

引用格式: LI Lu, ZHUANG Peng, XIE Chen-bo, *et al.* Calibration of FP Etalon Transmittance Curve and Wind Field Observation Based on Doppler Wind Measurement Lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11):1149016

李路, 庄鹏, 谢晨波, 等. 多普勒测风激光雷达的 FP 标准具透过率曲线校准及风场观测[J]. 光子学报, 2020, 49(11):1149016

# 多普勒测风激光雷达的 FP 标准具透过率曲线校准及风场观测

李路<sup>1,2,3,4</sup>, 庄鹏<sup>1,2,3</sup>, 谢晨波<sup>1,2,3</sup>, 王邦新<sup>1,2,3</sup>, 邢昆明<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

(3 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

(4 皖西学院 机械与车辆工程学院, 安徽 六安 237012)

**摘要:** 研制了一台基于法布里-珀罗标准具的多普勒测风激光雷达系统, 发射激光波长为 532 nm, 采用 300 mm 口径望远镜接收回波信号, 能够同时探测从边界层到对流层顶的大气风场. 为提高法布里-珀罗标准具透过率曲线扫描的准确度, 在接收机光路严格装调基础上, 通过脉冲光直接对三通道法布里-珀罗标准具频谱进行扫描, 通过高速采集卡采集脉冲信号并进行拟合积分得到准确的脉冲信号强度, 采用非线性最小二乘法拟合得到 FPI-1、FPI-2 和 FPI-L 的谱宽分别为 1.20 GHz、1.22 GHz、1.18 GHz, 峰值透过率分别为 0.817、0.807、0.768, FPI-1 和 FPI-2 及 FPI-1 和 FPI-L 的峰峰间隔分别为 3.91 GHz 和 1.25 GHz. 在风场观测试验中, 通过多次测量同一方向上径向风速得到, 91% 的测量方差小于 4 m/s, 在水平风场观测中, 该系统白天探测高度为 13 km, 夜间可达 17 km, 并与探空气球进行对比, 从 1.5 km 至 10 km 范围内二者吻合较好.

**关键词:** 多普勒激光雷达; 法布里-珀罗标准具; 透过率曲线校准; 大气风场; 探空气球

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204911.1149016

## Calibration of FP Etalon Transmittance Curve and Wind Field Observation Based on Doppler Wind Measurement Lidar

LI Lu<sup>1,2,3,4</sup>, ZHUANG Peng<sup>1,2,3</sup>, XIE Chen-bo<sup>1,2,3</sup>, WANG Bang-xin<sup>1,2,3</sup>, XING Kun-ming<sup>1,2,3</sup>

(1 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

(4 West Anhui University, Faculty of Mechanical and Automotive Engineer, Lu'an, Anhui 237012, China)

**Abstract:** Doppler wind measurement lidar system based on Fabry-Perot etalon was developed. The laser emission wavelength is 532 nm. The 300 mm diameter telescope is used to receive the echo signal, which can simultaneously detect the wind field from the boundary layer to the top of the troposphere in China. In order to improve the accuracy of Fabry-Perot etalon transmittance curve scanning, the three-channel

**基金项目:** 民用航天“十三五”技术预先研究项目(No.D040103), 中科院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(No.KP-2019-05), 安徽省 2017 年度高层次科技人才团队项目(No.010567900)

**第一作者:** 李路(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为测风激光雷达技术. Email: lili201205@163.com;

**导师:** 谢晨波(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气遥感和环境监测. Email: cbxie@aiofm.ac.cn

**通讯作者:** 庄鹏(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为测风激光雷达技术. Email: pzhuang007@163.com;

**收稿日期:** 2020-07-13; **录用日期:** 2020-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

Fabry-Perot etalon spectrum is directly scanned by pulsed light on the basis of strict installation and adjustment of the receiver optical path. The pulse signal is collected by high-speed acquisition card, and the accurate pulse signal intensity is obtained by fitting integration method. Using nonlinear least squares fitting method, the spectral widths of FPI-1, FPI-2 and FPI-L are 1.20 GHz, 1.22 GHz, and 1.18 GHz, respectively. The peak transmittance of FPI-1, FPI-2 and FPI-L is 0.817, 0.807, 0.768, respectively. The peak-to-peak spacing of FPI-1 and FPI-2 is 3.91 GHz and the peak-to-peak spacing of FPI-1 and FPI-L is 1.25 GHz. In the wind field observation test, the radial wind speed was measured multiple times in the same direction. 91% of the measurement variance was less than 4 m/s. In horizontal wind field observation, the system has a detection height of 13 km during the day and 17 km at night. Compared with the air balloon, the agreement is good from 2 km to 10 km.

**Key words:** Doppler lidar; Fabry-Perot etalon; Transmission curve calibration; Atmospheric wind field; Sounding balloon

**OCIS Codes:** 010.0280; 010.3640; 050.2230

## 0 引言

目前,在大气风场探测过程中,主要有探空气球、多普勒声雷达、风廓线雷达、测风激光雷达四种探测设备,其中,探空气球探测距离和精度较高,但是实验成本偏高,做不到连续观测;多普勒声雷达建设、使用、维护成本较低,寿命较长,但探测距离有限;风廓线雷达可以在雨雪雾等天气下使用,但是体积庞大,机动性较差;测风激光雷达收到大气衰减的限制,在恶劣环境下发挥不了作用,但因其高空分辨率、高测量精度等优点,在大气风场探测中发挥重要的作用。

就国外而言,欧空局星载测风激光雷达于北京时间2018年8月23日顺利发射升空,并完成在轨测试,该系统设计了独立的用于种子激光器稳频控制系统,并对激光频率进行扫描并反馈的方法,可获得0~30 km的风速<sup>[1]</sup>.NASA Goddard公司正在开发用于探测火星极地轨道的大气风场的火星激光雷达(Mars Lidar, MARLI),采用双边缘光学鉴别技术,处在早期实验测试阶段<sup>[2]</sup>.

就国内而言,中国海洋大学研制的基于碘分子吸收池的测风激光雷达探测高度为7 km<sup>[3]</sup>;中科院安徽光机所研制的基于法布里-珀罗(Fabry-Perot,FP)标准具的米散射多普勒测风激光雷达,发射波长为1 064 nm,探测高度为5~6 km<sup>[4]</sup>;中国科学技术大学研制的基于瑞利散射中高层激光激光雷达发射波长为355 nm,探测高度为10~40 km<sup>[5]</sup>;中科院空间技术中心采用碘分子吸收池为鉴频器件,发射波长为532 nm,探测高度为30~70 km<sup>[6]</sup>.综上所述,对于基于FP标准具的532 nm的测风激光系统研制,中科院安徽光机所自2011年以来研究该系统,2011年,王国成等<sup>[7]</sup>对基于FP标准具的532 nm测风激光雷达系统进行设计与理论分析;2014年,郑俊等<sup>[8]</sup>对基于FP标准具532 nm测风激光雷达系统激光器频率锁定技术进行了研究,重点对采用激光器稳频和标准具频率跟踪方法对激光频率进行锁定.基于前人的技术沉淀,目前中科院安光所正在研制可兼顾高低层(5~50 km)风场的532 nm多普勒测风激光雷达,系统置于5m方舱内,可实现倾角可调的800 mm望远镜,总体置于可实现360°旋转的转台上来实现三维风场探测.目前,该系统已在装调过程中,而在这期间实验室搭建300 mm望远镜和二维扫描仪作为另一套实验验证系统,为后继800 mm口径测风激光雷达系统夯实基础.

本文研究了基于三通道FP标准具的532 nm瑞利-米多普勒测风激光雷达系统,可用于探测1.5~17 km的大气风场.FP标准具透过率曲线直接关系到激光雷达系统的探测精度,故需对其进行FP标准具透过率曲线进行校准.目前,在FP标准具透过率曲线扫描与校准过程中,首先确保测风激光雷达接收机高精度的装配和FP标准具进行调平,利用脉冲光进行扫描,采用光纤或积分球将脉冲信号展宽的形式进行扫描,积分获得脉冲信号强度,通过非线性最小二乘法进行拟合校准<sup>[9-11]</sup>.本文直接利用高速采集卡对脉冲信号进行直接采集形式对透过率曲线进行扫描,并通过多点积分方法获得脉冲信号强度,来提高扫描精度.

## 1 基于FP标准具的瑞利散射大气风场的测量原理

测风激光雷达在风场探测时,将激光射向大气中,由于风的存在,望远镜接收到的回波信号携带了风的信息,使得回波信号频率与发射激光频率不相等,二者之差即为多普勒频移,根据多普勒频移量即可反演

出风速<sup>[12-16]</sup>.

通过多普勒效应可以得到,径向风速  $V_r$  与多普勒频移  $\nu_d$  可表示为

$$\nu_d = \pm 2V_r/\lambda \quad (1)$$

通过合成多个方向上的径向风速可以得到水平风场,包括水平风速和风向

$$\begin{cases} V = \sqrt{V_{rx}^2 + V_{ry}^2} / \cos\alpha \\ \theta = \arctan(V_{ry}/V_{rx}) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $V_{rx}$  和  $V_{ry}$  分别为径向风速投影在水平面的  $x$  和  $y$  方向上的分量;  $\alpha$  为天顶角.

根据探测指标,主要探测边界层以上的大气风场,这部分大气中几乎不存在气溶胶,利用米散射探测显然不可取,故利用双边缘探测技术对分子散射信号进行探测,其原理如图1所示.根据大气温度不同,分子散射频谱展宽程度不同,所以在使用FP标准具检测多普勒频移时,FP两个边缘通道频谱间隔很大,使得分子散射信号频谱落在两个边缘通道上.从图1可以看出,正因为边缘通道1与边缘通道2间隔很大,导致其交叉点处透过率很低,且灵敏度很低.为了将发射激光锁定在边缘通道交叉点处,采用第三个通道作为锁定通道.锁定通道频谱形状与边缘通道完全一样,而锁定通道的半高宽正好对应边缘通道的交叉点位置,所以只需将发射激光频率锁定在边缘通道半高宽处即可.而此处灵敏度最大,发射激光频率的微小抖动都可以被检测出来,提高了锁定精度,从而提高整个系统的探测精度.发射激光频率可以根据锁定通道频谱反演得到,在零风速时,分子散射谱位于边缘通道的中间.经过标准具后,两个边缘通道探测器输出信号相等.而因为风场的原因,使得后向散射谱发生频移,导致经过标准具后的能量不相等,根据两个边缘通道的能量差即可以得到多普勒频移大小,进而可知径向风速.

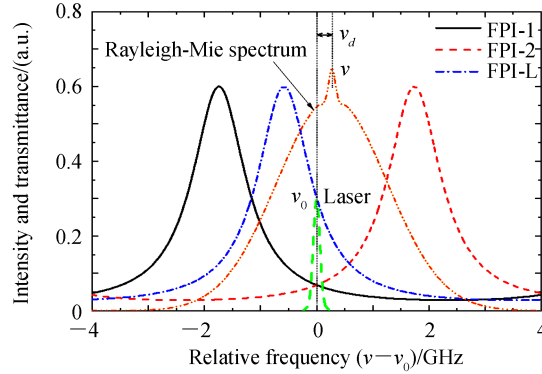


图1 瑞利散射多普勒频率测量原理

Fig. 1 Principle of Rayleigh scattering Doppler frequency measurement

Fabry-Perot标准具对大气回波信号中的米散射信号和瑞利散射信号的透过率函数分别为

$$\begin{cases} T_L(\nu) = T_M(\nu) = h(\nu) \otimes f_{\text{Mie}}(\nu) \\ T_R(\nu, T) = h(\nu) \otimes f_L(\nu) \otimes f_{\text{Ray}}(\nu, T) \\ h = I_t/I_0 = \left| \sum_{i=1}^{\infty} E_i \right|^2 / E_0^2 = T_p \left[ 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $T_L(\nu)$  为锁定通道透过率;  $T_M(\nu)$  为米散射信号经过FP标准具的透过率;  $f_{\text{Mie}}(\nu)$  为米散射信号频谱;  $T_R(\nu, T)$  为瑞利散射信号经过FP标准具的透过率;  $f_L(\nu) = f_{\text{Mie}}(\nu)$  为发射激光频谱;  $f_{\text{Ray}}(\nu, T)$  为瑞利散射频谱;  $T$  为大气温度,代入温度模型会产生较大的误差,可以使用实测的温度数据;  $h(\nu)$  为FP的透过率表达式;  $T_p$  为FP标准具峰值透过率;  $R$  为膜层反射率;  $\delta$  为相位差; “ $\otimes$ ” 为卷积符号.由式(3)可得

$$T_R(\nu, T) = T_M(\nu) \otimes f_{\text{Ray}}(\nu, T) \quad (4)$$

假设激光雷达接收到的米散射信号和瑞利散射信号分别为  $I_M$  和  $I_R$ ,则标准具两边通道探测的信号为

$$\begin{cases} I_1 = a_1 [I_M T_{M1}(\nu_0 + \nu_d) + I_R T_{R1}(\nu_0 + \nu_d, T_a)] \\ I_2 = a_2 [I_M T_{M2}(\nu_0 + \nu_d) + I_R T_{R2}(\nu_0 + \nu_d, T_a)] \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $a_1, a_2$  为常数;  $\nu_d$  为多普勒频率;  $\nu_0$  为激光发射频率;  $T_a$  为实际大气温度. 定义频率响应函数为

$$R(\nu, T) = T_{R1}(\nu, T) / T_{R2}(\nu, T) \quad (6)$$

为消除气溶胶的影响, 可以通过算法将米散射信号扣除, 若大气很干净, 可直接忽略, 还可以利用标准具使得  $T_{M1}/T_{M2} = T_{R1}/T_{R2}$ , 那么边缘通道  $R$  为

$$R(\nu_0 + \nu_d, T_a) = a_2 I_1 / (a_1 I_2) \quad (7)$$

首先, 需要对激光发射频率进行测量, 根据接收机原理图, 1% 的激光能量通过光纤直接进入接收机,  $I_{M0}$  在接收机内一分为二, 分别作为能量监测信号和频率检测信号, 表达式分别为

$$\begin{cases} I_{Le} = a_5 I_{M0} \\ I_{Ls} = a_4 I_{M0} T_L(\nu_0) \end{cases} \quad (8)$$

则可以得到

$$T_L(\nu_0) = a_5 I_{Ls} / (a_4 I_{Le}) \quad (9)$$

在实际测量大气风场之前, 先对透过率曲线进行扫描和校准获得  $T_L(\nu)$ 、 $T_{M1}(\nu)$  和  $T_{M2}(\nu)$ , 采用式(5)求出  $T_{R1}(\nu, T)$  和  $T_{R2}(\nu, T)$ , 利用式(6)得到  $R(\nu, T)$ , 由于  $T_L(\nu)$  和  $R(\nu, T)$  都是单值函数, 所以根据式(6)可以求出激光发射频率  $\nu_0$ , 采用模式温度或者实际温度可以得到回波信号的频率, 二者相减得到径向风速

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \nu_d = \frac{\lambda}{2} [R^{-1}(\nu_0 + \nu_d, T_a) - T_L^{-1}(\nu_0)] \quad (10)$$

## 2 FP标准具透过率曲线扫描与校准

多普勒测风激光雷达接收机的核心器件是一个FP标准具, 承担着鉴定发射激光频率和回波信号频率的任务, 由于入射光束的准直度以及发散角会直接影响FP标准具透过率曲线形状, 因此必须对接收机的光路进行严格设计, 保证入射到FP标准具光束的准直度以及发散角在允许的范围内.

如图2所示为多普勒测风激光雷达接收机光路图, 接收系统中有两个光纤接口, 一个是边缘通道, 用来接收大气回波信号, 大气回波光信号经过准直镜后准直成近似平行光, 在进入FP标准具之前先由分束镜分10%的光信号直接由PMT探测器接收, 作为边缘通道的能量通道, 目的是为了消除由于激光器能量抖动所造成的测量误差, 再将剩余的90%的光信号均分进入FP标准具的两个边缘通道, 经汇聚透镜汇聚后由PMT探测, 由采样率为20 M的采集卡采集; 另一个则是锁定通道, 在发射之前分出的极小一部分光信号直接进入锁定通道, 这部分光信号准直成近似平行光, 在进入FP标准具锁定通道之前由分束镜分出30%的能量作为锁定通道的能量通道, 由PMT探测器探测, 并由采样率为1 GHz的高速采集卡采集, 剩余70%的能量进入FP标准具锁定通道, 经汇聚透镜汇聚后由PMT探测, 同样由采样率为1 GHz的高速采集卡采集.

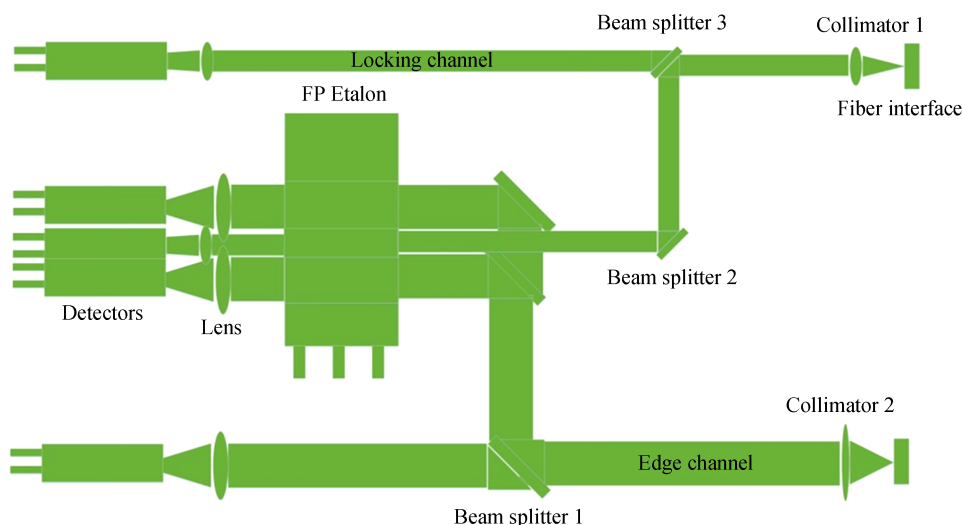


图2 多普勒测风激光雷达接收机光路  
Fig.2 Diagram of Doppler wind lidar receiver

## 2.1 FP标准具平行度调节

FP标准具是接收机的核心,在接收机装调之前,首先将FP标准具前后两块平板调节平行,当标准具两平板不平行时,FP标准具的透过率频谱的峰值透过率降低,且带宽增加<sup>[10]</sup>,最终影响测风的精度.

在对FP标准具进行平行调节时,使用一平行光管正入射FP标准具,使得平行光充满整个FP标准具,通过CS100控制器对标准具的XY轴进行调谐,当FP标准具没有调节平行时,可以很明显看到干涉条纹,在调节Z时,将看到条纹的移动,如图3(a)所示,在调节过程中,这些条纹会逐渐变宽且变少,当严格平行时,条纹会充满整个口径,如图3(b)所示,在调节Z轴时,只看到各通道明暗变化.从图中可以清楚看到各通道的大小和位置,该FP标准具有四个通道,两个直径19 mm的锁定通道,一个直径38 mm的边缘通道,剩下的区域是另外一个边缘通道.

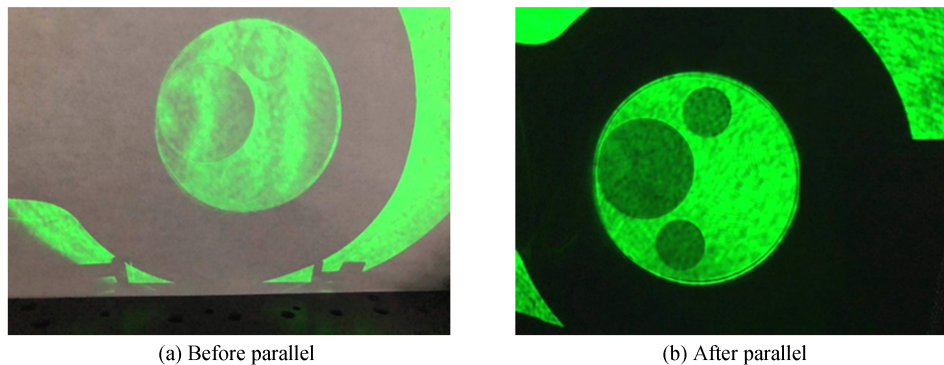


图3 FP标准具调节平行前后干涉条纹

Fig.3 FP etalon interference fringes before and after parallel

## 2.2 脉冲光对FP标准具频谱扫描及校准

多普勒测风激光雷达光源为脉冲光,激光器采用Continuum公司powerlite型Nd:YAG激光器,并配有种子注入,此激光器出射激光线宽为90 MHz(种子注入后),与FP标准具的FWHM为1 GHz相比,经过两者卷积后,透过率曲线的带宽几乎不发生变化.在脉冲光扫描透过率时,通过自编的程序对FP标准具Z腔长进行调节,同时对各通道信号进行采集,扫描流程图如图4所示.

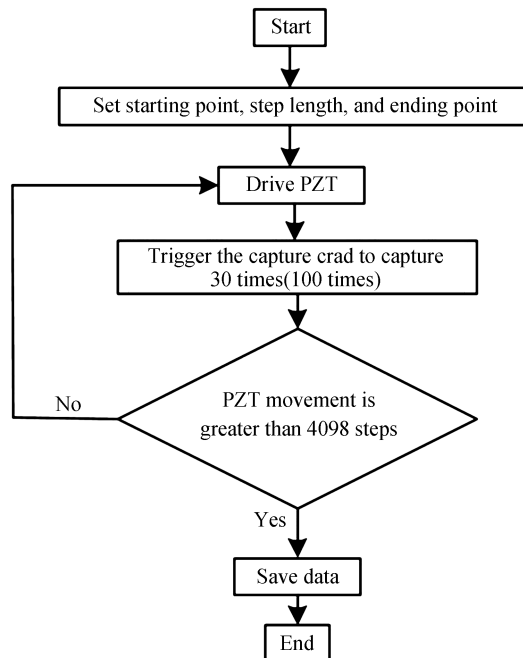


图4 透过率曲线扫描流程

Fig.4 Flow chart of transmittance curve scanning

由于是对激光脉冲直接进行探测,低速采集卡很难捕捉到完整的脉冲信号,故采用高速采集卡对脉冲信号进行采集,使用的PMT响应时间小于1 ns,经过激光器出厂参数和示波器观察,出射激光脉冲宽度为8 ns.为了描述整个脉冲波形,采用采样频率为1 GHz的高速采集卡对脉冲信号进行采集,可以采到17个有用信号点,并将这些信号点进行积分,得到准确的脉冲信号强度,采集到的脉冲信号如图5所示.

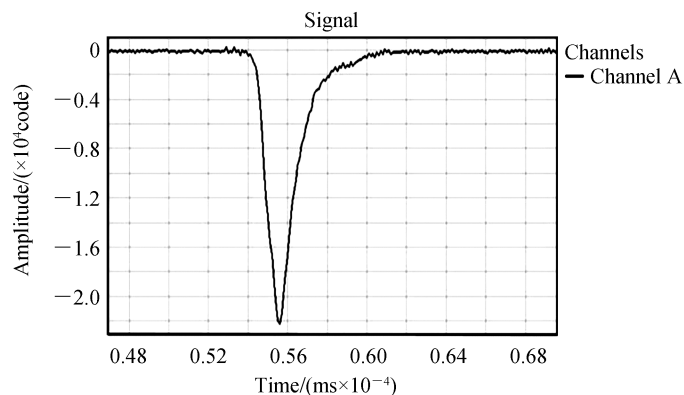


图5 采集到PMT输出的脉冲信号  
Fig.5 Collected the pulse signal output by PMT

最终扫描得到的透过率曲线如图6(a)所示,图中横坐标是步长,FP标准具的最小步长为0.125 nm,对应的频率为3.7 MHz,纵坐标为两个边缘通道或者锁定通道与对应的能量通道之比,可以得知三个通道的透

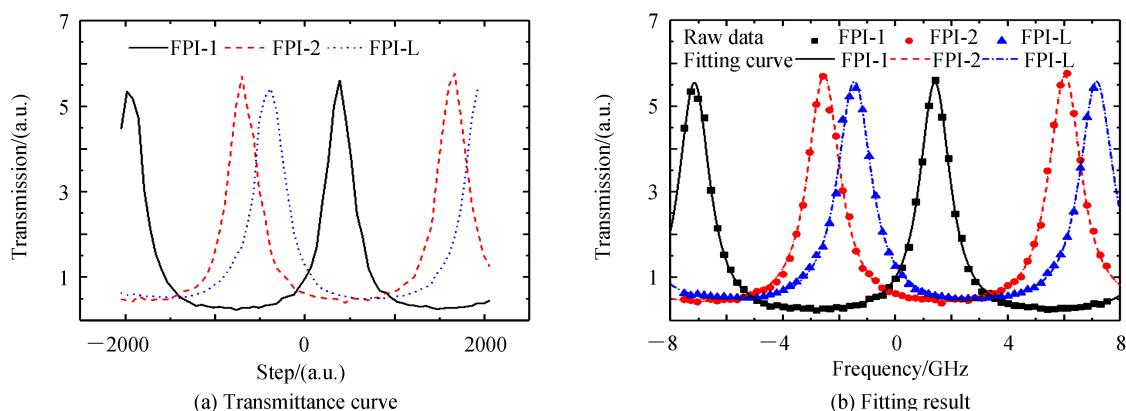


图6 脉冲光扫描得到的透过率曲线及拟合结果  
Fig.6 Transmittance curve and fitting result obtained by pulsed light scanning

过率曲线形状几乎相同,峰值位置不同.采用非线性最小二乘法拟合FP标准具透过率曲线,拟合结果如图6(b)所示,可知FPI-1、FPI-2和FPI-L的 $\nu_{\text{FSR}}$ 、 $R_e$ 、 $T_{\text{pe}}$ 和 $\nu_p$ 分别为8.56 GHz、0.645、0.817、-6.102 GHz;8.57 GHz、0.641、0.807、-2.194 GHz;8.59 GHz、0.652、0.768、-4.851 GHz.

通过拟合结果,得出大气瑞利散射光入射时FP-1和FP-2的透过率频谱函数 $T_{1R}(\nu)$ 和 $T_{2R}(\nu)$ ,如图7所示,同时给出了 $T_{1M}(\nu)$ 、 $T_{2M}(\nu)$ 、 $T_{eM}(\nu)$ 以及大气温度分别为220 K和290 K时的 $T_{1R}(\nu)$ 和 $T_{2R}(\nu)$ .将出射激光频率锁定在图7所示的-4 GHz附近.

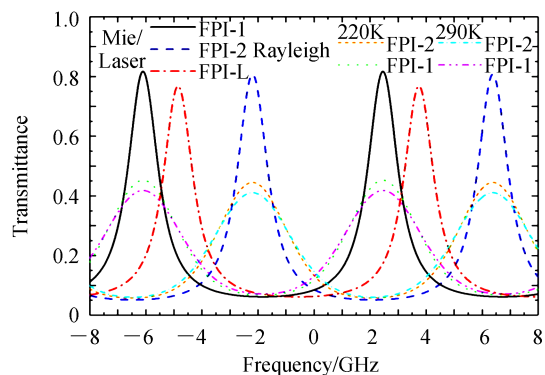


图7 分子散射信号在FP标准具边缘通道的透过率函数  
Fig.7 Transmittance function of molecular scattering signal in etalon edge channel

### 3 基于多普勒测风激光雷达的风场观测

#### 3.1 532 nm 瑞利-米多普勒测风激光雷达系统

如图8所示为基于三通道FP标准具的532 nm瑞利-米多普勒测风激光雷达系统实物及其结构图,主要有激光器,300 mm望远镜、接收机以及控制系统等部分组成.图9为风场探测实验流程图,在准备风场探测时,首先将设备初始化,包括激光器预热、温控设备达到预设温度、FP标准具控制器、采集卡、工控机、探测器电源等设备开启.在设备初始化完成之后启动激光频率稳定系统,若激光频率稳定失败,则对稳频系统进行调试.若频率稳定成功则可以使用激光器出射的脉冲光对FP标准具三个通道的透过率频谱进行扫描校准.将Y型光纤的两个支端分别连接边缘通道和锁定通道,Y型光纤总端接收激光器脉冲信号.设置透过率

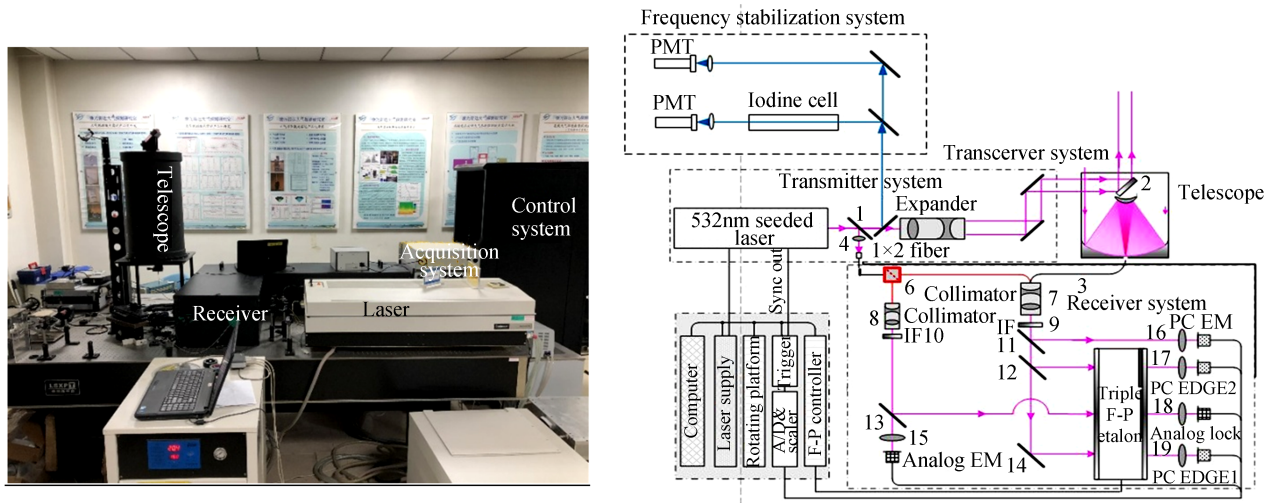


图8 多普勒测风激光雷达系统实物及其结构示意图

Fig.8 Photo and structure diagram of Doppler wind lidar system

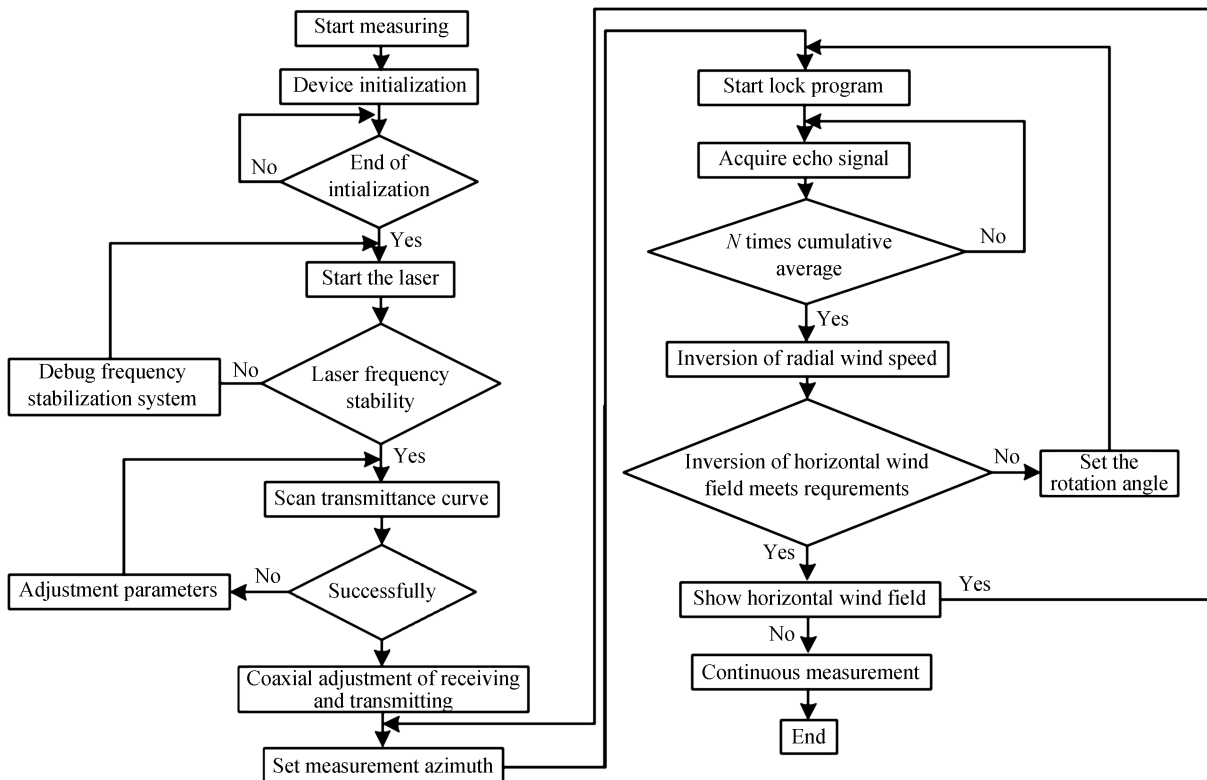


图9 风场探测实验流程

Fig.9 Flow chart of wind field detection experiment

扫描的起始点、终点、步长以及每一步脉冲采集次数.若扫描出的透过率曲线不能用于风场探测,则对扫描参数进行调整,直到扫描出的透过率曲线可以用于风场探测,将透过率曲线保存以备用.将望远镜回波信号接入接收机边缘通道,调节系统发射光路,使得发射光路与接收光路同轴.此时,风场探测准备工作已完成.通过程序控制旋转平台将望远镜指向预设方位,一般以正北方位为零位,启动锁频程序,调用已保存的FP标准具透过率曲线.若激光频率发生抖动或者漂移,标准具频谱将根据激光频率的抖动大小调节腔长,使得激光发射频率基本稳定在锁定通道的半腰处.当频率锁定之后开始采集回波信号,经过N次累计平均后将数据保存反演径向风速.在一个方向测量完成之后,控制旋转台旋转 $90^\circ$ ,开始测量下一个方位的径向风速,直至测满北、东、南、西四个方位.将各个方向测得的径向风速合成水平风场,并在程序中显示水平风场的风速和风向.若要连续测量,再将旋转台调至北方向,进行下一组水平风场测量.表1为该系统中的一些主要参数.

表1 多普勒测风激光雷达系统参数  
Table 1 Parameters of Doppler wind lidar system

Name		Parameters	
Transmitter system	Nd:YAG Laser Continuum9030	Out wavelenth/nm	532
		Pulse energy/(mJ·pulse <sup>-1</sup> )	800
		Pep rate/Hz	30
		Pulse length/ns	4~8
		Beam divergence/mrad	0.5
Receiving system	Cassegrain telescope	Diameter/mm	300
		Focal length/mm	1 961
		Field of view/mrad	0.1
	Three-channel FP	FSR/GHz	7.6
		FWHM/GHz	1.05
		Dual channel spectral spacing/GHz	3.48
Etalon ET70	Peak transmittance/%	>60	
	Diameter/mm	80	
Capture card	Sampling rate	1 GHz/20 MHz	
optical fiber	Core diameter/mm	0.2(reference)/0.1(locking)	
	Numerical diameter	N.A. 0.22	

### 3.2 观测结果

2020年5月11日下午14:53至15:01,共对同方位径向风速测量5组,测量结果如图10(a)所示,激光雷达采用天顶角为 $27.18^\circ$ 探测,每次径向风速测量时间为2 min,空间分辨率为75 m.图10(b)为连续探测5组

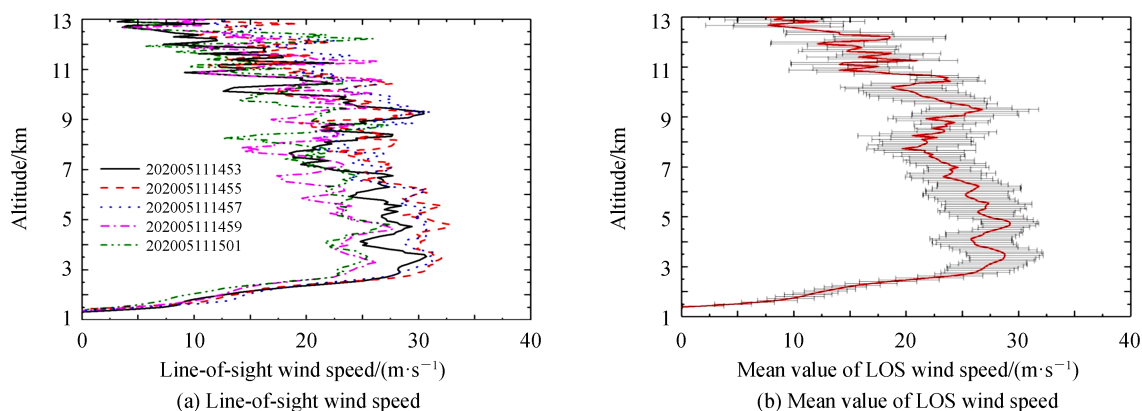


图10 连续5组同一方向径向风速连续观测结果  
Fig.10 5 consecutive observations of radial wind velocity in the same direction



的风速测量的平均值和方差.由图10(b)可知,在10.5 km距离附近有明显的风切变,10.5 km以下绝大部分距离处的方差小于3.5 m/s,方差最大值小于5 m/s.该方差由雷达系统风场测量不确定误差和10 min时间内探测区域大气风速变化两部分构成,验证了系统的稳定性.图11为2020年5月18日21点48分开始,东南西北方位的四个径向风速测量结果.3 km以上可以看到东西和南北两对测量数据关于零风速有较为明显的对称性.

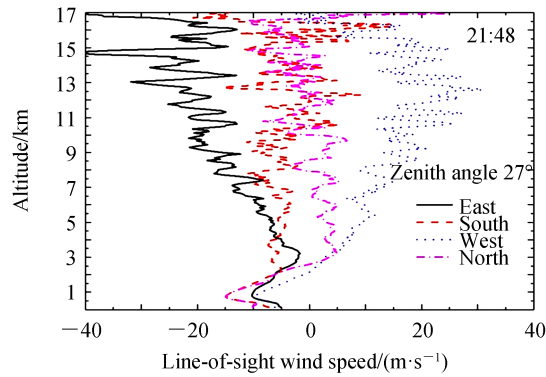


图11 5月18日晚间四个方位径向风速测量结果

Fig.11 Measurement results of four azimuth radial wind speeds on the evening of May 18

图12和图13为2020年5月12日10:56和5月18日22:36,多普勒激光雷达系统与BG-400J型探空仪的水平风速大小和方向对比结果.探空仪的释放地点与激光雷达相距约60 m,根据探空仪定位数据显示,探空仪上升平均速度约为5.8 m/s,高度分辨率为5 m,风场探测精度为0.3 m/s,风向误差小于3°.可以看出,在白

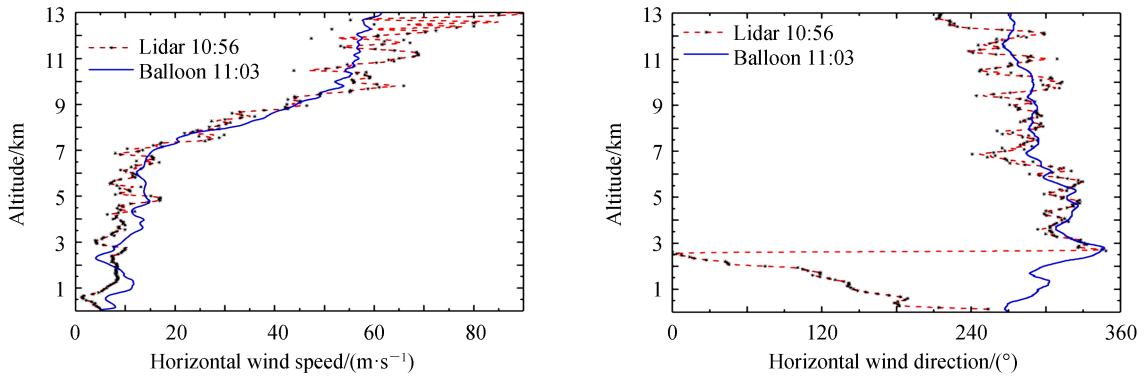


图12 2020年5月12日10:56测风激光雷达系统与探空仪的对比结果

Fig.12 Comparison result of wind measurement lidar system and radiosonde at 10:56 on May 12, 2020

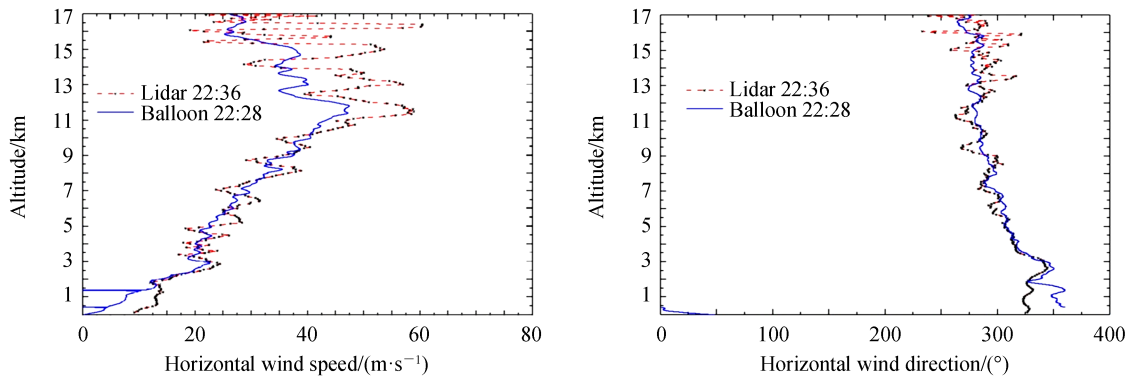


图13 2020年5月18日22:36测风激光雷达系统与探空仪的对比结果

Fig.13 Comparison result of wind measurement lidar system and radiosonde at 22:36 on May 18, 2020

天 2.7~10 km、晚间 1.5~10 km 高度范围两种探测设备的水平风速大小和方向随高度的变化趋势一致,并且数据吻合得比较好.将白天 2.7~10 km、晚间 1.5~10 km 高度范围的探空数据进行线性插值获得与验证系统同时同高度的风场数据,两者构成水平风速和风向两组数据对.分析得到:91%的水平风速和风向数据对的差值小于 4 m/s 和 15°.如图 14 所示,根据探空数据显示,在 10 公里以上范围内,探空气球所在位置已经偏离激光雷达 72.7 km,所以在 10 km 以上,风速偏差较大,但是白天至 13 km、晚间至 17 km 验证系统和探空风速数据的变化趋势仍然一致;而在 1.5 km 高度范围以下两者出现偏离最可能是激光雷达受到气溶胶散射和布里渊散射的影响.

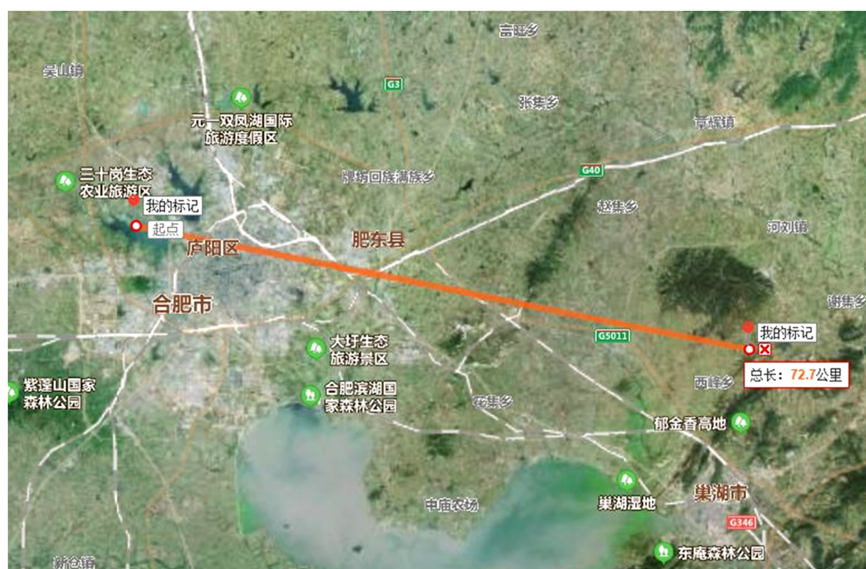


图 14 探空仪上升至 10 km 与激光雷达距离

Fig.14 The radiosonde rises to a distance of 10 km from the lidar

## 4 结论

介绍了基于瑞利散射多普勒测风激光雷达系统,叙述了 FP 标准具透过率曲线的扫描过程和校准结果,由于采用脉冲光对 FP 标准具进行扫描,因此对信号采集提出了更高的要求.文中采用高速采集卡采集脉冲信号的形式替代了利用积分球将激光脉冲展宽,并通过多点拟合积分的方法准确得到脉冲信号强度,提高了透过率曲线的扫描精度.利用非线性最小二乘法对实测的三条透过率曲线进行拟合,拟合得到 FPI-1、FPI-2 和 FPI-L 的  $v'_{FSR}$ 、 $R_e$ 、 $T_{pe}$  和  $v_p$  分别为 8.56 GHz、0.645、0.817、-6.102 GHz; 8.57 GHz、0.641、0.807、-2.194 GHz; 8.59 GHz、0.652、0.768、-4.851 GHz,并将大气模式温度或者探空仪测得的实际温度代入分子散射信号,由分子散射信号与边缘通道透过率进行卷积得到分子散射信号在标准具边缘通道的透过率函数.

该测风激光雷达系统于 2020 年 5 月在合肥科学岛地区开展了风场观测实验,在单次径向风速测量时,时空分辨率取 2 min 和 75 m 的情况下,系统白天和晚上分别具备探测 13 km 和 17 km 左右高度范围的风场探测能力.在白天 2.7 km~10 km 和晚间 1.5 km~10 km 高度范围内,系统与探空仪对比实验的水平风速大小和方向数据吻合得都比较好,91%的水平风速和风向数据对的差值小于 4 m/s 和 15°,充分验证了系统风速测量结果的准确性.

由于低层大气中含有较多的气溶胶,而气溶胶信号与分子信号的速度灵敏度不同,该测风激光雷达探测分子后向散射信号,当在气溶胶浓度较大的低层势必引起较大的风速测量误差,后期可以通过算法将气溶胶信号和瑞利信号分开,得到它们的占比,将气溶胶信号和瑞利信号分开进行风速反演,即可以进一步提高高层大气的测量精度.

### 参考文献

- [1] MA Fu-min, CHEN Yong, YANG Ze-hou, *et al.* Latest development of laser doppler wind measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, **56**(18): 180003.

- 马福民,程涌,杨泽后,等.激光多普勒测风技术最新进展[J].激光与光电子学进展,2019,56(18):180003.
- [2] CREMONS D R, ABSHIRE J, ALLAN G, *et al.* Development of a Mars lidar(MARLI) for measuring wind and aerosol profiles from orbit[C]. SPIE, 2018, **10791**: 1079106.
- [3] WANG L, GAO F, WANG J, *et al.* Vertical wind profiling with fiber-Mach-Zehnder-interferometer-based incoherent Doppler lidar[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, **121**(10):61-65.
- [4] GUO W, SHEN F, SHI W, *et al.* Data inversion method for dual-frequency Doppler lidar based on Fabry-Perot etalon quad-edge technique[J]. *Optik*, 2018, **159**:31-38.
- [5] GUO W J. Several key technologies of 532nm rayleigh doppler lidar and gravity waves study by lidar observation[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2016.  
郭文杰. 532nm瑞利多普勒激光雷达若干关键技术和大气重力波观察研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [6] WU S H. Key technologies of high spectral resolution wind measurement by laser with high stability [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.  
吴松华. 高稳定性高光谱分辨率激光测风系统关键技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [7] WANG Guo-cheng, SUN Dong-song, DU Hong-liang, *et al.* Design and analysis of 532 nm Doppler wind lidar with Fabry-Perot etalon[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(4):949-953.  
王国成, 孙东松, 杜洪亮, 等. 基于法布里-珀罗标准具的 532 nm 多普勒测风激光雷达系统设计和分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(4):949-953.
- [8] ZHENG Jun. Laser frequency locking of rayleigh doppler lidar [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.  
郑俊. 瑞利多普勒激光雷达中的激光频率锁定技术的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [9] TANG Lei, WU Hai-bin, SUN Dong-song, *et al.* Design and calibration of the Fabry-Perot etalon in Rayleigh backscattering Doppler wind lidar[J]. *Laser Technology*, 2014, **38**(2): 283-288.  
唐磊, 吴海滨, 孙东松, 舒志峰. 瑞利多普勒激光雷达 F-P 标准具的设计与校准分析[J]. 激光技术, 2014, **38**(2): 283-288.
- [10] SHEN Fa-hua, XIA Yi-qi, YU Ai-ai, *et al.* Research on dual-frequency Doppler lidar based on Fabry-Perot etalon quad-edge technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10):1001002.  
沈法华, 夏益祺, 於爱爱, 等. 基于法布里-珀罗标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达研究[J]. 光学学报, 2014, **34**(10): 1001002.
- [11] SHEN Fa-hua, YU Ai-ai, DONG Jie-hui, *et al.* Dual-frequency quad-edge frequency discrimination photoelectric detection technique based on single F-P etalon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(3):0312005.  
沈法华, 於爱爱, 董吉辉, 等. 基于单法布里-珀罗标准具的双频率四边缘鉴频光电探测技术[J]. 光学学报, 2014(3): 0312005.
- [12] ZHENG Jun. Development of the stabilized lidar receiver for all-day rayleigh wind lidar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.  
郑俊. 瑞利测风激光雷达高稳定昼夜探测光学接收机的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [13] XIA H, DOU X, SUN D, *et al.* Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14):15286.
- [14] BAUMGARTEN G, FIEDLER J, HILDEBRAND J, *et al.* Inertia gravity wave in the stratosphere and mesosphere observed by Doppler wind and temperature lidar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(24):10929-10936.
- [15] TANG Lin-qiu, HUA Deng-xin, WANG Li, *et al.* Numerical simulation for wind lidar based on optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7):0701003.  
谭林秋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪测风激光雷达技术与数值仿真[J]. 光子学报, 2015, **44**(7): 0701003.
- [16] THYGESEN L G, LUNDQVIST S O. NIR measurement of moisture content in wood under unstable temperature conditions. Part 2. Handling temperature fluctuations[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2017, **8**(1):191-199.