

文章编号:1671-8860(2009)10-1163-05

文献标志码:A

# GOCE 卫星重力梯度测量数据的预处理

罗志才<sup>1,2</sup> 吴云龙<sup>1</sup> 钟 波<sup>1</sup> 杨 光<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘 要:**GOCE (gravity field and steady-state ocean circulation explorer)计划的主要科学目标是以 70 km 空间分辨率、1 mGal 重力异常和 1~2 cm 大地水准面的精度测定全球静态地球重力场,卫星重力梯度测量数据的预处理是实现这一预期科学目标的重要任务之一。讨论了重力梯度测量数据的预处理方案、时变重力场信号改正、粗差探测和外部校准方法,为进一步开展 GOCE 卫星重力梯度测量数据的预处理研究提供参考和具体建议。

**关键词:**GOCE;卫星重力梯度测量;预处理;粗差探测;外部校准

**中图法分类号:**P223.6; P228.41

欧洲空间局(ESA)于 2009 年 3 月 17 日成功发射了“重力场和静态海洋环流探测卫星”GOCE (gravity field and steady-state ocean circulation explorer),目前运行状况良好。该卫星同时采用了高低卫-卫跟踪测量(SST-hl)和卫星重力梯度测量(SGG)技术,预期科学目标是以前所未有的精度和分辨率(70 km 空间分辨率、1 mGal 精度的重力异常和 1~2 cm 精度的全球大地水准面)测定全球静态地球重力场<sup>[1]</sup>。受观测噪声、仪器故障、姿态误差、计算误差等多种因素的影响,GOCE 重力梯度观测数据中不可避免地存在粗差、系统偏差、尺度偏差和有色噪声等。GOCE 重力梯度观测数据的预处理是实现其预期科学目标的关键任务之一,以期获得“干净”的重力梯度数据供地球重力场的确定和相关地球科学研究使用,并为评估 GOCE 卫星系统关键有效载荷的性能提供科学依据。

## 1 预处理方案

GOCE 的数据产品分为 Level 0、Level 1(1a 和 1b)、Level 2 和 Level 3 数据,其中 Level 0 是

卫星原始观测数据,由欧空局专职部门负责接收并处理转换为 Level 1a 和 Level 1b 数据,Level 2 数据包括卫星精密轨道和地球重力场模型等相关科学产品,Level 3 数据是为了满足不同科学研究领域的需要而由 Level 2 产品导出的应用产品,可直接用于固体地球物理学、海洋环流、冰盖动力学、大地测量学与海平面变化等领域的研究<sup>[2]</sup>。GOCE 重力梯度数据的预处理主要是指对 Level 1b 数据的处理,由欧空局 GOCE 卫星高级数据处理部门(HPF)完成,主要包括时变重力场信号的改正、粗差探测、外部校准与误差估计,并提供快速解和精密解两种模式的成果。快速解的延迟很短,要求在获得数据后一天内完成,应用于监测和校准卫星的运行状态;精密解的延迟较长,一般在获得数据后 2 周或更长时间内完成,为确定地球重力场及相关地球科学研究尽可能提供重力梯度数据的最佳解。近几年来,GOCE 卫星高级数据处理部门(HPF)在 GOCE 重力梯度数据的预处理方面开展了大量的模拟研究,综合 HPF 和国际上最新研究成果<sup>[3-12]</sup>,GOCE 重力梯度数据的预处理方案和流程如图 1 所示。

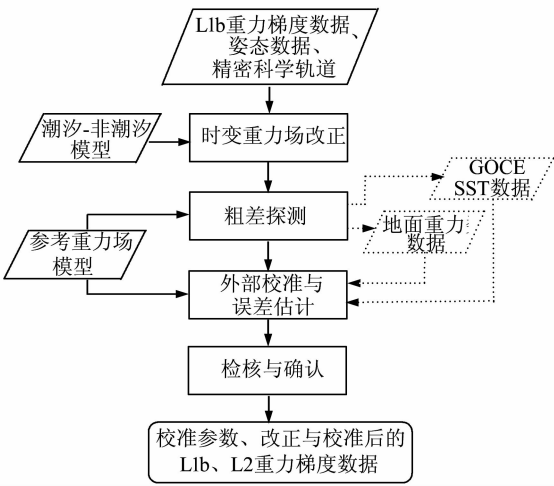


图 1 GOCE 重力梯度数据预处理方案  
(虚线方框仅用于精密解)

Fig. 1 Pre-processing Scheme of GOCE Gravity Gradient Data (The Dashed Blocks are Only Employed to the Precise Solution)

2 时变重力场信号的改正

由于 GOCE 卫星的轨道采样存在时空重叠,并且 GOCE 卫星在两个 6 个月的观测任务期中存在长达 5 个月的休眠期,因此,以确定高精度静态地球重力场为目标,GOCE 重力梯度观测数据必须进行时变重力场信号的改正。时变重力场信号的改正包括潮汐和非潮汐影响。

2.1 潮汐影响

GOCE 重力梯度观测数据的潮汐改正主要包括固体潮(平衡潮、潮汐变形)、海潮、负荷潮和极潮等对重力梯度仪观测数据的影响。平衡潮的影响可采用 JPL 提供的 DE 405 星历数据和 GOCE 星载 GPS 数据提供的轨道数据计算;地球潮汐变形的影响可通过勒夫数由平衡潮转换求得;负荷潮的影响包括负荷本身自引力和负荷变形,可采用模型(如 GOT00.2)计算;通常采用由 IERS 提供的极移参数(如 C04 地球定向参数模型)计算由于地球自转变化引起的极潮,但计算时需要区分瞬时极移和平均极移。

2.2 非潮汐影响

非潮汐影响主要包括海洋和大气质量变化、陆地水质量变化(地表地下水、蒸发径流等)、冰雪质量变化和冰后回弹等固体地球动力过程。因大气和海洋平均质量分布的影响属于地球重力场的静态部分,因此,GOCE 重力梯度数据中非潮汐时变重力场信号的改正主要指大气和海洋质量变化的高频信号及陆地水质量变化、冰雪质量变化和

冰后回弹等固体地球动力过程的影响。GOCE 卫星观测任务期间大气质量变化的高频信号影响可利用欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-range Weather Forecasts,ECMWF)或美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction,NCEP)提供的模型数据计算得到,海洋质量变化的高频信号影响可采用海洋环流和潮汐模型(ocean model for circulation and tides,OMCT)计算得到。

因 GRACE 月重力场模型已扣除了潮汐、大气和海洋质量变化的影响,因此,由 GRACE 月重力场模型得到的质量季节性变化主要包括陆地水质量变化、冰雪质量变化和固体地球质量变化,其中陆地水质量变化和冰雪质量变化占主导地位<sup>[13]</sup>。GOCE 采用与 GRACE 同样的方法消除大气和海洋质量变化的高频信号,因此,可以采用 GRACE 月重力场模型计算 GOCE 重力梯度数据中陆地水质量和冰雪质量变化的季节性影响。

3 粗差探测

受多种因素的综合影响,GOCE 重力梯度测量数据中不可避免地存在粗差。模拟研究表明,即使重力梯度数据中仅存在 0.2% 的粗差也对重力场模型的求解有较大影响<sup>[8]</sup>。因此,粗差探测是 GOCE 重力梯度数据预处理中的重要环节,其目的是探测、标记或校准 GOCE 重力梯度测量数据中的粗差。

3.1 探测依据

3.1.1 迹条件

引力梯度(以下不区分引力梯度和重力梯度)在地球外部空间满足 Laplace 方程,即重力梯度张量的迹为零。因此,如果 GOCE 重力梯度测量数据中不存在粗差和系统偏差,并假设各梯度分量的误差没有相关性,则有:

$$E(V_{xx} + V_{yy} + V_{zz}) = 0 \tag{1}$$

式中, $E$  表示数学期望。

由重力梯度对角线分量构成新的观测数据时间系列:

$$W(t_i) = V_{xx}(t_i) + V_{yy}(t_i) + V_{zz}(t_i) \tag{2}$$

若  $W(t_i)$  存在系统偏差,则可以从  $W(t_i)$  中扣除其中位值以减弱系统偏差的影响,即

$$W'(t_i) = W(t_i) - M \tag{3}$$

式中, $M$  为  $W(t_i)$  的中位值。

根据迹条件可探测  $W(t_i)$  或  $W'(t_i)$  是否存在粗差。该条件只能用于重力梯度对角线分量的粗

差探测,并且不能明确分辨出哪个对角线重力梯度分量带有粗差。

3.1.2 连续性条件

引力位的二阶导数在地球外部空间是连续的,相邻历元的重力梯度值应不存在突变,该性质可作为重力梯度数据的粗差探测依据。若重力梯度观测数据中没有粗差,则有:

$E(T_{ij}) = 0, T_{ij}(P) = V_{ij}(P) - V_{ij}^{int}(P)$  (4)

式中,  $V_{ij}(P)$  和  $V_{ij}^{int}(P)$  分别为  $P$  点重力梯度的观测值和内插值,其中内插值由  $P$  点前后若干个历元的重力梯度观测值依据有关内插方法(如 Overhauser 样条插值法)计算得到。根据连续性条件可探测每个重力梯度分量是否存在粗差。该方法具有计算简单快速的优点,但要求内插误差可忽略不计,且难以发现成批的粗差(某时间段内连续出现的粗差)。

降低信噪比有利于发现粗差,为此可以首先在重力梯度观测值中扣除模型重力梯度的影响,然后直接对残差重力梯度(或重力梯度异常)进行粗差探测。若模型重力梯度或重力梯度观测值存在系统偏差,可采用类似式(3)的方法处理。

3.2 探测方法

粗差探测方法很多,下面仅讨论  $\omega$  检验、阈值法、检验和小波方法。

3.2.1  $\omega$  检验

$\omega$  检验实际上是带有条件方程的假设检验方法<sup>[14]</sup>。假设观测向量  $y$ (如重力梯度观测值)的误差服从正态分布,即

$y \sim N(E\{y\}, Q_y)$  (5)

构造原假设  $H_0: B^T E\{y\} = 0$ , 备选假设  $H_1: B^T E\{y\} = c_t \nabla, \nabla \neq 0$ 。其中  $B^T$  为条件方程阵(如迹条件),  $c_t = B^T c_y, c_y$  为单位向量(对应被检验观测量的元素为 1,其余为 0),  $\nabla$  是未知大小的粗差。

构造统计量:

$\omega = \frac{c_t^T Q_t^{-1} t}{\sqrt{c_t^T Q_t^{-1} c_t}}$  (6)

式中,  $t = B^T y; Q_t = B^T Q_y B$ 。

在  $H_0$  成立时,即观测向量  $y$  没有粗差,  $\omega$  服从正态分布。因此,若  $\omega < -k_\alpha$  或  $\omega > k_\alpha$ ,则被检验观测量存在粗差,  $k_\alpha$  为临界值,其大小取决于显著水平  $\alpha$ 。

3.2.2 阈值法

假设数据向量  $x$ (如式(4)中的  $T_{ij}$ )服从正态分布,即  $x \sim N(\mu, \sigma)$ ,若  $x_i$  满足:

$|x_i - \mu| > k\sigma; k = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, m\}$  (7)

则认为  $x_i$  存在粗差,其中  $k$  的值可根据实际情况来选择。

若母体的均值和标准差未知,则可用样本的均值和标准差代替之,此时式(7)改写为:

$|x_i - \bar{x}_m| > ks_m; k = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, m\}$  (8)

该方法计算简单快速,适用于海量数据的处理,但探测效果取决于  $k$  和  $m$  的选取,难以发现小的粗差和成批的粗差。

3.2.3 小波方法

小波分析已广泛应用于重力场逼近、滤波与预测、数值计算和数据解释等领域<sup>[15]</sup>。小波变换可看作是可变带宽的带通滤波,小波分解把信号分解到尺度空间和细节空间,通过设定阈值修改小波系数可以实现 GOCE 重力梯度数据的粗差定位、滤波和去噪,其数据处理流程如图 2 所示。小波变换具有良好的时频刻画特性和自适应强的优点,在分析不同频率上的误差特性时具有独特能力,很容易确定误差或粗差在时域或空域中的位置。Kern 等<sup>[8]</sup>采用 Haar 小波的模拟研究表明,该方法应用于粗差探测的成功率可达到 99.1%,失败率为 2.4%。

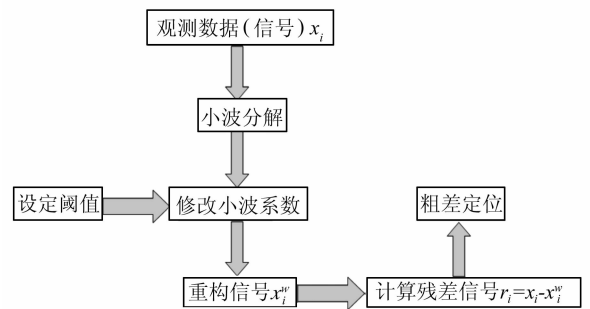


图 2 GOCE 重力梯度数据的小波粗差探测方案  
Fig. 2 Wavelet Outlier Detecting Scheme for GOCE Gradiometry Data

4 外部校准

GOCE 数据的校准包括卫星飞行前的地面校准、卫星飞行期间的在轨校准(内部校准)和外部校准,本文只讨论 GOCE 重力梯度数据的外部校准方法。GOCE 重力梯度数据的外部校准方法包括,基于地球重力场模型的校准方法、基于 GOCE SST 数据的校准方法和基于地面重力数据的校准方法。

4.1 基于地球重力场模型的校准方法

该方法类似于利用已知地球重力场模型校准 CHAMP、GRACE 加速度计数据的方法,即利用

已知高精度地球重力场模型(如 EGM96、EGM2008、EIGEN\_GL04C 等)计算 GOCE 卫星轨道处的重力梯度(模型重力梯度),将模型重力梯度与重力梯度观测值进行比较,根据校准模型计算重力梯度分量的偏差和尺度因子,适用于校准所有重力梯度观测数据。由于 GOCE 重力梯度数据在低频信号中存在有色噪声( $1/f$ )的影响,地球重力场模型的误差也会影响校准结果,因此,实际校准时需要将 GOCE 重力梯度数据和模型重力梯度数据同时进行滤波处理(如 Butterworth 滤波)。Bouman 等<sup>[6]</sup>的模拟研究结果表明,该方法能够以优于  $10^{-3}$  的精度估计重力梯度分量的尺度因子。

4.2 基于 GOCE SST 数据的校准方法

GOCE 卫星可以获得高-低卫星跟踪卫星测量数据(星载 GPS 跟踪数据)、重力梯度数据(差分模式)、加速度计数据(普通模式)和恒星跟踪装置测定的卫星姿态数据。基于简化动力学方法,联合星载 GPS 跟踪数据、加速度计数据和卫星姿态数据可以确定卫星的轨道、低阶(如 80 阶)重力场模型和加速度计校准参数。同时,利用重力梯度数据、简化动力法定轨结果和卫星姿态数据也可以确定地球重力场模型,并且该重力场模型的低阶部分与由高-低卫星跟踪卫星数据确定的重力场模型重叠。由于高-低卫星跟踪卫星数据对低阶重力场更加敏感,因此可以利用 GOCE SST 数据校准卫星重力梯度数据。该方法可以联合星载 GPS 跟踪数据、重力梯度数据、加速度计数据和卫星姿态数据同时求解卫星的轨道、低阶重力场模型、加速度计校准参数和重力梯度数据的校准参数,其数据处理方案如图 3 所示<sup>[12]</sup>。由于 GOCE 重力梯度数据在低频信号中存在有色噪声的影响,实际校准时也需要对 GOCE 重力梯度数据进行高通滤波处理。Visser 的模拟研究结果表明<sup>[12]</sup>,该方法不仅能够以优于  $4 \times 10^{-3}$  的精度估计重力梯度对角线分量的尺度因子,而且估计 X 方向(沿轨方向)加速度计的联合偏差和 Y 方向(垂直于轨道方向)加速度计的尺度因子也是可行的。

4.3 基于地面重力数据的校准方法

在地面上选择具有高精度重力数据且覆盖较好(分布均匀)的区域作为检验区,采用最小二乘配置法、积分法等向上延拓方法,由地面重力数据计算卫星轨道处的重力梯度数据(重力梯度的计算值),通过比较重力梯度的计算值与观测值来估计 GOCE 重力梯度观测数据的偏差和尺度因子。如果已采用上述方法(4.1 或 4.2)对 GOCE 重力

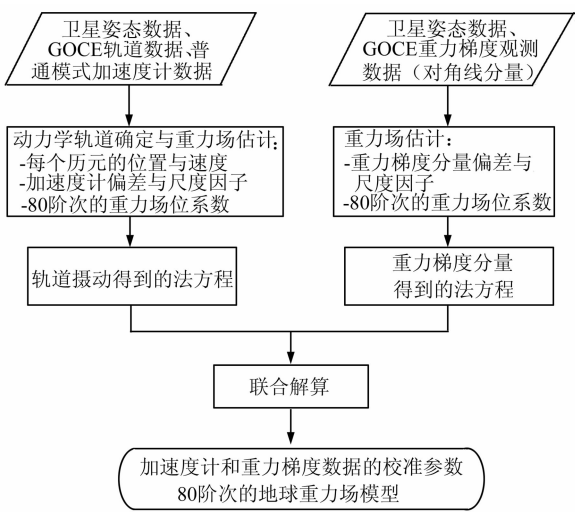


图 3 基于 GOCE SST 数据校准 GOCE 重力梯度对角线分量的处理方案

Fig. 3 Processing Scheme for the Calibration of the Diagonal Gravity Gradients by GOCE SST Data

梯度观测数据进行了校准,则利用该方法还可评价上述两种校准方法的有效性。该方法的缺点是只能用于校准通过检验区的卫星轨道上的重力梯度数据,因地面重力数据的限制不能校准全球的重力梯度数据,并且其校准参数可能与检验区的选择有关。此外,考虑到 GOCE 重力梯度仪的有效测量带宽为  $5\text{ mHz} \sim 0.1\text{ Hz}$ ,检验区域的大小应接近  $12^\circ \times 12^\circ$  的范围,相当于 GOCE 卫星 200 s ( $5\text{ mHz}$ ) 飞行的距离所穿过的区域。模拟研究结果表明,该方法能够以  $10^{-2}$  的精度估计重力梯度的尺度因子<sup>[3,6,11]</sup>。

5 结 语

GOCE 重力梯度观测数据的预处理是实现其预期科学目标的重要任务之一。本文主要讨论了重力梯度测量数据的预处理方案、时变重力场信号改正、粗差探测和外部校准方法。随着 GOCE 卫星的成功发射和真实卫星重力梯度数据的获取,需要进一步分析重力梯度测量数据的噪声及其频谱特性,在粗差探测和外部校准中必须设计高效稳定的数字滤波器以便消除或减弱低频有色噪声的影响;针对现有粗差探测方法的缺陷,结合卫星重力梯度测量的特点研究新的粗差探测方法,如统计检验与小波分析相结合的粗差探测方法;基于 GOCE SST 数据、高精度地球重力场模型和区域地面重力数据的外部校准方法互为补充,联合使用这三种方法才能实现重力梯度数据的相对校准和绝对校准。

参 考 文 献

[1] ESA. Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission[R]. Reports for Mission Selection, the Four Candidate Earth Explorer Core Missions, The Netherlands, ESA SP-1233(1), 1999

[2] Gruber T, Rummel R, Abrikosov O, et al. GOCE Level 2 Product Data Handbook[R]. ESA Publication Division, GO-MA-HPF-GS-0110, 2007

[3] Arabelos D, Tscherning C. Calibration of Satellite Gradiometer Data Aided by Ground Gravity Data [J]. Journal of Geodesy, 1998, 72: 617-625

[4] Bouman J, Koop R. Error Assessment of GOCE SGG Data Using Along Track Interpolation [J]. Advances in Geosciences, 2003(1): 27-32

[5] Bouman J. Quick-look Outlier Detection for GOCE Gravity Gradients[J]. Newton's Bulletin 2, 2004 (2): 78-87

[6] Bouman J, Koop R, Tscherning C, et al. Calibration of GOCE SGG Data Using High-low SST, Terrestrial Gravity Data, and Global Gravity Field Models [J]. Journal of Geodesy, 2004, 78: 124-137

[7] Kern M, Haagsmans R. Determination of Gravity Gradients from Terrestrial Gravity Data for Calibration and Validation of Gradiometric GOCE Data [C]. IAG Symposia 129 - Gravity, Geoid and Space Missions, Springer, 2005

[8] 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: 509-519

[9] Koop R, Bouman J, Schrama E, et al. Calibration and Error Assessment of GOCE Data [C]. IAG Symposia 125 - Vistas for geodesy in the new millennium, Springer, 2002

[10] Pail R, Plank G. GOCE Gravity Field Processing Strategy [J]. Stud Geophys Geod, 2004, 48: 289-309

[11] Tscherning C, Veicherts M, Arabelos M. Calibration of GOCE Gravity Gradient Data Using Smooth Ground Gravity [C]. The GOCINA Workshop, Luxembeng, 2006

[12] Visser P. GOCE Gradiometer Validation by GPS[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(10): 1 630-1 637

[13] Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F, et al. GRACE Observations of Changes in Continental Water Storage[J]. Global and Planetary Change, 2006, 50: 112-126

[14] Teunissen P. Testing theory: An introduction [M]. Delft: Delft University Press, 2000

[15] 宁津生,汪海洪,罗志才. 小波分析在大地测量中的应用及其进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004,29(8):659-664

第一作者简介:罗志才,教授,博士生导师。现主要从事物理大地测量学和卫星重力学研究。  
E-mail:zhcluo@sgg.whu.edu.cn

Pre-processing of the GOCE Satellite Gravity Gradiometry Data

LUO Zhicai<sup>1,2</sup> WU Yunlong<sup>1</sup> ZHONG Bo<sup>1</sup> YANG Guang<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The anticipated scientific objective of the GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) mission is to determine the global static earth's gravity field with a spatial resolution of half wavelength 70 km, and an accuracy of 1mGal gravity anomaly and of 1-2 cm geoid. The pre-processing of the satellite gravity gradiometry data is one of the most important tasks to the realization of the GOCE scientific goal. For this purpose, the pre-processing scheme of the satellite gravity gradiometry data is presented in the paper. And then the methods of time-variable gravity gradient corrections, outlier detection and external calibration are discussed. Moreover, it will provide the suggestions and guidance to the further study of the pre-processing for the GOCE satellite gravity gradiometry data.

**Key words:** GOCE; satellite gravity gradiometry; pre-processing; outlier detection; external calibration

About the first author: LUO Zhicai, professor, Ph.D supervisor. He is engaged in the research on physical geodesy and satellite gravimetry.  
E-mail: zhcluo@sgg.whu.edu.cn