

资源三号数据在重力中区地形改正中的应用

孙喜亮^{1,2}, 刘召芹², 刘斌², 邸凯昌², 张明华³

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 3. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 针对我国资源三号卫星立体影像数据, 利用 GPS 控制点, 结合前视、下视、后视区域网平差精化有理函数模型, 探讨了资源三号卫星立体影像数据用于重力中区地形改正的高精度 DEM 生成方法。通过 1: 1 万高精度 DEM 数据进行地改实验验证表明: 资源三号卫星立体影像数据提取的 DEM 可以满足 1: 20 万区域重力测量中区地改精度要求, 为我国重力测量中区地形改正提供了一条有效途径, 拓展了资源三号数据在区域重力测量中的应用。

关键词: 资源三号; 有理函数模型(RFM); 区域网平差; DEM; 重力中区地形改正

中图分类号: P631; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2013)05-0822-05

多年来, 重力中区(50 或 100~2 000 m)地形改正一直是重力资料整理过程中的一项既费时又费力的工作, 传统的作业手段不仅效率低下且精度受人因为因素影响较大^[1]。除部分城市外, 国内大部分区域高精度地形图的缺乏, 严重限制了重力调查中区地形改正。随着对地观测技术的发展, 卫星影像的获取越来越及时, 分辨率越来越高, 尤其是立体像对的获取, 利用高分辨率遥感影像快速进行大比例尺测图逐渐成为一种可靠而有效的途径。

资源三号测绘卫星是中国首颗民用高分辨率光学传输型立体测图卫星, 主要搭载有一台地面分辨率优于 2.1 m 的高分辨率正视全色延时积分成像(TDI CCD)相机、两台地面分辨率优于 3.5 m 的前视、后视全色 TDI CCD 相机和一台地面分辨率优于 5.8 m 的正视多光谱相机(参考 <http://sjfw.sasmac.cn/>)。资源三号测绘卫星集测绘和资源调查功能于一体, 用于长期、连续、稳定、快速地获取覆盖全国的高分辨率立体影像和多光谱影像以及辅助数据, 生产全国基础地理信息 1: 5 万测绘产品, 开展 1: 2.5 万以及更大比例尺地图的修测和更新、国土资源调查和监测等。

资源三号在轨运行半年来, 针对其几何校正产品的质量评价和精度验证工作已初步展开, 李德仁院士^[2]在概述了资源三号卫星地面应用处理流程的基础上, 对卫星的几何级辐射特性的指标和性能进行了介绍; 唐新明^[3]通过基于有理函数模型区域

网平差的方式对资源三号作了初步的几何精度验证; 刘斌^[4]等选用了北京市房山区的一景资源三号数据对其几何精度进行了更充分的验证, 其实验区地形覆盖区域高差较大, 地形较为复杂(涵盖了城区、山地), 平坦地区平面定位精度达到 1.776 m, 高程 2.213 m, 山区平面定位精度达到 2.191 m, 高程 2.895 m。

由此表明资源三号卫星定位精度有了长足的进步, 但是尚未有相关文献对其产品在地改中的应用进行精度验证和应用分析。笔者利用一景资源三号三线阵数据, 结合外业 GPS 控制点, 探索生产高精度 DEM 的技术流程, 并对其精度进行验证, 然后结合国家测绘局 1: 1 万高精度 DEM 进行地改实验对比, 验证其用于区域重力测量中区地改的精度并进行分析, 为大范围快速重力地改提供有效的支撑。

1 研究方法

1.1 实验区及数据

选取北京房山区的一景资源三号三线阵影像产品数据作为实验区, 实验区影像数据获取时间为 2012 年 2 月 23 日, 覆盖面积约 2 500 km², 实验区西北部分为山区, 高差起伏较大, 高差从十几到 1 500 m 左右, 东南部分为城区, 地势平坦。整个实验区地形类型较为典型, 涵盖了山地和平坦区, 适合用来进行 DEM 生产精度验证及重力地改精度验证。

利用 DEM(digital elevation model)进行重力地

形改正的精度取决于 DEM 自身的精度和地形改正计算方法,针对资源三号测绘卫星立体像对生产 DEM 的精度验证采用外业实地测量的方法进行,通过外业 GPS 测量的方式,实地测量了 25 个 GPS 点, GPS 测量平差后精度优于 0.01 m,像方刺点精度达到子像素级。在实验区外围四角取 4 个 GPS 点作为控制点,其他 21 个点作为检查点, GPS 点在下视图像上的分布如图 1 所示,其中三角形符号为控制点,实心圆形符号为检查点。

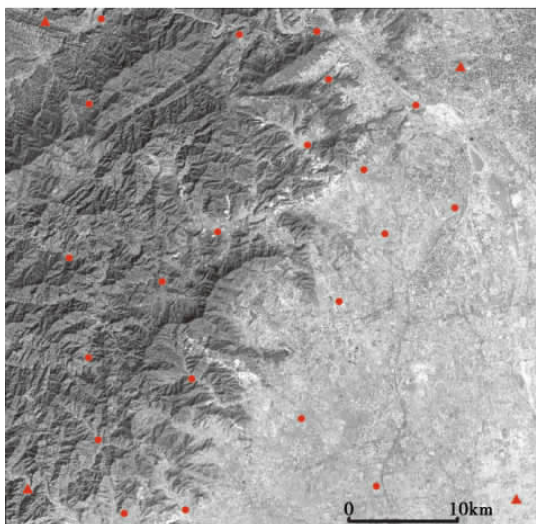


图 1 实验区下视图像及 GPS 点分布(据文献[4])

1.2 有理函数模型及区域网平差

传感器成像几何模型的建立是进行摄影测量立体定位处理的基础,它反映了地面点三维空间坐标与相应像点在像平面坐标系中二维坐标系之间的数学关系,一般分为两类:物理传感器模型和通用传感器模型^[5]。鉴于物理传感器模型与传感器类型相关,形式复杂,不具有通用性等,有理函数模型(rational function model,RFM)等通用传感器模型逐渐成为了立体测图的主要手段。

有理函数模型的形式为

$$L = \frac{P_1(p \downarrow h)}{P_2(p \downarrow h)}, S = \frac{P_3(p \downarrow h)}{P_4(p \downarrow h)} \quad (1)$$

式中 L 、 S 和 $(p \downarrow h)$ 是像坐标和地面坐标经过平移和缩放处理后的正则化坐标,且多项式最高阶数为 3 次。

资源三号卫星影像虽然以有理函数模型方式提供影像定位信息,但存在较大的系统误差^[6-7],且前视、下视、后视图像间存在着不一致性,直接利用提供的 RFM 模型参数进行 DEM 生产存在较大误差。笔者采用在实验区四个角点布设 4 个 GPS 控制点,结合像方仿射变换模型将前视、下视和后视图像统

一进行区域网平差,精化三视图像的有理函数模型^[2,4],消除三视图像间的不一致,且实现了高精度绝对定位,然后利用精化后的有理函数模型进行 DEM 的生产。

1.3 DEM 生产

利用区域网平差技术对前视、下视、后视图像进行模型精化后,由于前视和后视的交会角度最大,利用前视和后视图像构成立体像对生成 DEM 的高程精度要优于其他组合,因此采用前后视影像生产 DEM。利用立体像对生产 DEM 的流程主要包括立体像对构建、立体影像匹配、匹配点粗差剔除、构建不规则三角网 TIN、DSM 生成、DSM 滤波、DEM 的生产、编辑等^[8],流程如图 2 所示。

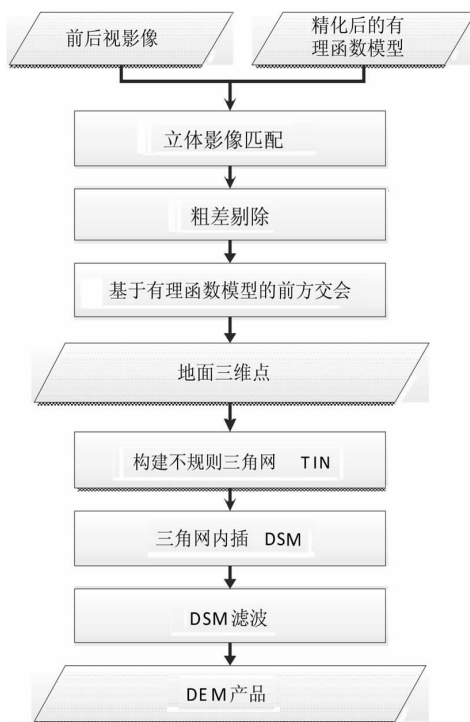


图 2 立体像对生成 DEM 流程

1.3.1 数据源

资源三号卫星是三线阵立体测绘卫星,前后视影像形成的立体像对,交会角为 44°,相对其他组合具有较大的基高比,提取目标点的高程精度高。通过区域网平差技术精化前后视有理函数模型,能很好地消除其不一致性,提高其平面和高程精度。

1.3.2 立体影像匹配

资源三号一景数据的数据量比较大(24 576 × 24 516 像元),为提高影像匹配效率和准确度,采用 3 层金字塔分层的自动影像相关技术。从顶层开始处理,通过 Förstner 算子提取影像的特征点,为了使提取出的兴趣点分布较均匀,对影像以一定间隔大

小划分规则格网,在每个格网中选取特征值最大的特征备选点作为特征点,再根据立体影像的核线约束关系在右影像的同名核线上搜索相关系数最大的特征点作为左影像的匹配点,且用基于视差连续性的方法剔除错误匹配结果。上层匹配的结果作为下层的初始点,以相同的方法作进一步的匹配,直到底层影像。最后在底层影像上对匹配的同名点进行最小二乘匹配至子像素,得到整景影像的匹配点。

1.3.3 粗差剔除

在影像分层匹配的过程中即采用视差连续性的方法剔除错误的匹配点,得到整景影像的匹配点后,再统一利用 RANSAC 方法,利用仿射变换模型进一步剔除错误的匹配点,从而保证匹配点的正确性。

1.3.4 基于有理函数模型的前方交会

联立前后视影像的有理函数模型正解公式,构建误差方程,法化,最小二乘迭代求解出地面三维点坐标。

1.3.5 构建不规则三角网 TIN 及内插生成 DSM

利用前方交会得到的地面三维点构建不规则三角网 TIN,然后利用 TIN 内插生成影像重叠区的 DSM。

1.3.6 DSM 滤波

对于大量的居民区和植被区等,大量的匹配点位于房屋或植被的顶部,因此由立体像对计算得到的是数字表面模型 DSM,为了得到准确的 DEM,需结合地形选择不同的滤波策略对其结果进行修正。

在地形平坦区,设置小的 DEM 间距及搜索窗口,会得到很多实际落在地面上的高程点^[9],低楼房区域根据窗口对象的面积以及高度设置阈值滤除掉小于面积阈值和大于高度阈值的对象,高楼房城区设置坡度阈值滤除掉大于阈值的对象,同时设置高强度的平滑策略,利用其周围落在地面上的高程点计算落在建筑物和植被上点的高程数据。

在山地地区,设置较大间隔 DEM 及搜索窗口,区分是否是植被区,植被区利用坡度阈值滤波去除等;坡度阈值的设置随高楼区、植被区、平坦区等依次减小;搜索窗口、DEM 间隔及平滑程度随高山区、丘陵区、平坦区依次降低。图 3 为实验区 DSM 滤波前后局部效果,对比图 3a、b 可以看出位于平坦区的房屋影响被消除了(红框 3),而有地形起伏的区域,地形特征也得到了很好的保留(红框 1、2),这有利于提高精度和地改精度。

1.3.7 DEM 产品

对滤波后的 DSM 数据进行人工目视检查和断裂线编辑,按 1:5 万 DEM 生产标准内插生成 DEM

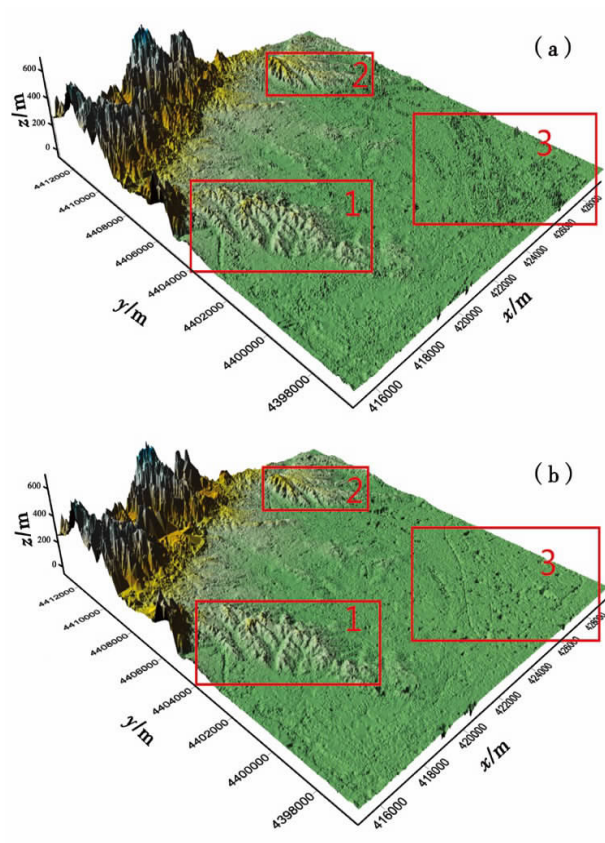


图 3 滤波前 (a) 和滤波后 (b) DSM 局部效果

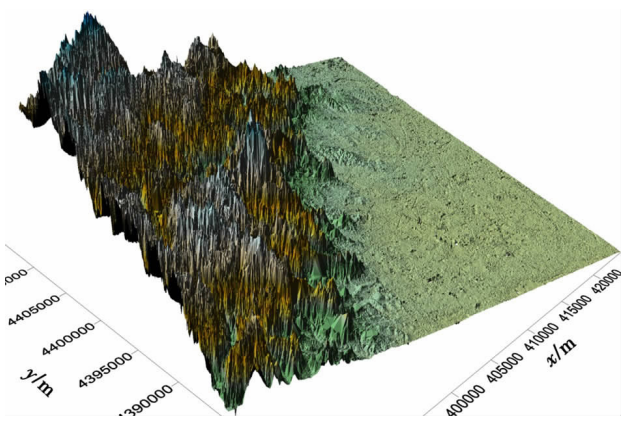


图 4 试验区 DEM 结果

产品,整个实验区 DEM 如图 4 所示。

1.4 重力地形改正

重力地形改正是要去掉测点周围地形起伏对该点重力值的影响。由于地形复杂,参照规范要求实际计算将以测点为中心的四周地形分割成许多小块,计算出每一个小块地形质量对测点的重力值影响值,然后累加求和便得到改点的地形影响值^[10]。其计算公式^[14]为

$$g_i = G\sigma \iiint_v \frac{zdx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

式中: G 为引力常数 $6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{s}^2)$; σ 为

岩石密度,取 2.67 g/cm³; x、y 为节点到测站的距离; z 为节点与测站的高程差。

区域重力测量中将测点周围的地形分为近、中、远区,近区一般为 0~50 m,中区为 50~2 000 m,远一区为 2~20 km,远二区为 20~166.7 km^[10]。传统的重力中区地形改正方法是,做一圆形量板,将其分成若干方位和环带,使其把测点周围一定范围内的地形分成许多扇形柱。通过求取每个扇形柱的高程,再求出其地形改正值。虽然能满足当前规则的要求,但模拟地形变化的精度不高^[1],导致计算精度有限。为了充分利用测点高程和计算机的快速计算,并结合 GIS 中不规则三角网 TIN 内插技术,笔者采用方形域法进行中区地改值的计算^[11-16]。

重力地改的误差来源是非常复杂的,常用均方误差来标示。对于地形改正误差的估计,目前普遍采用的方法是使用比原地改时大一级比例尺的地形图进行中区地形改正误差评价^[10],误差计算公式为

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2}$$

式中:δ_i 为检查值与原计算值之差;n 为检查点数。

依据规范^[10]中区地改采用计算机进行时,1:20 万中区地改宜使用国家测绘局 1:5 万 DEM 高程数据计算地改值。因此结合误差评价原则,笔者利用国家测绘局 1:1 万高精度 DEM 对生产的 DEM 进行地改精度评价。

2 试验验证及结果

2.1 DEM 精度验证

对生产的 DEM 从两个方面进行精度验证:①同名点匹配质量检查:对匹配出的大量同名点根据其相关系数划分为 6 类,质量从好到差依次为:优(1~0.85)、良(0.85~0.70)、一般(0.75~0.0)、孤立、量测、可疑;括号内为相关系数。点质量分布图如图 5a 所示,各类别所占比例如图 5b 所示;②高程精度检查:利用余下的 21 个外业 GPS 点作检查点,根据 GPS 点的坐标采用双线性内插方法提取生成 DEM 对应点的高程值,与实际测量值进行比较,统计结果中误差为 2.008 m,最大误差为 4.385 m。

由此可以看出,利用资源三号卫星前后视影像提取 DEM,75% 的同名点匹配质量非常好,且几乎占据整幅影像范围,少部分点由于受到地形、植被、房屋、阴影等的影响,匹配精度较差。加入 4 个 GPS 控制点进行区域网平差精化其有理函数模型,高程精度达到了 2.008m,满足 1:5 万 DEM 精度要求^[17],可以有效支持重力地形改正。

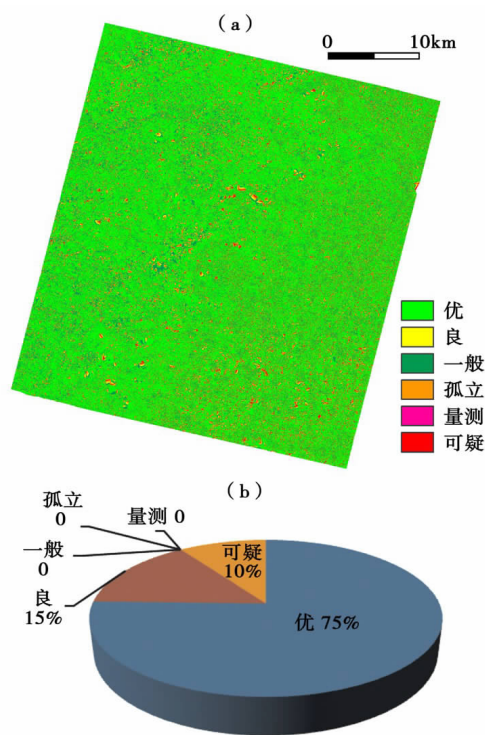


图 5 点质量分布(a)和点质量所占比例(b)

2.2 重力地形改正精度验证

针对重力地形改正精度验证,在生成的实验区 DEM 中均匀分布选取 64 个测站点,其中山区地形 40 个,平地地形 24 个,根据式(2)分别计算各测站点的中区地形改正值,统计结果见表 1。同样利用 1:1 万高精度的 DEM,计算各测站点得到的中区地形改正值如表 2 所示。对两种精度的 DEM 利用式(3)进行地形改正差值统计,结果见表 3。

表 1 利用前后视提取 DEM 计算的地改值统计结果 mGal

地形	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
山地	5.247	0.073	1.926	1.584	0.323
平地	0.186	0.003	0.041	0.046	0.007

表 2 利用 1:1 万 DEM 计算的地改值统计结果 mGal

地形	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
山地	5.494	0.082	2.105	1.519	0.310
平地	0.145	0.0002	0.017	0.026	0.004

表 3 两种 DEM 计算的地改差值统计结果 mGal

地形	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
山地	1.406	-1.098	0.179	0.594	0.121
平地	0.007	-0.185	-0.025	0.039	0.006

从表 1、表 2 中统计标准差项可以看出,地形起伏越大,相应的地形改正量也越大,平地地区的地形改正非常小。对比两种精度 DEM 进行地改差值统计结果,山地地形引起的中区地改误差是 0.121 mGal,平地地形引起的中区地改误差是 0.006 mGal,均满足 1:20 万区域重力测量关于中区地改

地形误差的要求^[10] (0.20 mGal)。这表明,利用资源三号前后视提取的 DEM 进行 1: 20 万区域重力测量中地形改正完全是可行的,同时依据规范要求,这也进一步说明了其提取的 DEM 精度是完全符合 1: 5 万 DEM 精度要求的。

3 结束语

实验结果表明,针对一景资源三号三线阵立体影像数据,通过 4 个 GPS 控制点,结合区域网平差即可实现高精度 DEM 的生产,且能够满足 1: 20 万区域重力测量中地形改正的精度要求,为解决我国常规区域重力测量的地形改正提供了一条有效的途径。随着资源三号卫星的业务化运行,在获取足够多数数据的情况下,采用多景、多航带联合区域网平差,可以进一步减少外业 GPS 控制点的数量,减少外业作业成本,为拓展资源三号卫星数据在区域重力测量地形改正的业务化应用提供借鉴。

由于资源三号卫星立体影像分辨率的限制,在 DEM 生产过程中,房屋、植被等在提取的 DSM 中影响仅表现为一些毛刺,且平坦区进行 1: 20 万区域重力测量中地形改正时引起的地改值本身就很小,所以笔者并未探讨 DSM 滤波前后对于地形改正值的影响,在以后的工作中,将利用更高分辨率的数据进行更大比例尺地形改正时重点讨论 DSM 滤波对重力地形改正值的影响,探索利用立体卫星影像进行 1: 10 万或更高精度的重力区域地形改正方法。

参考文献:

[1] 冯治汉. 区域重力调查中的中地形改正方法及精度[J]. 物

探与化探, 2007(5): 455-458.
 [2] 李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星-资源三号卫星[J]. 测绘学报. 2012, 41(3).
 [3] 唐新明, 张过, 祝小勇, 等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报. 2012, 41(2).
 [4] 刘斌, 孙喜亮, 邱凯昌, 等. 资源三号卫星传感器校正产品定位精度验证与分析[J]. 国土资源遥感, 2012, 160-162.
 [5] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
 [6] Xiong Z, Zhang Y. A generic method for RPC refinement using ground control information [J]. Photogramm Eng Rem S, 2009, 75(9): 1083-92.
 [7] Grodecki J, Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials [J]. Photogramm Eng Rem S, 2003, 69: 59-68.
 [8] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.
 [9] 李忠, 李梅, 杜绪奎. 平坦地区 DSM 到 DEM 的试验[J]. 测绘与空间地理信息, 2008(2): 29-31.
 [10] DZ/T 0082-2006 区域重力调查规范[S]. 2006.
 [11] Forsberg R. Gravity field terrain effect computations by FFT [J]. Bulletin Géodésique, 1985(4).
 [12] 姜玉林. 方域重力近区地形改正实测方法研究[J]. 地质与勘探, 1988(5): 37-40.
 [13] 张明华, 张家强. 现代卫星测高重力异常分辨能力分析及其在海洋资源调查中的应用[J]. 物探与化探, 2005(4): 295-298.
 [14] 王成锡. 中国区域重力信息系统集成[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
 [15] 冯治汉. 重力中地形改正系统的研制[J]. 物探与化探, 2002(6): 467-469.
 [16] 钟本善, 何昌礼, 江玉乐. 方域近区地改的多面体解析法[J]. 物探与化探, 1989(2): 127-135.
 [17] GB 12340-2008-T 1: 25 000, 1: 5 万, 1: 10 万地形图航空摄影测量内业规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008..

THE APPLICATION OF ZY-3 DATA TO GRAVITY INTERMEDIATE AREA TOPOGRAPHIC CORRECTION

SUN Xi-liang^{1,2}, LIU Zhao-qin², LIU bin², DI Kai-chang², ZHANG Ming-hua³

(1. Geomatic College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper investigates the method of high-precision digital elevation model generation in gravity intermediate area topographic correction with ZY-3 stereo surveying satellite data. The rational function model has been refined with the GPS points and forward, nadir, backward image data. The experimental verification of topographic correction with 1: 10 000 high-precision digital elevation model data shows that the digital elevation model produced by ZY-3 stereo data can meet the precision requirement for 1: 200 000 gravity intermediate area topographic correction. The result obtained by the authors provides an effective means for gravity intermediate area topographic correction and expands the application of ZY-3 in regional gravity survey.

Key words: ZY-3; RFM; block adjustment; DEM; gravity intermediate area topographic correction

作者简介: 孙喜亮 (1989 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事卫星影像高精度几何处理及信息提取等工作。

通讯作者简介: 刘召芹 (1973 -), 男, 副研究员, 主要从事航空摄影测量、行星制图与导航定位方面的研究工作。