

## 瑞利测风激光雷达夜间准零风层观测结果分析

胡冬冬,舒志峰,孙东松,张飞飞,窦贤康

(中国科学技术大学 地球和空间科学学院,安徽 合肥 230026)

**摘要:**一台用于观测对流层和平流层风场的车载瑞利测风激光雷达于安徽合肥建成,该雷达使用双边缘技术,设计探测高度 10~40 km,距离分辨率分别为 100 m(20 km 高度以下)和 500 m(20 km 高度以上)。在 2011 年夏季该雷达于新疆乌鲁木齐地区(42.1°N,87.1°E)进行了风场观测实验并成功观测到了平流层准零风层大气结构,给出了几组夜间典型的风场数据,根据观测结果得出:准零风层底部高度稳定在 17~18 km 高度而不随时间变化,而准零风层厚度则随时间有一个先增大后减小的趋势,并在北京时间凌晨 0 点~3 点期间达到最大值。在观测中出现的准零风层厚度最大值超过 15 km,最小值则仅有约 2~3 km。分析认为:准零风层厚度的变化与夜间平流层接收到的紫外线辐射强度变化有关,同一时刻不同纬度上的平流层接收的紫外线辐射强度变化程度不同,导致平流层温度梯度继而大气环流的速度发生变化,从而引起准零风层厚度变化。

**关键词:**大气光学; 测风激光雷达; 平流层; 准零风层

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0482-04

## Quasi-zero wind layer measured by rayleigh wind lidar at night

Hu Dongdong, Shu Zhifeng, Sun Dongsong, Zhang Feifei, Dou Xiankang

(School of Space and Earth Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In order to measure wind field of troposphere and stratosphere, a mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on Double-edge technology was developed in Hefei, China. The detection range of the lidar is designed to cover altitudes from 10 km to 40 km with height resolution of 100 m (below 20 km) and 500 m (above 20 km). In the summer of 2011, wind field measurements were carried out in Urumqi (42.1°N, 87.1°E), the stratospheric quasi-zero wind layer, where wind velocity is almost 0 m/s, was successfully observed. Some typical results of the wind field at night were given. The quasi-zero wind layer's bottom was found stabled at about 17–18 km height. However, the thickness of the quasi-zero wind layer would increase with time until about 0–3 a.m. Beijing time, gaining its maximum, and then decrease. The maximum thickness could be more than 15 km and minimum thickness just 2–3 km according to the author's measurements. This phenomenon could be a result of change of the ultraviolet radiation's intensity emitted to the stratosphere at night. The decrease and increase of the ultraviolet radiation's intensity were different at different latitude at the same time, and that would lead to a change

收稿日期:2014-06-05; 修订日期:2014-07-08

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

作者简介:胡冬冬(1987-),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:Bonn\_Wiggin@hotmail.com

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

of temperature gradient in the stratosphere, which was pointed from lower latitudes to higher latitudes. Then the temperature gradient passes the affection to the stratosphere circulation, which was part of the quasi-zero wind layer, and eventually leads to this regular increase-decrease change.

**Key words:** atmospheric optics; wind lidar; stratosphere; quasi-zero wind layer

## 0 引言

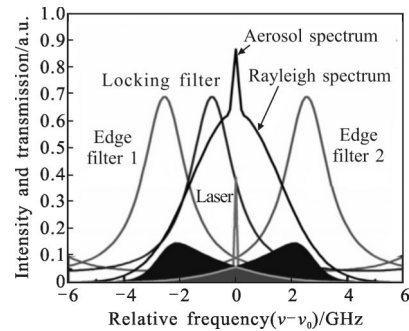
激光雷达测风作为一种典型的非接触式风场探测方式,因其较高的时空分辨率和较好的实时性,正逐渐成为全球风场观测的一种重要手段<sup>[1-2]</sup>。文中基于双边缘技术的车载可移动式多普勒测风激光雷达设计探测高度 10~40 km,覆盖对流层顶到平流层大气范围<sup>[3-5]</sup>。这一区域是大气上下层相互作用和日地关系中太阳活动天气气候响应的关键区域,因此对这一区域内风场的观测及数据积累对于大气科学研究具有重要意义<sup>[6]</sup>。该雷达在 2011 年夏季于新疆乌鲁木齐地区(42.1°N, 87.1°E)进行了长期的定点风场观测试验,成功观测到了 20 km 高度左右的准零风层大气结构<sup>[7]</sup>。文中选取了其中 3 天的典型风场观测数据对准零风层的夜间变化趋势进行了初步讨论和原因分析。

## 1 测量原理

该雷达采用双边缘技术提取大气回波信号中的多普勒频移信息。信号处理过程中使用一个三通道 Fabry-Perot(F-P)标准具作为鉴频器<sup>[8-9]</sup>,其中包含三个谱线形状相同但中心位置有固定偏差的滤波器,分别称为边缘滤波器 1、2 和锁定滤波器。由于高空气溶胶含量低,雷达系统观测主要依靠大气分子的后向散射信号。分子热运动导致分子后向散射谱很宽,两个边缘滤波器谱线分列于分子谱两侧。如图 1(a)所示。

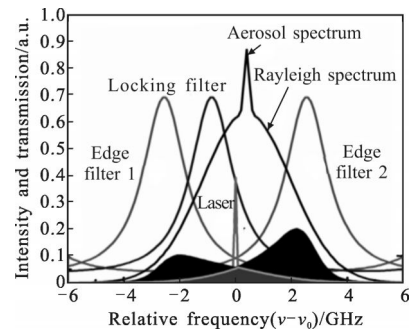
假定两边缘滤波器的输入光强相同且发射激光频率严格位于透过率的交点处,若大气后向散射信号并没有发生多普勒频移,则边缘滤波器 1 和边缘滤波器 2 输出光强相同,如图 1 中阴影部分面积;若风场导致大气后向散射信号产生了多普勒频移,则边缘滤波器 1 和边缘滤波器 2 输出光强一个增大,另一个减小,如图 1(b)所示。通过测量两个边缘通道信号的相对差别就可以确定风速的大小和方向。

系统出射激光分出一部分参考光进入锁定通道,用来锁定发射激光频率的相对位置以使标准具实时跟踪激光频率,以保证不会将出射激光频率的偏移误作为多普勒频移。



(a) 无多普勒频移

(a) Zero Doppler



(b) 有多普勒频移

(b) Action Doppler

图 1 瑞利测风激光雷达基本原理

Fig.1 Principle of mobile Rayleigh Doppler wind lidar

## 2 雷达系统结构

雷达探测指标见表 1,整个雷达系统主要由四个部分组成:发射部分、接收部分、收发光学部分和控制部分。

发射部分包括一台工作波长 355 nm 的种子注入式 Nd:YAG 脉冲激光器和光学扩束导光系统。

收发光学部分是一台有效通光孔径 450 mm 的折返式卡塞格林望远镜。

控制部分主要包括一台工业控制用计算机和用

于信号采集的数据采集卡等,用于系统各器件的协调工作以及数据的采集和实时分析处理。

接收部分主要包括光学鉴频器、探测器、滤光片和各种用于构建空间光路的机械结构,使用光学鉴频器对大气回波信号、参考光按照双边缘技术的原理进行处理,并用探测器将处理后的光信号转化为电信号并传输给控制部分。

表 1 瑞利测风激光雷达系统参数

**Tab.1 Parameters of the mobile Rayleigh Doppler wind lidar**

Parameter	Value
Height range/km	10-40
Range of LOS velocity/m·s <sup>-1</sup>	±100
Vertical resolution	100 m@10 km, 500 m@<40 km
Temporal resolution	30 min/Profile(>10 km)
Measurement accuracy	3 m/s@10 km, 6 m/s@40 km
Scan range	360°(Horizontal)×90°(Vertical)

Notice: "LOS" is short for Line-of-Sight

### 3 准零风层观测

平流层准零风层(Quasi-Zero Wind Layer, QWZL)一般指平流层下层 20 km 高度附近的大气层,这里的大气风场环境特性表现为:上下纬向风风向相反,同时南北风分量很小<sup>[10]</sup>。准零风层的研究对于临近空间应用具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。

文中采用大气环流基本理论来对观测到的准零风层现象进行解释和分析。首先引入对数压力系下的垂直坐标:

$$z = -H \ln(p/p_s) \quad (1)$$

式中: $z$  为对数压力高度;高度  $H=RT_s/g_0$ ,其中  $R$  为干空气比气体常数, $T_s$  为全球平均参考温度, $g_0$  为重力加速度; $p$  和  $p_s$  分别为气压和参考气压。

热成风方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_g}{\partial z} = -\frac{R}{fH} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (2)$$

式中: $\bar{u}_g$  为平均地转纬向风; $f$  为科里奥利参数; $\bar{T}$  为两层大气间的平均温度。

对于乌鲁木齐地区(42.1°N, 87.1°E)而言,在对流层,平均温度梯度始终由高纬指向地纬,对流层大气环流以西风为主。而平流层,由于其大气温度影响主要来源于臭氧对紫外线的吸收增温,夏季时平均温度梯度由低纬指向高纬,也即以东风环流为主。因

此在夏季时,大气中存在低层为西风、高层为东风的准零风层大气结构。

从图 2 中可以看到,准零风层高度上下风向的显著变化,而且两者之间的分界线清晰、稳定,风向的分界线高度就是准零风层的起始高度。

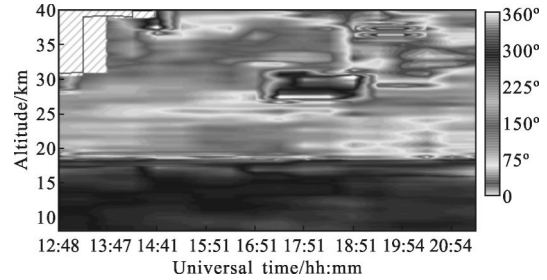
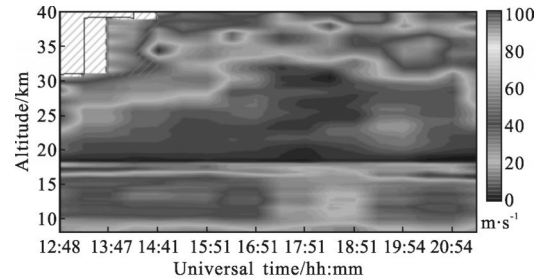


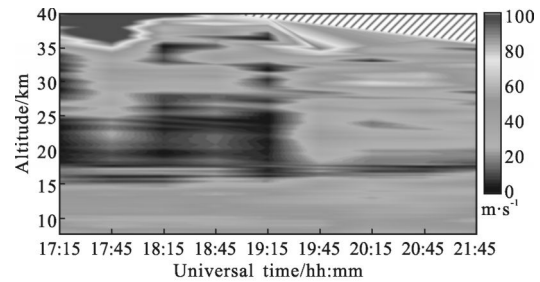
图 2 典型的准零风层风场风向图(2011-08-22)

Fig.2 Typical wind direction of The Quasi-Zero wind layer (August 22, 2011)

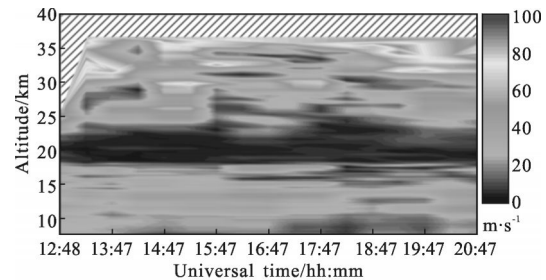
图 3 给出了激光雷达于 2011-08-22T12:48~21:31, 2011-09-08T17:15~21:45 以及 2011-09-28T12:47~20:47 的三组典型观测结果。



(a) 2011-08-22



(b) 2011-09-08



(c) 2011-09-28

图 3 准零风层连续观测风速图

Fig.3 Wind speed of the quasi-zero wind layer

从图3中可以明显地看到:自18 km向上的一段大气风速接近0 m/s,即为准零风层,准零风层的底部稳定在18 km高度,而没有固定的顶部高度。

在夜间,准零风层厚度(也即顶部高度)随时间变化呈现增加、稳定、减小的趋势,在16~19时期间(北京时间0~3时)稳定在当天的较大值附近。

根据观测结果来看,这种准零风层厚度最大值与最小值之间的转变变化可能在不足30 min内完成,如图3(b)中准零风层厚度减小的过程,也有可能缓慢的持续3~4 h,如图3(a)准零风层厚度增加的过程,更加规律性的结论还需要进一步的大量观测数据进行统计。在几组典型的实验结果中,观测到的准零风层厚度最大值超过15 km,最小值则仅有约2~3 km。

考虑到平流层东风的成因,认为这种现象的出现是由于平流层温度梯度的变化导致的。

平流层温度主要取决于平流层内紫外线对太阳辐射的吸收,入夜后平流层接收到的紫外线辐射减少,导致温度下降,而太阳在不同纬度上的指向不同,导致这种温度下降幅度不同,平流层中低纬指向高纬的温度梯度减弱,根据热成风原理,平流层东风减弱,从而表现为准零风层的厚度增大。之后的厚度减小则是相反的温度梯度恢复过程体现。

## 4 结论

一台基于双边缘直接探测技术的瑞利多普勒测风激光雷达在2011年夏季于新疆乌鲁木齐地区(42.1°N, 87.1°E)进行了风场观测,成功观测到了平流层准零风层的大气结构,并给出了三组典型的风场观测数据。

依靠测风激光雷达的高时空分辨率得以获得准零风层在夜间的变化趋势,发现准零风层底部高度稳定在18 km,厚度在夜间随时间变化,呈现增大、稳定、减小的变化过程,考察现有的观测结果:厚度最大值约为15 km,最小值则仅有约2~3 km。厚度最大值与最小值之间的转变变化可能在不足30 min内完成,也有可能缓慢地持续3~4 h。笔者认为这种变化趋势与平流层接收的紫外线辐射量变化相关,入夜之后平流层吸收的紫外线辐射减少,而且减少量与纬度相关,导致平流层温度梯度(由低纬指向高纬)变小,大气环流速度减小,从而表现为准零风层的厚度增大。而之后的厚度减小则是相反的恢复过程。

文中对激光雷达测得的高时空分辨率准零风层

夜间观测数据进行了分析,并讨论了其变化的一些初步规律性。激光雷达的特性为中高层大气科学实验、平流层飞行器实验等研究活动提供了高时空分辨率的风场观测数据,未来进一步的观测数据也将帮助研究人员更好地分析平流层准零风层结构的更多、更精确的规律性特征。

## 参考文献:

- [1] Freeman F H, Milton H R, Michael H R, et al. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(15): 2503-2506.
- [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]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2410-2421.
- [3] Shu Zhifeng, Dou Xiankang, Xia Haiyun, 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.
- [4] Shu Zhifeng, Xu Wenjing, Tang Lei, et al. Development of wind lidar based on Rayleigh scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2153-2157.
- [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.
- [6] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. LIDAR - measured winds from space: a key component for weather and climate prediction [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1995, 76(6): 869-888.
- [7] 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(14): 15286-15300.
- [8] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, et al. Application of triple Fabry-Perot etalon for Rayleigh wind lidar [J] *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1474-1480. (in Chinese)
- [9] Hu Dongdong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, et al. Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar receiver [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 369-374. (in Chinese)
- [10] Lv Daren, Sun Baolai, Li Liquan. Zero wind layer and the first dwell experiment of high-altitude balloon in China[J]. *Target Environment Feat*, 2002, 1: 45-51.
- [11] Xiao Cunying, Hu Xiong, Gong Jiancun, et al. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer over China[J]. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(3): 230-235. (in Chinese)
- [12] Tao Mengchu, He Jinhai, Liu Yi. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer and the effect of the quasi-biennial oscillation on it [J]. *Climate and Environmental Research*, 2012, 17(1): 92-102. (in Chinese)