

DOI:10.13203/j.whugis20150100



文章编号:1671-8860(2018)03-0457-07

# 联合 GOCE 卫星数据和 GRACE 法方程确定 SWJTU-GOGR01S 全球重力场模型

苏 勇<sup>1</sup> 范东明<sup>2</sup> 蒲星钢<sup>3</sup> 游 为<sup>2</sup> 肖东升<sup>1</sup> 于 冰<sup>1</sup>

1 西南石油大学土木工程与建筑学院,四川 成都,610500  
2 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756  
3 成都市勘察测绘研究院,四川 成都,610081

**摘 要:**联合地球重力场和海洋环流探测器(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, GOCE)和重力恢复与气候实验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)卫星观测数据确定全球静态重力场模型是当前大地测量学的研究热点之一。联合近 3 a 的 GOCE 卫星梯度数据和 7 a 左右的 GRACE 星间距离变率数据计算的 ITG-GRACE2010S 模型的法方程恢复了 210 阶次的重力场模型 SWJTU-GOGR01S。采用带通数字滤波方法处理 GOCE 卫星的 4 个高精度梯度观测分量,利用梯度数据恢复重力场模型的观测方程直接建立在梯度仪坐标系中,可以避免坐标转换过程中高精度的梯度观测分量受低精度分量的影响;联合法方程解的最优权采用方差分量估计迭代计算,GOCE 数据的两极空白引起的病态问题采用 Kaula 正则化方法进行约束。基于 EIGEN-6C2 模型和北美地区的 GPS 水准网观测数据,对 SWJTU-GOGR01S 模型进行内外符合精度分析,结果表明,SWJTU-GOGR01S 模型在 210 阶次的大地水准面误差和累计误差分别为 1.3 cm 和 5.7 cm,精度与欧洲空间局公布的第四代时域法模型相当,略优于 GOCO02S 和 GOCO03S 模型的精度。

**关键词:**GOCE;GRACE;地球重力场模型;方差分量估计;正则化

**中图法分类号:**P223

**文献标志码:**A

高精度高时空分辨率的地球重力场和大地水准面可以为地球物理学、地球动力学、海洋学和地震学等研究地球结构和动力学过程的学科提供基础空间信息,同时也满足空间科学、军事科学和大地测量学对精细地球重力场的实际应用需求。随着挑战小卫星有效载荷卫星(Challenging Mini-satellite Payload, CHAMP)、重力恢复与气候实验卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)和地球重力场和海洋环流探测器(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, GOCE)三代重力卫星任务的相继实施,利用重力卫星观测数据恢复的全球重力场模型的精度持续提高,继海洋卫星测高之后卫星重力测量研究进入新的发展阶段<sup>[1-2]</sup>。虽然 GOCE 卫星已于 2013-11-11 坠落,但其海量的观测数据还有待深入分析。GRACE 和 GOCE 卫

星均采用高低卫-卫跟踪观测模式,同时两者还分别采用 K 波段星间测距和重力梯度观测技术,用于恢复中长波和中短波重力场信号。两代重力卫星所采用的观测技术只能有效探测不同频段的重力场信号,单独采用某一类观测数据只能恢复有限频段的重力场信号。因此联合 GRACE 和 GOCE 观测数据恢复宽频段、高精度、高分辨率的全球静态重力场模型及其用于地球物理解释成为当前大地测量学和地球物理学的一个研究热点<sup>[3-4]</sup>。

GRACE 卫星可以有效恢复中长波重力场信号,众多研究机构和学者对此进行了广泛深入的研究,典型的 GRACE 全球静态重力场模型有 GGM03S<sup>[5]</sup>、EIGEN-5S<sup>[6]</sup>、AIUB-GRACE03S<sup>[7]</sup>和 ITG-GRACE2010S<sup>[8]</sup>等,这些模型的最大阶次一般为 150~180,使用了至少 4 a 的卫星观测数

收稿日期:2016-05-26

项目资助:国家自然科学基金(41574018,41404018)。

第一作者:苏勇,博士,讲师,主要从事卫星重力测量确定全球静态和时变重力场模型及其用于监测全球质量变化等方面的研究。

suyongme@foxmail.com

据。GOCE 卫星采用独特的梯度观测技术,可有效恢复中短波重力场信号,利用纯 GOCE 数据恢复的重力场模型有欧洲空间局(European Space Agency, ESA)发布的时域法和空域法 GOCE 模型(TIM 和 SPW 系列)<sup>[9]</sup>、文献[10-11]联合 GOCE 轨道和梯度数据恢复的 230 阶左右的 JYY\_GOCE02S 和 ITG-GOCE02 模型。单独采用 GOCE 数据恢复的重力场模型精度无法达到 100 km 尺度上大地水准面精度优于 1 cm 的预期目标,因此联合 GRACE 和 GOCE 数据恢复高精度静态重力场模型成为发展趋势。文献[12]采用直接法并联合 GRACE 数据恢复了 5 代 DIR 系列模型;文献[13]联合 GRACE 数据恢复了 250 阶重力场模型 DGM-1S;文献[10,14]采用一种新的策略并联合 GRACE 数据恢复了 TUMGOCE02S 和 GOGRA02S 模型;文献[15-17]联合 GRACE 数据恢复了 GOCO 系列模型;文献[18]联合 LAGEOS、GRACE 和 GOCE 等多类观测数据恢复了 EIGEN-6S 模型。同时,许多学者还联合地形数据、地面重力数据和卫星测高数据恢复了一系列超高阶、超高分辨率的重力场模型<sup>[19]</sup>。

本文利用近 3 a 的 GOCE 数据并联合 7 a 左右的 GRACE 数据计算的 ITG-GRACE2010S 模型的法方程,采用不同结构的法矩阵相加组成联合加权法方程求解,确定了 210 阶全球重力场模型 SWJTU-GOGR01S;并将其与已有 GOCE、GRACE 模型和 GPS 水准数据进行比较,为确定高精度、高分辨率的全球重力场模型进行了有益的探索。

## 1 GOCE 卫星数据和 GRACE 法方程及处理方法

### 1.1 数据处理

ITG-GRACE2010S 是目前精度较高的 GRACE 静态重力场模型,其利用 2002-08—2009-08 共计 7 a 的 GRACE 轨道和星间距离变率数据,并采用最大弧长为 60 min 的短弧积分法恢复得到,最大阶次为 180。在处理过程中采用 Kalman 滤波和 AOD1B 产品以降低混叠效应的影响,该模型确定的重力场信号包含整个大气和海洋的质量。由于该模型采用的方法成熟、数据处理精细,本文直接采用其法方程用于联合 GOCE 数据的结果恢复重力场模型<sup>[8]</sup>。

采用欧洲空间局提供的 2009-11~2013-08

共 3 a 左右的 GOCE 观测数据,首先利用移动窗口阈值法和 Grubbs 法相结合的组合方法对梯度观测数据进行粗差探测<sup>[20]</sup>。梯度仪本身的设计特点导致梯度观测数据在特定频段内的精度较好,即在 0.005~0.1 Hz 频段内的测量精度较高,在频段外(特别是低频部分)表现为有色噪声特性,因此需要对梯度数据进行滤波处理。本文采用带通频率范围为 0.005~0.1 Hz 的零相位有限脉冲带通数字滤波器(finite impulse response, FIR)和“移去-恢复”法对梯度数据进行滤波处理,滤波窗函数采用 1 000 阶的 Hanning 窗<sup>[21-23]</sup>。采用“移去-恢复”法进行滤波处理后的数据反演的重力场模型的信号在长波部分与参考模型较为接近,但是梯度数据主要用于恢复中短波重力场信号,而长波部分信号采用 GRACE 星间数据恢复,因此先验重力场模型的影响可以忽略。采用零相位滤波器可以避免滤波后数据的相位出现漂移,只需对观测数据进行滤波,不需要对观测数据和观测方程的设计矩阵同时进行滤波处理。限于篇幅,针对 GOCE 数据的详细处理参见文献[23]。基于直接最小二乘法在梯度仪坐标系中建立梯度数据的法方程,并利用方差分量估计联合 ITG-GRACE2010S 模型的法方程恢复了 210 阶次的 GOCE/GRACE 模型 SWJTU-GOGR01S。

### 1.2 数学模型

局部指北坐标系(local north-oriented frame, LNOF)和梯度仪坐标系(gradimeter reference frame, GRF)中的梯度张量分别表示为  $\mathbf{V}_{\text{LNOF}}$  和  $\mathbf{V}_{\text{GRF}}$ ,将梯度张量对球谐位系数求偏导,可得观测方程的设计矩阵,将其转换至 GRF 中<sup>[10,24]</sup>:

$$\frac{\partial \mathbf{V}_{\text{GRF}}}{\partial x} = \mathbf{R}_{\text{GRF}}^{\text{LNOF}} \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{LNOF}}}{\partial x} (\mathbf{R}_{\text{GRF}}^{\text{LNOF}})^{\text{T}} \quad (1)$$

式中, $x = (\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm})$  表示完全归一化的球谐位系数; $\mathbf{R}_{\text{GRF}}^{\text{LNOF}}$  表示 LNOF 至 GRF 的转换矩阵。在 GRF 中利用引力梯度张量确定地球重力场模型的误差方程可表示为:

$$\mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{GRF}}}{\partial x} \cdot x - F\{\mathbf{y}_{\text{GRF}}\} \quad (2)$$

式中, $F\{\}$  表示滤波算子; $\mathbf{v}$  表示观测值改正向量; $\mathbf{y}_{\text{GRF}}$  为 GRF 中的梯度张量观测数据。联合 GOCE 和 GRACE 的观测方程可得联合法方程<sup>[25-27]</sup>:

$$\left( \sum_i \omega_i \mathbf{A}_i^{\text{T}} \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i \right) x = \sum_i \omega_i \mathbf{A}_i^{\text{T}} \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i \quad (3)$$

式中, $i$  表示 GOCE 或 GRACE; $\mathbf{A}_i$  和  $\mathbf{y}_i$  分别为第  $i$  类误差方程的设计矩阵和常数矩阵; $\mathbf{P}_i$  为第

$i$  类观测数据的权;  $\omega_i = 1/\sigma_i^2$  为第  $i$  类观测数据形成的法方程的权; 方差分量估计 (variance component estimation, VCE) 最优权的确定采用鲍姆克简化方法迭代计算得到:

$$\sigma_i^2 = \frac{\mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{v}_i}{n_i} = \frac{\mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i - (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i) \mathbf{x}}{n_i} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_i^2$  表示方差分量;  $n_i$  表示第  $i$  类观测数据的个数。本文实际计算时, 设方差分量的初值为 1.0, 当计算结果趋近于某一常数时迭代终止。根据文献 [17] 的建议, 在实际计算过程中, ITG-GRACE2010S 模型的法方程可以通过公布的协方差矩阵和位系数及其精度信息进行反推计算得到。针对 GOCE 数据极空白引起的法方程病态, 需要进行正则化处理:

$$\hat{\mathbf{x}}_a = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \alpha \mathbf{K})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{y} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{K}$  表示 Kaula 正则化矩阵;  $\alpha$  为正则化参数。

## 2 重力场模型结果分析

### 2.1 与已有重力场模型比较

利用 GOCE 数据恢复重力场模型时, 本文将 3 a 左右的数据分为若干弧段, 将每个弧段形成的法方程进行累加, 这样可以减少对计算机内存的需求, 每个弧段的长度设为 GOCE 卫星的运行周期 (约为 5 400 s)。由于 GOCE 梯度仪测量的梯度张量中  $V_{xx}$ 、 $V_{yy}$ 、 $V_{zz}$  和  $V_{xz}$  4 个分量的精度较

高, 因此本文只对 4 个分量分别得到的法方程作等权处理, 恢复 210 阶次的梯度重力场模型。采用方差分量估计法经过 4 次迭代即可得到联合 GOCE 和 GRACE 数据恢复重力场模型的最优权, 最优权的比值约为  $1 \times 10^{21}$  (本文中梯度张量的单位为  $\text{s}^{-2}$ )。GOCE 数据极空白导致的法方程病态采用 Kaula 正则化方法从 150 阶开始进行约束。图 1 反映了单独利用 GOCE 梯度数据恢复重力场模型正则化前后的位系数误差谱, 可见极空白主要影响重力场模型的低次部分, 正则化处理后能较大程度削减极空白的影响, 但并不能完全消除。联合 GRACE 数据后, 法方程仍然受极空白的影响, 此时最优正则化参数为  $1 \times 10^{-11}$ 。如图 2 所示, 正则化的影响基本可以忽略。这是由于受计算机内存限制, 本文恢复的梯度模型的阶次较低, 与 ITG-GRACE2010S 模型组成联合法方程之后, GRACE 数据已填补两极数据空白, 对极空白问题起到可靠的约束作用, 如果利用梯度数据恢复的重力场模型阶次更高 (如 250 阶以上), 正则化处理极空白的效果将更明显 [14]。将恢复的模型 SWJTU-GOGR01S 与 GOCO02S、GOCO03S、ITG-GRACE2010S、TIM-R4 以及 DIR-R4 比较, 各模型的大地水准面误差如图 3 所示, 需要注意的是各模型的潮汐系统必须统一 [16]。

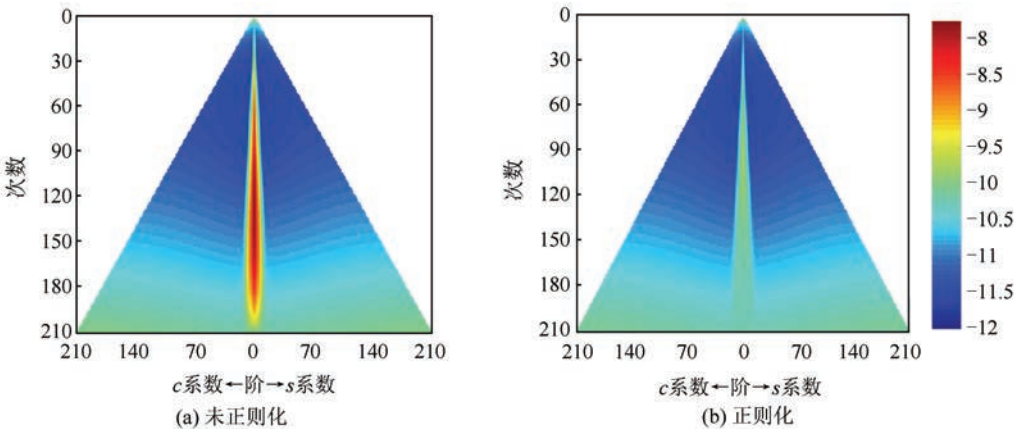


图 1 梯度结果的位系数误差谱 (取 10 为底的对数值)

Fig.1 Spherical Harmonic Coefficients Error of GOCE Gradient Result (in lg Scale)

由图 3 可知, 由于 SWJTU-GOGR01S、GOCO02S 和 GOCO03S 模型均联合了 ITG-GRACE2010S 模型的法方程, 这些模型低阶位系数的精度与 ITG-GRACE2010S 基本一致, 而 TIM-R4 模型仅采用 GOCE 轨道和梯度数据, 其低阶位系数的精度低于采用 GRACE 数据的模型

的精度。SWJTU-GOGR01S 模型高阶位系数的精度优于 GOCO02S 和 GOCO03S 模型, 但差于 TIM-R4 和 DIR-R4 模型的精度, 这是由于这两个模型均采用上一代 GOCE 重力场模型作为参考对梯度观测数据进行进一步处理, 而 SWJTU-GOGR01S 模型仅采用 EGM2008 模型的前 300



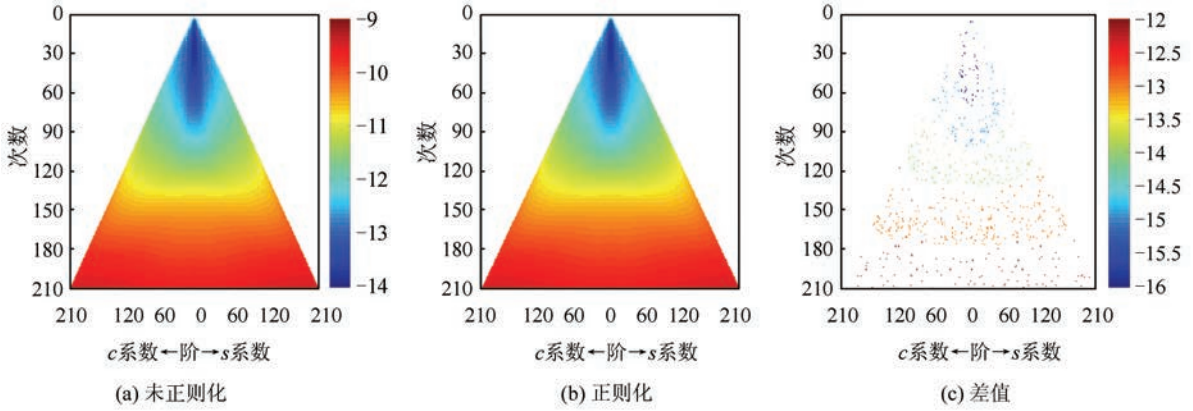


图2 GOCE 和 GRACE 联合结果的位系数误差谱(取 10 为底的对数值)

Fig.2 Spherical Harmonic Coefficients Error of the Combined Result (in lg Scale)

阶作为参考模型对梯度观测数据进行一次处理。根据文献[28]建议,各模型相对于 EIGEN-6C2 的大地水准面累积误差如图 4 所示。除 TIM-R4 外,其余各模型的低阶位系数的精度差异不大;由于各模型采用的 GOCE 数据量不一样,并且对梯度数据的处理方式也有差别,因此高阶部分位系数的精度有所不同。比较可知,本文针对 GOCE 梯度数据的处理达到了预期目的,联合 GRACE 和 GOCE 数据恢复的 SWJTU-GOGR01S 模型的精度与国际最新的卫星重力场模型相比还存在差距。主要原因在于相对 ESA 模型而言,本文的模型仅采用 GOCE 梯度数据一次解算,并未采用先验 GOCE 模型对梯度数据进行迭代处理,而 ESA 模型(特别是第二代以后的模型)处理梯度数据时,均是采用前一代 GOCE 模型作为参考模型对梯度数据进行处理,相当于求解的最新 GOCE 重力场模型经过迭代处理,故精度较高。SWJTU-GOGR01S 模型在 210 阶次的大地水准面误差和累积误差分别为 1.3 cm 和 5.7 cm。

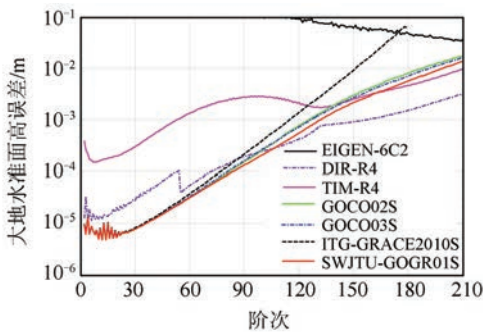


图3 大地水准面误差比较

Fig.3 Comparison of Geoid Errors

GPS 水准网共有 25 251 个观测数据,其中,美国地区有 24 003 个数据,加拿大地区有 574 个数据,墨西哥地区有 674 个数据(<http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/>)。表 1 反映了各模型计算的大地水准面高与 GPS 水准数据比较的统计结果,各模型的最大阶次分别截断至 180 和 210 阶次。整体上,各模型精度相差不大,单独采用 GRACE 数据的模型的精度差于联合 GOCE 和 GRACE 数据的模型,主要原因是 GOCE 梯度数据有效改善了中短波重力场信号的精度;但各模型相对于 GPS 水准测量结果的系统偏差都比较大。

模型截断至某一阶次计算的大地水准面高与 GPS 水准观测数据的标准差如图 5 所示。可以看出,在 160 阶以后 ITG-GRACE2010S 模型的精度比采用 GOCE 数据的模型精度差,而 150 阶次左右开始 ITG-GRACE2010S 模型的累积误差也开始超过采用 GOCE 数据的模型(图 4),这说明梯度数据获取高阶重力场信号的能力较强。对于联合 GOCE 和 GRACE 数据的模型,各模型低阶次的差异较小,在高阶次的差异逐渐显现,这反映出不同的梯度数据处理方法之间的差异,并且随着阶次的增加,各模型的截断误差不断减小。

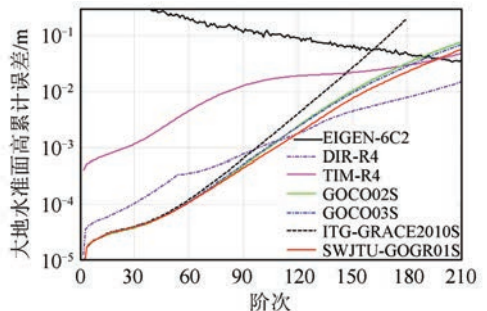


图4 大地水准面累积误差比较

Fig.4 Comparison of Cumulative Geoid Errors

### 2.2 利用 GPS 水准数据检核

采用 2011 年北美地区的 GPS 水准网观测数据对 SWJTU-GOGR01S 模型进行外部检核,该

表 1 各模型的外符合精度比较/m

Tab.1 Comparison of External Precision of Several Models/m

截断阶次	模型	美国 GPS 水准网		加拿大 GPS 水准网		墨西哥 GPS 水准网	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
180	ITG-GRACE2010S	0.225	0.783	1.111	0.758	-0.567	0.860
	TIM_R4	0.219	0.755	1.098	0.746	-0.580	0.777
	DIR_R4	0.222	0.756	1.099	0.746	-0.577	0.777
	GOCO02S	0.222	0.756	1.099	0.747	-0.579	0.778
	GOCO03S	0.222	0.755	1.100	0.747	-0.579	0.779
	SWJTU-GOGR01S	0.223	0.756	1.099	0.748	-0.576	0.784
210	ITG-GRACE2010S	-	-	-	-	-	-
	TIM_R4	0.227	0.707	1.058	0.705	-0.589	0.703
	DIR_R4	0.230	0.707	1.057	0.704	-0.585	0.703
	GOCO02S	0.230	0.710	1.057	0.708	-0.574	0.709
	GOCO03S	0.230	0.709	1.057	0.708	-0.588	0.712
	SWJTU-GOGR01S	0.233	0.711	1.060	0.709	-0.590	0.707

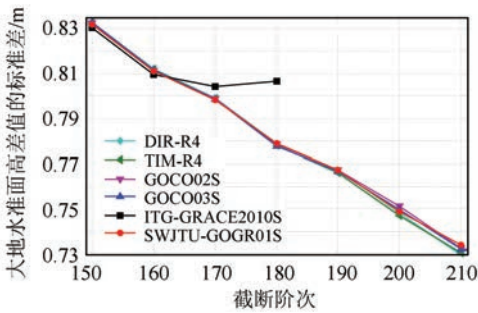


图 5 各模型截断至不同阶次的外符合精度比较

Fig.5 Comparison of External Precision of Several Models Truncation at Different Degree

### 3 结 语

本文采用“向前向后”零相位的有限脉冲带通数字滤波器和“移去-恢复”法处理了 3 a 左右的 GOCE 卫星梯度观测数据,基于直接最小二乘法恢复了 210 阶次的梯度重力场模型,并联合采用 7 a GRACE 观测数据和短弧积分法计算的 ITG-GRACE2010S 模型的法方程,恢复了 GOCE/GRACE 重力场模型 SWJTU-GOGR01S。利用已有高精度重力场模型和北美地区的 GPS 水准网观测数据对 SWJTU-GOGR01S 模型进行内外符合精度比较可知,SWJTU-GOGR01S 模型在低阶部分的精度与 ITG-GRACE2010S 模型基本一致,在高阶部分的精度优于 GOCO02S 和 GOCO03S 模型,但高阶部分的精度差于 DIR-R4 和 TIM-R4 模型的精度。这反映出本文对梯度数据进行了有效处理,但受计算机硬件限制,并未对 GOCE 梯度观测数据进行迭代处理,SWJTU-GOGR01S 模型在高阶部分的精度还有进一步提升的空间,下一步将采用迭代算法精化处理

GOCE 数据并恢复更高精度的全球重力场模型。

### 参 考 文 献

- [1] Drinkwater M R, Haagmans R, Muzi D, et al. The GOCE Gravity Mission: ESA's First Core Earth Explorer[C]. The 3th International GOCE User Workshop, Frascati, Italy, 2006
- [2] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): 1-8
- [3] Bingham R J, Knudsen P, Andersen O, et al. An Initial Estimate of the North Atlantic Steady-State Geostrophic Circulation from GOCE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(1): 1-10
- [4] Garcia R F, Bruinsma S, Lognonné P, et al. GOCE: The First Seismometer in Orbit Around the Earth [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(5): 1 015-1 020
- [5] Tapley B, Ries J, Bettadpur S, et al. The GGM03 Mean Earth Gravity Model from GRACE[C]. Fall Meeting of American Geophysical Union, United States, 2007
- [6] Förste C, Flechtner F, Schmidt R, et al. EIGEN-GL05C: A New Global Combined High-Resolution GRACE-based Gravity Field Model of the GFZ-GRGS Cooperation[C]. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2008
- [7] Jäggi A, Prange L, Meyer U, et al. Gravity Field Determination at AIUB: From Annual to Multi-annual Solutions [C]. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2010
- [8] Mayer-Gürr T, Kurtenbach E, Eicker A. The Satellite-only Gravity Field Model ITG-Grace 2010s [EB/OL]. <http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace2010>, 2010

- [9] Pail R, Bruinsma S, Migliaccio F, et al. First GOCE Gravity Field Models Derived by Three Different Approaches [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(11): 819-843
- [10] Yi Weiyong. An Alternative Computation of a Gravity Field Model from GOCE [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(3): 371-384
- [11] Schall J, Eicker A, Kusche J U R. The ITG-Goce02 Gravity Field Model from GOCE Orbit and Gradiometer Data Based on the Short Arc Approach [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4):403-409
- [12] Bruinsma S L, Förste C, Abrikosov O, et al. The New ESA Satellite-Only Gravity Field Model via the Direct Approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3 607-3 612
- [13] Farahani H H, Ditmar P, Klees R, et al. The Static Gravity Field Model DGM-1S from GRACE and GOCE Data: Computation, Validation and an Analysis of GOCE Mission's Added Value [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(9): 843-867
- [14] Yi Weiyong. The Earth's Gravity Field from GOCE [D]. München: Technische Universität München, 2011
- [15] Pail R, Goiginger H, Schuh W D, et al. Combined Satellite Gravity Field Model GOCO01S Derived from GOCE and GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): 1-8
- [16] Koch K R, Brockmann J M, Schuh W D. Optimal Regularization for Geopotential Model GOCO02S by Monte Carlo Methods and Multi-scale Representation of Density Anomalies [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(8): 647-660
- [17] Mayer-Gürr T, Rieser D, Höck E, et al. The New Combined Satellite Only Model GOCO03S [C]. International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems, Venice, Italy, 2012
- [18] Förste C, Bruinsma S L, Shako R, et al. A New Release of EIGEN-6: The Latest Combined Global Gravity Field Model Including LAGEOS, GRACE and GOCE Data from the Collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse[C]. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2012
- [19] Hirt C, Claessens S, Fecher T, et al. New Ultra-high-resolution Picture of Earth's Gravity Field [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 ( 16 ): 4 279-4 283
- [20] Kern M, Preimesberger T, Allesch M, et al. Outlier Detection Algorithms and Their Performance in GOCE Gravity Field Processing [J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 78(9): 509-519
- [21] Wan Xiaoyun, Yu Jinhai, Zeng Yanyan. Frequency Analysis and Filtering Processing of Gravity Gradients Data from GOCE [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2 909-2 916(万晓云,于锦海,曾艳艳. GOCE 引力梯度的频谱分析及滤波[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 2 909-2 916)
- [22] Yu J H, Wan X Y. Recovery of the Gravity Field from GOCE Data by Using the Invariants of Gradient Tensor [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56(7):1 193-1 199
- [23] Su Yong, Fan Dongming, You Wei. Gravity Field Model Calculated by Using the GOCE Data [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 99-102(苏勇,范东明,游为.利用 GOCE 卫星数据确定全球重力场模型[J].*物理学报*, 2014, 63(9): 99-102)
- [24] Petrovskaya M S, Vershkov A N. Non-singular Expressions for the Gravity Gradients in the Local North-oriented and Orbital Reference Frames [J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(3): 117-127
- [25] Koch K R, Kusche J. Regularization of Geopotential Determination from Satellite Data by Variance Components [J]. *Journal of Geodesy*, 2002, 76(5): 259-268
- [26] Kusche J, Klees R. Regularization of Gravity Field Estimation from Satellite Gravity Gradients [J]. *Journal of Geodesy*, 2002, 76(6): 359-368
- [27] Kusche J. Noise Variance Estimation and Optimal Weight Determination for GOCE Gravity Recovery [J]. *Advances in Geosciences*, 2003(1): 81-85
- [28] Tsoulis D, Patlakis K. A Spectral Assessment Review of Current Satellite-Only and Combined Earth Gravity Models [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(2): 186-243

## New Static Gravity Field Model SWJTU-GOGR01S Derived from GOCE Data and GRACE Normal Equation

SU Yong<sup>1</sup> FAN Dongming<sup>2</sup> PU Xinggang<sup>3</sup> YOU Wei<sup>2</sup> XIAO Dongsheng<sup>1</sup> YU Bing<sup>1</sup>

1 School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Faculty of Geoscience and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

3 Chengdu Institute of Survey and Investigation, Chengdu 610081, China

**Abstract:** Global static gravitational field determined by GOCE and GRACE satellite data has become a hotspot in current research of geodesy. In this paper, a satellite-only global static gravity field model entitled SWJTU-GOGR01S up to degree and order 210 is recovered based on 3 years of GOCE gravity gradient data and ITG-GRACE2010S model's normal equation from 7 years GPS and K-band rang rate data. Four high precision GOCE gradiometer components ( $V_{xx}, V_{yy}, V_{zz}, V_{xx}$ ) are filtered by the zero phase finite impulse band-pass digital filter, and then gradient observation equation is founded directly in gradiometer coordinates which avoids the loss of gradiometer component in accuracy in the conversion process. The optimal weight of the combination result of GOCE and GRACE data is determined by variance component estimation and the GOCE data polar gaps is dealt with the Kaula regularization method. Comparing the internal and external precision of SWJTU-GOGR01S with EIGEN-6C2 and GPS leveling data of North America, the results show that the geoid error and cumulative error of the SWJTU-GOGR01S model with degree and order 210 are 1.3 cm and 5.7 cm respectively. Compared with the fourth generation direct approach and time-wise approach models released by ESA, GO-CO02S and GOCO03S model, the accuracy of the model SWJTU-GOGR01S is verified basically consistent with the model TIM-R4. The precision of SWJTU-GOGR01S model is also better than GO-CO02S and GOCO03S model.

**Key words:** GOCE; GRACE; gravity field model; variance component estimation; regularization

**First author:** SU Yong, PhD, lecturer, specializes in determination of static and time-variation Earth's gravitational field model from satellite gravity measurement and global mass distribution monitoring. E-mail: suyongme@foxmail.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41574018, 41404018.