  
刘源,刘继桥,陈卫标.人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器[J].中国激光,2009,**36**(7): 1857~1860
- Claude Souprayen, Anne Garnier, Albert Hertzog. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2410~2421
- Xia Haiyun. Direct Detection Doppler Wind Lidar Based on Aerosol Backscattered Signal with Twin-Channel Fabry-Perot Etalon[D]. Suzhou: Soochow University, 2006  
夏海云.基于气溶胶后向散射的双边缘直接探测多普勒测风激光雷达研究[D].苏州:苏州大学,2006
- P. A. Wilksch. Instrument function of the Fabry-Perot spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(10): 1502~1511