

利用残差地形模型空域法精化局部地球重力场

刘聪, 王正涛, 张华伟, 许智铭

引用本文:

刘聪, 王正涛, 张华伟, 许智铭. 利用残差地形模型空域法精化局部地球重力场[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(3): 369–376.

LIU Cong, WANG Zhengtao, ZHANG Huawei, XU Zhiming. Refining Local Earth's Gravity in Spatial Domain with Residual Terrain Modelling Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 369–376.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

利用Swarm星群探测亚马逊流域2015–2016年干旱事件

2015–2016 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by Swarm Constellation

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 595–603 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180273>

利用形状模型进行火卫一高阶重力场建模

High Degree Phobos Gravity Field Modeling Based on Shape Model

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 604–611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190104>

应用重力场模型GL1500E和LLR天平动参数估算月核大小及其组成

Estimation of the Size and Composition of the Lunar Core Based on the Gravity Field Model GL1500E and LLR Physical Libration Parameters

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 238–243 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190124>

海底地形高次项对海面重力信息影响分析

Influence Analysis of High-order Seafloor Topography on Sea Surface Gravity Information

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1328–1335 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190192>

一种顾及IGS-RTS数据接收中断的厘米级星载GPS实时定轨方法

A Centimeter-Level Real-Time Orbit Determination Method Using Space-Borne GPS Measurements Considering IGS-RTS Data Receiving Interruption

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1620–1626 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200432>



利用残差地形模型空域法精化局部地球重力场

刘聪¹ 王正涛¹ 张华伟² 许智铭¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 96901部队,北京,100094

摘要:陆地高分辨率重力数据是超高阶重力场模型及其应用研究的基础,但现有的观测技术和手段限制了陆地重力测量的覆盖区域,全球仍有大量的重力测量空白地区。采用残差地形模型空域法,利用高通滤波技术提取航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)分辨率 $3'' \times 3''$ 的V4.1数据短波信号,结合EGM2008重力场模型,反演精化 $1' \times 1'$ 分辨率的局部地球重力场参量。利用美国地面实测重力观测数据NGS99共57 387个点检验基于该方法恢复的 $1' \times 1'$ 分辨率的美国局部重力场,相比于EGM2008模型,其误差均方根(root mean square, RMS)由15.470 mGal降低到12.999 mGal,表明该方法可以在保证精度的同时有效地提高陆地重力场的分辨率。将该方法应用于中国华北平原($114^\circ\text{E} \sim 117^\circ\text{E}$, $32^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$),计算了该地区 $1' \times 1'$ 分辨率的重力扰动和垂线偏差,重力扰动的RMS为25.311 mGal,垂线偏差南北分量和东西分量的RMS分别为 $2.215''$ 和 $8.452''$,填补了该地区 $1' \times 1'$ 分辨率重力测量的空白。

关键词:残差地形模型;数字高程模型;重力场正演;陆地重力场

中图分类号:P223 **文献标志码:**A

高分辨率地面重力测量数据是超高阶重力场模型及其应用研究的基础,当前高分辨率海洋重力数据可由卫星测高技术获取^[1],但陆地重力测量的覆盖区域仍受限于现有的观测技术和手段,存在大量的数据稀疏区和空白区。当前国际上公布的重力场模型最高到2 190阶,对应地面重力格网分辨率分布为 $5' \times 5'$,但当前数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据的分辨率最高可以达到 $1'' \times 1''$,远高于超高阶重力场模型的分辨率。已有研究表明,利用地形数据可以在空间域或频谱域精化局部重力场模型^[2],二者的基本原理都是牛顿的万有引力公式。Forsberg等于1981年首次提出空间域法,并给出了用快速傅里叶变换进行地形效应计算的原理^[3-4];文献[5]提出了频谱域法;文献[6]推导了空间域内四棱柱体引力位一阶、二阶、三阶导数的计算公式;文献[7]比较了基于四棱柱的空间域法与基于Tesseroid体的空间域法计算的重力场精度,结果表明二者精度相当;文献[8]利用频谱域法计算了地球等星球的重力场;文献[9]推导了空间域内Tesseroid体引力位一阶、二阶导数的计算公

式;文献[10]在频谱域内计算地球重力场并分析了球近似与椭球近似的差别;文献[11-15]多次使用DEM数据精化陆地高分辨率重力场并建立了GGMplus、ERTM2160等重力场模型;文献[16-17]在空间域内借助DEM数据计算区域高程异常,并用水准点进行检验;文献[18]基于地形精化金星重力场得到VGM2013模型。当前的研究仍存在若干的不足和缺陷,文献[11-15]使用的DEM数据最高分辨率为 $3'' \times 3''$,并仅用于近区;空间域内精化重力场通常使用残差地形模型(residual terrain modelling, RTM)提取地形短波信号,需要球谐地形模型;GGMplus、ERTM2160等的计算中使用的是RET2012,相比于RET2012,目前最新的RET2014模型数据来源更为可靠,分辨率和精度更高。

本文利用美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和国防部国家测绘局(National Imagery and Mapping Agency, NIMA)联合测量的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)高分辨率DEM数据,基于RTM空域法

收稿日期:2020-04-30

项目资助:国家自然科学基金(41474018, 41774019, 41974007)。

第一作者:刘聪,硕士生,主要从事重力场精化与椭球谐展开研究。liucongns@qq.com

通讯作者:王正涛,博士,教授。zwtwang@whu.edu.cn

精化陆地重力场,在近区和远区统一使用 $3'' \times 3''$ DEM数据进行计算,并引入RET2014模型提取地形短波信号,计算 $1' \times 1'$ 分辨率局部地面重力参量。

1 RTM空域法

利用地形数据可以在空间域或频谱域精化局部重力场模型,二者的基本原理都是牛顿的万有引力公式。空间域法将地形分解为离散单元,根据万有引力公式计算各个单元产生的重力效应,进行累加得到整个地形产生的重力。RTM仅考虑了地形的短波部分,以DEM地形减去地形球谐系数综合计算得到的地形面作为残差地形,以残差地形计算的剩余重力是移除了相同阶数球谐综合值后的短波重力^[3]。RTM计算过程中通常只需考虑计算点一定半径内的地形,该半径通常取200 km^[11]。残差地形离散化后得到多个四棱柱,可将地球表面近似看作平面,计算中考虑了地球曲率的影响。

要计算密度为 ρ 的四棱柱 V 在 P 点处产生的重力场,需以计算点 P 为原点,建立坐标轴与四棱柱的边平行的坐标系,如图1所示^[3]。

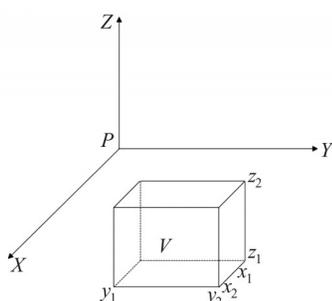


图1 定义的坐标系

Fig.1 Defined Coordinate System

给出四棱柱在 P 点产生的扰动位 T :

$$T = G\rho \int_V \frac{1}{r} dV = G\rho \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{r} dx dy dz \quad (1)$$

式中, G 为引力常数;坐标变量如图1所示, X 轴指向东, Y 轴指向北, Z 轴指向上; $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 为四棱柱 V 的6个顶点的坐标,且:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

重力扰动为:

$$\begin{aligned} \delta g = -\frac{\partial T}{\partial z} = -G\rho \int_V \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dV = \\ -G\rho \int_V \frac{z}{r^3} dV \end{aligned} \quad (3)$$

同理,利用扰动位在 x 与 y 方向的偏导可以

求出垂线偏差,计算公式为:

$$\begin{aligned} \xi = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{G\rho}{\gamma} \int_V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{r} \right) dV = \\ -\frac{G\rho}{\gamma} \int_V \frac{y}{r^3} dV \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \eta = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{G\rho}{\gamma} \int_V \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r} \right) dV = \\ -\frac{G\rho}{\gamma} \int_V \frac{x}{r^3} dV \end{aligned} \quad (5)$$

式中, γ 为正常重力。对于以上的积分形式,可以进行积分计算求得,也可以用级数进行估算。

重力扰动及扰动位的计算公式为:

$$\begin{aligned} \delta g = \left\| \left\| \left\| G\rho [x \ln(y+r) + y \ln(x+r) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. z \arctan \frac{xy}{zr} \right] \right\|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \right\| \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T = \left\| \left\| \left\| G\rho [xy \ln(z+r) + xz \ln(y+r) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. yz \ln(x+r) - \frac{x^2}{2} \arctan \frac{yz}{xr} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \frac{y^2}{2} \arctan \frac{xz}{yr} - \frac{z^2}{2} \arctan \frac{xy}{zr} \right] \right\|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \right\| \quad (7) \end{aligned}$$

式(1)可以写成级数的形式:

$$\begin{aligned} T = G\rho \Delta x \Delta y \Delta z \left\{ \frac{1}{r} + \frac{1}{24r^5} [(2\Delta x^2 - \Delta y^2 - \right. \right. \\ \left. \left. \Delta z^2)x^2 + (-\Delta x^2 + 2\Delta y^2 - \Delta z^2)y^2 + (-\Delta x^2 - \right. \right. \\ \left. \left. \Delta y^2 + 2\Delta z^2)z^2] + \dots \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为四棱柱 V 在3个方向上的长度。本文中50 km以内使用积分计算,50~200 km进行级数估算。

2 实例计算与分析

DEM的分辨率是影响重力场精化结果精度的主要因素,现有研究使用的DEM数据最高分辨率为 $3'' \times 3''$,但只用于近区,本文将在近区和远区统一使用 $3'' \times 3''$ 分辨率DEM数据进行计算,减少计算误差。在空间域内精化重力场通常使用RTM提取地形短波信号,该方法避免了对全球DEM数据的需求,但需要球谐地形模型,如

GGMplus、ERTM2160 等的计算中使用的 RET2012 模型,本文将使用较新的 RET2014 模型。

计算所需要的数据有高分辨率 DEM 数据、地形球谐模型和重力场球谐模型。地形球谐模型为对地形数据进行球谐分析得到的一组系数。本文选用的 DEM 数据是雷达影像数据覆盖全球陆地表面的 80% 以上的 SRTM V4.1,对应的地面分辨率为 90 m,该高程模型精度较高,其 V4.1 版本采用高级插值方法,与之前版本相比,高程质量有显著改进^[19-21];选用的地形球谐模型和重力场球谐模型分别为 2 160 阶 RET2014 和 2 160 阶 EGM2008。

为检验本文方法的精度和可靠性,采用美国国家大地测量局(National Geodetic Survey, NGS)的地面实测重力数据 NGS99 进行比较,NGS99 总共包括了 1 633 499 个重力测量点,提供的数据中包含了重力值、重力异常和布格异常等,其点位的分布如图 2 所示,几乎遍布整个美国。本文截取了大部分陆地区域的重力数据,在这些重力点利用 DEM 数据精化 EGM2008 模型,由于 SRTM V4.1 不包括海底地形数据,近海岸以及夏威夷的数据未使用,阿拉斯加的重力测量

点位较为稀疏,故其数据也未使用。

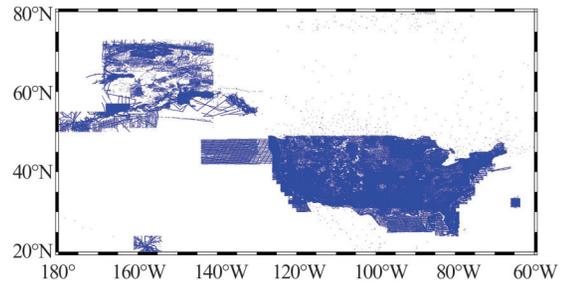
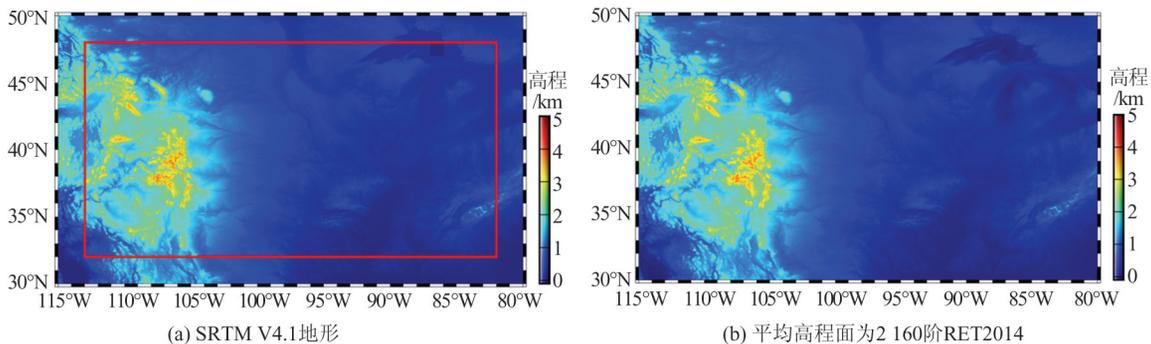


图 2 NGS99 重力点位分布

Fig.2 Distribution of NGS99 Gravity Points

如图 3 所示,研究的区域为 80°W~115°W, 30°N~50°N,图 3(a)和图 3(b)所示分别为 SRTM V4.1 地形和 2 160 阶地形模型 RET2014,在 86°W~87°W、47°N~48°N 区域 SRTM V4.1 无数据,由于该处地形接近于 0,因此取近似值 0。由于 RTM 法计算一点的重力场需要附近 200 km 范围的高程数据,因此计算点位的范围为 82°W~113°W、32°N~48°N,即图 3(a)中的红色框范围,该范围内重力测量点位过于密集,邻近点位进行检验无太大意义,因此对该范围的重力测量点位进行采样,采样的分辨率约为 5'×5',采样选取的重力测量点位如图 4 所示,总共包括 57 387 个点。



(a) SRTM V4.1 地形

(b) 平均高程面为 2 160 阶 RET2014

计算区域

图 3 美国研究区域地形

Fig.3 Topography of Study Area in American

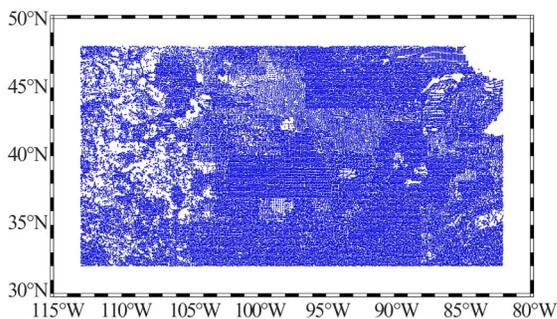


图 4 实例计算点位分布

Fig.4 Distribution of Gravity Points in Case Study Area

在图 4 所示的点位计算地面的 RTM 短波重力值与 EGM2008 模型重力值,以 NGS99 实测重力值为参考,统计 EGM2008 模型的误差,各点误差的绝对值分布如图 5 所示,可以看出 EGM2008 模型的误差较大的点位主要在西部以及东北部,误差绝对值可达到 50 mGal 以上。

RTM 短波重力值与 EGM2008 模型重力值的总量即为经过 DEM 数据精化后的重力值,其误差的绝对值分布如图 6 所示。对比图 5 与图 6 可知,经过 DEM 精化后,误差在东北部有所减

小,在西部变化不明显,在其余区域误差减小,更接近于0。

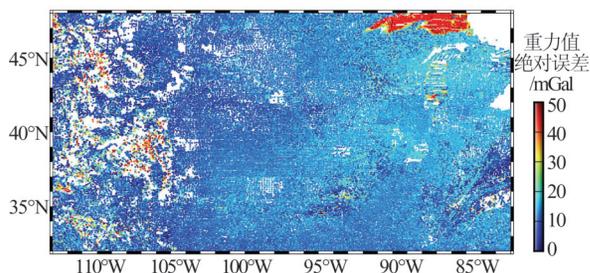


图5 EGM2008模型重力值绝对误差

Fig.5 Absolute Error of EGM2008 Model Gravity

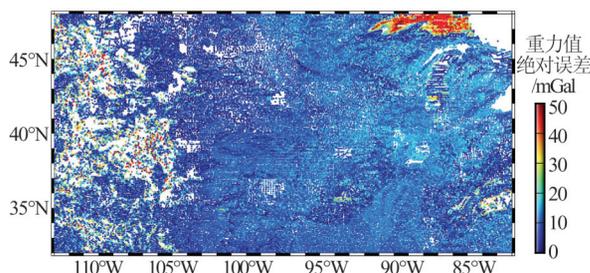


图6 顾及地形影响后EGM2008模型重力值绝对误差

Fig.6 Absolute Error of EGM2008 Model Gravity
Considering Topography Effect

EGM2008模型重力值、EGM2008与RTM重力值之和的误差统计结果见表1。EGM2008模型重力值误差的最小值为 -89.090 mGal,最大值为 109.433 mGal,均值为 -12.845 mGal,这表明EGM2008模型重力值整体上小于实测重力值,误差均方根(root mean square, RMS)为 15.470 mGal。经过DEM精化后的EGM2008

模型重力值的误差最小值为 -86.337 mGal,最大值为 127.934 mGal,均值为 -6.754 mGal,精化后的重力值整体上依然小于实测重力值,但是更为接近了,RMS为 12.999 mGal,比EGM2008模型重力值提高了 2.5 mGal左右的精度。上述结果表明本文所计算的结果可靠,使用的地形改正算法可行。

表1 实测数据检核结果/mGal

Tab.1 Test by Measured Data/mGal

模型	最小值	最大值	平均值	RMS
EGM2008	-89.090	109.433	-12.845	15.470
EGM2008与 RTM总和	-86.337	127.934	-6.754	12.999

3 华北平原局部地区重力场计算

本文将RTM应用于中国华北平原的重力场精化。华北平原地势较为平坦,研究区域范围为 $114^{\circ}\text{E}\sim 117^{\circ}\text{E}$, $32^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$,处于华北平原的西南部,由于计算一点的重力场需要附近 200 km的高程数据,DEM的范围大于计算区域。如图7所示,DEM的范围为 $112^{\circ}\text{E}\sim 119^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}$,图7(a)为SRTM V4.1高程数据,红色框即为计算区域,图7(b)为 2160 阶RET2014球谐系数计算出的平均高程面,计算点位于地表,即其高程与SRTM一致,分别计算分辨率 $1'\times 1'$ 的重力扰动、垂线偏差南北分量与垂线偏差东西分量。

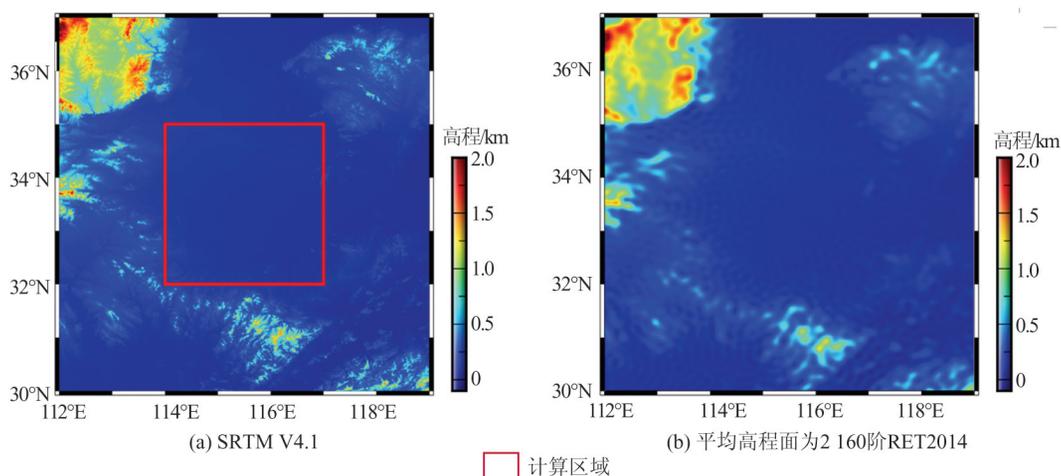


图7 华北平原高程数据

Fig.7 Elevation Data of the North China Plain

1) 重力扰动。图8为重力扰动计算结果,其中RTM短波重力扰动即残差地形的计算结果,EGM2008模型的重力扰动代表了中长波重力扰

动,RTM短波重力扰动与EGM2008模型重力扰动之和即为恢复的高分辨率重力扰动。

由图8可知,RTM短波重力扰动多为正数,

且其值整体接近于零,仅在东北角处稍大,EGM2008模型重力扰动在大部分区域为负;二

者的相同点在于西北部重力扰动小、东北角重力扰动大。

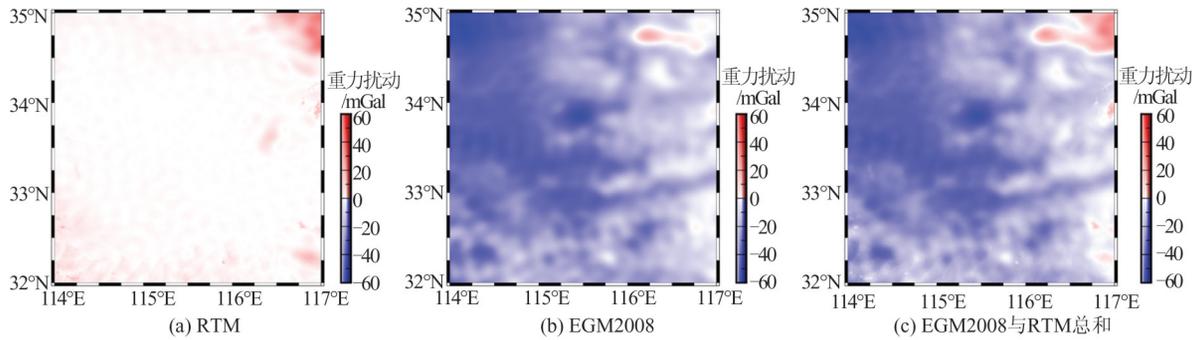


图8 华北平原重力扰动

Fig.8 Gravity Disturbance in the North China Plain

重力扰动的统计结果见表 2。该区域 EGM2008 模型重力扰动的最小值为 -54.143 mGal,最大值为 19.715 mGal,平均值为 -23.437 mGal,可以看出 EGM2008 模型重力扰动多为负值,其 RMS 为 26.160 mGal;RTM 短波重力扰动的最小值为 -0.722 mGal,最大值为 31.718 mGal,平均值为 1.629 mGal,RTM 短波重力扰动多为正值, RMS 为 3.490 mGal;二者相加得到的总量最小值为 -52.845 mGal,最大值为 29.849 mGal,平均值为 -21.808 mGal,RMS 为 25.311 mGal。由于该地区地势平缓,重力扰动的短波信号振幅小,RTM 短波重力扰动对于 EGM2008 与 RTM 总和的影响较小。

分量,RTM 短波垂线偏差南北分量与 EGM2008 模型垂线偏差南北分量之和即为恢复的高分辨率垂线偏差南北分量。

表 2 重力扰动的统计结果/mGal

Tab.2 Statistics of Gravity Disturbance/mGal

模型	最小值	最大值	平均值	RMS
EGM2008	-54.143	19.715	-23.437	26.160
RTM	-0.722	31.718	1.629	3.490
EGM2008 与 RTM 总和	-52.845	29.849	-21.808	25.311

2) 垂线偏差南北分量。图 9 为垂线偏差南北分量计算结果,其中 RTM 短波垂线偏差南北分量即残差地形的计算结果,EGM2008 模型的垂线偏差南北分量代表了中长波垂线偏差南北

由图 9 可知,计算出的 RTM 短波垂线偏差南北分量与 EGM2008 模型的垂线偏差南北分量多为正值,这表明其方向多为北方;RTM 短波垂线偏差南北分量仅在西北部与少数区域呈负值,而 EGM2008 模型垂线偏差南北分量在中部有些区域也为负值;二者的相似之处在于南部的垂线偏差南北分量较大。

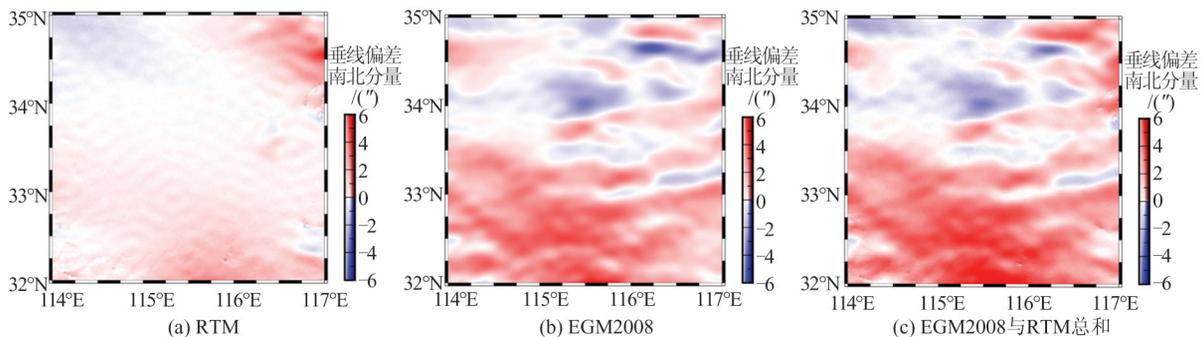


图9 华北平原垂线偏差南北分量

Fig.9 South-North Vertical Deflection in the North China Plain

垂线偏差南北分量的统计结果如表 3 所示。该区域 EGM2008 模型的垂线偏差南北分量最小值为 $-4.253''$,最大值为 $5.892''$,平均值为 $0.960''$,可知垂线偏差南北分量多为北向,其

RMS 为 $1.737''$;RTM 垂线偏差南北分量最小值为 $-2.072''$,最大值为 $5.085''$,平均值为 $0.409''$,可以看出其垂线偏差南北分量也多为北向,其 RMS 为 $0.757''$;二者的总量最小值为 $-3.261''$,最大值

为 $8.794''$,平均值为 $1.370''$,RMS为 $2.215''$ 。

表3 垂线偏差南北分量结果统计/ $''$

Tab.3 Statistics of South-North Vertical Deflection/ $''$

模型	最小值	最大值	平均值	RMS
EGM2008	-4.253	5.892	0.960	1.737
RTM	-2.072	5.085	0.409	0.757
EGM2008与RTM总和	-3.261	8.794	1.370	2.215

3) 垂线偏差东西分量。图10为垂线偏差东西分量计算结果,由图10可知,计算出的RTM短

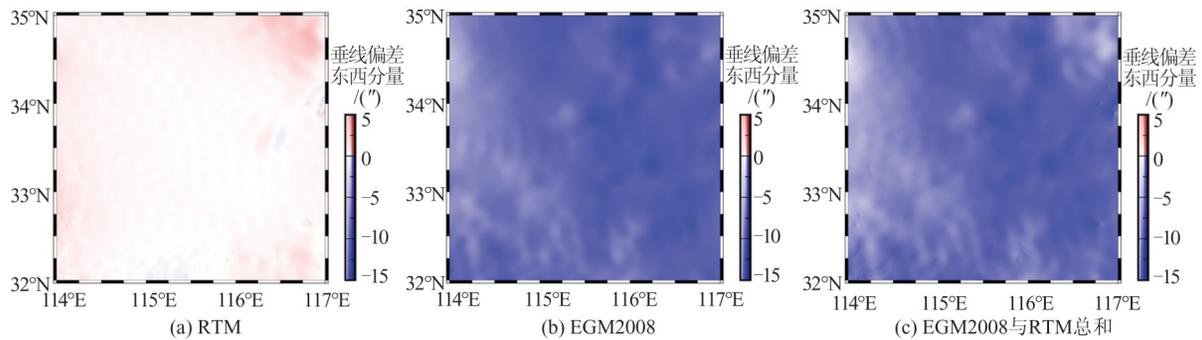


图10 华北平原垂线偏差东西分量

Fig.10 East-West Vertical Deflection in North China Plain

表4 垂线偏差东西分量结果统计/ $''$

Tab.4 Statistics of East-West Vertical Deflection/ $''$

模型	最小值	最大值	平均值	RMS
EGM2008	-13.283	-3.602	-8.846	8.968
RTM	-2.915	4.282	0.568	0.811
EGM2008与RTM总和	-13.640	-1.441	-8.279	8.452

由于缺乏地面实测重力数据,本文将计算出的RTM重力参量与文献[12]计算的RTM重力参量进行对比。本文计算的华北平原RTM短波重力场参量统计结果可见表2~4,文献[12]在计算ERTM2160时得到的RTM短波重力场参量统计结果见表5,该结果统计了全球 $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 范围内的所有陆地及近海岸地区约30亿个点的RTM重力场。

表5 ERTM2160中的RTM短波重力场

Tab.5 RTM Short Wave Gravity Field in ERTM2160

重力场参量	最小值	最大值	平均值	RMS
重力扰动/mGal	-362.4	139.9	-1.050	10.59
垂线偏差南北分量/ $''$	-29.1	31.3	0.000	1.43
垂线偏差东西分量/ $''$	-32.3	29.1	0.000	1.46

波垂线偏差东西分量接近于0,EGM2008模型的垂线偏差东西分量都为负值,即其方向为西向;二者分布较为均匀,看不出太大的变化。

对垂线偏差东西分量结果进行统计,如表4所示。该区域EGM2008模型的垂线偏差东西分量最小值为 $-13.283''$,最大值为 $-3.602''$,平均值为 $-8.846''$,其RMS为 $8.968''$;RTM垂线偏差东西分量最小值为 $-2.915''$,最大值为 $4.282''$,平均值为 $0.568''$,RMS为 $0.811''$ 。EGM2008与RTM两者总量的最小值为 $-13.640''$,最大值为 $-1.441''$,平均值为 $-8.279''$,RMS为 $8.452''$ 。

华北平原的RTM短波重力场参量RMS均小于ERTM2160,其重力扰动RMS为 3.490 mGal ,仅为ERTM2160的 $1/3$ 左右。ERTM2160中国华北平原大部分区域RMS小于 2 mGal ,部分区域RMS为 $2\sim 5\text{ mGal}$,因此华北平原整体RMS应为 $2\sim 4\text{ mGal}$,与本文计算结果吻合。

4 结 语

本文使用DEM数据对局部重力场进行精化处理,利用NGS99实测重力数据对RTM算法进行检验,并应用于中国华北平原,计算出分辨率 $1'\times 1'$ 的重力扰动和垂线偏差,得到了更为精细描述的重力场信息。

1) 根据实测数据检验,本文所使用的RTM算法可行,其计算结果可靠,利用高分辨率、高精度的DEM数据可以在保证精度的同时有效地提高陆地重力场的分辨率,填补地面重力测量的空白。

2) 华北平原地区重力扰动RMS为 25.311 mGal ,垂线偏差南北分量和东西分量RMS为 $2.215''$ 和 $8.452''$ 。

3) 利用高分辨率DEM数据与RTM法可以

计算出全球 $1' \times 1'$ 分辨率的陆地重力场, 结合卫星测高技术获得的全球 $1' \times 1'$ 分辨率海洋重力场, 有望为 10 800 阶地球重力场模型的解算提供数据支撑。

参 考 文 献

- [1] Wu Yihao, Luo Zhicai. The Approach of Regional Geoid Refinement Based on Combining Multi-satellite Altimetry Observations and Heterogeneous Gravity Data Sets[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5): 1596-1607 (吴怿昊, 罗志才. 联合多代卫星测高和多源重力数据的局部大地水准面精化方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(5): 1596-1607)
- [2] Hirt C, Kuhn M. Band-Limited Topographic Mass Distribution Generates Full Spectrum Gravity Field - Gravity Forward Modelling in the Spectral and Spatial Domains Revisited[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(4): 3646-3661
- [3] Forsberg R. A Study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical Inversion Methods in Gravity Field Modelling[R]. Columbus: Ohio State University, 1984
- [4] Forsberg R, Tscherning C C. The Use of Height Data in Gravity Field Approximation by Collocation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1981, 86(B9): 7843-7854
- [5] Rummel R, Rapp R H, Suenkel H, et al. Comparisons of Global Topographic/Isostatic Models to the Earth's Observed Gravity Field [R]. Columbus: Ohio State University, 1988
- [6] 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
- [7] Tsoulis D, Novak P, Kadlec M. Evaluation of Precise Terrain Effects Using High-Resolution Digital Elevation Models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B2): 1-14
- [8] Wiczorek M A. Gravity and Topography of the Terrestrial Planets [M]// Schubert G. Treatise on Geophysics. Amsterdam: Elsevier, 2007: 165-206
- [9] Grombein T, Seitz K, Heck B. Optimized Formulas for the Gravitational Field of a Tesseroid [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(7): 645-660
- [10] Rexer M, Hirt C, Claessens S, et al. Layer-Based Modelling of the Earth's Gravitational Potential up to 10-km Scale in Spherical Harmonics in Spherical and Ellipsoidal Approximation [J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(6): 1035-1074
- [11] 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
- [12] Hirt C, Kuhn M, Claessens S, et al. Study of the Earth's Short-Scale Gravity Field Using the ERTM2160 Gravity Model [J]. *Computers and Geosciences*, 2014, 73: 71-80
- [13] Hirt C, Rexer M. Earth2014: 1 Arc-Min Shape, Topography, Bedrock and Ice-Sheet Models - Available as Gridded Data and Degree-10 800 Spherical Harmonics [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 39: 103-112
- [14] Hirt C, Claessens S, Fecher T, et al. New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4279-4283
- [15] Hirt C. RTM Gravity Forward-Modeling Using Topography/Bathymetry Data to Improve High-Degree Global Geopotential Models in the Coastal Zone [J]. *Marine Geodesy*, 2013, 36(2): 183-202
- [16] Zhai Changzhi, Yao Yibin, Yue Shun. Geoid Refinement Method Based on the Regional EGM2008 and the Remaining Terrain Model [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(6): 941-944 (翟长治, 姚宜斌, 岳顺. 基于 EGM2008 和剩余地形模型的区域似大地水准面精化方法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(6): 941-944)
- [17] Zhang Yongyi, Zhang Xingfu, Zhou Boyang, et al. The Integral Method and Accuracy Analysis of Residual Terrain Model Height Anomaly [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(9): 770-774 (张永毅, 张兴福, 周波阳, 等. 剩余地形模型高程异常计算的积分法及精度分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 770-774)
- [18] Xu Luyuan, Li Fei, Yan Jianguo. A Gravity Field Model of Venus Based on Refined Topography: VGM2013 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(8): 2484-2494 (徐璐媛, 李斐, 鄢建国. 基于地形精化的金星重力场模型 VGM2013 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2484-2494)
- [19] Li Zhenhong, Li Peng, Ding Dong, et al. Research Progress of Global High Resolution Digital Elevation Models [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1927-1942 (李振洪, 李鹏, 丁咚, 等. 全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 1927-1942)
- [20] Zhang Quan, Yang Qinke, Cheng Jie, et al. Characteristics of 3" SRTM Errors in China [J]. *Geomat-*

ics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(5): 684-690 (张泉, 杨勤科, 程洁, 等. 中国地区 3" SRTM 高程误差特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(5): 684-690)

[21] Chen Junyong. Quality Evaluation of Topographic

Data from SRTM3 and GTOPO30[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(11): 941-944 (陈俊勇. 对 SRTM3 和 GTOPO30 地形数据质量的评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(11): 941-944)

Refining Local Earth's Gravity in Spatial Domain with Residual Terrain Modelling Technique

LIU Cong¹ WANG Zhengtao¹ ZHANG Huawei² XU Zhiming¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Troops 96901, Beijing 100094, China

Abstract: Objectives: The land high-resolution gravity data is the basis of the research on ultra-high-degree gravity field model and its application. But the existing observation technology and means limit the coverage area of land gravity measurement, and there are still a lot of areas without gravity measurement. **Methods:** Based on the residual terrain modelling method, short-wave signal of 3"×3" resolution shuttle radar topography mission(SRTM) V4.1 data is extracted using high-pass filtering technology, combined with the EGM2008 gravity field model, to inverse and refine local gravity field parameters with 1'×1' resolution. 57 387 points of NGS99 are used to test the local gravity field of America with 1'×1' resolution restored by this method. Then this method is applied to the North China Plain (114°E—117°E, 32°N—35°N), and gravity disturbance and vertical deflection of 1'×1' resolution in this area are calculated. **Results:** Compared with EGM2008 model, the root mean square(RMS) of error is reduced from 15.470 mGal to 12.999 mGal. In the North China Plain, the RMS of gravity disturbance is 25.311 mGal, and the RMS of South-North and East-West vertical deflections are 2.215" and 8.452", respectively. **Conclusions:** This method can effectively improve the resolution of the land gravity field while ensuring the accuracy, and fill in the blank of 1'×1' resolution ground gravity measurement.

Key words: residual terrain modelling; digital elevation model; gravity forward-modelling; land gravity field

First author: LIU Cong, postgraduate, specializes in gravity field refinement and ellipsoidal harmonic expansion. E-mail: liucongns@qq.com

Corresponding author: WANG Zhengtao, PhD, professor. E-mail: ztwang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41474018, 41774019, 41974007).

引文格式: LIU Cong, WANG Zhengtao, ZHANG Huawei, et al. Refining Local Earth's Gravity in Spatial Domain with Residual Terrain Modelling Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 369-376. DOI:10.13203/j.whugis20200079 (刘聪, 王正涛, 张华伟, 等. 利用残差地形模型空域法精化局部地球重力场[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(3): 369-376. DOI: 10.13203/j.whugis20200079)