

# 基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利-米散射 测风激光雷达研究

庄鹏<sup>1,2</sup>, 沈法华<sup>4\*</sup>, 王邦新<sup>1,2,3</sup>, 谢晨波<sup>1,2,3</sup>, 邵甲第<sup>1,2</sup>, 仇成群<sup>4</sup>, 刘东<sup>1,2,3</sup>, 王英俭<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学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, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>4</sup>盐城师范学院物理与电子工程学院, 江苏省智能光电器件与测控工程研究中心, 江苏 盐城 224002

**摘要** 为了研制探测中高层风场的瑞利-米散射多普勒激光雷达系统, 前期在实验室搭建了一套基于三通道法布里-珀罗干涉仪(FPI)的 532 nm 瑞利-米多普勒激光雷达验证系统, 并进行实际比对实验。利用验证系统, 首先开展了 FPI 透过率校准实验, 采用非线性拟合方法获得了三个通道 FPI 实际透过率曲线, 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, 并进一步给出了米散射和瑞利散射信号入射时系统实际的风速探测灵敏度。其次, 开展了径向风速连续观测实验和水平风场对比观测实验。实验结果表明: 在单次径向风速测量中, 时空分辨率为 2 min 和 75 m 的情况下, 系统白天和晚间分别具备 10 km 和 16 km 左右高度的风场探测能力。在白天 2.7~10 km、晚间 1.5~10 km 高度范围内, 系统测得的水平风场数据与探空气球测得的水平风场数据吻合度较高, 晚间 70.8% 的水平风速和风向数据偏差小于 2 m/s 和 10°; 95% 的水平风速和风向数据偏差小于 5 m/s 和 15°, 充分验证了系统风场测量结果的准确性。

**关键词** 遥感; 多普勒激光雷达; 大气风速测量; 法布里-珀罗干涉仪; 瑞利-米散射

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1210001

## Rayleigh-Mie Wind Lidar Based on Fabry-Perot Interferometer

Zhuang Peng<sup>1,2</sup>, Shen Fahua<sup>4\*</sup>, Wang Bangxin<sup>1,2,3</sup>, Xie Chenbo<sup>1,2,3</sup>,  
Shao Jiadi<sup>1,2</sup>, Qiu Chengqun<sup>4</sup>, Liu Dong<sup>1,2,3</sup>, Wang Yingjian<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>4</sup>Jiangsu Province Intelligent Optoelectronic Devices and Measurement-Control Engineering Research Center, Department of Physics and Electronic Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China

**Abstract** In order to develop a Rayleigh-Mie Doppler lidar system for detecting mid-to-high wind fields, a set of 532 nm Rayleigh-Mie Doppler lidar verification system based on triple Fabry-Perot interferometer (FPI) was previously built and the actual comparison test was conducted. Using the verification system, the FPI transmission calibration experiment was carried out firstly, and the actual transmission curves of triple FPI were obtained by using the nonlinear fitting method. The spectral width of FPI-1, FPI-2, and FPI-L were 1.20 GHz, 1.22 GHz, and

收稿日期: 2020-06-03; 修回日期: 2020-07-06; 录用日期: 2020-07-13

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA17040524)、民用航天技术预先研究项目(D040103)、中科院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(KP-2019-05)、安徽省2017年度高层次科技人才团队项目(010567900)、中国科学院大气光学重点实验室开放基金(2017-01)、江苏省自然科学基金面上项目(SBK2020020046)

\* E-mail: shenfh@yctu.edu.cn

1.18 GHz respectively, the peak transmission were 0.817, 0.807, and 0.768 respectively, and the peak intervals of FPI-1 & FPI-2 and FPI-1 & FPI-L were 3.91 GHz and 1.25 GHz respectively. Furthermore, the actual wind speed detection sensitivity of the system was given when both of the Mie and Rayleigh scattering signals were incident. Secondly, continuous observation experiment of radial wind speed and comparative observation experiment of horizontal wind field were carried out. The experimental results show that in the single radial wind speed measurement, the system has the capable of detecting wind field at a height of about 10 km and 16 km in the daytime and night respectively with the time resolution of 2 min and spatial resolution of 75 m. In the height range of 2.7 km to 10 km in the daytime and 1.5 km to 10 km in the night, the data of the horizontal wind field measured by the verification system coincide with those measured by the balloon. In the night, 70.8% of the horizontal wind speed and direction data deviation is less than 2 m/s and  $10^\circ$ , and 95% of the data deviation is less than 5 m/s and  $15^\circ$ , which fully verifies the accuracy of the system wind field measurement results.

**Key words** remote sensing; Doppler lidar; wind speed measurement; Fabry-Perot interferometer; Rayleigh-Mie scattering

**OCIS codes** 010.0280; 010.3640

## 1 引 言

实时的高精度、高时空分辨率的对流层和平流层风场数据在改进气候模型、研究全球气候变化、促进大气热力学及动力学研究、提高天气预报的准确性、保障航空航天器的起飞和着落安全、提高风能利用率等方面有着重要的应用。多普勒激光雷达是近30多年发展起来的一种新型大气风场遥感探测设备,在时空分辨率、角度方位和机动性等方面相对于传统的声雷达和微波雷达均有较大的提高,是目前对三维风场进行高精度、高时空分辨率遥感探测的最有效工具之一。多普勒激光雷达根据探测体制的不同可分为相干探测技术<sup>[1-4]</sup>和直接探测技术<sup>[5-19]</sup>。相干探测技术具有很高的探测灵敏度,目前已广泛应用于风电场、机场航空等领域。但是,由于大气湍流对激光相干性的破坏以及只能利用气溶胶米散射信号等原因,它的有效探测距离受到限制,一般水平方向不超过10 km,垂直方向不超过3 km。通常,直接探测技术若仅以气溶胶为探测目标,则可以探测低层大气(约10 km以下)风场;若仅以大气分子为探测目标,则可以探测中高层大气(约10~70 km)风场。因此,直接探测技术具有探测覆盖对流层和平流层高度范围风场的潜力。

目前,国外直接探测的典型系统主要包括:法国普罗旺斯重点实验室建立的基于双法布里-珀罗干涉仪(FPI)边缘技术的532 nm 瑞利-米散射多普勒激光雷达系统(OHP),其探测范围为25~60 km,改进后的第二代系统探测范围达到8~50 km<sup>[5-6]</sup>;欧洲气象组织在挪威建立的瑞利/米/拉曼散射多参数测量激光雷达系统(ALOMA),其风场测量采用碘吸收边缘技术,系统改进后在北极地区的测量范围为18~80 km<sup>[7-8]</sup>;美国MAC公司建立的基于

FPI条纹技术的多普勒激光雷达系统,其探测范围为0.5~20 km<sup>[9]</sup>;美国NASA Goddard航天中心大气实验室研制的基于三通道FPI双边缘技术的355 nm 瑞利散射多普勒激光雷达系统(GLOW),其探测范围为1.8~35 km<sup>[10]</sup>。此外,欧洲航天局(ESA)发射成功的全球首台星载测风激光雷达(ALADIN),其探测范围为0~30 km,低层风场测量采用Fizeau条纹技术,高层风场测量采用双FPI边缘技术<sup>[11-12]</sup>。国内直接探测的典型系统有:中国海洋大学组建的基于532 nm 碘分子吸收谱线边缘鉴频技术的多普勒激光雷达系统,并报道了低对流层风速分布<sup>[13]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所(以下简称中科院安徽光机所)建成的基于双FPI双边缘技术的1064 nm 米散射多普勒激光雷达系统,其探测范围为0.2~10 km<sup>[14]</sup>。中国科学技术大学研制成功的两套基于三通道FPI双边缘技术的355 nm 瑞利测风激光雷达系统<sup>[15-18]</sup>,探测范围分别为10~40 km和15~60 km。中国科学院国家空间科学中心建成了基于碘分子吸收池的532 nm 瑞利车载测风激光雷达<sup>[19]</sup>,探测范围为30~70 km。

为了兼顾高低层风场探测,目前中科院安徽光机所正着力研制探测5~50 km风场的532 nm 瑞利-米散射多普勒激光雷达。将采用描述瑞利-布里渊散射谱的Tenti S6模型代替描述瑞利散射谱的高斯模型<sup>[20]</sup>,并用算法将米散射信号和瑞利散射信号分离,系统探测能力可以拓展至近地面,从而实现50 km以下高低层大气风场探测的全覆盖。系统将置于5 m的移动方舱内,采用倾角可调、800 mm口径的Cassegrain望远镜。整个方舱放置在一个直径为6 m、可360°旋转的圆形转台上,以实现三维风场探测。目前,移动方舱、800 mm口径望远镜和圆形转台正在建造和加工中,本文利用实验室现有的

300 mm 口径望远镜和二维扫描仪替代 800 mm 口径望远镜和圆形转台,搭建完成了一套验证实验系统,并成功开展了 FPI 透过率校准实验、外场风场探测实验以及探空气球对比实验,从而为实际 800 mm 口径多普勒雷达系统的成功研制夯实了理论和实验基础。

## 2 风场探测原理

如图 1 所示,系统采用三通道 FPI(FPI-1、FPI-2 和 FPI-L)测量风速。FPI-1、FPI-2 和 FPI-L 是由一个大口径的 FPI 在其中一个基板的三个不同位置镀上不同厚度的膜层构成,因此它们的频谱相对位置严格固定。其中,FPI-L 透射频谱用于测量发射激光频率  $n_0$  变化,并将其锁定在 FPI-L 透射频谱的右侧半腰附近(即 FPI-1 和 FPI-2 透射频谱的交点附近)。当  $n_0$  变化时,发射激光经过 FPI-L 的透过率将发生变化,通过测量发射激光经过 FPI-L 的透过率可以测得  $n_0$  的变化值(相对值);FPI-1 和 FPI-2 的透射频谱用于测量大气后向散射光的频率  $n$ ,它们分别位于大气瑞利-米后向散射谱的左右两翼,形成双边缘探测。通过设计合适的 FPI-1 和 FPI-2 参数,使得它们在特定温度下对瑞利散射光和米散射光的频率测量灵敏度接近相同,进而可以利用瑞利和米后向散射信号的混叠信号测量  $n$ 。当  $n$  变化时,大气后向散射光经过 FPI-1 和 FPI-2 的透过率将会一个增大一个减小,通过测量后向散射光经过 FPI-1 和 FPI-2 的透过率比值可以测得大气回波光信号频率  $n$  的变化值(相对值)。至此,大气风场造成的多普勒频移量  $n_d = n - n_0$ ,径向风速  $V_r = n_d l / 2$ ,  $l$  为发射激光波长。通过测量东西南北四个不同方向的径向风速  $V_{rE}$ 、 $V_{rW}$ 、 $V_{rS}$  和  $V_{rN}$ ,得到水平风速大小  $V_h$  和方向  $g$ ,表达式分别为

$$V_h = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \quad (1)$$

$$\gamma = \arctan(V_x / V_y) +$$

$$\pi \{1 - \text{sign}[(V_y + |V_y|) \cdot V_x]\}, V_y \neq 0, \quad (2)$$

式中: $V_x = (V_{rE} - V_{rW}) / 2 \sin f$ ;  $V_y = (V_{rN} - V_{rS}) / 2 \sin f$ ;  $f$  为发射光束天顶角。速度方向规定正北方向为  $0^\circ$ ,顺时针旋转。

## 3 验证系统结构

根据风场探测原理,基于三通道 FPI 的瑞利-米散射多普勒激光雷达系统的总体结构如图 2 所示。采用种子光注入的 Nd:YAG 激光器来(Continuum9030)产生两倍频 532 nm 的发射激光。该激光束透过分束片 BS-1(透反比  $T/R=99/1$ )后,先由扩束镜扩束来压缩发散角,然后经导光镜、二维扫描仪以设定的方位发射进入大气探测区域。大气分子和气溶胶后向散射光由 300 mm 口径 Cassegrain 反射式望远镜接收,并通过多模光纤耦合进入接收机。进入接收机的后向散射光在经过准直镜 Collimator-1 准直、窄带滤光片滤光后,由分束镜 BS-2 和 BS-3(透反比分别为 90/10 和 50/50)分为三束,一束直接由光子计数工作模式光电倍增管(PMT)探测器 PC EM 探测;另外两束正入射至 FPI-1 和 FPI-2,透射光信号再分别由光子计数工作模式 PMT 探测器 PC EDGE1 和 PC EDGE2 探测。被分束片 BS-1 反射的激光脉冲耦合进入 Y 型光纤合束端口后,由其中一个分束端口进入准直镜 Collimator-2 准直。该准直光束再由分束镜 BS-4(透反比  $T/R=30/70$ )分为两束,一束直接由模拟

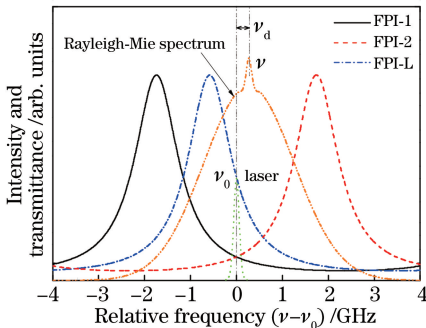


图 1 基于三通道 FPI 的多普勒频率测量原理图

Fig. 1 Schematic of Doppler frequency measurement principle based on triple FPI

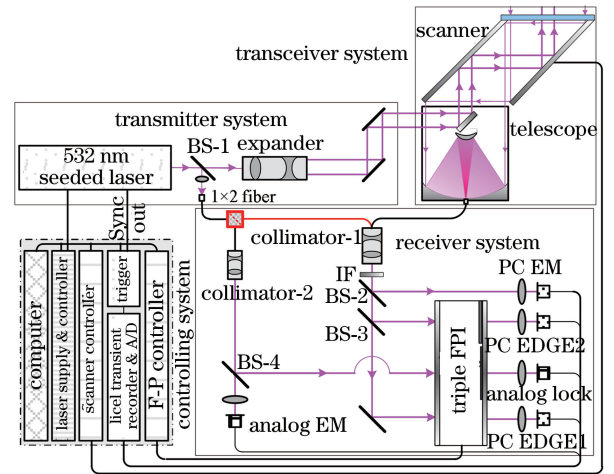


图 2 基于三通道 FPI 的瑞利-米散射多普勒激光雷达系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of Rayleigh-Mie Doppler lidar system based on triple FPI

工作模式 PMT 探测器 Analog EM 探测;另一束正入射至 FPI-L,透射光信号再由模拟工作模式 PMT 探测器 Analog Lock 探测。在进行风场测量时,三个光子计数探测器信号由速率为 20 MHz 的记录仪采集,两个模拟探测器信号由速率为 1 GHz 的模拟数字转换器(A/D)采集。在进行透过率校准测量时,将 Y 型光纤的另一个分束端口替换连接望远镜的多模光纤接入准直镜 Collimator-1,此时 5 个探测器接收到的均为脉冲宽度 4~8 ns 的激光脉冲信号,均由采样率为 1 GHz 的 A/D 采集。此外,对种子光进行温控以减小发射激光频率的漂移和抖动;整个接收机做了密封处理,以减小杂散光干扰和 FPI 周围的温度变化。激光雷达系统包括:激光器控制器、扫描仪控制器、FPI 控制器、数据记录仪和 A/D 采集卡等单元,均通过 RS232 串口由工控机控制。系统实物照片如图 3 所示。详细的验证系统参数如表 1 所示,其中,FSR 为自由光谱范围,FWHM

为半峰全宽。需要说明的是:PC EM、PC EDGE1 和 PC EDGE2 三个探测器采用的是大动态范围 PMT 模块,在 800 mm 口径的雷达系统中,将同时处于模拟和光子计数两种工作模式。

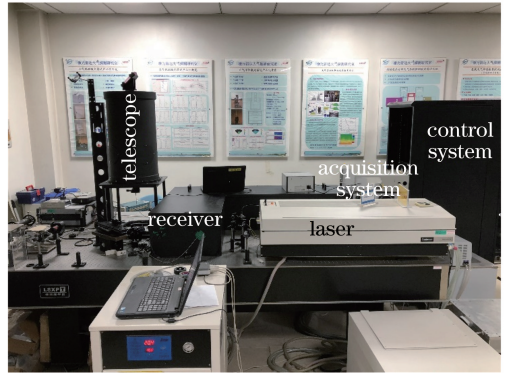


图 3 基于三通道 FPI 的多普勒激光雷达验证系统实物照片

Fig. 3 Photos of verification system for Doppler lidar based on triple FPI

表 1 基于三通道 FPI 的多普勒激光雷达验证系统设计参数

Table 1 Design parameters of verification system for Doppler lidar based on triple FPI

Parameter			Value	Parameter			Value	
Emission system	Nd:YAG laser	Wavelength /nm	532	Triple FPI	FSR /GHz	8		
		Pulse energy /mJ	430		FWHM /GHz	1		
		Frequency /Hz	30		FPI-1 and -2	3.48		
	Continuum9030	Pulse width /ns	4~8		ET70	FPI-1 and -L	1.16	
		Line width /MHz	90		peak-to-peak /GHz	>60		
		Beam diameter /mm	9		Peak transmittance /%	80		
		Divergence angle /mrad	0.5		Caliber /mm	532		
Beam expander	Magnification	10	Receiving system	Filter	Wavelength /nm	532		
Transceiver optical system	Cassegrain telescope	Caliber /mm	300	Filter	FWHM /nm	0.5		
		Focal length /mm	2440	Peak transmittance /%	70			
		Receiving field /mrad	0.08	Beam splitter	T/R	90/10; 50/50; 30/70		
	Scanner	Optical efficiency /%	85	PMT detector	Model	R9880U-20		
		Scan range /(^{\circ})	360\times 90	Operating mode	AD+PC			
		Caliber /mm	350	Fiber	Core diameter /mm	0.2(edge)/0.1(lock)		
		Optical efficiency /%	60	NA	0.11			
Acquisition card	Sampling rate /(GHz/MHz)	1000/20						

### 4 三通道 FPI 透过率校准实验

如图 2 所示,在对三通道 FPI 透过率进行校准时,激光器的 1% 发射激光能量耦合进入 Y 型光纤的合束端,其中一个分束端口接入接收机中的 Collimator-1 用于 FPI-1 和 FPI-2 的透过率校准测

量;另一个分束端口接入接收机中的 Collimator-2 用于 FPI-L 的透过率校准测量。由于是对脉宽 4~8 ns 的脉冲激光进行直接探测(实测值为 8 ns),所以选择响应时间为 1 ns 的 PMT 探测器,并使用采样速率为 1 GHz 的 A/D 采集卡进行信号采集。图 4 为采集卡实际采集到的 PMT 探测器输出脉冲信

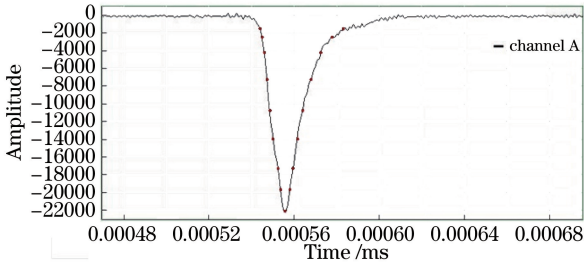


图 4 高速 A/D 采集卡采集到的 PMT 输出脉冲信号

Fig. 4 PMT output pulse signal collected by high-speed A/D acquisition card

号示例。在脉冲峰值前后取 16 个点的信号,每个信号点间隔 1 ns,16 个点对应 15 ns 时间长度,累加后再扣除基底作为 PMT 探测到的时间积分信号  $I$ 。

在透过率校准测量过程中,FPI 腔长扫描程序通过工控机通信串口发送指令给 FPI 控制器,再由

控制器驱动 PZT 按程序设定的扫描步长和扫描范围对 FPI 腔长连续调节。假定 PC EDGE1、PC EDGE2、PC EM、Analog Lock 和 Analog EM 探测到的时间积分信号数据列分别为  $I_1(n_m)$ 、 $I_2(n_m)$ 、 $I_e(n_m)$ 、 $I_{Ls}(n_m)$  及  $I_{Le}(n_m)$ ,则

$$T_1(\nu_m) = \frac{a_3 I_1(\nu_m)}{a_1 I_e(\nu_m)}, T_2(\nu_m) = \frac{a_3 I_2(\nu_m)}{a_2 I_e(\nu_m)},$$

$$T_L(\nu_m) = \frac{a_5 I_{Ls}(\nu_m)}{a_4 I_{Le}(\nu_m)}, \quad (3)$$

式中: $m$  为扫描 FPI 腔长的步数; $n_m$  为第  $m$  步对应的频率; $a_1 \sim a_5$  为校准常数。本系统中 FPI 腔长变化的最小步长为 0.125 nm,等效对应 3.67 MHz 的激光频率变化。对五个探测器的实测数据列采用非线性最小二乘拟合方法拟合就可得到三通道 FPI 透过率曲线,拟合方程为

$$T_M(\nu) = C + \eta_{FP} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{50} R_e^n \cos \left[ \frac{2\pi n(\nu - \nu_p)}{\nu'_{FSR}} \right] \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\pi n \Delta \nu_l}{\nu'_{FSR}} \right)^2 \right] \operatorname{sinc} \left( \frac{2n\nu_0}{\nu'_{FSR}} \frac{1 - \cos \theta_0}{1 + \cos \theta_0} \right) \right\}, \quad (4)$$

式中: $C$  为背景常数; $\eta_{FP} = T_{pe}(1 - R_e)(1 + R_e)$  为 FPI 的光学效率, $T_{pe}$  为峰值透过率, $R_e$  为有效反射率; $\nu'_{FSR} = 2\nu_{FSR}/(1 + \cos q_0)$ , $\nu_{FSR}$  为自由谱间距, $q_0$  为光信号入射至 FPI 的光束发散角,本系统为 1.25 mrad; $D\nu_l = d\nu/(4\ln 2)^{1/2}$ , $d\nu$  为发射激光线宽,本系统为 90 MHz; $\nu_0 = c/l$ , $l$  为激光波长, $c$  为真空中光速。

图 5 为实测的  $T_1(\nu_m)$ 、 $T_2(\nu_m)$ 、 $T_e(\nu_m)$  数据列及相应的拟合曲线  $T_{1M}(\nu)$ 、 $T_{2M}(\nu)$ 、 $T_{eM}(\nu)$ 。该拟合曲线代表发射激光或者大气米散射光入射时三个通道 FPI 的透过率。拟合得到 FPI-1、FPI-2 和 FPI-L 的  $\nu'_{FSR}$ 、 $R_e$ 、 $T_{pe}$  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,以及 8.59 GHz、0.652、0.768、-4.851 GHz。由此可得,FPI-1、FPI-2 和 FPI-L 的透射谱宽分别为 1.20 GHz、1.22 GHz 和 1.18 GHz;FPI-1 和 FPI-2 以及 FPI-1 和 FPI-L 的峰峰间隔分别为 3.91 GHz 和 1.25 GHz。将前两组拟合结果分别代入(4)式,并用  $D\nu_e$  替换  $D\nu_l$  代入,即可得到大气瑞利散射光入射时 FPI-1 和 FPI-2 的透过率  $T_{1R}(\nu)$  和  $T_{2R}(\nu)$ ,其中  $D\nu_e = (D\nu_l^2 + D\nu_r^2)^{1/2}$ , $D\nu_r = (8kT_a/Ml^2)^{1/2}$  为瑞利谱线  $1/e$  高度处的展宽量, $k$  为玻耳兹曼常数, $T_a$  为大气温度, $M$  为大气分子质量。

图 6 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  $T_{2R}(\nu)$ 。将发射激光频率锁定在图 6 所示的 -4 GHz 附近,则实测的米散射信号和不同大气温度条件下瑞利散射信号入射至 FPI-1 和 FPI-2 时总的风速测量灵敏度  $S_v$  (单位速度变化引起的透射信号的相对变化量)随风速的变化如图 7 所示。可以看出,米散射信号的风速测量灵敏度约为 0.5 %/(m·s<sup>-1</sup>);在 220~290 K 温度范围内,瑞利散射信号的风速测量灵敏度在 0.5~0.6 %/(m·s<sup>-1</sup>)变化。

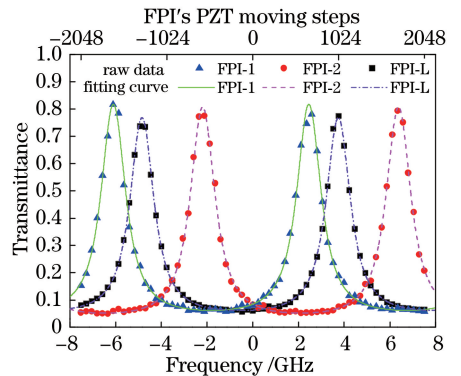


图 5 扫描 FPI 腔长时实测的原始透过率数据及相应的拟合曲线

Fig. 5 Measured original transmittance data and the corresponding fitting curve when scanning the FPI cavity length

## 5 风场探测实验

在完成 FPI 透过率校准后,进一步开展了风场

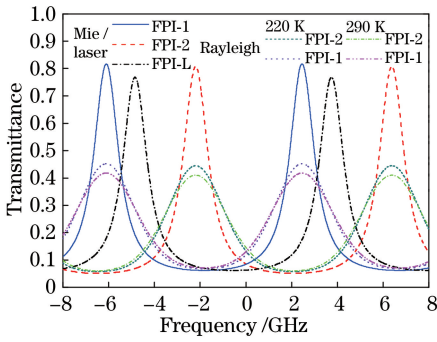


图 6 发射激光/米散射光和瑞利散射光入射时 FPI 透过率曲线

Fig. 6 FPI transmittance curves when emitted laser/Mie and Rayleigh scattering light are incident

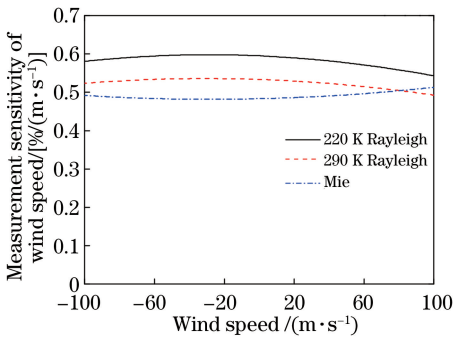


图 7 米散射和瑞利散射信号入射至 FPI-1 和 FPI-2 时总的风速测量灵敏度

Fig. 7 Total wind speed measurement sensitivities when Mie or Rayleigh scattering signals are incident on FPI-1 and FPI-2

探测实验。图 8(a)是 2020 年 5 月 11 日 22 时 24 分开始连续 5 组同一方向的径向风速测量结果(天顶角为  $27^\circ$ ),每组的脉冲累计时间为 2 min,空间分辨率为 75 m。图 8(b)为 5 组径向风速测量结果的平均值和方差。由图 8(b)可知,在 8 km 距离附近有明显的风切变,1.8~8.7 km 之间 80.4% 距离处的方差小于 3 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。图 9(a)为 2020 年 5 月 18 日 21 时 48 分开始,发射激光先后指向天顶角  $27^\circ$ 、东南西北方位的四个径向风速测量结果。3 km 以下由于受到气溶胶散射和布里渊散射的影响,风速测量结果与实际有较大的偏差;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,这也从侧面验证了系统风速测量数据的可靠性。利用  $e_v = 1/(R_{SN} S_v)$  得到四个径向风速的测量误差,如图 9(b)所示,其中  $e_v$  为径向风速测量误差,  $R_{SN}$  为测量 FPI-1 和 FPI-2 接收信

号比值的信噪比。可以看出,径向风速测量误差在 16 km 距离达到了 10 m/s,这是由于验证系统探测信号的信噪比较低。如表 1 所示,验证系统采用 300 mm 口径望远镜,而实际系统采用 800 mm 口径,导致望远镜接收面积减小为 1/7。激光器的实测发射激光脉冲能量为 430 mJ,而同型号的出厂标称激光脉冲能量为 800 mJ,能量减小了一半;扩束镜入射口径只有 3 mm,而激光器出射光斑直径为 9 mm,即使考虑到光斑不均匀性,由于扩束镜的遮挡,扩束后的激光能量将减小为 1/7;由于表面所镀膜层的老化,收发光学系统的光学效率只有  $85\% \times 60\% = 51\%$ ,而实际系统可以做到 90% 以上,考虑到往返光路,总光学效率将减小为 1/3。因此,受望远镜口径和发射激光能量减小、系统总体光学耦合效率低等因素的影响,与实际系统相比,验证系统探测信号的信噪比减小为 1/18。

图 10 和图 11 分别为 2020 年 5 月 12 日下午和 5 月 18 日晚上多普勒激光雷达验证系统与探空仪的水平风速大小和方向的对比结果。多普勒激光雷达的单组水平风速数据的获取周期为 8 min,垂直分辨率为 66.7 m@ $<10$  km;133.4 m@ $>10$  km。由图 10 和图 11 可知,在白天 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 5 月 18 日晚 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,其相应的差值分别如图 12(a)和图 12(b)所示。统计分析得到:70.8% 的水平风速和风向数据对的差值小于 2 m/s 和  $10^\circ$ ;95% 的水平风速和风向数据对的差值小于 5 m/s 和  $15^\circ$ 。根据探空数据可知,在 10 km 以上高度范围内,探空气球所在位置已经偏离了激光雷达 120 km,所以在 10 km 以上,风速偏差较大,但是在白天 12 km 高度范围内、晚间 16 km 高度范围内,验证系统和探空风速数据的变化趋势仍然一致;而在 2 km 高度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。在激光雷达低层的风速反演过程中,采用更符合实际的描述瑞利-布里渊散射谱的 Tenti S6 模型,并通过算法将米散射和瑞利散射信号分离,可以提高数据反演的准确性。这是我们下一步的重要工作之一。针对探空气球在高空飘离激光雷达探测区域而导致两者风速数据对比结果可信度降低的问题,

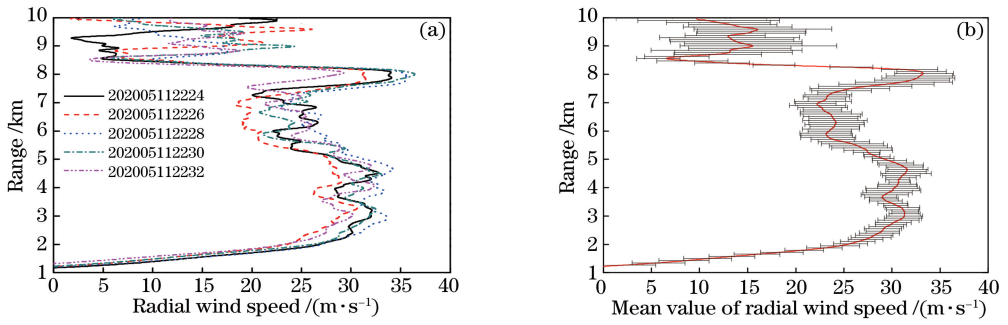


图 8 连续 5 组同一方向的径向风速。(a)测量廓线;(b)测量平均值和方差

Fig. 8 Five consecutive groups of radial wind speeds in the same direction.

(a) Measuring profile; (b) measuring mean and variance

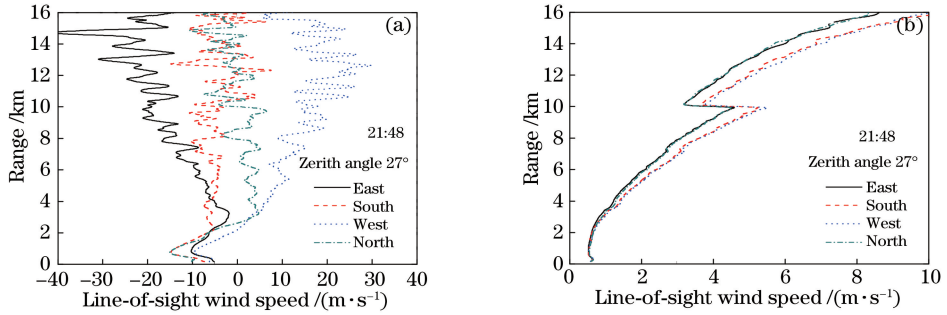


图 9 天顶角为 27°、东南西北四个方位的径向风速和误差。(a)径向风速;(b)径向风速误差

Fig. 9 Radial wind speed and error in East, South, West, and North with zenith angle of 27°.

(a) Radial wind speed; (b) radial wind speed error

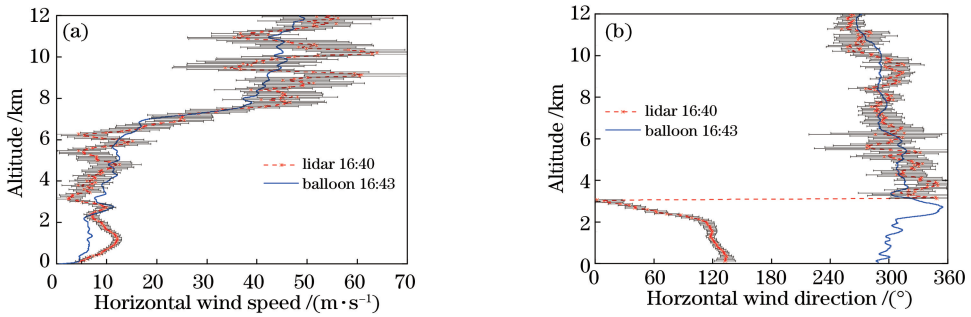


图 10 2020 年 5 月 12 日下午多普勒激光雷达验证系统与探空仪对比结果。(a)水平风速;(b)水平风向

Fig. 10 Comparison results of Doppler lidar verification system and radiosonde on the afternoon of May 12, 2020.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction

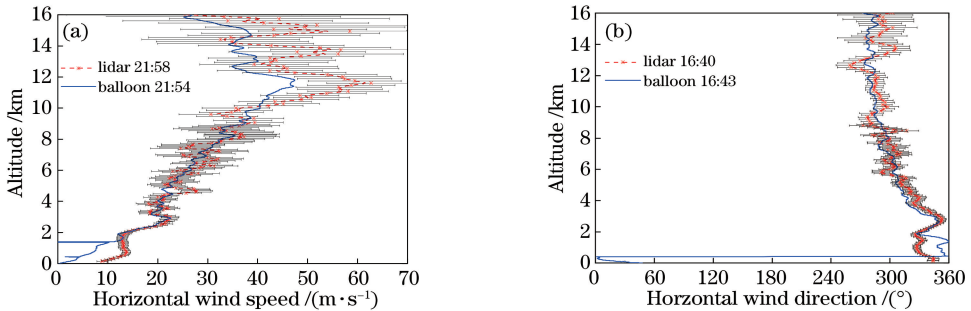


图 11 2020 年 5 月 18 日夜晚多普勒激光雷达验证系统与探空仪的对比结果。(a)水平风速;(b)水平风向

Fig. 11 Comparison results of Doppler lidar verification system and radiosonde on the night of May 18, 2020.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction

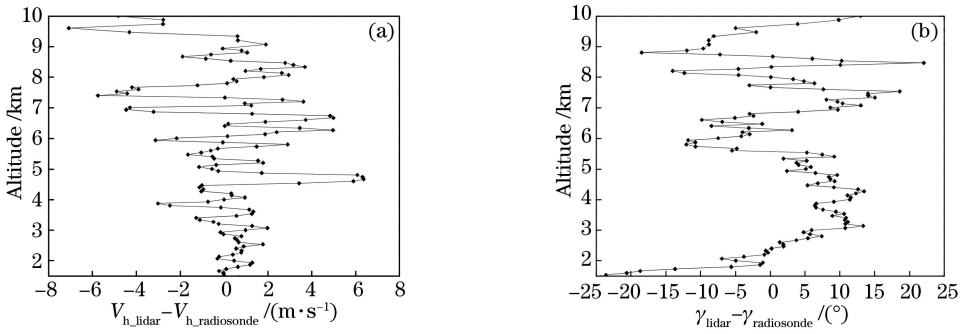


图 12 2020 年 5 月 18 日夜两种探测设备测得的水平风场差值。(a)水平风速差值;(b)水平风向差值

Fig. 12 Horizontal wind field difference measured by two detection devices on the night of May 18, 2020.

(a) Horizontal wind speed difference; (b) horizontal wind direction difference

今后除与探空气球对比外,考虑同时与微波雷达和 ESA 星载测风激光雷达进行数据对比。

## 6 结 论

目前,中科院安徽光机所正研制可探测 5~50 km 高度范围风场的瑞利-米散射多普勒激光雷达系统,用于实现能够兼顾高低层风场探测的需求。为了确保项目的顺利开展,先期利用实验室已有的 300 mm 口径望远镜和二维扫描仪成功搭建了一套验证系统,并先后开展了 FPI 透过率校准实验,径向风速连续观测实验以及水平风场对比观测实验。实验结果表明:尽管受到望远镜口径和激光器发射脉冲能量减小、系统总体光学耦合效率低等因素的影响,但是验证系统总体性能依然良好。在单次径向风速测量中,时空分辨率为 2 min 和 75 m 的情况下,白天具备 10 km 左右高度的风场探测能力,夜晚则可以达到 16 km 高度;在白天 2.7 km 以上和夜晚 1.5 km 以上高度,与探空气球的水平风场对比实验数据吻合度较好。这些结果为确保 800 mm 口径瑞利-米多普勒测风激光雷达系统的顺利研制打下了很好的前期基础。课题组下一步工作除了要加快 800 mm 口径雷达系统的研制外,将在低层风速反演方法和 FPI 温控稳频技术方面展开进一步研究,以拓展系统的低层风场探测能力和提高系统的风场探测精度。

## 参 考 文 献

[1] Huffaker R M, Reveley P A. Solid-state coherent laser radar wind field measurement systems[J]. Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1998, 7(4): 863-873.  
 [2] Diao W F, Liu J Q, Zhu X P, et al. Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least

square retrieval method and validation experiment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0914003.

刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914003.

[3] Chen Y, An J L, Lin J, et al. Observation of nocturnal low-level wind shear and particulate matter in urban Beijing using a Doppler wind lidar [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, 10(6): 411-417.  
 [4] Zhao M, Guo P, Rui X B, et al. Wind-field vector retrieval method at low signal-to-noise ratio for coherent Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110005.  
 赵萌, 郭磐, 芮训豹, 等. 低信噪比下相干多普勒激光雷达风场矢量反演算法 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110005.  
 [5] Souprayen C, Garnier A, Hertzog A, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2410-2421.  
 [6] Souprayen C, Garnier A, Hertzog A. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2422-2431.  
 [7] 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.  
 [8] Baumgarten G. Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(6): 1509-1518.  
 [9] Dehring M T, Nardell C A, Pavlich J C, et al. Performance and comparison of 532 nm and 355 nm



- groundwinds lidars [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4893: 337-347.
- [10] Gentry B M, Chen H, Li S X. Wind measurements with 355 nm molecular Doppler lidar [J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1231-1233.
- [11] Ingmann P. Status of the Doppler wind lidar profiling mission ADM-Aeolus [R]. ESA Report, SP, 1999, 1233(4): 1-8.
- [12] Ansmann A, Wandinger U, Rille O L, et al. Particle backscatter and extinction profiling with the spaceborne high-spectral-resolution Doppler lidar ALADIN: methodology and simulations [J]. Applied Optics, 2007, 46(26): 6606-6622.
- [13] Liu Z S, Wu D, Liu J T, et al. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter [J]. Applied Optics, 2002, 41(33): 7079-7086.
- [14] Shen F H, Cha H, Sun D S, et al. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. Optical Review, 2008, 15(4): 204-209.
- [15] Shen F H, Shu Z F, Sun D S, et al. Wind retrieval algorithm of Rayleigh Doppler lidar [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 192-198.  
沈法华, 舒志峰, 孙东松, 等. 瑞利散射多普勒激光雷达风场反演方法 [J]. 物理学报, 2011, 60(6): 192-198.
- [16] Shu Z F, Dou X K, Xia H Y, et al. Low stratospheric wind measurement using mobile Rayleigh Doppler wind lidar [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2012, 16(2): 141-144.
- [17] 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(105): A1203-A1221.
- [18] Liu F F, Bi D C, Liu H, et al. Principle prototype and experimental progress of wind lidar for near-space [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0810003.  
刘菲菲, 毕德仓, 刘恒, 等. 临近空间激光测风雷达原理样机和实验进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0810003.
- [19] Fan Y, Lin Z X, Cheng X W, et al. Pulsed laser spectral pattern detection based on Fabry-Perot interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0804006.  
樊焱, 林兆祥, 程学武, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的脉冲激光谱型测量 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0804006.
- [20] Zhang X. A spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering study for the characterization of atmospheric [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012: 13-19.  
张晓. 大气瑞利-布里渊散射频谱特性研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012: 13-19.