

ZHANG Xingfu, LIU Cheng. The Approach of GPS Height Transformation Based on EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 Residual Terrain Model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(1): 25-32. (张兴福, 刘成. 综合 EGM2008 模型和 SRTM/DTM2006.0 剩余地形模型的 GPS 高程转换方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 25-32.)

## 综合 EGM2008 模型和 SRTM/DTM2006.0 剩余地形模型的 GPS 高程转换方法

张兴福<sup>1</sup>, 刘 成<sup>2</sup>

1. 广东工业大学 测绘工程系, 广东 广州 510006; 2. 铁道第三勘察设计院集团有限公司 测绘分院, 天津 300251

### The Approach of GPS Height Transformation Based on EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 Residual Terrain Model

ZHANG Xingfu<sup>1</sup>, LIU Cheng<sup>2</sup>

1. Department of Surveying and Mapping, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Surveying and Mapping, The Third Surveying and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China

Abstract: The RTM data can be constructed from SRTM and DTM2006.0 global digital terrain model, and RTM height anomaly are computed based on RTM data. Several GPS/leveling points are selected with optimal choice method for constructing the residual height anomaly interpolated model according to their measured height anomaly, EGM2008 height anomaly and RTM height anomaly, and then the accuracy of height anomaly can be improved. Finally two cases of GPS/leveling data are adopted, and the results show that the accuracy of GPS height transformation can be obviously improved using residual height anomaly interpolation based on measured height anomaly, EGM2008 model expanded to 2160 degree and order and SRTM/DTM2006.0 residual terrain model.

Key words: EGM2008; SRTM/DTM2006.0; residual terrain model; GPS height transformation

摘 要: 利用 SRTM 以及 DTM2006.0 全球地形模型构建剩余地形模型(RTM)数据,并将其转换为 RTM 高程异常。通过 GPS/水准点的优化选择法,选择少量 GPS/水准点的实测高程异常,扣除 EGM2008 模型以及 SRTM 与 DTM2006.0 模型求得的剩余模型高程异常,对残余高程异常进行拟合,从而进一步提高 GPS 高程转换的精度。最后利用两个不同测区的高精度 GPS/水准数据对此方法进行研究。结果表明:利用 GPS/水准点的实测高程异常,扣除综合 2160 阶次的 EGM2008 模型以及 SRTM/DTM2006.0 剩余地形模型求得的高程异常,并对残余高程异常进行拟合,能显著提高 GPS 高程转换精度。

关键词: EGM2008; SRTM/DTM2006.0; 剩余地形模型; GPS 高程转换

中图分类号: P223

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)01-0025-08

基金项目: 国家自然科学基金(41104002); 中国科学院动力大地测量学重点实验室开放基金(L09-07)

## 1 引 言

随着卫星重力计划的逐步实施和完善,利用卫星重力资料并结合地面重力数据获得的全球重力场模型的精度和分辨率在逐步提高,特别是 EGM2008 模型的公布<sup>[1]</sup>,使得利用重力场模型进行 GPS 高程转换的精度和可靠性获得了大幅度提升。EGM2008 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为 5' (约 9 km)。EGM2008 模型采用了 GRACE 卫星跟踪数据(ITG-GRACE03S 位系数信息以及相应的协方差信息)、卫星测高数据和地面重力数据等,该模型无论在精度还是在分辨率方面均取得了巨大进步<sup>[2-3]</sup>。文献[4]利用我

国大陆 GPS/水准实测高程异常对 EGM2008 地球重力场模型进行了外部精度测试,结果表明: EGM2008 模型高程异常精度在我国大陆的整体精度为 20 cm,且与全球精度相当。

地球重力场模型展开到一定的阶次,对应于一定的空间分辨率,EGM2008 模型的阶数高达 2190,也只有约 9 km 的空间分辨率,很难表示更高频段的高程异常。为了提高 GPS 高程转换的精度,须借助于高分辨率的地形模型。文献[5]推导出一套适合厘米级似大地水准面精化的 Molodensky 解实用简便的算法公式,并结合实例测试验证了厘米级地形影响的技术特征,文献[6-8]对 RTM 技术用于补偿 EGM2008 信号截断误差进行了研究,获得了良好的效果。笔者基于剩余

地形模型理论<sup>[9-11]</sup>,利用 SRTM 以及 DTM2006.0 全球地形模型构建 RTM 数据,并计算剩余地形模型高程异常。任意 GPS 点的总高程异常可表示为地球重力场模型高程异常、剩余地形模型高程异常以及残余高程异常 3 部分总和的形式,通过计算可获得所有 GPS 点总高程异常中的前两项,然后选择少量 GPS/水准点的实测高程异常,扣除 EGM2008 模型以及 SRTM 与 DTM2006.0 模型求得的剩余模型高程异常,对残余高程异常进行拟合,从而提高 GPS 高程转换的精度。利用 2 个不同测区的高精度 GPS/水准数据进行实例分析,结果表明,该方法能显著提高 GPS 高程转换精度。

## 2 原理与方法

### 2.1 重力场模型高程异常计算

根据 Bruns 公式,地球表面上任意点 P 的模型高程异常可由下式获得<sup>[4]</sup>

$$\zeta_p(\varphi, \lambda, \rho) = \frac{GM}{\rho\gamma_P} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{\rho}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \quad (1)$$

式中,  $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$  为完全规格化 Legendre 函数;  $GM$  为地心引力常数;  $N$  为地球重力场模型展开的最高阶数,对于高阶 Legendre 函数计算要特别注意计算的稳定性<sup>[12]</sup>;其他参数含义参见文献<sup>[4]</sup>。

### 2.2 剩余地形模型(RTM)高程异常计算

RTM 数据表示真实地形表面和参考地形表面的差值,见图 1。一般情况下,真实地形表面用分辨率较高的 DTM 数据表示,而参考地形表面用分辨率较低的 DTM 数据表示,该数据是对表示真实地形表面的 DTM 经过一定平滑处理后获得的。在地形起伏较大测区,仅仅依靠一定阶次的地球重力场模型以及少量的 GPS/水准数据很难对短波长的重力场信号进行模型化,而这种方法又是非常经济实用的 GPS 高程转换方法,理论上 RTM 技术有能力表示由局部地形变化引起的重力场短波长部分。

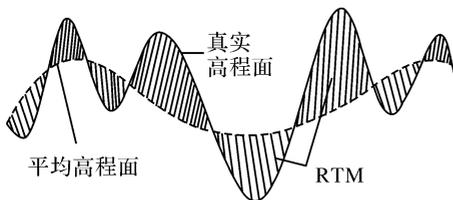


图 1 剩余地形模型(RTM)  
Fig. 1 Residual terrain model

RTM 高程异常计算的方法很多,本文探讨利用棱柱积分法将 RTM 数据转换到剩余高程异常,每个棱柱(格网)对应的引力位为<sup>[13-14]</sup>

$$V = G\rho_0 \left[ xy \ln(z+r) + yz \ln(x+r) + zx \ln(y+r) - \frac{x^2}{2} \tan^{-1} \left( \frac{yz}{xr} \right) - \frac{y^2}{2} \tan^{-1} \left( \frac{xz}{yr} \right) - \frac{z^2}{2} \tan^{-1} \left( \frac{xy}{zr} \right) \right]_{x_1^2 | y_1^2 | z_1^2}^{x_2^2 | y_2^2 | z_2^2} \quad (2)$$

式中,  $G$  为引力常数;  $r$  为坐标原点到点  $(x, y, z)$  的距离;  $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$  为棱柱体的边界角点坐标,  $z_2 - z_1$  表示剩余高程;  $\rho_0$  为标准的地形质量密度,取  $\rho_0 = 2670 \text{ kg/m}^3$ ;式(2)是平面近似,计算中需考虑地球曲率的影响<sup>[11]</sup>;其他变量的含义及具体计算过程请参考相关文献<sup>[11,13-14]</sup>,将棱柱引力位转换为对应的高程异常,公式为

$$\zeta^{\text{prism}} = \frac{V}{\gamma_Q} \quad (3)$$

式中,  $\gamma_Q$  表示正常重力。GPS 点 P 所对应的 RTM 高程异常可由计算区域内所有单个棱柱对应的高程异常总合表示,公式为

$$\zeta^{\text{RTM}} = \sum_{i=1}^k \zeta^{\text{prism}}(i) \quad (4)$$

为了提高棱柱积分的计算速度,在实际应用中,离计算点稍远的区域采用分辨率稍低 DTM 格网数据,离计算点较近的区域采用分辨率较高的 DTM 格网数据,这种实用的剩余地形计算的过程称为粗糙/详细 DTM 格网系统。在计算过程中,一般会给两个积分计算半径  $R_1$  和  $R_2$ ,当积分半径小于  $R_1$  时用详细格网数据,当积分半径在  $R_1$  和  $R_2$  时用粗糙格网数据。另外在计算点 P 周围  $3 \times 3$  格网的地形数据用双三次样条函数进行加密处理,以获得更光滑的地形数据,这种加密也可避免计算点 P 处于格网边界时对计算结果产生影响<sup>[11]</sup>,粗糙/详细 DTM 格网数据使用情况见图 2。

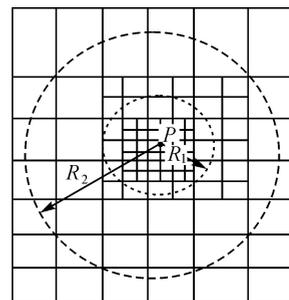


图 2 粗糙/详细 DTM 格网使用情况图  
Fig. 2 Use of coarse and detailed DTM grid

### 2.3 剩余地形模型(RTM)数据构建方法

利用 RTM 方法计算高程异常的关键是构建 RTM 数据。目前可用于 RTM 数据构建的全球 DTM 数据有 3" 的 SRTM、1" 的 ASTER GDEM 以及局部高精度的 DTM 数据等。在我国要获得局部高精度的 DTM 数据难度较大,而 SRTM 和 GDEM 数据是公开的,SRTM(V4.1)的高程精度要优于 GDEM。本文 RTM 的构建方法为:① 采用免费的 3" SRTM(V4.1)数据来表示地形表面,详细及粗糙 DTM 数据均由该数据获得;② 一般情况下,参考面 DTM 可通过对 3" SRTM(V4.1)数据进行平滑、降低分辨率而获得,本文为了与 EGM2008 模型更匹配,参考面 DTM 数据采用 EGM2008 研发课题组完成的 DTM2006.0 模型;③ 利用①和②数据构建 RTM 数据,即  $z_{\text{RTM}} = z_2 - z_1 = H_{\text{SRTM}} - H_{\text{DTM2006.0}}$ 。

DTM2006.0 模型是为满足新一代超高阶地球重力场模型(如:EGM2008)研发所涉及的与地形有关的重力量计算而完成的全球高分辨率 DTM 模型。该模型阶次为 2190,容纳了大约 240 万对正规化的高程系数,地面上任意一点  $P$  的模型高程可用式(5)求得<sup>[15]</sup>

$$H_P^{\text{DTM2006.0}}(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}^{\text{DTM}}} \sum_{m=0}^n (H_{\bar{c}_{mn}} \cos(m\lambda) + H_{\bar{s}_{mn}} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{mn}(\cos(\theta)) \quad (5)$$

式中,  $n_{\text{max}}^{\text{DTM}}$  表示高程模型的最大阶数;  $H_{\bar{c}_{mn}}$  和  $H_{\bar{s}_{mn}}$  表示正规化的高程系数;  $(\theta, \lambda)$  表示点  $P$  的坐标。DTM2006.0 模型相当于高通滤波器,用于移去 SRTM 地形模型中的长波部分,由 SRTM/DTM2006.0 构建的 RTM 数据可表示比超高阶重力场模型 EGM2008 空间分辨率高的重力场高频信息。

### 2.4 综合 EGM2008 模型和 SRTM/DTM2006.0 剩余地形模型的高程异常拟合

基于 EGM2008 模型,利用式(1)可获得任意 GPS 点的重力场模型高程异常  $\zeta^{\text{EGM2008}}$ ,由式(4)可获得剩余地形模型高程异常  $\zeta^{\text{RTM}}$ ,则任意点  $P$  总的高程异常为

$$\zeta = \zeta^{\text{EGM2008}} + \zeta^{\text{RTM}} + \zeta^{\text{res}} \quad (6)$$

式中,  $\zeta^{\text{res}}$  表示残余高程异常。为提高 GPS 高程转换精度,在实际数据处理过程中,一般可采用如下方法:① 基于 EGM2008 模型计算所有 GPS 点重力场模型高程异常  $\zeta^{\text{EGM2008}}$ ;② 根据 RTM 数据计算所有 GPS 点的 RTM 高程异常  $\zeta^{\text{RTM}}$ ;③ 采用优化选择法选择少量 GPS/水准点,计算这些点的实测

高程异常,然后扣除模型高程异常  $\zeta^{\text{EGM2008}}$  以及 RTM 高程异常  $\zeta^{\text{RTM}}$ ,获得残余高程异常  $\zeta^{\text{res}}$ ,利用一定的拟合方法建立残余高程异常拟合模型,从而推求待求 GPS 点残余高程异常,通过式(6)即可获得待求点的总高程异常。其中  $\zeta^{\text{RTM}}$  和  $\zeta^{\text{res}}$  可表示为 EGM2008 模型的截断误差。选择少量 GPS/水准点的目的有两个:① 建立残余高程异常拟合模型;② 实现高程基准转换,即将 EGM2008 模型所对应的高程基准转换到水准点对应的高程基准。

对于面状测区,待求点的残余高程异常可通过平面或曲面等拟合函数获得。而对于公路、铁路等线路测区,由于 GPS 点一般沿线路延伸方向呈近似直伸形式分布,若采用平面或曲面拟合函数,则需要在线路两侧联测足够多的 GPS/水准点,否则容易造成观测方程病态。一般可选择某一 GPS 点作为坐标原点,以线路延伸方向作为坐标轴的横轴,过坐标原点且与横轴垂直的方向为纵轴建立线路独立坐标系,然后忽略垂直线路方向的高程异常变化,并利用直线、二次曲线或三次曲线拟合函数。在实际计算中选择不同的 GPS/水准点,可能会得到不同精度的高程转换结果,因此有必要对 GPS/水准点进行优化选择,可采用逐步剔除法<sup>[16]</sup>。

## 3 计算与结果分析

为对本文提出的方法进行精度分析,现选择华南地区两个地形起伏相对较大测区 GPS/水准数据作为测试数据:算例 A(带状 GPS/水准数据)和算例 B(面状 GPS/水准数据)。

### 3.1 计算数据准备

为满足实际计算需要,本文共收集或计算了如下几组数据。

(1) 3" 的 SRTM 数据:算例 A(25°N—30°N, 107°E—115°E)和算例 B(23°N—27°N, 111°E—116°E)3" 的 SRTM 数据,该数据直接从 SRTM 官方网站获得,用于表示测区详细地形。

(2) 15" 的 SRTM 数据:15" SRTM 数据是通过 3" SRTM 数据进行平滑处理获得,用于表示测区的粗糙地形。

(3) 参考面 DTM 数据:根据 DTM2006.0 模型利用式(5)计算了这两个测区相应范围的分辨率为 30" 的参考面 DTM 数据,模型阶次取 2160。

(4) 高精度的 GPS/水准点:算例 A 共收集到高精度 GPS/水准点 109 个,算例 B 共收集到高精度 GPS/水准点 41 个,两个算例的 GPS 点坐

标基准均为 CGCS2000 大地坐标系, GPS 点大地高精度均优于 2 cm, 水准测量等级不低于三等。

两个测区地形情况(15"的 SRTM 数据)和 GPS/水准点概略点位见图 3, 其中十字丝表示 GPS/水准点。测区 RTM 高程数据见图 4(SRTM 高程与 DTM2006.0 高程之差, 分辨率为 30")。

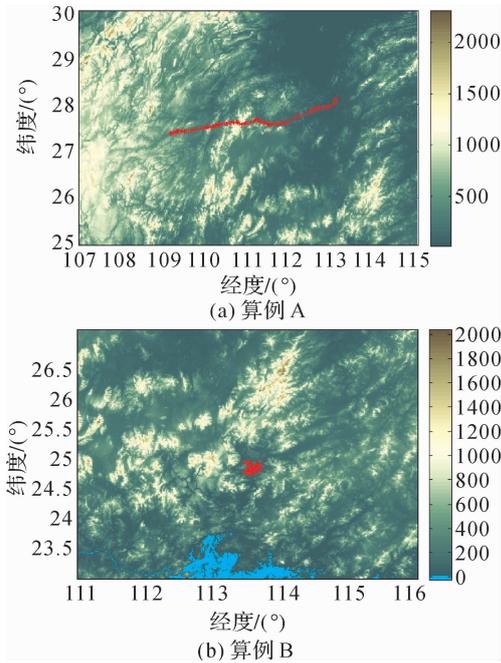


图 3 测区地形(SRTM)及 GPS/水准点  
Fig. 3 SRTM terrain and GPS/leveling points

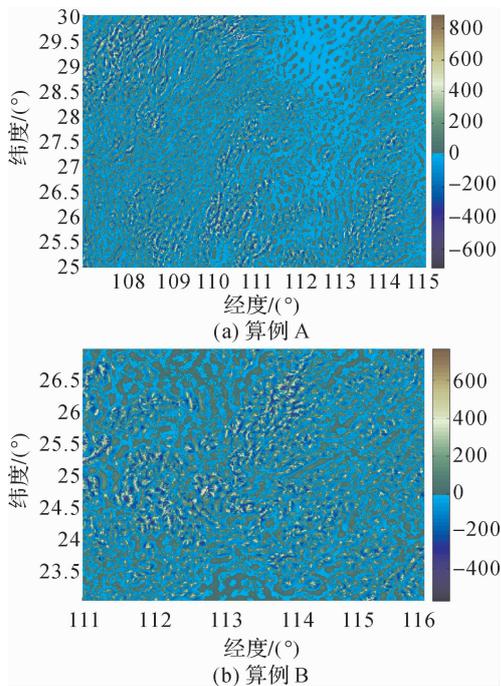


图 4 测区 RTM 高程数据(SRTM-DTM2006.0)  
Fig. 4 RTM elevations(SRTM-DTM2006.0)

### 3.2 算例 A

算例 A 为某一铁路客运专线 GPS/水准数据, 线路跨度近 500 km, 共有 GPS/水准点 109 个, 整个线路西部地势较东部高, 东部 GPS/水准点间距略比西部大, 整个线路平均点间距约 4.5 km。为对残余高程异常进行有效拟合, 提高 GPS 高程转换精度, 本文将整个线路 GPS/水准数据分为 4 段:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$ , 分段的基本过程和原则为: ① 鉴于 EGM2008 地球重力场模型具有很高的精度, 本文首先利用 2160 阶次的 EGM2008 地球重力场模型计算所有 GPS/水准点的模型高程异常; ② 沿线路走向绘制线路模型高程异常变化图; ③ 在保证每段高程异常变化趋势基本一致或变化不大前提下, 尽量延长线路长度, 且每个测段宜近似直线走向。  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$  测段模型高程异常变化图见图 5, 每个图横轴表示该测段点序号, 整个测区高程异常变化约 9 m。

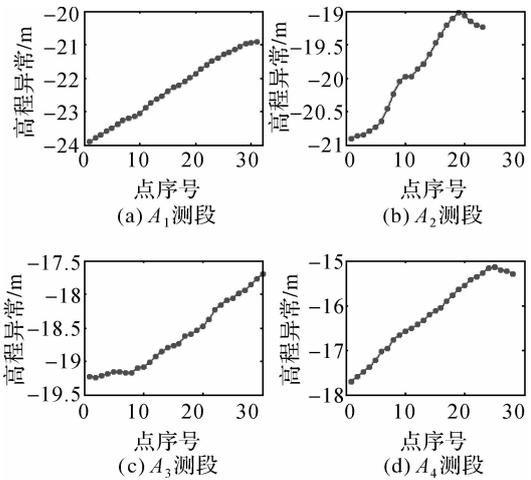


图 5 算例 A 测区高程异常变化图  
Fig. 5 The height anomaly variability for case A

图 6 是利用 3"的 SRTM 数据(详细 DTM)、15"的 SRTM 数据(粗糙 DTM)、30"的 DTM2006.0 数据(参考面 DTM)以及 GPS 数据获得的各点的 RTM 高程异常。在计算过程中, 采用详细/粗糙 DTM 数据组合的目的是为了提高计算效率。随着积分半径  $R_2$  的增大, 计算点  $P$  的 RTM 高程异常值会逐步趋于稳定。在积分半径  $R_2$  一定的前提下, 理论上随着积分半径  $R_1$  的增大, 计算点  $P$  的 RTM 高程异常值的精度会越高, 但计算效率越低。同时 RTM 高程异常值的变化范围越小, 若给定一个可容许的变化值(如

1 cm),则可从中确定积分半径  $R_1$  及  $R_2$ 。在实际计算中本文取  $R_1=40$  km,  $R_2=200$  km。图 6 结果显示,在该区域 RTM 高程异常在  $\pm 0.05$  m 范围内,RTM 高程异常最大值为 0.042 m,最小值为 -0.044 m,且东部 GPS/水准点 RTM 高程异常变化较小,这与东部地形起伏相对较小相吻合(见图 3)。

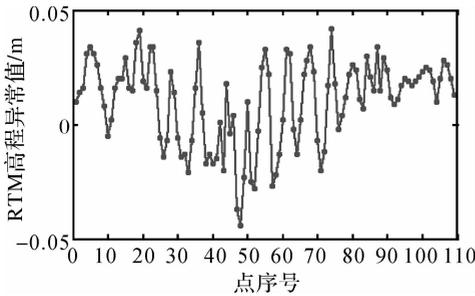


图 6 RTM 高程异常值(算例 A)

Fig. 6 RTM height anomaly (case A)

表 1 为采用 2160 阶次的 EGM2008 模型以及 RTM 数据计算得到的高程异常与 GPS/水准点实测高程异常的比较结果。从表 1 中可以看到,2160 阶的 EGM2008 模型在该区域具有较高的精度,最差精度为 6.0 cm,最高精度为 3.1 cm。EGM2008 高程异常与 GPS/水准高程异常差值的平均值不为零,则暗示两者存在系统偏差。该系统偏差主要是由 EGM2008 模型所定义的高程基准和我国国家高程基准不一致造成的。综合 EGM2008 模型高程异常及 RTM 剩余高程异常后,GPS 高程转换的精度都有不同程度的提高,4 个测段高程异常精度提高量分别为 5%、10%、42%和 2%,说明 RTM 技术能提高 GPS 高程转换精度。

为了分析 RTM 高程异常及残余高程异常拟合技术对 GPS 高程转换的影响,在测段  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$  中各选择 3~5 个 GPS/水准点。选点的原则有两个:① 要求每一测段中 GPS/水准点平均点间距不小于 25 km;② 采用逐步剔除法选择最优的 GPS/水准点。由于每个测段是近似直伸形式,故拟合模型采用二次曲线和三次曲线,即在每一测段都建立线路独立坐标,并忽略垂直于线路方向的高程异常变化。每一测段所选择的 GPS/水准点个数及高程转换精度统计结果见表 2,高差转换精度统计结果见表 3。

表 1 EGM2008/RTM 高程异常与 GPS/水准高程异常比较结果(算例 A)

Tab. 1 The statistical results of GPS height anomaly differences between EGM2008/RTM and GPS/leveling(case A)

测段	EGM2008(2160 阶)				cm
	最小值	最大值	平均值	标准差	
$A_1$	-14.9	-1.6	-7.1	3.7	
$A_2$	-18.1	5.0	-3.0	6.0	
$A_3$	-18.1	-6.0	-10.0	3.1	
$A_4$	-19.8	-2.8	-12.2	4.7	
EGM2008(2160 阶)+RTM					精度提高
最小值	最大值	平均值	标准差		
-16.8	-4.0	-8.9	3.5	5%	
-15.3	3.8	-2.1	5.4	10%	
-15.3	-7.2	-10.9	1.8	42%	
-20.7	-4.3	-14.1	4.6	2%	

从表 1 和表 2 可以看出:

(1) 与用 EGM2008 模型直接转换相比,通过对仅扣除 EGM2008 模型高程异常的残余高程异常进行拟合,对于二次曲线拟合, $A_1$  和  $A_3$  测段精度略微降低,而  $A_2$  和  $A_4$  测段精度提高较大,约提高 50%;对于三次曲线拟合, $A_3$  测段精度略微降低,而  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_4$  测段精度提高较大,除  $A_1$  测段外,三次曲线拟合与二次曲线拟合精度基本相当。

(2) 通过对扣除 EGM2008/RTM 模型高程异常的残余高程异常进行拟合,精度能明显提高,与未顾及 RTM 高程异常情况相比,若选择拟合方法为二次曲线,则  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$  4 个测段精度分别提高了 19%、20%、71%和 10%;若选择拟合方法为三次曲线,则  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$  4 个测段精度分别提高了 33%、65%、76%和 21%;顾及 RTM 高程异常后,无论采用二次曲线还是三次曲线拟合方法,精度都会得到不同程度的提高,最大可提高 76%。测段  $A_4$  精度提高量相对较小,这和测段  $A_4$  及周围地形起伏相对较小有关(见图 3),图 6 结果也显示该测段 RTM 高程异常变化较小。

(3) 与利用 EGM2008/RTM 高程异常直接转换结果相比,对残余高程异常进行拟合,转换精度也获得了不同程度的提高。整体上,顾及 RTM 高程异常后,三次曲线拟合比二次曲线拟合精度略高,整体精度可以达到 2.0 cm,在  $A_2$  和  $A_3$  测段,精度甚至可达到 1.0 cm。

表 2 基于 EGM2008 模型及 RTM 的 GPS 高程转换精度统计结果(算例 A)

Tab. 2 The statistical results of GPS height transformation accuracy based on EGM2008 model and RTM(case A)

拟合方法	测段	约束 GPS/水准点个数	EGM2008(2160 阶)			EGM2008(2160 阶)+RTM			精度提高
			最小值	最大值	中误差	最小值	最大值	中误差	
二次曲线	A <sub>1</sub>	4	-6.8	7.1	4.3	-6.7	6.2	3.5	19%
	A <sub>2</sub>	3	-4.2	4.8	2.7	-2.3	3.8	2.2	20%
	A <sub>3</sub>	3	-7.3	5.2	3.5	-2.0	2.5	1.0	71%
	A <sub>4</sub>	5	-5.6	5.6	2.1	-4.3	5.1	1.9	10%
三次曲线	A <sub>1</sub>	4	-3.9	6.1	2.7	-3.3	3.6	1.8	33%
	A <sub>2</sub>	4	-5.6	3.1	3.1	-2.2	2.1	1.1	65%
	A <sub>3</sub>	4	-7.5	3.3	3.7	-1.2	2.6	0.9	76%
	A <sub>4</sub>	5	-4.9	4.2	2.4	-3.8	3.4	1.9	21%

为了进一步分析本文方法获得的高差精度, 将表 2 中顾及 RTM 高程异常后的三次曲线拟合高程结果转换为高差(沿线路坐标依次求高差), 并和三等、四等水准测量限差要求进行比较, 结果见表 3。

表 3 结果显示:除测段 A<sub>1</sub> 外,其余 3 个测段平均 90% 的高差满足三等水准测量精度要求。测段 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 和 A<sub>3</sub> 中所有高差均满足四等水准测量限差要求, A<sub>4</sub> 测段中 95% 高差满足四等水准测量限差要求, 经分析发现有 1 个 GPS 点高程转换精度较差, 若扣除该点, 则剩余高差均满足四等水准测量限差要求。

表 3 基于 EGM2008 模型及 RTM 的 GPS 高差转换精度统计结果(算例 A)

Tab. 3 The statistical results of GPS height difference transformation accuracy based on EGM2008 model and RTM(case A)

拟合方法	测段	最小值	最大值	中误差	cm	
					满足三等比例	满足四等比例
三次曲线	A <sub>1</sub>	-2.9	2.9	1.6	85%	100%
	A <sub>2</sub>	-2.1	2.7	1.2	95%	100%
	A <sub>3</sub>	-2.4	1.9	1.0	97%	100%
	A <sub>4</sub>	-3.7	5.6	1.9	90%	95%

3.3 算例 B

算例 B 是某一城市 GPS/水准数据, 控制面积 600 km<sup>2</sup> 多, 平均点间距约 4 km, 整个 GPS 控制区域地形起伏相对不大, 但周围地形起伏很大, 共有 GPS/水准点 41 个。

图 7 是利用 SRTM 数据、DTM2006.0 数据以及 GPS 数据获得的各点的 RTM 高程异常, 计算方法同 3.2 节。图 7 结果显示, 在该区域 RTM

高程异常在 ±0.03 m 范围内, RTM 高程异常最大值为 0.03 m, 最小值为 -0.021 m。

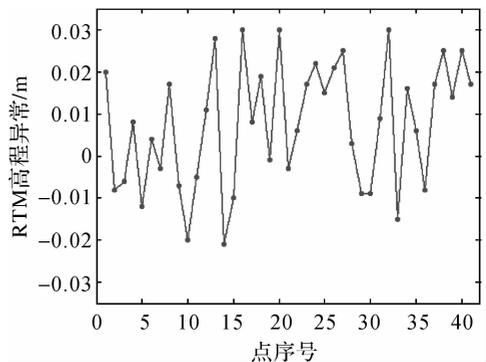


图 7 RTM 高程异常值(算例 B)

Fig. 7 RTM height anomaly(case B)

表 4 为采用 2160 阶次的 EGM2008 模型以及 RTM 数据计算得到的高程异常与 GPS/水准点实测高程异常的比较结果。从表 4 中可以看到, 2160 阶的 EGM2008 模型在该区域精度可达 2.4 cm。综合 EGM2008 模型高程异常及 RTM 剩余高程异常后, GPS 高程转换的精度获得了提高, 其提高量为 38%, 说明 RTM 技术能提高 GPS 高程转换精度。

同样对于该测区, 为了分析 RTM 高程异常及残余高程异常拟合技术对 GPS 高程转换的影响。根据测区情况, 选择平面和曲面函数建立残余高程异常拟合模型, 采用 GPS/水准点优化选择法确定已知点, 个数分别为 3 个和 6 个。平面拟合和曲面拟合中约束点间距约 25 km 和 10 km, 计算结果见表 5。

表 4 和表 5 结果显示: 与用 EGM2008 模型直接转换相比, 仅通过对扣除 EGM2008 模型高

程异常的残余高程异常进行拟合,则平面和曲面拟合的精度分别为 2.5 cm 和 2.3 cm,而 EGM2008 模型精度为 2.4 cm,精度基本相当。顾及 RTM 高程异常后,GPS 高程转换精度显著提高,平面和

曲面残余高程异常拟合方法的精度分别为 1.2 cm 和 0.9 cm,精度分别提高了 52% 和 61%。与利用 EGM2008/RTM 模型高程异常直接转换结果相比,该方法精度可分别提高 20% 和 40%。

表 4 EGM2008/RTM 高程异常与 GPS/水准高程异常比较结果(算例 B)

Tab. 4 The statistical results of GPS height anomaly differences between EGM2008/RTM and GPS/leveling(case B)

EGM2008(2160 阶)				EGM2008(2160 阶)+RTM				精度提高
最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差	
-20.6	-11.7	-15.5	2.4	-18.6	-13.4	-16.2	1.5	38%

表 5 基于 EGM2008 模型及 RTM 的 GPS 高程转换精度统计结果(算例 B)

Tab. 5 The statistical results of GPS height transformation accuracy based on EGM2008 model and RTM(case B)

拟合方法	约束 GPS/水准点个数	EGM2008(2160 阶)			EGM2008(2160 阶)+RTM			精度提高
		最小值	最大值	中误差	最小值	最大值	中误差	
平面	3	-6.2	3.9	2.5	-2.4	2.2	1.2	52%
曲面	6	-4.4	3.6	2.3	-1.5	2.3	0.9	61%

## 4 结 论

(1) EGM2008 地球重力场模型所定义的高程基准和我国国家高程基准存在系统性偏差。在局部区域,2160 阶次的 EGM2008 地球重力场模型具有很高的精度。在算例 A 中,4 个测段的精度从 3.1~6.0 cm 不等,而在算例 B 中精度可达到 2.4 cm。

(2) 利用 SRTM/DTM2006.0 构建 RTM 数据,并将其转换为 RTM 高程异常,能在一定程度上对 2160 阶次的 EGM2008 模型的截断误差进行补偿。在算例 A 中,4 个测段的精度提高量从 2%~42% 不等,在算例 B 中,精度提高约 38%。

(3) 若不考虑 RTM 高程异常,仅通过对扣除 EGM2008 模型高程异常后的残余高程异常进行拟合,则能在一定程度上提高高程异常的计算精度。而通过对扣除 EGM2008/RTM 模型高程异常后的残余高程异常进行拟合,高程异常拟合精度明显提高。与未顾及 RTM 高程异常情况相比,算例 A 中高程精度平均提高量超过 40%,高程平均精度优于 2.0 cm(三次曲线拟合),而算例 B 中高程精度平均提高量超过 50%,高程平均精度约 1.0 cm。在算例 A 中平均 90% 的高差满足三等水准测量精度要求,近乎 100% 的高差满足四等水准测量精度要求。与利用 EGM2008/

RTM 模型高程异常直接转换结果相比,由该方法获得的高程异常的精度也获得了较大程度的提高,精度提高的主要原因是 RTM 高程异常表示高程异常中的高频部分,扣除该部分后,有利于残余高程异常的建模。

(4) 在算例 A 和算例 B 中,计算了 GPS/水准点平均点间距不低于 25 km 的情况,为利用少量 GPS/水准点进行较大范围的局部似大地水准面精化提供一种参考。本文计算所利用的数据源均可以免费获得(EGM2008 模型、SRTM 数据及 DTM2006.0 模型)。利用少量的 GPS/水准点,即可获得较为满意的高程转换结果。

## 参考文献:

- [1] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008[R]. Vienna: EGU General Assembly 2008, 2008.
- [2] GRUBER T. Evaluation of the EGM2008 Gravity Field by Means of GPS Leveling and Sea Surface Topography Solutions[J]. Newton's Bulletin, 2009(4): 3-17.
- [3] JEKELI C, YANH H J, KWON J H. Evaluation of EGM08—Globally and Locally in South Korea [J]. Newton's Bulletin, 2009(4): 38-49.
- [4] ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong, et al. EGM2008 and Its Application Analysis in Chinese Mainland [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. (章传银,郭春喜,陈俊勇,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.)
- [5] ZHANG Chuanyin, CHAO Dingbo, DING Jian, et al. Arithmetic and Characters Analysis of Terrain Effects for cm Order Precision Height Anomaly[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(4): 308-314. (章传银, 晁定波, 丁剑, 等. 厘米级高程异常地形影响的算法及特征分析[J]. 测绘学报, 2006, 35(4): 308-314.)
- [6] HIRT C, FEATHERSTONE W E, MARTI U. Combining EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 Residual Terrain Model Data to Improve Quasigeoid Computations in Mountainous Areas Devoid of Gravity Data[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(9): 557-567.
- [7] HIRT C. Prediction of Vertical Deflections from High-degree Spherical Harmonic Synthesis and Residual Terrain Model Data [J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(3): 179-190.
- [8] HIRT C, MARTI U, BÜRKI B. Assessment of EGM2008 in Europe Using Accurate Astrogeodetic Vertical Deflections and Omission Error Estimates from SRTM/DTM2006.0 Residual Terrain Model Data[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B10404): 1-13.
- [9] FORSBERG R, TSCHERNING C C. The Use of Height Data in Gravity Field Approximation by Collocation[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B9): 7843-7854.
- [10] FORSBERG R. A study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical Inversion Methods in Gravity Field Modelling[R]. Report 355. Columbus: Ohio State University, 1984.
- [11] FORSBERG R. Terrain Effects in Geoid Computations [R]. Copenhagen: National Survey and Cadastre, 1994.
- [12] HOLMES S A, FEATHERSTONE W E. A Unified Approach to the Clenshaw Summation and the Recursive Computation of Very High Degree and Order Normalised Associated Legendre Functions[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(5): 279-299.
- [13] NAGY D, PAPP G, BENEDEK J. The Gravitational Potential and Its Derivatives for the Prism[J]. Journal of Geodesy, 2000, 74(7-8): 552-560.
- [14] NAGY D, PAPP G, BENEDEK J. Corrections to "The Gravitational Potential and Its Derivatives for the Prism" [J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(8): 475.
- [15] PAVLIS N K, FACTOR J K, HOLMES S A. Terrain-related Gravimetric Quantities Computed for the Next EGM[C]// Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service, 18. Istanbul: [s. n.], 2007: 318-323.
- [16] SHEN Yunzhong, GAO Dakai, ZHANG Xingfu. Optimal Choice of GPS Leveling Points[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004(6): 49-51. (沈云中, 高达凯, 张兴福. GPS水准点优化选择法[J]. 工程勘察, 2004(6): 49-51.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2011-04-11

修回日期: 2011-07-15

第一作者简介: 张兴福(1977—),男,博士,副教授,研究方向为卫星重力、GPS数据处理。

First author: ZHANG Xingfu (1977—), male, PhD, associate professor, majors in satellite gravity and GPS data processing.

E-mail: xfzhang77@163.com

## 欢迎订阅《测绘学报》

《测绘学报》创刊于1957年,是由中国科协主管、中国测绘学会主办的反映我国测绘科学技术发展水平的国家级综合性学术刊物,影响因子和被引频次居中文核心期刊测绘类前列,是美国《工程索引》(EI)核心期刊,并入选中国百种杰出学术期刊,连续入选科技部中国精品科技期刊和中国科协精品科技期刊示范项目,是我国最具影响力的测绘期刊之一。

《测绘学报》着重报道我国测绘科技最新的重要研究成果及其应用,内容涉及大地测量、工程测量、摄影测量与遥感、地图学、地理信息系统、矿山测量、海洋测绘、地籍测绘、地图印刷、测绘仪器,信息传输等测绘学科及其相关相邻学科。被多个国际检索系统所收录。

《测绘学报》设有测绘快报、学术论文、博士论文摘要、博士后工作动态等栏目。

《测绘学报》(双月刊)定价:20.00元,邮发代号:2-224。

编辑部地址:北京市西城区三里河路50号,邮编:100045,订阅电话:010-68531192(金英),010-68531317(传真)。

网址: <http://xb.sinomaps.com>