0254-6124/2012/32(6)-824–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Tu Cui, Hu Xiong. Spectra of the OH airglow perturbation on 5 January 2009 at Langfang. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 824-828

2009 年 1 月 5 日廊坊 OH 气辉观测图像的谱分析*

涂 翠 胡 雄

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 2009 年 1 月 5 日在中国河北省廊坊市韩村镇 (39.4°N, 116.6°E) 进行了中国首次中间层顶大气重力波成像观测实验, 记录了近 4 h 的 OH 气辉辐射数据, 给出了依据该数据计算所得的该时间段内廊坊韩村附近水平方向约 185 km 范围内的中间层顶 OH 气辉扰动的谱分析结果. 所得到的传播方向确定的二维功率谱和角度谱揭示了该时间段内重力波活动的波长和传播方向分布特点, 表明波长下限较短, 西向传播分量明显大于东向分量.

关键词 重力波, 成像, OH, 气辉, 谱分析

中图法分类号 P 353

Spectra of the OH Airglow Perturbation on 5 January 2009 at Langfang

TU Cui HU Xiong

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract It is necessary to observe and analyze the characters of gravity waves to study their effect to upper and middle atmosphere. The first imaging observation experiment of the atmospheric gravity waves in the mesopause region in China with the all-sky OH band airglow CCD imager was made on 5 January 2009, at Hancun (39.4°N, 116.6°E), Langfang, Hebei. Based on the nearly 4-hour data, we obtained the spectra of OH airglow perturbation during this time period, with a horizontal range of about 185 km centered around the observatory (at Hancun, Langfang). The unambiguous power spectrum and angular spectrum method is approved by simulation. The parameters of three quasi-monochromatic gravity waves analyzed before agree with the unambiguous power spectrum. The unambiguous power spectrum and angular spectrum reveal the distribution of wavelengths and propagation directions of the gravity waves during the 4 hours: the lower limit of wavelength is short; the gravity waves propagate more westward than eastward. Compared with the results in other two papers, the directions are different in different sites even in the same season and similar altitudes, which may be related with the different sources of the gravity waves.

Key words Gravity wave, Image, OH, Airglow, Spectrum

---

* 国家自然科学基金项目 (40774087, 41104099) 和国家航天领域高技术课题共同资助

2011-06-27 收到原稿, 2011-12-07 收到修定稿

E-mail: tucui@nssc.ac.cn

0 引言

大气重力波观测和研究一直是中高层大气研究领域中的热点. 重力波在上传过程中, 携带的动量和能量伴随着饱和破碎等过程, 会释放到中高层大气中, 严重影响到中间层及低热层大气环流和温度分布的平衡状态, 这在中高层大气动力学和热力学过程中起到非常重要的作用 [1]. 为了估计重力波对中高层大气的影响程度, 观测和研究重力波的活动特性是十分必要的.

有研究表明, 大部分由重力波上传的能量是由较短周期的高频重力波携带至中高层大气中的 [2]. 利用气辉辐射作示踪物的重力波成像仪对于高频重力波敏感 [3], 能够获取中间层气辉层高度水平二维的重力波成像数据.

2009 年 1 月 5 日, 利用中国科学院空间科学与应用研究中心的大气重力波成像仪 [4], 在中国河北省廊坊市韩村镇 (39.4°N, 116.6°E) 临近空间大气探测示范站廊坊野外观测站进行了实验观测, 获得了近 4 h 的有效数据, 这也是中国首次对中间层顶大气重力波进行二维成像观测 [5]. 该次实验中使用的示踪物为 OH 气辉, 峰值辐射高度约为 87 km. 文献 [5] 报道了该次观测实验数据中初步的个例分析结果, 得到了三个准单色重力波个例的水平波长及观测相速度和水平传播方位角等信息.

利用谱分析的方法, 可以进一步获得由大气重力波导致的气辉扰动变化具有传播方向的二维功率谱信息, 这对于长期统计观测站的重力波活动特性具有重要意义 [6−8]. 本文主要介绍全天空大气重力波成像仪图像的谱分析方法, 利用模拟数据验证方法的准确性, 并应用于 2009 年 1 月 5 日的气辉观测分析, 用以初步揭示廊坊上空重力波活动谱特征.

1 全天空气辉成像数据的谱分析方法

在谱分析之前, 首先需要对全天空成像数据进行预处理. 数据预处理的主要内容包括滤除星点、鱼眼镜头校正、从 CCD 像素坐标到气辉层水平直角坐标的坐标变换和坐标插值以及平场等 [9−11], 最后得到在气辉层高度上的水平二维成像图.

完成数据预处理后, 计算气辉辐射的相对亮度. 目的是为了计算得到重力波活动对应的气辉扰动的相对幅度值. 相对亮度值由扰动量除以平均值得到. 用 $I(t)$ 表示每幅图像亮度值, $\overline{I(t)}$ 表示平均亮度值, 则相对亮度计算有

$$P = \frac{I(t) - \overline{I(t)}}{\overline{I(t)}}. \tag{1}$$

考虑一个理想的重力波波动, 反映在亮度变化里有如下形式:

$$P = \Delta I \cos(\omega_0 t - k_0 x - l_0 y). \tag{2}$$

由时间连续的二维图像计算出自相关函数后, 可以通过傅里叶变换得到关于频率 ω、二维波数 k 和 l 的三维功率谱, 即

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{OH}}(\omega, k, l) =& (2\pi)^3 \Delta I^2 [\delta(\omega - \omega_0)\delta(k + k_0)\delta(l + l_0) + \\ & \delta(\omega + \omega_0)\delta(k - k_0)\delta(l - l_0)]/4. \end{aligned} \tag{3}$$

按照傅里叶变换的性质, 可以知道, 这样得到的三维谱是关于原点对称的. 如果取频率小于 0 的空间, 在频率 ω 轴上, 将负频率部分积分, 并乘以系数 2, 可以得到如下二维谱:

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{OH}}(k, l) =& \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{0} 2F_{\mathrm{OH}}(\omega, k, l) \mathrm{d}\omega = \\ & (2\pi)^2 \Delta I^2 \delta(k - k_0)\delta(l - l_0)/2. \end{aligned} \tag{4}$$

上述二维功率谱表示水平波数为 (k, l), 以 $\arctan(k/l)$ 方位角传播的所有周期重力波对应气辉扰动的总功率谱, 该谱可以反映出功率随空间频率 (波数) 和传播方向的分布状况.

该二维功率谱还可以写为极坐标的形式, 即 $F_{\mathrm{OH}}(\boldsymbol{h}, \phi)$, 其中, $\boldsymbol{h}$ 为水平波数矢量, $|h| = \sqrt{k^2 + l^2}$, ϕ 为方位角. 对该二维谱在 h 方向积分, 即可得到重力波传播特性分析中另外一个重要参量角度谱, 角度谱反映的是重力波功率在不同传播方向上的分布状况, 其表达式为

$$F_{\mathrm{OH}}(\phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} h F_{\mathrm{OH}}(\boldsymbol{h}, \phi) \mathrm{d}h. \tag{5}$$

重力波的传播方向对于重力波源的研究是非常重要的信息, 所以式 (4) 和式 (5) 的二维功率谱和角度谱的估计, 对于统计重力波传播特性和进一步了解重力波源等具有重要价值 [6].

2 分析结果

2.1 模拟数据谱分析结果

为了验证算法, 模拟了如图 1 所示的一个大气波动, 该重力波向北传播, 波长 20 km, 周期 30 min, 气辉扰动幅度为 2%, 有

$$P = 0.02 \times \cos(2\pi t/1800 - 2\pi y/20). \qquad (6)$$

式中, t 为时间, 单位为 s; y 为空间距离, 单位为 km. 利用第 1 节所述方法计算出的含有传播方向信息的二维功率谱如图 2 所示. 该功率谱的横轴和纵轴分别表示纬向和经向波数, 颜色变化表示了对应波数点处功率的大小, 单位为 $1/(\text{cycle}^2\cdot\text{m}^{-2})$. 从图 2 可以清晰地找到该波动对应的位置为正北方向 (纬向波数 0, 经向波数 0.05 $\text{cycle}\cdot\text{km}^{-1}$). 表明利用该方法计算的有确定传播方向的二维功率谱能够正确反映波动能量随空间频率变化的分布情况. 图 3 给出了模拟的北向传播波动效果, 角度谱使用极坐标表示, 0° 对应位置为正北方向, 90° 为正东方向, 极径的长短表征了对应方向上功率传播分量的大小, 单位为 rad^{-1}. 由对应角度谱的结果也可以看出, 该谱分析方法能正确反映出重力波整体的传播方向. 说明该谱分析方法是可信的.

2.2 实测数据的谱分析结果

2009 年 1 月 5 日廊坊大气重力波成像观测实验中, 02:09 LT−06:00 LT 期间天气状况良好, 无云, 数据有效, 图像数据时间分辨率约 1 min. 使用上述方法, 对 2009 年 1 月 5 日 02:09 LT−06:00 LT 时间段内的 OH 气辉辐射数据进行分析. 得到如图 4 和图 5 所示的有确定方向的二维功率谱和角度谱 (图中结果采用对数坐标表示).

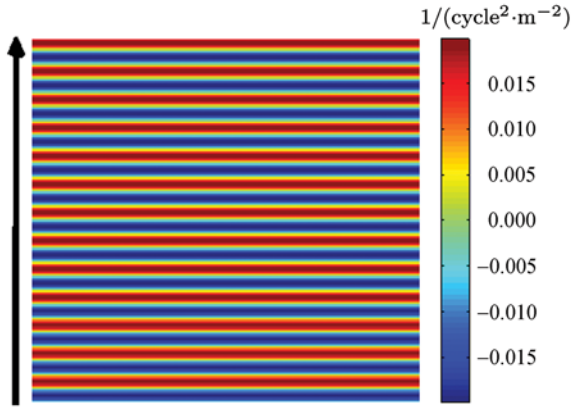


图 1 模拟的北向传播波动效果 (波动水平波长 20 km, 周期 30 min, 扰动幅度 2%)

Fig. 1 Simulated wave with a horizontal wavelength of 20 km, a period of 30 min, and perturbation amplitude of 2%

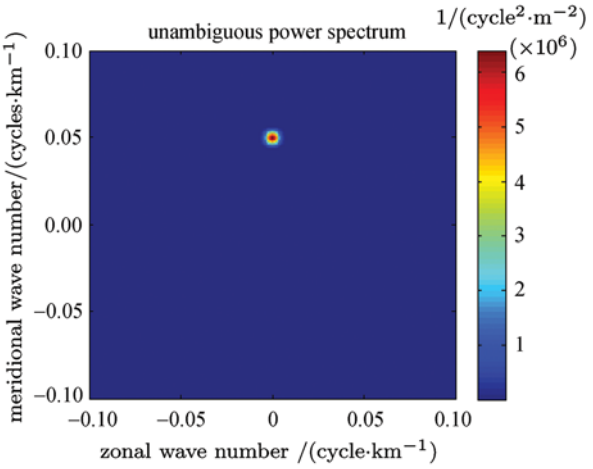


图 2 由模拟波动计算所得到的有确定方向的二维功率谱 (波动对应纬向波数 0, 经向波数 0.05 处)

Fig. 2 Unambiguous power spectrum of the simulated wave (Zonal and meridional wave numbers are 0 and 0.05 $\text{cycle}\cdot\text{km}^{-1}$, respectively)

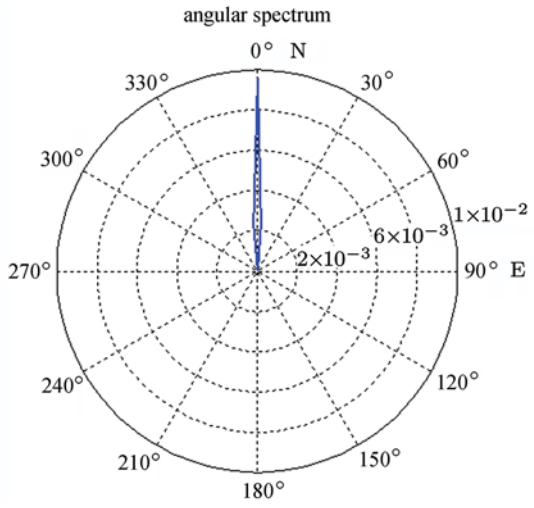


图 3 由图 2 中有确定传播方向的二维功率谱计算所得的角度谱

Fig. 3 Angular spectrum of the simulated wave

从图 4 二维功率谱中可以看到, 该段观测时间内重力波波数最大可以达到 0.1 以上, 对应的波长界限约 10 km, 波长下限较短. 对这次实验已有初步分析结果 [5], 得到了三个准单色重力波个例的详细参数, 本文在功率谱中也标志出了其对应的方位和波数 (327°, 1/12.3 cycle·km^{-1}), (68°, 1/25 cycle·km^{-1}) 和 (341°, 1/10 cycle·km^{-1}), 如图 4 中星号所示. 个例与谱分析结果是相符的.

从图 5 角度谱可以得知, 该次实验的时间段内,

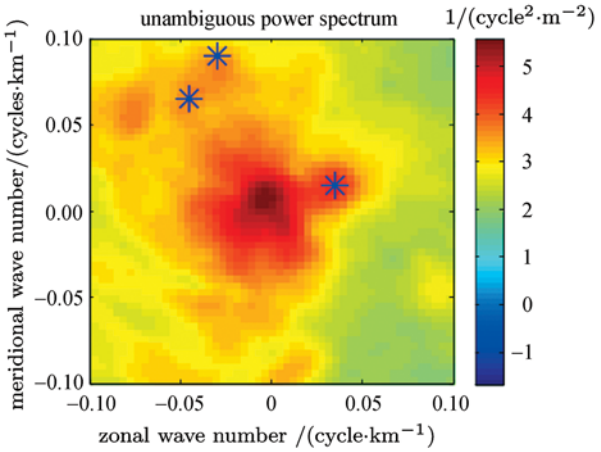


图 4　传播方向确定的二维功率谱 (星号为该次实验中三个重力波活动个例对应的方位和波数)

Fig. 4　Unambiguous power spectrum (asterisks correspond to the three gravity waves)

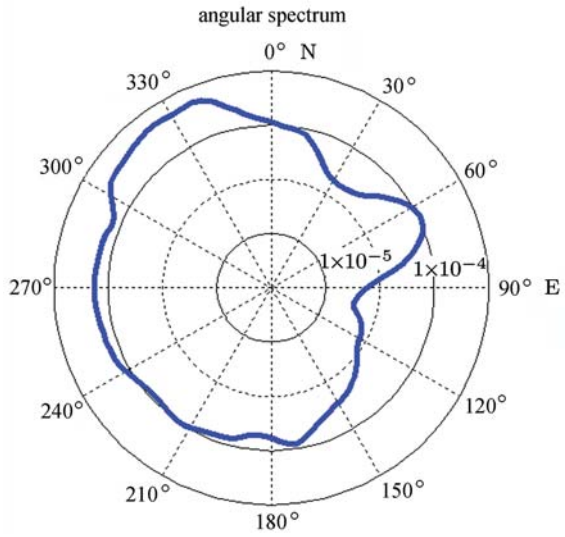


图 5　角度谱

Fig. 5　Angular spectrum

重力波西向分量明显大于东向分量.

文献 [6] 给出了对 1995 年 2 月 3 日 Starfile Optical Range (SOR, 35°N, 107°W) 气辉扰动数据的谱分析结果, 由二维功率谱可知, 大气重力波没有明显的主导传播方向, 东向分量略微比西向分量大; 文献 [7] 给出了 2000 年 1 月 4 日在 SOR 的结果, 从功率谱和角度谱中可以明显看出西向分量占优势. SOR 所处位置与本文中的观测点纬度相近. 文献 [7] 和本文的观测时间都是 1 月份, 结论很相近, 都是西向分量较大, 这与通常认为的冬夏不同的风场对大气重力波传播存在影响的理论保持一致; 但是文献 [6] 的观测时间是同样处于冬季的 2 月份, 方向却不同. 综合上述两篇文献和本文中结果, 可以看出, 大气重力波的传播特性可能随着具体时间或地点的不同会有很大改变, 这可能与大气重力波的源相关.

Liu 等的研究 [12−13] 表明, 气辉作为大气重力波示踪物时, 气辉亮度相对扰动幅度与大气重力波幅度的比值系数 C_{f} 和大气重力波的垂直波长 λ_z(单位 km) 之间存在关系, 即 $C_{\mathrm{f}} = 3.68 - 3.41\mathrm{e}^{-0.0053(\lambda_z-6)^2}$. 对垂直波长大于 15 km 的大气重力波, C_{f} 的典型值在 3~5 之间, 且随着波长增加, 该放大系数的变化率减小; 而对于垂直波长更短的大气重力波, 气辉层的响应很弱, 气辉亮度的相对扰动幅度随垂直波长变短呈指数减小. Tang 等在利用气辉数据估计重力波水平动量的垂直通量时, 分别考虑了 C_{f} 参数变化和 C_{f} 为常数两种情况, 统计结果显示 C_{f} 因子对水平动量的垂直通量估计影响较小, 两种情况下, 计算结果仅相差约 10%[14]. 因此, 可以认为上述二维功率谱和角度谱反映的是垂直波长大于 15 km 的大气重力波的传播特性. 利用谱分析方法, 全球范围内一些观测站的部分重力波活动特性已经得到了研究 [6−8].

3　结语

介绍了从全天空气辉成像仪图像数据中提取重力波传播方向信息的谱分析方法, 采用仿真数据对方法进行了检验; 并对 2009 年 1 月 5 日气辉成像仪观测实验得到的数据进行了详细的谱分析, 获得非模糊二维功率谱和角度谱图, 从而清晰展现了观测时间段内所有重力波活动的主要特性, 即波长下限较短, 西

向分量明显大于东向分量等.

结合同步的风场观测数据, 还可以进一步利用这种方法给出重力波能量通量和动量通量的估计 [7,13−14]. 目前, 中国科学院空间科学与应用研究中心廊坊临近空间环境野外科学综合观测研究站开展了以 Na 层测风/测温激光雷达、多普勒测风激光雷达、FPI 干涉测风仪、中频雷达、流星雷达、重力波成像仪等先进设备为主的观测实验. 未来研究将利用上述方法, 进一步分析重力波能量和动量传播及其统计特性.

参考文献

[1] Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. *Rev. Geophys.*, 2003, **41**(1):3-1-3-64

[2] Vincent R A. Gravity-wave motions in the mesosphere [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**:119-128

[3] Gardner C S, Taylor M J. Observational limits for lidar, radar, and airglow imager measurements of gravity wave parameters [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D6):6427-6437

[4] Tu C, Hu X, Guo S Y, *et al.* CSSAR Airglow Gravity Wave Imager and its Preliminary Observation Proceeding [R]. SPIE 7384, 73841K, 2009, doi:10.1117/12.835580

[5] Tu C, Hu X, Yan Z A, *et al.* First imaging observation of the gravity waves in the mesopause region in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2010, **55**:539-543

[6] Coble M R, Papen G C, Gardner C S. Computing two-dimensional unambiguous horizontal wavenumber spectra from OH airglow images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1998, **36**:368-382

[7] Tang J, Liu A Z, Swenson G R. High frequency gravity waves observed in OH airglow at Starfire Optical Range, NM: Seasonal variations in momentum flux [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(20):27-1-27-4

[8] Jiang K, Ding F, Wan W X, *et al.* Observations of atmospheric gravity waves in airglow over adelaide [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(6):491-497

[9] Tang J, Kamalabadi F, Rumsey L G, Swenson G R. Point-source suppression for atmospheric wave extraction from airglow imaging measurements [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, **41**(1):146-152

[10] Hill R. A lens for whole sky photographs [J]. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.* 1924, **50**:227-235

[11] Sanjit K. Mitra Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach (2ed) [M]. Mcgraw-Hill: McGraw-Hill Higher Education, 2011

[12] Liu A Z, Swenson G R. A modeling study of O_2 and OH airglow perturbations induced by atmospheric gravity waves [J]. *J Geophys. Res.*, 2003, **108**:11-1-11-9

[13] Vargas F, Swenson G R, Liu A, *et al.* O (∼1 S), OH, and O_2 (b) airglow layer perturbations due to AGWs and their implied effects on the atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(D14):D14102, doi:10.1029/2006JD007642

[14] Tang J, Swenson G R, Liu A Z, Kamalabadi F. Observational investigations of gravity wave momentum flux with spectroscopic imaging [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D09S09, doi:10.1029/2004JD004778.