

iGrav-007 超导重力仪格值的精密测定

贾剑钢¹ 栾 威¹ 申文斌^{1,2}

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要: iGrav 超导重力仪是当前世界上最新型的便携式相对重力仪,可提供最稳定和最高精度的连续相对重力测量。利用武汉九峰台站 FG5-112 绝对重力仪与 iGrav-007 超导重力仪连续 3 天的同址观测结果,基于最小二乘线性回归和迭代算法,精密确定 iGrav-007 的格值。数据处理结果表明, iGrav-007 的格值为 $(-91.640 \pm 0.085) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{V}$, 相对标定精度为 0.092 9%, 连续 1 天的 FG5 绝对重力观测获得的格值精度优于 0.2%, 连续 3 天的 FG5 绝对重力观测获得的格值精度优于 0.1%。

关键词: iGrav-007; FG5-112; 超导重力仪; 格值; 精度分析

中图法分类号:P223

文献标志码:A

超导重力仪(superconducting gravimeter, SG)被认为是观测精度最高、稳定性和连续性最好的地球重力信号观测仪器,对重力场变化的灵敏度很高,广泛应用于时变重力场研究^[1-3]。1997 年 7 月启动的全球地球动力学计划(global geodynamics projects, GGP)为研究全球地球动力学现象,包括固体地球重力潮汐、重力场与海洋大气的耦合效应、地球自由章动、固态内核的平动振荡、固态地幔的自由振荡、地球自转变化和长期地壳运动等导致的重力效应提供了全球超导重力仪观测资料^[2,3],该计划的实施即利用全球超导重力仪观测网络获得的重力场时变研究地球物理学和地球动力学中的国际焦点问题^[4-6]。因超导重力仪的原始观测值为重力反馈电压,需对其进行格值标定才能转换为重力值,故超导重力仪格值的精密测定是利用其高精度观测数据反演地球物理学现象的必要前提,当前潮汐模型的优化要求该项格值的标定精度为 0.1% 的量级或更高^[7,8]。

本文基于最小二乘线性回归和迭代算法,采用比测法^[9],利用 FG5-112 绝对重力仪(absolute gravimeter, AG)与 iGrav-007 超导重力仪于 2013 年在武汉九峰台站连续 3 天的同址、同期观测,精密测定 iGrav-007 的格值,并分析仪器漂移和比测数据个数对格值及精度的影响;基于 iGrav-007 连续 5 个月的观测数据,采用线性拟合

和最小二乘滤波分析仪器漂移和观测精度,验证格值标定的准确性。

1 AG 和 SG 同址观测及精度评定方法

1.1 同址观测

FG5 绝对重力仪由美国 Micro-g 公司生产,该仪器基于自由落体原理测量垂直加速度,设计精度达 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 是目前世界上精度最高的绝对重力仪^[10]。中国科学院测量与地球物理研究所于 1995 年引进了一台 FG5-112, 1996 年 FG5-112 在中国大陆中西部 15 个绝对重力点的观测精度为 $(0.81 \sim 2.78) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ^[11]; 2010 年在武汉组织的国内所有 FG5 比测试验中, FG5-112 的观测精度为 $(1.4 \sim 2.0) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ^[12], 两次试验结果表明 FG5-112 保持着较高的稳定性, 保证了对 iGrav-007 格值标定的准确性。

iGrav 超导重力仪由美国 GWR 仪器公司生产,以稳恒超导电流为核心的工作原理使其具有极高的稳定性:零漂小于 $0.5 \mu\text{Gal}/\text{月}$, 是目前世界上最稳定的相对重力仪。与广泛应用于世界各地地球动力学研究项目的 OSG 超导重力仪相比, iGrav 设计简单, 价格略低, 易于使用; 其观测灵敏度在频域中为 $1 \text{ nanoGal} (1 \times 10^{-9} \text{ Gal})$, 在时

域中 1 min 平均值为 $0.05 \mu\text{Gal}$ ^[13]。武汉大学于 2012 年引进了一台 iGrav-007, 2013 年 3 月安装于武汉九峰观测站。

为获得高精度的 iGrav-007 的格值, 2013 年 6 月 20 日 23:30:00 至 24 日 01:19:55, 在武汉九峰观测站进行了长约 74 h 的与 FG5-112 同址、同期观测。两台仪器平行架设于观测室内, 相距不到 10 m, 观测环境基本保持一致, 测点重力场变化几近相同。

FG5-112 采用如下观测方案: 每 50 min 观测一组, 每组落体次数为 150 次, 单次落体的观测时间为 20 s, 除开始两组之间停测 10 min 15 s, 其他均为每 50 min 停测 10 min, 故总共 74 组落体观测, 理论上可获得 11 100 个观测值。iGrav-007 采样率为 1 Hz。由于 FG5 获取的观测值 g_{nontide} 已剔除了固体潮 g_{tide} 和海潮 g_{ocean} 的影响, 为了便于比较, 用 $g_{\text{nontide}} + g_{\text{tide}} + g_{\text{ocean}} - G$ (G 为 FG5-112 所在绝对重力点的多年平均重力值, 为一常数) 来获得重力变化值。图 1(a) 给出了比测期间 FG5-112(用“+”表示的粗线, 单位为 10^{-8} m/s^2 , 且为了与超导重力仪相比较, 观测值已乘以 -1) 和 iGrav-007(用“·”表示的细线, 单位为 V, 且只保留与 FG5-112 数据获取时刻一致的观测数据) 的原始观测值。可见比测期间潮汐变化较大, 这对于使格值快速达到所需的精度更有利^[14]; 比测期间仪器数据记录良好, 且无间断现象, iGrav-007 观测十分平滑, 而 FG5-112 有许多离散值, 这些离散值的误差源包括激光问题、时钟漂移、环境或微震噪声等^[15], 在计算格值时须剔除。

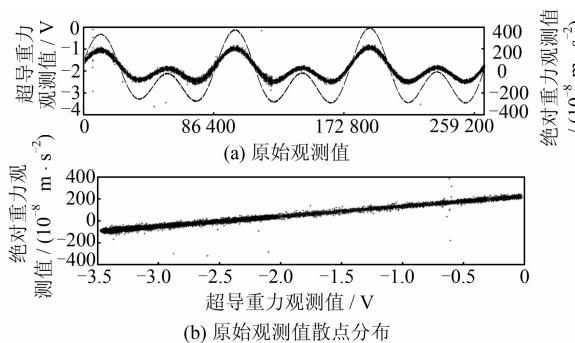


图 1 FG5-112、iGrav-007 原始观测值和原始观测值散点分布

Fig. 1 Original Observations and Scatter Distribution of FG5-112 and iGrav-007

1.2 最小二乘线性回归原理

从图 1(b) 散点分布图可见, 样本点呈条状分布, 两个时间序列观测值呈良好的线性关系。设自变量 $V(t)$ 为 iGrav-007 的观测值(单位 V), 因

变量 $y(t)$ 为 FG5-112 的观测值(单位 10^{-8} m/s^2), 根据样本相关系数计算公式:

$$r = \frac{n \sum_{t=1}^n V(t)y(t) - \sum_{t=1}^n V(t) \sum_{t=1}^n y(t)}{\sqrt{n \sum_{t=1}^n V^2(t) - (\sum_{t=1}^n V(t))^2} \sqrt{n \sum_{t=1}^n y^2(t) - (\sum_{t=1}^n y(t))^2}} \quad (1)$$

算得样本点的相关系数为 -0.9914, 判定两变量为高线性的负相关, 故可采用如下一元线性回归模型:

$$y(t) = aV(t) + b + \epsilon \quad (2)$$

式中, a 、 b 为线性回归系数, 且 a 为超导重力仪的格值(单位 $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{V}$)。

为使估计直线 $\hat{y}(t) = \hat{a}V(t) + \hat{b}$ 最佳拟合于绝对重力观测值, 应使各观测点到该直线的偏差平方和最小, 即要求 a 、 b 的估值使

$$S(\hat{a}, \hat{b}) = \sum_{t=1}^n \epsilon^2(t) = \sum_{t=1}^n (y(t) - \hat{a}V(t) - \hat{b})^2 = \min \quad (3)$$

取微分, 解得回归系数最小二乘估计 \hat{a} 、 \hat{b} 。

令 $\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n V(t)$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y(t)$, 有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{a} = \frac{\sum_{t=1}^n (V(t) - \bar{V})(y(t) - \bar{y})}{\sum_{t=1}^n (V(t) - \bar{V})^2} \\ \hat{b} = \bar{y} - \hat{a}\bar{V} \end{array} \right. \quad (4)$$

1.3 回归系数的不确定度评定方法

由于 \hat{a} 、 \hat{b} 是根据有误差的观测数据点算得的, 无法避免偏差的存在, 且各观测数据点并非都与拟合线准确重合, 绝对重力观测值 $y(t)$ 与对应于拟合直线上的 $\hat{y}(t)$ 间也有偏差。为衡量所有随机误差对 $y(t)$ 的平均偏差大小, 需计算残差标准差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{t=1}^n (y(t) - \hat{y}(t))^2} \quad (5)$$

σ 越小, 回归直线的精度越高, 当回归方程的稳定性较好时, σ 可作为回归方程的精度参数。下文迭代计算中, 在未知观测值中误差的情况下, 用残余标准差替代中误差。

对于超导重力观测值 $V(t)$ 误差的处理方法是分析 $V(t)$ 在实际测量中可能出现的误差限, 再根据自变量和因变量的回归方程, 将 $V(t)$ 误差限转变成变量 $y(t)$ 的一个不确定度 B 分量, 与变量 $y(t)$ 的其他不确定度 A 分量进行合成处理。故

在推导回归系数时,可不考虑 $V(t)$ 的误差。由 iGrav-007 和 FG5-112 的观测方式可知,对被观测量 V, y 分别进行了多次等精度观测,用 $V(t)$ 、 $y(t)$ ($t=1, 2, \dots, n$) 表示观测值。观测 y 时,存在 A 分量 σ^2 (方差)和 B 分量 u^2 (该项主要与 iGrav-007 的观测精度有关)。因 iGrav-007 的噪声水平很低,观测精度高于 FG5-112 至少 2 个量级^[16],故此处将自变量 $V(t)$ 当做准确值,所有的误差只与 $y(t)$ 有关,即 B 分量近似为零,则 y 的不确定度 u_y 可以表示为:

$$u_y = \sqrt{\sigma^2 + u^2} \quad (6)$$

根据不确定度传递公式得:

$$u_a = \sqrt{\sum_{t=1}^n \left(\frac{\partial \hat{a}}{\partial y(t)} u_y \right)^2}, u_b = \sqrt{\sum_{t=1}^n \left(\frac{\partial \hat{b}}{\partial y(t)} u_y \right)^2}$$

将式(4)分别代入 u_a, u_b ,可算得:

$$u_a = u_y \sqrt{\frac{n}{n \left(\sum_{t=i}^n V^2(t) \right) - \left(\sum_{t=1}^n V(t) \right)^2}} \quad (7)$$

$$u_b = u_y \sqrt{\frac{\sum_{t=i}^n V^2(t)}{n \left(\sum_{t=i}^n V^2(t) \right) - \left(\sum_{t=1}^n V(t) \right)^2}} \quad (8)$$

则相对不确定度分别为:

$$E_a = u_a / |\hat{a}|, E_b = u_b / |\hat{b}|$$

2 格值标定结果及分析

由于超导重力仪振幅因子估算的精度和目前潮汐模型参数的相对精度均为 0.1% 的量级或更高,因此格值标定的相对精度要求在 0.1% 的量级。为此,在线性回归运算中,采用 3 倍中误差(3σ)作为观测限差剔除异常数据^[14, 16, 17]。孙和平等^[6]的研究表明,当观测限差在 $(20 \sim 35) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间,参与计算的观测数据对个数在 7 000 以上,格值的变化在 0.3% 范围内。因 FG5-112 观测值中出现了若干明显的错误数据,影响了线性回归计算,故本文剔除了其中绝对值大于 $600 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的 96 个数据。对 FG5-112 和 iGrav-007 原始观测数据作最小二乘线性回归计算,回归系数 $\hat{a} = -91.672 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{V}$,残差标准方差 $\sigma = 12.483 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,可确定观测限差超出范围,说明异常数据的剔除非常必要。

采用最小二乘线性回归方法,以残差标准差(σ)为中误差,以 3σ 为剔除异常数据的限差,当格值的变化小于 0.001 时停止迭代,实际计算中迭代 7 次即可。由于同址观测时间较短,且仪器长

期漂移通常表现为线性漂移^[14],对参与计算的观测数据进行线性拟合,比较拟合直线的斜率,如图 2 所示。每次迭代运算中都去掉重力观测值的线性部分(包括仪器漂移、潮汐和大气变化的趋势项)。参与格值计算的重力观测值共 10 865 对,FG5-112 的数据利用率为 97.88%;iGrav-007、FG5-112 观测值的线性拟合斜率分别为 $-0.000\ 002\ 94$ 、 $-0.000\ 270$,观测时段内的线性偏移量分别为 $-0.782\ 5\ \text{V}$ 和 $71.680\ 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,最终算得线性回归残差标准差为 $9.150\ 796 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。比较仪器漂移影响去除前后可知,3 天的仪器漂移对回归残差标准差的变化量很小,对回归直线精度的影响也小到可以忽略。但若同址观测时间更长,在进行格值计算前,须去除仪器漂移,并注意异常数据的影响。本文忽略漂移的影响,得到 iGrav-007 的格值为 $(-91.640\ 2 \pm 0.085\ 2) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{V}$,相对标定精度为 0.092 9%。图 3 给出了剔除异常数据后仪器同址观测期间 FG5-112 和 iGrav-007 观测值之间的比较,可见经过最小二乘线性迭代回归计算后,观测残差很好地收敛于观测限差范围内。

为比较不同落体次数对格值的影响,利用选用的 10 865 对观测数据,按不同的落体次数分段进行格值计算。表 1 给出了不同个数的观测数据获得的格值及其精度,图 4 给出了所测定的格值与观测数据对个数间的关系。当观测数据对个数超过 3 000 时,获得的格值和精度趋于稳定,相对标定精度优于 0.2%。因此当选用 FG5 标定 iGrav 时,若按 20 s 一次落体,每观测 50 min 停测 10 min 的方案,至少需要 20 h 的有效观测数据;若要满足格值相对标定精度优于 0.1%,至少需要连续 67 h 的有效观测数据,考虑到实际观测数据中总存在异常数据,连续 3 天的同址观测才能满足格值的精度要求。

根据上文确定的 iGrav-007 的格值因子,选取仪器安装后连续 5 个月(仪器安装后 3 个月内处于调试阶段,尚不稳定,故此处选取的时间段为 2013-06-25~2013-11-25)的采样观测数据。经过潮汐、气压和极移改正等预处理得到重力残差,线性拟合得 iGrav-007 的漂移率为 $0.375 \mu\text{Gal}/\text{月}$,如图 5(a)所示,该结果小于其标称值 $0.50 \mu\text{Gal}/\text{月}$,表明 iGrav-007 具有极高的稳定性;采用最小二乘高通滤波器处理重力残差,如图 5(b)所示,取截止频率为合成潮 M3 波的最高频率 $3.081\ 254 \text{ cpd}$,认为高于 M3 波频的部分(短周期部分)为仪器的高频噪声所致,取短周期部分扣除

平均值后的均方根(RMS)作为 iGrav-007 的观测精度,为 $0.038 \mu\text{Gal}/\text{min}$,该结果小于其标称值 $0.05 \mu\text{Gal}/\text{min}$,表明 iGrav-007 具有较高精度的观测性能。该结果也进一步验证了 iGrav-007 格值标定的准确性。

表 1 观测数据对个数与格值及其精度统计

Tab. 1 Statistics of the Calibration Factor, Its Accuracy and the Number of Pairs of Data

观测数据对个数	格值/ $(10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{V}^{-1})$	相对标定精度/%
1 000	-91.5925 ± 0.6319	0.6976
2 000	-91.9332 ± 0.1833	0.1993
3 000	-91.8467 ± 0.1737	0.1891
4 000	-91.8786 ± 0.1514	0.1648
5 000	-91.7051 ± 0.1323	0.1443
6 000	-91.6892 ± 0.1222	0.1332
7 000	-91.6259 ± 0.1120	0.1223
8 000	-91.6111 ± 0.0968	0.1057
9 000	-91.7023 ± 0.0922	0.1005
10 000	-91.7160 ± 0.0896	0.0977
10 865	-91.6402 ± 0.0852	0.0929

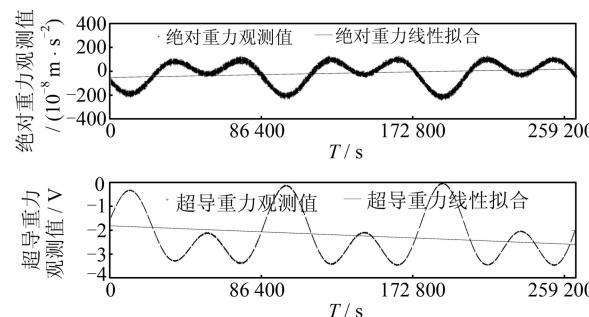


图 2 FG5-112 和 iGrav-007 的线性漂移

Fig. 2 Linear Instrument Drifts of FG5-112 and iGrav-007

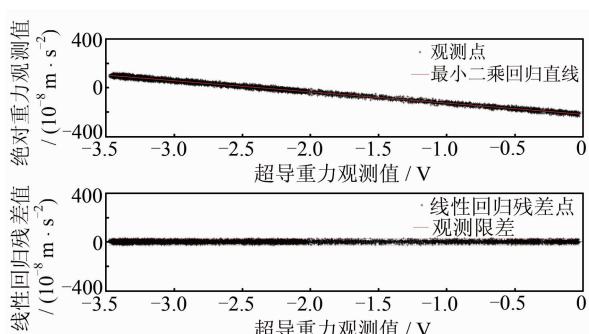


图 3 FG5-112 和 iGrav-007 观测值之间的比较

Fig. 3 Comparison Between the Observations of FG5-112 and iGrav-007

3 结语

在大潮期间,利用运行状态良好的绝对重力

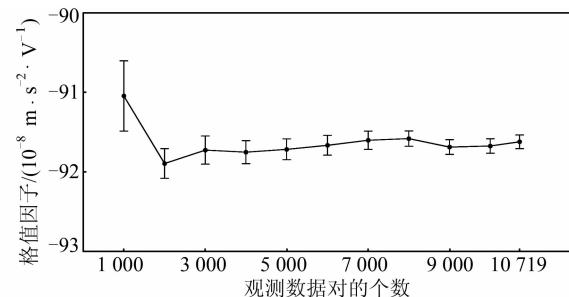


图 4 格值与观测数据对个数之间的关系

Fig. 4 Relation Between the Calibration Factor and the Number of Pairs of Data

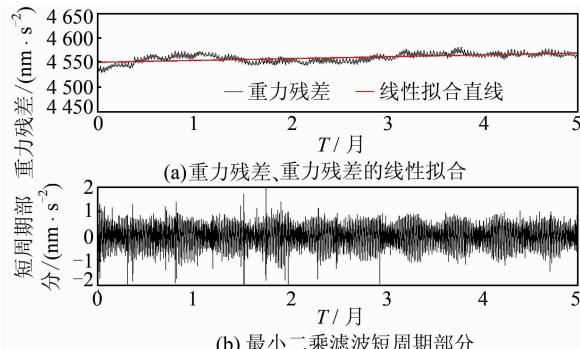


图 5 iGrav-007 连续 5 个月(2013 年 6 月 25 日-11 月 25 日)的重力残差、重力残差的线性拟合以及最小二乘滤波短周期部分

Fig. 5 Gravity Residuals, the Linear Fitting of the Gravity Residuals and the Short Cycle Part of the Least Squares Filtering Results of iGrav-007 for 5 Months (June 25th-November 25th, 2013)

仪观测能够精确有效地测定超导重力仪的格值。考虑 3 天中呈线性变化的仪器漂移对格值精确测定的影响,利用武汉九峰台站 FG5-112 与 iGrav-007 连续 3 天的同址观测结果测定 iGrav-007 的格值为 $(-91.6402 \pm 0.0852) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{V}$, 相对标定精度为 0.0929%。24 h 的标定精度优于法国 Hinderer^[7]获得的精度(0.72%),72 h 的优于孙和平^[6]获得的精度(0.2%),连续 3 天的精度优于 0.1% 量级,与 Francis^[17]利用连续 9 天获得的精度(0.08%)、邢乐林等^[19]利用连续 5 天获得的精度(0.11%)为同一量级^[18]。选取 iGrav-007 安装后 5 个月的连续观测数据初步分析该仪器的漂移量和观测精度,认为其具有极高的稳定性和高精度的观测性能,也验证了格值标定的准确性。

致谢:感谢中国科学院测量与地球物理研究所提供的 FG5-112 绝对重力仪观测数据,以及陈晓东副研究员等的悉心指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] Goodkind J M. The Superconducting Gravimeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(11): 4 132 -4 152
- [2] Hinderer J, Crossley D. Scientific Achievements from the First Phase (1997-2003) of the Global Geodynamics Project Using a Worldwide Network of Superconducting Gravimeters[J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 38(3):237-262
- [3] Crossley D, Hinderer J. Report of GGP Activities to Commission 3, Completing 10 Years for the Worldwide Network of Superconducting Gravimeters[M]//Observing Our Changing Earth. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [4] Sun Heping , Xu Houze. The Implementation and Prospection of the International Geodynamics Cooperation Projects[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997,12(2):152-157(孙和平,许厚泽. 国际地球动力学合作项目的实施与展望[J]. 地球科学进展, 12(2):152-157)
- [5] Sun Heping, Chen Xiaodong, Xu Houze, et al. Precision Measurement of the Calibration Factor by GWR Superconducting Gravimeter Tidal Observation[J]. *Acta Seism-Ologica Sinica*, 2001,23(6): 651-658(孙和平, 陈晓东, 许厚泽, 等. GWR 超导重力仪潮汐观测标定因子的精密测定[J]. 地震学报, 2001,23(6):651-658)
- [6] 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)
- [7] Hinderer J. On the Calibration of a Super Conducting Gravimeter Using Absolute Gravity Measurements [J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 106(2):491-497
- [8] Baker T F, Bos M S. Validating Earth and Ocean Tide Models Using Tidal Gravity Measurements [J]. *Geophys J Int*, 2003, 152(2):468-485
- [9] Francis O, Van Dam T. Evaluation of the Precision of Using Absolute Gravimeters to Calibrate Superconducting Gravimeters[J]. *Metrologia*, 2002, 39(5):485-488
- [10] Neibauer T M, Klopping F J, Faller J E. The FG5 Absolute Gravimeter[J]. *Bur Grav Int Bull d'Inf Toulouse*, 1995(11):1-2
- [11] Wang Yong, Xu Houze,Zhang Weimin, et al. High Precision Absolute Gravity Observations in the Midwest of China in 1996[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(6): 818-825(王勇, 许厚泽, 张为民, 等. 1996 年中国中西部地区高精度绝对重力观测结果[J]. 地球物理学报, 1998, 41(6): 818-825)
- [12] Xiao Fan, Zhang Hongwei, Wang Yingjian, et al. Analysis of FG5 Absolute Gravimeter Comparison Observation Data [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 5(31): 55-57(肖凡, 张宏伟, 王应建, 等. FG5 绝对重力仪比对观测数据分析. 海洋测绘, 2011, 5(31): 55-57)
- [13] Warburton R J, Pillai H, Reineman R C. Initial Results with the New GWR iGravTM Superconducting Gravity Meter[C]. International Association of Geodesy (IAG) Symposium Proceedings, Saint Petersburg, Russia, 2010
- [14] Chen Xiaodong, Sun Heping, Zhang Weimin, et al. Precision Analysis of the Determination of Superconducting Gravimeter Calibration Factor with Absolute Gravimeter[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013,33(5):145-149(陈晓东, 孙和平, 张为民, 等. 用绝对重力仪测定超导重力仪格值的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(5):145-149)
- [15] Van Camp M, Williams S D P, Francis O. Uncertainty of Absolute Gravity Measurements [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: B05406, doi: 10. 1029/2004JB003497
- [16] Riccard U, Rosat S, Hinderer J. On the Accuracy of the Calibration of Superconducting Gravimeters Using Absolute and Spring Sensors; A Critical Comparison[J]. *Pure Appl Geophys*, 2011, 169(2 012):1 343-1 356
- [17] Francis O. Calibration of a Superconducting Gravimeter by Comparison with an Absolute Gravimeter FG5 in Boulder[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(7):1 075-1 078
- [18] Xing Lelin,Li Hui, Liu Ziwei, et al. Precise Determination of Superconducting Gravimeter Calibration Factor by Absolute Gravity Measurement[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(1):48-50(邢乐林,李辉,刘子维,等. 利用绝对重力测量精密测定超导重力仪的格值因子[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1):48-50)

structure features, this paper put forward a new soft probability pooling method, which is used in multilayer Deconvolutional Network, then high level structure features can be learned and be used for classification of SAR image. Firstly, the SAR image was divided into patches; then, the feature coding of each patch was obtained by means of multilayer Deconvolutional Networks, which can learn features suitable for image classification in different scale; finally, the SAR image was classified through the features used in SVM classifier. Experimental results on the first batch domestic PolSAR images show that the classification accuracy rate of the proposed algorithm is superior.

Key words: synthetic aperture radar; multilayer learning; deconvolutional network; image classification; soft probability pooling

First author: WANG Yunyan, PhD, specializes in SAR imagery interpretation. E-mail: helen9224@126.com

Corresponding author: HE Chu, PhD, associate professor. E-mail: chuhe@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Basic Research and Development Program(973 Program) of China, No. 2013CB733404; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41371342, 61331016; the Natural Science Foundation of Hubei Province.

(上接第 1370 页)

Accurate Determination of the Calibration Factor of iGrav-007 Superconducting Gravimeter

JIA Jiangang¹ LUAN Wei¹ SHEN Wenbin^{1,2}

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

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The iGrav superconducting gravimeter is the newest relative gravity meter with the highest accuracy and most portable measurements in the world. It provides the most stable relative gravity measurement. The calibration factor for the iGrav-007 superconducting gravimeter was accurately determined using site observations obtained with the FG5-112 absolute gravimeter and the iGrav-007 superconducting gravimeter at Wuhan Jiufeng station, based on Least Square method. The data processing results show that the calibration factor was $(-91.6402 \pm 0.0852) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$ with a relative calibration accuracy of 0.092 9%, the accuracy of the calibration factor obtained by the absolute gravimeter for one day was better than 0.2%, the accuracy of the calibration factor obtained by absolute gravimeter for three days was better than 0.1%.

Key words: iGrav-007; FG5-112; superconducting gravimeter; calibration factor; accuracy analysis

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

Foundation support: The National 973 Program of China, No. 2013CB733305; the National Natural Science Foundation of China, No. 41210006.