

中国区域 SST 卫星重力场模型精度分析

罗 佳¹ 姜卫平² 汪海洪¹ 邹贤才¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:通过比较最新 SST 地球重力场模型 EIGEN_GRACE02S、GGM 02S 和 EGM 96 模型在中国区域与 WDM94 模型重力异常残差的差异, 分析差异产生的原因及分布, 研究新一代卫星重力方法对于提高区域重力场模型精度的潜力以及存在的问题。结果证明, 卫星跟踪卫星方法对于现有模型中低阶部分有明显改善。

关键词:卫星跟踪卫星; 重力场; GRACE

中图法分类号: P223.0

卫星跟踪卫星 (satellite-to-satellite tracking, SST) 是通过两颗卫星之间的追踪, 进而确定高精度高分辨率重力场模型的卫星重力方法。该方法的研究始于 20 世纪 60 年代, 分为高低模式卫星跟踪卫星 (SST in high-low mode, SST-hl) 和低低模式卫星跟踪卫星 (SST in low-low mode, SST-ll)。由于硬件技术的原因, 直到 CHAMP(2000) 和 GRACE(2002) 的发射, SST 方法才真正得以实施^[1]。有关 SST 的原理可以参阅已有文献^[1-5]。本文主要内容是研究新一代卫星重力场模型在中国区域 (N15° ~ N55°, E65° ~ E135°) 的状况。

1 SST 重力场模型现状

自 CHAMP 和 GRACE 卫星成功发射起, 已经积累了 4 a 多的 SST 重力观测资料。这些资料以多级产品的形式向全球科研工作者提供, 并已获得了不少成果。但是, 国际上能够独立处理 SST 重力资料的机构主要有德国地学研究中心 (GFZ) 和美国德克萨斯大学空间研究中心 (CSR) 两个。GFZ 的 SST 重力场模型主要是 EIGEN (01, 02) 系列, 而 CSR 提供的是 GGM (01, 02) 系列模型。模型命名约定最后一个字母表示该模型的数据源: S 表示纯粹使用 SST 资料, C 表示联合了其他重力资料。由于 C 系列模型的计算方法、

所选用非 SST 数据的精度、分辨率等情况都不清楚, 所以本文在分析 SST 重力场模型精度时选用 S 类重力场模型。目前最新的 SST 重力场模型为 EIGEN_GRACE02S^[6,7] (150 阶) 和 GGM02S (160 阶)。为了叙述的简化, 文中后续部分如无特殊说明, EIGEN_GRACE02S 简称为 EIGEN, GGM02S 简称为 GGM, 而用 SST 模型通称 EIGEN 和 GGM 模型。

2 数值分析

EGM96^[8] 模型是 NASA 所属哥达德宇航中心 (GSFC)、美国国防制图局 (NIMA) 和美国俄亥俄州立大学 (OSU) 联合研发的高精度地球重力场模型。由于 EGM96 模型使用了除中国区域以外的几乎所有能够获得的观测资料, 包括重力、卫星测高、SLR 等, 使其成为目前公认的精度最高的 360 阶次的全球重力场模型, 在全球范围内一般都可以提供优于 1m 精度的大地水准面模型。但是由于 EGM96 在中国区域很少甚至未使用有关数据, 所以该模型在中国区域的精度较差, 这也是国外其他高阶地球重力场模型 (如 OSU91) 的共同弱点。为此, 武汉大学测绘学院研发了适合中国区域的 360 阶重力场模型 WDM94^[8]。WDM94 使用了中国境内 22 万个实测重力值 (主要是陆地区域) 和所收集的中国海域和近海 2 581

块 $30' \times 30'$ 平均重力异常, 该模型在中国区域具有较高的精度。基于以上原因, 本文通过比较 EGM 96-WDM 94、GGM-WDM 94 和 EIGEN-WDM 94 差值来研究目前 SST 重力场模型的精度水平。

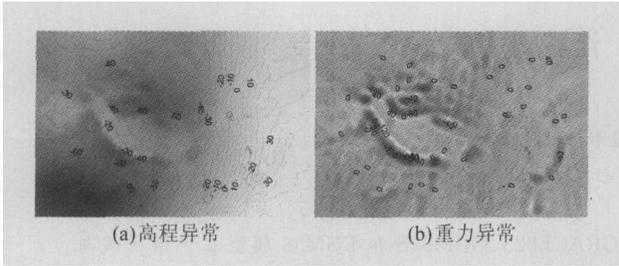


图 1 比较区域的 EIGEN 模型高程异常和重力异常

Fig. 1 Height Anomaly and Gravity Anomaly of EIGEN Model in China

由于 EGM96 和 WDM 94 都是完全阶次为 360 阶的重力场模型, 对应于地面的分辨率约 50 km, 而 EIGEN 模型是完全阶次到 150 阶的重力场模型, 对应地面分辨率约为 133 km; GGM 模型的完全阶次到 160 阶, 对应地面分辨率为 125 km, 如果直接比较则很可能由于 EGM 96 或 WDM 94 中高频信号的干扰使得不能客观真实地评价比较的结果。为了避免这种情况的发生, 可以采用常规低通滤波或模型截断的方法进行处理。由于两种方法的本质相同, 效果接近, 所以本文只采用截断的方法, 即将 EIGEN、GGM、EGM 96 和 WDM 94 都截断到相同阶次再进行比

较。另外, 由于(似)大地水准面具有长波占优的特性, 而重力异常蕴涵更多的相对高频信息, 所以本文通过对重力异常偏差的比较来分析 EIGEN、GGM 和 EGM96 分别与 WDM 94 的一致性。

首先, 依次由 4 个模型截断到 150 阶次计算出 4 套 $15' \times 15'$ 的格网重力异常, 其格网点数为 45 402。然后在 EIGEN-WDM 94、GGM-WDM 94 和 EGM 96-WDM 94 间求差得到 3 套 $15' \times 15'$ 的格网重力异常偏差, 参考模型为 WDM 94。

表 1 给出了截断到 150 阶次模型间总体差异和分区差异的统计量。可以看出, SST 模型与 WDM 94 模型重力异常差的最大值和最小值的大小都有所减小, 但标准差并没有明显的减小。比较标准差可以看出, 总体上 EIGEN 和 EGM 96 模型与 WDM 94 模型的一致性相当, 而 GGM 与 WDM 94 的偏差较大; 在本文所划分的南部和西部区域, EIGEN 模型相对于 EGM 96 有较小的改善。另外, 由 150 阶模型重力异常偏差的统计信息可以看出, EIGEN 和 GGM 模型与 WDM 94 偏差的标准差都大于 EGM 96 模型与 WDM 94 偏差的标准差。总之, 两种 SST 模型在 150 阶对中国区域重力场模型的改进并未显现出来。

为了研究这种现象发生的原因并分析 SST 方法对较低阶次重力场模型的改进程度, 依次将模型截断到 100 阶次、110 阶次、120 阶次、130 阶次和 140 阶次再进行偏差比较, 统计结果如表 2。

由表 2 可以看出, 随着截断阶次的降低, GGM 和 EIGEN 与 WDM 94 模型的一致性趋近。

表 1 EIGEN, GGM 和 EGM 96 重力异常偏差统计(截断到 150 阶次)

Tab. 1 Statistic of EIGEN, GGM and EGM 96's Gravity Anomaly Difference (150 degree)

偏差统计量	南部 $\leq N35^\circ$			西部 $E65^\circ \leq \text{经度} < E35^\circ$			中部 $E105^\circ \leq \text{经度} < E115^\circ$			总体		
	EIGEN-WDM 94	GGM-WDM 94	EGM 96-WDM 94	EIGEN-WDM 94	GGM-WDM 94	EGM 96-WDM 94	EIGEN-WDM 94	GGM-WDM 94	EGM 96-WDM 94	EIGEN-WDM 94	GGM-WDM 94	EGM 96-WDM 94
点数	22 842	22 842	22 842	25 921	25 921	25 921	6 440	6 440	6 440	45 402	45 402	45 402
最小值 /mGal	-98.296	-104.508	-135.182	-98.296	-104.508	-135.182	-39.393	-41.693	-35.373	-98.296	-104.508	-135.182
最大值 /mGal	105.554	103.282	138.012	105.554	107.460	138.012	32.229	58.882	36.670	105.554	107.460	138.012
平均值 /mGal	-0.116	-0.071	-0.200	-0.017	0.120	0.063	-1.313	-1.402	-1.211	-0.140	-0.058	-0.115
标准差 /mGal	15.360	20.901	15.471	18.082	20.518	18.207	9.740	15.199	7.747	15.086	18.788	14.869

表 2 EIGEN、GGM 和 EGM 96 重力异常偏差统计

Tab. 2 Statistic of EIGEN, GGM and EGM 96's Gravity Anomaly Difference

标准差 / mGal	100 阶次	110 阶次	120 阶次	130 阶次	140 阶次
EIGEN-WDM 94	10.932 9	11.641 7	12.262 7	13.162 8	14.101 4
GGM-WDM 94	10.934 7	11.640 8	12.380 2	13.337 2	14.858 4
EGM 96-WDM 94	11.378 9	12.064 7	12.743 6	13.571 1	14.253 4

这主要是由于 EIGEN 和 GGM 所采用的数据源相同, 而超过 120 阶次后 GGM 和 EIGEN 与 WDM 94 模型的一致性产生较大差异。这可能主

要是由于在确定地球重力场模型较高阶部分时为了使奇异阵可求逆采用方法(如 Kaula 规则)不同而导致的。

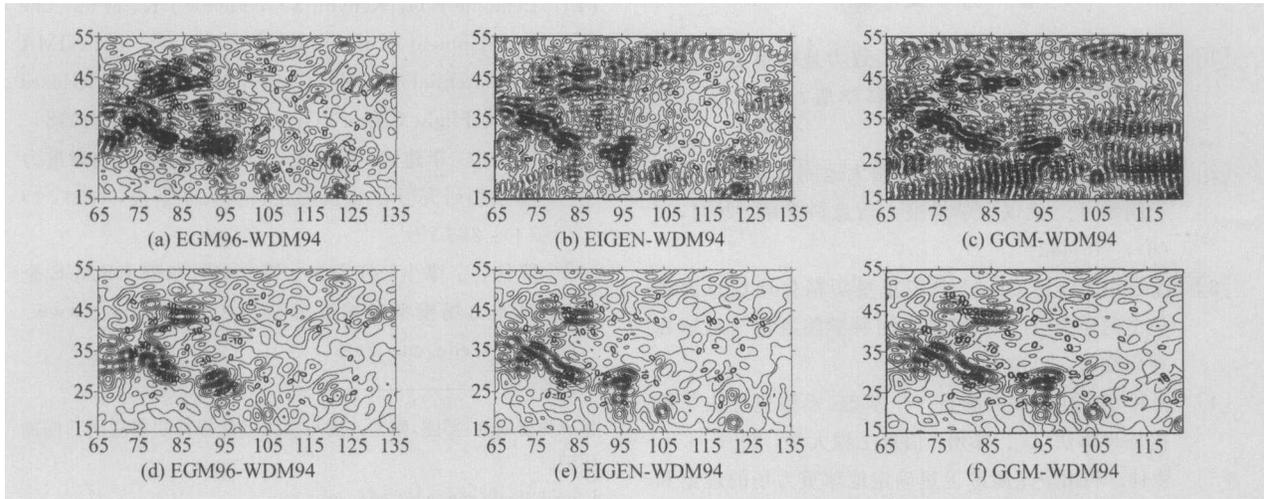


图 2 中国区域 EGM96、EIGEN 和 GGM 模型重力异常偏差(150 阶, 110 阶)

Fig. 2 Difference of Model Gravity Anomaly of EGM96, EIGEN and GGM in China (150 degree, 110 degree)

图 2 分别给出了截断到 150 阶和 110 阶的中国区域模型重力异常偏差, 等高距均为 10 mGal, 依次为 EGM96-WDM94 (150 阶)、EIGEN-WDM94 (150 阶)、GGM-WDM94 (150 阶)、EGM96-WDM94(110 阶), EIGEN-WDM94(110 阶)和 GGM-WDM94(110 阶)。低于 110 阶次的模型重力场偏差与 110 阶次的情况类似, 而高于 110 阶次的模型重力场偏差与 150 阶次的情况类似, 在此就不一一列出。首先, 比较图 2(b) 和图 2(c), 两者都存在一沿着纬度方向的起伏现象, 其中 GGM 模型的情况更突出一些, 这种规则的起伏可以肯定不是重力场信息而是一种具有周期性的系统偏差。而比较图 2(e) 和图 2(f) 就不存在 150 阶所反映出的现象。这也说明无论是 GFZ 还是 CSR, 处理较高阶次重力场模型求定问题时都使模型中引入了少量的虚假信息。所以, 当前 SST 重力场模型的较高阶(高于 110 阶)部分的求定方法还有待改进或者需要降低 SST 模型的阶次。此外, 虽然 GGM 模型已经达到了 160 阶次的水平, 但是通过笔者的比较发现, 160 阶次 GGM 与截断到 160 阶 WDM94 模型的偏差更大, 且比图 2(c) 所反映的周期性误差现象更为明显, 所以在此略去有关图和分析。

由图 2(e) 和图 2(f) 可以看出, SST 模型与 WDM94 模型的一致性要优于 EGM96 与 WDM94 的一致性。同时, 中国东部的模型一致性又优于西部的模型一致性。因为中国东部区域是我国经济文化比较发达的区域, 其地面重力观

测资料精度较高, 分布和密度情况较好, 这就使得 WDM94 在该区域有很高的精度。所以, 笔者认为在中国东部的统计结果更为可信。笔者在另一文中比较了 EIGEN 模型在中国东部的情况, 得出了 EIGEN 模型相对于截断到 150 阶 EGM96 模型精度提高了 14~15%^[9]。而中国西部的重力资料相对要少得多, 所以这部分偏差中可能包含了较大的 WDM94 模型本身的误差。

3 结 语

1) 由 GRACE 卫星 SST 资料获得的 EIGEN 模型对于全球重力场模型中长波部分的精化有一定贡献, 在中国区域以 WDM94 作为参考, 截断到 120 阶次 EIGEN_GRA CE02S 模型相对于截断到 120 阶 EGM96 模型与 WDM94 的一致性有明显提高。而无论是 EGM96 还是 WDM94 所采用的数据都是数十年所积累的数据, 而 SST 模型仅仅只有不到 2 a 的 GRACE 卫星 SST 观测资料可用(其中 EIGEN_GRA CE02S 模型使用了 110 d 的数据)。

2) 使用 SST 模型时建议只使用截断到 110 ~ 120 阶的模型位系数, 从文中的分析就可以看出高于 120 阶次的模型包含了规则的周期性系统偏差, 可靠性较低。

3) GGM 模型和 EIGEN 模型由不同机构采用不同的方法得到, 虽然都计算到了 150 阶甚至更高的 160 阶部分的位系数, 但是结果并不理想,

所以建议以后基于纯粹 GRACE 资料反演地球重力场以不超过 120 阶为宜。

参 考 文 献

- [1] 宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 471-474
- [2] 陈俊勇, 文汉江, 程鹏飞. 中国大地测量学发展的若干问题 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6), 475-482
- [3] 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
- [4] 张传定. 卫星重力测量——基础、模型化方法与数据处理算法 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2001
- [5] 罗佳. 利用卫星跟踪卫星确定地球重力场的理论和方法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2003

- [6] GRACE site in GFZ, http://op.gfz-potsdam.de/grace/results/grav/g002_eigen-grace02s.html, 2005
- [7] Lemoine F G, Kenyon S C, Factor J K, et al. The Development of the Joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96 [C]. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1998
- [8] 宁津生, 李建成, 晁定波. WDM94 360 阶地球重力场模型研究 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(4): 283-291
- [9] 罗佳, 宁津生, 汪海洪, 等. 中国东部 GRACE 全球重力场模型的精度分析 [J/OL]. <http://www.paper.edu.cn>, 2004

第一作者简介: 罗佳, 博士。现从事大地测量和卫星应用方面的研究。

E-mail: jluo@sgg.whu.edu.cn

Precision Analysis of SST Gravity Field Model in China

LUO Jia¹ JIANG Weiping² WANG Haihong¹ ZOU Xiancai¹

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

(2 Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, with China as the region in test, the potential of the new satellite gravity technique, satellite-to-satellite tracking, to improve the precision of regional gravity field model is studied. With WDM94 as reference, the gravity anomaly residuals of three models, the latest two GRACE global gravity field models (EIGEN_GRACE02S, GGM02S) and EGM96, are computed and compared. The causes for the differences among the residuals of the three models are discussed. The comparison between the residuals shows that in the selected region, EIGEN_GRACE02S or GGM02S is better than EGM96 in lower degree part (less than 110 degree). From the analysis of the model gravity anomaly residuals, it is found that some systematic errors with periodical properties exist in the higher part of EIGEN and GGM models. The results of the paper can also be taken as references in the validation of the SST gravity data.

Key words: satellite-to-satellite tracking; gravity field; GRACE

About the first author: LUO Jia, Ph. D. He majors in geodesy and satellite application.

E-mail: jluo@sgg.whu.edu.cn

朱灼文教授病逝

本报讯 武汉大学博士生导师、本刊编委朱灼文教授, 因病不幸于 2006 年 2 月 17 日去世, 享年 69 岁。朱灼文教授长期从事物理大地测量研究, 卓有建树, 是该领域的知名学者。