

文章编号: 0253-2239(2010)05-1332-05

# 用于测风激光雷达的三通道法布里-珀罗标准具性能分析

舒志峰<sup>1</sup> 唐磊<sup>1</sup> 董吉辉<sup>1</sup> 沈法华<sup>1</sup> 孙东松<sup>1</sup> 窦贤康<sup>2</sup> CHA H K<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; <sup>2</sup> 中国科学技术大学和空间科学学院, 安徽 合肥 230026  
<sup>3</sup> 韩国原子能研究所量子光学实验室, 韩国 大田

**摘要** 研制了用于瑞利散射多普勒激光雷达的三通道法布里-珀罗(Fabry-Pérot)标准具,采用 He-Ne 激光对其进行检测,利用产生的干涉图案检测了两个边缘通道的厚度差为  $74.70 \pm 2.24$  nm,对应频谱间隔为  $5.05 \pm 0.07$  GHz;锁定通道与其中一个边缘通道的厚度差为  $27.16 \pm 1.90$  nm,对应频谱间隔为  $1.79 \pm 0.07$  GHz。数值模拟结果表明:采用脉冲能量 350 mJ 波长 355 nm、重复频率 30 Hz 的激光器和口径 450 mm 的望远镜,利用该标准具作为鉴频器,在 0~40 km 高度,瑞利散射多普勒激光雷达的径向风速测量误差小于 2.53 m/s,测量精度比理论设计值 2.94 m/s 提高了约 14.1%。

**关键词** 分子散射;双边缘技术;测风激光雷达;法布里-珀罗标准具;干涉条纹

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1332

## Performance of the Triple Fabry-Pérot Etalon for Wind Lidar

Shu Zhifeng<sup>1</sup> Tang Lei<sup>1</sup> Dong Jihui<sup>1</sup> Shen Fahua<sup>1</sup> Sun Dongsong<sup>1</sup>  
Dou Xiankang<sup>2</sup> Cha H K<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup> School of Space and Earth Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup> Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

**Abstract** A triple Fabry-Pérot etalon for wind lidar is developed. The relative thicknesses of the etalon measured by using the interference fringe with the He-Ne laser are  $74.70 \pm 2.24$  nm and  $27.16 \pm 1.90$  nm. The corresponding separation of two edges etalon and that between edge1 etalon and locking etalon are  $5.05 \pm 0.07$  GHz and  $1.79 \pm 0.07$  GHz, respectively. The etalon as a frequency discriminator, a laser with the push energy of 350 mJ at wavelength 355 nm, repetition frequency of 30 Hz and a telescope with the diameter of 450 mm are used) to simulate the wind lidar. As a result, the actual line-of-sight wind speed error is lower than 2.53 m/s, the accuracy of line-of-sight wind is improved by 14.1% compared with the theoretical value of 2.94 m/s at the altitude of 0~40 km.

**Key words** molecular scattering; double-edge technique; wind lidar; Fabry-Pérot etalon; interference fringe

## 1 引言

全球范围内三维风场的探测对提高数值天气预报准确性、促进气候研究具有重要意义。而与其它风场探测手段相比,直接探测多普勒测风激光雷达是目前唯一能够实现对全球范围的三维风场进行高精度、高时空分辨率探测的工具。为此,近年来法国普罗旺斯重点实验室(OHP)<sup>[1,2]</sup>、美国密歇根公司<sup>[3]</sup>、美国国家航空航天局(NASA)Goddard 航天中心等机构相继研制了多台直接探测多普勒测风激

光雷达系统,并用于实际风场探测<sup>[4,5]</sup>。

目前,直接探测多普勒测风激光雷达系统大多采用了基于法布里-珀罗(Fabr-Pérot, F-P)标准具的条纹技术和边缘技术<sup>[6]</sup>。近年来随着加工技术的发展,已经可以加工性能稳定、分辨率高且可调谐的 F-P 标准具,这使标准具可以作为直接探测多普勒测风激光雷达的鉴频装置。

F-P 标准具作为测风激光雷达的鉴频器,其参数影响了整个测风激光雷达系统的风场探测性能。

收稿日期: 2009-04-28; 收到修改稿日期: 2009-06-29

基金项目: 国家 863 计划和安徽省国际科技合作项目(09080703032)资助课题。

作者简介: 舒志峰(1983—),男,硕士研究生,主要从事测风激光雷达方面的研究。E-mail: shuzhif@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962—),男,博士,研究员,主要从事激光遥感方面的研究。E-mail: Dssun@aiofm.ac.c

本文分析了影响标准具参数的各种因素,研制了三通道 F-P 标准具,并实验检测了标准具的性能参数,根据检测结果,数值计算了该标准具的径向风速测量的精度。

## 2 F-P 标准具基本工作原理

理想的 F-P 标准具是由两个完全平行的平板组成,它的透射比是一个经典的 Airy 函数

$$T(\nu, d, \theta) = T_p \left[ 1 + \frac{4F_c^2}{\pi^2} \sin^2 \left( \frac{2\pi\nu d}{c} \cos \theta \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中  $T_p = [1 - A/(1 - R)]^2$  为峰值透射比,  $A$  为标准具的吸收和散射损耗,  $R$  为对应波长的反射率,  $F_c$  为有效精细度,  $c$  为光速,  $\nu$  为入射光的频率,  $d$  为标准具的腔长,  $\theta$  为光束入射角。在激光雷达系统中,入射到标准具的光束是采用光纤耦合的方式得到,具有一定的发散角,若正入射且光束的全发散角  $2\theta_0$  很小的情况下,透射比可以近似表示为

$$T(\nu, d) = \frac{1}{\pi\theta_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} T(\nu, d, \theta) \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

图 1 给出了不同发散角光束入射下的透射比曲线,可以看出发散角增大会引起透射比峰值下降,频谱中心位置移动,以及条纹展宽。发散角在 3 mrad 以上透射比下降很厉害,频谱中心位置偏移较大,当发散角为 2.5 mrad 时峰值透射比相对下降了 5.5%,频谱中心位置移动了 10 MHz,这引起系统风速探测性能的下降是可以接受的,因此在系统设计时光束发散角要控制在 2.5 mrad 以内。同时标准具本身的缺陷也会对透射比产生影响,对于标准具的随机缺陷,一般用几率密度分布函数来表征<sup>[7]</sup>,实际标准具透射比曲线是理想透射比曲线和标准具缺陷分布函数的卷积。标准具的缺陷一般分为表面

质量缺陷和光学平板不平行缺陷,(3)式和(4)式分别为这两种缺陷的分布函数:

$$\begin{aligned} \phi_1(\delta d) &= \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma_1} \cdot \exp\left(-\frac{\delta d^2}{2\sigma_1^2}\right), \\ \phi_2(\delta d) &= \frac{2}{\pi\sigma_2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\delta d^2}{\sigma_2^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\delta d$  为缺陷深度值,  $\sigma_1$  为标准具表面缺陷标准差,  $\sigma_2$  为标准具两个光学平板不平行缺陷标准差。考虑以上因素之后,标准具的透射比函数为

$$T(\nu) = T(\nu, d) \otimes \phi_1(\delta d) \otimes \phi_2(\delta d), \quad (4)$$

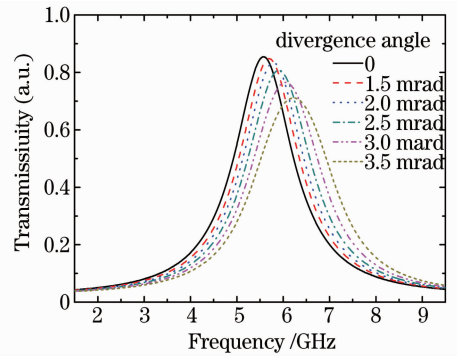


图 1 不同发散角下的标准具透射比曲线

Fig. 1 Transmittance curves at different incident angle

图 2 给出了标准具不同表面缺陷和两个光学平板不平行的标准具透射比曲线,可以发现随着表面平面度增加,标准具透射比峰值急剧下降同时频谱展宽,当平面度为 3.55 nm 即  $\lambda/100$ (分子测风激光雷达系统采用 355 nm 波长的激光)时,峰值透射比相对下降 6.9%,为了保证系统探测的性能,标准具平面度应控制在  $\lambda/100$  以内。同时,随着两个光学平板不平行度的增加,峰值透射比下降同时频谱展宽。基于标准具是可调谐的,可以调整小尺度上的不平行,设计时要求标准具可调谐最小程度为 0.082 nm,因此不平行导致系统测量性能的下降可以解决。

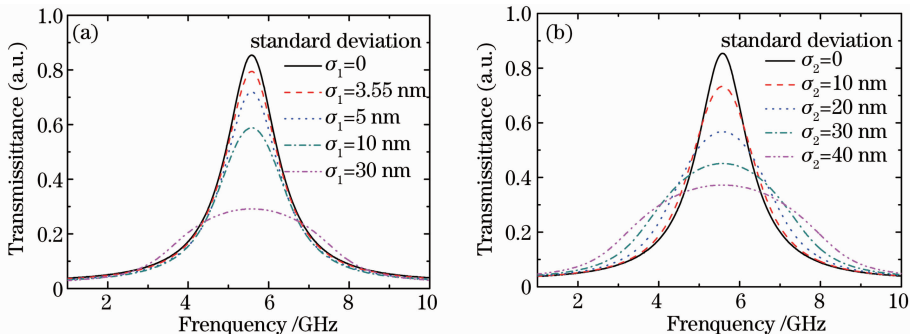


图 2 (a)表面缺陷对透射比的影响;(b)非严格平行对透射比的影响

Fig. 2 (a) Transmittance for effect of surface defect;(b) Transmittance for the effect of nonparallelism

标准具的性能用精细度来表示,理想标准具精细度为

$$F_r = \pi \sqrt{R}/(1 - R), \quad (5)$$

式中  $R$  为反射率。用缺陷精细度  $F_d$  来表征标准具的缺陷,则标准具的有效精细度为

$$F_e = (F_r^{-2} + F_d^{-2})^{-1/2}, \quad (6)$$

有效峰值透射比为<sup>[10]</sup>

$$T_{Pe} = T_P F_e / F_r. \quad (7)$$

### 3 三通道 F-P 标准具的设计

瑞利多普勒测风激光雷达系统中采用了三通道 F-P 标准具,其中两通道用于边缘探测,来获得信号的多普勒信息,锁定通道用来测量发射激光的频率,用以消除测量过程中激光频率的抖动和漂移。基于两点考虑:一是使系统探测误差最小;二是消除米氏后向散射信号的影响<sup>[9,10]</sup>,对三通道 F-P 标准具的

参数进行了优化设计<sup>[11~13]</sup>,设计的具体参数见图 3 和表 1,其中设计时峰值透射比应大于 60%,这是基于信噪比考虑的,低于 60% 信噪比很低,不能满足测量精度的要求。理论上峰值透射比越大越好,但由峰值透射比公式  $T_P = [1 - A/(1 - R)]^2$  可知,峰值透射比受到表面粗糙程度、吸收程度以及表面反射率的影响,这些都跟标准具加工工艺有关,设计优化时峰值透射比为 60% 是保受值。三通道标准具的腔长差都是在纳米量级,1 nm 的腔长差将引起两个通道标准具频谱(透射比函数)的相对位置变化 0.068 GHz,从而影响标准具的风速探测灵敏度,最终影响系统的风速测量精度。因此腔长差是评价三通道标准具鉴频性能好坏的最重要的参量之一,有必要对其进行检测。而对于腔长的要求是毫米量级,设计精度在微米量级,厂家基本上可以满足这样要求,不需要对其进行检测。

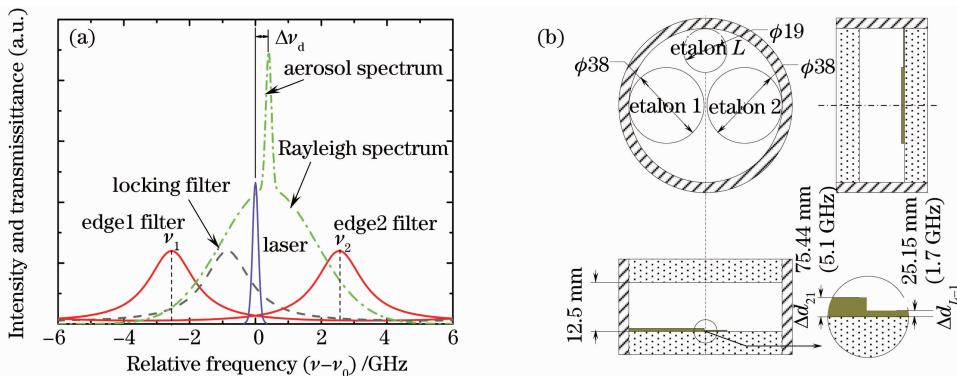


图 3 (a) 信号散射谱及三通道标准具透射比曲线; (b) 三通道标准具结构图

Fig. 3 (a) Spectra of scattering signals and triple etalon transmission curves; (b) Triple etalon configuration

表 1 三通道标准具的参数优化值

Table 1 Optimized parameters for triple F-P etalon

Parameter	Value
Wavelength /nm	355
Plate flatness	$\lambda/100$
Cavity transmittance /%	$\sim 60$
Cavity spacing /mm	$12.5 \pm 0.005$ (12 GHz)
Dual channel step height /nm	$d_{21} = 75.44$ ( $\nu_{21} = 5.1$ GHz)
Locking channel step height /nm	$d_{l-1} = 25.15$
(centre spectral distance to etalon 1)	$(\nu_{l-1} = 1.7$ GHz)
Effective finesse	$\sim 7$
FWHM /GHz	1.7

### 4 标准具性能的测试

使用波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光照射标准具的平板,根据干涉图样来检测标准具的三个通道相对厚度,测量标准具之间的腔长差值,如图 4 所示。

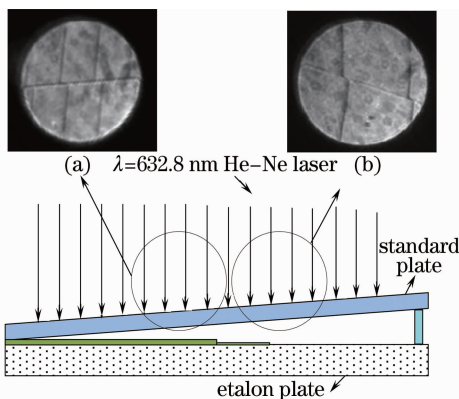


图 4 三通道标准具干涉图样。(a) 两个边缘通道; (b) 边缘通道和锁定通道

Fig. 4 Interferogram of triple etalon. (a) two edge channels; (b) edge and locking channels

对于干涉图样的像素进行分析,得到两个边缘通道标准具和第一边缘通道与锁定通道标准具干涉图

样的光强等高线局部图,如图 5 所示。图 6 可以给出了每个干涉图样的垂直方向强度平均值随水平像素的变化。从图 6(a)求出等厚干涉条纹空间周期为  $27.24 \pm 0.18$  pixel,两个边缘通道标准具的干涉条纹相差  $6.43 \pm 0.15$  pixel,由干涉理论可知标准具的腔长差为  $74.69 \pm 1.04$  nm。从图 6(b)中可以求出标准具的干涉条纹周期为  $51.78 \pm 0.19$  pixel,

第一个边缘通道和锁定通道标准具干涉条纹空间周期为  $4.35 \pm 0.21$  pixel,求出标准具的腔长差为  $26.58 \pm 1.03$  nm。设计时标准具的腔长为 12.5 mm,经过计算,得到两个边缘通道峰值透射比频率间隔为  $5.05 \pm 0.07$  GHz;锁定通道和第一个边缘通道的透射比峰值频率间隔为  $1.79 \pm 0.07$  GHz。

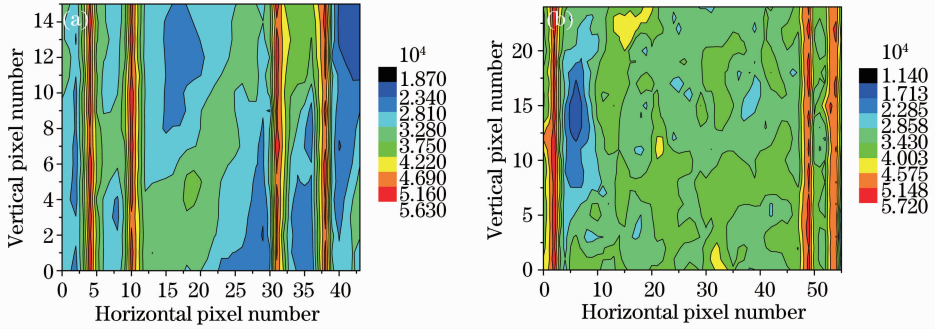


图 5 干涉光强等高线。(a)双边缘通道;(b)第一边缘通道与锁定通道

Fig. 5 Contour of interferogram. (a) two edge channels; (b) first edge channel and locking channel

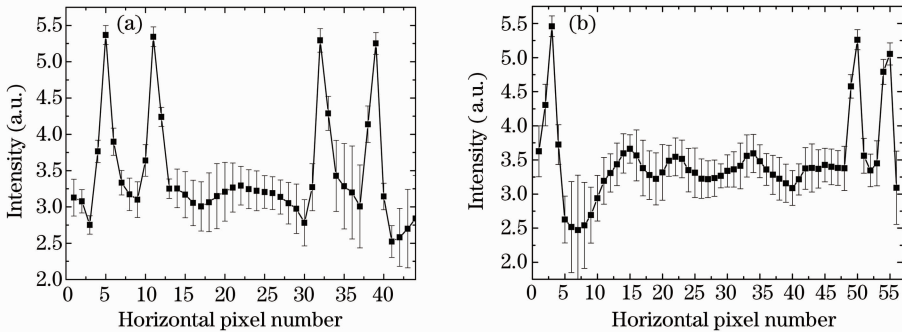


图 6 干涉图样纵向像素平均值。(a)两边边缘通道;(b)边缘通道和锁定通道

Fig. 6 Mean verical pixel intensity of interferogram. (a) two edge channels; (b) edge1 channel and locking channel

图 7 给出了标准具表面透射比与不同波长之间的关系,对应于 355 nm 的激光波长反射率为  $65\% \sim 67.5\%$ ,可以得出反射精细度  $F_r$  为 7.54。根据标准具的平面度为  $\lambda/100$ ,可以计算出缺陷精细度  $F_d$  为 25.3,由(6)式得到有效精细度为 7.1。

厂家提供的吸收和散射损耗  $A$  约为  $2\%$ ,由此可得  $T_p$  为  $88.6\%$ ,再由(7)式得到标准具的有效峰值透射比  $T_{pe}$  为  $83.4\%$ ,优于设计时对峰值透射比(约为  $60\%$ )的要求,与  $60\%$ 的设计值相比提高了  $23.4\%$ 。实际的三通道标准具的具体参数值归纳在表 2 中。

表 2 三通道标准具参数实测值

Table 2 Parameters of the triple F-P etalon

Parameters	Modified value
Wavelength /nm	355
Plate flatness	$\lambda/100$
Cavity transmittance /%	83.4
Dual channel step height /nm	$74.69 \pm 1.04$
etalon separation /GHz	5.05
Locking channel step height /nm	$26.58 \pm 1.03$
(centre spectral distance to etalon 1)	(1.79 GHz)

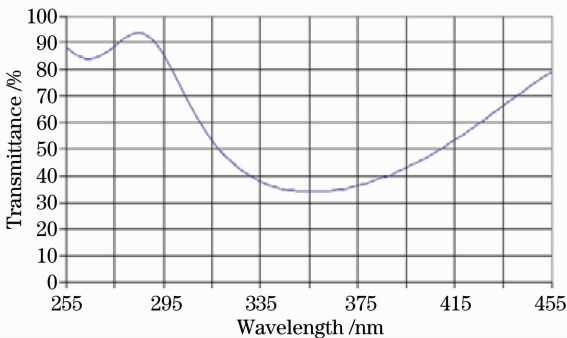


图 7 标准具表面透射比

Fig. 7 Transmittance on etalon surface

## 5 径向风速测量性能估算

根据表 1 和表 2 列出的理论设计的和实际的标准具参数,可以分别算得理论设计的和实际标准具的速度测量灵敏度,如图 8(a)所示。从图中可以看出实际的标准具的速度探测灵敏度与理论设计的相比整体下降了 0.006%。再根据美国标准大气模式以及采用在 355 nm 的脉冲能量为 350 mJ、重复频率 30 Hz 的激光器和口径 450 mm 的望远镜,由径向风速误差公

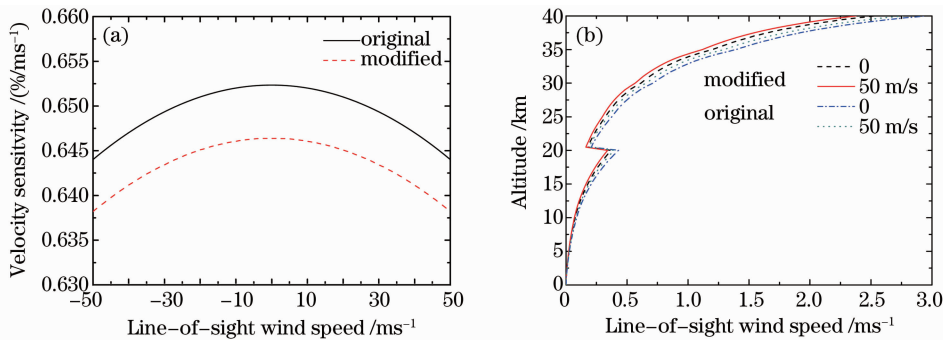


图 8 (a)实际和设计标准具的测量风速灵敏度的比较;(b)实际和设计标准具的测量径向风速误差的比较

Fig. 8 (a) The comparison of velocity sensitivity for modified and original etalon; (b) The comparison of line-of-sight wind speed error for modified and original etalon

## 6 结 论

分析了各种因素对标准具参数的影响,考虑这些因素条件下,根据基于分子后向散射测风激光雷达特点,研制了三通道 F-P 标准具。采用 He-Ne 激光测量标准具厚度差,得到两个边缘通道和边缘与锁定通道之间的腔长差分别为  $74.70 \pm 2.24$  nm 和  $27.16 \pm 1.90$  nm,利用检测参数数值计算该标准测量速度灵敏度与设计的基本一致,峰值透射比与设计时 60% 相比增加了 23.4%,根据检测出的标准具参数计算出径向风速探测精度,在 0~40 km 高度与设计值相比提高了 14.1%。该标准具能够满足瑞利多普勒测风激光雷达系统的要求,为今后类似标准具的设计和检测提供了实验和理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog *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
- 2 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2422~2431
- 3 C. Nardell, P. B. Hays, J. Pavlich *et al.*. GroundWinds new hampshire and the LIDAR fest 2000 campaign[C]. *SPIE*, 2002, **4484**: 36~50
- 4 S. Businger, B. Moore, C. Nardell *et al.*. Ground Winds

式  $\epsilon_v = [\theta_v(S/N)]^{-1}$  可以计算得到瑞利多普勒激光雷达系统的径向风速测量误差随高度的变化关系,如图 8(b)所示。可以看出,采用理论设计的标准具,在  $\pm 50$  m/s 的径向风速动态范围内,采用 1800 发脉冲累积,雷达系统在 0~40 km 高度的径向风速测量误差小于 2.94 m/s,而采用实际的标准具,在 0~40 km 高度的径向风速测量误差小于 2.53 m/s,相比理论设计值风速测量精度提高了 14.1%。

- Hawaii; applications for wind profiles derived from an ultra-violet LIDAR in hawaii[C]. *SPIE*, 2002, **4546**: 127~132
- 5 B. M. Gentry, H. L. Chen. Performance validation and error analysis for a direct detection molecular Doppler lidar[C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 287~294
- 6 C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Wena *et al.*. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- 7 G. J. Sloggett. Fringe broadening in Fabry-Perot interferometers [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(14): 2427~2432
- 8 J. A. Mckay. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. 1. The edge technique[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6480~6486
- 9 C. Flesia, C. Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 432~440
- 10 Sun Dongsong, Yang Zhao, Xue Guogang. Performance analysis of direct detection Doppler lidar for wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 115~117
- 孙东松,杨昭,薛国刚. 直接探测测风激光雷达的性能分析 [J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2): 115~117
- 11 Xia Haiyun, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Design of verifying attachment for calibration of wind lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1412~1416
- 夏海云,孙东松,钟志庆等. 应用于测风激光雷达的多普勒校准仪[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1412~1416
- 12 Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection 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
- 13 Shen Fahua, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Error analysis of wind lidar based on fizeau interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1761~1765
- 沈法华,孙东松,钟志庆等. 基于菲佐干涉仪测风激光雷达的误差分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1761~1765