

Temporal Global Gravity Recovery from GRACE Satellite-to-Satellite Tracking Data Using Two-Step Method

ZHAO Qile^{1,2}, GUO Jing^{1,3}

¹⁰GNSS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China
²⁰State key laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, China
³⁰School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan, China *e-mail: zhaoql@whu.edu.cn, jingguo@live.com*

Abstract: Based on the dynamic orbit determination model of PANDA, the temporal gravity models named WHUTM have been computed with coefficients truncated up to 60 degree from March 2006 to February 2007, using the two-step variational approach and parallel programming. By analyzing the water storage variation of Amazon and other 5 river basin, a comparison with other GRACE solutions is made. The results has showed that WHUTM can reflect the seasonal change of water storage variation in all selected river basin, and it also can be observed that WHUTM has a reasonable agreement with other GRACE solutions, and is particularly closed to the JPL and DEOS models.

Keywords: GRACE; temporal gravity model; two-step variational approach; water storage variation

基于二步法利用 GRACE 卫星跟踪卫星数据 反演地球时变重力场

赵齐乐^{1,2},郭靖^{1,3}

¹武汉大学卫星导航定位工程技术研究中心,武汉,中国,430079 ²武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉,中国,430079 ³武汉大学测绘学院,武汉,中国,430079 e-mail: zhaoql@whu.edu.cn, jingguo@live.com

摘 要: 本文基于 PANDA 动力学定轨模块,采用动力学二步法和并行算法结合 GRACE 高低卫星跟踪卫星以及低低卫星跟踪卫星数据计算了 2006 年 3 月至 2007 年 2 月 12 个月 60 阶的全球时变重力场模型——WHUTM。在此基础上通过对亚马孙等 6 条全球大河流域水储量的分析,将 WHUTM 模型与国际上其他研究机构发布的时变重力场模型进行比较,结果表明 WHUTM 模型不仅能有效反映大河流域水储量的季节性变化,同时也与其他 GRACE 模型间吻合较好,特别是与 JPL 和 DEOS 模型更为接近。

关键字: GRACE; 时变重力场; 二步法; 水储量变化

1 引言

地球重力场反映地球物质的空间分布、运动和变 化,确定地球重力场的精细结构及其时间变化是现代 大地测量学的主要科学目标,同时也为其他相关学科, 如地球物理学、海洋学、气候学等迫切需要^[12]。而地 球重力场在几年或者更短时间尺度上的变化主要由大 气变化、海底压力和陆地水储量的变化产生^[1]。

由美国国家宇航局 NASA 和德国航天中心 DZR

于2002年3月合作发射的重力场恢复和气候实验卫星GRACE,由两颗相距约200km的卫星组成。每颗卫星都搭载有GPS接收机和K波段星间测距系统,可以同时开展高低卫星跟踪卫星以及低低卫星跟踪卫星测量。得益于K波段测距系统提供的高精度星间距离以及导得的距离变率数据,GRACE卫星不仅可以恢复高精度的静态重力场,同时可以得到短至一天周期的时变重力场^[12]。

当前国际上许多研究机构如德国地学研究中心 (GFZ)、美国喷气动力实验室(JPL)、美国德克萨斯大 学空间研究中心(CSR)、法国国家空间研究中心 (CNES)、荷兰 Delft 理工大学地球观测与空间系统研

本 文 得 到 了 国 家 自 然 科 学 基 金 (No: 40874004) 、 3 项 目 (No:2006CB701301)、863 项目(2006AA12Z326 和 2007AA12Z345) 以及高等学校学科创新引智计划(B07037)

究所(DEOS)等开展了计算时变重力场的研究,并分别 基于不同的反演方法求得和发布了时变重力场模型 ^[6-9,14]。国内许多研究机构也已开展了重力卫星精密定 轨和卫星重力场方面的研究,取得了一定的研究成果。 如周旭华和肖云等采用两步法结合已有轨道数据和 KBR 观测数据分别求得了114 天 80 阶和 30 天 100 阶 的平均重力场模型^[2,4],王正涛则基于能量守恒法求得 了 120 阶的 WHU-GM-05 重力场模型^[5]。在时变重力 场的应用方面,胡小工等利用 15 个月的 GRACE 卫星 重力场模型分析了长江流域的水储量变化^[1],而汪汉 胜等利用 22 个月的 GRACE 时变重力场反演了三峡水 库补给水系的水储量变化^[3]。上述应用研究均采用的 是国外的时变重力场模型,而目前我国还没有可靠的 高精度时变重力场系列模型发布。

由武汉大学 GNSS 中心自主开发的 PANDA 软件 已经能够提供 2-3cm 的动力学轨道以及 3-4cm 的几何 学轨道^[14],并且基于该软件荷兰 Delft 理工大学和武 汉大学 GNSS 中心合作使用 3 点星间距离联合法 (3RC)^[10,11]解算了 2003 年 2 月至 2006 年 12 月(无 2003 年 6 月)共 46 个月的时变重力场,形成并发布 DMT-1 时变重力场模型^[8]。

本文主要基于动力学二步法,利用 PANDA 动力 学定轨模块和 GEACE 卫星跟踪卫星数据求解地球时 变重力场模型,详细给出了相应的数据处理策略,并 通过考察全球 6 条大河流域水储量变化将所得模型与 国际其他研究机构发布的模型进行比较。

1.1 基于二步法从 GRACE 卫星跟踪卫星数据反 演地球重力场的函数模型

假设在时刻 t 卫星的观测值记为 h(t,y(t₀),p,z),其 中 y(t₀)为弧段初始时刻卫星的运动状态矢量; P 为其 他动力学参数,其可以进一步分为重力场球谐系数 P_g 部分和其他非重力场球谐系数部分 P_{ng}(主要包括加速 度计的偏差和尺度参数); Z 为其他和观测量相关的参 数,其主要包括由动力学积分所产生的共振效应的周 期性经验参数。由于其为非线性函数,使用泰勒级数 展开取 0 阶和 1 阶项可得:

$$\begin{split} h(t; \mathbf{y}(t_{0}), \mathbf{p}, \mathbf{z}) &\approx h_{c}(t; \mathbf{y}(t_{0}), \mathbf{p}, \mathbf{z}) \\ &+ \frac{\partial h(t; \mathbf{y}(t_{0}), \mathbf{p}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{y}(t_{0})} \bigg|_{\mathbf{y}(t_{0}) = \mathbf{y}_{c}(t_{0})} \delta \mathbf{y}(t_{0}) \\ &+ \frac{\partial h(t; \mathbf{y}(t_{0}), \mathbf{p}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{p}} \bigg|_{\mathbf{p} = \mathbf{p}_{c}} \delta \mathbf{p} + \frac{\partial h(t; \mathbf{y}(t_{0}), \mathbf{p}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \bigg|_{\mathbf{z} = \mathbf{z}_{c}} \delta \mathbf{z} \qquad (1) \end{split}$$

上式中下标 c 代表各种量的初始值。

如果观测值为卫星位置**r**(*t*),将其代入式(1)中可以得到其相应的函数模型为:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} \end{pmatrix} \cdot (\Phi(t, t_0) \cdot \delta \mathbf{y}(t_0) + \mathbf{S}(t) \cdot \delta \mathbf{p})$$
(2)

式中 $\phi_{(t,t_0)}$ 为状态转移矩阵,而 $s_{(t)}$ 为参数敏感矩阵,两者由动力学轨道积分而得。

GRACE 星间距离可以表示为:

$$\rho = \left(\mathbf{r}_{B}(t) - \mathbf{r}_{A}(t)\right) \cdot \mathbf{e}_{AB}$$
(3)

式中 $\mathbf{r}_A(t)$ 和 $\mathbf{r}_B(t)$ 分别为卫星A、B在时刻t的位置矢量, \mathbf{e}_{AB} 为星间位置差的单位矢量, 由星A指向星B。

由式(3)可以得到星间距离相对于卫星 A 运动状态的偏导数为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{y}_{A}(t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{r}_{A}(t)} & \frac{\partial \rho}{\partial \dot{\mathbf{r}}_{A}(t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\mathbf{e}_{AB}(t))^{T} & \mathbf{0}_{I\times 3} \end{pmatrix}$$
(4)

其相对于卫星 B 运动状态的偏导数与 A 反号。

由此可得利用星间距离反演地球重力场的函数模型为:

$$\delta \rho = \left(\left(\mathbf{e}_{AB}(t) \right)^{T} - \mathbf{0}_{1 \times 3} \right) \left(\mathbf{\Phi}_{B}(t, t_{0}) \cdot \delta \mathbf{y}_{B}(t_{0}) - \mathbf{\Phi}_{A}(t, t_{0}) \cdot \delta \mathbf{y}_{A}(t_{0}) + \mathbf{S}_{B,ng}(t) \cdot \delta \mathbf{p}_{B,ng} - \mathbf{S}_{A,ng}(t) \cdot \delta \mathbf{p}_{A,ng} + \left(\mathbf{S}_{B,g}(t) - \mathbf{S}_{A,g}(t) \right) \cdot \delta \mathbf{p}_{g} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial z} \bigg|_{z=z} \quad \delta z$$
(5)

式中各项含义如上所述,下标 A、B 表示其分别为卫 星 A 和 B 相应的值,而 z 除了包含周期性参数外,还 包括星间距离的模糊度。

GRACE 星间距离变率的表达式为:

$$\dot{\rho} = \frac{\mathbf{r}_{B} - \mathbf{r}_{A}}{\rho} \cdot (\dot{\mathbf{r}}_{B}(t) - \dot{\mathbf{r}}_{A}(t))$$
(6)

式中 $\dot{\mathbf{r}}_{A}(t)$ 和 $\dot{\mathbf{r}}_{B}(t)$ 分别为 A、B 两颗星的速度,式(6) 对 A 星的位置和速度的偏导数为:

$$\frac{\partial \dot{\rho}}{\partial \mathbf{y}_{A}(t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial \mathbf{r}_{A}(t)} & \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial \dot{\mathbf{r}}_{A}(t)} \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} -\frac{1}{\rho} (\dot{\mathbf{r}}_{AB}(t) - \dot{\rho} \mathbf{e}_{AB}(t))^{T} & -(\mathbf{e}_{AB}(t))^{T} \end{pmatrix}$$
(7)

其对 B 的偏导与 A 星相反。由此可以得到星间距离变 率反演地球重力场的函数模型:

$$\begin{split} \delta \dot{\rho} &= \left(\frac{1}{\rho} \left(\dot{\mathbf{r}}_{AB}(t) - \dot{\rho} \mathbf{e}_{AB}(t) \right)^{T} \quad \left(\mathbf{e}_{AB}(t) \right)^{T} \right) \cdot \\ \left(\boldsymbol{\Phi}_{B}(t, t_{0}) \cdot \delta \mathbf{y}_{B}(t_{0}) - \boldsymbol{\Phi}_{A}(t, t_{0}) \cdot \delta \mathbf{y}_{A}(t_{0}) \right) \\ &+ \mathbf{S}_{B,ng}(t) \cdot \delta \mathbf{p}_{B,ng} - \mathbf{S}_{A,ng}(t) \cdot \delta \mathbf{p}_{A,ng} \\ &+ \left(\mathbf{S}_{B,g}(t) - \mathbf{S}_{A,g}(t) \right) \cdot \delta \mathbf{p}_{g} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{\mathbf{z} = \mathbf{z}_{\mathbf{p}}} \delta \mathbf{z} \end{split} \tag{8}$$

在动力学定轨中轨道积分都是分弧段进行,因此 在不同弧段除了重力场系数外还有一些和弧段相关的 未知参数。为了减少法方程中未知数个数从而提高计



算效率,则在单弧段法方程中消去其他和弧段相关的 未知参数x,而仅保留重力场系数p_s,第*i*弧段的法 方程为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N}_{i,xx} & \mathbf{N}_{i,xp_{g}} \\ \mathbf{N}_{i,p_{g}x} & \mathbf{N}_{i,p_{g}p_{g}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x}_{i} \\ \Delta \mathbf{p}_{g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{i,x} \\ \mathbf{b}_{i,p_{g}} \end{pmatrix}$$
(9)

式中 $N_{i,p_{e}p_{e}}$ 为重力场系数对应的法矩阵子块, $N_{i,x}$ 为其他未知数对应的法方程子块,从式(10)中消去 Δx_{i} 得到仅和重力场系数相关的法方程:

$$\mathbf{N}_i \Delta \mathbf{p}_e = \mathbf{b}_i \tag{10}$$

$$\mathbf{N}_{i} = \mathbf{N}_{i, p_{g} p_{g}} - \mathbf{N}_{i, p_{g} x} \mathbf{N}_{i, xx}^{-1} \mathbf{N}_{i, xp_{g}}$$
(11)

$$\mathbf{b}_{i} = \mathbf{b}_{i,p_{g}} - \mathbf{N}_{i,p_{g}x} \mathbf{N}_{i,xx}^{-1} \mathbf{b}_{i,x}$$
(12)

将所有单弧段法方程叠加可以得到最终的仅含地 球重力场系数为未知数的法方程:

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{N}_{i} \Delta \mathbf{p}_{s} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{b}_{i}$$
(13)

式中*n*为弧段个数。如果考虑正则化,可以得到最终的重力场系数为:

$$\Delta \mathbf{p}_{g} = \left(\sum_{i=1}^{n} \mathbf{N}_{i} + \alpha \mathbf{N}_{p_{i}}\right)^{-1} \sum_{i=1}^{n} \mathbf{b}_{i}$$
(14)

式中 N_{pg} 为正则化矩阵, α 为正则化系数。将求得的 Δp_g 代入式(9)从而求得单弧段内的其他参数:

$$\Delta \mathbf{x}_{i} = \mathbf{N}_{i,x}^{-1} (\mathbf{b}_{i,x} - \mathbf{N}_{i,x} \Delta \mathbf{p}_{x})$$
(15)

而验后单位权中误差由下式计算:

$$\sigma_0^2 = [l^T P l - \Delta \mathbf{p}_g \sum_{i=1}^n \mathbf{b}_{i,\mathbf{p}_g} - \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{x}_i \mathbf{b}_{i,\mathbf{x}}] / (M - n)$$
(16)

式中1为观测量的验前残差, M 为观测方程总数。

2 数据处理策略

整个数据处理流程大致包含三步:

1) 根据参考重力场计算卫星的初始动力学轨道;

2) 计算卫星轨道和星间距离变率的残余观测值;

3) 重力场求解,这主要包括单弧段内法方程构建 以及所有弧段法方程叠加。

动力学轨道的计算过程可以分为四步:第一步为 根据输入的卫星几何轨道计算在每个弧段初始时刻卫 星的位置和速度,以及卫星加速度计在径向、横向和 法向的偏差和尺度参数的初值;在第二步中利用第一 步得到的卫星状态参数和动力学参数初值进行轨道积 分求得卫星的初始动力学轨道;第三步将动力学轨道 和几何轨道进行拟合,以改进初始动力学参数;第四 步利用改进的动力学参数再次进行轨道积分。

为了减少由于初始时刻卫星运动状态以及参考重 力场带谐项的不精确所产生的共振效应的影响,积分 弧长设置为 6 小时。积分方程使用 11 阶 Adams 多步 法计算,开始几个历元使用 Runge-Kutta 单步法计算, 积分步长为 1 秒,每 5 秒输出一个数据,积分在惯性 系下进行,其所使用的力模型以及其他数据如表 1 所 示:

轨道积分后可以获得卫星在惯性系下的位置、速 度以及相应的状态转移矩阵和参数敏感矩阵。

当得到卫星的动力学轨道之后,使用其来计算各 种观测值(卫星轨道、星间距离和距离变率)的计算值, 然后由观测量和计算值求差得到相应的验前残差。之 后对其进一步处理以剔除其中质量较差的值,此时计 算整个验前残差的标准差,以5倍标准差作为限差, 超过该值的验前残差则被剔除,另外若单弧段残差标 准差超过一定值则剔除整个弧段观测值。

得到各种观测值的验前残差后,根据第2节中所述构 建单弧段法方程,然后将单弧段法方程叠加求得重力 场系数改正,进而解得各个单弧段内其他动力学参数 的改正量。之后将单弧段动力学参数改正量和仅截取 13阶的重力场参数改正量加入各自相应的先验值中, 进行迭代求解。这里需要说明的是仅截取13阶重力场

Table 1. The force models used in the dynamic orbit determination 表 1. 动力学定轨中使用的力模型

模型	说明
平均重力场模型	150阶 EIGEN-GL04C
低阶重力场系数 C ₂₀ 、C ₃₀ 、C ₄₀ 、C ₂₁ 和 S ₂₁ 的长期变化	根据IERS Conventions 2003计算,其中C ₂₀ 、C ₃₀ 和C ₄₀ 的参考历元为 2004年1月1日,C ₂₁ 和S ₂₁ 的参考历元为2002年8月16 日
N体摄动	根据质点引力公式计算,行星星历根据 JPL DE405 计算
地球固体潮	根据 IERS Conventions 2003 计算
海潮	FES2004海潮模型,其中9个日潮、半日潮和4个长期分量都取到80阶
极潮	30 阶 Desai 模型
大气和海洋变化	2至100阶 AODLIB RL04 数据
广义相对论	根据 IERS Convention 2003 计算
非保守力	GRACE 星载加速度计数据





Figure 1. Maps of WHUTM solutions from March 2006 to February 2007 in terms of equivalent water height after 600 km Gaussian smoothing and P3M8 de-striping 图 1. 经过 P3M8 和 600km 高斯滤波后,以等价水高度表示的 2006 年 3 月至 2007 年 2 月 WHUTM 时变重力场模型

系数改正量加入第二次迭代中不仅可以有效减少模型 误差的影响,同时由于 13 阶以下其噪声远远低于 13 阶以上的噪声,重力场信号也主要集中在低阶项,这 样可以有效减少观测值误差对重力场的影响。





Figure 2. The water storage variation of selected 6 river basins. (left up) the Amazon river basin. (right up) the Mississippi river basin. (left middle) the Chari river basin. (right middle) the Ganges river basin. (left low) the Changjiang river basin. (right low) the Pearl river basin. All of the models are truncated to 60 degree and post-processed by 600km Gaussian filter and P3M8 de-striping
图 2. 全球 6 条大河流域水储量的变化。左上图为亚马孙河,右上图为密西西比河,左中图为沙里河,右中图为恒河,左下图为长江, 右下图为珠江。图中所有模型都截断至 50 阶采用 600km 高斯滤波和 P3M8 去条

3 WHUTM 时变重力场模型

根据上述数据处理方法,解算了从 2006 年 3 月至 2007 年 2 月共 12 个月的时变重力场模型。WHUTM 时 变重力场模型未使用正则化方法求解,所有模型系数 从 2-60 阶。由于在动力学轨道计算中已经有效除去引 起重力场变化的其他因素,因此整个模型所估计的重 力场的变化信号是由于水文变化、冰雪积聚和消融、

冰后回弹以及地震等地球动力学变化所引起。

图 1 以等价水高度的形式给出了经过 P3M8 去条 和 600km 高斯滤波处理的 WHUTM 时变重力场模型。 需要说明的是并不是所有月份重力模型都有较好的质量,某些月份在海洋上存在有较大的误差,如从 2006 年 9 月至 2007 年 1 月在美洲东部海洋地区即存在有较强的非物理信号,该信号的产生可能来自于以下几方 面误差的影响: 1. 海洋表面大气压的误差; 2. 海洋环 流模型的误差; 3. GRACE 观测资料和数据处理中的 误差; 这需要进行进一步分析。然而即使在相对较差 的月份,在陆地区域全球水文变化仍旧十分显著。从 几条大河流域可以明显看到水储量的季节性变化, 这 表明在这些区域信号强度仍旧在噪声水平以上。

4 WHUTM 模型与其他时变重力场模型的比 较

本节通过考察全球大河流域水储量的变化将 WHUTM 重力场模型和其他研究机构(JPL、GFZ、 DEOS、CSR、CNES) 发布的 GRACE 时变重力场模 型进行比较,为了能够提供一个相对较为独立的比较 也使用了 GLDAS 水文模型。所选择的 6 条大河流域 为南美的亚马孙河,北美的密西西比河,非洲的沙里 河,亚洲的恒河以及中国长江和珠江流域,这些大河 其流域面积和气候环境各异,因此具有一定代表性。 由于 CNES 模型仅有 50 阶,因此将所有模型都截断 至 50 阶进行比较,同时使用 P3M8 和 600km 高斯滤 波,C₂₀项并未除去。

某一月份*t*河流流域平均的等价水厚度由下式求得:

$$\overline{h}(t) = \frac{\sum_{j \in S} h(\vartheta_j, \lambda_j, t) \sin \vartheta_j}{\sum_{j \in S} \sin \vartheta_j}$$
(17)

式中 h(*9_j*,*λ_j*,*t*)为格网点处的等价水高度, *9_j*、*λ_j*为相应的格网点的余纬和经度,*S*表示相应的河流流域。 所有 6条河流流域水储量的变化列于图 2。

从图 2 中可以看到由 GRACE 数据导得的河流水 储量的季节性变化十分明显, 亚马孙河流域有最大的 水储量变化,其在4、5月间水储量达到最大值,而在 9、10月间达到最小值,而密西西比河水储量变化大 致相同。但是沙里河流域其水位在4月达到最低,在 10月达到最高,恒河水位大约在5月达到最低,在9 月水储量达到最大。长江流域水量大约在7月达到峰 值,而在12月、1月间达到最小值,而珠江流域大约 在8、9月间水量达到峰值,在2月其水量最小。而这 种季节性的变化与 GLDAS 水文模型吻合的相当好。 相较于其他 GRACE 模型, WHUTM 与 JPL 模型在亚 马孙河、密西西比河、沙里河和恒河流域十分接近, 特别是在恒河流域从2006年4月至2006年12月两个 模型几乎重合。JPL、GFZ、CSR 和 CNES 模型通过 一步法计算而得,而 DEOS 模型根据 3 点星间距离联 合法求得,从图中可以看到整体来讲 DEOS 模型的信

号量在 6 个模型中最弱,而由二步法求得的 WHUTM 模型信号量也较大部分一步法模型的信号量弱但却较 几乎采用相同设置求得的 DEOS 模型信号量强,这种 关系特别在水储量变化较大的地区,如亚马孙河、沙 里河和恒河流域更为明显,这种由不同处理方法产生 的差别有待进一步分析。

5 结论

本文基于动力学二步法和 PANDA 动力学定轨模 块,实现联合 GRACE 高低和低低卫星跟踪卫星数据 求解地球时变重力场模型,并通过计算全球 6 条大河 流域水储量的变化,将所得 WHUTM 模型与国际上其 他研究机构发布的模型进行比较,结果表明 WHUTM 模型与其他模型符合的较好,并观察到不同计算方法 对时变重力场信号强度的影响有所不同,关于产生这 一现象的深层机制有待进一步研究与分析。

致谢

感谢荷兰 Delft 理工大学柳响林博士提供其他研 究机构时变重力场模型。

References (参考文献)

- Hu Xiaogong, et al. Seasonal variation of water distribution in Yangtze River basin from spatial gravity survey of GRACE
 [J] . Science in China Series D: Earth Sciences, 2006,36(3),P225-232. (Ch).
 胡小工,陈剑利,周永宏,黄珹,廖新浩.利用GRACE 空间 重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J].中国科学D 辑地球科学,2006,36(3),P225-232.
- [2] XIAO Yun ,XIA Zhe-ren ,WANG Xing-tao, Recovering the Earth Gravity Field from Inter-satell ite Range-rate of GRACE[J], ACTA GEODAETICA et CARTOGRAPHICA SINICA, 2007, 36(1), P19–25. (Ch). 肖云,夏哲仁,王兴涛.用GRACE 星间速度恢复地球重力场. 测绘学报[J], 2007, 36(1), P19–25。
- [3] Wang H S ,Wang Z Y,Yuan X D ,et al. Water storage changes in Three Gorges water systems area inferred from GRACE time-variable gravity data[J]. Chinese J. Geophys. 2007,50(3), P730-736. (Ch). 汪汉胜,王志勇,袁旭东. 基于GRACE 时变重力场的三峡水 库补给水系水储量变化[J]. 地球物理学报, 50(3):730-736, 2007。
- [4] Zhou X H, Hsu H, Wu B, et al. Earth's gravity field derived from GRACE satellite tracking data[J]. *Chinese J*. *Geophys*. 2006, 49 (3), P718-723. (Ch).
 周旭华,许厚泽,吴斌. 用GRACE 卫星跟踪卫星数据反演地 球重力场[J]. 地球物理学报, 2006, 49 (3), P718-723。
- [5] Wang Z T. Theory and methodology of earth gravity field recovery by satellite-to-satellite tracking data [D].Wuhan University, 2005. (Ch) 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]. 武汉大学,2005.
 [6] R. Biancale, J-M Lemoine, G Balmino, S Bruinsma, F Perosanz.
- [6] R. Biancale, J-M Lemoine, G Balmino, S Bruinsma, F Perosanz, and J-C Marty (2007). 5 years of gravity variations from GRACE and LAGEOS data at 10-day intervals over the period from July 29th 2002 to June 22nd 2007. available at http://bgi.cnes.fr:8110/geoidvariations/README.html.
- [7] S. V. Bettadpur. UTCSR level-2 processing standards document



for Level-2 product release 0004, Center for Space Research, University of Texes at Austin, 2007.

- [8] Delft University of Technology (The Netherlands) Faculty of Aerospace Engineering Delft Institute of Earth Observation and Space Systems (DEOS), Wuhan University (China) GNSS Research and Engineering Center. DEOS Mass Transport model release 1 (DMT-1), 2008.
- F. Flechtner. GRACE 327-743: GFZ Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0004. GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany, 2007.
- [10] X.L. Liu, P. Ditmar, and Q.L. Zhao. Recovery of temporal gravity field variations from GRACE data with the range combination approach. Oral presentation at the general assembly of IUGG 2007, Perugia, Italy, 2–15, July, 2007.
- [11] X.L. Liu, Global gravity field recovery from SST data with the

acceleration approach. PHD Dissertation. TUDELFT, 2008.

- [12] R. Rummel, G. Balmino, J. Johannessen, P. Visser, and P. Woodworth. Dedicated gravity filed missions-principles and aims. *Journal of Geodynamics*, 2002, 33, P3–20.
- [13] B. D. Tapley, S. Bettadpur, M.Watkins, and Ch. Reigber. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results. *Geophysical research letters*, 2004,31(9), P L96–112.
- [14] M. M. Watkins and D. Yuan. JPL Level-2 processing standards document for Level-2 product release 0004. Jet Propulsion Laboratory, 2007.
- [15] Q.L. Zhao, P. Ditmar, X.L. Liu, R. Klees, C. Shi, and J.N. Liu. Determination of precise kinematic orbits of CHAMP and GRACE for gravity field modeling. IUGG 2007, Perugia, Italy.