

测风激光雷达法布里-珀罗标准具参数及其性能分析

王国成^{1,2} 孙东松³ 段连飞² 舒志峰¹

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
² 解放军炮兵学院三系, 安徽 合肥 230031; ³ 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026

摘要 法布里-珀罗(F-P)标准具是直接探测多普勒测风激光雷达常用的鉴频器件,标准具的性能及其入射光路的设计对整个探测系统的测量误差起着决定性的作用。基于三通道标准具的检测原理,对标准具的主要设计参数如自由谱间距、带宽和边缘通道之间峰值间距等进行了分析,给出了设计方法;入射光的状态对标准具透射率曲线的影响较为明显,根据标准具透射率相关方程,分别讨论了入射光的入射角、发散角和入射光斑未全部通过标准具设计通道对透射率曲线的影响,并且给出了相应的测量误差分析。

关键词 测风激光雷达;法布里-珀罗标准具;参数设计;误差分析

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0301001

Analysis and Design of Fabry-P rot Etalon of Doppler Wind Lidar

Wang Guocheng^{1,2} Sun Dongsong³ Duan Lianfei² Shu Zhifeng¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Department No. 3, Artillery Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China
³School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Fabry-P rot etalon is usually employed as discriminating frequency unit in direct detection Doppler wind lidar, and performance of Fabry-P rot etalon and design of state of incident light beam are important factors in measurement error of the whole systems. The fundamental theory of the Doppler wind lidar based on a triple Fabry-P rot etalon is introduced. After deep analysis of free spectral range (FSR) and full width at half maximum (FWHM) and peak value interval in two edge channels, the project of parameters design is obtained. The state of incident light beam has an obvious effect on transmission curve of Fabry-P rot etalon. According to the correlative equation, the effects of incident angle, divergence angle and partial facula permeating through etalon channel designed on transmission curve are provided, and corresponding measurement error is calculated and simulated.

Key words wind lidar; Fabry-P rot etalon; parameters design; error analysis

OCIS codes 010.3640; 010.0280; 010.1310; 010.1290

1 引 言

随着科学技术的发展,航天航空兵器的研制水平达到了前所未有的高度,高技术兵器的训练和使用需要精确的大气空间风场分布数据,航空器种类的发展与使用空间的拓展也日趋多样化与全球化,对风场数据的需求从高度上和时间上越趋于高分辨

率;近年来异常天气的频繁发生,对于天气依赖程度较大的行业受到不同程度的损失和影响,同样需要准确的天气预报。

当前,风场观测系统较多,测风激光雷达在高时空分辨率上具有较大的优势,并且空间风场分布测量的研究已经成为激光雷达大气遥应用的热点之

收稿日期: 2010-05-24; 收到修改稿日期: 2010-11-11

基金项目: 国家 863 计划 和中国科学技术大学引进人才项目(ZC9850290093) 资助课题。

作者简介: 王国成(1975—),男,博士研究生,主要从事激光遥感探测技术方面的研究。E-mail: guochengw@sina.com

导师简介: 孙东松(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事多普勒测风激光雷达方面的研究。

E-mail: sds@ustc.edu.cn

一,是未来大气遥感不可替代的工具。

测风激光雷达探测技术分为相干和直接探测两种,在直接探测方式的激光雷达中,鉴频技术是该系统的关键技术之一。边缘技术的提出,使直接探测激光测风技术得到了大幅度的发展,1990年 Korb 等^[1-3]提出新的大气测量方法,使用边缘技术并且给出了基本原理,Korb 等^[4]于 1998 年将单边缘技术发展为双边缘技术,当前已经有了应用^[5]。美国航空航天局(NASA)的 GLOW^[6]为车载直接探测激光雷达,采用标准具双边缘技术,能够探测到从 1.8~ 35 km 高度的大气风场;法国 OHP 的激光雷达系统是由 Chanin 等^[6,7]组建的基于双通道法布里-珀罗(F-P)标准具的分子散射双边缘技术测风系统,探测的范围是整个平流层及对流层顶(约 8~ 50 km),垂直分辨率为 150 m。经过十几年的发展,基于 F-P 标准具的双边缘技术已近成熟。本文讨论了基于分子和气溶胶后向散射的测风激光雷达系统 F-P 标准具的参数设计及其透射率影响因素分析。

2 基本原理

测风激光雷达使用 F-P 标准具对大气悬浮颗粒的激光后向散射光进行频率鉴别,以求得多普勒频移,进而求得径向风速。

F-P 标准具根据干涉原理,采用两块平行的玻璃板或石英板组成,入射光照射到标准具后,在出射端会产生干涉条纹,当两板内反射面平行时,产生的干涉条纹会更加尖锐。根据两反射面的光程是否可调整,将标准具分为固定式 F-P 标准具和可调谐式 F-P 标准具。标准具的干涉条纹如图 1 所示。

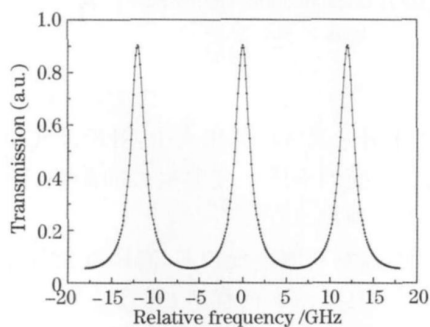


图 1 标准具透射率曲线图

Fig. 1 Spectrum of etalon transmission

假设标准具的平板间距为 d , 板间折射率为 n , 平行入射到标准具的光电矢量的复振幅为 E_0 , 因而相邻两反射或透射光之间的光程差为 $\Delta = 2nd \cos \theta$, 相应的相位差为 $\delta = k\Delta = 4\pi nd \cos \theta / \lambda$ 通过推导,可以

求得透射光强 I_t 与入射光强 I_0 的比值,即标准具透射率函数^[8]为

$$h = I_t / I_0 = \left| \sum_{i=1}^{\infty} E_i \right|^2 / E_0^2 = T_p \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $T_p = [1 - A / (1 - R)]^2$ 为标准具的峰值透射率, A 为标准具平板的吸收损耗, R 为平板内表面膜层反射率。

在采用双边缘技术时,即使用三个(其中两个为边缘通道,另一个为锁定通道)通道的标准具,通道间的腔长会有差异,这个差值决定了两个通道透射率峰值的间隔,间隔的数值选取取决于后向散射谱的谱宽。米氏散射谱宽与激光发射谱宽相近,分子热运动产生的多普勒展宽效应使得瑞利散射谱的谱宽比米氏散射谱宽大得多,基于分子和气溶胶后向散射的激光雷达测风系统,标准具通道的两个相邻峰值间隔(即一个自由谱间距)之内应该包含米氏散射谱和瑞利散射谱的大部分能量。利用两个频谱分布相同而峰值频率分开的 F-P 标准具作为边缘滤波器,使用两个滤波器的边缘对瑞利散射谱进行检测,由于瑞利散射谱较宽,使得两个标准具的峰值间隔拉得很开,这样导致交点处的速度灵敏度降低。为了提高测量精度,启用第三个通道,利用它的单边缘对发射激光频率进行跟踪与锁定,将激光频率锁定在它的半高宽位置,这个位置与两个边缘滤波器的交点重合,这样形成了基于三通道标准具的多普勒检测方式,三通道透射率原理示意图如图 2 所示。

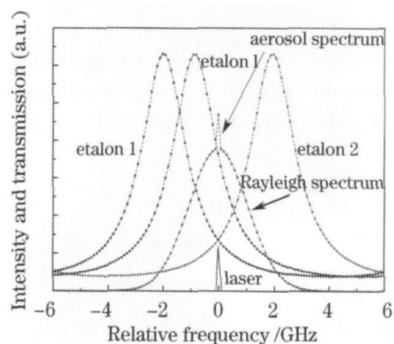


图 2 透射率及散射谱图

Fig. 2 Spectrum of transmission and backscattering

3 标准具主要参数设计

标准具是测风激光雷达接收机的核心部件,标准具参数反映了透射率曲线的陡峭程度,它的选取直接影响系统的信噪比和探测精度,这里主要讨论

两个边缘通道的参数设计。

3.1 自由谱间距的选取

标准具透射率曲线是周期性的陡峭波峰, 一个通道的连续两个波峰之间的宽度称为自由谱间距 (FSR)。为了减少测量误差, 一个自由谱间距应该囊括分子后向散射谱和气溶胶后向散射谱, 而随着自由谱间距的增大, 两个边缘通道在透射率交点处的频率灵敏度会降低。分子后向散射谱比气溶胶谱宽得多, 这里以分子后向散射谱为基准, 分子散射谱线可以用一高斯谱函数来描述^[9]:

$$f_{\text{Ray}}(\nu, T) = (1/\pi\Delta\nu_r^2)^{1/2} \exp(-\nu^2/\Delta\nu_r^2) \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu_r$ 为瑞利谱线的 1/e 高度处的宽度

$$\Delta\nu_r = (8kT/M\lambda^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中 λ 为激光波长, k 为玻耳兹曼常数, T 为大气分子的温度, M 为分子质量。

假设激光工作波长取 532 nm、大气温度为 226.5 K 时, 分子高斯散射谱的均方根 $\Delta\nu_r \approx 1.49$ GHz, 它的 99.73% 的瑞利信号集中在 $6\Delta\nu_r$ 的频率范围内, 加之多普勒频移范围取 200 MHz, 要求自由谱间距 $\nu_{\text{FSR}} \approx 10$ GHz 较为合适。

3.2 带宽和峰值间距的选取

假定光斑是均匀的, 发射激光频率严格锁定在两边边缘通道透射率交点处, 考虑零多普勒频移时的情况, 径向风速的测量误差^[9-11]为

$$\varepsilon = [\theta_v \cdot (S/N)]^{-1}, \quad (4)$$

式中 θ_v 为速度灵敏度, (S/N) 为测量频率响应函数数值的信噪比, 可表示为

$$(S/N) = [(S/N)_1^2 + (S/N)_2^2]^{-1/2}, \quad (5)$$

式中 $(S/N)_1$ 和 $(S/N)_2$ 为通道 1 和通道 2 的信噪比。假定系统采用的是采用光子计数探测器, 可表示为

$$(S/N)_i = N_i / (N_i + N_{b,i} + N_{d,i})^{1/2}, \quad (6)$$

式中 $i = 1, 2$; N_i 为探测通道 i 接收到的瑞利和米氏散射总的信号光子数; $N_{b,i}$ 为探测通道 i 接收到的天空背景光子数; $N_{d,i}$ 为探测通道 i 对应探测器的暗计数。

在信号散粒噪声极限下, 算得径向风速的测量误差^[12, 13]为

$$\varepsilon = \left\{ \left[\frac{N_R T_R(\nu, T_a)}{4} \right]^{1/2} \frac{4}{\lambda} \times \frac{1}{T_R(\nu, T_a)} \frac{\partial T_R(\nu, T_a)}{\partial \nu} \bigg|_{\nu=\nu_0} \right\}^{-1}, \quad (7)$$

式中 N_R 为接收到的瑞利散射光子数; T_R 为透射率值; T_a 为对应的大气温度; ν 为频率; 对于高斯分布的瑞利散射光谱信号, 探测通道 i 接收到的在理想

的鉴频器下测量径向风速的极限误差 (CRLB) 为

$$\varepsilon_d = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta\nu_r}{\sqrt{2N_R}} \quad (8)$$

相对误差定义为

$$\varepsilon = \varepsilon_r / \varepsilon_d. \quad (9)$$

求得在激光工作波长取 532 nm、激光线宽为 200 MHz、 $T_a = 226.5$ K, 当带宽取不同值时, 相对误差随两个边缘通道标准具峰值间隔的变化关系如图 3 所示。

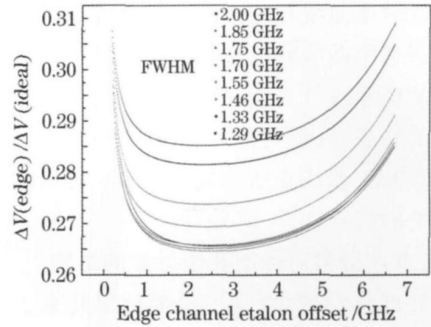


图 3 不同的标准具带宽下, 相对误差随两个边缘通道标准具峰值间隔的变化关系

Fig. 3 With different FWHM, relation between relative error and peak interval of etalon in two edge channels

从图 3 可以看出, 当带宽选择 1.75 GHz 时, 相对误差较小。如果系统设计的探测对象为气溶胶与大气分子, 则要考虑二者的速度灵敏度差异, 速度灵敏度表示单位速度变化引起的输出光强的相对变化量, 是标准具本身的性质决定的参数。定义为

$$\theta_v = \frac{2}{N(\nu)} \frac{dT(\nu)}{d\nu}. \quad (10)$$

通过对两边边缘通道透射率峰值间隔选取指定值来弥补二者的差异所带来的测量误差, 可基本消除

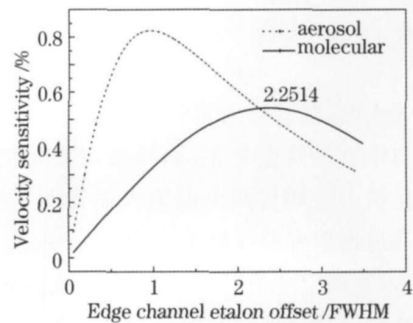


图 4 分子和气溶胶散射信号的速度灵敏度随两个边缘通道标准具的峰值间隔变化

Fig. 4 Relation between peak interval of etalon in two edge channels and velocity sensitivity of scattering signal from molecule and aerosol

由大气成分的区别所带来的误差。在激光工作波长取 532 nm 时,分子信号灵敏度与气溶胶信号的灵敏度关系图如图 4 所示。当两通道峰值间距为 2.2514 倍于带宽时,分子信号灵敏度等于气溶胶信号灵敏度,该值对应应在图 3 中的测量误差处于最小的区域。

4 性能分析

标准具在实际使用中,受到多种因素的影响,它的实际透射率曲线与理论曲线存在差别^[14~16],主要体现在透射率曲线峰值降低、带宽宽度增宽、三通道透射率峰值相对位置发生变化等方面,主要原因是入射光的状态、入射光路与标准具通道的相对关系、标准具自身工艺状态所决定的,这里主要讨论与入射光相关的因素。

4.1 光束入射角对标准具透射率的影响

在标准具参数设计时,主要针对光束正入射标准具透射率的状态,如图 2 所示。而实际工程实践中,入射光束与标准具平面法线间总会存在一定的入射角,根据(1)式,得到透射率曲线与入射角的关系,如图 5 所示。

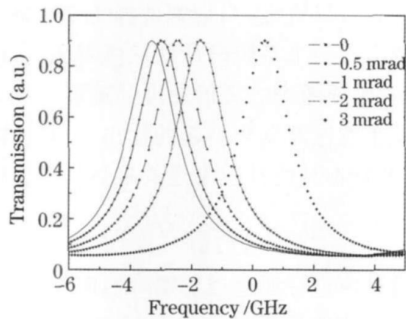


图 5 透射率随入射角的变化关系

Fig. 5 Relation between transmission and beam incident angle

图 5 表明,随着入射角的增大,透射率曲线的峰值高度与带宽未发生变化,而峰值位置发生偏移并且逐渐在增大。如果两个通道入射光不平行,将会造成两通道透射率曲线峰值间距发生变化。由图 3 可知,在带宽确定的情况下,两个边缘通道峰值间距增大或减少时均会使相对测量误差增大。

4.2 光束发散角对标准具透射率的影响

大气后向散射光经过望远镜接收后,经由光纤耦合进入准直系统,进而入射到标准具,准直系统用来将光纤出射光压缩成平行光,但是实际光路调试中总会存在一定的发散角,致使透射率发生变化。透射率

与发散角的关系可以用下面公式^[16]进行表述:

$$h(v) = \frac{2T_{pe}}{\theta_0^2} \int_0^{\theta_0} \left[1 + 4 \left(\frac{V_{SR}}{\pi \Delta V_{1/2}} \right)^2 \times \sin^2 \left(\frac{\pi V \cos \theta}{V_{FSR}} \right) \right]^{-1} \sin \theta d\theta. \quad (11)$$

这里发射激光频率选取 532 nm,全发散角为 2 θ_0 。透射率随发散角变化关系如图 6 所示。

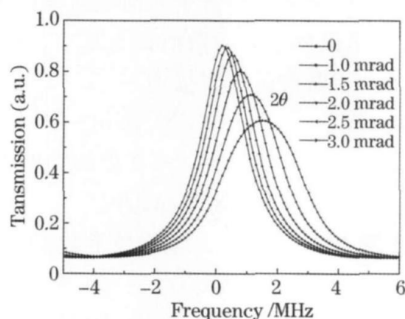


图 6 透射率随发散角的变化关系

Fig. 6 Relation between transmission and beam divergence angle

图 6 表明,标准具入射光发散角变化后,透射率会发生明显变化。随着发散角的增大,透射率曲线峰值、带宽、峰值位置都会发生变化,这将会带来测量误差。

系统的速度灵敏度和相对测量误差与入射光发散角的关系可由(4),(7)~(9)式进行推算,在零多普勒频移时相互关系如图 7,8 所示。

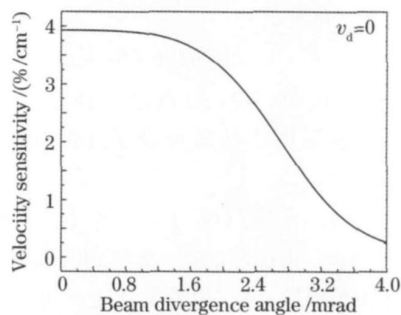


图 7 速度灵敏度与发散角的变化关系

Fig. 7 Relation between velocity sensitivity and beam divergence angle

图 7 表明,当发散角增大时,速度灵敏度呈递减状态,并且当发散角超过 1.2 mrad 后,速度灵敏度下降很快。从图 8 可以看出,风速测量误差随着发散角的增大而增大,当发散角从 1 mrad 增至 2 mrad 时,由发散角引起的测量误差相对于系统总的测量误差从 0.86% 增加到 17.22%。

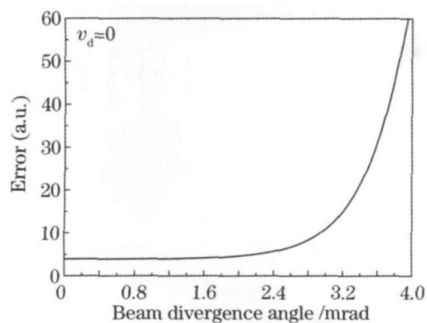


图 8 风速测量误差随发散角的变化关系

Fig. 8 Relation between wind-velocity measurement error and beam divergence angle

4.3 部分光斑通过设计通道对透射率的影响

标准具通道透光孔径往往根据入射光斑大小设计和加工,这里假定有部分光斑通过标准具内反射面镀膜通道,为便于计算,取 50%,剩余部分光斑通过未镀膜通道,通过标准具后,两部分光斑被同一聚焦系统收集。假定标准具单一通道出现上述情况,根据(1)式对上述情况的两部分透射率分别进行计算并求和,得到这一通道实际透射率曲线图,如图 9 所示。

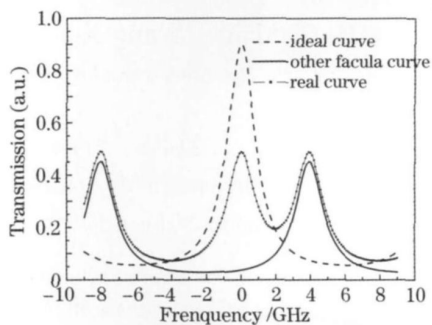


图 9 实际透射率与频率的关系图

Fig. 9 Relation between real transmission and frequency

从图 9 可以看出,当有部分光斑通过设计通道时,实际透射率曲线的透射率峰值会降低,峰值间距缩小,导致在一个设计自由谱间距范围内可能出现多个波峰。进而导致双边缘通道峰值间距减小,带来的测量误差变化关系如图 3 所示。

5 结 论

多通道 F-P 标准具设计及加工技术在国际上均属新兴的高科技技术,相关的光路对标准具透射率影响较大,进而会增大整个探测系统的测量误差。系统地介绍了标准具多普勒频率检测原理,对标准具的主要参数给出了设计方法,主要包括标准具自由谱间距、带宽和两个边缘通道峰值间距等。对标准具透射率曲线与入射光状态的关系进行了讨论,

主要分为入射光的入射角、发散角和入射光斑未全部通过指定标准具通道的情况,并且对相应情况产生的测量误差进行了估算,对测风激光雷达标准具设计及相关研究提供了有益参考。

参 考 文 献

- 1 C. L. Korb, B. Gentry, C. Weng. The edge technique-theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~ 4213
- 2 B. M. Gentry, C. L. Korb. Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33** (24): 5770~ 5777
- 3 C. L. Korb, B. M. Gentry, S. X. Li *et al.*. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5976~ 5983
- 4 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
- 5 M. P. Cadirola, D. N. Whiteman, S. H. Melfi *et al.*. Measurement improvements in the NASA Goddard space flight center's scanning Raman lidar[C]. *Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, 2006, 106~ 108
- 6 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
- 7 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog *et al.*. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements: II. Mie scattering effect, theory, and calibration[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2422~ 2431
- 8 Shen Fahua, Cha Hyunki, Sun Dongsong *et al.*. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar[J]. *Opt. Rev.*, 2008, **15**(4): 204~ 209
- 9 J. A. McKay. Modeling of direct detection Doppler wind lidar: I. The edge technique[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6480~ 6486
- 10 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
- 11 Shu Zhifeng, Tang Lei, Dong Jihui *et al.*. Performance of the triple Fabry-Pérot etalon for wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1332~ 1336
- 舒志峰, 唐磊, 董吉辉等. 用于测风激光雷达的三通道法布里-珀罗标准具性能分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1332~ 1336
- 12 Tang Lei, Shu Zhifeng, Dong Jihui *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double edge technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(8): 726~ 731
- 13 Shen Fahua, Sun Dongsong, Chen Min *et al.*. Error analysis of DWL based on Fabry-Pérot rot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1761~ 1765
- 沈法华, 孙东松, 陈敏等. 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
- 14 H. Xia, D. Sun, Y. Yang *et al.*. Fabry-Pérot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29): 7120~ 7131
- 15 C. L. Korb, C. Flesia, S. Lolli *et al.*. Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1466~ 1468
- 16 Shen Fahua, Sun Dongsong, Chen Min *et al.*. Analysis on the factors influencing measure precision of wind lidar based on Fizeau interferometer[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(1): 53~ 58
- 沈法华, 孙东松, 陈敏等. 影响 Fizeau 干涉仪测风激光雷达测量精度因素分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, **1**(1): 53~ 58