

# 广东地区最优地球重力场模型的选择及精度分析<sup>\* 1</sup>

许耿然 周建营 朱紫阳

(广东省国土资源测绘院,广州 510500)

**摘 要** 利用广东地区 GPS/水准数据和 2 个局部区域高密度的 GPS/水准观测资料,对地球重力场模型进行了比较和分析。结果表明,在广东地区,EGM2008/ EIGEN-6C(1420)模型的精度最高,达 0.066 m。

**关键词** 广东地区;卫星重力;地球重力场模型;高程异常;GPS/水准

**中图分类号**:P312.1

**文献标识码**:A

## CHOICE AND ACCURACY ANALYSIS OF OPTIMAL EARTH GRAVITY FIELD MODEL IN GUANGDONG REGION

Xu Gengran, Zhou Jianying and Zhu Ziyang

(*Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department of Guangdong Province, Guangzhou 510500*)

**Abstract** Several earth gravitational field models are compared and analyzed based on the GPS/leveling data, which are distributed over not only Guangdong region but also densely over two local areas. The result shows that the accuracy of the EGM2008/ EIGEN-6C(1420) model is the highest with 0.066 m in Guangdong region.

**Key words**: Guangdong region; satellite gravity; earth gravitational field model; height anomaly; GPS/leveling

## 1 引言

国际科研机构利用长时间序列的 CHAMP、GRACE、GOCE 卫星重力观测数据获得了一系列地球重力场模型,使各模型的中长波位系数精度提高了 1~2 个数量级,仅利用重力卫星观测数据获得的地球重力场模型的精度较高,但阶次有限,分辨率不高。美国国家地理空间情报局(NGA)将 ITG-GRACE03S 模型与地面重力、海洋重力等数据源联合构建了新一代地球重力场模型 EGM2008<sup>[1]</sup>,该模型的精度和分辨率都得到了很大的提高。目前 IC-GEM(International Centre for Global Earth Models)利用各个地区的 GPS/水准数据,对各地球重力场模型的精度进行了全面的评价,但因缺少中国的 GPS/水准数据,所以在应用这些国际地球重力场模型对我国局域大地水准面进行精化时就需利用高精度、不同密度的 GPS/水准观测资料对各模型的精度进行

评价<sup>[3-12]</sup>。

EGM2008 地球重力场模型是新一代超高阶地球重力场模型,在进行区域性似大地水准面精化时,可考虑作为最优的参考重力场,但在不同的区域,最优参考场可能是不同的,这需要用地面实测 GPS/水准数据或重力数据作进一步的检核,从而选出区域最优参考场。“十五”期间,广东地区以 EGM96 地球重力场模型作为参考重力场进行陆地大地水准面精化,建立了广东似大地水准面模型(GDQG, Guang-dong Quasi-Geoid model),但该似大地水准面模型满足不了更高精度要求的实际生产需要,由此需对其进行进一步的优化,提高高程异常的精度和分辨率。新一代的地球重力场模型 EGM2008 在广东地区精度如何?是否为最优的参考重力场模型?还需要利用实测的地面观测资料进行分析。为此,本文将利用广东地区现有的 GPS/水准数据对 EGM2008 等地球重力场模型的精度进行分析。

\* 收稿日期:2013-05-21

作者简介:许耿然,男,1968 年生,高级工程师,现主要从事测绘生产技术管理。E-mail: xugengran@126.com

## 2 高程异常比对方法

利用地球重力场模型计算地面任意点的高程异常的公式为

$$\zeta_m = \frac{GM}{\rho\gamma} \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left( \frac{a}{\rho} \right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\phi)$$

(1)

式中各参数的定义请见文献[5]。

GPS 定位技术测定地面点大地高的精度可达 cm 级甚至 mm 级,而几何水准联测的水准高精度能达到 mm 级,故利用 GPS/水准数据来评价地球重力场模型的精度。

## 3 地球重力场模型和地面观测资料的选用

本文主要评价具有代表性的 6 个地球重力场模型,分别为 EGM2008、EIGEN-6C、GIF48、GGM03C、GOCO03S 以及 ITG-GRACE2010,各模型的最高完整阶分别为 2 160、1 420、360、360、250 和 180,其中 EGM2008 和 EIGEN-6C 模型属于超高阶重力场模型。

- 参与比对的 GPS/水准数据共有 3 类:
- 1)用于广东地区似大地水准面精化的 88 个 GPS/水准点,平均点间距约 70 km,各点均按照 GPS-B 级网的精度进行了外业观测,部分 GPS 点有国家一、二和三等水准测量成果,在没有水准测量成果的点则联测了二等水准(图 1);
  - 2)区域一的数据采用湛江市市区似大地水准面精化的 49 个 GPS/水准点,覆盖该市区 1 500 km<sup>2</sup>,平均边长约 10 km,这些点均按照 GPS-C 级网的精度进行了 GPS 观测和二等水准测量;
  - 3)区域二的数据采用某工程控制网的 GPS/水准点,其中有 55 个 B 级点,平均边长 70 km;475 个 D 级点,平均边长 5~10 km;169 个三等水准点,其中 GPS/水准点 119 个。

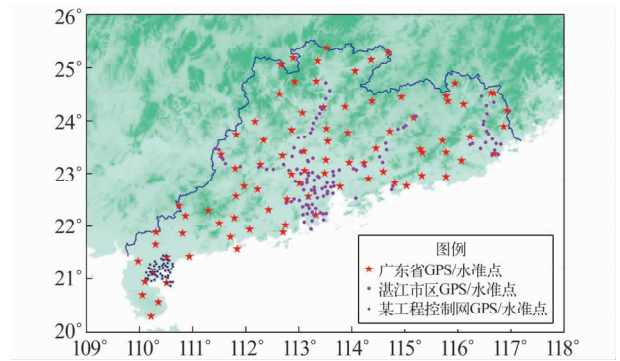


图 1 GPS/水准点点位分布

Fig. 1 Distribution of GPS/leveling points

## 4 分析方法

利用 GPS/水准数据对 EGM2008、EIGEN-6C、GIF48、GGM03C、GOCO03S 及 ITG-GRACE2010 等模型的精度进行分析,同时以广东似大地水准面模型(GDQG)的精度结果作为比较。由于各模型的阶次不同,而 GPS/水准数据提供的是地面点全频域的高程异常,为此本文采用简单的谱组合技术<sup>[2,12]</sup>,即模型的位系数均用 EGM2008 模型位系数补充至 2 160 阶(EGM2008 模型除外),如 GIF48、GOCO03S 和 ITG-GRACE2010 模型。其中,EGM2008/EIGEN-6C、EGM2008/GIF48 及 EGM2008/GGM03C 组合模型前 1 420、360、360 阶分别采用 EIGEN-6C、GIF48 及 GGM03C 模型位系数,1 421~2 160、361~2 160、361~2 160 阶采用 EGM2008 模型位系数补充;考虑 GOCO03S 与 ITG-GRACE2010 仅由 GRACE 或 GOCE 卫星重力观测数据获得的地球重力场模型,EGM2008/GOCO03S、EGM2008/ITG-GRACE2010 组合模型利用 GPS/水准数据经过比对,选择结果最好的阶次,如利用全省 88 个 GPS/水准点进行计算,EGM2008/GOCO03S 模型经过比对,前 190 阶采用 GOCO03S 模型位系数,191~2 160 阶采用 EGM2008 模型位系数。

## 5 结果分析

利用 GPS/水准数据对 EGM2008、EIGEN-6C、GIF48、GGM03C、GOCO03S 以及 ITG-GRACE2010 等模型的精度进行分析,同时以广东似大地水准面模型(GDQG)的精度结果作为比较。利用 3 类 GPS/水准数据的评价结果见表 1~3。

表 1 利用覆盖广东 GPS/水准数据检核各模型精度的统计结果(单位:m)

Tab. 1 Accuracy statistic results for different models based on GPS/leveling data in Guangdong region(unit:m)

| 模型                            | 最大值   | 最小值    | 平均值    | 标准差   |
|-------------------------------|-------|--------|--------|-------|
| EGM2008(2160)                 | 0.067 | -0.298 | -0.156 | 0.076 |
| EIGEN-6C(1420)                | 0.040 | -0.300 | -0.140 | 0.071 |
| GIF48(360)                    | 0.516 | -0.571 | -0.195 | 0.170 |
| GGM03C(360)                   | 0.417 | -0.548 | -0.176 | 0.215 |
| EGM2008/<br>EIGEN-6C(1420)    | 0.025 | -0.286 | -0.140 | 0.066 |
| EGM2008/<br>GIF48(360)        | 0.065 | -0.333 | -0.162 | 0.082 |
| EGM2008/<br>GGM03C(360)       | 0.321 | -0.513 | -0.143 | 0.167 |
| EGM2008/<br>ITG-GACE2010(140) | 0.101 | -0.285 | -0.158 | 0.075 |
| EGM2008/<br>GOCO03S(190)      | 0.052 | -0.326 | -0.140 | 0.079 |
| GDQG                          | 0.109 | -0.120 | 0.000  | 0.040 |

表 2 利用湛江市区域 GPS/水准数据检核各模型精度的统计结果(单位:m)

Tab.2 Accuracy statistic results for different models based on GPS/leveling data in Zhanjiang region (unit:m)

| 模型                            | 最大值    | 最小值    | 平均值    | 标准差   |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| EGM2008(2160)                 | -0.204 | -0.412 | -0.280 | 0.044 |
| EIGEN-6C(1420)                | 0.028  | -0.179 | -0.053 | 0.043 |
| GIF48(360)                    | -0.183 | -0.377 | -0.294 | 0.044 |
| GGM03C(360)                   | 0.179  | -0.561 | -0.162 | 0.167 |
| EGM2008/<br>EIGEN-6C(1420)    | 0.035  | -0.171 | -0.053 | 0.041 |
| EGM2008/GIF48(360)            | -0.142 | -0.349 | -0.237 | 0.052 |
| EGM2008/<br>GGM03C(360)       | 0.221  | -0.532 | -0.106 | 0.196 |
| EGM2008/<br>ITG-GACE2010(120) | -0.242 | -0.455 | -0.320 | 0.044 |
| EGM2008/<br>GOCO03S(170)      | 0.091  | -0.157 | 0.001  | 0.051 |
| GDQG                          | 0.105  | -0.064 | -0.013 | 0.045 |

表 3 利用广东地区某工程控制网 GPS/水准数据检核各模型精度的统计结果(单位:m)

Tab.3 Accuracy statistic results for different models based on GPS/leveling data in Guangdong sea-route (unit:m)

| 模型                            | 最大值    | 最小值    | 平均值    | 标准差   |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| EGM2008(2160)                 | -0.050 | -0.383 | -0.190 | 0.070 |
| EIGEN-6C(1420)                | -0.030 | -0.375 | -0.178 | 0.073 |
| GIF48(360)                    | -0.027 | -0.551 | -0.233 | 0.110 |
| GGM03C(360)                   | 0.127  | -0.565 | -0.209 | 0.159 |
| EGM2008/<br>EIGEN-6C(1420)    | -0.034 | -0.380 | -0.173 | 0.074 |
| EGM2008/GIF48(360)            | -0.054 | -0.406 | -0.194 | 0.081 |
| EGM2008/<br>GGM03C(360)       | 0.149  | -0.501 | -0.169 | 0.164 |
| EGM2008/<br>ITG-GACE2010(140) | -0.021 | -0.326 | -0.165 | 0.076 |
| EGM2008/<br>GOCO03S(190)      | -0.036 | -0.339 | -0.156 | 0.059 |
| GDQG                          | 0.156  | -0.199 | -0.031 | 0.058 |

从表 1 看出,利用 GPS/水准点检测的不同模型的高程异常均值不为零,说明各模型表示的区域似大地水准面和我国国家高程基准存在系统性偏差,在整个广东地区,除 360 阶次的 GIF48 模型所表示的似大地水准面和我国国家高程基准差别分别为 -0.195 m 外,其他模型所表示的区域似大地水准面模型和我国国家高程基准的系统性偏差为 -0.140 m 至 -0.176 m,可以认为在广东地区各模型所表示的区域似大地水准面基本是一致的。在整个广东地区,360 阶的 GGM03C 模型精度为 0.215 m,360 阶的 GIF48 模型精度为 0.170 m,2 160 阶的 EGM2008 模型精度为 0.076 m,1420 阶的 EIGEN-6C 模型的

精度为 0.071 m,精度最高的模型为经过谱组合技术的 EGM2008/ EIGEN-6C(1420) 模型,其精度为 0.066 m,比 EGM2008 模型的精度提高约 13.2%。在整个广东地区,GDQG 的高程异常精度为 0.040 m,虽然单纯的重力场模型的精度比 GDQG 要稍差一些,但是作为进行大地水准面精化的参考模型,EGM2008/ EIGEN-6C(1420) 模型具有较高的精度。

表 2 为利用湛江市区域 GPS/水准数据后的结果的对比。从表 2 可见,该区域 GGM03C 与 EGM2008/ GGM03C(360) 模型的高程异常精度稍低,分别为 0.167 m 和 0.196 m;其余各模型的精度基本相当,模型高程异常的精度介于 0.041 m 至 0.052 m 之间。精度最高的模型为经过谱组合技术的 EGM2008/ EIGEN-6C(1 420) 模型,其精度为 0.041m,略高于 GDQG 模型的精度;EGM2008 模型与 GDQG 模型的精度基本相当。模型高程异常与 GPS/水准高程异常的差异平均值从 -0.294 m 到 0.001 m 不等,不同模型高程异常值偏差差异较大。

表 3 为利用广东地区某工程控制网 GPS/水准数据检核各模型精度的统计结果。从表 3 看出,经过谱组合技术的 EGM2008/ GOCO03S(190) 模型与 GDQG 模型的精度最高,而 360 阶的 GGM03C 与经过谱组合技术的 EGM2008/ GGM03C(360) 模型的精度最差分别为 0.159 m 和 0.164 m,其他模型的精度基本相当。比较表 1~3 可以看出:区域小,各模型所表示的似大地水准面和我国国家高程基准的差别可能变化稍大一些,但扣除系统偏差后,其精度较高,而大范围结果则相反。

表 3 的结果进一步说明采用较小区域的点来选择模型系统差是不妥的,需要覆盖整个区域分布均匀的 GPS/水准点。

## 5 结语和建议

1)在整个广东地区,各地球重力场模型所表示的似大地水准面与我国国家高程基准的系统性差异基本一致;

2)在小区域 GPS/水准数据中,总能找到一个参考模型的精度与我们现在使用的 GDQG 模型的精度相当,在湛江市区的 EGM2008/ EIGEN-6C(1420) 模型的精度略优于 GDQG 模型的精度;

3)整个广东地区,EGM2008/ EIGEN-6C(1420) 模型的精度最高(0.066 m),因此可将该模型作为广东地区下一代似大地水准面的最优参考模型;

4)本文仅用 GPS/水准点的高程异常精度进行模型优选,若比较重力异常的精度,能否得出同样的结论,需进一步分析验证。

致谢 感谢张兴福副教授提供有关计算软件!

参 考 文 献

1 Pavlis N K, et al. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008[ A]. The 2008 General Assembly of the European Geosciences Union[ C]. Vienna, Austria, 2008, 13 – 18.

2 Hirt C, Gruber T and Featherstone W E. Evaluation of the first GOCE static gravity field models using terrestrial gravity, vertical deflections and EGM2008 quasigeoid heights [J]. Journal of Geodesy, 2011,85(10):723 – 740.

3 郭海荣,焦文海,杨元喜. 1985 国家高程基准与全球似大地水准面之间的系统差及其分布规律[J]. 测绘学报, 2004,33(2):100 – 104. (Guo Hairong, Jiao Wenhai and Yang Yuanxi. The systematic difference and its distribution between the 1985 National Height Datum and the global quasigeoid[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004,33(2):100 – 104)

4 郭海荣,等. 1985 国家高程基准的系统差[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):715 – 719. (Guo Hairong, et al. Systematic error of the 1985 national height datum[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004,29(8):715 – 719)

5 章传银,等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报,2009,38(4):283 – 289. (Zhang Chuanyin, et al. EGM2008 and its application analysis in Chinese mainland [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4):283 – 289)

6 荣敏,周巍,陈春旺. 重力场模型 EGM2008 和 EGM96 在中国地区的比较与评价[J]. 大地测量与地球动力学, 2009,(6):123 – 126. (Rong Min, Zhou Wei and Chen Chunwang. Comparison and comments between EGM2008 and EGM96 in China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009,(6):123 – 126)

7 束蝉方,李斐,郝卫峰. EGM2008 模型在中国某地区的检核及适用性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011,(8):919 – 922. (Shu Chanfang, Li Fei and Hao Weifeng. Evaluation of EGM2008 and its application analysis over a particular region of China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,(8):919 – 922)

8 翟振和,等. 利用 EGM2008 位模型计算中国高程基准与大地水准面间的垂直偏差[J]. 大地测量与地球动力学, 2011,(4):116 – 118. (Zhai Zhenhe, et al. Computation of vertical deviation of Chinese height datum from geoid by using EGM2008 model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011,(4):116 – 118)

9 杨金玉,等. EGM2008 地球重力模型数据在中国大陆地区的精度分析[J]. 地球物理学进展,2012,(4):1298 – 1306. (Yang Jinyu, et al. On the accuracy of EGM2008 earth gravitational model in Chinese Mainland[J]. Chinese J Geophys.,2012,(4):1298 – 1306)

10 张精明,闫建强,王福民. EGM2008 地球重力场模型精度分析与评价[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(增刊1):230 – 233. (Zhang Jingming, Yan Jianqiang and Wang Fumin. Accuracy analysis and evaluation of EGM2008 earth gravity field model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(Sup. 1):230 – 233)

11 张兴福,等. 无水准数据的 GPS 高程转换方法及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(1):114 – 118. (Zhang Xingfu, et al. Analysis of method and accuracy of GPS heigh transformation without leveling data[J]. Journal of Geodesy and Geodenamics, 2010,(1):114 – 118)

12 张兴福,等. 多类重力场模型的精度分析及联合确定 GPS 点正常高的方法[J]. 测绘学报,2013,42(1):6 – 12. (Zhang Xingfu, et al. The accuracy analysis of multiple earth gravity field models and normal height determination of GPS points based on combination method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013,42(1):6 – 12)