

基于瑞利多普勒激光雷达数据的重力波测量与分析

陈 冲¹, 孙东松¹, 陈廷娣¹, 韩於利¹, 赵若灿¹, 周安然², 王国成², 唐 磊³

(1. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国人民解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031; 3. 合肥师范学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 对于平流层的高空间分辨率的重力波连续测量和研究非常稀少。近几年中国科学技术大学的瑞利多普勒激光雷达观测了大量的重力波事件, 这得益于激光雷达系统在重力波研究中的优越特性。文中对激光雷达系统作出了一个简单的介绍, 并且展示了位于中国酒泉(39.741°N, 98.495°E), 垂直高度范围在 15~60 km, 自 2015 年 10 月 7 日起持续了两个月的重力波夜间观测结果。在对一些重力波事件分析过程中, 对中尺度的水平风速进行了二维波谱分析之后, 发现重力波波动非常明显, 这些波动的波长范围主要集中在 3~6 km, 而周期大约为 10 h。这些观测结果都肯定了瑞利多普勒激光雷达在重力波观测应用方面的优势。

关键词: 瑞利多普勒雷达; 风场测量; 重力波; 风速扰动分析

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0930002

Gravity waves measurement and analysis based on a Rayleigh Doppler lidar

Chen Chong¹, Sun Dongsong¹, Chen Tingdi¹, Han Yuli¹, Zhao Ruocan², Zhou Anran²,
Wang Guocheng², Tang Lei³

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

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

3. Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

Abstract: Simultaneous wind measurements in stratosphere with high-spatial resolution for gravity waves study are scarce. In recent years, lots of gravity waves cases were observed by mobile Rayleigh Doppler lidar of University of Science and Technology of China benefiting from the system with excellent performance. In this paper, a brief introduction of the Rayleigh Doppler lidar system was made. The wind field gravity waves cases in the altitude region 15–60 km were also performed, which were carried out for 2 months started from October 7th, 2015 in Jiuquan (39.741°N, 98.495°E), China. After the 2-D fast Fourier transform of those mesoscale fluctuations of the horizontal wind velocity, the two dimensional spectra analysis and band-pass filter results of these fluctuations exhibited the presence of dominant oscillatory modes with wavelength of 4–15 km and period of around 10 hours in several cases. The observed cases demonstrate the Rayleigh Doppler lidar's capacity in measuring and studying gravity waves.

Key words: Rayleigh Doppler lidar; wind measurements; gravity waves; wind perturbation analysis

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(41774193)

作者简介: 陈冲(1994-), 男, 硕士生, 主要从事测风激光雷达及光电探测方面的研究。Email: cchan@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测、激光雷达遥感等方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

0 引言

相较于以往对于 10~60 km 范围内的测风手段,例如气象气球,大气探测火箭,激光雷达有着很大的优势。测风激光雷达可以在对于中高层大气风速长时间的连续观测,能够得到较高空间分辨率的风速变化。这样,就可以通过风速数据分析过滤出大量有效的重力波的信息。这对于重力波的研究帮助巨大,并且迄今为止,世界上针对此高度上有如此高分辨率的重力波观测非常之少。对于温度以及风速的联立测量只有 ALOMAR 研究站研发的瑞利/米/拉曼雷达有进行过^[1],他们的测量高度达到了 80 km 以上。除此之外,GLOW(the Goddard Lidar Observation for Winds)使用波长为 355 nm 的 Nd:YAG 激光器通过三倍频实现了车载多普勒激光雷达,他们使用了和文中使用的雷达系统相同的双边缘法布里珀罗标准具鉴频技术,并为 NASA 的 Goddard Space Flight Center 进行中层大气的测量^[2]。经过不断的发展,激光雷达成为了一种实用的中层大气探测方式,而重力波是中高层大气中最普遍、最重要的中小尺度扰动。它是稳定层结大气中重力和垂直惯性力作用下产生的波动,虽然重力波对于大尺度天气现象没有太大的影响,可是在中小尺度的天气变化中,重力波是一种非常重要的能量和动量传输过程的机制,并且可以触发中尺度的系统发生。因此研究重力波对于观察大气动力学结构,解决中高层大气动力学研究中的问题,认识天气现象形成原因以及发展过程都有很重要的意义。

1 雷达系统简介

中国科学技术大学的车载瑞利多普勒激光雷达系统向大气射出激光,并收集因为瑞利散射而返回的后向散射光,然后通过三通道法布里珀罗标准具去检测瑞利散射光产生的后向散射频移,最后根据光的多普勒效应反演出风速的变化。值得一提的是相较于单边缘鉴频器,此系统中的双边缘法布里珀罗标准具鉴频器将有更高的精准度^[3],如图 1 所示,其中两个通道产生鉴频用的透过率曲线,而第三个通道作为锁定通道,锁定在前两个的通道透过率曲线的交点处,以检测双边缘通道透过率曲线的变化。

当激光发射到大气当中,后向散射光携带信息回到激光雷达处被收集起来。由于光的多普勒效应,散射光相较于发射的激光会有一段频移,双边缘 FPI 能够通过鉴别光强变化得到对应两端透过率曲线边缘上频率的变化。通过双边缘 FPI 并且系统会在每一分钟不断移动法布里珀罗标准具与激光频率漂移,以此让出射激光频率始终精准锁定在 1.8 MHz 也即 355 nm 波长处。此系统最终只有 0.32 m/s 的固有径向风速标准差。

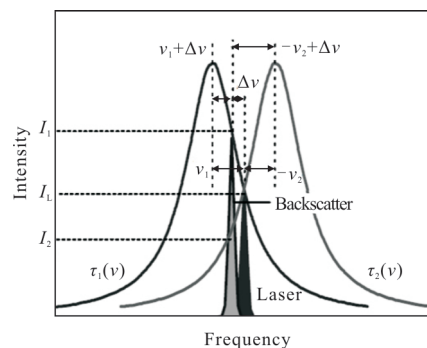


图 1 双边缘 F-P 标准具透过率曲线示意图

Fig.1 Double-edge FPI transmittance curve

车载测风雷达由两个子系统组成,每个子系统独立测量,每个系统中有一个 1 m 口径的望远镜倾斜 30°,接收到同样以此角度发射出去的激光所产生的散射信号。这样就可以测量大气某个高度水平风速的两个方向的成分。

2015 年酒泉测量时系统测量的示意图如图 2 所示。通过多普勒频移的原理可以反演出 X, Y 的径向风速,由于倾角为 30°,水平风速即为径向风速的两倍。图中 X 方向正东逆时针旋转 45°方向,而与此对应 Y 方向为从正南方向逆时针旋转 45°方向。后面在分析重力波参数时将会直接使用 X 方向和 Y 方向的水平风速数据,而不使用经过速度合成后得到的径向风速和纬向风速。这是因为两个字系统互相独立测量,不可避免有微小的时间测量延迟,这个误差将会造成重力波相位产生移动,使用 X, Y 方向水平风速来分析重力波可以避免两个系统风速矢量合成产生的误差。测量风速后得到的风速时间分辨率为 15 min,垂直高度分辨率为 0.2 km(40 km 高度以下)以及 1 km(40 km 以上)。40 km 以下时通过原始的光子计数数据反演出 0.2 km 分辨率的风速分布,而 40 km 以上时,通过线性插值的方法得到同样分辨率的风

速分布轮廓。需要注意的是,反演风速时,选取的光子计数点数据对应的最大高度为信噪比高于 17 的高度,当信噪比低于 17 时,高于此高度的数据因为噪声太大而截止。在 2015 年冬季酒泉,当云层以及气溶胶非常少的洁净夜晚,满足信噪比低于 17 的对应高度可以达到 75 km 以上。这个测量范围基本已经涵盖了重力波出现的高度范围。

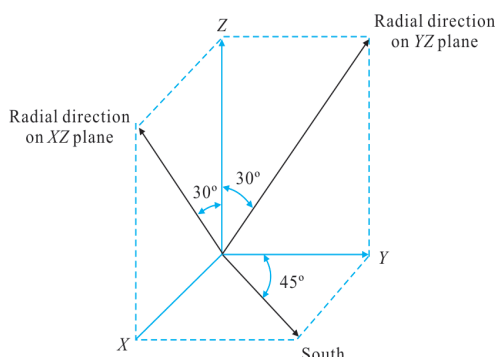


图 2 系统出射光方向示意图

Fig.2 Schematic view of the lidar's two lines of sight

2 水平风速反演以及重力波分析

图 3 所示为酒泉 15~70 km 的水平风速测量结果,两幅图分别是 X 方向与 Y 方向的水平风速。由于测量过程都是在晚上进行 (6:00 pm~7:00 am), 以此图中的横向的间断表示白天的间隔, 而夜间的测量是以 15 min 的分辨率画在图上, 同时高度达到一定程度后由于信噪比不够而被舍弃, 然而的大多数数据都能达到较为满意的高度。测量是 2015 年 10 月 6 日~11 月 16 日的夜间持续的观测, 与此同时, 当地气象站在同样的位置也会每天进行两次高空的大气无线电探测, 笔者的连续观测与之有比较好的符合^[4]。

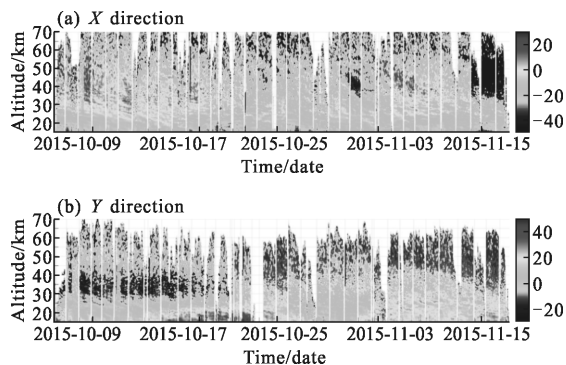


图 3 2015 年酒泉 10 月~11 月 X, Y 方向水平风速图

Fig.3 Horizontal wind map in Jiuquan from October to November, 2015

在测量到大气风场分布之后,为了进一步提取出重力波的信息,需要对风速进行一定的处理,这样才能更加清晰看出波动的特征。第一步往往是需要求出背景的风速,并将风速中的背景去除掉,从而得到扰动。最常用求取背景的方法就是将某一段高度范围内的风速求平均,以此来作为背景风速。由于在中高层大气 15 km 以上的范围内背景风速往往比较稳定,将高度分为许多小段,并对每一段数据求平均以得到背景风速的方法有一定的效果,然而选取多长的高度范围进行平均将会对于结果产生过大的影响,这不利于风速扰动的提取^[5]。由于风速在垂直高度上的变化比温度更加复杂^[6],不同于提取温度扰动的时候使用的三阶多项式拟合,这里采用四阶多项式拟合的方法,这样能够更加贴切地得到背景风速。

图 4 展示了 2015 年 10 月 9 日晚酒泉所测得的风速数据结果, 该风速数据为 Y 方向的水平风速。图(a)中点曲线为所测得风速,该风速是 30 min 的风速平均。平均风速经过和无线电探测的结果比较,发现两者差距小于 3 m/s。曲线为利用四阶多项式拟合对平均风速拟合求得的背景风速。图(b)为原来的风

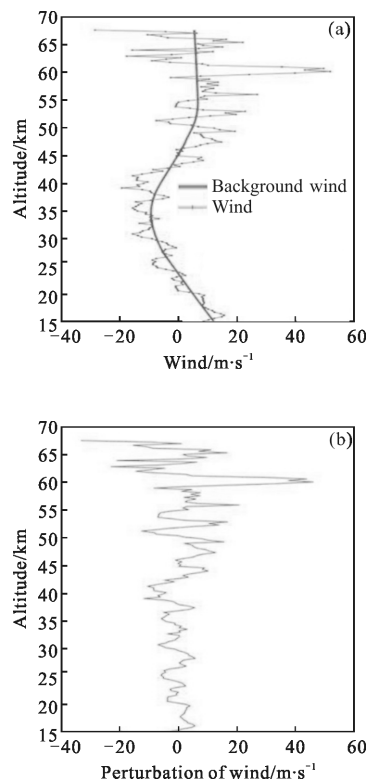


图 4 Y 方向水平风速以及风速扰动

Fig.4 Horizontal wind and perturbation in Y direction

速去除背景风速之后的扰动风速图。在图中可以看见风速的扰动随着高度的提高而不断提高, 这样的结果很符合向上传播的重力波振幅约为 $H=2H_p$ 的规律^[7], 其中 H_p 为大约 7 km 的压强标高。进一步地, 为了提取出更多的重力波特征, 将对风速扰动进行傅里叶变换, 观察其在频域上的轮廓。

图 5 即为 10 月 26 日晚 20:00 至第二天早晨 7:45 的风速扰动的二维傅里叶变换频域图, 除去特别低频的背景部分, 重力波垂直波数主要分布在 $0.20\sim 0.25\text{ km}^{-1}$ 的范围中, 对应的波长为 4~5.5 km 内。并且在频域上, 波的频率分布主要在正象限内, 这就表明波的相速度是朝下的, 这与在低层大气产生, 携带能量向上传播, 也即重力波向上的群速度方向相反。

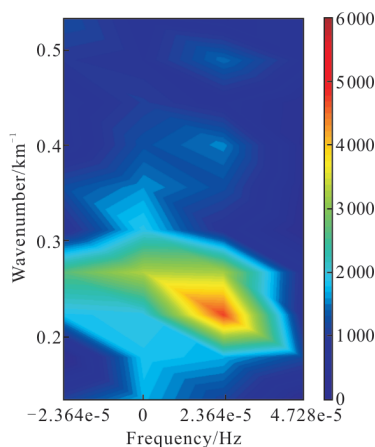


图 5 风速扰动二维傅里叶频域图

Fig.5 2D FFT frequency spectra of perturbation

图 6 为 Y 方向的水平风速扰动, 其中图 6(b) 为经过滤波之前的水平风速扰动, 虽然可以大致看出重力波波形的轮廓, 但是还需要进一步处理。经过在二维傅里叶转换得到的频谱图上观察后, 选择滤掉波长范围 1.6 km 以下 10 km 以上的其他成分。再将剩余的波动成分反傅里叶变换得到另一张风速扰动 (如图 6(a) 所示)。这时候重力波的轮廓已经非常明显了, 可以看见, 在垂直方向上重力波的波长 3~6 km 不等。并且在低于 25 km 的高度中, 重力波的垂直方向波长比 25 km 以上更小, 它的垂直波长似乎有随着高度上升而变大的趋势。除此之外重力波有一个非常明显的向下的相速度, 随着高度提高, 重力波的波形在时域上更加倾斜, 这就说明重力波的频率随

着高度升高在不断变大。对比滤波之前的风速扰动图, 当到达 40 km 的高度处, 重力波的波形逐渐不再清晰, 有趋于破碎的态势。这里产生这种结果的原因, 可能是从 40 km 往上出现了其他波动模式的轮廓, 其他波动和重力波的波形叠加, 产生了这种破碎的效果^[8]。然而对于背景风速的计算方法存在一定的缺陷, 由此带来的误差也对于 40 km 以上出现的这种现象有一些影响。

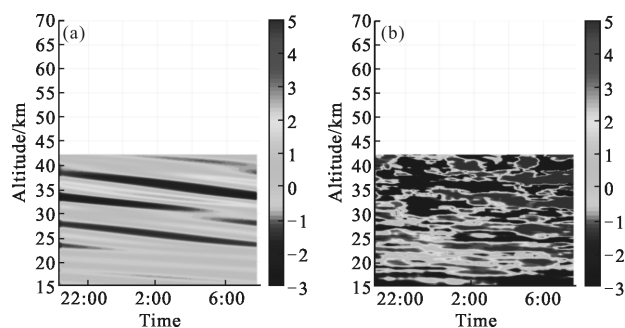


图 6 Y 方向水平风速扰动分布图

Fig.6 Wind perturbation map in Y direction

3 结论

文中简单介绍了基于双边缘鉴频技术的瑞利多普勒激光雷达系统, 并介绍了在双通道的技术基础上使用第三通道锁频的系统设计。随后展示使用瑞利多普勒雷达观测到的重力波事件。此次观测的高度主要在 15~60 km, 拥有很高的时空分辨率 (时间分辨率为 30 min, 高度分辨率为 40 km 下 0.2 km, 40 km 以上 1 km)。在经过二维傅里叶变换之后, 看出重力波垂直波长主要在 4~5.5 km 的范围内, 周期为 10 h, 并且有一个向下的相速度。随着高度的升高, 重力波的频率不断升高, 这表明了在更高的高度上, 大气之中低频阻尼变大了。通过这些分析又一次说明了瑞利多普勒激光雷达在观测重力波中的巨大作用。

参考文献:

[1] 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]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 1996, 58(16): 1827-1842.
 [2] Flesia C, Korb C L. Theory of the double-edge molecular

- technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 432–440.
- [3] Dou X, Han Y, Sun D, et al. Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (S5): A1203.
- [4] Alexander S P, Klekociuk A R, Murphy D J. Rayleigh lidar observations of gravity wave activity in the winter upper stratosphere and lower mesosphere above Davis, Antarctica (69 S, 78 E)[J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2011, 116 (D13): D13109.
- [5] Zhao R, Dou X, Sun D, et al. Gravity waves observation of wind field in stratosphere based on a Rayleigh Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): A581.
- [6] Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. *Rev Geophys*, 2003, 41 (1): 1003.
- [7] Gentry B M, Chen H, Li S X. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(17): 1231–1233.
- [8] Forbes J M. Tidal and planetary waves, in the upper mesosphere and lower thermosphere: a review of experiment and theory [J]. *AGU Geophysical Monographs*, 1995, 87: 67–87.