

文章编号:0494-0911(2010)02-0008-03

中图分类号:P223

文献标识码:B

# DQM2000d、UGM05 和 EGM2008 地球

## 重力场模型精度比较

刘晓刚<sup>1</sup>,吴晓平<sup>1</sup>,田颜锋<sup>1,2</sup>,卢成静<sup>2</sup>

(1. 信息工程大学 测绘学院,河南 郑州 450052; 2. 73603 部队,江苏 南京 210049)

### Precision Comparison of the Earth Gravity Field Models of DQM2000d, UGM05 and EGM2008

LIU Xiaogang, WU Xiaoping, TIAN Yanfeng, LU Chengjing

**摘要:**给出由地球重力场模型计算重力异常和垂线偏差的公式,利用36阶、360阶、1800阶DQM2000d、UGM05以及EGM2008地球重力场模型计算国内某地区格网点重力异常和地面垂线偏差,并将其与实测数据进行比较,从而对三种模型的精度进行评估。结果表明,在表示国内某地区格网点重力异常时,UGM05模型精度最高,DQM2000d模型精度次之,EGM2008模型精度最低;在表示地面垂线偏差时,三种模型的精度相当。

**关键词:**地球重力场模型;球谐函数;DQM2000d;UGM05;EGM2008

地球重力场是反映地球物质分布与运动的基本物理场,在地球科学及相关学科的研究中具有极其重要的作用。地球重力场模型就是用以描述和表示地球重力场的一类基本参数的集合,是对地球重力场的逼近或拟合。

由于全球重力数据覆盖的密度和数据精度差别较大,所以已知的重力场模型的实际分辨率及其精度也因地区而异,故重力场模型的精化是一个漫长的过程<sup>[14]</sup>。自从1963年美国应用物理实验室确定的第一个地球重力场模型APL 1.0(最高完全阶数为4阶)问世以来,经过40多年的发展,确定地球重力场模型时采用的技术越来越先进,数据量和数据种类不断增多,模型阶数不断增加,精度也不断提高。

EGM2008地球重力场模型是美国国家宇航局哥达飞行中心(NASA/GSFC)、美国国家影像制图局(NIMA)、美国国防部(DOD)以及俄亥俄州大学在2008年共同完成的高精度重力场模型,利用地面重力数据(主要是重力异常数据)、GRACE卫星跟踪数据(ITG-GRACE03S位系数信息以及相应的协方差信息)和卫星测高数据等重力场信息构建而成<sup>[5-7]</sup>。该模型的阶次完全至2159(另外球谐系数的阶扩展至2190,次为2159),相当于模型的空间分辨率约为9 km,因此无论在精度方面还是分辨率

方面都比EGM96重力场模型取得了巨大的进步<sup>[8-9]</sup>。

DQM2000d地球重力场模型是我国西安测绘研究所基于局部积分谱权综合法,选择国外重力场模型OUS91A和EGM96作为基础模型,利用中国区域20'×20'、15'×15'、10'×10'及5'×5'的平均重力异常数据解算的一个高分辨率地球重力场模型,该模型的阶次完全至2160,在我国区域内精度要高于OUS91A和EGM96重力场模型<sup>[10]</sup>。

UGM05地球重力场模型是我国信息工程大学测绘学院采用轮胎调和分析方法,对全球陆地重力数据、海洋测高数据进行集成和融合处理,实现陆海数据的拼接而构建的基于全球重力场信息的超高阶重力场模型,该模型的阶次完全至2160。

目前,研究构建地球重力场模型的机构日益增多,模型的种类也越来越多,模型的更新周期越来越短,但是,由于各构建模型采用的技术和使用的数据不同,因而所建立的模型的精度千差万别。另外,由于受地域限制,国外构建的模型基本上很少采用我国国内的重力实测数据,因而国际上发布的模型在描述我国地域重力场时,精度不高。因此,有必要对国内外所构建的地球重力场模型精度进行比较,以便于在利用这些模型处理实际地球物理问题时提供必要的参考。

收稿日期:2009-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40774031);全国优秀博士学位论文专项基金资助项目(200344);中科院动力大地测量学重点实验室开放基金资助项目(L06-06,L04-03);信息工程大学博士生创新基金资助项目;航天一院项目资金资助项目

作者简介:刘晓刚(1983—),男,甘肃天水人,博士生,主要从事卫星重力测量研究。

本文结合国内某地区实测的地面重力异常和垂线偏差数据,分别利用DQM2000d、UGM05以及EGM2008地球重力场模型计算了该地区的重力异常和垂线偏差数据,并对其精度进行比较,从而对这三种模型的精度作出评估和比较。

## 一、重力异常的比较

地球的扰动位可以表示为<sup>[11-12]</sup>

$$T = \frac{fM}{\rho} \sum_{n=2}^N \left(\frac{R}{\rho}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

式中, $fM$ 为引力常数; $R$ 是地球平均半径; $\rho$ 是地心向径; $\theta$ 是地心余纬; $\lambda$ 是地心经度; $(\bar{C}_{nm}^*, \bar{S}_{nm})$ 为完全正常化地球扰动引力位系数; $\bar{P}_{nm}(\cos \theta)$ 为完全正常化缔合勒让德函数。

在球近似的情况下,地面上的重力异常与扰动位有如下的关系

$$\Delta g = -\frac{\partial T_R}{\partial \rho} + \frac{2}{\rho} T_R \quad (2)$$

式中, $T_R$ 为球面上的扰动位。将式(1)代入式(2),并将其中的 $\rho$ 用 $R$ 来代替,可得

$$\Delta g = \frac{fM}{R^2} \sum_{n=2}^N (n-1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (3)$$

具体计算时,根据式(3),分别利用36阶、360阶、1800阶DQM2000d、UGM05以及EGM2008地球重力场模型计算了国内某地区 $1' \times 1'$ 、 $5' \times 5'$ 、 $20' \times 20'$ 、 $60' \times 60'$ 的地面格网点重力异常数据,并将其与该地区实测值进行比较,差值统计结果如表1所示。

表1 36阶、360阶、1800阶DQM2000d、UGM05、EGM2008地球重力场模型计算的 $1' \times 1'$ 、 $5' \times 5'$ 、 $20' \times 20'$ 、 $60' \times 60'$ 格网点重力异常与实测数据差值结果统计

格网	比对项目	mGal								
		DQM2000d 36阶	UGM05 36阶	EGM2008 36阶	DQM2000d 360阶	UGM05 360阶	EGM2008 360阶	DQM2000d 1800阶	UGM05 1800阶	EGM2008 1800阶
$1' \times 1'$	最大值	31.478	30.567	30.561	50.487	51.106	53.546	48.415	48.589	54.131
	最小值	-141.348	-142.073	-142.080	-107.320	-107.301	-106.601	-92.558	-93.496	-89.325
	平均值	-29.825	-30.606	-30.613	-9.509	-9.976	-10.347	-9.006	-10.397	-10.651
	均方根	<b>40.846</b>	<b>41.404</b>	<b>41.409</b>	<b>25.999</b>	<b>25.988</b>	<b>26.089</b>	<b>21.385</b>	<b>22.175</b>	<b>22.429</b>
$5' \times 5'$	最大值	105.217	104.456	104.455	87.548	84.472	85.917	79.588	79.091	79.501
	最小值	-125.500	-126.486	-126.490	-100.872	-97.513	-98.585	-80.274	-69.144	-66.898
	平均值	2.370	2.042	2.038	3.799	3.808	3.884	3.868	3.874	3.956
	均方根	<b>30.852</b>	<b>30.951</b>	<b>30.952</b>	<b>22.436</b>	<b>21.730</b>	<b>21.890</b>	<b>17.054</b>	<b>15.516</b>	<b>16.085</b>
$20' \times 20'$	最大值	94.279	94.682	94.684	83.374	77.081	78.089	89.441	85.798	84.893
	最小值	-74.216	-73.617	-73.619	-92.289	-82.651	-82.745	-109.193	-98.134	-99.554
	平均值	4.758	4.482	4.482	3.786	3.378	3.215	3.741	3.414	3.225
	均方根	<b>25.367</b>	<b>25.531</b>	<b>25.533</b>	<b>17.897</b>	<b>16.955</b>	<b>17.387</b>	<b>18.546</b>	<b>17.826</b>	<b>18.537</b>
$60' \times 60'$	最大值	270.319	270.238	270.226	285.624	268.524	279.934	287.553	260.704	254.854
	最小值	-139.981	-138.649	-138.637	-178.503	-187.023	-193.851	-178.503	-206.232	-181.289
	平均值	2.205	2.216	2.216	2.259	2.415	2.456	2.005	2.095	2.233
	均方根	<b>27.744</b>	<b>27.754</b>	<b>27.754</b>	<b>32.720</b>	<b>32.389</b>	<b>33.393</b>	<b>34.167</b>	<b>33.841</b>	<b>35.841</b>

由表1可以看出,36阶、360阶、1800阶DQM2000d、UGM05、EGM2008地球重力场模型计算的国内某地区 $1' \times 1'$ 格网点重力异常与实测数据的差值均方差分别近似为41 mGal、26 mGal、22 mGal; $5' \times 5'$ 格网点重力异常与实测数据的差值均方差分别近似为31 mGal、22 mGal、16 mGal; $20' \times 20'$ 格网点重力异常与实测数据的差值均方差分别近似为25 mGal、17 mGal、18 mGal; $60' \times 60'$ 格网点重力异常与实测数据的差值均方差分别近似为28 mGal、33 mGal、34 mGal。

总体来看,随着模型阶数的升高,DQM2000d、UGM05、EGM2008地球重力场模型计算的国内某地区格网点重力异常精度逐渐提高,这可能是由于模型阶数越高,模型截断误差越小而引起的。从两种模型计算的 $1' \times 1'$ 、 $5' \times 5'$ 、 $20' \times 20'$ 、 $60' \times 60'$ 格网点的重力异常的精度趋势来看,一方面说明划分的格网不能太大,否则就无法反映地球重力场的精细结构;划分的格网也不能太小,否则容易导致计算误差的累积,都将使得计算结果的精度下降。从文中的计算结果来看, $20' \times 20'$ 格网点的计算精度最高。

另一方面说明模型阶次上升到一定程度之后(1 800阶以后),对计算值的精度影响并不大,这也可以看出三种模型对高阶次的改善效果并不明显。

由表 1 可以明显看出,在计算国内某地区格网点重力异常时,在较低阶次(36 阶左右),三种模型的精度相当;在中高阶次(360 阶以上),UGM05 模型要比 EGM2008 模型的精度高 ± (1 ~ 2) mGal, UGM05 模型与 DQM2000d 模型精度相当,但略优于 DQM2000d 模型。

### 二、垂线偏差的比较

在球近似的情况下,地面上的垂线偏差与扰动位有如下的关系

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{1}{\gamma R} \frac{\partial T_R}{\partial \theta} \\ \eta &= -\frac{1}{\gamma R \sin \theta} \frac{\partial T_R}{\partial \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4),并将其中的  $\rho$  用  $R$  来代替,可得

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \cdot \frac{d\bar{P}_{nm}(\cos \theta)}{d\theta} \\ \eta &= \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n m (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda - \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) / \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

具体计算时,根据式(5),分别利用 36 阶、360 阶、1 800 阶 DQM2000d、UGM05 以及 EGM2008 地球重力场模型计算了国内某地区的地面垂线偏差数据,并将其与该地区实测值进行比较,差值统计结果如表 2 所示。

表 2 36 阶、360 阶、1 800 阶 DQM2000d、UGM05、EGM2008 模型计算的垂线偏差与实测数据差值结果统计 (")

垂线偏差	比对项目	DQM2000d	UGM05	EGM2008	DQM2000d	UGM05	EGM2008	DQM2000d	UGM05	EGM2008
		36 阶	36 阶	36 阶	360 阶	360 阶	360 阶	1 800 阶	1 800 阶	1 800 阶
$\Delta\xi$	最大值	12.645	12.709	12.704	14.041	14.321	14.082	12.645	14.062	13.962
	最小值	-12.812	-12.853	-12.859	-16.538	-16.857	-16.893	-16.489	-16.515	-16.611
	平均值	-1.507	-1.500	-1.505	-0.817	-0.808	-0.811	-0.813	-0.831	0.839
	均方根	<b>4.615</b>	<b>4.624</b>	<b>4.626</b>	<b>5.346</b>	<b>5.496</b>	<b>5.459</b>	<b>5.343</b>	<b>5.741</b>	<b>5.714</b>
$\Delta\eta$	最大值	23.451	23.518	23.516	25.908	26.836	26.591	25.877	27.794	27.333
	最小值	-6.791	-6.736	-6.737	-9.328	-9.388	-9.336	-6.791	-9.325	-9.189
	平均值	12.678	12.697	12.697	12.584	12.602	12.600	12.585	12.619	12.602
	均方根	<b>15.248</b>	<b>15.252</b>	<b>15.251</b>	<b>15.588</b>	<b>15.686</b>	<b>15.675</b>	<b>15.588</b>	<b>15.743</b>	<b>15.727</b>

从表 2 可以看出,36 阶、360 阶、1 800 阶 DQM2000d、UGM05、EGM2008 地球重力场模型计算的国内某地区垂线偏差子午分量、卯酉分量与实测数据差值的均方差分别近似为 5"、16"。

总体来看,模型阶数对垂线偏差计算值的精度影响不太明显,这是因为垂线偏差主要受当地地形的影响;另外,在计算国内某地区垂线偏差时,三种模型的精度相当。

### 三、结论

从 DQM2000d、UGM05、EGM2008 地球重力场模型的精度分析可以得出以下结论:

1) 随着模型阶数的升高,三种模型计算的国内某地区格网点重力异常的精度不断提高;但是模型阶次升高到一定程度之后(1 800 阶左右),对计算

值精度的影响并不大。

2) 划分的格网不能太大,否则不能正确反映地球重力场的精细结构;划分的格网也不能太小,否则将导致计算误差的累计。

3) 模型阶数对垂线偏差计算值的精度影响不大。

4) 总体看来,在表示国内某地区格网点重力异常时,UGM05 模型精度最高,DQM2000d 模型精度次之,EGM2008 模型精度最低;在表示国内某地区地面垂线偏差时,三种模型的精度相当。

### 参考文献:

[1] SNEEUW N, VAN DEN IJSSEL J, KOOP R, et al. Validation of Fast Pre-mission Error Analysis of the GOCE Gradiometry Mission by a Full Gravity Field Recovery

(下转第 13 页)

基准站控制软件和数据后处理软件。监测站控制软件主要是要分时段实现对天线共享器多个天线测量数据的采集,可将数据直接存储在监测站,并可利用 ZigBee 无线传感器网络对数据传输的主控中心(可放在某个基准站上),包括各种采集和控制参数的遥控设置,完全实现无人值守。基准站控制软件主要是将基准站采集的原始数据直接传输到控制中心,也可将数据存储在基准站控制中心,解码等工作由后处理软件实时完成,后处理软件可采用两种模式(基于单机和基于网络的),后处理软件的数据处理流程如图 3 所示。

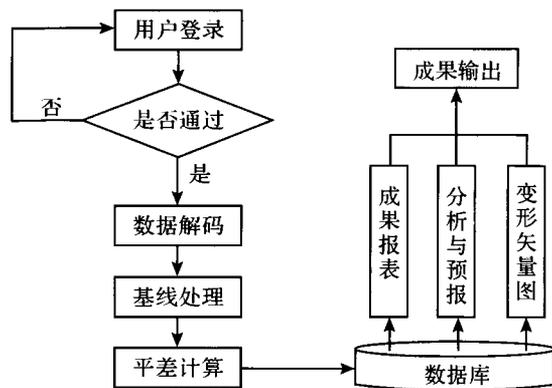


图3 后处理软件数据处理流程

#### 四、结束语

采用本文提出的将 GPS 整周模糊度解算的 DC 算法推广到 GNSS 天线阵列接收机中,提高了数据

解算的效率,同时通过与无线传感器网络的集成,有效地解决了 GNSS 变形监测系统在通信困难地区的无线数据传输问题。并且由于无线传感器网络具有节点定位功能,可以将 GNSS 的几何监测与无线传感器网络的物理监测集成起来,实现立体化监测,为重大自然或工程灾害的监测服务,为防灾减灾提供辅助参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 冉崇宪,邹进贵,王新洲,等. 基于 GPS 天线阵列技术的变形监测系统研制[J]. 测绘通报, 2006(8): 28-30.
- [2] 李征航. 利用 GPS 进行高精度变形监测的新模型[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 206-210.
- [3] 李善仓,张克旺. 无线传感器网络原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [4] 敦旭锋,田丰,孙小平. 无线传感器网络节点的研究与设计[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007(5): 19-21.
- [5] GENG J, TEFERLE F N, SHI C, et al. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data[J]. GPS Solutions, 2009, 13(4): 263-270.
- [6] ZOU Shuangchao, WANG Xinzhou, ZOU Jingui, et al. Research on Application of GPS Multi-antenna Array Deformation Monitoring System [C] // GNSS 2005 Conference. Hong Kong: [s. n.], 2005.
- [7] University of California at Los Angeles. WINS: Wireless Integrated Network Sensors [DB/OL]. [2009-05-08]. <http://www.janet.ucla.edu/WINS/biblio.htm>.
- [8] NGA. Earth Gravitational Model 2008 (EGM 2008) [EB/OL]. [2009-05-08]. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>.
- [9] 刘成,张幸福. EGM2008 重力场模型在 GPS 高程拟合中的应用和分析[J]. 铁道勘察, 2009, 35(1): 1-3.
- [10] NASA. EGM96 General Description [EB/OL]. [2009-05-11]. <http://cddis.nasa.gov/926/egm96/gendesc.html>.
- [11] 边少锋,柴洪洲. 大地坐标系与大地基准[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [12] 夏哲仁,石磐,李迎春. 高分辨率区域重力场模型 DQM2000[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2003, 28(S1): 124-128.
- [13] Moritz, Helmut. Advanced Physical Geodesy [M]. Karlsruhe: Wichmannverlag, 1980.
- [14] 陆仲连. 地球重力场理论与方法[M]. 北京:解放军出版社, 1996.

(上接第 10 页)

Simulation[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 33 (1-2): 43-52.

[2] MOORE P, TURNER J F, QIANG Z. CHAMP Orbit Determination and Gravity Field Recovery[J]. Adv Space Res, 2003, 31(8): 1897-1903.

[3] YAN Yafen, WANG Guangjie, ZHANG Zhongjie. Characteristics and Tectonic Significance of the Gravity Field in South China[J]. ACTA GEOLOGICA SINICA, 2004, 78(6): 1235-1244.

[4] 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.

[5] PAVLIS N K, HOLMES H A, KENYON S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree 2160; EGM2008 [C] // The 2008 General Assembly of the European Geosciences Union. Vienna, Austria: [s. n.], 2008: 13-14.