

江颖,李响,张晓彤,等. 2025. 弹簧重力仪在亚地震频段和潮汐频段的噪声水平对比分析研究[J]. 地震研究, 48(4): 665–673, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0068.

Jiang Y, Li X, Zhang X T, et al. 2025. Comparative analysis of the gravity noise levels of three different types of gravimeters in seismic sub-frequency band and tidal frequency band [J]. *Journal of Seismological Research*, 48(4): 665–673, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0068.

弹簧重力仪在亚地震频段和潮汐频段的 重力噪声水平对比分析研究*

江颖^{1,2}, 李响^{1,2}, 张晓彤^{1,2}, 刘子维^{1,2}, 刘清超^{1,2}, 周浩^{1,2}

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉引力与固体潮国家野外观测研究站, 湖北 武汉 430071)

摘要: 选取 2022 年蓟县地震台同址观测的 3 种弹簧重力仪 (gPhone 型、DZW 型和 GS-15 型) 的连续观测数据, 计算了这 3 种弹簧重力仪在亚地震频段 (1~6 h) 的背景噪声水平 (SSNM) 和在潮汐频段 (>6 h) 的背景噪声水平 (TNM), 讨论了不同频段的背景噪声水平之间的相关性, 比较 Eterna 和 Venedikov 2 种调和分析方法, 并讨论了不同频段背景噪声水平之间的相关性。结果表明: ①在亚地震频段, gPhone 型、DZW 型和 GS-15 型重力仪的 SSNM 值分别为 3.91、4.48 和 5.20, SSNM 值与地震频段背景噪声水平 (SNM) 之间存在正相关。②在潮汐频段, 3 种重力仪的 TNM 值分别为 5.514、6.681 和 8.007, TNM 值与 SNM 值之间存在一定的相关性。③通过调和分析发现, 相比于 DZW 和 GS-15 型重力仪, gPhone 型重力仪记录到的潮汐信号的主要潮波 (O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2) 精度较高。

关键词: 亚地震频段背景噪声; 潮汐频段背景噪声; 潮汐; Eterna 调和分析; Venedikov 调和分析

中图分类号: P315.726

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)04-0665-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0068

0 引言

重力仪是可以测量地球重力场变化的精密仪器, 能够检测到非常微小的重力变化, 具有高灵敏度、较宽的动态范围、较好的稳定性和可靠性 (孙和平, 2011), 这使得重力仪能够捕捉到长周期信号中的细微变化趋势。重力仪在长周期信号观测方面的优势使其成为研究地球潮汐、地壳运动、极移等地球物理现象的重要工具 (许厚泽, 2002)。重力仪观测到的重力数据质量可能受地球重力场变化、海洋潮汐、仪器精度、仪器漂移等因素影响 (祝意青等, 2020)。背景噪声水平是评

价观测数据质量和台站观测环境优劣的关键指标, 为台站选址、仪器校正以及观测数据用于地球动力学研究的潜力评估提供必要的前提和依据 (张苗苗, 2017)。为了更好地理解地球内部结构和动力学过程, 以及全面评估仪器性能, 评估亚地震频段和潮汐频段的背景噪声水平就显得尤为重要。

不同学者开展了重力背景噪声相关研究, 如 Rosat 等 (2005) 利用超导重力仪的 2 年观测数据进行分析评估, 认为超导重力站属于低噪声水平台站, 有利于探测低频信号; 江颖等 (2016) 通过对中国大陆的超导重力仪台站和弹簧重力仪台站背景噪声水平的评估, 揭示了不同台站之间的噪声水平差异; 孙和平等 (2017) 对比分析了重力潮汐观测资料及

* 收稿日期: 2024-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金 (42104088); 中国地震局地震研究所基本科研业务费专项资助项目和中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项资助项目 (IS202226326).

第一作者简介: 江颖 (1986-), 副研究员, 主要从事重力数据分析及应用研究. E-mail: jiangyingchen@126.com.

最新的全球海潮模型,发现台站周围环境因素对背景噪声水平有显著影响;张苗苗等(2015)评估了超导重力仪在亚地震频段的背景噪声水平,发现该频段的噪声水平评估方法与地震频段相似,且超导重力仪在这一频段的噪声水平较低,适合用来研究长周期地震和亚地震频段的信号;李响等(2024)研究了地震频段弹簧重力仪的背景噪声水平,发现不同台站的背景噪声水平差异较大,不同仪器的背景噪声水平也不相同。

目前,国家重力台网共有 80 台弹簧重力仪,数量较多,分布较广,便利完整的数据可以支撑进一步的对比分析研究。鉴于此,本文选择蓟县地震台同址观测的 3 种弹簧重力仪的连续观测数据,研究弹簧重力仪在亚地震频段和潮汐频段的背景噪声水平,并和国际同行的结果进行对比,给出不同弹簧重力仪在不同频段的背景噪声结果。

1 数据处理方法

1.1 亚地震频段

亚地震频段通常指的是 1~6 h 周期的振动信号,通过计算不同仪器的亚地震频段背景噪声水平,计算结果可以作为比较不同仪器性能的依据(邢乐林等,2010)。为了消除仪器漂移和残余潮汐信号的影响,更清晰地识别和分析重力数据中的信号、更准确地研究地球的自由振荡和其他相关现象。

在过去的研究中,使用超导重力仪进行观测的台站噪声水平可能非常低,大约为 0.07 μGal 。在这种情况下,如果采样间隔为 1 min,并且希望检测到 1 nGal 的信号,那么至少需要 2 000 个采样点,数据长度至少为 14 d。因此,选择连续 15 d 的最平稳时期进行亚地震频段的观测,可以确保信号的检测和分析具有高准确性和可靠性。这个时间窗口足够长,可以提供足够的数据点,从而确保信号检测不受随机噪声影响,也能够满足频谱分析需求。

本文采用与超导重力仪数据处理一致的方法,计算弹簧重力仪的亚地震频段的背景噪声水平,具体步骤如下:①选取重力台网以天为单位的重力和气压数据,不做任何处理,数据采样率为分钟采样。②扣除固体潮影响。③修正气压数据中

的间断、阶跃和尖峰等问题,并进行气压改正(大气导纳值为 -0.3 Gal/mbar)。④对数据使用高通滤波器滤波,截止频率设定为 8 h。⑤经过上述处理后,计算每一天的重力残差,并滚动计算连续 15 d 的 *RMS* 值,滑动窗口为一天。⑥将 *RMS* 值由小到大排序,选取 15 d 的 *RMS* 值最小且连续的原始重力数据,进行傅立叶变换,得到这 15 d 的平均振幅谱,计算其平均功率谱密度 (*PSD*)。⑦计算 *SSNM* 值。

1.2 潮汐频段

潮汐频段的范围是信号周期大于 6 h。通过对台站相对重力仪连续一年的观测数据进行分析,计算潮汐频段内的背景噪声水平,并且与其它重力仪的背景噪声水平进行比较,发现潮汐改正和气压改正可以显著改善噪声水平(韩宇飞等,2015)。在评估潮汐频段的背景噪声水平时,首先选取台网以天为单位的原始观测数据,数据采样率为分钟。修正重力和气压数据中的间断、突跳和阶跃等问题,将 1 min 采样率降为 1 h 采样率,利用 Eterna 或 Venedikov 方法进行调和分析(Wenzel, 1996; Venedikov *et al.*, 2003)。在 Eterna 方法的应用中,采用 Tamura 引潮位展开表,并采用高通滤波消除仪器漂移,当只考虑气压和极潮对台站的影响时,可以将某一特定时刻 t 的观测值 $y(t)$ 表示为 (Tamura, 1987):

$$y(t) = \sum_{m=1}^M \delta_m \sum_{n=\alpha_m}^{\beta_m} A_{mn} \cos(\omega_{mn}t + \varphi_{mn} + \Delta\varphi_m) + Dr(t) + \sum_{k=0}^K a_k P(t-k) + b \cdot Pole(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

式中: M 代表波群的总数;对于第 m 个波群中的第 n 个潮波分量, A_{mn} 、 ω_{mn} 和 φ_{mn} 分别代表理论振幅、角频率和初始相位; δ_m 和 $\Delta\varphi_m$ 是第 m 个波群中的振幅因子和相位滞后,需要通过计算得到; $Dr(t)$ 表示仪器的零点漂移; $P(t)$ 和 $Pole(t)$ 分别是气压和极潮的观测值; a_k 和 b 是气压和极潮的回归系数; $\varepsilon(t)$ 代表观测误差。

Venedikov 等(2003)提出了一种潮汐分析方法,该方法利用 48 阶奇偶滤波器计算潮汐的周日、半日和 1/3 日波分量,这些分量被用来估计潮汐参数。目前,国家重力台网中心运用这种方法,结合 Nakai 检验方法和数字滤波技术来评估连续重力

观测资料。Venedikov 等 (2003) 引入 Tamura 的 1 200 个分波潮波表, 并将气压等辅助观测序列、分段多项式方法纳入潮汐分析数学模型, 增强了程序分析潮汐观测数据的能力 (Venedikov *et al*, 2003)。在 Venedikov 方法的应用中, 可以将固体潮某特定时刻 t 观测值 $y_1(t)$ 表示为:

$$y_1(t) = \sum_{j=1}^N h_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) + \sum_{k=1}^q b_k P_k(t) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

式中: N 为波群总数; h_j 是第 j 个潮波的观测振幅; ω_j 是第 j 个潮波的角频率; 当 $t=0$ 时, φ_j 为该时刻的初相位; $P_k(t)$ 是逼近零点漂移所选择的时间 t 的 k 阶多项式; $\varepsilon(t)$ 是观测误差。

2 亚地震频段和潮汐频段噪声水平分析

2.1 15 d 重力数据的功率谱密度

在对连续 15 d 观测数据的分析中, 重点是验证数据的完整性、干扰因素以及异常值是否存在。在进行噪声水平分析之前, 没有对原始数据进行任何预处理。随机选取蓟县地震台 gPhone、DZW 和 GS-15 型重力仪连续 15 d 的原始重力观测数据, 对其使用 1.1 节中数据处理方法进行处理, 以此评估不同型号重力仪在亚地震频段对环境噪声的响应差异。图 1 分别给出了 gPhone、DZW 和

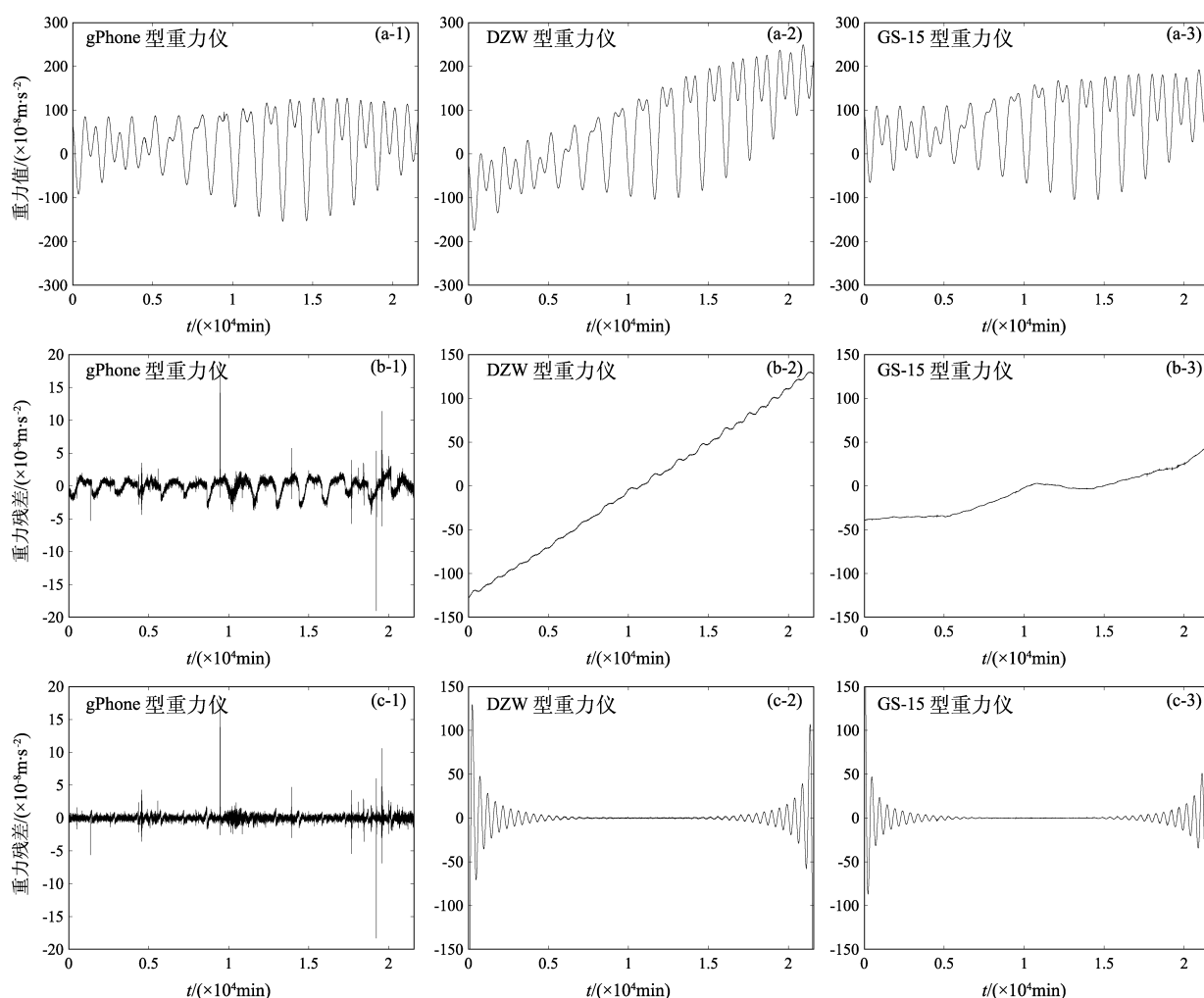


图 1 3 台重力仪连续 15 d 的原始重力观测值 (a)、扣除理论固体潮和大气改正后的重力残差 (b) 和使用截止频率为 8 h 的高通滤波器滤波后的重力残差 (c)

Fig. 1 Original gravity observations from the three gravimeters in a continuous 15-day period (a), gravity residuals after atmospheric corrections and subtracting theoretical solid tide (b), and gravity residuals after applying a high-pass filter with a cutoff frequency of 8 hours (c)

GS-15 型重力仪最平静的连续 15 d 的原始重力数据、扣除固体潮和气压改正后的重力数据以及利用截止频率为 8 h 的高通滤波器滤波后的重力残差功率谱。

从图 1 可以看出, gPhone 和 GS-15 型重力仪的原始重力观测曲线的振幅较为相近, 大约为 $300 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, DZW 型重力仪记录到的原始重力数据有明显的漂移。扣除固体潮并进行气压改正后, 数据质量有所改善, 3 种型号重力仪的重力残差振幅分别为 10×10^{-8} 、 250×10^{-8} 和 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 其中 DZW 型重力仪重力残差信号振幅最大、漂移最为明显。

本文选取 2022 年蓟县地震台 3 种型号重力仪的连续重力观测数据, 分别进行在亚地震频段的背景噪声水平计算, 发现 gPhone、DZW 和 GS-15 型重力仪的固体潮数据平静期分别为 7 月 30 日—8 月 13 日、7 月 4 日—18 日、7 月 29 日—8 月 12 日。3 台仪器平静期较为相近, 根据 RMS 值选取的 gPhone、GS-15 型重力仪的平静期前后仅相差 1 d。3 台重力仪最平静 15 d 的固体潮数据, 经过气压改正、高通滤波后得到重力残差, 并利用 101 个点的 Parzen 窗对其做平滑处理, 得到重力残差的功率谱, 结果如图 2 所示。

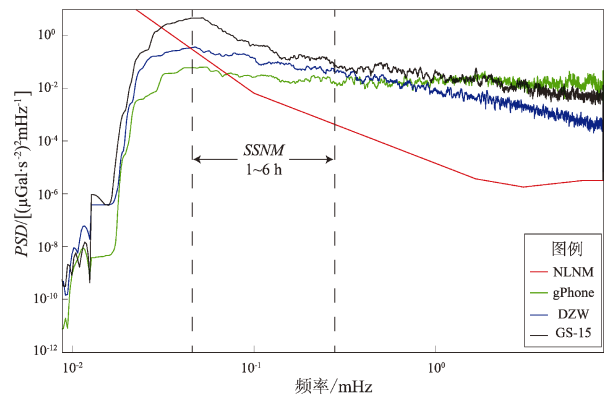


图 2 蓟县地震台 3 台重力仪固体潮观测数据平静期重力残差的功率谱密度

Fig. 2 Power Spectral Density (PSD) of gravity residuals of three gravimeters at Jixian Station during the calm period

从图 2 可以看出, 在亚地震频段, gPhone 型重力仪的噪声水平低于 DZW 和 GS-15 型。根据 1~6 h 频段的平均功率谱, 得到 gPhone、DZW 和

GS-15 型重力仪的 SSNM 值分别为 3.91、4.48 和 5.20。

图 3 给出了 25 台重力仪在亚地震频段的背景噪声水平, 其中超导重力仪结果源自 GGP (Global Geodynamics Project) 中 19 个台站 (Rosat *et al.*, 2004) 以及拉萨台和武汉台 (张苗苗等, 2015)。根据图 3 可知, 25 台重力仪中, 有 16 台超导重力仪的背景噪声水平低于新低噪声模型 (NLNM) (Peterson, 1993), 一半以上的超导重力仪的 SSNM 值小于 3。相比拉萨台 C032 型超导重力仪, 武汉台 iGrav-007 和 OSG-065 型超导重力仪较新, 噪声水平整体偏低。蓟县台 3 台重力仪的 SSNM 值均高于 NLNM 值, 其中, gPhone 型重力仪噪声水平高于 95% 的超导重力仪, 其 SSNM 值约为 Mo 台站的 2 倍。

将 2022 年蓟县台 3 种不同类型重力仪在亚地震频段和地震频段的背景噪声水平 (李响等, 2024)

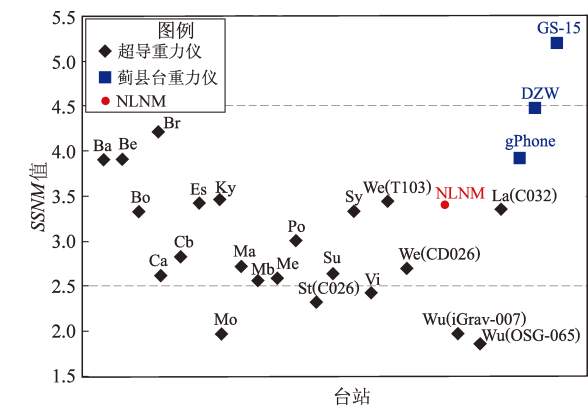


图 3 重力仪在亚地震频段的背景噪声水平

Fig. 3 Background noise levels of gravimeters in the seismic sub-frequency band

表 2 2022 年蓟县台 3 种类型重力仪在亚地震频段的背景噪声水平							
Tab. 2 Background noise levels in the seismic sub frequency band of gravimeters at Jixian Station in 2022							
重力仪 型号	采样 率	最平静 15 d 天数	15 d 的 RMS	平均 PSD/ [(μGal · s ⁻²) ² mHz ⁻¹]	SNM 值	SSNM 值	
gPhone	min	211 ~ 225	0.339 8	25.720 4	3.355	3.910	
DZW	min	185 ~ 199	0.229 6	95.006 0	3.497	4.478	
GS-15	min	210 ~ 224	0.501 8	495.665 3	3.543	5.195	

汇总于表2。从表2可发现, $SSNM$ 值和 SNM 值呈正相关, 这与 Rosat (2005) 得出的 SNM 值和 $SSNM$ 值具有线性强相关性的结论一致。因此可以推断, 地震频段的背景噪声越大, 亚地震频段的背景噪声也越大, 台站背景噪声水平就越高, 反之亦然。

2.2 潮汐频段背景噪声水平分析

对 gPhone、DZW 和 GS-15 型重力仪在潮汐频段的背景噪声水平进行比较分析。首先对 2022 年的原始观测数据 (1 min 采样率) 使用 1.2 节中数

据处理方法进行预处理, 蓟县台 3 台重力仪预处理后的重力数据和气压数据, 如图 4 所示。

使用 Eterna 方法对预处理后的数据进行调和和分析。采用 Tamura (1987) 提出的潮位展开表, 运用高通滤波剔除仪器漂移的影响, 同时对气压变化的影响进行了改正。刘清超等 (2016) 在南极中山站利用 LCR-ET21 型弹簧重力仪也进行过类似的研究, 表 3 给出了 4 种重力仪在不同潮汐频段的噪声水平进行对比分析。

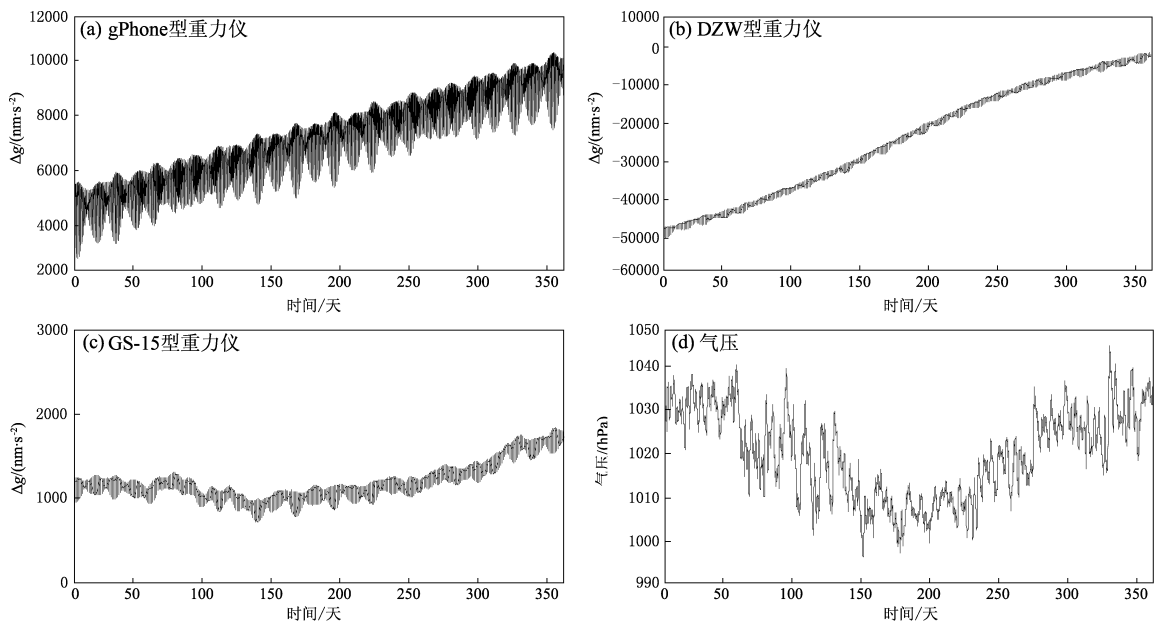


图 4 蓟县台重力仪原始数据经过间断、突跳、阶跃修正后的小时采样重力数据和气压数据

Fig. 4 Hourly-sampled values of gravity after intermittent correction, abrupt-change correction, and step-change correction at Jixian Station, and barometric recordings

表 3 不同重力仪不同潮汐频段的背景噪声水平
Tab. 3 Background noise levels of gravimeters in different tidal frequency bands 单位: nm/s^2

频段	LCR-ET21 型	gPhone 型	DZW 型	GS-15 型
周日	0.576 611	0.140 759	0.385 193	2.186 064
半日	0.269 850	0.127 767	0.295 117	1.059 061
1/3 日	0.152 567	0.143 756	0.147 886	0.491 094
1/4 日	0.098 355	0.131 904	0.104 082	0.369 267

从表 3 可以看出, 除去 1/4 日频段, gPhone 型重力仪的噪声水平普遍低于 DZW 和 GS-15 型重力仪。DZW 型重力仪在所有潮汐频段的噪声水平均低于 GS-15 型重力仪, 特别是在周日频段, 差异更为显著, 可达 5.7 倍之多。可能由于南极噪声

比较大, gPhone 型和 DZW 型重力仪在所有频段的噪声水平都低于中山站的 LCR-ET21 型重力仪。

表 4 列出 gPhone、DZW 和 GS-15 型重力仪的观测资料通过调和和分析得到的主要潮波 (O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2) 的潮汐参数, 包括振幅因子 δ 和相位滞后 $\Delta\varphi$ 及其均方根误差。由表 4 可见, gPhone 型重力仪得到的潮汐参数的均方根误差普遍小于其它 2 种重力仪。由于 GS-15 型重力仪仪器老化严重, 本文着重比较 gPhone 和 DZW 型重力仪的潮汐参数。gPhone 和 DZW 型重力仪的 O_1 和 K_1 潮波的差距接近 3 倍, M_2 和 S_2 潮波的差距达到 2 倍多。实际上, gPhone 型重力仪在调和和分析中得到高精度的潮汐参数, 如 O_1 波的精度为 0.33‰, K_1 波的精度为 0.26‰, M_2 波的精度为 0.24‰, S_2 波的精度为 0.53‰。

表 4 蓟县台 3 台重力仪调和得到的主要潮波潮汐参数

Tab. 4 The main tidal parameters of the 3 gravimeters at Jixian Station obtained from the harmonic analysis

波群	gPhone 型		DZW 型		GS - 15 型	
	δ/RMS	$\Delta\varphi(^{\circ})/RMS$	δ/RMS	$\Delta\varphi(^{\circ})/RMS$	δ/RMS	$\Delta\varphi(^{\circ})/RMS$
O_1	1. 164 20/0. 000 33	0. 276 0/0. 016 2	1. 134 07/0. 000 90	-0. 009 0/0. 045 4	1. 159 46/0. 005 10	-0. 564 7/0. 252 1
K_1	1. 145 04/0. 000 26	0. 096 9/0. 012 8	1. 113 99/0. 000 70	-0. 177 4/0. 036 1	1. 135 69/0. 003 98	0. 318 5/0. 200 8
M_2	1. 164 13/0. 000 24	0. 139 0/0. 011 9	1. 133 98/0. 000 56	-0. 462 8/0. 028 1	1. 145 24/0. 002 00	-0. 296 1/0. 099 9
S_2	1. 165 37/0. 000 53	-0. 129 1/0. 030 2	1. 134 13/0. 001 21	-0. 640 3/0. 071 7	1. 170 01/0. 004 37	0. 608 6/0. 248 5

表 5 给出了 gPhone、DZW 和 GS - 15 型重力仪在地震频段、亚地震频段和潮汐频段的背景噪声水平 (Rosat *et al*, 2004; 李响等, 2024)。从表 5 可以看出, 在地震频段、亚地震频段和潮汐频段, 相较于 DZW 和 GS - 15 型重力仪, gPhone 型重力仪的背景噪声较低。因此, *TNM* 值和 *SNM* 值具有一定的相关性, 与 Rosat 等 (2004) 计算得出 19 个台站的超导重力仪的 *SNM* 值和 *TNM* 值具有线性相关性的结论一致。

图 5 给出了蓟县台 3 台重力仪和 GGP 中 19 个台站超导重力仪 (Rosat *et al*, 2004) 在潮汐频段背景噪声水平的对比情况。从图 5 可看出, 19 台

表 5 2022 年蓟县台 3 台重力仪在不同频段的背景噪声水平
Tab. 5 Background noise levels of the 3 gravimeters
in the tidal frequency band in 2022

重力仪型号	<i>SNM</i> 值	<i>SSNM</i> 值	<i>TNM</i> 值
gPhone 型	3. 355	3. 910	5. 514
DZW 型	3. 497	4. 478	6. 681
GS - 15 型	3. 543	5. 195	8. 007

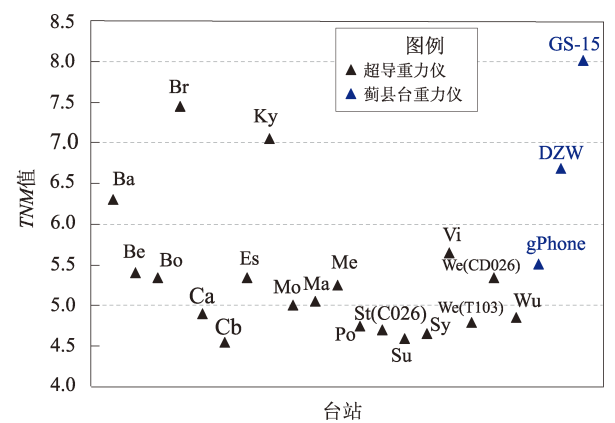


图 5 重力仪在潮汐频段的背景噪声水平
Fig. 5 The background noise level of gravimeters
in tidal frequency band

超导重力仪中, 约 50% 的超导重力仪的背景噪声水平小于 5, 80% 的超导重力仪的背景噪声水平小于 5. 5。gPhone 型重力仪在潮汐频段噪声水平高于部分超导重力仪。

2. 3 不同方法调和结果对比

选取 2022 年蓟县地震台 3 种重力仪的小时采样的重力数据进行平均滤波和降采样处理, 以达到分钟的采样频率, 并结合该台站的气压观测数据, 分别运用 Eterna 和 Venedikov 调和方法进行潮汐分析。两种分析均使用了 Tamura 分波表中的 1 200 个潮波进行计算, 均得到各个潮汐波群的潮汐参数 (Tamura, 1987)。固体潮参数指标是评估观测数据质量的关键工具, 包括 Nakai 检验百分比、 M_2 潮汐因子、 M_2 潮汐因子中误差和相对中误差等。由于蓟县台位于中纬度地区, M_2 波在中纬度的振幅最大, 所以通过对比观测固体潮 M_2 波振幅与理论固体潮 M_2 波振幅的比值及其标准差、 M_2 潮汐因子与 M_2 潮汐因子中误差的比值来评价台站数据质量的可靠性。

表 6 和 7 给出了分别采用 Eterna 方法和 Venedikov 方法对蓟县地震台的重力固体潮观测数据进行调和结果, 并提供了详细的波群信息, 包括每个波群的起始频率和终止频率、振幅因子及其均方根误差以及相位滞后及其均方根误差。均方根误差是观测值与理论值之间差异的平方的平均值, 是衡量观测数据集中趋势的指标, 反映了观测误差的平均水平。均方差越小, 表示观测数据的波动越小, 观测结果越稳定。表 6、7 显示, 所有的波群中理论振幅最大的波群为 M_2 、 O_1 、 K_1 、 S_2 , 而相应的振幅因子中误差远小于其他潮波的中误差, 因此潮波振幅越大, 中误差越小。

表6 采用 Eterna 方法对蓟县台重力仪重力数据进行调和分析

Tab. 6 Harmonic analysis of gravimeters' recordings at Jixian Station through Eterna method

波群名称	起始频率/cpd	终止频率/cpd	波群理论振幅/($\times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	δ/RMS	$\Delta\varphi(^{\circ})/RMS$
Q_1	0.501 370	0.911 390	5.858 09	1.164 86/0.001 65	0.345 5/0.081 2
O_1	0.911 391	0.947 991	30.596 54	1.164 20/0.000 33	0.276 0/0.016 2
M_1	0.947 992	0.981 854	2.406 30	1.153 74/0.005 43	0.031 1/0.269 6
P_1	0.981 855	0.998 631	14.236 50	1.159 43/0.000 85	0.041 6/0.041 7
S_1	0.998 632	1.001 369	0.336 66	1.285 59/0.057 04	15.024 1/2.803 0
K_1	1.001 370	1.004 107	43.030 58	1.145 04/0.000 26	0.096 9/0.012 8
J_1	1.023 623	1.057 485	2.406 21	1.166 12/0.004 60	-0.067 6/0.225 8
OO_1	1.057 486	1.470 243	1.316 63	1.164 34/0.005 84	-0.823 2/0.287 5
$2N_2$	1.470 244	1.880 264	1.344 37	1.171 86/0.006 98	0.236 4/0.340 8
N_2	1.880 265	1.914 128	8.418 32	1.168 65/0.001 39	-0.085 3/0.068 0
M_2	1.914 129	1.950 419	43.969 04	1.164 13/0.000 24	0.139 0/0.011 9
L_2	1.950 420	1.984 282	1.24279	1.160 03/0.004 58	0.196 9/0.226 3
S_2	1.984 283	2.002 738	20.456 71	1.165 37/0.000 53	-0.129 1/0.030 2
K_2	2.002 739	2.451 943	5.561 18	1.167 97/0.001 50	0.208 5/0.073 6
M_3	2.451 944	7.000 000	0.661 09	1.062 63/0.017 03	0.780 7/0.918 2

表7 采用 Venedikov 方法对蓟县台重力仪数据进行调和分析

Tab. 7 Harmonic analysis of gravimeters' recordings at Jixian Station through Venedikov method

波群名称	起始频率/cpd	终止频率/cpd	波群理论振幅/($10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	δ/RMS	$\Delta\varphi(^{\circ})/RMS$
Q_1	0.820 351	0.903 576	6.838 50	1.166 78/0.003 12	-0.186 93/0.153 35
O_1	0.923 765	0.939 868	35.603 89	1.163 08/0.000 58	0.222 87/0.028 43
M_1	0.958 232	0.974 188	2.750 26	1.142 56/0.008 97	-0.018 41/0.449 71
P_1	0.991 786	0.998 028	16.589 19	1.164 41/0.001 39	0.017 64/0.068 60
S_1	0.999 999	1.000 145	0.449 77	1.331 31/0.084 46	-174.879 19/3.621 50
K_1	1.001 971	1.010 951	49.268 44	1.144 43/0.000 43	0.081 67/0.021 29
J_1	1.031 434	1.044 652	2.841 59	1.180 51/0.007 92	-0.093 99/0.384 74
OO_1	1.065 607	1.112 688	1.542 42	1.169 51/0.010 61	-0.858 25/0.519 92
$2N_2$	1.787 107	1.872 141	9.875 57	1.173 44/0.003 29	-0.275 39/0.160 90
N_2	1.890 211	1.903 576	1.577 86	1.174 22/0.0169 5	0.018 04/0.827 93
M_2	1.924 678	1.940 487	51.206 57	1.164 92/0.000 55	0.015 70/0.027 18
L_2	1.960 970	1.969 478	1.405 93	1.131 46/0.010 18	0.331 88/0.515 60
S_2	1.974 041	2.000 618	23.942 26	1.170 74/0.001 07	0.281 51/0.053 08
K_2	2.002 737	2.079 119	1.0326 2	0.185 53/0.032 98	-4.869 01/10.186 40
M_3	2.825 827	2.971 906	0.694 06	1.050 21/0.013 18	1.622 95/0.719 05

Eterna 方法采用了最小二乘谐波分析,可精确分离各潮汐波,更适用于长期连续观测。Venedikov 方法基于潮汐频带滤波,将数据分成不同频段后进行分析。由于使用的分析方法不同,每种波群的频

率范围也略有不同,经过调和分析后,得到的振幅因子的中误差也有差别。本文选取的是一年的数据,对于振幅比较大的 M_2 、 O_1 、 K_1 、 S_2 ,采用 Eterna 方法得到的振幅因子中误差比较小。

3 结论

本文基于 2022 年蓟县地震台 3 台不同型号的弹簧重力仪——gPhone 型、DZW 型和 GS-15 型的连续观测数据, 计算了 3 台重力仪在地震频段、亚地震频段和潮汐频段的背景噪声水平, 得到以下主要结论:

(1) 在亚地震频段, gPhone 型重力仪展现出比 DZW 型和 GS-15 型更低的噪声水平。通过分析 1~6 h 频段内的平均 *PSD*, 得到 gPhone、DZW 和 GS-15 型重力仪的 *SSNM* 值分别为 3.91、4.48 和 5.20。这表明在该频段 gPhone 型重力仪噪声水平最低。评估 3 种类型仪器在地震频段和亚地震频段的背景噪声水平, 发现 *SSNM* 值与 *SNM* 值之间存在正相关关系。

(2) 在潮汐频段, gPhone、DZW 和 GS-15 型重力仪的 *TNM* 值分别为 5.514、6.681 和 8.007, *TNM* 值与 *SNM* 值之间存在一定的相关性。

(3) 通过 Eterna 和 Venedikov 方法的调和分析结果发现, 相比于 DZW 和 GS-15 型重力仪, gPhone 型重力仪的主要潮波 (O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2) 精度较高。

感谢中国地震台网中心国家地震科学数据中心 (<http://data.earthquake.cn>) 提供数据支撑。

参考文献:

- 韩宇飞, 江颖, 张晓彤, 等. 2015. 陆态网络太原台 gPhone 重力仪背景噪声水平研究[J]. 大地测量与地球动力学, 35(5): 898-900.
- Han Y F, Jiang Y, Zhang X T, *et al.* 2015. Research on Taiyuan gPhone gravimeter background noise level of CMONOC[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 35(5): 898-900. (in Chinese)
- 江颖, 刘子维, 张苗苗, 等. 2016. 超导重力仪背景噪声水平分析[J]. 大地测量与地球动力学, 36(8): 689-693.
- Jiang Y, Liu Z W, Zhang M M, *et al.* 2016. Research on background noise level of global superconducting gravimeter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 36(8): 689-693. (in Chinese)
- 李响, 江颖, 刘子维, 等. 2024. 蓟县地震台 gPhone、DZW 和 GS-15 重力仪重力噪声水平对比[J]. 大地测量与地球动力学, 44(5): 528-533.
- Li X, Jiang Y, Liu Z W, *et al.* 2015. Comparison of background noise level

- based on gPhone, DZW, and GS-15 gravimeters at Jixian seismostation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 44(5): 528-533. (in Chinese)
- 刘清超, 孙和平, 徐建桥, 等. 2016. 南极中山与昭和站重力海潮负荷效应及背景噪声研究[J]. 地球物理学报, 59(8): 2773-2782.
- Liu Q C, Sun H P, Xu J Q, *et al.* 2016. The research of ocean tide loading effects on gravity and ambient noise at Zhongshan and Syowa Station in Antarctic[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2773-2782. (in Chinese)
- 孙和平, 刘清超, 吴书清, 等. 2017. 北京地区最新重力潮汐结果及其在检测液核共振效应中的应用[J]. 地球物理学报, 60(12): 4699-4708.
- Sun H P, Liu Q C, Wu S Q, *et al.* 2017. The latest gravity tide results in Beijing and its application in detecting resonant effect of the fluid outer core[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12): 4699-4708. (in Chinese)
- 孙和平. 2011. 高精度超导重力仪器在地球内部动力学和结构的应用研究[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 14. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- Sun H P. 2011. Application research of high-precision superconducting gravity instrument in the dynamics and structure of the Earth's interior[C]//Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 14. Hefei: University of Science and Technology of China Press. (in Chinese)
- 邢乐林, 李辉, 夏正超, 等. 2010. CG-5 重力仪零漂特性研究[J]. 地震学报, 32(3): 369-373.
- Xing L X, Li H, Xia Z C, *et al.* 2010. Study on zero drift characteristics of CG-5 gravimeter[J]. Acta Seismologica, 32(3): 369-373. (in Chinese)
- 许厚泽. 2002. 地球各圈层相互作用的大地测量研究和检测[J]. 大地测量与地球动力学, 22(4): 1-5.
- Xu H Z. 2002. Geodetic research and detection on the interaction between various earth layers[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 22(4): 1-5. (in Chinese)
- 张苗苗, 徐建桥, 孙和平, 等. 2015. 拉萨 OSG-057 超导重力仪台站在不同频段的背景噪声水平[C]//中国地球物理学会. 2015 中国地球科学联合学术年会论文集(十六)——专题 44: 地球重力场及其地质应用, 专题 45: 不同尺度微地震监测研究进展和展望, 1052. 北京: 中国和平音像电子出版社.
- Zhang M M, Xu J Q, Sun H P, *et al.* 2015. The background noise level of Lhasa OSG-057 superconducting gravimeter station in different frequency bands[C]//Proceedings of the 2015 China Earth Science Joint Academic Annual Conference(16)-Topic 44: Earth Gravity Field and Its Geological Applications, Topic 45: Progress and Prospects of Microseismic Monitoring at Different Scales, 1052. Beijing: China Peace and Video Publishing House. (in Chinese)
- 张苗苗. 2017. 超导重力仪台站背景噪声水平评估及信号提取[J].

- 测绘学报, 46(4):535.
- Zhang M M. 2017. Estimation of the background noise levels and extraction of signals at SG stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(4):535. (in Chinese)
- 祝意青, 申重阳, 刘芳, 等. 2020. 重力观测地震预测应用研究[J]. *中国地震*, 36(4):708–717.
- Zhu Y Q, Shen C Y, Liu F, *et al.* 2020. Application of earthquake prediction based on gravity observation[J]. *Earthquake Research in China*, 36(4):708–717. (in Chinese)
- Peterson J. 1993. Observations and modelling of seismic background noise [R]. New Mexico; U S Department of Interior, Geological Survey, Albuquerque.
- Rosat S, Hinderer J, Boy J P, *et al.* 2018. A two – year analysis of the iOSG – 24 superconducting gravimeter at the low noise underground laboratory (LSBB URL) of Rustrel, France; Environmental noise estimate[J]. *Journal of Geodynamics*, 119:1–8.
- Rosat S, Hinderer J, Crossley D, *et al.* 2004. Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides[J]. *Journal of Geodynamics*, 38(3–5):461–476.
- Rosat S, Sato T, Imanishi Y, *et al.* 2005. High-resolution analysis of the gravest seismic normal modes after the 2004 $M_w = 9$ Sumatra earthquake using superconducting gravimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 32:pp. 13304.
- Tamura Y. 1987. A harmonic development of the tidal generating potential [J]. *Bull Inf. Marees Terrestres*, 99:6813–6855.
- Venedikov P A, Arnoso J, Vieira R. 2003. VAV: a program for tidal data processing[J]. *Computers and Geosciences*, 29(4):487–502.
- Wenzel H G. 1996. The nanogal software: data processing package ETERNAL 3.3 [J]. *Bull Inf Marees Terrestres*, 124:9425–9439.

Comparative Analysis of the Gravity Noise Levels of Three Different Types of Gravimeters in Seismic Sub-frequency Band and Tidal Frequency Band

JIANG Ying^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, ZHANG Xiaotong^{1,2}, LIU Ziwei^{1,2}, LIU Qingchao^{1,2}, ZHOU Hao^{1,2}

(1. *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China*)

(2. *Wuhan Gravitation and Solid Earth Tides, National Observation and Research Station, Wuhan 430071, Hubei, China*)

Abstract

We analyzed continuous gravity data observed by three gravimeters gPhone, DZW, and GS – 15 at Jixian Seismic Station throughout the year 2022. We calculated the background noise level ($SSNM$) of these gravimeters in seismic sub-frequency band (1–6 Hz) and the background noise level (TNM) in tidal frequency band (>6 Hz). Then we discussed the correlation between the two kinds of background noises, and compared the Eterna harmonic analysis method with the Enedikov harmonic analysis method. The results indicate that: (1) In the sub – seismic frequency band, the $SSNM$ values for the gPhone, DZW, and GS – 15 gravimeters are 3.91, 4.48, and 5.20 respectively. A positive correlation was observed between $SSNM$ and (SNM). (2) In the tidal frequency band, the TNM values for the gPhone, DZW, and GS – 15 gravimeters are 5.514, 6.681, and 8.007 respectively, suggesting a correlation between TNM and SNM . (3) Harmonic analysis reveals that the main tidal waves (O_1 , K_1 , M_2 , S_2) recorded by gPhone are more accurate than the ones recorded by DZW and GS – 15. For tidal waves with smaller amplitudes and longer periods, both the Eterna method and the Venedikov method exhibited relatively large errors.

Keywords: background noise in seismic sub-frequency band; background noise in tidal band; tidal waves; the Eterna harmonic analysis; the Venedikov harmonic analysis