

iGrav-007 超导重力仪的性能分析及对球型自由振荡模态₀ S_m 的检测

贾剑钢¹ 栾 威¹ 申文斌¹

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

摘要: iGrav 超导重力仪是世界上最新型的便携式高精度重力仪, 可提供目前为止最稳定的相对重力测量。基于 Tsoft 软件处理 iGrav-007 在武汉九峰台站连续 5 个月的观测数据, 进行气压负荷、极移重力效应改正, 分析重力残差和漂移等特性。通过频谱分析, 检测观测期间 2013 年 Mw6.6 级芦山地震激发的球型自由振荡模态₀ S_m , 检测结果明显, 综合表明 iGrav-007 观测性能良好。

关键词: iGrav-007; 大气重力导纳值; 重力残差; 自由振荡模态₀ S_m

中图法分类号:P223

文献标志码:A

地球重力场变化与各种物理过程(如潮汐、构造活动、地球自由振荡等)紧密联系, 国内外许多学者都试图通过重力潮汐的观测来探索地球内部的奥秘并解释与之相关的地球物理现象^[1-3]。1997 年 7 月启动的“全球地球动力学计划”(Global Geodynamics Projects, GGP)为研究全球动力学现象, 如地球固体潮、重力场与海洋大气耦合、地球自由核章动、地球自转变化等导致的重力效应, 提供了全球超导重力观测资料^[4-6]。

超导重力仪被认为是精度最高, 稳定性和连续性最好的重力仪, 对重力变化的灵敏度极高(在频段低于 0.8 mHz 时超过当前最好的宽频地震仪^[7]), 适合长周期信号的观测, 在自由振荡等研究中优势明显^[8-10]。美国 GWR 公司生产的 iGrav 超导重力仪是最新型的便携式相对重力仪, 其基本原理与台站型超导重力仪(OSG)解释相同, 体积更小更为便携。其标称精度在频域中为 1 nanoGal, 在时域中 1 min 平均值为 0.05 μ Gal, 零漂小于 0.5 μ Gal/月^[11]。

利用超导重力仪获取高精度地球重力信号, 需进行各项必要的改正及残差分析。本文基于 Tsoft 软件^[12]处理武汉九峰台站连续 5 个月的超导重力观测数据, 进行气压负荷、极移重力改正及尖峰、阶跃、间断等干扰信号的修正; 进一步分析

重力残差及仪器的长期漂移特征, 评估观测精度。采用功率谱密度估计(Spanos-Tratskas 方法)^[13], 检测 2013 年 Mw6.6 级芦山地震激发的地球自由振荡球型模态₀ S_m , 并分析各频段上的信噪比。

1 观测数据的预处理和分析

1.1 观测资料及预处理方法

武汉大学的 iGrav-007 超导重力仪引进于 2012 年, 次年 3 月安装于中科院测地所武汉九峰台站。由于观测显示安装前 3 个月仪器尚未完全稳定, 因此本文取 2013 年 6 月 25 日~11 月 25 日连续 5 个月的原始秒采样观测数据, 并采用最小二乘滤波获得分采样数据。

利用 Tsoft 软件进行数据预处理的过程包括:(1) 根据台站潮汐参数构制重力合成潮, 得到重力残差;(2) 利用 Tsoft 多种修正方法去除尖峰、阶跃和间断等干扰信号;(3) 由回归分析法计算大气重力导纳值, 改正大气负荷效应;(4) 根据 IERS 提供的地球自转参数, 改正极移重力效应。对经大气负荷和极移重力改正后的重力残差分别进行多项式拟合和滤波, 去除仪器漂移和残余潮汐信号, 得到最终重力残差 $\epsilon(t)$ (单位为 nm ·

s^{-2});

$$\begin{aligned}\epsilon(t) &= y_{\text{obs}}(t) - y_{\text{mod}}(t) - \text{dg}_P(t) - \\ &\quad \text{dg}_{\text{pole}}(t) - \sum_{i=1}^p a_i t^i\end{aligned}\quad (1)$$

式中, t 为采样历元; $y_{\text{obs}}(t)$ 为 iGrav-007 的重力潮汐观测值; $y_{\text{mod}}(t)$ 为台站重力合成潮; $\text{dg}_P(t)$ 为气压引起的台站重力变化; $\text{dg}_{\text{pole}}(t)$ 为极移引起的台站重力变化; $\sum_{i=1}^p a_i t^i$ 表示拟合仪器漂移和残余潮汐信号的 p 次多项式, a_i 是多项式系数。

1.2 重力合成潮汐

台站重力合成潮 $y_{\text{mod}}(t)$ 可表示为:

$$y_{\text{mod}}(t) = \sum_{n=1}^N \delta_n \sum_{m=1}^{M_n} H_{nm} \cos(\omega_{nm} t + \varphi_{nm} + \Delta\varphi_n) \quad (2)$$

式中, n 为波群数; N 为波群总数; δ_n 和 $\Delta\varphi_n$ 为第 n 个波群数的模型振幅因子和相位滞后; m 为第 n 个波群的潮汐分量数, M_n 为第 n 个波群的潮汐分量总数; H_{nm} 、 ω_{nm} 和 φ_{nm} 为第 n 个波群第 m 个潮汐分量的模型振幅、角频率和初始相位^[2]。

本文采用台站提供的重力合成潮波群(共 17 个波群)参数, 并置测站点的大地经、纬度 $\lambda = 114.48980^\circ\text{E}$, $\varphi = 30.51587^\circ\text{N}$, 仪器高程 $H = 89.3\text{ m}$, 构制 $y_{\text{mod}}(t)$, 如图 1(b) 所示。

1.3 大气负荷改正

大气负荷改正的常用方法是将重力潮汐观测值减去重力合成潮获得重力残差 $y_{\text{resd}}(t)$, 如图 1(c) 所示, 再将 $y_{\text{resd}}(t)$ 与台站气压观测值 $P(t)$ 进行最小二乘回归求得大气重力导纳值 C , 乘积 $CP(t)$ 即为大气负荷改正量。

在时域内获得大气重力导纳值, 一元线性回归模型为:

$$y_{\text{resd}}(t) = CP(t) + C_1 \quad (3)$$

气压引起的台站重力变化 $\text{dg}_P(t)$ 可表示为:

$$\text{dg}_P(t) = CP(t) \quad (4)$$

采用最小二乘线性迭代回归法, 以残差标准差 σ 为中误差, 3σ 为限差, 每次迭代时均去掉原始重力残差和气压观测值中的二次多项式拟合部分, 当 C 的变化小于 $0.0001\text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}/\text{mBar}$ 时停止迭代, 实际迭代 4 次即可, 得到台站大气重力导纳值 $C = (-2.4807 \pm 0.0035)\text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}/\text{mBar}$, 斜距 $C_1 = 4361.2448\text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。由图 1(d) 可知, 台站大气负荷的影响振幅约 $100\text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。经大气负荷改正后, 重力残差得到明显改善, 如图 1(e) 所示, 可见大气负荷效应是重力残差中的主要成分。

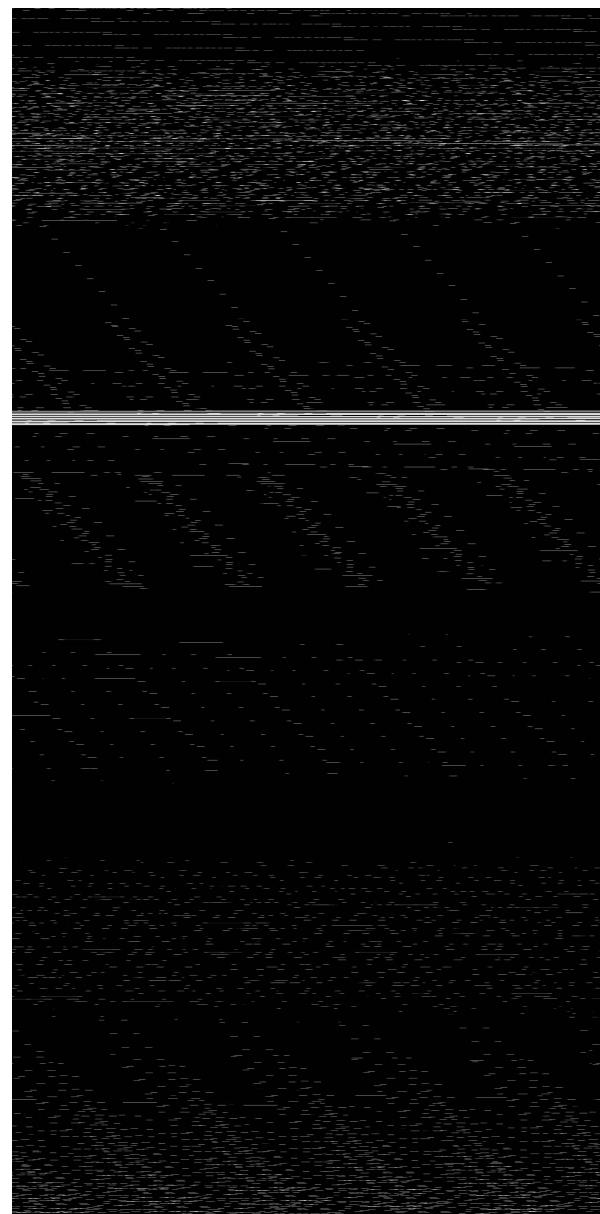


图 1 重力残差中的台站大气负荷和极移重力改正

Fig. 1 Correction of Air Pressure and Polar Motion at Station on the Gravity Residuals

1.4 极移重力效应改正

极移引起的地表任一点重力变化可根据该点坐标和极坐标的变化(从 IERS 提供的地球自转参数中得到)算得, 故极移重力效应可作为已知量扣除^[14]。极移引起的台站重力变化 dg_{pole} 可表示为:

$$\begin{aligned}\text{dg}_{\text{pole}} &= 2 \times 1.164 a \bar{\omega}^2 \sin(90^\circ - \varphi) \cdot \\ &\quad \cos(90^\circ - \varphi) (x \cos \lambda - y \sin \lambda)\end{aligned}\quad (5)$$

式中, 地球平均半径 $a = 6378137.0\text{ m}$; 地球平均自转角速度 $\bar{\omega} = 7.292115 \times 10^{-5}\text{ rad/s}$; (x, y) 为测站点的极坐标; 大地经度 λ 、大地纬度 φ 与上文给出的值相同。

根据式(5)算得武汉九峰台站的极移重力效

应,并取与图 1(e)中残差相同的时间段。因 IERS 提供的数据采样率为 1 d,采用三次样条插值获得分采样的极移重力,如图 1(f)所示,极移影响的振幅约 $20 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,较明显。

1.5 经大气和极移改正后的重力残差分析

对最终重力残差线性拟合得 iGrav-007 的漂移率为 $0.40 \mu\text{Gal}/\text{月}$,如图 2(a)所示,较其标称值小。采用 20 阶多项式拟合重力残差,如图 2(b)所示,得到拟合残差均方根 $\text{RMS} = 0.423 \mu\text{Gal}/\text{min}$ (经实验,采用更高阶多项式 RMS 变化均小于 $0.01 \mu\text{Gal}$)。该值大于其标称值 $0.050 \mu\text{Gal}/\text{min}$ 。究其原因,一是因台站背景噪声较大;二是大气负荷改正不彻底,未考虑中远和远区

的气压影响^[15]以及对重力潮汐观测影响的频率依赖,仅采用线性回归计算大气重力导纳值^[15-17]。

对最终重力残差分别进行最小二乘高通、带通、低通滤波,截止频率分别以合成潮 M3 波的最高频率 3.081254 cpd 和 MM 波的最低频率 0.020885 cpd 为界。此处认为比 M3 波频更高的部分由仪器的高频噪声引起,比 MM 波频更低的部分为仪器漂移,中间部分主要为残余潮汐。故将重力残差分为短周期、潮汐频段、长周期三部分。由图 3(a)可知,重力残差中存在微弱的残余潮汐信号,能量约在 $\pm 3 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间,相对较小。以短周期部分扣除平均值后的均方根 $0.040 \mu\text{Gal}/\text{min}$ 衡量其观测精度,表明 iGrav-007 观测性能良好。

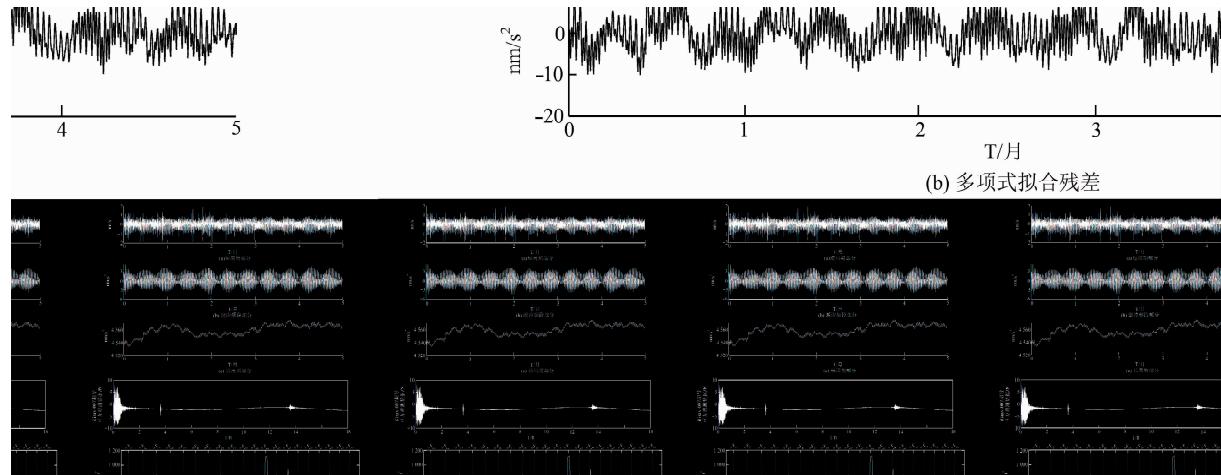


图 2 重力残差的线性拟合、20 次多项式拟合及多项式拟合残差

Fig. 2 Linear Fitting, 20 Times Polynomial Fitting and Polynomial Residual Error on the Gravity Residuals

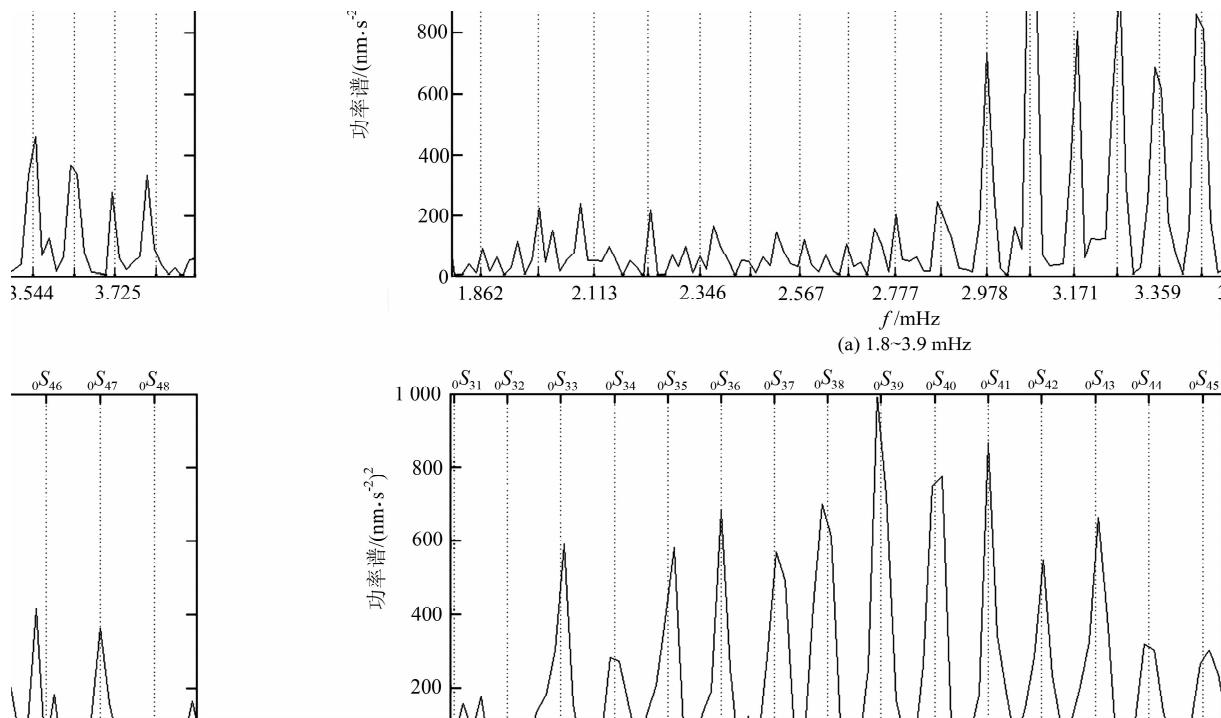


图 3 重力残差的最小二乘滤波

Fig. 3 Least Squares Filtering on the Gravity Residuals

2 iGrav-007 对球型自由振荡模态₀S_m 的检测

2.1 自由振荡信号检测方法

2013年芦山地震在2.3~5.3 mHz频段激发了微弱的球型简正模信号,为研究iGrav-007的

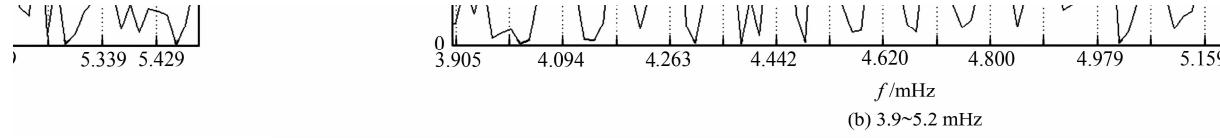


图4 iGrav-007记录的芦山地震后18 h的原始观测数据/V

Fig. 4 18 Hours Original Recording After Lushan Earthquake by iGrav-007 /V

2.2 观测结果分析

在0.28~1.80 mHz频段上,自由振荡信号受噪声干扰严重,₀S₀~₀S₁₀基型振荡无法有效检测。分析原因,一是这些频率的低阶振型受地震强度较小的限制,难以激发;二是地球自转和椭率可导致自由振荡信号的分裂和耦合^[19,20]。

图5(a)、图5(b)分别为iGrav-007在1.8~3.9 mHz和3.9~5.5 mHz频段检测到的芦山地震激发的自由振荡振型。数据长度为18 h,傅里叶变换采用Hanning窗。由图5可知iGrav-007清晰地检测到了₀S₁₁~₀S₄₈之间除₀S₁₆振型之外的振型基频系列。为对比观测到的自由振荡周期与PREM理论值,图5中用虚线指示PREM模型的理论频率值。₀S₁₆振型未形成突出的谱峰,主要是受附近的噪声影响较大所致。1.80~3.00 mHz频段信噪比较低,但功率谱密度能较好地反映基频球型振荡频率。在3.00~4.75 mHz频段检测到₀S₂₁~₀S₄₀的所有振型,信噪比均大于3,谱峰清晰,大部分基频振型观测值与PREM理论值偏差较小。其中₀S₃₀振型虽形成清晰的谱峰,但观测值与理论值频率偏差相对其他频段较大,达到20.0×10⁻⁶ Hz(约8倍的傅氏谱分析频率分辨率)。究其原因,一是由于该振型附近噪声较大,二是这一基频振型可能受到地球上地幔剪切波的干扰^[21],且₀S₃₁振型处可能出现谱线分裂现象。在4.75~5.50 mHz频段检测到₀S₄₁~₀S₄₈振型,该频段附近噪声较低,谱峰清晰可见,与PREM理论值较吻合。

由表1可知,1.80~5.50 mHz频段iGrav-007检测到的基频自由振荡信号和PREM理论值偏差仅3个基频振型偏差绝对值超过0.30%,偏差绝对值小于0.15%的检测振型数占总振型数的65.7%。

高频特性提供了条件。采用功率谱密度估计,检测该地震激发的地球自由振荡球型模态₀S_m,分析各频段上的信噪比,并与PREM模型^[18]理论预测值比较,评价iGrav-007的残差水平。芦山地震发生于2013年4月20日0:2:48(UTC),选取了地震后18 h的iGrav-007观测数据,如图4所示。

表1 自由振荡模态₀S₁₁至₀S₄₈的基频观测结果

Tab. 1 The Observation of Basic Frequencies Free Oscillation Modes from ₀S₁₁ to ₀S₄₈

| 振型 | PREM理论预测值/mHz | iGrav-007观测值/mHz | 偏差/% |
|------------------------------|---------------|------------------|-------|
| ₀ S ₁₁ | 1.862 | 1.867 | 0.27 |
| ₀ S ₁₂ | 1.99 | 1.991 | 0.05 |
| ₀ S ₁₃ | 2.113 | 2.114 | 0.05 |
| ₀ S ₁₄ | 2.231 | 2.238 | 0.31 |
| ₀ S ₁₅ | 2.346 | 2.346 | 0.00 |
| ₀ S ₁₆ | 2.458 | 不明显 | * * * |
| ₀ S ₁₇ | 2.567 | 2.567 | 0.00 |
| ₀ S ₁₈ | 2.673 | 2.67 | -0.11 |
| ₀ S ₁₉ | 2.777 | 2.778 | 0.04 |
| ₀ S ₂₀ | 2.878 | 2.878 | 0.00 |
| ₀ S ₂₁ | 2.978 | 2.978 | 0.00 |
| ₀ S ₂₂ | 3.075 | 3.071 | -0.13 |
| ₀ S ₂₃ | 3.171 | 3.172 | 0.03 |
| ₀ S ₂₄ | 3.266 | 3.272 | 0.18 |
| ₀ S ₂₅ | 3.359 | 3.359 | 0.00 |
| ₀ S ₂₆ | 3.452 | 3.451 | -0.03 |
| ₀ S ₂₇ | 3.544 | 3.549 | 0.14 |
| ₀ S ₂₈ | 3.635 | 3.637 | -0.05 |
| ₀ S ₂₉ | 3.725 | 3.719 | -0.16 |
| ₀ S ₃₀ | 3.816 | 3.796 | -0.52 |
| ₀ S ₃₁ | 3.905 | 3.92 | 0.38 |
| ₀ S ₃₂ | 3.995 | 3.997 | 0.05 |
| ₀ S ₃₃ | 4.084 | 4.09 | 0.15 |
| ₀ S ₃₄ | 4.174 | 4.167 | -0.17 |
| ₀ S ₃₅ | 4.263 | 4.275 | 0.28 |
| ₀ S ₃₆ | 4.352 | 4.352 | 0.00 |
| ₀ S ₃₇ | 4.442 | 4.444 | 0.05 |
| ₀ S ₃₈ | 4.531 | 4.522 | -0.20 |
| ₀ S ₃₉ | 4.62 | 4.614 | -0.13 |
| ₀ S ₄₀ | 4.71 | 4.722 | 0.25 |
| ₀ S ₄₁ | 4.8 | 4.799 | -0.02 |
| ₀ S ₄₂ | 4.889 | 4.892 | 0.06 |
| ₀ S ₄₃ | 4.979 | 4.985 | 0.12 |
| ₀ S ₄₄ | 5.069 | 5.062 | -0.14 |
| ₀ S ₄₅ | 5.159 | 5.170 | 0.21 |
| ₀ S ₄₆ | 5.249 | 5.231 | 0.34 |
| ₀ S ₄₇ | 5.339 | 5.340 | 0.02 |
| ₀ S ₄₈ | 5.429 | 5.417 | 0.22 |

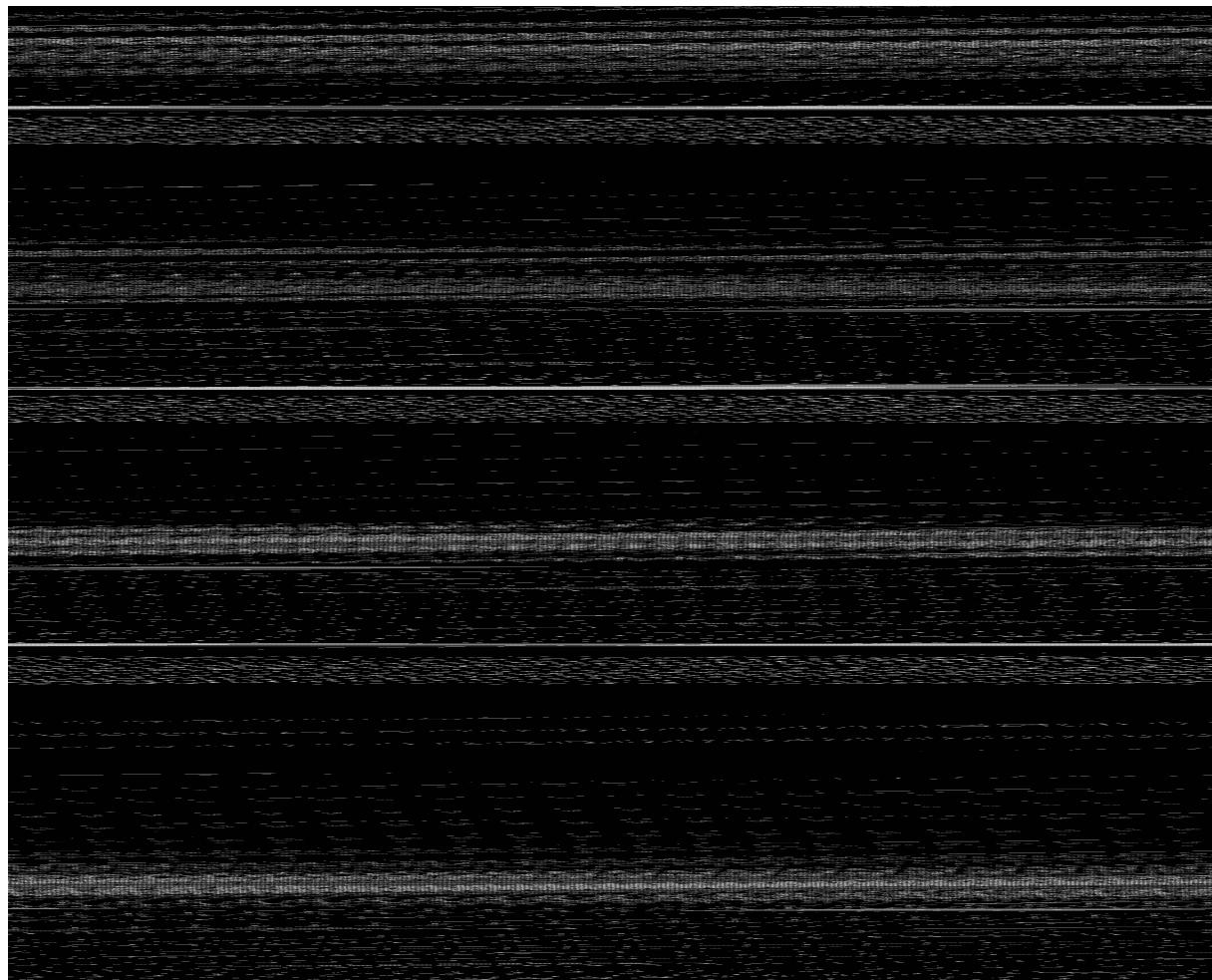


图 5 iGrav-007 记录到的芦山地震激发的自由振荡信号傅里叶变换频谱

Fig. 5 FFT Transform Spectrum of Earth's Free Oscillation Excited by Lushan Earthquake Recorded by iGrav-007

3 结语

本文基于 iGrav-007 在武汉九峰台站连续 5 个月的观测数据,应用 Tsoft 软件进行大气负荷和极移重力效应改正,采用最小二乘线性迭代回归,在时域内得到武汉九峰台站大气重力导纳值为 $(-2.4807 \pm 0.0035) \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2} / \text{mBar}$ 。利用线性拟合最终重力残差,得到 iGrav-007 的漂移率为 $0.40 \mu\text{Gal}/\text{月}$;利用多项式拟合重力残差,去除仪器长期漂移量和残余潮汐信号,得到最终重力残差均方根为 $0.423 \mu\text{Gal}/\text{min}$;利用滤波,以重力残差短周期部分扣除平均值后的均方根 $0.040 \mu\text{Gal}/\text{min}$ 衡量观测精度,表明 iGrav-007 观测性能良好。

iGrav-007 很好地记录了 2013 年 Mw6.6 芦山地震,检测出 $1.80 \sim 5.50 \text{ mHz}$ 频段内₀ S₁₁ ~₀ S₄₀ 振型中除₀ S₁₆ 振型外的基频振型自由振荡系列。观测值与 PREM 理论值偏差绝对值超过

0.30% 的有 3 个基频振型,小于 0.15% 的检测振型数占总振型数的 65.7%。

下一步将对 iGrav-007 固体潮观测数据作调和分析,综合考虑固体潮、气压、极移、日长等变化的影响,获得更准确的潮汐参数和频域内的大气重力导纳值。

致谢:感谢中国科学院测量与地球物理研究所提供的武汉九峰台站潮汐参数。

参 考 文 献

- [1] Wang Dijin, Shen Wenbin. Development of Investigations in some Geoscientific Problems Using Superconducting Gravimeter Data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34:10-11(王迪晋,申文斌. 利用超导重力数据研究若干地球科学问题的进展[J]. 测绘科学, 2009, 34:10-11)
- [2] Chen Xiaodong, Sun Heping. New Method for Pre-processing and Analyzing Tidal Gravity Observations [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22:83-87 (陈晓东,孙和平. 一种新的重力潮

- 汐数据预处理和分析方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22: 83-87)
- [3] Shen Wenbin, Liu Renli. Study of Detecting the Inner Core Super Rotation Using SG Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 72-76(申文斌, 刘任莉. 利用超导重力数据探测内核超速旋转的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 72-76)
- [4] Crossley D, Hinderer J. Report of GGP Activities to Commission 3, Completing 10 Years for the Worldwide Network of Superconducting Gravimeters [J]. *Observing Our Changing Earth, IAG Symposia*, 2008, 133: 511-521
- [5] Warburton R J, Pillai H, Reineman R C. Initial Results with the New GWR iGravTM Superconducting Gravity Meter[C]. *IAG Symposium Proceedings*, Saint Petersbuly, Russia, 2010
- [6] Rosat S, Register Y, Crossley D, et al. A Search for the Slichter Triplet with Superconducting Gravimeters: Impact of the Density Jump at the Inner Core Boundary [J]. *Journal of Geodynamics*, 2006, 41(1-3): 296-306
- [7] Rosat S, Hinderer J, Crossley D, et al. Performance of Superconducting Gravimeters from Long Period Seismology to Tides[J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 38: 461-476
- [8] Widmer R. What can Superconducting Gravimeters Contribute to Normal Mode Seismology[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2003, 93(3): 1 370-1 380
- [9] Hu Xiaogang, Liu Lintao, Sun Heping, et al. Wavelet Filter Analysis of Splitting and Coupling of Seismic Normal Modes Below 1.5 mHz with Superconducting Gravimeter Records After the December 26th 2004 Sumatra Earthquake[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49: 1 259-1 269
- [10] Wang Linsong, Chen Chao, Liang Qing, et al. Co-seismic Response to Gravity Signals of the Great Earthquake in East Japan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1 348-1 351(王林松, 陈超, 梁青, 等, 东日本大地震重力信号同震响应[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(11): 1 348-1 351)
- [11] GWR Instruments, Inc. iGrav007 User's Guide [OL]. <http://www.gwrinstruments.com>, 2012
- [12] Van C M, Vauterin P. Tsoft: Graphical and Interactive Software for the Analysis of Time Series and Earth Tides[J]. *Computers & Geosciences*, 2005, 31: 631-640
- [13] Spanos D, Failla G. Evolutionary Spectra Estimation Using Wavelets[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(8): 952-960
- [14] Banka D, Crossley D L. Noise Levers of Superconducting Gravimeter at Seismic Frequencies[J]. *Geophys. J. Int.*, 1999, 139(1): 87-97
- [15] Sun Heping, Ducarme B, Dehant V. Correction of the Atmosphere Pressure on Gravity Measurements Recorded by a Superconducting Gravimeter at Brussels[C]. The 12th Int. Sympos. On Earth Tides, Beijing, 1993
- [16] Sun Heping, Xu Houze, Tao Guoxiang, et al. Accurate Determination of the Earth Tidal Parameters Using Superconducting Gravimeter Observation[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1997, 17(4): 17-25(孙和平, 许厚泽, 陶国祥, 等. 用超导重力仪观测数据精密测定地球潮汐常数[J]. 地壳形变与地震, 1997, 17(4): 17-25)
- [17] Crossley D, Jensen O, Hinderer J. Effective Barometric Admittance and Gravity Residual[J]. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1995, 90(3-4): 1 679-1 682
- [18] Dziewonski A, Anderson D. Preliminary Reference Earth Model[J]. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1981, 25: 297-356
- [19] Lei Xiang, Xu Houze, Sun Heping. Detection of Earth Free Oscillation by Superconducting Gravity Observation Data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (18): 1 432-1 436(雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 利用超导重力观测资料检测地球自由振荡[J]. 科学通报, 2002, 47(18): 1 432-1 436)
- [20] Lei Xiang, Sun Heping, Xu Houze. Test and Discussion of the Earth Free Oscillations and Spectral Line Splitting of Sumatra Earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2007, 37(4): 504-511(雷湘鄂, 孙和平, 许厚泽. 苏门达腊大地震激发的地球自由振荡及其谱线分裂的检测与讨论[J]. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(4): 504-511)
- [21] Ishii M, Tromp J, Dziewonski A M, et al. Joint Inversion of Normal Mode and Body Wave Data for Inner Core Anisotropy: Laterally Homogeneous Anisotropy[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (B12): 2 379-2 395

iGrav-007 SG and Detection of the Spherical Free Oscillation Modes ₀S_m

JIA Jiangang¹ LUAN Wei¹ SHEN Wenbin¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: iGrav Superconducting Gravimeter is the newest portable gravimeter with high accuracy in the world, which provides the most stable relative gravity measurement. Based on Tsoft software, this paper processed the consecutive iGrav-007 observation data of 5 months at Wuhan Jiufeng Station. Correction of station air pressure and variations of polar motion on the gravity field and analysis of the nature of gravity residual error and drifting was made. Through the spectrum analysis, detection of the spherical free oscillation modes ₀S_m caused by the 2013 Lushan Earthquake(Mw=6.6) was made. The result of detection is evident. It comprehensively shows that iGrav-007 having a good performance on observation.

Key words: iGrav-007; atmospheric gravity admittance; gravity residual; free oscillation modes ₀S_m

First author: JIA Jiangang, Phd candidate, specializes in determination of earth gravity field. E-mail:jgjia@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The Major State Basic Research Development Program of China (973 Program), No. 2013CB733305; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41128003, 41174011, 41210006, 40974015; the Experiment Technology Project of Wuhan University, No. WHU-2015-SYJS-08.

(上接第 1660 页)

A Building Method of Statistical Cartographic Symbols by Using the Space Layout

ZHANG Xiaonan¹ JIANG Nan¹ ZHANG Yajun¹ YAN Yulong¹ CUI Huping¹

1 Institute of Geography Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Statistical cartographic symbol is used to express statistical data, which is the important bridge for data exploration and transfer between designer and user. By means of the thorough analysis on space layout, elements and classification of statistical cartographic symbol, puts forward a kind of building method of statistical cartographic symbols by using the space layout. Describes in detail the formalization description and organization of statistical cartographic symbol under the constraints of space layout, then designs the basic building flow. Afterwards, constructs visual variables, graphic element and statistical cartographic symbols in turn. Experimental results show that this method can break through the traditional limits of data dependency and building complexity, rich the kinds of statistical cartographic symbols, and has certain actual application value.

Key words: space layout; statistical mapping; symbol building; visual variable; graphic element building

First author: ZHANG Xiaonan, PhD candidate, specializes in the spatial geographic information processing and application services. E-mail:zhangxiaon0902@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41271450.