

瑞利多普勒激光雷达超窄带滤光器的设计

李梓霖¹, 陈廷娣¹, 刘恒嘉¹, 孙东松¹, 王国成², 唐磊³

- (1. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国人民解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031;
3. 合肥师范学院 电子信息与电气工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 目前中国科学技术大学车载激光雷达已经实现了对于 15~60 km 中性大气风场的夜间连续观测, 鉴于白天观测的信噪比受到背景光的限制, 因此, 设计了一种利用现有干涉滤光片结合固态 FP 标准具的超窄带滤光器, 用于实现背景噪声的降低。提出了一种结合鉴频器参数确定 FP 最佳参数的方法, 得出了 FP 标准具的参数, 实现了带宽为 8.4 pm、中心波长为 354.73 nm、自由光谱间距为 150 pm、峰值透过率高于 0.67 的滤光器, 将背景噪声降低到原来的十八分之一。该滤光器有效提高了系统信噪比, 减小了风速误差, 同时计算了温度、角度变化对滤光器带宽、中心波长和透过率的影响, 设计了一种角度调谐的方法。实验结果与理论值具有较高的一致性。

关键词: 激光雷达; 超窄带; 瑞利; 多普勒; 法布里-珀罗标准具

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1030003

Design of ultra-narrow filter for Rayleigh Doppler lidar

Li Zimu¹, Chen Tingdi¹, Liu Hengjia¹, Sun Dongsong¹, Wang Guocheng², Tang Lei³

- (1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. New Star Institute of Applied Technology, PLA, Hefei 230031, China;
3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

Abstract: The mobile lidar of USTC implements the continuous wind measurement in 15–60 km neutral atmosphere at night. Since the signal to noise ratio was limited by background light during daytime operation, an ultra-narrow filter which combined an interference filter with a solid FP etalon was designed to reduce the background noise. An approach to solve the optimum parameters for the F–P etalon was proposed, based on the Frequency Discriminator, an etalon filter with bandwidth of 8.4 pm, center wavelength of 354.73 nm, free spectral range of 150 pm and peak transmission of 0.67 was achieved to decrease the background noise to one in eighteen. The improvement of SNR and velocity errors were simulated. The effect of temperature and tilting angle on bandwidth, center wavelength and transmissivity was calculated. A method of tuning by tilting angle was designed. The experiment result is highly uniform with the theoretical value.

Key words: lidar; ultra-narrow; Rayleigh; Doppler; Fabry–Perot etalon

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(41574180, 41374156, 41204108); 中国科学技术大学校预研基金(YX2081600023, YZ2081600026)

作者简介: 李梓霖(1989-), 男, 博士生, 主要从事测风激光雷达及光电探测方面的研究。Email: lizimu@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测、激光雷达遥感等方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

0 引言

对于中性大气的风场连续探测对于研究大气波动及传播的机理以及通讯、飞行器安全方面都具有重要的作用。激光雷达已经实现了在夜间对于中性大气的风场观测,但在白天观测的过程中,背景光噪声过大一直是限制实现激光雷达对于中性大气风场连续观测的主要问题。因此,具有超窄带宽的光学滤光片在筛选需要的光谱范围同时抑制其他探测器响应波长范围内的背景噪声强度成了解决连续观测问题的重要手段。

激光雷达目前运用的主要的抑制背景的方法有两种:法拉第反常色散滤光器和 FP 标准具滤光器。法拉第反常色散滤光器是基于纵向磁场中的样品原子共振吸收线附近的反常色散,主要运用于共振荧光激光雷达,该滤光器具有工作波长可调谐、窄带宽等特性,但是同时也具有结构复杂,控制过程要求高等特点,目前已经在多个课题组及设备中使用^[1-2]。FP 标准具式的滤光器是基于多光束干涉原理从而产生周期性的透过率。设计紧凑的 FP 标准具可以具有较高的透过率和光谱分辨率。同时采用空气隙的结构和低热膨胀系数的材料也可以有效减小温度对其的影响。通过角度、温度和气压等都可以通过改变腔长对其进行调谐。

ALOMAR 的多普勒测风测温激光雷达系统采用了干涉滤光片加双标准具结构在白天观测抑制背景光。工作波长为 532 nm,整体结构的 FWHM 为 0.13 nm,带宽为 4 pm^[3];CALIPSO 同样采用这种组合方式,利用干涉滤光片和单个标准具组合。工作波长为 532 nm,FP 标准具的 FSR 为 0.71 nm,带宽为 0.77 nm^[4]。

在该设计中,讨论了针对中国科学技术大学中高层大气瑞利多普勒测风激光雷达^[5-6]白天观测用的超窄带滤光器的参数设计方法,采用标准具式滤光器来实现对白天背景噪声的抑制,达到激光雷达白天风场观测的目的。确定了基本参数和加工参数,同时讨论了温度和角度变化对滤光器透过率曲线的中心波长、带宽和峰值透过率的影响,最后给出了实验结果和分析。

1 原理

接收光路由望远镜接收回波信号,经由两次反

射经过准直透镜形成一段平行光路,经过标准具滤光器滤波,再由耦合透镜耦合进入光纤,光纤另一端出射光经由耦合透镜变成平行光,利用非偏振分光棱镜分光,分别通过鉴频标准具两个通道,再经由耦合透镜耦合,最后进入探测器中。标准具滤光器放置于接收前端的平行光路中,防止发散角对标准具透过率峰值的降低,见图 1。

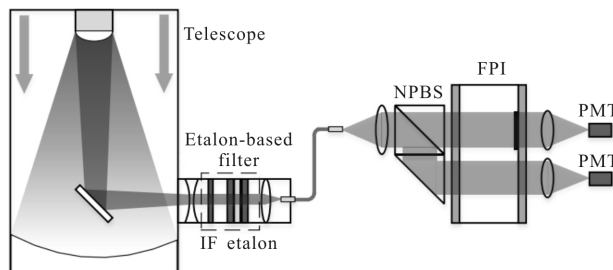


图 1 中国科学技术大学瑞利多普勒激光雷达接收系统

Fig.1 Rayleigh Doppler lidar receiving system of USTC

中国科学技术大学瑞利激光雷达系统的激光工作波长为 354.7 nm,采用双通道 FP 标准具作为鉴频器,单通道的 FSR 为 12.5 GHz,带宽为 1.8 GHz,两通道频差为 5.1 GHz,发散角为 1.9 mrad;PMT 探测器的光谱响应范围为 230~700 nm;干涉滤光片的带宽为 0.15 nm,峰值透过率为 0.85^[7]。

鉴频器单通道的透过率曲线 $h(\nu)$ 为:

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

式中: L 为标准具损耗; R 为标准具的镀膜反射率; F 为标准具的 finesse; $\Delta\nu$ 为标准具带宽; θ 为发散角。

选用的带宽为 0.15 nm、峰值透过率为 0.85 的干涉滤光片的透过率曲线 $g(\nu)$ 为:

$$g(\nu) = \frac{T_p}{4 \left(\frac{\nu}{\Delta\nu}\right)^2 + 1} \quad (2)$$

式中: $\Delta\nu$ 为滤光片的带宽; T_p 为峰值透过率。

瑞利谱为:

$$T_R(\nu) = \sqrt{\frac{4\ln(2)}{\pi(\delta\nu_T^2 + \delta\nu_L^2)}} \cdot e^{-\frac{4\ln(2) \cdot \nu^2}{\delta\nu_T^2 + \delta\nu_L^2}} \quad (3)$$

式中:

$$\delta\nu_T = \sqrt{\frac{32\ln(2)kT_{ref}}{\lambda_0 m_e}} \quad (4)$$

式中： $\delta\nu_T$ 为瑞利谱宽； k 为玻耳兹曼常数； $T_{ref}=226.5\text{K}$ ， $m_e=4.81\times 10^{-26}\text{kg}$ ； $\delta\nu_L$ 为激光谱宽， $\delta\nu_L=200\text{MHz}$ 。

为达到最佳设计指标，文中将设计滤光器、鉴频标准具的透过率曲线和瑞利谱的卷积结果看做信号 S (公式(5))，将设计滤光器与鉴频标准具的透过率曲线的卷积结果看做背景噪声 N (公式(6))，定义 $P_{SN}=S/N$ (公式(7))。

$$S(\mu)=\int_{-\infty}^{\infty} h(\nu)\cdot h_{et}(\nu)\cdot g(\nu)\cdot T_R(\mu-\nu)d\nu \quad (5)$$

$$N(\mu)=\int_{-\infty}^{\infty} h(\nu)\cdot h_{et}(\nu)\cdot g(\mu-\nu)d\nu \quad (6)$$

$$P_{SN}=\frac{S(\mu)}{N(\mu)} \quad (7)$$

式中： $h(\nu)$ 为设计标准具的透过率曲线； $h_{et}(\nu)$ 为鉴频标准具的透过率曲线； $g(\nu)$ 为固定带宽滤光片的透过率曲线； $T_R(\nu)$ 是瑞利谱。由此可看出， P_{SN} 越大表示信噪比越强，所以设计参数应以 P_{SN} 值作为指标。

对于 FP 标准具而言，带宽 $\Delta\nu$ 和自由谱间距 FSR 是最主要的两个参数，精细度表示条纹的细锐程度， $\text{Finesse}=\text{FSR}/\Delta\nu$ ，而精细度 Finesse 由平板的平行度精细度 F_{Dp} 、平整度精细度 F_{Dg} 、缺陷精细度 F_{Ds} 和镀膜反射率精细度 F_R 决定，他们的关系如公式(8)所示^[8]：

$$\frac{1}{F}=\left[\frac{1}{F_R^2}+\frac{1}{F_{Dp}^2}+\frac{1}{F_{Dg}^2}+\frac{1}{F_{Ds}^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中： F_{Dp} 、 F_{Dg} 、 F_{Ds} 由加工工艺决定， F_R 由镀膜材料决定。在实际的工艺条件下，平板缺陷的精细度基本固定，Finesse 主要受镀膜反射率控制，镀膜反射率越高，精细度越高，同时总体透过率越低，如图 2 所示，因此，为了保证透过率大于 60%，则 Finesse 最大值为 18。

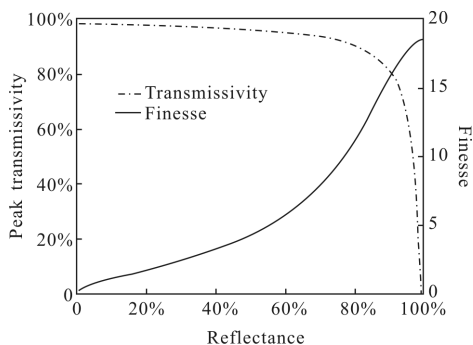


图 2 镀膜反射率与峰值透过率和精细度的关系

Fig.2 Peak transmissivity and finesse versus coating reflectance

根据公式(1)~(7)，可以得到 Finesse 和 P_{SN} 之间的关系，图 3 反映了精细度 Finesse 和 P_{SN} 之间的关系。

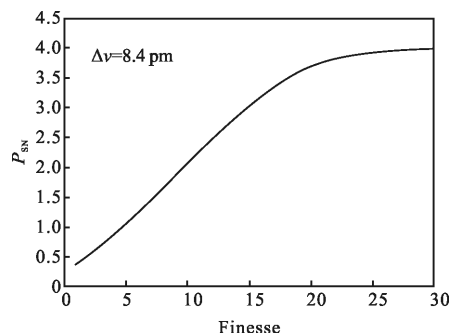


图 3 P_{SN} 随 Finesse 的变化(带宽 $\Delta\nu=8.4\text{pm}$)

Fig.3 P_{SN} versus Finesse(Bandwidth $\Delta\nu=8.4\text{pm}$)

由图 3 可知，在带宽一定的条件下，Finesse 越大， P_{SN} 越高，为了获得更好的效果，精细度越高越好，因此 Finesse 取最大值 18。

在固定 Finesse($F=18$)的情况下，带宽变化 $\Delta\nu$ 。

由图 4 可知， P_{SN} 总体趋势随带宽变大先增后减，且具有极大值在 8 pm 附近，且在带宽 $<8\text{pm}$ 区间内 P_{SN} 上下波动较大，容易在调谐过程中导致信噪比降低，因此带宽的最优点选在 8.4 pm 处^[9-10]。表 1 列出了设计标准具的参数。

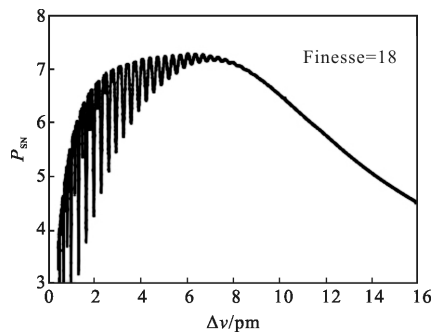


图 4 P_{SN} 随带宽的变化(Finesse=18)

Fig.4 P_{SN} versus bandwidth(Finesse=18)

表 1 标准具参数

Tab.1 Parameters of etalon

Parameters	Value
FSR/pm	150
Bandwidth/pm	8.4
Finesse	17.86
Clear aperture/mm	30
Length of spacer/ μm	419.4

2 标准具滤光器对信噪比及径向风速误差影响的仿真

对于光子计数的探测方式,其信噪比 SNR 为:

$$SNR = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_b}} \quad (9)$$

式中: N_s 为接收到的信号光子数; N_b 为背景光子数, 包括光学背景和暗计数。中国科学技术大学直接瑞利测风激光雷达采用的是标准具双边缘鉴频技术, 对于双通道, 其总信噪比可以表示为:

$$SNR = (SNR_1^{-2} + SNR_2^{-2})^{-1/2} \quad (10)$$

式中: SNR_1 和 SNR_2 分别为两个通道的信噪比。

径向风速误差可以表示为:

$$V_{er} = \frac{1}{\theta \cdot SNR} \quad (11)$$

式中: θ 为系统速度灵敏度。

由瑞利激光雷达的雷达方程可以得到仿真雷达信号的强度:

$$E(\lambda_L, r) = E_L \cdot \frac{\Delta R \cdot A_0}{r^2} \cdot k(\lambda_L) \cdot \beta(\lambda_L, r) \cdot T^2(\lambda_L, r) \quad (12)$$

式中: E_L 为发射激光脉冲能量; λ_L 为发射激光波长; $\beta(\lambda_L, r)$ 为总的大气后向散射系数; A_0/r^2 为接收光学系统的接收立体角, A_0 为接收光学系统望远镜的接收面积; $k(\lambda_L)$ 为系统常数, 考虑了接收机的响应, 诸如光谱透过率因子和几何重叠因子; $T^2(\lambda_L, r)$ 为大气透过率系数; ΔR 为被辐射大气体积元的长度^[11-12]。

因此, 可以得到系统信噪比的提高, 如图 5 所示, 径向风速误差的减小, 如图 6 所示。

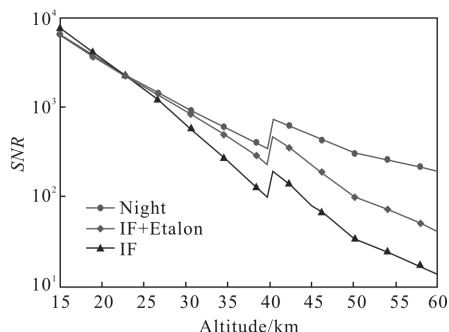


图 5 夜晚、白天使用干涉滤光片和白天使用超窄带滤光器三种情况下 SNR 随高度的变化

Fig.5 SNR versus altitude with IF in night and daylight, and with ultra-narrow filter in daylight

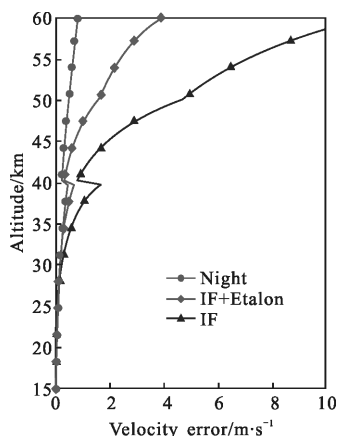


图 6 夜晚、白天使用干涉滤光片和白天使用超窄带滤光器三种情况下径向风速误差随高度的变化

Fig.6 Velocity error versus altitude with IF in night and daylight, and with ultra-narrow filter in daylight

由仿真结果可以看出, 在白天观测时使用了滤光器在 25 km 以下高度时, SNR 对比使用干涉滤光片的结果有所下降, 这是由于加入了滤光器导致了系统整体光学效率的降低, 但是由于背景抑制效果大大增强, 所以在探测距离上得到了极大的提升, 也可以从速度误差的仿真中得出相同的结论, 在白天观测中仅使用干涉滤光片在 60 km 高度时风速误差远超过 10 m/s, 而使用了滤光器以后, 风速误差可以控制在 4 m/s 以内, 只比夜间误差增加了一倍。

3 温度变化和入射角度对标准具透过率曲线的影响

3.1 温度变化对标准具透过率曲线的影响

固态 FP 标准具可以分为“三明治”式标准具和空气隙标准具, 前者是在两个薄熔石英窗口之间加入介质, 后者介质为空气。由于介质的不同, 两者对于温度和角度造成的透过率变化有着不同的灵敏度。温度变化会引起介质折射率和腔长的变化, 从而引起带宽和中心波长的变化。

已知熔石英的折射率温度系数为 10 ppm, 热膨胀系数为 0.5 ppm, 微晶玻璃(Zerodur)的热膨胀系数为 0.05 ppm, 则中心波长随温度的变化如图 7 所示。即温度变化 10 °C, “三明治”熔石英标准具的中心波长变化为 26.05 pm, 空气隙标准具的中心波长变化为 0.177 pm。

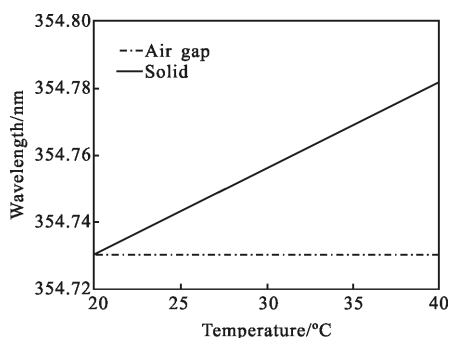


图 7 空气隙和熔石英固态标准具中心波长随温度的变化

Fig.7 Center wavelength versus temperature for air-gap and fused silica etalons

带宽随温度变化如图 8 所示。

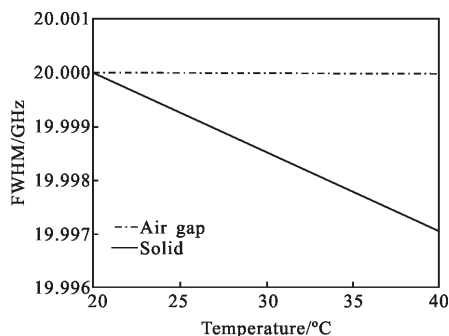


图 8 空气隙和熔石英固态标准具半高全宽随温度的变化

Fig.8 FWHM versus temperature for air-gap and fused silica etalons

即温度变化 10 °C,“三明治”熔石英标准具的带宽变化为 1.5 MHz,空气隙标准具的带宽变化小于 0.01 MHz。

温度影响体现在对折射率和腔长的影响,进而改变带宽和中心波长,在 10 °C 的温差范围内,空气隙标准具的带宽和中心波长的变化明显小于“三明治”标准具,对于中国科学技术大学的车载瑞利测风激光雷达,采用空气隙标准具可以忽略温度对其标准具透过率曲线造成的影响。

3.2 入射角度对标准具透过率曲线的影响

旋转标准具的调谐具有一定的范围限制,因为旋转标准具会增大带宽并减小峰值透过率。其新的峰值由公式(13)^[7]给出,Θ是入射光的发散角,θ是旋转的角度,n是介质的折射率,λ₀表示垂直入射时的波长:

$$\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2) = \lambda_0 - \frac{\Theta^2 + \theta^2}{2\theta} \lambda_0 \quad (13)$$

由图 9 可知,随倾角增大,中心波长随之减小,且角度越大,中心波长减小速度越快。在 10 mrad 范围内,空气隙标准具中心波长变化量为 18.4 pm,固态标准具中心波长的变化量为 8.6 pm。

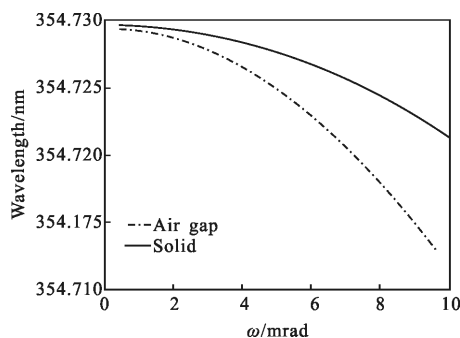


图 9 空气隙和熔石英固态标准具中心波长随倾角的变化

Fig.9 Center wavelength versus tilt angle for air-gap and fused silica etalons

其新的带宽由公式(14)^[13]给出,

$$\Delta\lambda = \sqrt{\Delta\lambda_0^2 + (\lambda_1 - \lambda_2)^2} \sqrt{\Delta\lambda_0^2 + \left(\frac{2\Theta\theta\lambda_0}{n^2}\right)^2} \quad (14)$$

式中:Δλ₀为平行光正入射时标准具带宽;n为介质折射率。

由图 10 可知,随倾角增大,带宽随之增大,且角度越大,带宽增大速度越快。在 10 mrad 范围内,空气隙带宽变化量为 7.5 pm,固态带宽变化量为 2.1 pm。

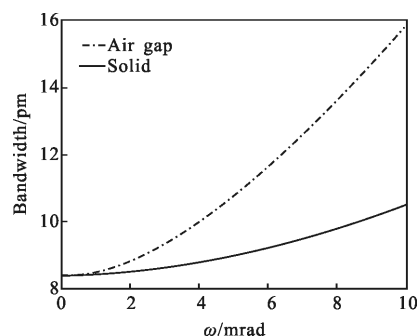


图 10 空气隙和熔石英固态标准具带宽随倾角的变化

Fig.10 Bandwidth versus tilt angle for air-gap and fused silica etalons

其新的峰值透过率由公式(15)^[7]给出,

$$T_{pk} = \frac{\Delta\lambda_0}{\left(\frac{2\Theta\theta\lambda_0}{n^2}\right)} \arctan\left(\frac{\left(\frac{2\Theta\theta\lambda_0}{n^2}\right)}{\Delta\lambda_0}\right) \quad (15)$$

由图 11 可知,随倾角增大,透过率随之下落。在 10 mrad 范围内,空气隙透过率变化量为 35%,固态

透过率变化量为 14%。结合温度和角度调谐两种情况的结果,在 SN 的允许范围内,标准具的带宽可以增加至 14 pm,峰值透过率要求大于 60%。空气隙标准具对于温度变化不敏感,因此温度稳定性较好,所以对于空气隙标准具可以采用角度调谐的方式,在峰值透过率下降不超过 80%的情况下,中心波长可以调谐 7 pm,此时带宽增加到 11 pm。

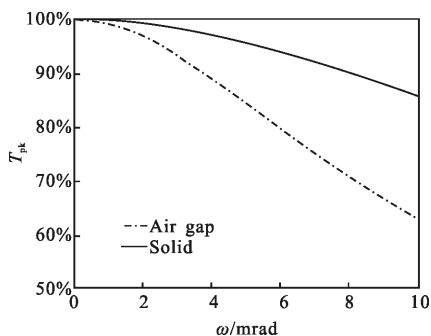


图 11 空气隙和熔石英固态标准具峰值透过率随倾角的变化
Fig.11 Relative peak transmission versus tilt angle for air-gap and fused silica etalons

4 实验和结论

对加工的空气隙标准具进行了性能测试,利用可调谐种子光对激光器波长进行调谐,调谐波长范围 354.703~354.742 nm。图 12 是实测透过率数据和拟合出的标准具透过率曲线,根据拟合结果,标准具实际带宽为 6.76 pm,中心波长为 354.736 nm,实际峰值透过率为 67.5%。实际带宽小于设计带宽,中心波长在调谐范围内。图 13 是转动角度后透过率变化与理论值的对比,从图中可以看出,角度变化的实际情况符合理论计算结果。

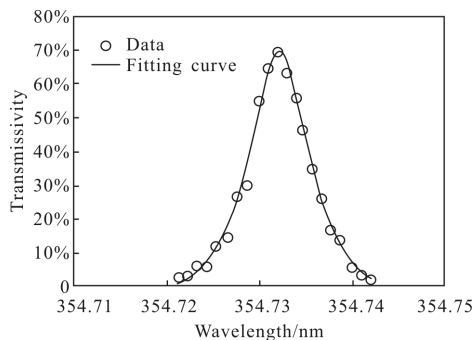


图 12 标准具实测透过率曲线与拟合曲线
Fig.12 Measured value and fitting curve of etalon's transmissivity

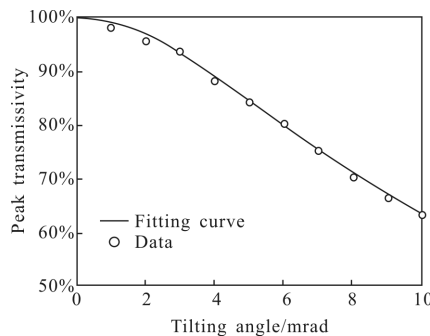


图 13 标准具旋转角度透过率下降曲线与理论曲线对比
Fig.13 Comparison of theoretical and actual curves of transmission with tilt angle

从实验结果可以看出: 固态空气隙标准具实际性能与理论设计基本相符,可以将背景抑制到原本的十八分之一,但同时由于透过率下降,信号强度变为原来的 65%。同时通过角度调谐的方法具有一定的调谐能力,在保证峰值透过率下降不超过 20%的基础上,可以调节 7 pm。后续工作将测试其实际工作性能,并进行白天夜晚的连续观测,从而验证该标准具在提升多普勒瑞利测风激光雷达的白天观测能力的实际效果。

参考文献:

- [1] Kiefer W, Low R, Wrachtrup J, et al. Na-faraday rotation filtering: The optimal point [J]. *Sci Rep*, 2014, 4 (6552): 10.1038/srep06552.
- [2] Popescu Alexandru, Walther T. On the potential of faraday anomalous dispersion optical filters as high-resolution edge filters[J]. *Laser Physics*, 2005, 15(1): 55-60.
- [3] Rees D, Vyssogorets M, Meredith N P, et al. The doppler wind and temperature system of the alomar lidar facility: Overview and initial results [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, 58(16): 1827-1842.
- [4] Zaun N H, Weimer C, Sidorin Y, et al. Solid-etalon for the calipso lidar receiver[C]//Earth Observing Systems IX, 2004, 5542: 141-145.
- [5] Zheng Jun, Sun Dongsong, Dou Xiankang, et al. 60 km Rayleigh Doppler lidar and wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030002. (in Chinese) 郑俊, 孙东松, 窦贤康, 等. 60 km 瑞利多普勒激光雷达及其风场探测[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1030002.
- [6] Han Yan, Sun Dongsong, Weng Ningquan, et al. Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar[J]. *Infrared and Laser*

- Engineering*, 2015, 44(5): 1414–1419. (in Chinese)
韩燕, 孙东松, 翁宁泉, 等. 60 km 车载瑞利测风激光雷达研制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1414–1419.
- [7] Dou X K, Han Y L, Sun D S, et al. Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): A1203–A1221.
- [8] Atherton P D, Reay N K, Ring J. Tunable Fabry-Perot filters [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(6): 806–814.
- [9] Sun Jian, Feng Yutao, Bai Qinglan, et al. Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for wind measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1167–1173. (in Chinese)
孙剑, 冯玉涛, 白清兰, 等. 高热稳定性测风 Fabry-Perot 干涉仪标准具的设计 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1167–1173.
- [10] Tai Hongda, Zhuang Zibo, Jiang Lihui, et al. Multi-point mobile measurement of atmospheric transmittance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1894–1901. (in Chinese)
台宏达, 庄子波, 蒋立辉, 等. 大气透过率的多点移动测量 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(8): 1894–1901.
- [11] Liu Huasong, Wang Lishuan, Ji Yiqin, et al. Study on the influence factors of the characteristic of laser etalon with solid dielectric spacer-layer [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 74–83. (in Chinese)
刘华松, 王利栓, 季一勤, 等. 固体介质间隔层激光标准具性能的影响因素研究[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 74–83.
- [12] Li Li, Wang Canzhao, Xie Yafeng, et al. Wind field inversion technique for scanning wind lidar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 251–258. (in Chinese)
李丽, 王灿召, 谢亚峰, 等. 扫描式测风激光雷达的风场反演[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 251–258.
- [13] Macleod H A. Thin-film Optical Filters [M]. US: McGraw-Hill, 1989.