

文章编号:1001-5078(2006)01-0029-03

测风激光雷达中 F-P 标准具的分析及性能检测

夏海云¹, 孙东松², 钟志庆³, 王邦新³, 陈敏¹

(1. 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006; 2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083; 3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:基于双边缘技术的测风激光雷达中,多普勒频移由高分辨率的 F-P 标准具检测得到。数值计算了存在各种缺陷的标准具响应曲线,分析了入射光束发散角、表面质量以及平行度对透过率谱宽的影响。用等厚干涉的方法测量了标准具双通道的腔长差值和表面质量。在窄带和宽带光源照射下,分别测量了标准具双通道的透过率曲线。长期测量(22天)的系统误差为 0.42~0.85m/s。

关键词:激光测风雷达; Fabry-Perot 标准具; 气溶胶; 多普勒效应

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Analysis and Performance of the Fabry-Perot Etalon for a Doppler Direct Detection Wind Lidar

XIA Hai-yun¹, SUN Dong-song², ZHONG Zhi-qing³, WANG Bang-xin³, CHEN Min¹

(1. Department of physics, Soochow University, Suzhou 215006; 2. School of Instrument Science and Photo-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083; 3. Institute of Anhui Optics and Fine Mechanics Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: A dual Fabry-Perot etalon with high spectral resolution is used as the frequency discriminator in the wind detection system. Simulations of the system at 1064nm using reasonable instrumental parameters are used to show the effects of the imperfections and the beam divergence to the etalon. The frequency center distance between the dual channels was measured from interferograms. Transmissions of the dual channels are also measured with CW laser and Q-switched pulse laser. Comparisons have been made between experiment data and theoretically derived transmission functions with designed parameters. System error ranges from 0.42 m/s to 0.85 m/s for a long period of 22 days.

Key words: detection wind lidar; Fabry-Perot etalon; aerosol; Doppler

1 引言

近年来国内外关于直接探测多普勒测风激光雷达的各种报道说明,人们对这一领域的研究与日俱增。鉴于大气风场数据的重要性,美国国家航空航天局 Goddard 航天中心已经研制了车载的直接探测多普勒测风激光雷达系统^[1];欧航局已经启动风神太空计划(Aeolus Mission),并将于2008年发射升空世界第一台星载多普勒测风激光雷达^[2](ALADIN)。这些测风激光雷达的基本原理都是边缘探测技术^[3,4]。基于 F-P 标准具的双边缘探测技术的发展使我们能够更有效、更准确地探测对流层和低平流层的风速^[5,6]。随着光学加工工艺和光电技术的发展,F-P 标准具因具有测量精度较高、稳定性易控制、测量动态范围可调、后期数据处理方便等优点,迅速成为直接探测多普勒测风激光雷达中的首选鉴频装置。

标准具作为直接测风激光雷达的核心部件,其设计参数决定了整个系统的光学参数。其分辨率和

稳定性直接决定了雷达系统的测风精度。文中分析了各种因素对标准具透过率的影响。在此基础上,设计了双通道结构的 F-P 标准具。并对标准具的光学性能和长期稳定性进行了测量。

2 Fabry-Perot 标准具的分析与设计

理想 Fabry-Perot 标准具的透过率是一个 Airy 函数:

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

式中, l 为标准具腔长; R 为对应波长的反射率; L 为光损耗; c 是光速; 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 是有效精细度。对实际的激光雷达系统,入射到标准具的光束总是存在

作者简介:夏海云(1980-),男,苏州大学物理科学与技术学院硕士研究生,就读于中国科学院安徽光学精密机械研究所,从事测风激光雷达方面的研究工作。

收稿日期:2005-04-21;**修订日期:**2005-06-17

一定的发散角。在正入射且光束全发散角 2θ (Beam Divergence Full Angle) 很小, 透过率可以近似表示为:

$$H_0(\nu) = \frac{2}{\theta_0^2} \int_0^{\theta_0} h(\nu, \theta) \cdot \sin\theta d\theta \quad (2)$$

研究表明^[7]: $\theta_0 \leq 1 \text{ mrad}$ 时, 相对误差小于 6%。若连接光学天线和接收机的光纤的芯径为 $100 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22, 则要求标准具的口径为 49mm。

标准具加工时, 无法保证平面绝对平整。对整个标准具平面, 定义表面缺陷高(深)度值为 δ 的几率密度函数为 $D_1(\delta)$, 其服从高斯分布:

$$D_1(\delta) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (3)$$

式中, σ_1 是表面缺陷标准差(工艺水平为 $\lambda/100$), 则考虑表面质量的透过率函数可以表示为:

$$H_1(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\nu, l - \delta) \times D_1(\delta) d\delta \quad (4)$$

实验操作时, 两平板不一定严格平行。假设平行板边缘与中心位置的腔长差值 σ_2 (由于倾斜引起的最大偏差量), 则倾斜几率密度函数可以表示为:

$$D_2(\delta) = \frac{2}{\pi\sigma_2^2} \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\sigma_2^2}} \quad (5)$$

在两平板不严格平行时的透过率函数为:

$$H_2(\nu) = \int_{-\sigma_2}^{+\sigma_2} h(\nu, l - \delta) \times D_2(\delta) d\delta \quad (6)$$

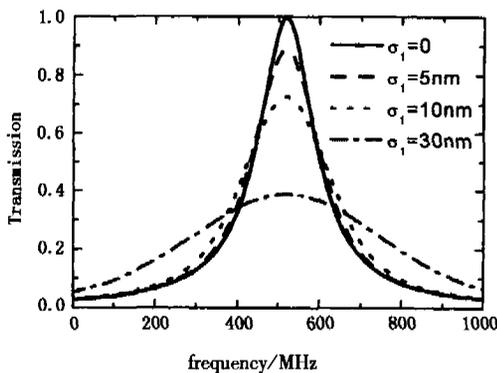


图 1 表面质量对透过率的影响
Fig. 1 Transmissions for surface irregularities

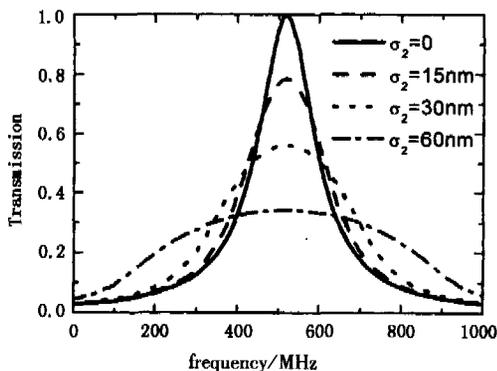


图 2 非严格平行对透过率的影响
Fig. 2 Transmissions for maladjustment

图 1 和图 2 分别显示了表面质量和两平板非严格平行对透过率曲线谱宽和峰值的影响。以上分析

了入射光发散角、表面质量、两平板非严格平行对透过率函数的影响。而实际情况总是多种展宽源同时存在^[8], 如果各种展宽没有统计相关性, 那么:

$$W^2 = W_0^2 + 12 \sum_i \sigma_{d(i)}^2 \quad (7)$$

W 是存在多种缺陷时的复合展宽, W_0 是爱里函数理论谱宽, $\sigma_{d(i)}$ 是第 i 个展宽源的标准偏差。

如果要求水平风速测量的动态范围达到 $\pm 75 \text{ m/s}$, 则双通道透过率曲线的峰值间距应设计为 200MHz。测风时, 通过调节腔长, 使得气溶胶后向散射信号在双通道上的透过率曲线交点(且为半高点)在出射激光频率处。气溶胶后向散射信号在双通道上的透过率函数为激光频谱函数与标准具透过率函数的卷积。考虑到激光脉宽(约 60MHz)、表面缺陷标准差(约 $\lambda/100$)、非严格平行($\sigma_2 = 1 \text{ nm}$, 压电陶瓷的最小分辨率)的影响, 设计理论谱宽值为 $W_0 = 170 \text{ MHz}$, 自由谱间距为 3.5GHz。

3 实验检测

3.1 测量标准具的表面质量以及双通道腔长差值

在波长 633nm 的光源照明下, 通过等厚干涉条纹, 对标准具的表面质量以及双通道的腔长差值进行了检测。双通道均采用半圆结构, 图 3 为平行和垂直标准具平行板分界线方向的干涉照片。图 4 为垂直分界线方向的光强等高线图。

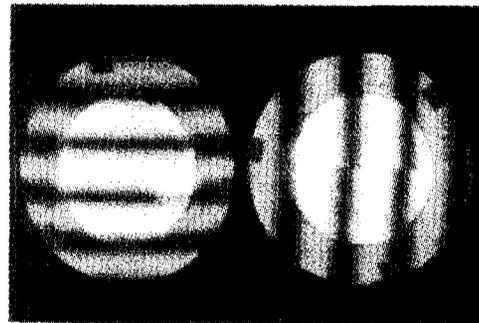


图 3 标准具干涉条纹
Fig. 3 Etalon interferograms

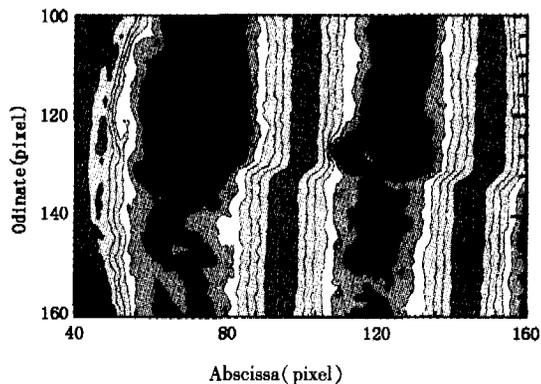


图 4 干涉光强等高线图(局部)
Fig. 4 Contour of the interferogram

测试结果: 条纹空间周期为 $a = 49.4 \pm 0.3$ 单位, 双通道的干涉条纹相差 $b = 5.1 \pm 0.3$ 单位。由等厚干涉条纹可知标准具的腔长差为 $32.7 \pm 1.8 \text{ nm}$ 。在正入射情况下, 若设定腔长为 42.856 mm , 那

么两通道透过率峰值的频率间隔为 $215 \pm 12\text{MHz}$ 。

图 4 中,光强等高线的平直程度直接反映了干涉面的平整程度。分别对平行和垂直平行板分界方向的等高线进行多次测量,可以计算表面缺陷的标准差为 $\delta z = 4.3\text{nm}$,与其对应的频率标准差为 $\sigma_d = 26.4\text{MHz}$ 。由公式(7)得:仅考虑表面缺陷时的频谱宽度 $W = 196.4\text{MHz}$ 。

3.2 测量标准具双通道透过率曲线

使用模拟探测器,在窄带光和宽带光入射情况下,用扫描标准具腔长的办法分别测量了双通道的透过率曲线。分别如图 5、图 6 所示。窄带光入射时,采用 Lorentz 拟合,测得两通道谱宽分别为:196.7MHz 和 190.6MHz,峰值间距为 204.1MHz;宽带光入射时,采用 Voigt 拟合,测得谱宽分别为:211.5MHz 和 222.3MHz,峰值间距为 206.2MHz。

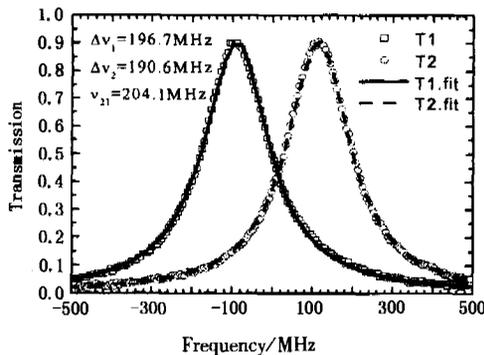


图 5 连续光入射时的响应曲线

Fig. 5 Transmittance measured with CW laser

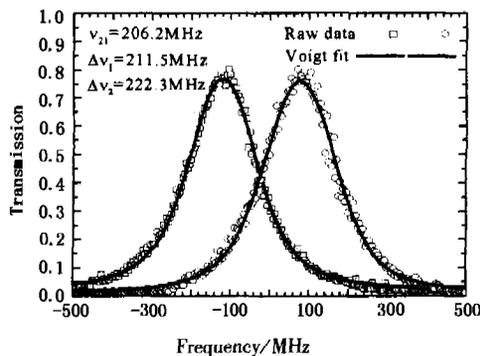


图 6 脉冲光入射时的响应曲线

Fig. 6 Transmittance measured with pulsed laser

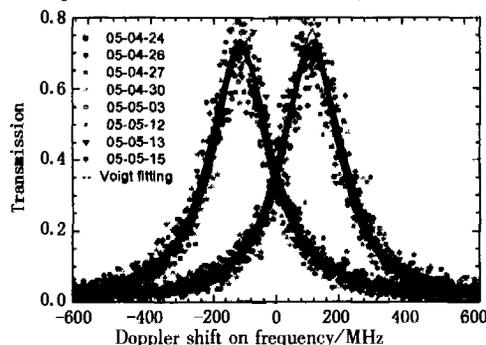


图 7 透过率曲线的长期稳定性

Fig. 7 Repeatability of the transmissions for long term

使用光子计数器,在窄带光入射下,对标准具的

长期稳定性进行了测试,结果如图 7 所示。图 8 为实测速度灵敏度曲线。透过率曲线长期测量的标准偏差为 1.69%,对应实测的速度灵敏度曲线,由此导致的径向风速测量的系统误差为 0.42 ~ 0.85m/s。

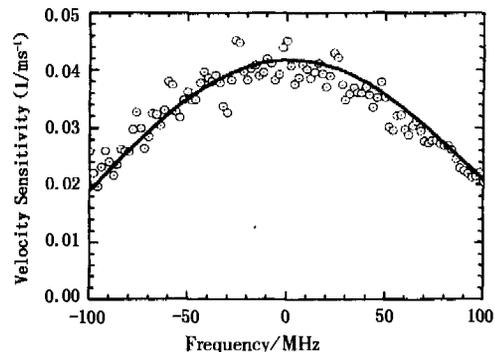


图 8 实测速度灵敏度

Fig. 8 Velocity sensitivity from experiment data

4 结论

文中分析了入射光发散角、表面质量以及两平行板非严格平行对透过率曲线的影响。在此基础上,根据基于气溶胶后向散射信号的测风激光雷达的特点,设计了双通道结构的 Fabry-Perot 标准具。并对 F-P 标准具的光学性能和长期稳定性进行了实验检测。实验测量结果与理论计算吻合。这为标准具应用于测风激光雷达时,系统的实验调整以及进一步的稳定性控制提供了实验和理论依据。

参考文献:

- [1] Bruce Gentry, Huailin Chen. 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, San Diego, CA, 2001, 4484 (7): 30-31.
- [2] Didier Morancais, Frederic Fabre, Marc Schillinger. ALADIN: The first European lidar in space [A]. 22nd International Laser Radar Conference [C], ILRC2004, 1, 127-129.
- [3] C L Korb, B Gentry, C Y Weng. The Edge Technique-Theory and application to the Lidar Measurement of Atmospheric Winds [J]. Applied Optics, 1992, 31, 4202-4212.
- [4] C L Korb, B Gentry, S X Li. Edge Technique Doppler Lidar Wind Measurements with High Vertical Resolution [J]. Applied Optics, 1997, 36, 5976-5983.
- [5] C L Korb, B Gentry, S Li, et al. Theory of the Double-Edge Technique for Doppler Lidar Wind Measurement [J]. Applied Optics, 1998, 37, 3097-3104.
- [6] Flesia C, C Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Appl. Opt., 1999, 38, 432-440.
- [7] 丁红星, 孙东松. 测风激光雷达光束发散对测量精度的影响 [J]. 激光与红外, 2004, 31 (1): 18-20.
- [8] G J Sloggett. Fringe broadening in Fabry-Perot interferometers [J]. Appl. Opt., 1984, 23, 2427-2432.