

瑞利激光雷达超窄带滤光器参数设计及性能分析

韩 飞¹, 刘恒嘉¹, 孙东松¹, 韩於利¹, 张楠楠¹, 储嘉齐¹, 周安然¹, 蒋 杉^{1,2}, 王元祖¹, 郑 俊¹

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230031;

2. 合肥师范学院 物理与材料工程学院, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 白天太阳光背景辐射严重降低雷达系统的信噪比, 从而影响探测高度和精度。为实现对中高层大气相关参数的全天时测量, 利用 Nd:YAG 激光器产生的 355 nm 激光束作为光源, 研制了用于全天时的超窄带滤光器。从原理出发, 利用 FP 标准具透过率曲线单支具有超窄带宽的特性, 设计了一款用于进行白天观测的级联式超窄带滤光器; 给出了该超窄带滤光器近似透过率函数形式, 定义了滤光器性能评价函数, 给出了设计方法; 通过定义的滤光器性能评价函数, 对超窄带滤光器主要参数进行了优化设计, 给出了各光学部件具体参数, 给出了超窄带滤光器的信噪比提升效果; 最后, 通过具体实验对各标准具及级联状态下的系统透过率进行了标定, 经曲线拟合表现出较好的一致性。

关键词: 激光雷达; 滤光器; 法布里-珀罗标准具; 超窄带

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0205003

Design and analysis of ultra-narrow filter of Rayleigh lidar

Han Fei¹, Liu Hengjia¹, Sun Dongsong¹, Han Yuli¹, Zhang Nannan¹, Chu Jiaqi¹, Zhou Anran¹,
Jiang Shan¹, Wang Yuanzu¹, Zheng Jun¹

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China;

2. School of Physics and Material Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230031, China)

Abstract: The solar background radiation seriously reduces the signal to noise ratio of the lidar detection, and affects the detection height and accuracy of lidar system during the daytime. In order to obtain the relevant parameters of the middle atmosphere all time, an ultra-narrow band filter used on all time detection was developed in 355 nm wavelength of laser. First of all, an ultra-narrow band filter was designed on all time observation with the character that the band of a single pass rate curve of FPI was very narrow. Then, the approximate transmission function of the ultra-narrow band filter was inferred, the performance evaluation function was defined, and the design method was given. With the performance evaluation function, the main parameters of the ultra-narrow band filter were optimized and the parameters of each optical component were given. The signal-to-noise ratio of the ultra-narrow band filter was increased 50 times than the 0.15 nm interference filter. Finally, the transmission rate curves of each optical component and cascaded etalon system were calibrated through experiment. The fitting curve shows good consistency with the experimental data.

Key words: lidar; filter; Fabry-Perot etalon; ultra-narrow

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(41774193, 41574180)

作者简介: 韩飞(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光遥感方面的研究。Email: feihan@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光遥感方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

0 引言

全天时大气参数(风速、温度、密度)的精确测量对气象科学、地球环境的研究有着重要意义。用于中高层大气探测的激光雷达利用大气分子为探测对象,以其高时间与空间分辨率、高测量精度、覆盖范围从对流层到中层大气等优点,成为国际、国内各科研机构的研究热点。

然而,为实现对中高层大气参数进行全天时探测,首要难点是对白天太阳光强辐射背景进行抑制。现有技术工艺条件下,相对有效的措施是在光路中加入一独立设计的窄带滤光器进行背景抑制,国际上已有研究机构采取该技术措施对白天环境下大气参数进行了测量。美国 Calipso 星载激光雷达选取工作在 532 nm 波段的激光为光源,设计了工作在该波长下,由一块干涉滤光片和一个 F-P 型标准具组成的滤光器^[1];ALOMAR 多普勒测风测温激光雷达系统,工作波长为 532 nm,采取了干涉滤光片和双标准具结构来抑制白天背景辐射,与其相匹配的多普勒鉴频器为一碘吸收池^[2];至今,激光雷达系统中匹配三通道 F-P 标准具鉴频器进行白天观测的措施基本上都是在系统中加入窄带干涉滤光片^[3-4],该方式在白天观测中受限,目前尚未有报道匹配 FPI(Fabry-Perot interferometer) 鉴频器进行全天时中高层大气参数测量的超窄带滤光器。

文中针对上述难点问题,结合中国科学技术大学中高层大气瑞利多普勒测风、测温激光雷达^[5-8],设计了基于 355 nm 激光波长的超窄带滤光器,该滤光器由 0.15 nm 窄带滤光片与两个参数不同的标准具进行级联;依据超窄带滤光器的光学架构,重新定义了其透过率曲线函数及性能评价函数,对噪声抑制效果进行了定量阐述;利用所定义的性能评价函数,讨论了超窄带滤光器主要参数的优化及选取;最后给出了实验结果和分析。

1 设计基本原理

目前激光雷达系统基本上采取在接收光路中嵌入窄带干涉滤光片的方法来抑制白天背景辐射,现阶段受限于制造工艺水平,窄带干涉滤光片带宽最小只能做到 0.15 nm,中国科学技术大学中高层大气

瑞利多普勒测风激光雷达鉴频 FPI 双边缘通道间隔为 4.7 GHz(2 pm)^[9],三通道鉴频标准具参数见表 1,若要实现全天时大气参数测量的目标,该干涉滤光片带宽相对边缘通道间隔还是很大,致使系统在白天工作受到限制。

表 1 鉴频标准具参数

Tab.1 Parameters of FPI

Parameter	Value
Wavelength/nm	354.73
Peak transmittance@355 nm	65%
Effective aperture/mm	50
FSR/GHz	12.5
Edge separation/GHz	4.7(2 pm)
Locking separation/GHz	$\nu_{L-1}=1.46,$ $\nu_{L-2}=3.24$
Finesse	7
FWHM of the edge/GHz	1.786

为实现最大限度抑制白天太阳背景辐射,基于 F-P 标准具单峰透过率具有超窄带宽的特点,在现有 FPI 制造工艺技术水平下,设计分辨率不同的两款 F-P 标准具进行级联,再与窄带干涉滤光片串联,实现在窄带干涉滤光片带宽范围内只有单支 F-P 标准具透过率曲线,实现超窄滤波功能,光谱原理图见图 1,进而系统能够实现基于瑞利散射的中高层大气全天时测温测风的目标。

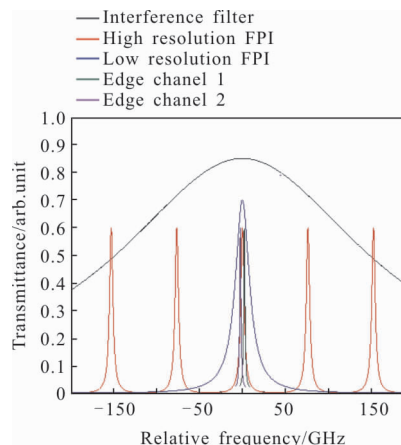


图 1 超窄带滤光器光谱原理图

Fig.1 Principle of spectrum of ultra narrow band filter

接收光路系统主要由卡塞格林望远镜接收回波信号,经由耦合光路耦合进入光纤,信号光通过光线后经由准直镜变为较小发散角的平行光束,进入超窄带滤光器;再由耦合透镜将信号光耦合进入光纤,信号光通过光纤后经准直镜进入非偏振分光棱镜,分别进入鉴频标准具两边通道,最后信号光经耦合透镜进入探测器中。系统原理图见图 2。

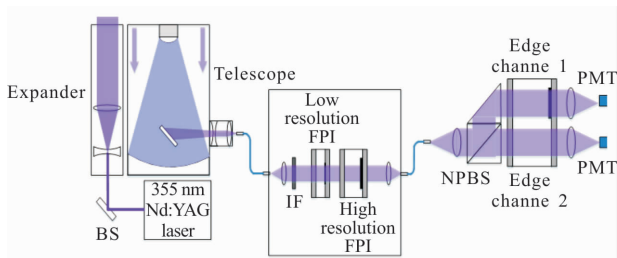


图 2 中国科学技术大学全天时瑞利多普勒激光雷达接收系统光路

Fig.2 Rayleigh Doppler lidar receiving optical system of USTC on all-day time

2 透过率函数及性能评价函数

2.1 透过率函数

频率为 ν 的激光由光纤耦合至准直系统后,平行光发散角为 $2\theta_0$,其入射到标准具的透过率函数为^[2,10-12]:

$$T(\nu) = \frac{2}{\theta_0^2} \int_0^{\theta_0} \frac{T_0 \sin^2 \theta d\theta}{1 + 4(\nu_{FSR} / \pi \Delta \nu_{1/2})^2 \sin^2(\pi \nu \cos \theta / \nu_{FSR})} \quad (1)$$

式中: T_0 为标准具的峰值透过率; ν_{FSR} 为标准具的自由谱范围; $\Delta \nu_{1/2}$ 为标准具频谱半高宽。

如图 3 所示,两个不同分辨率的标准具 Low resolution FPI、High resolution FPI 级联,其透过率分

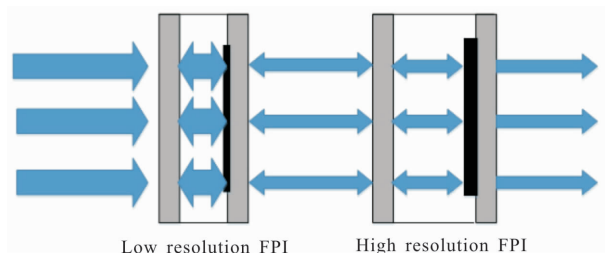


图 3 双级联标准具光路原理图

Fig.3 Optical principle of double cascading etalons

别为 $T_h(\nu)$ 、 $T_l(\nu)$,频率为 ν 的入射光经 Low resolution FPI 标准具后,一部分被原路返回,另一部分进入 High resolution FPI 标准具,最终一部分透过 High resolution FPI 标准具,一部分被返回 Low resolution

FPI 标准具,然后反射光再重复上述循环光路,两标准具间形成一衍生光学腔,其透过率可由与两标准具透过率函数相关的一个几何级数近似表示,因此,双标准具进行级联后,其透过率函数可近似表示为:

$$T_c(\nu) = \frac{T_h(\nu)T_l(\nu)}{1 - R_h(\nu)R_l(\nu)} \quad (2)$$

式中: $T_h(\nu)$ 为高分辨率标准具透过率函数; $T_l(\nu)$ 为低分辨率标准具的透过率函数; $R_h(\nu)$ 为高分辨率标准具的反射率函数,表示为 $a - T_h(\nu)$, a 为校准系数, $T_0 < a < 1$, 原因为总能量除透射以外,反射光在光路中被玻璃介质吸收等原因造成透过率与反射率之和不等于 1; $R_l(\nu)$ 为低分辨率标准具的反射率函数,表示为 $b - T_l(\nu)$, $T_0 < b < 1$ 。

超窄带滤光器透过率函数定义如下:

$$H(\nu) = g(\nu)T_c(\nu) = \frac{g(\nu) \cdot T_h(\nu) \cdot T_l(\nu)}{1 - R_h(\nu) \cdot R_l(\nu)} \quad (3)$$

式中: $g(\nu)$ 为滤光片透过率函数^[6,13],表示如下:

$$g(\nu) = \frac{T_p}{4 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)^2 + 1} \quad (4)$$

式中: T_p 为滤光片峰值透过率; ν_0 为中心频率; $\Delta \nu$ 为滤光片带宽。

2.2 性能评价函数

对于中高层大气参数的白天观测,主要通过对大气分子后向散射谱进行参数反演。基于分子后向散射的瑞利谱近似为高斯谱,表示为:

$$f_R(\nu, T_a) = [1 / \pi(\Delta \nu_1^2 + \Delta \nu_r^2)]^{1/2} \exp[-\nu^2 / (\Delta \nu_1^2 + \Delta \nu_r^2)] \quad (5)$$

式中: $\Delta \nu_1 = \delta \nu / \sqrt{4 \ln 2}$, $\delta \nu$ 为激光发射谱宽; $\Delta \nu_r = (8kT_a / M\lambda^2)^{1/2}$, k 为玻尔兹曼常数, T_a 为大气分子的温度, M 为分子质量。

为实现最佳抑制效果,假设干涉滤光片、两标准具及瑞利谱中心波长(此中心频率为零点)一致,超窄带滤光器透过率函数与瑞利谱卷积可以定义为超窄带滤光器的信号 S_H ,干涉滤光片与级联标准具的卷积定义为超窄带滤光器的噪声 N_H ,因此,加入超窄带滤光器,信噪比可以表示为:

$$S_H(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(\nu - \nu', T_a) \cdot g(\nu') \cdot T_c(\nu') d\nu' \quad (6)$$

$$N_H(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\nu - \nu') \cdot T_c(\nu') d\nu' \quad (7)$$

$$P_{SN}^H = \frac{S_H(\nu)}{N_H(\nu)} \quad (8)$$

同理, 通常情况下激光雷达系统中都是加一干涉滤光片对背景进行抑制, 效果有限, 只有干涉滤光片情况下信噪比可表示为:

$$P_{SN}^g = \frac{S_g(v)}{N_g(v)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f_R(v-v, T_a) \cdot g(v) dv}{\int_{-\infty}^{\infty} g(v) dv} \quad (9)$$

性能评价函数定义为如下^[3-4,14]:

$$\text{Ratio} = P_{SN}^H / P_{SN}^g \quad (10)$$

$$h(\lambda) = T_{pk}(\delta\theta) \cdot \frac{2\pi}{\pi \cdot (\delta\theta)^2} \cdot \int_0^{\delta\theta} \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot \text{FSR}^2}{\pi^2 \cdot \left(\Delta\lambda^2 + \left(\frac{\delta\theta^2 \cdot \lambda_0}{n^2} \right) \right)} \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda}{\pi^2} \cdot \frac{2 \cdot \delta\theta^2 \cdot \lambda_0}{2n^2} \cdot \cos(\theta) \right)} \cdot \sin(\theta) d\theta \quad (11)$$

式中: 变量为 λ (波长), 可通过 $\frac{\lambda \cdot c}{\lambda_0}$ 转化为频率; $\Delta\lambda$

为标准具半高全宽; FSR 为标准具自由谱间距; $\delta\theta$ 为入射光束半发散角; λ_0 为中心波长; $T_{pk}(\delta\theta)$ 为标准具峰值透过率, 表示为:

$$T_{pk}(\delta\theta) = \frac{\Delta\lambda}{\left(\frac{\delta\theta^2 \cdot \lambda_0}{2n^2} \right)} \cdot \arctan \left(\frac{\left(\frac{\delta\theta^2 \cdot \lambda_0}{2n^2} \right)}{\Delta\lambda} \right) \quad (12)$$

式中: 激光发射频率选取 355 nm, 发散全角为 $2\delta\theta$, 可得透过率随发散角变化关系如图 4 所示, 图中横坐标已转化为频率坐标。

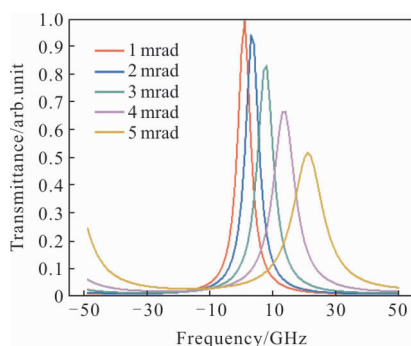


图 4 透过率随发散角的变化关系

Fig.4 Relation between transmission and beam divergence angle

由图 4 表明, 随着入射光发散角的增大, 标准具透过率曲线的峰值逐渐降低, 带宽明显变宽, 峰值位置发生变化, 这将严重影响滤光器的降噪效果。因此, 发散角应控制越小越好, 即准直光口径应越大。为配合窄带滤光片, 达到逐级抑制背景噪声的效果,

3 超窄带滤光器主要参数设计及性能分析

3.1 通光口径的选取

望远镜接收的大气后向散射光经光纤耦合进入准直光学系统, 进而入射到设计的超窄带滤光器之中, 见图 2。其中准直系统主要用于将光纤出射光发散角进行压缩, 使成为带有微小发散角的平行光束, 进入级联标准具。标准具透过率与光束发散角的关系可由下面公式表示:

标准具有效通光口径选取尽量贴近窄带滤光片有效口径(25.4 mm), 选取为 25 mm, 选取芯径 200 μm 、NA 值为 0.22 的多模光纤, 由 $NA/(1-NA^2)^{1/2} = d_b/(2f)$ 及 $\theta = d/f$ 关系可以得到入射到标准具的光束发散角为^[15]:

$$\theta = 2N \cdot A \cdot d_f / (\sqrt{1-N \cdot A^2} \cdot d_b) \quad (13)$$

式中: d_b 为准直后的光束直径; f 为准直透镜的焦距。此时准直光发散角为 2 mrad。

3.2 级联标准具精细度的选取

由公式(1)~(8)可得 Finesse 与 P_{SN} 之间关系。为更全面说明 P_{SN} 随 Finesse 的变化趋势, 分别选取三个不同带宽, 观察 P_{SN} 随 Finesse 的变化趋势是否相似。如图 5 所示, Finesse 越高, P_{SN} 值越大, 说明抑制效果越好, 因此设计过程中尽量选取较高的 Finesse。现阶段加工工艺下, 对于 354.7 nm 波长精细度最高为 16, 因此两级联标准具的精细度 Finesse 均选取最优值 16。

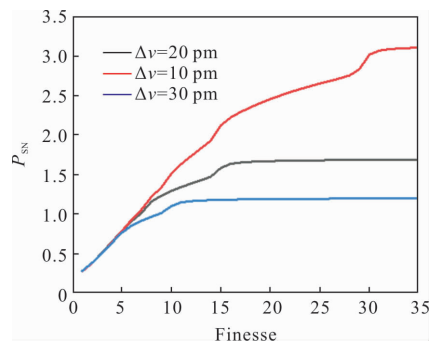


图 5 不同带宽下 P_{SN} 随 Finesse 的变化关系

Fig.5 Relation between P_{SN} and Finesse in different $\Delta\nu$

3.3 FSR 的选取

在标准具精细度 Finesse 选取为 16 的情况下, 需最终确定两级联标准具最终 FSR, 以其达到最优背景抑制效果。在此, 通过定义的 Ratio 函数对两标准具各自的 FSR 进行优化。由公式(1)~(10), 可得 Ratio 值与两标准具 FSR 间关系, 见图 6。

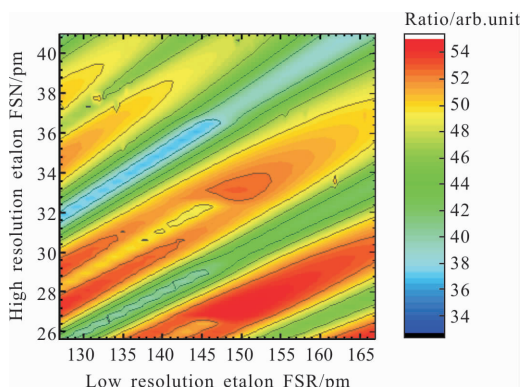


图 6 Ratio 随级联标准具 FSR 的变化关系

Fig.6 Relation between Ratio and FSR of double cascading etalon

由图 6 可知, 共有四片区域范围满足 Ratio 值最大。为满足激光雷达系统测风需求, 匹配鉴频标准具边缘通道间隔, 假设超窄带滤光器的中心波长锁定在鉴频标准具两边通道交点处, 窄带滤光片带宽尽量贴近鉴频标准具边缘通道的间隔值, 此时, 高分辨率带宽可取值 2pm(4.7GHz), 对应 FSR₁ 为 32pm。由图 6 可知, 此时满足 Ratio 值最大的另一标准具 FSR₂ 值为 144 pm, 对应其带宽为 9 pm。此时 Ratio 值大约为 54, 相比干涉滤光片背景抑制效果提升了 50 倍, 信号降为原来的 37%, 理论上白天观测效果有了进一步提高。级联各标准具参数见表 2。

表 2 级联各标准具参数

Tab.2 Parameters of each cascading etalon

	Low resolution etalon	High resolution etalon
Center wavelength/nm	354.73	354.73
Bandwidth/pm	9.234	2.099
FSR/pm	147.743	33.578
Cavity length/ μ m	425.85	1 873.75
Finesse	16	16
Effective aperture/mm	25	25

图 7 所示为上述已定两标准具参数下由公式(3) 得出的超窄带滤光器近似透过率函数曲线。可知, 超窄带滤光器带宽约为 2 pm, 峰值透过率约为 37%。

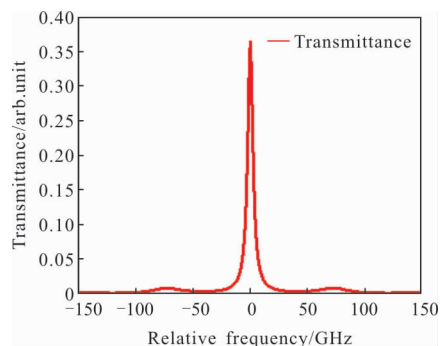
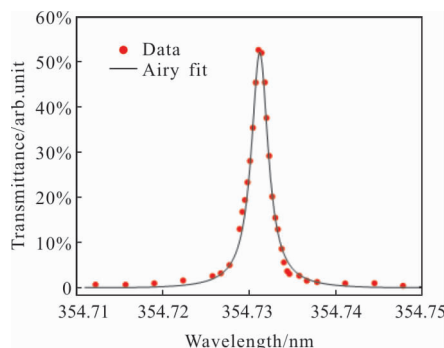


图 7 双级联标准具近似透过率曲线图

Fig.7 Spectrum of double cascading etalon transmittance

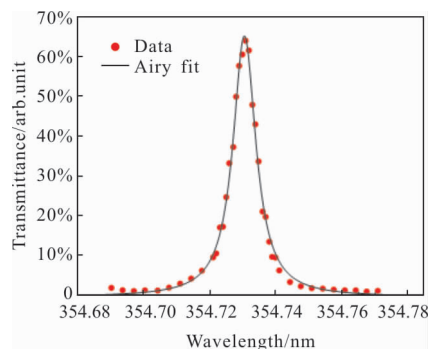
4 实验和结论

利用可调谐激光器, 分别对超窄带滤光器内的单个标准具透过率曲线及级联状态下的透过曲线进行了测试, 调谐波长范围 354.69~354.98 nm。图 8 中



(a) 高分辨标准具

(a) High resolution etalon



(b) 低分辨率标准具

(b) Low resolution etalon

图 8 两标准具实测透过率曲线及拟合曲线

Fig.8 Measured value and fitting curve of two etalons' transmittance

图(a)、(b)分别为高分辨率标准具与低分辨率标准具的实测透过率数据及拟合出的各透过率曲线。根据拟合结果,高分辨标准具实际带宽 2.27 pm,略大于设计值 0.17 pm,中心波长 354.731 18 nm,峰值透过率 52.03%,低分辨率标准具实际带宽 8.36 pm,略小于设计值 0.87 pm,中心波长 354.730 04 nm,峰值透过率 65.14%。从上述拟合结果可得,单个标准具的测试结果与设计值匹配完好,两标准具中心波长略显错开 1.14 pm,若理论上两标准具相对位置绝对平行,由公式(3)~(10)理论计算背景抑制效果降低为中心波长重合时的 90%,Ratio 约为 47。

对级联状态下的超窄带滤光器进行了性能测试。图 9 为实测超窄带滤光器级联状态下标准具透过率数据与拟合曲线,根据拟合结果,标准具实际带宽为 2.4 pm,中心波长为 354.731 09 nm,实际峰值透过率为 33.71%。从结果可以看出,级联状态下实测结果与理论匹配完好。其中,实际带宽略大于设计带宽 0.3 pm,主要原因在于单个标准具实际参数均与理论设计值有偏差,且高分辨的标准带宽 2.27 pm,大于设计值,再加上装调过程中两标准具相对位置没有达到严格的平行,导致实测带宽略大于理论带宽;与此同时两高、低分辨率标准具中心波长匹配有误差、相对位置误差以及单个标准具实测峰值透过率与理论值有差异,综合因素致使实测级联状态下峰值透过率略低于理论值。

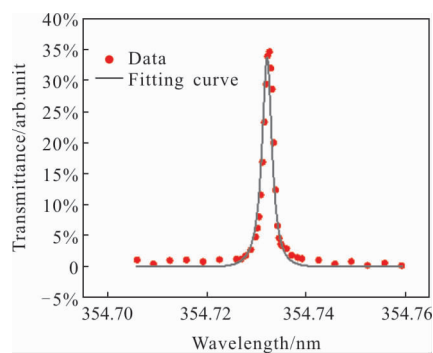


图 9 双级联标准具实测透过率与拟合曲线

Fig.9 Measured value and fitting curve of double cascading etalons

从实验结果可以看出:超窄带滤光器实际性能与理论设计基本相符,由图 6 和图 9 可知加入超窄带滤光片后背景抑制到大约只有窄带干涉滤光片原来的五分之一,信号强度变为原来的 33.7%。下面

的工作将主要集中在接入系统后的白天与夜晚的全天时观测对比,进一步验证该超窄带滤光器对多普勒测风激光雷达在白天观测方面性能的提升。

参考文献:

[1] Zaun N H, Weimer C, Sidorin Y, et al. Solid-etalon for the calypso lidar receiver [C]//Earth Observing Systems IX, 2004, 5542: 141-145.

[2] Mckay J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. I. The edge technique [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (27): 6480-6486.

[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] Wu Songhua, Song Xiaoquan, Liu Bingyi. Fraunhofer lidar prototype in the green spectral region for atmospheric boundary layer Observations [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5 (10): 6079-6095.

[5] 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

[6] Li Zimu, Chen Tingti, Liu Huanjia, et al. Design of ultra-narrow filter for Rayleigh Doppler Lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1030002. (in Chinese) 李梓霖, 陈廷娣, 刘恒嘉, 等. 瑞利多普勒激光雷达超窄带滤光器的设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1030002.

[7] 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. 瑞利多普勒激光雷达及其风场观测[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1030002.

[8] 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.

[9] Zheng Jun, Sun Dongsong, Chen Tingdi, et al. Scanning Rayleigh Doppler lidar for wind profiling based on non-polarized beam splitter cube optically contacted FPI [J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(2): 195-202.

[10] Atherton P D, Reay N K, Ring J, et al. Tunable Fabry-Perot filters [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(6):806-814.

- [11] 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.
- [12] Korb C L, Gentry B M, Weng C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(21): 4202–4213.
- [13] Macleod H A. Thin-film Optical Filters [M]. US: McGraw-Holl, 1989.
- [14] 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.
- [15] Han Yuli. Development of middle atmospheric temperature and wind lidar for gravity wave observation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 47. (in Chinese)
韩於利. 中高层大气测温测风激光雷达研制及重力波观测 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 47.