

引文格式: 陈秋杰, 沈云中, 张兴福, 等. 基于 GRACE 卫星数据的高精度全球静态重力场模型[J]. 测绘学报, 2016, 45(4): 396-403. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. 20150422.
CHEN Qiujié, SHEN Yunzhong, ZHANG Xingfu, et al. GRACE Data-based High Accuracy Global Static Earth's Gravity Field Model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(4): 396-403. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. 20150422.

基于 GRACE 卫星数据的高精度全球静态重力场模型

陈秋杰^{1,2,3}, 沈云中¹, 张兴福⁴, 陈 武², 许厚泽⁵

1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 香港理工大学土地测量及地理资讯学系, 香港;
3. 同济大学空间信息与可持续发展应用中心, 上海 200092; 4. 广东工业大学测绘工程系, 广东 广州
510006; 5. 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077

GRACE Data-based High Accuracy Global Static Earth's Gravity Field Model

CHEN Qiujié^{1,2,3}, SHEN Yunzhong¹, ZHANG Xingfu⁴, CHEN Wu³, XU Houze⁵

1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development, Shanghai 200092, China; 4. Departments of Surveying and Mapping, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 5. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Wuhan 430077, China

Abstract: To recover the highly accurate static earth's gravity field by using GRACE satellite data is one of the hot topics in geodesy. Since linearization errors of dynamic approach quickly increase when extending satellite arc length, we established a modified dynamic approach for processing GRACE orbit and range-rate measurements in this paper, which treated orbit observations of the twin GRACE satellites as approximate values for linearization. Using the GRACE data spanning the period Jan. 2003 to Dec. 2010, containing satellite attitudes, orbits, range-rate, and non-conservative forces, we developed two global static gravity field models. One is the unconstrained solution called Tongji-Dyn01s complete to degree and order 180; the other one is the Tongji-Dyn01k model computed by using Kaula constraint. The comparisons between our models and those latest GRACE-only models (including the AIUB-GRACE03, the GGM05S, the ITSG-Grace2014k and the Tongji-GRACE01) published by different international groups, and the external validations with marine gravity anomalies from DTU13 product and height anomalies from GPS/levelling data, were performed in this study. The results demonstrate that the Tongji-Dyn01s has the same accuracy level with those of the latest GRACE-only models, while the Tongji-Dyn01k model is closer to the EIGEN6C2 than the other GRACE-only models as a whole.

Key words: GRACE static gravity field; dynamic approach; linearization; regularization

Foundation support: The National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB957703); The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41474017; 41274035); State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics (No. SKLGED2014-1-3-E); State Key Laboratory of Geo-information Engineering (No. SKLGIE2014-M-1-2)

摘要: 应用 GRACE 卫星数据反演高精度静态地球重力场是大地测量学界的热点之一。考虑到经典动力学法线性化误差随弧长拉长而迅速增长, 本文以 GRACE 卫星轨道观测值为初值的线性化方法, 建立了应用 GRACE 卫星轨道和星间距离变率反演地球重力场的改进动力学法理论模型。利用 2003 年 1 月至 2010 年 12 月的 GRACE 卫星姿态、轨道、星间距离变率和非保守力加速度等观测数据, 解算了一个 180 阶次的无约束全球静态重力场模型 Tongji-Dyn01s 和一个采用 Kaula 规则约束的全球重力场模型 Tongji-Dyn01k。与国际不同机构最新发布的纯 GRACE 数据解算的重力场模型(包括 AIUB-

GRACE03S、GGM05S、ITSG-Grace2014k 和 Tongji-GRACE01) 进行比较,并利用 DTU13 海洋重力异常和 GPS/水准高程异常进行外部检核,结果表明, Tongji-Dyn01s 与国际最新模型精度处于同一水平, 然而 Tongji-Dyn01k 模型总体上更加靠近 EIGEN6C2 重力场模型。

关键词: GRACE 静态重力场; 动力学法; 线性化; 正则化

中图分类号:P223

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2016)04-0396-08

基金项目:国家 973 计划(2012CB957703);国家自然科学基金(41474017;41274035);大地测量与地球动力学国家重力实验室开放基金(SKLGED2014-1-3-E);地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2014-M-1-2)

地球重力场的分布源于地球质量、密度分布以及质量的重新分布(包括地球内部运动、大气运动、水循环、潮汐)。地球内部物质的质量分布可划分为稳态分布与非稳态分布,稳态分布决定了静态地球重力场,非稳态的质量重分布决定了时变地球重力场的特性。CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload)^[1]、GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)^[2] 和 GOCE (Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer)^[3] 是当今卫星重力探测的 3 类典型重力卫星。其中,CHAMP 主要探测低阶地球重力场^[1];GRACE 的最大贡献在于探测非稳态地球重力场并用于全球气候时变监测^[4];GOCE 的主要目标是探测高阶静态地球重力场信号^[5],尤其是 100 阶后的重力场信息。对于探测前 100 阶的重力场信号,GRACE 卫星的优势仍然明显大于 GOCE 卫星。尽管 GARCE 卫星的预期寿命为 5 a,但该卫星自 2002 年 3 月发射后,至今仍在运行,已经提供了约 12 a 的观测数据,因此可利用 GRACE 卫星的长时间数据序列反演高精度的静态地球重力场。目前国际上有多个研究机构利用 GRACE 卫星长时间观测序列反演静态地球重力场模型。其中,用纯 GRACE 数据解算的最新无约束重力场模型包括 GGM05S^[6]、AIUB-GRACE03S^[7]、ITSG-Grace2014s^[8] 以及 Tongji-GRACE01^[9],约束重力场模型仅仅只有 ITSG-Grace2014k^[8]。我国很多学者对应用卫星重力数据反演静态地球重力场作出了卓有成效的工作与贡献,取得了许多研究成果^[9-18]。如文献[18]利用经典动力学法恢复了 100 阶次的 GRACE 静态重力场模型。

动力学法是卫星重力反演的常用方法^[19],其核心思想是根据卫星初始状态参数、先验重力场模型以及其他力模型确定的参考轨道为初值,对卫星重力反演的非线性观测方程进行线性化。动

力学法的线性化观测方程的设计矩阵需通过变分方程数值积分,且需多次迭代解算。文献[20]提出以卫星轨道观测值为初值的线性化方法,然而涉及四重积分计算,模型比较复杂。文献[21]采用类似的思想改进加速度法,并利用 GRACE 卫星轨道数据反演重力场。本文将该线性化方法用于改进动力学法,并利用 2003 年 1 月至 2010 年 12 月共 8 a 的 GRACE 卫星轨道、星间距离变率、姿态和非保守力加速度数据,解算一个 180 阶次的 Tongji-Dyn01s 全球静态重力场模型。为改善高阶系数精度,进一步使用 Kaula 规则约束位系数,解算了一个 180 阶次的静态重力场模型 Tongji-Dyn01k。利用现有的高精度重力场模型, GPS 水准和 DTU13 海洋重力异常数据对 Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 静态重力场模型的精度进行了检核,结果表明 Tongji-Dyn01s 模型与国际最新的纯 GRACE 重力场模型精度相当,而且 Tongji-Dyn01k 模型总体上优于国际最新的纯 GRACE 重力场模型。

1 理论方法

对于由 $N+1$ 个离散点所构成的卫星轨道弧段,根据动力学法,第 i 个历元时刻 t_i 的位置 $\mathbf{r}(t_i)$ 与速度 $\dot{\mathbf{r}}(t_i)$ 方程可描述为

$$\mathbf{r}(t_i) = \mathbf{r}_0 + \dot{\mathbf{r}}_0(t_i - t_0) + \int_{t_0}^{t_i} \int_{t_0}^{t'} \mathbf{a}(t'') dt'' dt' \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$\dot{\mathbf{r}}(t_i) = \dot{\mathbf{r}}_0 + \int_{t_0}^{t_i} \mathbf{a}(t'') dt'' \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中, $\mathbf{a}(t'')$ 为 t'' 时刻卫星单位质量所受合力, 可由相邻历元加速度的 K 阶多项式内插而得

$$\mathbf{a}(t'') = \sum_{j=0}^K \lambda_j \mathbf{a}(t_j) \quad (3)$$

式中, λ_j 为多项式系数。将式(3)代入式(1)和式(2), 可将式(1)和式(2)离散化为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t_i) &= \mathbf{r}_0 + \dot{\mathbf{r}}_0(t_i - t_0) + \Delta t^2 \sum_{j=0}^N \alpha_j \mathbf{a}(t_j) \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{r}}(t_i) = \dot{\mathbf{r}}_0 + \Delta t \sum_{j=0}^N \beta_j \mathbf{a}(t_j) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中, $(\mathbf{r}_0^T, \dot{\mathbf{r}}_0^T)^T$ 为卫星初始位置与速度向量; Δt 为轨道采样率(5 s); α_j 和 β_j 为离散化系数; N 为弧段观测历元最大下标。 $\mathbf{a}(t_j)$ 可表示为保守力 \mathbf{a}_g 和非保守力 \mathbf{a}_f 的关系式^[22-23]

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(t_i) &= \mathbf{a}_g(\mathbf{r}(t_i), \mathbf{u}) + \mathbf{a}_f(t_i) \\ \mathbf{a}_f(t_i) &= \mathbf{C}(\mathbf{q}_i)^T (\mathbf{S}f_{acc} + \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 保守力 \mathbf{a}_g 是卫星轨道位置 $\mathbf{r}(t_i)$ 和重力位系数 \mathbf{u} 的函数; 非保守力与卫星姿态 \mathbf{q}_i 和星固系下非保守力加速度观测值 f_{acc} 有关; \mathbf{C} 为星固系到惯性系间的转换矩阵。由于加速度计观测值为有偏观测量, 一般需要估计加速度计尺度 S 和偏差 p 。由于尺度参数与重力场位系数存在较强相关性, 因此本文与 GFZ 一样, 只估计偏差参数 p 。将式(4)—式(6)中的卫星轨道以几何轨道 \mathbf{r}_k 与为初值展开

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_k(t) + \mathbf{v}_{r_k}(t) \quad (7)$$

式中, \mathbf{v}_{r_k} 为几何轨道的改正向量。将式(7)代入式(4)—式(6), 并以重力场位系数、初始速度参数和加速度计偏差等参数的先验值 $\mathbf{u}_0, \dot{\mathbf{r}}_0^0$ 和 \mathbf{p}_0 为概率值对卫星位置和速度方程式(4)和式(5)线性化, 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i + \mathbf{v}_{r_i} &= \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_{r_0} + (t_i - t_0)(\dot{\mathbf{r}}_0^0 + \delta\dot{\mathbf{r}}_0) + \\ &+ \Delta t^2 \sum_{j=0}^N \alpha_j \left(\mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0) + \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{u}} \delta\mathbf{u} + \right. \\ &\left. + \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{p}} \delta\mathbf{p} + \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{r}_j} \mathbf{v}_{r_j} \right) \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_i &= \dot{\mathbf{r}}_0^0 + \delta\dot{\mathbf{r}}_0 + \Delta t \sum_{j=0}^N \beta_j \left(\mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0) + \right. \\ &\left. + \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{u}} \delta\mathbf{u} + \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{p}} \delta\mathbf{p} + \right. \\ &\left. + \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{r}_j, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{r}_j} \mathbf{v}_{r_j} \right) \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (9)$$

若分别记 $\boldsymbol{\gamma} = [\dot{\mathbf{r}}_0^T \ \mathbf{p}^T]^T$, 则星间距离变率观测模型可建立为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}(t_i) &= \mathbf{e}_{AB}^T(t_i) \cdot (\dot{\mathbf{r}}_B(t_i) - \dot{\mathbf{r}}_A(t_i)) = \\ &= \mathbf{f}(\mathbf{r}_A(t_i), \mathbf{r}_B(t_i), \mathbf{u}, \boldsymbol{\gamma}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\dot{\rho}(t_i)$ 为星间距离变率观测值; $\mathbf{e}_{AB}(t_i)$ 为 GRACE 卫星 A 至 GRACE 卫星 B 的视线向量。顾及 GRACE 卫星 A 和 B 的位置与速度的线性化方程, 可将距离变率观测模型式(10)线性化为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}(t_i) + v_{\rho}(t_i) &= \mathbf{f}(\mathbf{r}_A(t_i), \mathbf{r}_B(t_i), \mathbf{u}_0, \boldsymbol{\gamma}_0) + \\ &+ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \delta\mathbf{u} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\gamma}} \delta\boldsymbol{\gamma} + \sum_{j=0}^N \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{r}_{A_j}} v_{r_{A_j}} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{r}_{B_j}} v_{r_{B_j}} \right) \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $v_{\rho}(t_i)$ 为星间距离变率观测值改正数。

假设有 M 个弧段, 对于第 k 个弧段, 为联合卫星轨道与星间距离变率数据求解重力场, 该弧段所有历元的卫星轨道和星间距离变率的观测方程可用矩阵形式表示为

$$\mathbf{A}_k \delta \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{v}_k = \mathbf{l}_k \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

式中, 待估参数 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{u}^T \ \boldsymbol{\gamma}_k^T]^T$ 为全局重力场参数 \mathbf{u} 与局部参数 $\boldsymbol{\gamma}_k$ (包括初始速度参数与加速度偏差参数); \mathbf{A}_k 为观测方程式(8)和式(11)中关于位系数与弧段局部参数的偏导数矩阵; \mathbf{B}_k 观测方程式(8)和式(11)中关于轨道与星间距离变率观测值的偏导数矩阵; \mathbf{l}_k 为卫星轨道和星间距离观测向量与参考向量之差。基于最小二乘准则可得到每个弧段关于待估参数的法方程为

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}_k^T (\mathbf{B}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{B}_k^T)^{-1} \mathbf{A}_k) \left[\begin{array}{c} \delta \mathbf{u} \\ \delta \boldsymbol{\gamma}_k \end{array} \right] &= \mathbf{A}_k^T (\mathbf{B}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{B}_k^T)^{-1} \mathbf{l}_k \\ k &= 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (13)$$

式中, \mathbf{Q}_k 为轨道和星间距离变率观测值方差-协方差矩阵, 可根据轨道和星间距离变率观测值先验精度确定(轨道精度约为 2 cm; 星间距离变率精度约为 $0.2 \mu\text{m/s}$)^[23]。消去局部参数 $\boldsymbol{\gamma}_k$ 后得到只与位系数有关的法方程, 进一步累加各个弧段与位系数有关的法方程并求得重力场参数, 具体解算方法可参考文献[21—23]。当解算的重力位模型达到 180 阶次时, 其法方程严重病态。为改善法方程的病态性, 本文采用 Kaula 约束的正则化方法进行位系数解算, 相关算法参见文献[24]。

2 静态地球重力场模型反演

本文采用 2003 年 1 月至 2010 年 12 月共 8 a 的 GRACE 卫星 A 和 B 的观测数据反演了 180 阶次的 Tongji-Dyn01s 静态地球重力场。所用的数据包括由 JPL 提供的 K 波段星间距离变率、卫星姿态、非保守力加速度数据以及武汉大学 GNSS 研究中心提供的约化动力学轨道^[25]。几何轨道直接由 GNSS 观测值确定, 不受先验重力场制约, 更适合于重力场反演; 而约化动力学轨道无疑会受先验重力场模型影响, 但若与距离变率数据一起组合求解, 先验重力场的影响就大为减

少^[22],因此本文反演重力场时以约化动力学轨道作为观测值,且在线性化时也以约化动力学轨道为初值。原始观测数据需进行预处理,比如卫星姿态和非保守力加速度数据存在数据间断,尤其是卫星姿态的间断十分频繁,需进行内插处理;距离变率数据为 GRACE 卫星最重要的观测量,对中长波重力信号十分敏感,然而其存在数据间断和粗差,本文直接忽略掉间断的距离变率数据;约化动力学轨道十分平滑,不存在数据间断和粗差,可用于剔除星间距离变率数据粗差。此外,还需顾及日月等行星三体扰动、海潮、海洋极潮、固体潮、固体极潮、大气与海洋的非潮汐变化和相对论效应等保守力以及非保守力摄动,具体参见文献^[23]。

GFZ 利用经典动力学法反演高精度的 EIGEN6C2 模型时并未估计非保守力加速度尺度参数。因此,本文中非保守力尺度并未作为待估参数,其采用 Bettadpur 推荐值^[26]。与 GFZ 相同^[27],本文每小时估计一组非保守力加速度偏差。由于在形成每个弧段法方程时均需计算逆矩阵 $(\mathbf{B}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{B}_k^T)^{-1}$,该矩阵规模与弧段长度有关,矩阵规模太大将不利于求逆的稳定性。为了选择较为合适的弧段长度,本文利用 2008 年 1 月的 GRACE 数据,分别以 0.5 h、1 h 和 2 h 弧长反演得 3 组 60 阶次的重力场解,每个弧段估计一组初始速度参数。图 1 为 3 组重力场解相对于 EIGEN6C2^[28] 的大地水准面误差,结果表明 1 h 的弧长比较适合本文改进的动力学法。因此在解算 Tongji-Dyn01s 静态地球重力场模型时,本文积分弧长取为 1 h,每个弧段估计一组加速度偏差参数。

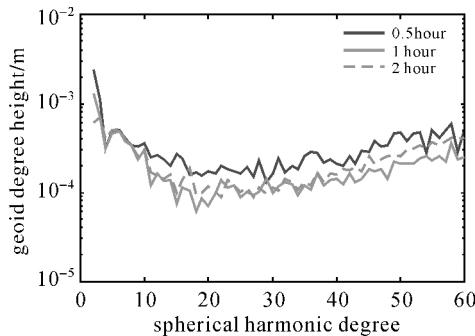


图 1 不同弧长所得重力场解相对于 EIGEN6C2 大地水准面阶误差

Fig. 1 Geoid degree errors of solutions computed by using different arc lengths with respect to EIGEN6C2

本文以卫星轨道观测值为初值对卫星运动方程进行线性化,其优点在于重力场解算结果不依

赖于初始重力场模型,且不需要迭代计算,不同的初始重力场模型仅仅是改变观测方程的常数项向量^[21]。然而,以卫星轨道观测值为初值对卫星运动方程进行线性化,其缺点在于每个积分弧段均需计算逆矩阵 $(\mathbf{B}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{B}_k^T)^{-1}$,弧段较长时该求逆运算的工作量比较大。Tongji-Dyn01s 模型的法方程条件数达到 1.9×10^{13} ,显然该法方程严重病态,必定会影响高阶重力位系数的解算精度。因此本文对重力位系数用 Kaula 规则约束,并采用正则化算法解算了全球静态地球重力场模型 Tongji-Dyn01k。正则化因子是以 MSE 迹最小为准则来确定^[10],图 2 表明,正则化参数取 1.0×10^6 时,MSE 迹最小。

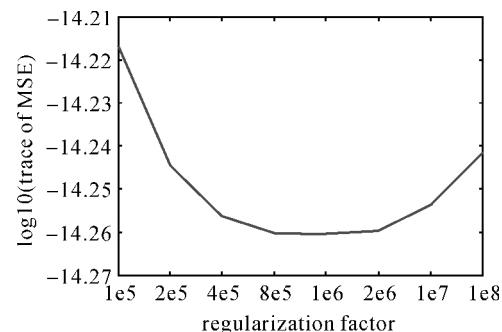


图 2 不同正则化因子所对应的 MSE 的迹(取对数)
Fig. 2 Trace of MSE (log10 scale) from different regularized factors

3 Tongji-Dyn01s 与 Tongji-Dyn01k 静态地球重力场的精度分析

为了检核 Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 模型的精度水平,本文将 Tongji-Dyn01s、Tongji-Dyn01k 与最新发布的 GGM05S、AIUB-GRACE03S、ITSG-Grace2014k、Tongji-GRACE01 等纯 GRACE 重力场模型进行比较分析。其中,GGM05S 为美国德克萨斯大学空间中心(CSR)利用经典动力学法基于 10 a 的 GRACE 数据所解算的 180 阶次无约束模型;AIUB-GRACE03S 为瑞士伯尼尔大学基于天体力学方法(其本质是动力学法,区别在于采用了不同的参数化方法,如采用开普勒轨道根数并引入经验加速度参数)利用 6 a 的 GRACE 数据所解算的 160 阶次无约束模型;ITSG-Grace2014k 为德国波恩大学基于经典短弧长积分法利用约 10.5 a 的 GRACE 数据所解算的 200 阶次正则化约束模型;Tongji-GRACE01 为同济大学利用改进的短弧长积分法基于 4 a GRACE 数据所

解算的 160 阶次无约束模型。GFZ 推出的 EIGEN6C2 模型采用多种观测数据求得,包括 GRACE、GOCE、Lageos(Laser Geodynamics Satellite)^[29]、海洋测高、地面重力以及航空重力数据,具有非常高的精度,本文将其作为基准模型评价不同 GRACE 重力场模型内符合精度。

各模型相对于 EIGEN6C2 的大地水准面阶误差如图 3 所示。由图 3 可见, Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 在前 100 阶次比当前其他所有的 GRACE 重力场模型更加靠近 EIGEN6C2。尤其是在前 60 阶, Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 的大地水准面误差比 GGM05S、AIUB-GRACE03S、ITSG-Grace2014k 和 Tongji-GRACE01 等模型约小一个量级。Tongji-Dyn01s 在 100 阶次后与 GGM05S、AIUB-GRACE03S 和 Tongji-GRACE01 等模型非常接近。Tongji-Dyn01k 在 101 到 160 阶次间大地水准面误差稍大于 ITSG-Grace2014k。然而在 161 到 180 阶次之间, Tongji-Dyn01k 大地水准面误差小于 ITSG-Grace2014k。

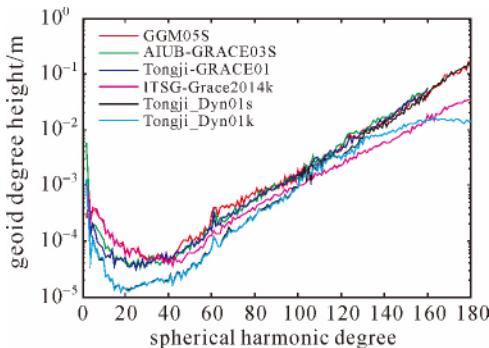


图 3 不同模型相对于 EIGEN6C2 大地水准面阶误差

Fig. 3 The geoid degree errors of different models with respect to EIGEN6C2

为了进一步比较 Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 模型与其他 GRACE 重力场模型间的内符合精度,本文利用这些模型截断到不同阶次计算全球重力异常信号。图 4 给出了不同模型扣除 EIGEN6C2 系数后截断至 180 阶次的重力异常信号。由于 EIGEN6C2 使用了 GOCE 梯度数据,高阶次系数精度优于纯 GRACE 模型,因此图 4 反映不同纯 GRACE 模型高阶位系数的误差。图 4 表明,无约束解 GGM05S 和 Tongji-Dyn01s 模型高阶位系数误差均大于正则化解 ITSG-GRACE2014k 和 Tongji-Dyn01k,且高纬度地区的误差明显大于低纬度地区;其主要原因是卫星重力

反演模型是病态的,且 GRACE 轨道在两极存在 1°左右空白,导致高阶次位系数和高纬度区域的误差偏大;正则化解能够抑制高阶次位系数的误差,因此正则化解的结果要明显优于无约束解。Tongji-Dyn01k 的误差小于所有模型,其 180 阶次位系数与 EIGEN6C2 重力异常差值标准差仅为 3.6 mGal (1 Gal=10⁻² m/s²)。为了分析 Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 的外部精度,笔者利用丹麦技术大学发布的 DTU13 产品(分辨率 2'×2',精度约为 2 mGal)^[30-31] 中太平洋中部 64 980 个海洋重力异常数据,对上述不同模型在太平洋中部海洋重力异常进行检核。具体区域为([17°S, 23°S], [314°E, 326°E])^[32], 面积约为 83.8 万 km²。各模型分别截断至 120、150 和 180 阶次,并由 EIGEN6C2 填补高阶次系数(完全至 1949 阶),依次计算太平洋中部重力异常。表 1 给出了不同模型截断至不同阶次的重力异常差值统计结果。可以看出,无论是截断到 120 还是 150 阶次,不同模型所计算的重力异常与 DTU13 海洋重力异常差值的标准差均十分接近,可以说这些模型在前 150 阶次的精度水平相当。对于截断到 180 阶次的结果, GGM05S 精度最差,其次是 Tongji-Dyn01s, Tongji-Dyn01k 表现最好,其截断到 180 阶次所计算的太平洋中部海洋重力异常与 DTU13 重力异常之差标准差仅为 4.1 mGal,与截断到 120 和 150 阶次所计算的标准差差别不大,然而其他模型截断到 180 阶次与截断到 120 或 150

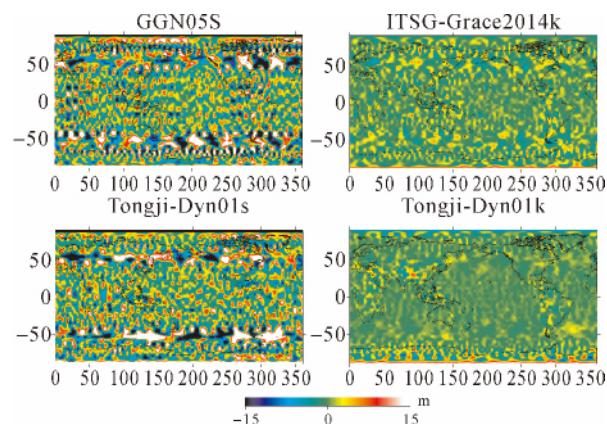


图 4 不同纯 GRACE 模型相对于 EIGEN6C2 的全球重力异常(截断至 180 阶次)

Fig. 4 The difference of global gravity anomalies between GRACE-only models and EIGEN6C2 (truncated to degree and order 180)

相比,其标准差均发生突变,有力地说明了 Tongji-Dyn01k 模型 180 阶次位系数的可靠程度。可以说,截断至 180 阶次计算重力异常差值能够有效区分 GRACE 高阶重力位系数的可靠程度。

表 1 不同模型截断至不同阶次的重力异常差值统计结果
Tab. 1 Statistics of the differences of gravity anomaly from DTU13 and that computed by 6 models truncated to different degrees

模型	阶	统计结果				mGal
		最小值	最大值	平均值	标准差	
AIUB-GRACE03S	120	-26.8	19.1	0.06	3.7	
	150	-23.0	21.0	-0.02	4.2	
Tongji-GARCE01	120	-26.7	19.4	0.03	3.7	
	150	-28.6	19.9	0.02	4.0	
GGM05S	120	-26.8	19.0	0.08	3.7	
	150	24.3	21.6	-0.10	4.3	
	180	-73.3	78.2	-0.42	25.8	
ITSG-Grace2014k	120	-27.0	19.0	0.04	3.7	
	150	-27.3	19.6	-0.02	3.7	
	180	-29.8	25.4	-0.04	4.9	
Tongji-Dyn01s	120	-27.4	19.3	0.03	3.7	
	150	-29.4	22.3	-0.07	3.9	
	180	-49.9	47.7	-0.31	15.4	
Tongji-Dyn01k	120	-27.4	19.1	0.04	3.7	
	150	-27.2	20.3	-0.03	3.7	
	180	-31.0	21.8	-0.02	4.1	

为了进一步客观评价 Tongji-Dyn01s 与 Tongji-Dyn01k 模型的精度水平,本文采用美国、墨西哥和江西 3 个地区的 GPS/水准网观测数据进行外部检核。其中美国和墨西哥数据可从网站(<http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/GEOID12>)下载,其水准点数据本文分别选取 8006 个和 536 个,江西选取 117 个。各模型分别截断至 90、120、150 和 180 阶,并采用 EIGEN6C2 填补高阶位系数(完全至 1949 阶),依次计算美国、墨西哥和江西等地区的大地水准面高程异常。统计计算值与实测值的最大值、最小值与标准差,结果如表 2 所示。表 2 中,对于截断至相同阶次(90 和 120),从所计算的模型高程异常与实测结果之差的标准差来看,所有模型在美国、墨西哥和江西的表现相当。对于截断到 150 阶次,Tongji-Dyn01s 的表现仅仅略逊于 ITSG-Grace2014k,然而 Tongji-Dyn01k 优于其他模型。尤其对于截断到 180 阶次,无论是利用美国、墨西哥还是江西的数

据进行外部检核,Tongji-Dyn01k 模型精度均远优于其他 GRACE 重力场模型。

4 结 论

本文以卫星轨道观测值为初值对经典动力学法卫星重力反演的非线性观测方程进行线性化,建立了卫星轨道和星间距离变率反演地球重力场的线性化观测模型。与传统动力学法相比,本文所建立的动力学法不需要解算变分方程与迭代计算,且不依赖于先验重力场模型。利用 2003 年 1 月至 2010 年 12 月 GRACE 卫星的姿态、轨道、星间距离变率和非保守力加速度等观测数据,解算了一个 180 阶次的 Tongji-Dyn01s 全球静态重力场模型;进一步对重力位系数进行了 Kaula 规则约束,通过正则化解法求得了 Tongji-Dyn01k 模型。利用多种方法与数据对 Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 模型和国际不同机构最新的纯 GRACE 重力场模型 AIUB-GRACE03S、ITSG-Grace2014k、GGM05S 和 Tongji-GARCE01 的精度进行了分析。

从模型的大地水准面误差看,Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 前 100 阶位系数比国际不同机构的最新 GRACE 重力场模型更加靠近 EIGEN6C2。从全球重力异常看,Tongji-Dyn01s 仅次于 ITSG-Grace2014k,而 Tongji-Dyn01k 相比于其他 GRACE 无约束模型更加靠近 EIGEN6C2。DTU13 太平洋中部海洋重力异常以及美国、墨西哥和江西区域 GPS/水准点的检核结果,证实了 Tongji-Dyn01s 和 Tongji-Dyn01k 模型在前 150 阶次与国际不同机构最新的 GRACE 重力场模型精度处于同一水平,然而 Tongji-Dyn01k 在 180 阶次的位系数精度优于当前所有 GRACE 数据反演的重力场模型,其所计算的太平洋中部重力异常与 DTU13 数据之差标准差仅为 4.1 mGal。总体来说,本文所建立的轨道与星间距离变率理论模型能够有效地提取重力场信号,Kaula 规则约束的正则化解法能够显著改善高阶位系数解算精度。

致谢:感谢美国 JPL 和德国 GFZ 所提供的 GRACE Level-1b 观测数据以及武汉大学 GNSS 研究中心赵齐乐教授所提供的约化动力学轨道数据。

表 2 各模型高程异常与实测 GPS/水准结果之差统计结果

Tab. 2 Statistics of the differences between the height anomaly from GPS/levelling data and that computed by 6 models

模型	阶	美国			墨西哥			江西			cm
		最小值	最大值	标准差	最小值	最大值	标准差	最小值	最大值	标准差	
AIUB-GRACE03S	90	-33.1	54.2	21.8	-109.5	55.6	31.1	-27.8	23.7	10.0	
	120	-34.0	55.3	22.0	-108.8	54.9	31.1	-28.3	22.3	9.6	
	150	-56.5	77.3	23.3	-117.3	58.8	31.6	-35.3	26.2	12.9	
Tongji-GARCE01	90	-33.4	53.6	21.6	-109.7	55.4	31.1	-27.9	23.8	10.0	
	120	-31.9	52.6	21.7	-110.4	56.7	31.1	-28.3	23.6	10.0	
	150	-40.0	66.7	24.0	-109.8	66.3	31.3	-32.4	23.2	9.8	
GGM05S	90	-33.1	54.6	21.9	-110.0	55.5	31.1	-27.6	23.9	10.0	
	120	-32.8	54.9	22.1	-109.8	56.6	30.9	-28.4	24.1	10.0	
	150	-47.6	-66.7	23.4	-114.7	58.8	31.2	-38.6	23.6	12.2	
ITSG-Grace-2014k	180	-185.9	224.1	73.3	-180.0	141.2	58.3	-92.3	103.4	50.3	
	90	-33.0	54.0	21.7	-109.5	55.4	31.1	-27.6	24.0	10.0	
	120	-32.6	53.1	21.8	-110.6	56.4	31.0	-27.7	24.6	10.0	
Tongji-Dyn01s	150	-35.0	55.6	23.1	-105.2	60.8	31.0	-27.5	26.2	10.4	
	180	-70.5	67.6	26.5	-120.0	64.2	33.1	-39.0	24.9	12.3	
	90	33.2	53.7	21.7	-109.4	55.6	31.1	-27.8	23.8	10.0	
Tongji-Dyn01k	120	-34.7	53.3	21.9	-109.5	58.9	31.0	-27.1	24.4	10.1	
	150	-52.9	69.1	25.2	-108.8	64.8	31.6	-29.3	24.7	10.5	
	180	-165.5	175.5	63.4	-163.1	128.7	47.0	-45.9	46.1	19.1	
Tongji-Dyn01k	90	-33.1	53.7	21.6	-109.4	55.6	31.1	-27.7	24.0	9.9	
	120	-34.1	53.6	21.8	-110.4	58.2	31.0	-27.3	24.4	10.0	
	150	-39.8	55.8	22.6	-108.3	58.9	31.1	-27.6	23.9	9.6	
	180	-39.9	58.1	23.5	-104.7	61.9	31.6	-35.3	28.0	12.2	

参考文献：

- [1] REIGBER C, BALMINO G, SCHWINTZER P, et al. A High-quality Global Gravity Field Model from CHAMP GPS Tracking Data and Accelerometry (EIGEN-1S)[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(14): 1-4.
- [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): 278-282.
- [3] DRINKWATER M R, FLOBERGHAGEN R, HAAGMANS R, et al. GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission [C]//BEUTLER G, DRINKWATER M R, RUMMEL R, et al. Proceedings of the Earth Gravity Field from Space — From Sensors to Earth Sciences. The Netherlands: Springer, 2006, 6-8.
- [4] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System [J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.
- [5] BOUMAN J, FIOROT S, Fuchs M, et al. GOCE Gravitational Gradients along the Orbit[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(11): 791-805.
- [6] TAPLEY B D, FLECHTNER F, BETTADPUR S V, et al. The Status and Future Prospect for GRACE after the First Decade[C]// AGU Fall Meeting. [S. l]: AGU, 2013: 9-12.
- [7] JÄGGI A, BEUTLER G, MEYER U, et al. AIUB-GRACE02S: Status of GRACE Gravity Field Recovery Using the Celestial Mechanics Approach [J]. Geodesy for Planet Earth, 2012: 161-169.
- [8] MAYER-GÜRR T, ZEHENTNER N, KLINGER B, et al. ITSG-Grace 2014: A New GRACE Gravity Field Release Computed in Graz[C]// Oral Presentation at the GRACE Science Team Meeting. Potsdam: [s. n.], 2014, 29.
- [9] SHEN Yunzhong, CHEN Qiuji, HSU H, et al. A Modified Short Arc Approach for Recovering Gravity Field Model [C]// Oral Presentation at the GRACE Science Team Meeting. Austin: University of Texas, 2013: 22-25.
- [10] 沈云中. 应用 CHAMP 卫星星历精化地球重力场模型的研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2000. SHEN Yunzhong. Study of Recovering Gravitational Potential Model from the Ephemerides of CHAMP[D]. Wuhan: The Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [11] 王正涛. 卫星跟踪卫星测量确定地球重力场的理论与方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. WANG Zhengtao. Theory and Methodology of Earth Gravity Field Recovery by Satellite-to-Satellite Tracking

- Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [12] 徐天河. 利用CHAMP卫星轨道和加速度计数据推求地球重力场模型[D]. 郑州: 信息工程大学, 2004.
- XU Tianhe. Gravity Field Recovery from CHAMP Orbit and Accelerometer Data [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2004.
- [13] 肖云. 基于卫星跟踪卫星数据恢复地球重力场的研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.
- XIAO Yun. Analysis of Earth Gravity Field Recovery by Satellite-to-Satellite Tracking Data[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2006.
- [14] 游为. 应用低轨卫星数据反演地球重力场模型的理论和方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- YOU Wei. Theory and Methodology of Earth's Gravitational Field Model Recovery by LEO Data[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [15] 张兴福. 应用低轨卫星跟踪数据反演地球重力场模型[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- ZHANG Xingfu. The Earth's Field Model Recovery on the Basis of Satellite-to-Satellite Tracking Missions[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] 周旭华. 卫星重力及其应用研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2005.
- Zhou Xuhua. Study of Satellite Gravity and Its Application[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [17] 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): 099101.
- SU Yong, FAN Dongming, YOU Wei. Gravity Field Model Calculated by Using the GOCE Data [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(9): 099101.
- [18] 肖云, 夏哲仁, 王兴涛. 用GRACE星间速度恢复地球重力场[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 19-25.
- XIAO Yun, XIA Zheren, WANG Xingtao. Recovering the Earth Gravity Field from Inter-satellite Range-rate of GRACE[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 19-25.
- [19] ZHU S, REIGBER C, KÖNIG R. Integrated Adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS Data[J]. Journal of Geodesy, 2004, 78(1-2): 103-108.
- XU Peiliang. Position and Velocity Perturbations for the Determination of Geopotential from Space Geodetic Measurements[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2008, 100(3): 231-249.
- [21] 陈秋杰, 沈云中, 张兴福. 基于重力卫星几何轨道线性的地球重力场反演方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2238-2244.
- Chen Qiuji, Shen Yunzhong, Zhang Xinfu. Linearization Method of Recovering Earth's Gravity Field with Respect to Gravity Satellite's Kinematic Orbits[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7): 2238-2244.
- [22] CHEN Qiuji, SHEN Yunzhong, ZHANG Xingfu, et al. Global Earth's Gravity Field Solution with GRACE Orbit and Range Measurements Using Modified Short Arc Approach[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2014, 50(2): 173-185.
- [23] CHEN Qiuji, SHEN Yunzhong, ZHANG Xingfu, et al. Monthly Gravity Field Models Derived from GRACE Level 1B Data Using a Modified Short-arc Approach[J]. Journal of Geophysical Research, 2015, 120(3): 1804-1819.
- [24] KUSCHE J, KLEES R. Regularization of Gravity Field Estimation from Satellite Gravity Gradients[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(6-7): 359-368.
- [25] ZHAO Qile, GUO Jing, HU Zhigang, et al. GRACE Gravity Field Modeling with an Investigation on Correlation Between Nuisance Parameters and Gravity Field Coefficients [J]. Advances in Space Research, 2011, 47(10): 1833-1850.
- [26] BETTADPUR S. Recommendation for A-Priori Bias & Scale Parameters for Level-1B ACC Data (Version 2)[EB/OL]. [2015-05-01]. <http://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/grace-documentation>.
- [27] DAHLE C, FLECHTNER F, GRUBER C, et al. GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005[EB/OL]. [2015-05-01]. http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:61197_9/component/escidoc:65055/1202.
- [28] FÖRSTE C, BRUINSMA S, FLECHTNER F, et al. EIGEN-6C2-A New Combined Global Gravity Field Model Including GOCE Data up to Degree and Order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse[C]//EGU General Assembly Conference. Vienna: [s. n.], 2013.
- [29] DIEDRICH R, GENDT G. A Gravity Field Model from LAGEOS Based on Point Masses (POEM-L1) [C]//Proceedings of the 6th International Symposium "Geodesy and Physics of the Earth". Potsdam: GDR, 1989: 22-27.
- [30] ANDERSEN O B, KNUDSEN P, KENYON S, et al. Global and Arctic Marine Gravity Field from Recent Satellite Altimetry (DTU13) [C]//76th EAGE Conference and Exhibition 2014, Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 2014: 16-19.
- [31] ANDERSEN O B, JAIN M, KNUDSEN P. The Impact of Using Jason-1 and Cryosat-2 Geodetic Mission Altimetry for Gravity Field Modeling[J]. International Association of Geodesy Symposia, 2015: 1-6.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2015-08-13

修回日期: 2015-12-31

第一作者简介: 陈秋杰(1987—), 男, 博士生, 主要从事卫星重力方面的研究。

First author: CHEN Qiuji (1987—), male, PhD candidate, majors in satellite gravimetry.

E-mail: chenqiuji2009@163.com