

现有 SST 重力场模型的比较研究

罗佳¹ 施闯² 邹贤才¹ 汪海洪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:分析了最新的卫星跟踪卫星(satellite-to-satellite tracking, SST)地球重力场模型 EIGEN 系列和 GGM 系列在欧洲大陆部分与 GPM98C 模型重力场异常残差的差异,研究了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。比较结果说明, SST 重力场模型的较高阶部分精度不理想,而在中低阶部分, SST 模型表现出在原有经典重力场模型中并未包含的信息。

关键词:卫星跟踪卫星; 重力场; CHAMP; GRACE

中图法分类号: P223.0

自 2000 年 CHAMP 成功发射以来,基于 SST 方法提供的丰富资料已经计算了多个成系列的高精度、高分辨率的静态地球重力场模型。这些模型将极大地推动固体地球物理、海洋科学、大地测量学等领域对地球的研究^[1]。本文研究了主要 SST 卫星重力场模型系列在不同频段上的精度,比较了它们之间的差异,分析了当前 SST 重力场模型存在的问题,旨在为利用 SST 重力场模型研究相关地球科学问题及应用 SST 技术进一步恢复地球重力场提供了科学依据。

1 SST 重力场模型

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)利用已经积累了 4 a 多的

SST 重力观测资料,建立了成系列的重力场模型。其中,GFZ 的 SST 重力场模型主要是 EIGEN 系列,包括 EIGEN_CHAMP01S、EIGEN_CHAMP02S、EIGEN_CHAMP03S、EIGEN_GRACE01S、EIGEN_GRACE02S、EIGEN_CG01C。CSR 提供 GGM 系列模型,包括 GGM01S、GGM01C、GGM02S 和 GGM02C。这些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;模型命名中的 CHAMP 表示仅使用了 CHAMP 卫星资料,GRACE 表示仅使用了 GRACE 卫星资料,CG 表示联合了 CHAMP 和 GRACE 卫星资料;01、02、03 等是模型的系列号。

表 1 列出了目前公开的主要 SST 模型,这些数据综合自 GFZ 和 CSR 提供的相关资料^[1, 2]。表

表 1 主要 SST 重力场模型

Tab. 1 Main SST Gravity Field Models

模型	EIGEN_CHAMP03S	EIGEN_GRACE02S	EIGEN_CG01C	GGM02S	GGM02C
完全阶次	120	150	360	160	200
有效阶次	60	-	-	110	-
数据	CHAMP 990 d	-	860 d	-	-
	GRACE -	110 d	109 d	363 d	363 d
	地面数据 -	-	30' × 30'	-	60' × 60'
	大地水准高 0.05 m	0.01 m	0.20 m	0.01 m	0.01 m
精度	重力异常 0.50 mGal	-	5.00 mGal	-	-
	对应半波长 400 km	275 km	55 km	200 km	200 km

收稿日期: 2006-04-25。

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(40274004, 40374006, 40304001, 40174004); 国家教育部博士点专项基金资助项目(20020486003);

国家教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 地理空间信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目。

中的“-”表示没有参考数据或未使用该类资料, 给出的模型精度是在特定分辨率下的精度。GFZ 给出的 EIGEN 模型见文献 [2], CSR 给出的 GGM 模型在给出波段的精度曲线见文献 [1]。

2 模型分析

为了研究 SST 模型的精度, 可以选取精度更高的模型作为参考, 本文选取了 EGM96 和 GPM98C 模型作为参考模型。EGM96 模型^[3]是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 1 m 精度的大地水准面模型。GPM98C 是在 EGM96 的基础上综合高密度的地面资料(以欧洲地区资料居多)确定的超高阶次重力场模型, 完全阶次到 1800 阶^[4]。无论是 EGM96 模型还是 GPM98C 模型, 或者其他重力场模型, 虽然具有全球的特性, 但由于所使用的重力等资料并非全球均匀覆盖, 其精度不均匀, 所以选用了模型精度较好的欧

洲区域(N35°~ N55°, E00°~ E30°)对各模型进行比较分析。图 1 是所选区域的高程异常图。由于各模型的最高分辨率不一, 为了使它们具有可比性, 将各模型截断到 150 阶次进行比较。

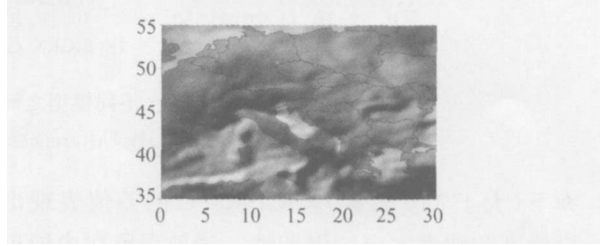


图 1 研究区域

Fig. 1 Research Region

因为 GFZ 提供的综合模型 EIGEN CG01C 和 CSR 提供的综合模型分别达到 360 阶次和 200 阶次, 所以图 2 分别将两模型与 GPM98C 和 EGM96 截断到 360 阶次和 200 阶次进行比较。因为 GGM02C 仅到 200 阶次, 故其只有一组统计量。该区域的 9882 个格网点的统计信息见表 2。

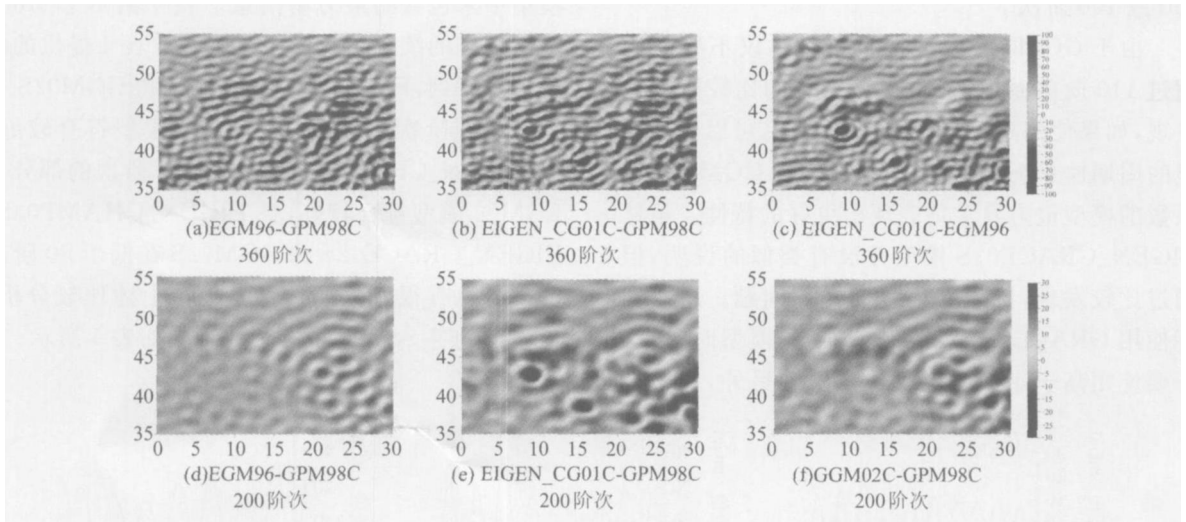


图 2 不同模型之间 360 阶次(上)和 200 阶次(下)的差值

Fig. 2 Gravity Anomaly Difference of Different Models, Degree and Order 360 (Top) and 200 (Bottom)

表 2 360 阶次和 200 阶次模型重力异常偏差统计

Tab.2 Statistics of Gravity Anomaly Difference, Degree and Order 360 and 200

偏差统计量	EGM96-GPM98C		EIGEN CG01C-GPM98C		EIGEN CG01C-EGM96		GGM02C-GPM98C	
阶次	360	200	360	200	360	200	200	200
平均值/mGal	-0.006	0.003	-0.087	-0.065	-0.081			-0.081
标准差/mGal	6.106	1.817	8.481	4.907	6.525			3.592

图 3 和表 3 列出了不同模型在 150 阶次的重力异常差值的情况, 同样统计了 9882 个格网点。可以看出, EGM96 与 GPM98C 已经趋同, 而 EIGEN GRACE02S 与 GPM98C 的符合程度优于 GGM02S 与 GPM98C 的符合程度。另外, EIGEN GRACE02S 和 GGM02S 模型在高分辨

表 3 150 阶次模型重力异常偏差统计/mGal

Tab.3 Statistics of Gravity Anomaly Difference, Degree and Order 150/mGal

偏差统计量	EGM96-GPM98C	EIGEN GRACE02S-GPM98C	GGM02S-GPM98C
平均值	0.000	-0.146	-0.071
标准差	0.000	10.067	12.140

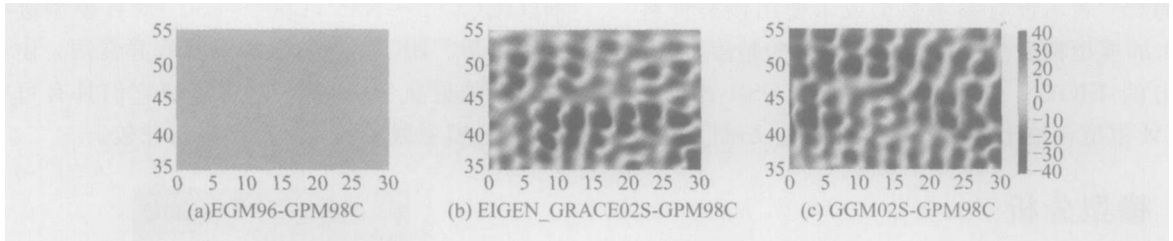


图3 不同模型之间150阶次的重力异常差值

Fig. 3 Gravity Anomaly Differences of Different Models, Degree and Order 150

率下(大于110阶次)与GPM98C的差值表现出沿经度和纬度方向的周期性。这种现象在中国东部区域的比较中也被发现^[5]。为了分析这种周期性偏差,以GGM模型为例,沿经度和纬度方向提取了共计7条变化带,如图4所示。可以看出,沿经度方向($E0^\circ$ 、 $E10^\circ$ 、 $E20^\circ$ 和 $E30^\circ$)起伏的周期性并不明显,随机性较强,但沿纬度方向($N35^\circ$ 、 $N45^\circ$ 和 $N55^\circ$)有明显的周期性,振幅可达30 mGal。笔者认为,这是由于SST的原始数据并不能达到相应的分辨率,所以其有效阶次达不到150或160阶次。

由于GGM02S模型在公布时建议不要使用超过110阶的系数,通过对该区域的比较研究也发现,如果使用高于110阶的位系数,可以看到明显的周期性系统误差,而低于110阶GGM02S位系数的模型重力异常则表现出更好的特性。虽然EIGEN_GRACE02S模型并没有类似的说明,但通过比较发现,该模型也有同样的问题。所以实际使用GRACE资料确定的S系列模型时,建议不要使用高于110阶次的位系数。另外,由于在

低于150阶次部分,EGM96与GPM98C趋同,下面的比较都将以EGM96为参考模型。

通过图5(a)~5(e)可以看出,在某些区域,SST模型相对于EGM96有明显的正值偏差,如($N46^\circ$, $E10^\circ$)和($N45^\circ$, $E22^\circ$)处,原因可能是SST模型本身的误差,或是SST获取了原有模型中未包含的信息。在图5(f)~5(j)中,同样是在这两处,CHAMP和GRACE提供的资料都反映出了这种偏差。这一现象在C系列模型中也有反映。笔者认为,最大的可能性是SST获取了EGM96模型中未包含的重力场信息。表4给出了9882个格网点的统计信息。综合图5和表4提供的信息可以看到,EIGEN_GRACE02S和GGM02S在低于110阶次的部分与EGM96模型符合较好,而EIGEN_CHAMP03S在低于60阶次的部分与EGM96模型符合较好,且EIGEN_CHAMP03S、EIGEN_GRACE02S和GGM02S在低于60阶次的部分也有很好的一致性。综合上述比较分析,可以得到各SST模型的有效阶次如表5所示。

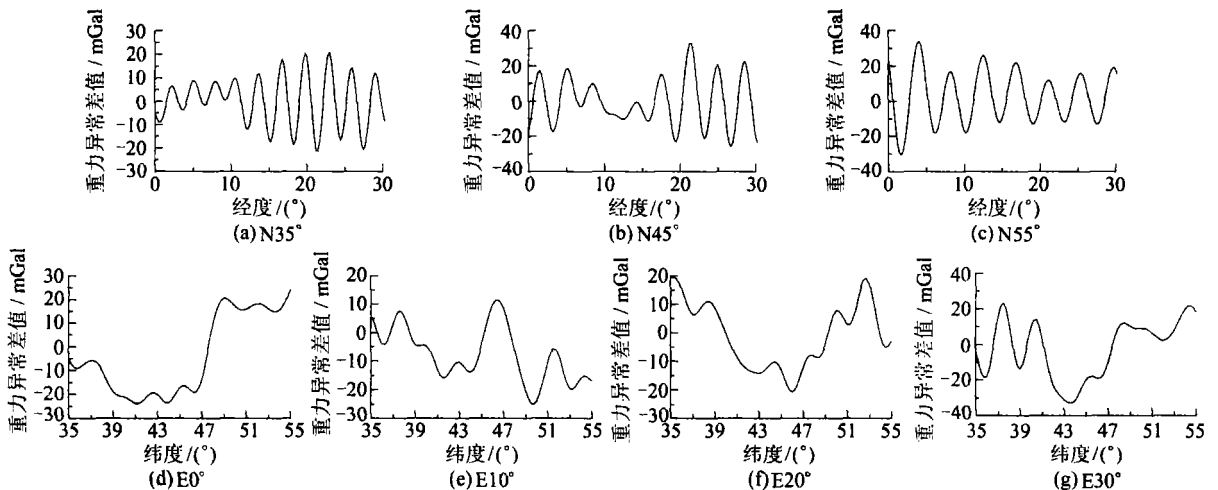


图4 欧洲地区沿纬圈($N35^\circ$ 、 $N45^\circ$ 、 $N55^\circ$)和经圈($E0^\circ$ 、 $E10^\circ$ 、 $E20^\circ$ 、 $E30^\circ$)方向的起伏条带

Fig. 4 Period Difference of Along Latitude and Along Longitude in Europe

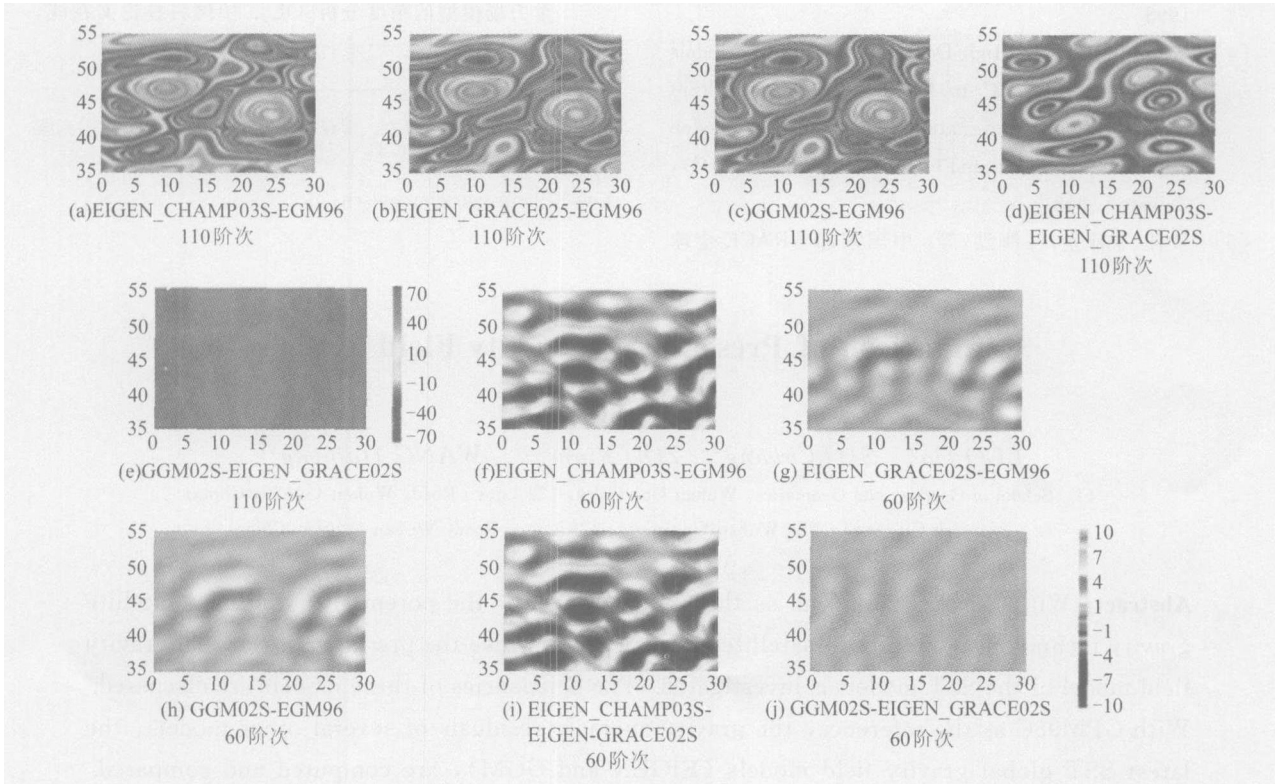


图 5 不同模型之间 110 阶次和 60 阶次重力异常的差值

Fig. 5 Gravity Anomaly Difference of Different Models, Degree and Order 110 and 60

表 4 110 阶次和 60 阶次模型重力异常偏差统计/mGal

Tab. 4 Statistics of Gravity Anomaly Difference, Degree and Order 110 and 60

偏差统计量	EIGEN_CHAMP0	EIGEN_GRACE02S	GGM 02S	EIGEN_CHAMP03S-	GGM02S-
	3S-EGM96	EGM96	EGM96	EIGEN_GRACE02S	EIGEN_GRACE02S
110 阶平均值	0.129 7	- 0.058 3	- 0.101 7	- 0.071 4	- 0.043 4
110 阶标准差	15.458 1	3.345 9	3.297 5	16.211 0	0.952 5
60 阶平均值	- 0.003 5	- 0.058 8	- 0.064 1	0.055 3	- 0.005 3
60 阶标准差	2.192 4	2.119 9	2.120 6	0.652 7	0.036 3

表 5 主要 SST 重力场模型的有效阶次

Tab. 5 Valid Degree and Order of Main SST

Gravity Field Models

模型	完全阶次	有效阶次
EIGEN_CHAMP03S	120	60
EIGEN_GRACE02S	150	110
EIGEN_CG01C	360	360
GGM02S	160	110
GGM 02C	200	200

时, 可以参照表 5 给出的有效阶次参考值。

3) 通过对不同 SST 任务 (CHAMP 和 GRACE)、不同机构 (CSR 和 GFZ) 计算结果的比较不难发现, SST 技术能够获取更为丰富的中波长重力场信息。

参 考 文 献

[1] Tapley B, Ries J, Bettadpur S, et al. GGM02—An Improved Earth Gravity Field Model from GRACE [J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(8): 467-478

[2] Reigber C, Schmidt R, Flechtner F, et al. An Earth Gravity Field Model Complete to Degree and Order 150 from GRACE: EIGEN GRACE02S[J]. Journal of Geodynamics, 2005, 39(1): 1-10

[3] Lemoine F G, Kenyon S C, Factor J K, et al. The Development of the Joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96[R]. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA,

3 结 语

1) 在高阶部分, SST 的 C 系列重力场模型与 EGM96 或 GPM98C 的一致性都较好, 这归因于 C 系列模型所使用的地面资料与 EGM96 或 GPM98C 的地面资料同源。

2) 各 SST 模型的计算虽然都达到了很高的阶次, 但是可用的位系数阶次并不高, 在具体使用

- 1998
- [4] Wenzel G. Ultra High Degree Geopotential Models GPM98A, B and C to Degree 1 800 [C]. Joint Meeting of the International Gravity Commission (IGC) and International Geoid Commission (IGeC), Trieste, 1998
- [5] 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[OL]. 中国科技论文在线, 2004

第一作者简介: 罗佳, 博士。现从事大地测量学和卫星应用方面的研究。

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

Comparison of Present SST Gravity Field Models

LUO Jia¹ SHI Chuang² ZOU Xiancai¹ WANG Haihong¹

(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: With Europe main land as the region in study, the potential of the new satellite gravity technology, satellite-to-satellite tracking, to improve the precision of regional gravity field model of the SST models is investigated. The deficiencies of these models are discussed. With GPM98C as the reference, the gravity anomaly residuals of several other models, the latest SST global gravity field models (EIGEN and GGM), are computed and compared. The results of the comparison show that in the selected region, some systematic errors with periodical properties exist in the EIGEN and GGM's S serial models in the high degree and order. Some information that is not shown in the classic gravity models is detected in the low and middle degree and order of EIGEN and GGM's S serial models.

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

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

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

欢迎订阅 2006 年《武汉大学学报·信息科学版》

《武汉大学学报·信息科学版》即原《武汉测绘科技大学学报》，是以测绘为主的专业学术期刊。其办刊宗旨是：立足测绘科学前沿，面向国际测量界，通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果，展示中国测绘研究的最高水平，引导测绘学术研究的方 向。本刊为中国中文核心期刊，EI 刊源期刊，国家优秀科技期刊，并获中国国家期刊奖，入选中国期刊方阵。

本刊主要栏目有院士论坛、学术论文、科技新闻等，内容涉及摄影测量与遥感、大地测量与物理大地测量、工程测量、地图学、图形图像学、地球动力学、地理信息系统、全球定位系统等。收录本刊论文的著名国际检索机构包括 EI、CAS、PY 等，其中 EI 收录率达 100%，其影响因子长期名列中国高校学报前列。本刊读者对象为测绘及相关专业的科研人员、教师、研究生等。

本刊为月刊，国内外公开发行，邮发代号 38-317，国外代号 MO1555。A4 开本，96 面，定价 8 元/册，每月 5 日出版。漏订的读者可以与编辑部联系补订。