

## 60 km 车载瑞利测风激光雷达研制

韩燕<sup>1,2,3</sup>, 孙东松<sup>1</sup>, 翁宁泉<sup>2</sup>, 窦贤康<sup>1</sup>, 王建国<sup>3</sup>, 张燕鸿<sup>3</sup>

- (1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学研究中心, 安徽 合肥 230031;
3. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 目前我国尚缺乏 25~60 km 大气风场实时探测手段, 为此研制了 60 km 车载瑞利测风激光雷达。介绍了系统总体结构, 对分系统的研制做了详细描述。为提高风场反演的精度, 设计了标准具通过率函数校准系统。提出了标准具通过率函数校准方法, 并开展实验对标准具通过率函数进行了校准。校准结果表明, 接收机性能稳定, 各参数测量标准差均小于 0.06。该系统在德令哈地区对 15~60 km 大气风场进行了观测, 获得了水平风场的测量结果, 并与当地探空气球的探测结果进行了对比, 30 km 以下一致性较好。对风速、风向测量误差进行了计算, 40 km 以下, 风速测量误差  $\leq 4$  m/s, 风向测量误差  $\leq 6^\circ$ , 40 km 以上, 风速测量误差  $\leq 8$  m/s, 风向测量误差  $\leq 18^\circ$ 。该系统设计合理, 性能稳定, 能够实时探测 10~60 km 大气风场。

**关键词:** 激光雷达; 直接探测; F-P 标准具; 透过率函数; 风场观测

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1414-06

## Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar

Han Yan<sup>1,2,3</sup>, Sun Dongsong<sup>1</sup>, Weng Ningquan<sup>2</sup>, Dou Xiankang<sup>1</sup>, Wang Jianguo<sup>3</sup>, Zhang Yanhong<sup>3</sup>

- (1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. Northwest Institute of Nuclear Technology of China, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Recently, the wind field in the altitude range 25–60 km is still poorly monitored in real time, therefore the 60 km mobile Rayleigh wind lidar based on a Fabry–Perot etalon was developed for wind measurement. The overall structure of this lidar system was described in detail. The design of the subsystems of this lidar was introduced elaborately. In order to improve the accuracy of wind measurement, experiment was designed to calibrate the transmission curves of FPI, and the calibration method was presented. The transmission curves of FPI were calibrated experimentally, and the standard deviations for parameters of FPI are less than 0.06 in the calibrated experiments. The developed lidar has observed the wind of 15–60 km altitudes over Delingha, and wind velocity and direction profiles were obtained. Observations of lidar were

收稿日期: 2014-09-10; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(41174130, 41227804, 41304123)

作者简介: 韩燕(1975-), 女, 高级工程师, 博士生, 主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: hanyanxj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达大气遥感、成像激光雷达、相干激光雷达等方面的研究。

Email: sds@ustc.edu.cn

compared with the rawinsondes', and the compared result show good agreement between both measurements. Measure error was calculated, wind velocity and direction errors of the measurements are less than 4 m/s and 6° respectively when it is lower than 40 km. They are less than 8 m/s and 18° when it is higher than 40 km. Wind observations demonstrate that the lidar has the expected good performances.

**Key words:** lidar; direct detection; F-P etalon; transmission function; wind observation

## 0 引言

中层大气风场很难监测,在此高度范围内纬向平均风的估算仅靠卫星观测到的气压场数据。

很多测风技术都只应用于 25 km 以下,诸如 ST 雷达,无线电探空仪和风速计,还有一些测风技术应用于 60 km 以上,诸如 VHF 和流星雷达,干涉仪和光谱仪。在过去的十几年里,偶发火箭探空仪可实现 25~60 km 范围内风场的探测。目前,Rayleigh 激光雷达广泛用于中高层大气风场的探测<sup>[1]</sup>,国内外研制成功的 Rayleigh 激光雷达系统实现了中高层大气风场的探测。法国普罗旺斯重点实验室(OHP)的激光雷达系统<sup>[2]</sup>,能够测量 18~80 km 高度范围内的风场。此系统于 2009 年 1 月对中高层大气风场进行了探测。美国 NASA Goddard 航天中心的 GLOW 系统<sup>[3]</sup>,于 2000 年 9 月在 North Glen, N.H.进行风场测量外场实验,测量的有效大气风廓线在 1.8~35 km 的高度,风速测量误差在 0.4~6 m/s 之间。在国内,中

层大气 Rayleigh 测风激光雷达发展较晚,中国科学技术大学孙东松研究小组研制了车载多普勒测风激光雷达并于 2009 年研制成功<sup>[4]</sup>,该雷达测量的有效大气风廓线高度范围是 8~40 km。

60 km 车载 Rayleigh 测风激光雷达系统是中国科学技术大学研制成功的又一台车载多普勒测风激光雷达系统<sup>[5]</sup>,测量范围覆盖整个平流层 15~60 km,风速测量误差在 3~10 m/s 之间。采用 Fabry-Perot 标准具双边鉴频技术<sup>[6]</sup>,通过分析大气分子后向散射信号,获得不同高度的水平风场分布,并在德令哈地区开展了大气风场观测试验,得到了 15~60 km 风场观测数据。展示了多普勒激光雷达在平流层范围的观测能力,探索出了我国平流层大气风场探测的新思路。

## 1 60 km 车载瑞利测风激光雷达系统

60 km 车载瑞利测风激光雷达在测量原理上利用分子散射多普勒频率检测技术,采用国际上先进的双边鉴频技术<sup>[7]</sup>。系统结构如图 1 所示。在系统

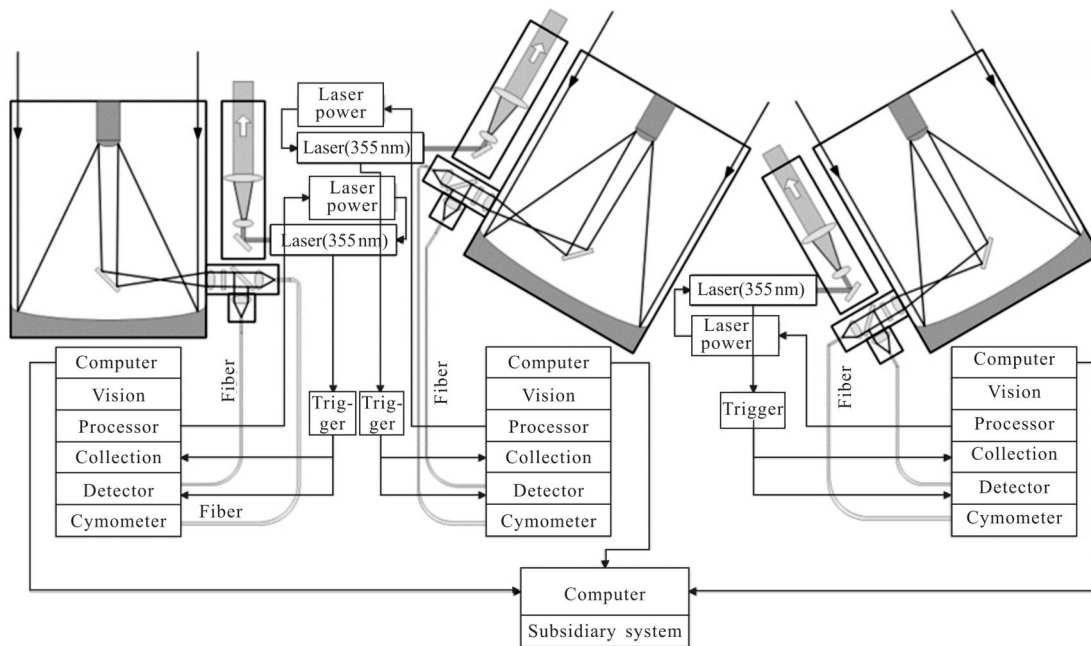


图 1 激光雷达系统结构

Fig.1 Schematic of the lidar system

设计上,使用大口径固定指向的三望远镜收发独立结构,其中,两个仰角为 30°正交方向望远镜用来探测水平风场,垂直方向望远镜用来探测大气温度、垂直风速及重力波。三套独立工作的径向风场探测系统均由激光发射机子系统、发射和接收光学子系统、接收机子系统和控制与数据处理子系统组成,整个系统封装在可移动方舱内,实现了测量的机动性。

该雷达系统的工作流程是由激光发射机子系统发出 355 nm 的激光,激光束经扩束镜扩束后由传导光纤连接至发射和接收光学子系统,经三个独立的望远镜向两个正交方向和一个垂直方向发射激光束,激光束经大气散射携带多普勒频移的回波信号由望远镜收集,经传导光纤连接至接收机子系统由三通道 F-P 标准具进行多普勒频移的分析,经探测器将信号传输至控制与数据处理子系统,得到大气风场的观测结果。

1.1 激光发射机子系统

激光发射机子系统的功能是发射 355 nm 的激光束并进行 18 倍的扩束,由激光器和扩束镜以及导光镜片组成,系统使用美国 Continuum 公司 9050 型种子注入式灯泵浦 Nd:YAG 激光器,三倍频后,单脉冲能量为 350mJ,脉冲重复频率为 50Hz,脉宽为 3~7ns,光束发散角为 0.1 mrad,谱线宽度约 200 MHz,光斑尺寸 <10 mm,扩束镜的设计是为了压缩激光器出射光束的发散角,这里确定激光光束的发散角 ≤ 0.1 mrad,出射光束有效通光口径 180 mm,扩束倍数 18 倍。因此,出射光束发射角 ≤ 0.05 mrad。设计了激光器种子光频率锁定装置<sup>[6]</sup>,如图 2 所示。在风场探测之前,首先用种子光扫描标准具腔长,得到三个通道透过率曲线,调节电光调制器(EOM electrooptic modulator),使三个通道透过率曲线参数满足设计值,此时确定种子光频率基准值,检测种子光频率,通过控制标准具,使其始终为基准值。

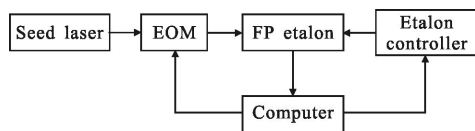


图 2 种子光锁定原理

Fig.2 Schematic diagram of seeded laser frequency locking

1.2 发射接收光学子系统

发射接收光学子系统功能是将激光束发射向大

气并接收大气散射回波,主要组成部分是望远镜,系统选用 1 m 口径的卡塞格林反射式望远镜。望远镜焦距为 2 217 mm,无渐晕视场为 0.045 mrad,光学遮挡比为  $(d/D)^2 \leq 10\%$ ,工作波长为 355nm,接收视场角为 0.1 mrad,反射镜面镀为 355 nm 高反射介质膜 ( $R > 99\%$ )。镜筒内径为  $\phi 1\ 040\text{ mm}$ ,望远镜总高度为 1 098 mm,整个镜筒通过支架与平台支撑连接。

1.3 接收机子系统

接收机子系统的功能是分析大气散射回波的多普勒频移,主要光学器件包括光纤分束器(splitter)、探测器(PMT)和 F-P 标准具(F-P etalon)。接收机子系统光路如图 3(a)所示。系统设计三通道 F-P 标准具作为鉴频器如图 3(b)所示,该 F-P 标准具包括

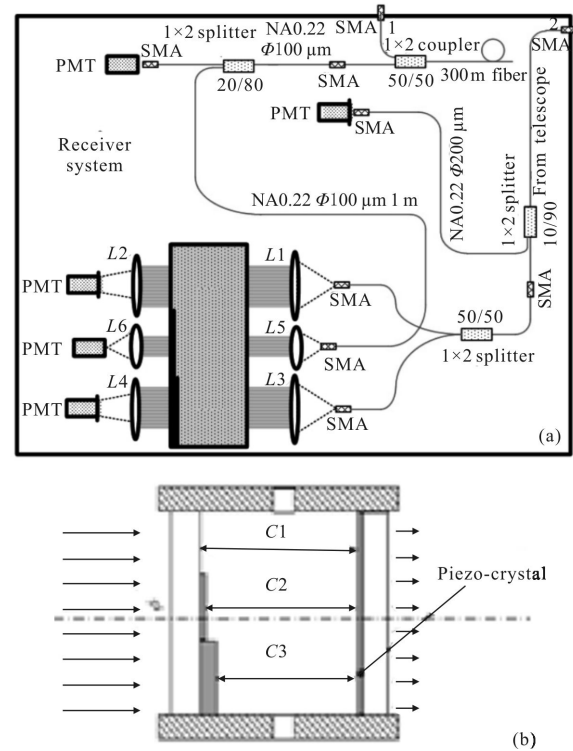


图 3 接收机子系统光学布局及三通道 F-P 标准具结构

Fig.3 Layout of the receiver subsystem and structure of the triple Fabry-Perot etalon

ET-Series II 型标准具和 CS100 控制器,为可调谐式标准具,即标准具的腔长可调,通过 CS100 控制器调整腔长可对具有漂移性的激光频率进行跟踪与锁定。ET-Series II 型标准具由两块平行平面玻璃组成,具有三个通道,内表面镀以高反射率的银膜,镀膜之后两平面玻璃的 PV 值为  $\lambda/100$ ,对波长为 355 nm 的激光反射率为 65%~67.5%,最小自由谱间距 FSR

为 12 GHz,半高宽  $\Delta\nu$  为 1.7 GHz。两个边缘通道的中心谱间距为 5.1 GHz,三个通道间隔 12.5 mm,有效孔径为 56 mm,透过率峰值为 58%~65%。光纤分束器的应用使得接收机体积缩小,结构紧凑,稳定且便于机动,同时减少了背景光的干扰。探测器是 R7400 型光电倍增管,采用德国 Licel 公司研制的采集系统,模拟与光子计数两种方式并行探测的方式,这两种信号进行合并能够提高模拟探测高强度信号的线性度和光子计数弱信号的灵敏度,探测范围可以达到 5 个数量级。

### 1.4 控制与数据处理子系统

控制与数据处理子系统控制着雷达系统的整体工作流程,控制系统主体为一台工控机,其通过程序控制着激光器电源和触发、采集卡工作状态及标准具控制器。数据处理系统为一台计算机。信息舱设有总控计算机,通过交换机对三套独立工作的径向风场探测系统计算机进行总体控制。

## 2 激光雷达系统接收机校准

### 2.1 校准系统及原理

系统研制成功后,需对接收机标准具透过率函数进行反复校准<sup>[7]</sup>,以提高风场反演的稳定性及精度,设计校准系统(如图 4 所示)对标准具透过率函数进行了校准,其中激光器(laser)使用波长为 355 nm 的 Nd:YAG 连续激光器,平均功率为 10 mW,线宽 <1 MHz,发出的激光近似为单模激光。积分球(IS)直径 25 cm,涂层对波长为 355 nm 的光波的反射率为 96%,光波被积分球收集并在其漫反射均匀的内壁上多次被反射形成均匀光。激光器发出的单模连续光经过滤光片(FILTER)至积分球(IS)的输入端,经积分球之后的均匀光通过传导光纤(MF)连接至接收机,经三个光纤分束器(FS)将光束分成四路,一路入射至能量探测器(EM DET1)、其他三路经汇聚透镜准直后入射至标准具(FPI)锁定通道(Lock DET)和两个信号通道(EDGE DET)。设置标准具控制器改变标准具腔长,腔长改变等效于激光器频率改变,所以,入射至标准具三个通道的连续单模激光束同时扫描标准具腔长得到标准具三个通道的透过率曲线。因为连续单模激光束的线宽 <1 MHz,此时扫描得到的三个通道透过率曲线就是标准具透过率曲线,透过率曲线用公式(1)进行拟合<sup>[8]</sup>,得到透过率函数。

$$H(\nu) = T_{pe} \left( \frac{1-R_e}{1+R_e} \right) \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R_e^n \cos \left( \frac{2\pi n \nu}{\nu_{FSR}} \frac{1+\cos\theta_0}{2} \right) \right. \\ \left. \text{sinc} \left( \frac{2n\nu}{\nu_{FSR}} \frac{1-\cos\theta_0}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

式中:  $T_{pe} = \left( 1 - \frac{A}{1-R} \right) 2 \cdot \frac{1+R_e}{1-R_e} \cdot \frac{1-R}{1+R}$  为峰值透过率;  $R_e$  为入射光对应波长的有效反射率;  $\nu_{FSR}$  为自由谱间隔;  $R$  为对应波长的反射率;  $\theta_0$  为入射光束发散角。

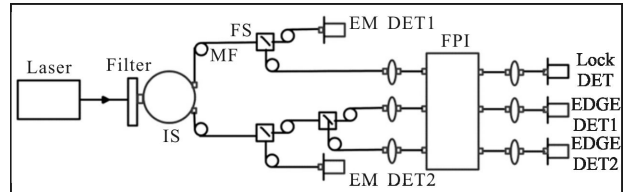


图 4 标准具透过率函数标定系统

Fig.4 Calibration system of transmission function of Fabry-Perot etalon

### 2.2 校准实验

接收机标准具透过率函数校准实验连续开展了多次,在实验过程中调节接收机光路直到校准实验扫描的透过率曲线满足理论设计值,且实验的重复性较好。其中,以 2013 年 9 月 24 日标准具透过率函数校准实验为例分析接收机性能,实验时间 17:10~19:30,共扫描 12 组透过率曲线数据,分别用公式(1)进行拟合,其中 4 组扫描曲线和其拟合曲线如图 5(a)所示,12 组拟合曲线如图 5(b)所示。从图 5 可以看出,标

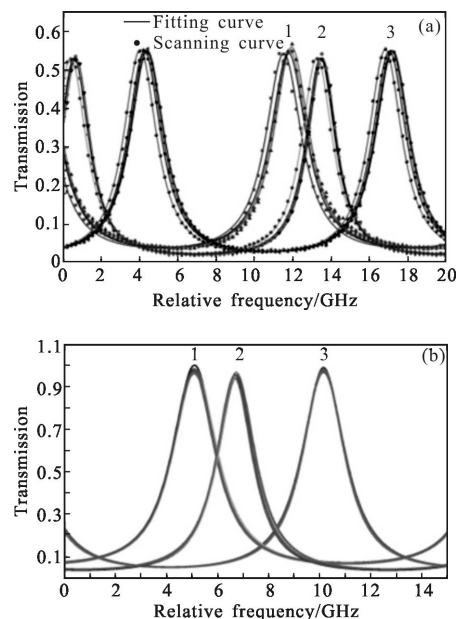


图 5 标准具透过率校准曲线

Fig.5 Calibrated and fitted transmission curves of Fabry-Perot etalon

准具三个通道透过率曲线 1、2、3 非常稳定,对 1、2 条拟合曲线进行了统计计算,各参数标准差均小于 0.06,经过校准后接收机性能非常稳定。

### 3 风场观测

激光发射机子系统发出 355 nm 的激光,激光束经扩束镜扩束后由传导光纤连接至发射和接收光学子系统,经三个独立的望远镜向两个正交方向和一个垂直方向发射激光束,激光束经大气散射携带多普勒频移的回波信号由望远镜收集,经传导光纤连接至接收机子系统由三通道 F-P 标准具进行多普勒频移的分析,根据标准具透过率曲线的变化可以直接差分测量多普勒频移量  $\Delta v$ ,其与径向风速  $v$  的关系为:

$$\Delta v = \frac{2v}{c} \nu \quad (2)$$

式中:  $\nu$  为激光频率。

系统采用三固定指向望远镜探测方式,如图 6 所示,两正交方向( $V_{r1}$ ,  $V_{r2}$ )和一垂直方向望远镜( $V_{r3}$ )发射激光束探测水平风速,两正交方向望远镜主轴与地平面夹角为  $60^\circ$ ,以正东方向为 Y 轴正方向,正北方向为 X 轴正方向,指向天顶方向为 Z 轴正方向建立直角坐标系。

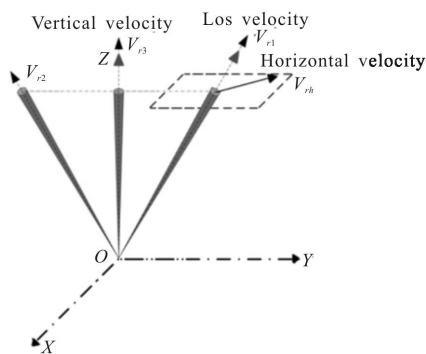


图 6 发射激光束分布图

Fig.6 Layout of emitting laser beams

$V_x, V_y, V_z$  分别是风矢量  $V_h$  在  $x, y, z$  方向上的分量,则:

$$V_x = 2V_{r1} - \sqrt{3} V_{r3} \quad (3)$$

$$V_y = 2V_{r2} - \sqrt{3} V_{r3} \quad (4)$$

$$V_z = V_{r3} \quad (5)$$

水平风速大小  $V_h$  和方向  $\gamma$  分别为:

$$V_h = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (6)$$

$$\gamma = \arctan(V_x/V_y) + \pi \{1 - \text{sign}[(V_x + |V_y|) \cdot V_x]\}, V_y \neq 0 \quad (7)$$

独立工作的垂直天顶指向的望远镜测得的径向风速  $V_{r3}$  就是大气垂直风速  $V_z$ 。

该系统于 2013 年 5 月研制成功,在中国科学技术大学开展调试、校准实验,并于 2013 年 11 月开始观测德令哈地区 15~60 km 大气风场,观测结果与探空气球观测数据进行了比对。风场观测、比对结果及测量误差如图 7 所示。图 7 表明,30 km 以下,激光雷达观测结果与探空气球观测结果一致性较好。图 7 中横线是测量误差,40 km 以下,激光能量较强,信噪比较高,风速测量误差  $\leq 4\text{m/s}$ ,风向测量误差  $\leq 6^\circ$ ,40 km 以上,激光能量较弱,信噪比较低,风速测量误差  $\leq 8\text{m/s}$ ,风向测量误差  $\leq 18^\circ$ 。

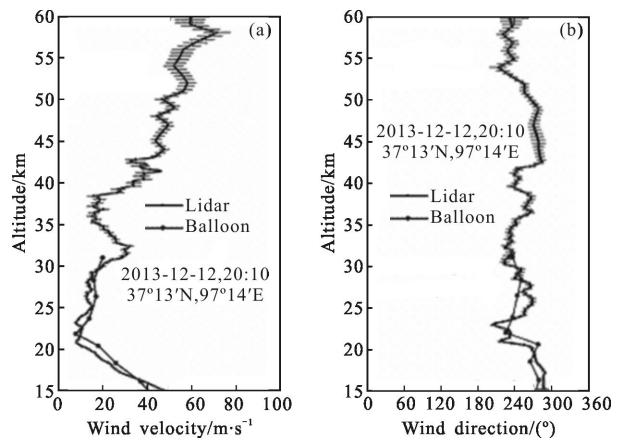


图 7 德令哈地区大气风场观测结果

Fig.7 Profiles of wind speed and direction measured by the Rayleigh Doppler lidar in Delingha

### 4 结论

该系统在激光发射机子系统的设计上,设计了种子光恒温箱,稳定了激光器频率及强度。发射接收光学子系统在设计上选用口径为 1 m 的卡塞格林反射式望远镜。接收机子系统设计三通道 F-P 标准具作为鉴频器,该 F-P 标准具是可调谐式标准具,设计锁定通道通过调整其腔长可对激光频率进行跟踪与锁定,起到了稳频作用。设计校准系统对标准具透过率函数进行了校准,经校准之后的接收机性能稳定,各参数测量标准差均小于 0.06,提高了风场探测精度。该系统在德令哈地区开展了观测实验,并得到了 15~60 km 风场数据,并与探空气球风场观测数据进

行了对比,一致性较好。对测量误差进行了计算,计算结果表明40 km以下,风速测量误差 $\leq 4$  m/s,风向测量误差 $\leq 6^\circ$ ,40 km以上,风速测量误差 $\leq 8$  m/s,风向测量误差 $\leq 18^\circ$ 。观测结果表明该系统设计合理,可以用来实时观测15~60 km大气风场。

#### 参考文献:

- [1] Baumgarten G. Twin Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km [J]. *Atmos Meas Tech Discuss*, 2010, 3: 2779–2803.
- [2] 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]. *Appl Opt*, 1999, 38: 2410–2421.
- [3] Gentry B, Chen H. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW) validation and performance [C]//21st International Laser Radar Conference, 2002, 4484: 74–81.
- [4] Xia Haiyun, Dou Xiankang, Sun Dongsong, et al. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system level optical frequency control method[J]. *Optics Express*, 2012, 20: 15286–153000.
- [5] Wang Guocheng, Dou Xiankang, Xia Haiyun, et al. Performance of a Rayleigh Doppler lidar for middle atmosphere wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2351–2357. (in Chinese)
- [6] Wang Jingjing, Shu Zhifeng, Dou Xiankang. Research of the frequency response function of the Rayleigh Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2364–2369. (in Chinese)  
王晶晶, 舒志峰, 窦贤康. 瑞利多普勒激光雷达频率响应函数的研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2364–2369.
- [7] Hu Dongdong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng. Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar receiver[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 369–374. (in Chinese)  
胡冬冬 孙东松 舒志峰. 瑞利测风激光雷达接收机校准[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 369–374.
- [8] Tang Lei, Wu Haibin, Sun Dongsong. Dynamic frequency tracking system for Doppler Lidar wind measurement based on Rayleigh scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1049–1053. (in Chinese)  
唐磊, 吴海滨, 孙东松. 瑞利散射多普勒测风激光雷达频率动态跟踪系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1049–1053.