

60 km 瑞利多普勒激光雷达及其风场探测

郑俊¹, 孙东松¹, 窦贤康¹, 韩於利¹, 赵若灿¹, 李建阅¹, 周安然¹, 高健¹, 王国成²

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2. 陆军军官学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 临近空间风场的探测, 在大气动力学研究和提高数值天气预报的准确性, 以及航空航天保障等方面具有重要意义。研制基于瑞利散射双边缘技术的 60 km 多普勒激光雷达用于临近空间大气风场的测量。激光雷达主要分为垂直指向测量系统和两台斜指向测量系统。工作波长 355 nm, 探测距离 15~60 km。为验证系统的可靠性和积累风场观测数据, 于 2014 年下半年进行了外场实验, 并与当地的探空气球数据进行对比, 结果显示 60 km 瑞利多普勒激光雷达风场测量数据与探孔气球数据具有良好的 consistency。

关键词: 瑞利散射; 多普勒激光雷达; 风场探测; 数据对比

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1030002

60 km Rayleigh Doppler lidar and wind measurement

Zheng Jun¹, Sun Dongsong¹, Dou Xiankang¹, Han Yuli¹, Zhao Ruocan¹, Li Jianyue¹, Zhou Anran¹,
Gao Jian¹, Wang Guocheng²

(1. School of Space and Earth Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. New Star Institute of Applied Technology, Hefei 230031, China)

Abstract: The near-space wind measurement is important to atmospheric dynamics, numerical weather prediction and guarantee of aerospace system. A 60 km Rayleigh Doppler lidar was developed to measure the wind of near space. This lidar was based on theory of the double-edge molecular technique. The system included three independent subsystems: one points to the zenith; the two others were tilted at 30° from the zenith with eastward and northward pointing, respectively. It emitted 355 nm laser and could measure the wind within 15 km to 60 km. To validate the performance of the lidar and achieve wind data, field experiment of three months was carried out in the second half year of 2014, comparison of the wind data which showed good agreement with radiosonde.

Key words: Rayleigh scattering; Doppler lidar; wind measurement; data comparison

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(41227804, 41174130, 41374156); 安徽省自然科学基金(1308085MD54)

作者简介: 郑俊(1988-), 男, 博士生, 主要从事多普勒测风激光雷达系统方面的研究。Email: junzheng@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事测风激光雷达方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

0 引言

临近空间是指高度位于 20~100 km 之间的地球大气层,临近空间环境的研究,对于大气动力学研究和提高数值天气预报的准确性,以及航空航天保障等方面具有重要意义^[1-2]。大气风场信息是临近空间环境的重要参数之一,直接探测瑞利多普勒激光雷达由于其探测范围刚好满足临近空间风场探测的需要,且具有高时空分辨率和能够探测晴空大气三维风场等特点,受到各国的普遍关注。

1989 年,Chanin 等首次报道了一台能够观测 25~60 km 大气风廓线的基于大气分子瑞利散射信号的激光雷达系统,该系统利用双通道标准具作为鉴频装置,工作波长为 532 nm^[3]。1992 年,Garnier 等报道了对该系统的改造,望远镜由原先的 3 台增加到 4 台^[4]。1999 年,Souprayen 等人对该系统进行了第二次改造,主要是增大了激光脉冲的能量,并且将原来温度控制的 F-P 标准具改变为压力控制,消除激光频率的漂移^[5]。美国宇航局 Goddard 航天中心大气实验室的 Korb 等人完善边缘技术的探测理论,发展了单边缘技术、双边缘技术的直接测风激光雷达理论。在此基础上,于 1999 年成功研制了车载测风激光雷达系统 GLOW (Goddard Lidar Observatory for Winds),该系统在 2000 年 9 月进行了连续 3 周的观测实验并与同期的无线电探空仪观测结果进行了对比^[6-8]。目前,欧空局(ESA)正在致力于研制全球第一台星载测风激光雷达计划-ADM-Aeolus 计划 (Atmospheric Dynamics Mission Aeolus),ADM-Aeolus 的激光雷达又被称作为 ALADIN,该激光雷达系统首先进行了机载实验,为了实现地面到 30 km 的全球大气风场探测,光学接收机采用了一个测量 Mie 散射的高分辨率单通道的 Fizeau 干涉仪和一个测量 Rayleigh 散射的双通道 F-P 干涉仪,其最新发射计划为 2016 年^[9-10]。2006 年,中国科学技术大学成功研制出可移动式低对流层测风激光雷达,采用双边缘技术,探测范围为 0.2~10 km^[11]。2010 年完成了 10~40 km 车载测风激光雷达系统的研制,并在 2011~2012 年进行了外场风场观测试验,其测量结果与当地的无线电探空仪的数据对比,具有较好的一致性^[12-13]。

文中介绍了中国科学技术大学研制的基于双边缘技术的 60 km 瑞利多普勒激光雷达系统,并利用该系统进行了外场实验,获得了实验地区的临近空间风场分布数据。

1 测量原理

双边缘技术瑞利散射多普勒测风激光雷达利用双通道的 F-P 标准具,将大气分子的后向散射信号中的多普勒频移转变成两个边缘通道的能量变化,通过分别测量两个通道的光强,可以反演出信号中的多普勒频移。根据光的多普勒效应,从而计算出径向风速。通过测量不同方向的径向风速,最终合成获得实际风场信息。

F-P 标准具由两块平行的平板玻璃构成,透过率曲线具有陡峭的边缘,入射光的频率变化会使透射的光发生较为明显的强度变化^[14]。如图 1 所示,双边缘技术的 F-P 标准具有两个边缘通道和一个激光

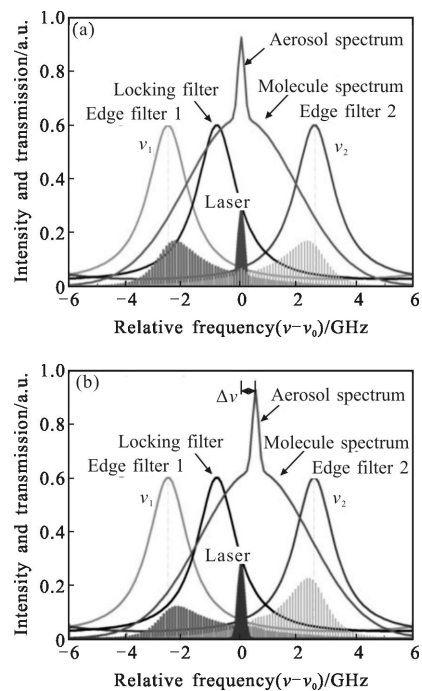


图 1 60 km 多普勒激光雷达测量原理图

Fig.1 Principle of 60 km Doppler lidar

频率锁定通道,两个边缘通道位于大气瑞利散射信号谱线的两侧,使激光的发射频率位于两个边缘通道的透过率曲线的交叉点位置。迭加了风速引起的多普勒频移的大气回波信号进入标准具的两个通道,由于信号的频率相对于发射激光发生改变,导致两个边缘通

道的透射光强发生变化,一个通道的光强增强,另一个通道的光强减弱。两个通道的信号被后面的探测器探测后,就可以反演出多普勒频移,进而测量出风速。锁定通道的作用是用于激光频率的锁定,降低由于激光频率漂移造成的风速测量的误差。

定义距离 z 处的响应函数 $R(z)$ 为:

$$R(z) = \frac{CN_1(z) - N_2(z)}{CN_1(z) + N_2(z)} \quad (1)$$

式中: $N_1(z)$ 和 $N_2(z)$ 分别表示边缘通道 1 和 2 接收的大气回波信号的光子数; C 表示两个边缘通道的校正常数。

响应函数随高度的廓线反映了回波信号相对标准具透过率曲线的频率位置的改变,利用系统标定函数与大气温度廓线,可以计算出不同高度的多普勒频移 $\Delta v_d(z)$ 。因而,视线风速(LOS)为:

$$V_{\text{LOS}}(z) = \frac{\lambda}{2} \Delta v_d(z) \quad (2)$$

式中: $V_{\text{LOS}}(z)$ 表示视线风速; λ 表示发射激光的波长; $\Delta v_d(z)$ 表示多普勒频移。利用两个方向的视线风速,就可以反演出实际的风场信息。

2 多普勒激光雷达系统结构

60 km 瑞利多普勒激光雷达包括 3 个探测子系统:垂直指向测量系统和两个斜指向测量系统。垂直

指向测量子系统的竖直向上发射激光,用于测量垂直的风速和温度廓线;两个斜指向的测量子系统的望远镜仰角均为 60° ,且指向相互垂直的两个方向。每个子系统由发射部分、接收望远镜、光学接收机和信号采集控制等部分组成,主要部分的参数如表 1 所示和图 2 所示。

表 1 60 km 瑞利散射多普勒激光雷达主要参数

Tab.1 Key parameters of the 60 km Rayleigh Doppler lidar

	Parameter	Value
Laser	Wavelength/nm	355
	Pulse duration/ns	7
	Laser 1/e width/MHz	200
	Energy/mJ	350
	Repetition rate/Hz	50
Receive	Telescope aperture/mm	1 000
	Field of view/mrad	0.09
	Etalon aperture/mm	56(edge)28(locking)
	Peak transmission	60%
	Cavity length/mm	12.5
FPI	Cavity tuning accuracy/nm	0.078
	FSR/GHz	12
	FWHM/GHz	1.7
	Edge channels separation/GHz	5.1
	Locking-edge channel separation/GHz	1.7

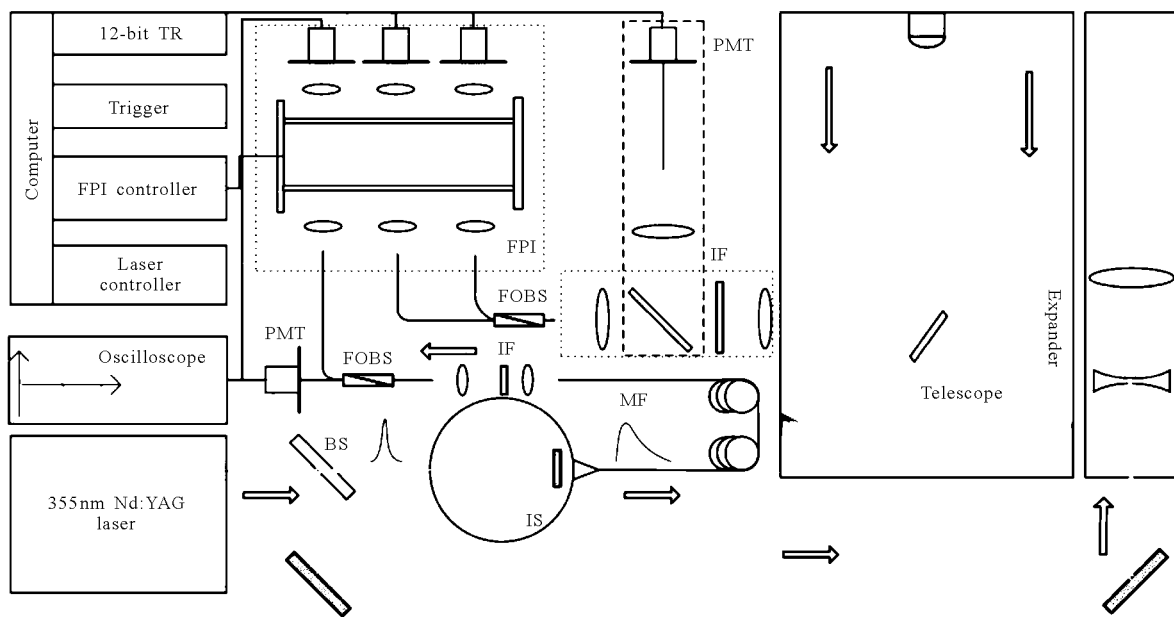


图 2 60 km 多普勒激光雷达系统结构图

Fig.2 Schematic view of the 60 km Doppler lidar optical setup

激光发射部分包括一台种子注入式的 Nd:YAG 激光器(Continuum Powerlite 9050)和扩束镜。激光器基频光为 1 064 nm,经过三倍频后,发射光为 355 nm,脉冲持续时间 7 ns,谱线宽度 200 MHz,单脉冲能量 350 mJ,脉冲重复率为 50 Hz。如图 2 所示,出射的光由分束片分出少部分的光进入直径 0.25 m 的积分球,用于激光频率的锁定。积分球中的光脉冲被展宽后经过芯径为 100 μm ,数值孔径为 0.22 的多模光纤和光纤分束器。一部分光进入 F-P 标准具的锁定通道后被光电探测器 PMT 探测;另一部分直接进入探测器。系统中所用的探测器是 Hamamatsu 生产的型号为 R7400U-03 光电倍增管模块,其探测的波长范围为 185~650 nm,带宽 10 MHz,最大增益 $10^5\sim 10^6$,量子效率优于 20%,暗电流为 2×10^{-10} A。激光频率锁定的两路信号均通过示波器进行数据采集。激光器发射的主要的光经过扩束镜扩束后,发射到大气中。激光在大气中大气粒子发生作用,产生后向散射信号,信号被直径为 1 m 的望远镜接收汇聚后,准直进入后继光路。经过窄带滤光片后,由分束片分成两个部分,一部分直接由会聚透镜汇聚后进入 PMT 探测器,进行温度廓线探测;另一部分由耦合透镜耦合进入多模光纤,光纤芯径为 200 μm ,数值孔径为 0.22。进入多模光纤的光,经过光纤分束器分成两部分,分别进入 F-P 标准具的两个信号通道。对于斜指向测量系统的结构与垂直测量系统类似,只是缺少温度测量的部分(图 2 中虚线框部分)。

可调谐式三通道 F-P 标准具是光学接收机主要部件,标准具由零膨胀玻璃为材料制造,以降低温度变化对其性能的影响。其峰值透过率为 60%,自由谱间距 12 GHz,3 个通道的带宽均为 1.7 GHz,3 个通道利用镀膜厚度不同产生频率间隔,两边缘通道频率间隔为 5.1 GHz,锁定通道与边缘通道频率间隔 1.7 GHz。F-P 标准具可以利用其中的 PZT 晶体实现腔长的调谐,调谐步长为 0.078 nm,对应频率变化 5.27 MHz@354.7 nm。系统接收机采用多模光纤和光纤分束器,代替自由光路及其中的反射镜、分束器等光学元件,简化了接收机光学系统,使结构更加紧凑,同时也避免了杂散光对测量精度的影响。

系统中的种子激光器和 F-P 标准具对于环境温度要求较高,虽然 F-P 标准具的材料是零膨胀玻璃,但是 PZT 晶体在温度发生变化时,长度会发生

变化,使得 F-P 标准具的腔长随温度发生改变,影响测量精度。同时环境温度的变化,也会导致激光器的出射光的频率发生变化,因此,F-P 标准具和种子激光器均分别放置在恒温箱中,恒温箱的温度控制精度为 ± 0.1 K。

3 风场反演及测量结果

60 km 瑞利多普勒激光雷达为车载系统,集成在两台卡车上,其中一台为垂直指向测量系统,另一台车为斜指向测量系统,主要用于测量 15~60 km 高度范围内大气风场信息。2014 年 10 月 28 日至 2015 年 1 月 20 日,系统在山西省某地进行了外场实验,图 3 为系统采集到的一组典型的大气回波信号图,时间为 2014 年 11 月 30 日晚上 10 点开始,脉冲总数 90 000 发,测量时间为 30 min,图中分别为两个边缘通道的不同距离采集到的光子数。信号采集系统采样频率为 20 MHz,对应信号的距离分辨率为 7.5 m。

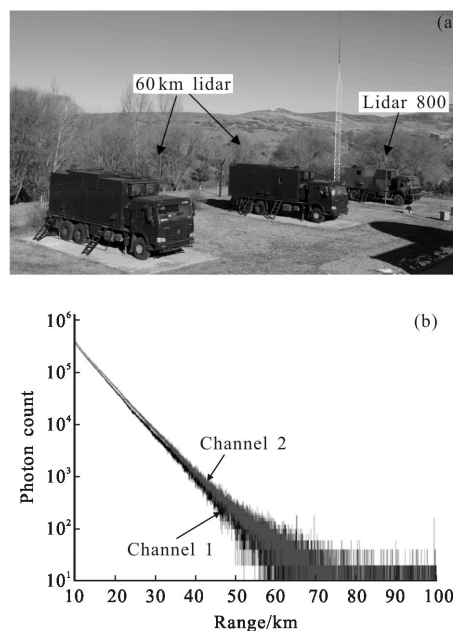


图 3 多普勒激光雷达外场实验照片和信号图
Fig.3 Photo and signal of field experiment Doppler lidar

为了验证系统的可靠性,在外场试验期间,与探空气球上的无线电探空仪的风场数据进行了比对。无线电探空仪悬挂在探空气球上,在上升的过程中能测定各个高度上的风向、风速、温度、湿度和气压等数据。对比实验所使用的无线电探空仪的距离分辨率为 100 m,探测的高度为 0~30 km,但是在实际

测量过程中,其实际测量高度会略有不同。

图 4 所示为 2014 年 11 月 5 日的一组数据对比结果,探空气球 19:00 开始升空,激光雷达为 20:26 采集的数据,信号累积时间为 15 min。图中的误差棒表示风速和风向的测量误差。根据系统的设计要求,60 km 多普勒激光雷达探测距离为 15~60 km,为了获得更多的对比数据,图中数据从 10 km 出开始反演。激光雷达在 40 km 以下的距离分辨率为 0.2 km,40 km 以上为 1 km。图中可以看出,在激光雷达探测范围内,风速变化在 2~75 m/s,且在 25 km 高度左右出现风速最小值,最大误差为 9.8 m/s。风向变化 200°~330°,最大误差为 26.4°,且大多位于 240°~300°之间,主要表现为西风。通过对比发现,在 10~30 km 距离内,激光雷达与无线电探空仪的测量结果具有较好的一致性,而且的测量的风速和风向的变化趋势相符,总体偏差较小。风速最大偏差为 5.1 m,风向最大偏差为 50°。

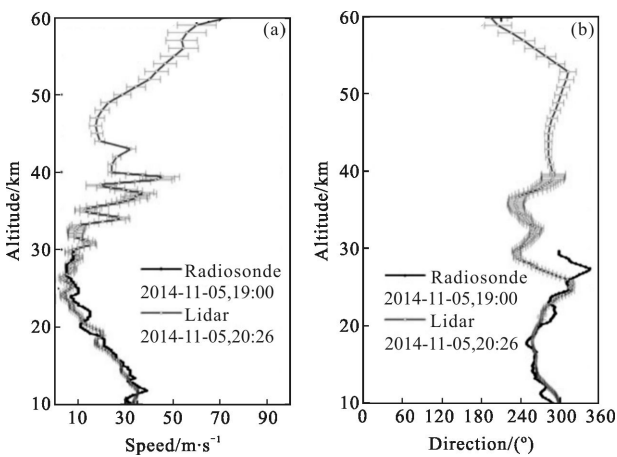


图 4 2014 年 11 月 5 日 20:26,瑞利多普勒激光雷达与探空气球的水平风速风向数据对比

Fig.4 Profiles of horizontal wind velocity and direction measured by the near-space Doppler lidar compared with data from radiosonde at LT 20:26, November 5, 2014

图 5 给出了另外一组典型对比数据,时间为 2014 年 12 月 4 日晚,探空气球 19:00 开始升空,激光雷达数据采集时间为 20:26,累积时间 15 min。图中可以看出,在激光雷达探测范围内,风速变化在 1~57 m/s,且在 30 km 高度左右出现风速最小值,最大误差为 8.9 m/s。风向变化 140°~320°,最大误差为 22.8°,且大多位于 180°~300°之间,主要表现为西风

和北风。通过对比发现,在 10~30 km 距离内,激光雷达与无线电探空仪的测量结果具有较好的一致性,而且的测量的风速和风向的变化趋势相符,总体偏差较小。风速最大偏差为 6.2 m,风向最大偏差为 28°。

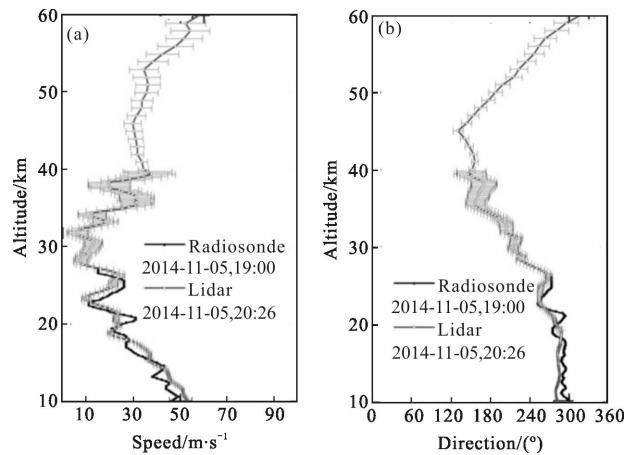


图 5 2014 年 12 月 4 日 20:09,瑞利多普勒激光雷达与探空气球的水平风速风向数据对比

Fig.5 Profiles of horizontal wind velocity and direction measured by the near-space Doppler lidar compared with data from radiosonde at LT 20:09, December 4, 2014

4 结论

研制了基于瑞利散射双边缘技术的 60 km 瑞利多普勒激光雷达,用于测量临近空间大气风场信息,其探测高度可以覆盖 10~60 km 的范围。介绍了 60 km 瑞利多普勒激光雷达的基本原理、系统结构和技术参数,叙述了系统的各部分结构和功能。并于 2014 年在中国山西进行了相关的外场实验,对邻近空间的风场信息进行了测量,获得了当地的风场数据,验证了系统运行的稳定性。同时与当地的探空气球数据进行对比,获得了较好的对比结果,验证了系统的可靠性,为进一步风场信息的长期观测,积累相关数据奠定了基础。

参考文献:

- [1] Lv Daren, Chen Zeyu, Guo Xia, et al. Recent progress in near space atmospheric environment study [J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(6): 674-682. (in Chinese)
吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状 [J]. *力学进展*, 2009, 39(6): 674-682.
- [2] David K Schmidt, James Stevens, Jason Roney. Near-space

- station-keeping performance of a large high-altitude notional airship [J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 39(6): 611–615.
- [3] Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16(11): 1273–1276.
- [4] Garnier A, Chanin M L. Description of a Doppler Rayleigh for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Applied Physics B*, 1992, 55: 35–40.
- [5] Claude Souprayen, Anne Garnier, Albert Hertzog, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2410–2421.
- [6] Laurence K C, 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.
- [7] Korb C L, Gentry B M, Li S X, et al. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3097–3104.
- [8] Cristina Flesia, Korb C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(3): 432–440.
- [9] Reitebuch O, Lemmerz C, Nagel E, et al. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar aladin on ADM–Aeolus [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2501–2515.
- [10] Paffrath U, Lemmerz C, Reitebuch O, et al. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar aladin on ADM–Aeolus [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2516–2530.
- [11] Shen Fahua, Cha Hyunki, Sun Dongsong, et al. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. *Optical Review*, 2008, 15: 204–209.
- [12] 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): 15286–15300.
- [13] Shu Z, Dou X, Xia H, 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.
- [14] Dou Xiankang, Han Yuli, Sun Dongsong, et al. Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere [J]. *Optics Express*, 2013, 22(S5): 1203–1221.