

# 利用落球探测资料分析临近空间大气重力波

盛峥<sup>1</sup>, 周树道<sup>1</sup>, 葛魏<sup>1</sup>, 卫克晶<sup>1</sup>, 应央涛<sup>2</sup>

(1.国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211101; 2.中国人民解放军 91867 部队, 浙江 宁波 320000)

**摘要:** **目的** 探究利用落球探测数据分析临近空间大气重力波特征的优势。**方法** 基于中国首次进行的火箭落球实验过程中, 雷达跟踪获得的落球位置信息, 计算得到大气水平风场廓线, 并利用最大熵法提取重力波参数。与此同时, 基于 TIMED/SABER 卫星在对应时间以及位置上探测得到的温度廓线, 利用最大熵法和 S 变换方法同样获得相应的重力波参数。针对两种方法获得的重力波参数进行对比分析。**结果** 利用最大熵法对火箭探测得到的水平风场扰动廓线和卫星探测得到的温度扰动廓线进行分析, 发现纬向风场中的主导重力波的垂直波长约为 4 km 左右, 而经向风场主导重力波的波长集中在 6.5 km 左右, 由温度扰动廓线提取出的主导重力波垂直波长集中在 12 km 左右。利用 S 变换再次对卫星探测得到的温度扰动廓线进行分析, 重力波垂直波长仍集中于 10~12 km 左右。这表明从风场廓线和温度廓线中提取出的重力波垂直波长的差异主要是由于卫星探测数据的分辨率不足产生的。**结论** 相比较卫星探测的温度廓线, 火箭探测得到的风场廓线数据对重力波的分辨率更高, 能够分辨出垂直波长更小的精细结构, 具有重要的精度优势。

**关键词:** 临近空间; 落球探测; 重力波; 垂直波长

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.004

**中图分类号:** X823 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)06-0021-04

## Gravity Wave in Near Space by Falling-sphere Detection

SHENG Zheng<sup>1</sup>, ZHOU Shu-dao<sup>1</sup>, GE Wei<sup>1</sup>, WEI Ke-jing<sup>1</sup>, YING Yang-tao<sup>2</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

2. Unit 91867, PLA, Ningbo 320000, China)

**ABSTRACT: Objective** To research the strength of falling-sphere detection to gravity wave in the near space. **Methods** The maximum entropy method was used to extract vertical wavelength of dominant gravity wave based on the horizontal winds profiles calculated with the falling sphere position information obtained through radar tracking during the first falling-sphere experiment in China. Meanwhile, the maximum entropy method and S transform were also used to obtain the corresponding gravity wave parameters based on temperature profile measured at the corresponding time and position by the TIMED/SABER satellite. The gravity wave parameters obtained through two methods were compared. **Results** The wind field disturbance profile and the temperature disturbance profile were analyzed with the maximum entropy. It was found that the vertical wavelength of main gravity wave was about 4 km (zonal wind) 6.5 km (meridional wind) and 12 km (temp) respectively. The vertical wavelength obtained by S-transform from temp profile was concentrated at 10-12 km. It meant that the different gravity wave of wind field profile and temperature profile was mainly caused by insufficient resolution of satellite detection data. **Conclusion** Compared with the temperature profile, the wind field profile data detected rocket has more resolution ratio of gravity wave. It could rec-

收稿日期: 2018-12-28; 修订日期: 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41775039, 41875045)

作者简介: 盛峥 (1983—), 男, 江西南昌人, 博士, 副教授, 主要研究方向为临近空间大气环境。

通讯作者: 葛魏 (1995—), 男, 江苏灌云人, 硕士研究生, 主要研究方向为空间气象学。

ognize smaller and finer structure of vertical wavelength. The rocket falling-sphere detection is more precise.

**KEY WORDS:** near space; falling-sphere detection; gravity wave; vertical wavelength

临近空间是由美军提出的位于大气层约十几至一百公里高度之间的区域,主要包括平流层、中间层以及低热层<sup>[1]</sup>。临近空间的特殊性在于其位于现有航空器飞行的最高高度与航天器运行的最低高度之间。这一高度范围具有重大的军事意义,尤其是平流层及中间层低层区域作为无人机、飞艇、浮空器等对地观测、通信中继等平台运行的区域,已经成为世界军事强国必争的战略要地。与传统航空和航天技术相比,临近空间飞行器具有安全性高、生存能力强、部署快,同时还具有极高的军事侦察和对地攻击的精度以及大覆盖范围的良好性能。为保障临近空间飞行器能够充分发挥作战效能,开展对临近空间大气环境的全面研究必不可缺。

早期针对临近空间大气环境的探测受限于技术手段的单一和精度的不足,效果并不令人满意。近年来,雷达、卫星以及火箭探测手段的不断发展,为研究临近空间大气环境提供了很好的支撑。其中,探空火箭是对临近空间大气环境就位探测的唯一手段,具有不可替代的作用<sup>[2]</sup>。

目前,探空火箭探测技术最为成熟,运用最为广泛的两种方法分别是热敏电阻测量和膨胀落球法。前者受其探测原理的限制,超过 60 km 后误差急剧上升;膨胀落球法原理简单、使用广、成本相对较低,具有相当重要的应用价值。膨胀落球可分为主动落球和被动落球,主动落球自身携带传感器,而被动落球则通过定位系统测量自身位置,计算大气参数。国内开展的落球实验始于 1971 年,期间未取得有效数据,研究趋于停滞。近年来,随着临近空间大气探测需求的显著提升,膨胀落球探测技术重新得到关注。

临近空间大气环境中存在多种值得关注的大气要素。其中,重力波作为中高层大气频繁发生、最重要的动力学过程之一,发挥着不可忽视的作用。研究重力波的产生、传输以及破碎过程,能够解释中高层大气参量的起伏变化,说明某些暂态现象的物理原因<sup>[3]</sup>。全面深入地了解重力波,对建立一个实用的临近空间环境扰动预报模型,开展航天活动等都能提供可靠的保障。总而言之,研究重力波既是当今中高层大气科学的重要目标,也是提升业务保障能力的必然要求。

研究人员已经利用各种数据对重力波开展了定量的研究<sup>[4]</sup>,包括 TIMED/SABER、COSMIC 卫星数据<sup>[5-6]</sup>等。Fritts 在其综述性文章中总结了重力波探测的手段,包括卫星遥感探测、探空仪探测、火箭探测、激光雷达探测、中频 MST 雷达探测以及飞行器探测等。其各自优势以及不足见表 1。利用这些数据提取重力波信号的方法也多种多样,但都存在特定的局限<sup>[7]</sup>,

需要结合具体的研究问题加以研究。

表 1 几种重力波探测的手段的优劣性

|           | 优势  | 缺点                    |
|-----------|---|-----------------------|
| 卫星遥感探测    | 覆盖全球尺度,可以研究重力波分布及变化                         | 对于小尺度,短周期的重力波观测能力弱    |
| 探空仪探测     | 分辨率高,可以探测小尺度重力波                             | 高度范围限制在低平流层以内,约 25 km |
| 火箭探测      | 探测高度高,热敏电阻式传感器可达 60 km 高度,落球式可达 100 km,分辨率高 | 费用较高,局限于单点探测          |
| 激光雷达探测    | 分辨率高  | 单点探测,只能进行夜间探测         |
| 中频 MST 雷达 | 可以进行连续探测                                    | 单点探测,只能进行固定高度层次的探测    |
| 飞行器探测     | 可以测量重力波水平波长以及动量通量                           | 观测持续时间长、费用高           |

在前人的研究基础之上,文中基于我国首次成功进行的临近空间膨胀落球探测获取的水平风场廓线和 TIMED/SABER 卫星在对应时空范围内探测得到的温度廓线,利用最大熵法提取重力波垂直波长参数,同时针对温度廓线利用 S 变换方法同样提取重力波垂直波长,对两种结果进行对比。介绍了所使用数据以及分析方法的详细情况,展示了利用这两种方法分析的重力波垂直波长分布。

## 1 数据及方法

我国首次成功进行的被动落球探测实验位于西北地区,时间为 2017 年 1 月。实验直接得到的数据为雷达跟踪落球所获得的位置信息,通过位置信息计算风场廓线的步骤参见文献[8-9],最终得到 30~100 km 高度范围内大气的纬向、经向风场廓线。

TIMED 卫星于 2001 年 12 月升空,其轨道高度约为 625 km,倾角为 74.1°。TIMED 卫星覆盖范围为一个半球的 52°至另一半球的 83°,每 60 天主副半球翻转。同时每天在经度上前进 3°,约 60 天可以覆盖 24 h 局地时。搭载在 TIMED 卫星上的 SABER 载荷通过探测 CO<sub>2</sub> 在 15 μm 以及 4.3 μm 的红外临边辐射,结合非局地热力平衡效应算法,反演获得高达 120 km 范围内的温度数据。

### 1.1 最大熵法提取重力波参数

利用最大熵法从风场廓线中提取重力波。最大熵法的基本思想在于除了所分析的有限数据外,不作其

他确定性的假设，而是以信息熵最大为前提，计算每个频率  $\omega$  对应的自回归谱密度  $P(\omega)$ ：

$$P(\omega) = \frac{\delta_\omega^2}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}|^2} \quad (1)$$

式中： $a_k$ 、 $\delta_\omega$  分别为  $p$  阶 AR 自回归模型系数的最小均方差。

相较经典的谱分析方法（如快速傅里叶变换、周期图等），最大熵法具有高分辨率和短时性的特点，这与落球探测得到的风场廓线的数据特性一致。

### 1.2 利用 S 变换提取重力波参数

S 变换是由美国地球物理学家 Stockwell 提出的一种时频分析的工具<sup>[10]</sup>。其既与傅里叶变换和小波变换有着密切联系，又有其自身特点。傅里叶变换只能作用于收敛信号，短时傅里叶变换的窗函数不可变；小波变换虽然能够改变窗函数，进行多分辨率分析，但基函数的选取比较困难。S 变换介于两者之间，结合了两种方法的优势，可以自适应地调节分辨率，并且其逆变换无损可逆。S 变换的定义为：

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

式中： $\tau$  为时间，控制窗口函数在时间轴上的位置； $h(t)$  为要分析的信号； $f$  为频率； $S(\tau, f)$  为变换得到的频谱矩阵。

数据分析的步骤如下：

1) 针对水平风场廓线，利用二阶多项式拟合得到背景风场，原风场廓线与背景风场的差值认为是扰动风场廓线，如图 1 和 2 所示。

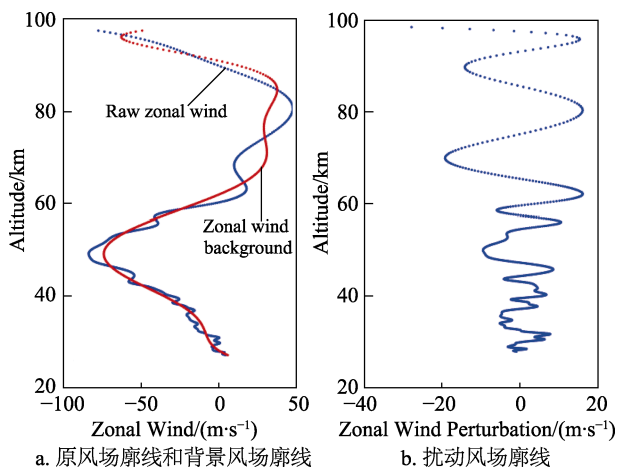


图 1 纬向风场廓线

2) 针对温度廓线，利用低通滤波（20 km 以下）得到背景温度廓线，二者之间差值认为是扰动温度廓线，如图 3 所示。

3) 针对风场扰动廓线以及温度扰动廓线分别进行最大熵谱分析。

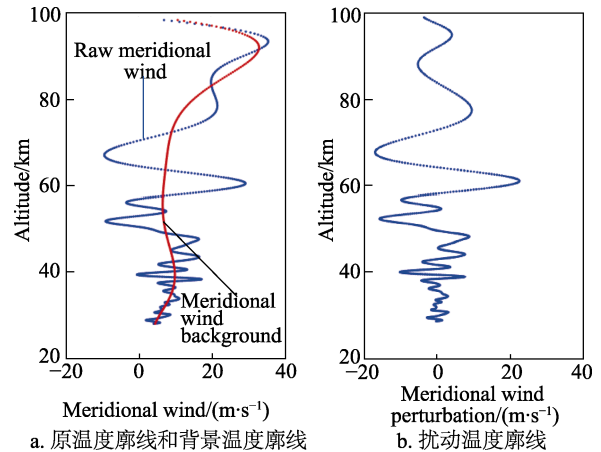


图 2 经向风场廓线

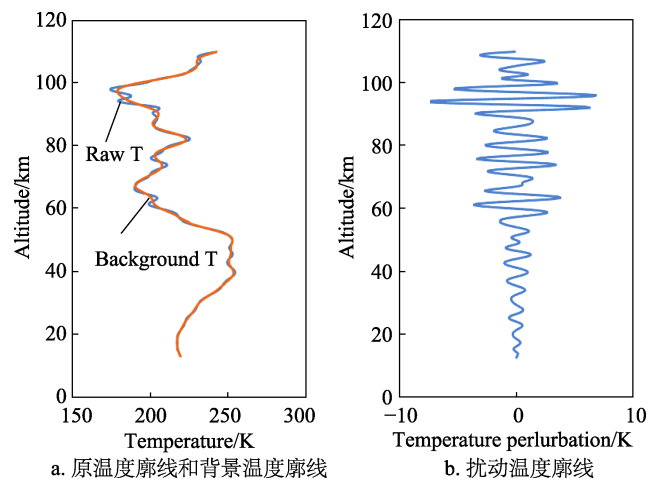


图 3 温度廓线

4) 火箭探测得到的风场数据中，由于落球下落的速度始终变化，导致计算得到的风场数据高度分布并不均匀，因此仅针对扰动温度廓线利用 S 变换提取重力波垂直波长。

## 2 结果及分析

### 2.1 重力波垂直波长

利用最大熵法提取水平风场廓线和温度廓线中的重力波功率-频率谱分布如图 4 所示。利用最大熵法对风场廓线进行分析，其中，纬向风场的主导重力波垂直波长集中在 4 km 左右；经向风场的主导重力波波长集中在 6.5 km 左右。由温度扰动廓线提取出的主导重力波垂直波长集中在 12 km 左右。这样的差异主要是由于卫星探测的温度数据分辨率限制产生的。为验证这一想法，针对温度扰动廓线利用 S 变换方法提取重力波垂直波长。

### 2.2 重力波振幅-波长分布

利用 S 变换提取温度扰动廓线中的重力波垂直波长分布如图 5 所示。从图 4 c 以及图 5 可以看出，

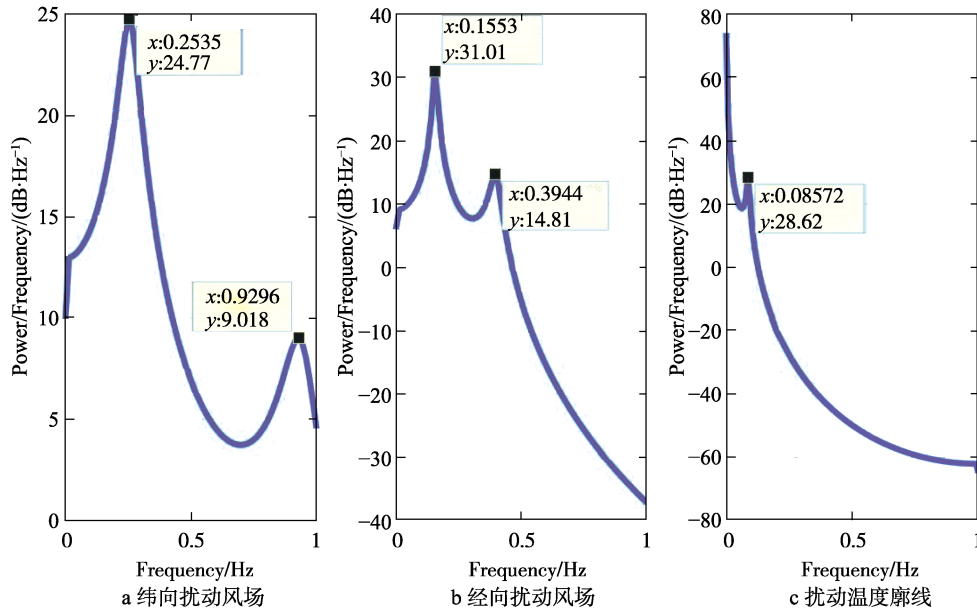


图4 通过不同廓线提取的功率-频率谱

无论使用最大熵法还是 S 变换方法, 扰动温度廓线中的重力波垂直波长均集中于 10~12 km 左右。这证明了卫星探测数据中分辨率不足是提取的重力波垂直波长存在差异的主要原因。

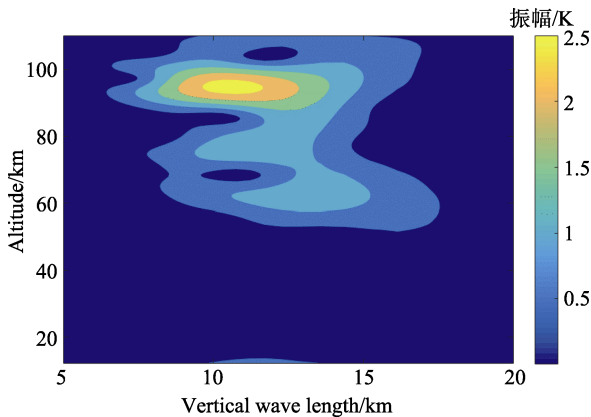


图5 利用 S 变换获得的扰动温度廓线各个高度上的重力波振幅-垂直波长分布

### 3 结论

1) 利用最大熵法提取纬向风场、经向风场以及温度廓线中的重力波垂直波长分别集中在 4、6.5、12 km 左右。

2) 利用 S 变换方法对温度扰动廓线提取的重力波垂直波长同样集中在 10~12 km 左右。

3) 相比较卫星探测数据, 火箭落球探测在提取重力波参数方面分辨率更高, 能够发现精细结构。

### 参考文献:

- [1] 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):
- [2] FRITTS D C, Alexander M J. Gravity Wave Dynamics and Effects in the Middle Atmosphere[J]. Reviews of Geophysics, 2003, 41(1): 1-68.
- [3] 易帆. 中高层大气重力波的研究——辨明近地空间环境扰动的关键过程[J]. 中国科学基金, 1997(3): 43-48.
- [4] 肖存英, 胡雄, 王博, 等. 临近空间大气扰动变化特性的定量研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(4): 1211-1221.
- [5] 帅晶. 全球重力波活动的 SABER/TIMED 观测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [6] 徐晓华, 郭金城, 罗佳. 利用 COSMIC 掩星资料分析大气重力波参数的全球分布特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(11): 1493-1498.
- [7] 程胡华, 钟中, 岑瑾. 曲线拟合背景场在提取大气重力波参数中的缺陷[J]. 气象科学, 2013, 33(1): 19-25.
- [8] 姜国英, 徐寄遥, 史东波, 等. 子午工程首枚气象火箭大气探测结果分析[J]. 科学通报, 2011, 56(19): 1568-1574.
- [9] GE Wei, SHENG Zheng, ZHANG Yi-yao, et al. The Study of in Situ Wind and Gravity Wave Determination by the First Passive Falling-sphere Experiment in China's Northwest Region[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2019, 182: 130-137.
- [10] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the Complex Spectrum: The S Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.