



高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差

唐新明, 刘昌儒, 张恒, 王霞, 李国元, 莫凡, 李丰翔

引用本文:

唐新明, 刘昌儒, 张恒, 等. 高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1423–1430.

TANG Xinming, LIU Changru, ZHANG Heng, et al. [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1423–1430.

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)

[ICESat-2/ATLAS全球高程控制点提取与分析](#)

Extraction and Analysis of Global Elevation Control Points from ICESat-2 /ATLAS Data

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 184–192 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200531>

[利用自适应水准网动态平差建立山东垂直运动速度模型](#)

Vertical Movement in Shandong Province Based on Adaptively Dynamic Adjustment for Level Network

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 620–625 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180296>

[川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

[基于深度学习的立体影像密集匹配方法综述](#)

A Review of Dense Stereo Image Matching Methods Based on Deep Learning

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 193–202 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200620>

[利用CryoSat-2测高数据研究南极威德尔海海冰出水高度时空变化](#)

Spatiotemporal Variation of Sea Ice Freeboard in the Antarctic Weddell Sea Based on CryoSat-2 Altimeter Data

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 125–132 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180504>



高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合 区域网平差

唐新明¹ 刘昌儒¹ 张恒¹ 王霞¹ 李国元¹ 莫凡¹ 李丰翔²

1 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京,100048

2 山东省国土测绘院,山东 济南,250102

摘要:提高稀少甚至无地面控制点的区域网平差精度,是实现境外和外业测控困难区域高精度测图的核心问题之一,也是主要的技术难点。为了充分利用高分七号激光测高数据与立体影像同步获取、相对精度较高、高程精度极高的特点,充分发挥足印影像作用,提出了一种激光测高数据辅助的高分七号卫星立体影像区域网平差方法。通过足印影像实现了激光高程控制点在立体影像上的自动量测,利用其极高的高程精度对区域网立体影像进行高程控制,经过联合区域网平差实现区域网影像高程精度提升。通过覆盖不同地形类型的山东测区激光测高数据与立体影像联合平差实验表明,仅使用激光测高数据作为高程控制,实验区高程中误差可由原始7.97 m提高到0.79 m,高程最大误差优于1.5 m,高程精度改善明显。

关键词:高分七号卫星;激光测高数据;区域网平差;高程控制;足印影像匹配

中图分类号:P207;P237 **文献标志码:**A

借助控制点采用区域网平差是提升卫星影像几何定位精度的重要手段,其中,获取分布均匀和数量足够的控制点是关键环节^[1-2]。但实际应用中,外业控制点的获取往往费时费力,特别是在沙漠、戈壁、林地甚至境外,控制点获取难度非常大。近年来,随着星载激光测高技术的不断发展,激光测高数据方向性好、测距精度高的特点有力丰富了卫星影像区域网平差控制资料来源,对开展稀少甚至无控制点条件下的影像几何定位处理提供了重要保障。

美国于2003年发射的冰、云和陆地高程卫星(ice, cloud and land elevation satellite, ICESat)搭载的地球科学激光测高系统(geo-science laser altimetry system, GLAS)是当前世界上主要的对地观测激光测高仪^[3],其标称测高精度达到0.15 m^[4]。文献[5]将GLAS数据作为参考高程数据,对TanDEM-X的高程值进行筛选,有效提高了数字高程模型(digital elevation model, DEM)的产品精度。文献[6]将筛选后的GLAS点作为广义高程控制点,将平面和高程控制分

离,开展了GLAS高程控制的区域网平差,显著提升了区域网的高程精度。中国探月工程中嫦娥一号卫星同样搭载了激光测高系统^[7],在月球表面三维地形制作中发挥了重要作用。文献[8]对嫦娥一号激光高度计轨道交叉点不符值进行平差处理和对比分析,提高了交叉点高程不符值中误差,消除或减弱了在此基础上生产的DEM条带现象。文献[9]利用嫦娥一号卫星三线阵光学影像和激光测高数据,采用局部表面约束的联合平差思想进行集成处理,最终生成了月球表面三维数字表面模型,为探测器落月选址奠定基础。2016年中国成功发射了资源三号02卫星,搭载的试验性激光测高仪首次实现了中国对地激光高程测量^[10-11]。文献[12-13]对资源三号02星激光测高数据进行了精度分析,并验证了提升立体影像无控精度的可行性。文献[14]提出了激光测高数据辅助卫星立体影像精化几何模型理论,利用资源三号02星激光测高点作为高程控制进行平差,并对影像几何模型进行精化。综上所述,无论是对地观测还是行星观测,激光测

收稿日期:2021-09-18

项目资助:高分遥感测绘应用示范系统(二期)(42-Y30B04-9001-19/21);高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术(11-Y20A13-9001-17/18);国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0205300)。

第一作者:唐新明,博士,研究员,主要从事航天摄影测量研究。tangxm@lasac.cn

通讯作者:刘昌儒,硕士。liucr@lasac.cn

高数据均发挥了重要作用,其与卫星影像联合区域网平差的理论、方法逐步完善,不仅促进了激光测高技术的发展,也为后续更高分辨率卫星立体数据联合处理提供了借鉴。

高分七号卫星是中国首颗民用亚米级高分辨率光学传输型立体测绘卫星,主要用于1:10 000立体测图生产及更大比例尺基础地理信息产品更新,已于2019年11月成功发射。高分七号卫星除了搭载高分辨率双线阵立体相机外,还搭载中国新一代业务化激光测高系统^[15],其主要设计参数见表1。高分七号卫星激光测高系统具有全波形数据获取能力,可获取丰富的地表高程、坡度、地貌信息,同时其特有的足印相机同步记录激光地面落点位置的地物影像,结合两线阵高分辨率立体相机,可实现多相机与激光测高系统的立体测图。文献[16]根据高分七号卫星双波束激光测高仪的特点,提出了单波束激光指向粗检校、双波束激光指向和测距联合检校的两步法在轨几何检校方案。其检校结果表明,平坦地区高分七号卫星激光测高数据绝对高程精度可达0.1 m。

表1 高分七号卫星激光测高系统主要设计参数

Tab.1 Main Parameters of GF-7 Laser Altimeter System

参数	设计值
激光波束个数	2
激光波长/nm	1 064
激光发射频率/Hz	3
激光光斑大小/m	15
足印影像像元分辨率/m	3.2
足印影像幅宽/km	1.6

为了充分发挥高分七号卫星激光测高数据高程精度极高的优势,充分利用激光测高数据与卫星立体影像同步获取几何定位一致性较好的特点,本文设计了一种激光测高数据辅助高分七号卫星立体影像区域网平差的方法。

1 激光测高数据辅助立体影像区域网平差原理

1.1 基于有理函数模型的立体影像区域网平差

有理函数模型用比值多项式的形式表示正则化后的地面点空间坐标 (X, Y, Z) 与对应的像点坐标 (x, y) 之间的关系,由于形式简单、替代精度高,已经成为当前卫星影像通用几何成像模型,其一般表达式为^[17-18]:

$$\begin{cases} x = \frac{p_1(X, Y, Z)}{p_2(X, Y, Z)} \\ y = \frac{p_3(X, Y, Z)}{p_4(X, Y, Z)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, p_1, p_2, p_3, p_4 为一般多项式,一般取3阶形式,因此共有80个有理多项式系数(rational polynomial coefficient, RPC)。

RPC各参数没有物理意义,并且由于卫星高轨道、窄视场的成像特点,其几何定位误差可通过附加像方的多项式模型进行补偿^[1,19],当多项式取一阶时即为仿射变换模型,其形式为:

$$\begin{cases} \Delta x = a_0 + a_1x + a_2y \\ \Delta y = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases} \quad (2)$$

式中, $(\Delta x, \Delta y)$ 为像方改正数; (x, y) 为利用式(1)求得的像点坐标; $a_i, b_i (i=0, 1, 2)$ 为仿射变换模型参数。

式(1)、式(2)构成了基于有理函数模型的卫星影像区域网平差的基本模型。其中,影像仿射变换参数和连接点物方坐标是要求解的两类未知量,将式(1)、式(2)线性化,可得误差方程:

$$V_1 = A_1 X + B_1 Y_1 - l_1, P_1 \quad (3)$$

式中, $X = [\Delta a_0 \ \Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \Delta b_0 \ \Delta b_1 \ \Delta b_2]^T$ 是影像的仿射变换参数改正数; $Y_1 = [\Delta \text{lon} \ \Delta \text{lat} \ \Delta h]^T$ 是连接点物方坐标改正值; A_1, B_1 为对应的系数矩阵; l_1 为初值计算的常量; P_1 为权值。

1.2 激光测高数据辅助立体影像区域网平差

高分七号激光测高数据高程精度可达0.1 m,远高于其立体影像的原始高程精度,与高精度地面控制点高程精度相当。因此,高分七号激光测高数据完全可以作为高程控制辅助区域网平差,改善立体影像几何成像模型。

激光测高数据辅助立体影像区域网平差的基本原理是利用其极高精度的高程值来约束激光测高点立体影像前方交会的高程值,以两者的差值作为观测值构建约束方程,实现两个高程值的逼近,平差方案如图1所示。具体过程如下:

1) 将获取的高分七号卫星立体影像构建区域网,并进行连接点匹配,获取数量足够、分布均匀的连接点,开展自由网平差,实现区域网影像高精度相对定向;

2) 根据激光测高点三维坐标、足印影像和相对定向后的立体影像,开展基于激光测高点的高程控制点自动量测,获取一定数量的高程控制点;

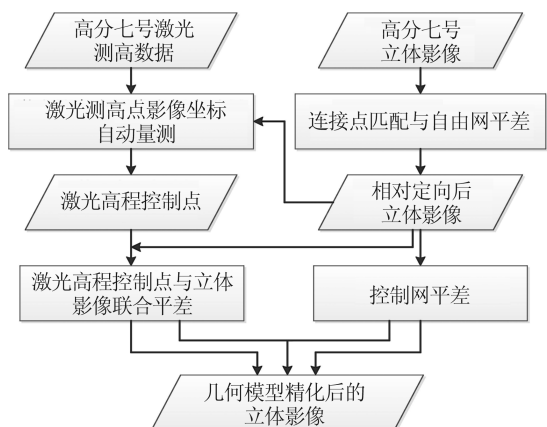


图1 激光测高数据辅助高分七号卫星立体影像区域网平差流程

Fig.1 Flowchart of GF-7 Satellite Stereo Images Block Adjustment Assisted with Laser Altimetry Data

3)对于激光高程控制点,因为与立体影像同平台获取,理论上两者的平面误差特性相似,定位水平相近,此时两者的平面不能进行相互约束,因此仅能利用其高程作为控制,平面坐标作为平差未知量进行解算。此时,误差方程变为:

$$V_2 = A_2 X + B_2 Y_2 - l_2, P_2 \quad (4)$$

式中, X 同式(3); $Y_2 = [\Delta \text{lon} \quad \Delta \text{lat} \quad 0]^T$ 是激光测高点物方坐标改正值; A_2 、 B_2 是相应的系数矩

$$\rho_{(x'_s, y'_s)} = \frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (g_{(x_f+i, y_f+j)} - \bar{g})(g'_{(x_{s_init}+i, y_{s_init}+j)} - \bar{g}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (g_{(x_f+i, y_f+j)} - \bar{g})^2 \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (g'_{(x_{s_init}+i, y_{s_init}+j)} - \bar{g}')^2}} \quad (6)$$

式中, ρ 表示相关系数; g 、 g' 为足印影像和立体影像灰度值; $\bar{g}$ 、 $\bar{g}'$ 为匹配窗口的平均灰度值; w 、 h 表示相关系数搜索窗口的宽和高。

3)以坐标 (x'_s, y'_s) 为初值,按式(7)进行最小二乘匹配,获取子像素级配准点位 (x_s, y_s) :

$$g_{(x, y_s)} = h_0 + h_1 g'_{(a_0 + a_1 x_f + a_2 y_f, b_0 + b_1 x_f + b_2 y_f)} \quad (7)$$

式中, h_0 、 h_1 为影像辐射畸变参数; a_i 、 b_i ($i=0, 1, 2$)为影像几何变换参数。

4)重复步骤1)~3),获取当前激光测高点在所有落点影像上的像点坐标;

5)重复步骤1)~4),获取所有激光测高点在区域网中的影像坐标。

一般情况下,激光测高点的数量远大于立体影像数,但是受到云雾、地表反射等因素的影响,存在激光测高点获取较少甚至失败的情况,此时为了保证激光点的分布,可适当放宽上述方法中相关系数阈值。另一个需要注意的是,由于立体

阵; l_2 是初值计算常量; P_2 是相应权值。

当存在控制点时,其误差方程为:

$$V_3 = A_2 X - l_3, P_3 \quad (5)$$

式中, X 同式(3); A_2 是相应的系数矩阵; l_3 是初值计算常量; P_3 是相应权值。

4)求解上述误差方程,更新立体影像成像几何模型,获取精度提升后的立体影像。

1.3 基于足印影像的激光高程控制点自动量测

每一个高分七号激光测高点都提供了概略的平面坐标和精确的高程值、足印影像以及激光点在足印影像上的像点坐标。因此,可通过足印影像与立体影像的配准,获取激光点在立体影像上的像点位置,即高程控制点自动量测。

与一般连接点匹配不同的是,高分七号激光点在足印影像上的像点坐标为已知,因此需要根据该像点坐标去立体影像上匹配同名点。

1)将激光测高点物方坐标代入立体影像有理函数模型,计算得到当前激光测高点在立体影像上的初略位置,设其像点坐标为 (x_{s_init}, y_{s_init}) 。

2)以 (x_{s_init}, y_{s_init}) 为中心,以激光光斑半径为最大搜索窗口,按式(6)逐点计算其与以激光点在足印影像上的像点坐标 (x_f, y_f) 为中心的区域影像相关系数 ρ ,取最大相关系数点 (x'_s, y'_s) 作为像素级配准点位。计算公式为:

影像与足印影像辐射差异以及异轨数据获取时间间隔内的地物变化等因素,会造成立体影像上匹配地物的差异,即存在高程控制点量测误差,而立体影像高程精度与基高比和像点坐标量测精度存在以下关系:

$$\Delta h = \frac{\sqrt{2} y_e \Delta r}{B/H} \quad (8)$$

式中, Δh 为高程误差; y_e 为影像地面分辨率; Δr 为像点量测误差; B/H 为基高比。

对于高分七号卫星而言,前后视沿轨向夹角分别为 26° 和 5° ,基高比为0.575,则影像上0.3像素的量测误差便会引起约0.48 m的高程误差,因此要特别重视高程控制点的量测精度。

2 联合平差实验与分析

2.1 测试数据与实验区域

实验区位于山东省中部,面积约26 300 km²,

整体南北长、东西窄。区域整体地形起伏从海拔−5 m到1 000 m,其中中部是山地和丘陵,周边以平地为主。共收集7轨64对高分七号立体影像,拍摄时间集中在2020-05—2021-01。共收集同时段激光测高点6轨669个,经过高程控制点自动量测获得265个有效高程控制点。为对平差结果进行验证分析,在实验区由GPS设备测量了105个高精度外业控制点(平面和高程精度均优于0.1 m),并由人工转刺获得像点坐标,像点坐标量测精度优于0.5像素。

由于高分七号卫星采用GPS定轨,其卫星影像和激光测高数据坐标均是基于WGS84坐标系的,与外业控制点坐标系一致,因而无需坐标基准转换。整个测区地形以及控制点、激光测高点分布如图2所示。

2.2 激光测高点对立体影像高程精度影响验证

根据地形坡度以及高程、高差信息,将山东测区划分为平地、丘陵和山地等3个不同地形。将激光测高点作为高程控制点与立体影像进行联合区域网平差,验证激光测高点在不同地形条件下对立体影像几何定位精度的影响效果,其结

果如表2所示。

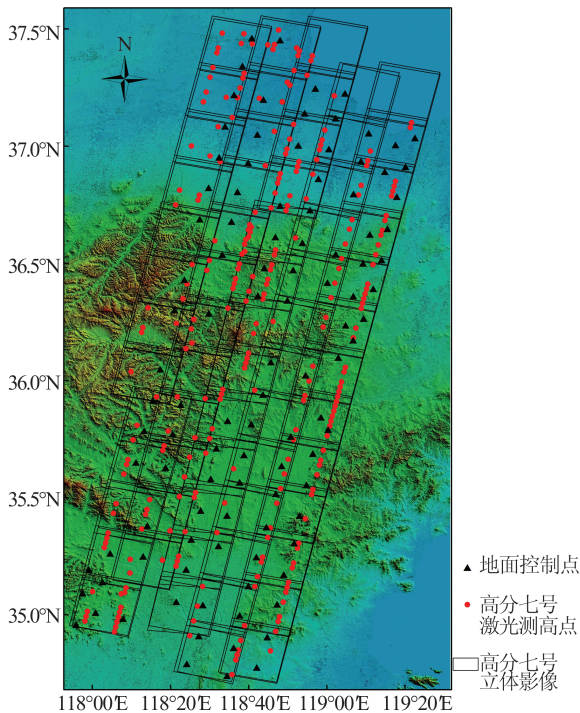


图2 测区地形与影像、激光测高点分布
Fig.2 Experiment Area Terrain, Image, and Laser
Altimetry Data Distribution

表2 山东测区激光测高点对不同地形的平差结果统计表

Tab.2 Statistics of Block Adjustment Assisted with Laser Altimetry Data with Different Terrains in Shandong

平差方案	地形类别	检查点个数	平面精度/m						高程精度/m		
			X中误差	X最大误差	Y中误差	Y最大误差	平面中误差	平面最大误差	中误差	平均差	最大误差
自由网平差	全区	105	4.00	8.47	1.46	3.92	4.26	8.51	7.97	−2.16	30.67
	平地	57	4.51	8.47	1.11	2.72	4.65	8.51	6.42	−3.94	18.93
	丘陵	32	3.69	5.46	1.69	3.92	4.06	6.22	9.37	−2.37	30.67
	山地	16	2.30	5.89	1.98	3.51	3.03	5.92	9.71	4.61	24.28
激光测高点作高程控制	全区	105	3.14	6.41	1.70	4.15	3.57	6.75	0.79	0.48	1.48
	平地	57	3.39	6.41	1.67	4.15	3.78	6.75	0.85	0.53	1.48
	丘陵	32	2.87	4.99	1.61	−3.08	3.29	5.49	0.80	0.54	1.40
	山地	16	2.70	6.04	2.00	3.49	3.36	6.42	0.51	0.15	1.02

从表2可以看出,在没有任何外部控制的条件下,高分七号立体影像整体平面定位精度为4.26 m,最大误差为8.51 m,并且各地形结果相近,无明显地形相关性。自由网平差后的高程精度接近8 m,其中平地最好,丘陵和山地次之,并且后两者的最大误差也明显比平地大,且测区高程平均误差比较明显,达到了2.16 m。从图3中也可以看出,测区平面和高程误差呈现明显的系统性。经过激光测高点辅助区域网平差后,测区整体平面精度为3.57 m,与自由网平差精度相当,同时各地形平面定位精度相近,也无明显的

地形区别,考虑到激光测高数据与立体影像同平台获取,两者的姿轨测量误差特性相近,因而不能像异源数据那样相互补偿或抵消。但是高程精度迅速提升,整体达到0.79 m,相对自由网平差提高近10倍,特别是山地区域,高程精度改善更明显,而且全区域高程均值从自由网时的2.16 m减小到0.48 m,最大误差也仅有1.48 m,表明高程精度得到了整体提高,高程扭曲现象得到了良好改善。从图4中可以看出,因为没有平面约束,联合平差后测区平面误差依然主要为系统误差,整体误差趋势与图3相似,但是高程误差规律不

明显,数值降低很多。以上实验结果可以证实激光测高数据对高程精度具有很好的提升作用,整体高程精度能够优于 0.8 m,最大高程误差小于 1.5 m。

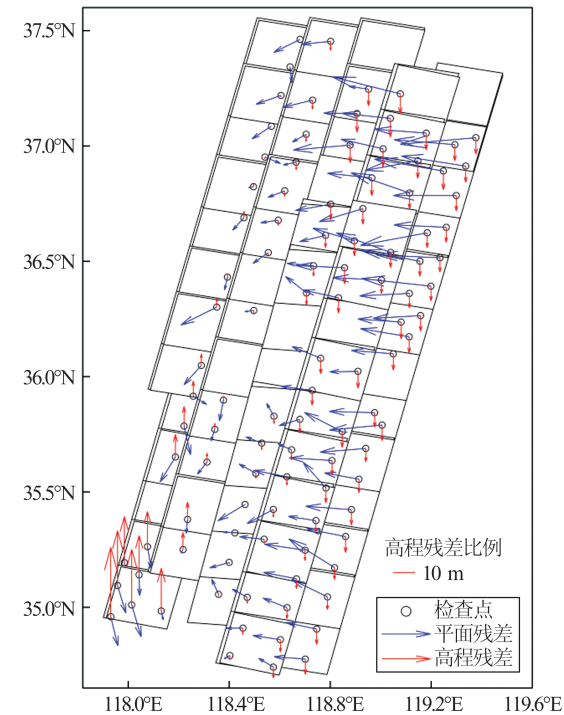


图3 自由网平差残差图
Fig.3 Residual of Free Network Adjustment

2.3 不同控制条件下的立体影像区域网平差

首先,选取不同数量控制点作为常规控制

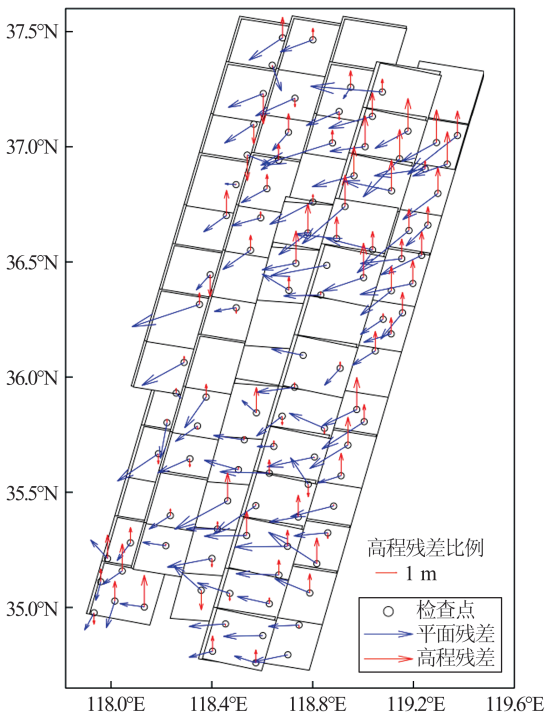


图4 激光测高点做高程控制的区域网平差残差图
Fig.4 Residual of Block Adjustment with Laser Altimetry Data

点,开展控制条件下的区域网平差;然后,将外业控制点与激光测高点组合使用,开展联合区域网平差,验证控制点与激光测高点联合平差对立体影像几何精度的影响效果,实验结果如表 3 所示。

表 3 山东测区不同控制条件下区域网平差结果统计表
Tab.3 Statistics of Block Adjustment with Different Control Conditions in Shandong

激光测高点控制作用	外业控制点个数	均值/m			中误差/m				最大误差/m			
		X	Y	H	X	Y	XY	H	X	Y	XY	H
激光测高点不参与平差	1	-0.06	1.14	-1.98	1.96	2.02	2.81	7.82	-5.69	5.27	6.05	30.52
	4	-0.08	-0.99	-2.59	1.24	1.72	2.12	5.60	-4.84	-4.94	5.11	15.55
	9	-0.66	0.12	-1.69	1.63	1.32	2.10	3.92	-6.66	-3.44	6.68	10.98
	15	-0.43	-0.11	0.01	1.38	1.29	1.89	0.69	-5.30	-3.55	5.34	-1.90
	41	-0.05	0.04	0.08	1.17	1.28	1.73	0.49	-4.11	-3.31	4.18	1.16
激光测高点作高程控制, 外业控制点作平面控制	1	0.13	1.55	0.48	1.27	2.10	2.46	0.79	-4.64	4.84	5.07	1.48
	4	0.39	-0.88	0.48	1.29	1.65	2.09	0.79	4.30	-4.42	4.70	1.48
	9	-0.54	0.31	0.48	1.56	1.36	2.07	0.79	-6.34	3.57	6.37	1.48
	15	-0.42	-0.12	0.48	1.38	1.30	1.89	0.79	-5.23	-3.55	5.28	1.48
	41	-0.05	0.03	0.48	1.18	1.28	1.74	0.79	-4.13	-3.21	4.21	1.48

从表 3 可以看出,仅用少量控制点(1~9 个不等)便可将整个区域网平面精度提高到较高水平。其中,使用位于区域中心的 1 个控制点时,平面精度由自由网平差时的 4.26 m 提高到了 2.81 m,并且平面系统残差也基本消除,如图 5 所示,随着控制点个数的增多,平面精度提升不再明显。但

是,少量控制点对区域网高程精度提升效果不理想,使用区域中心的 1 个控制点时,其高程精度仅比自由网提高 0.15 m,并且同样具有较大的系统性。随着控制点的增多,高程精度有一定提高,但是在布满区域四周以及中心区域的 9 个控制点的情况下也仅能达到 3.92 m 的水平,要想进一步

提高高程精度,需要继续增加控制点数量。当外业控制点作平面控制、激光测高点作高程控制后,测区平面精度与外业控制点作平面控制时的规律一致,其精度由外业控制点决定,但是高程精度提升非常明显,达到了0.79 m,与仅使用激光测高点作高程控制时相当,并且跟外业控制点的多少没有关系。图6显示了使用区域中心1个平面控制点和激光测高点联合平差的残差图,可以看出区域网平面和高程均得到了提高。综合表2和表3可以看出,激光测高点可以极大地提高区域网高程精度,在少量平面控制点的辅助下,其平面精度也能同步提高。这对于节省外业工作量具有重大的实际意义,同时对于测图困难区甚至境外测图也提供了重要的技术和数据支撑。

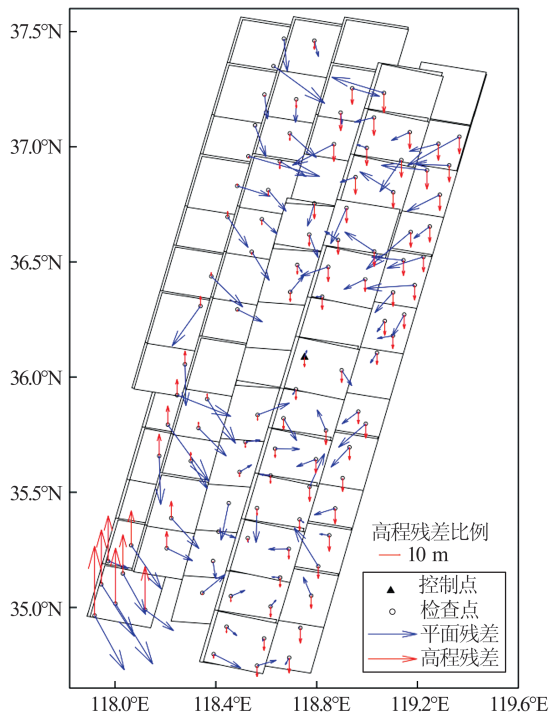


图5 区域中心1个平高控制点平差残差图

Fig.5 Residual of Block Adjustment with One Ground Control Point

进一步分析可知,由于高分七号卫星较小的基高比,仅依靠少量控制点很难取得较好的高程精度。在9个控制点条件下,沿轨向控制点间的单模型个数超过5,高程精度也仅能达到3.92 m,但是在此基础上增加6个控制点,将沿轨向控制点间的单模型数减少至2~3个时,高程精度迅速提升,能够达到0.69 m,当增加至41个控制点时,沿轨向和垂轨向控制点间单模型数在1个左右,其高程精度可进一步提升至0.49 m。可以看出,

高程精度严重依赖控制点的数量和分布,稀少控制点条件下不能取得理想效果。而激光测高点由于精度高、分布均匀且数量较多,足以在全区域对高程进行约束,实现区域整体高程与激光测高点高程的对齐,起到提升高程精度的作用。另外,由于激光测高点没有平面约束,区域网平差后不能有效提升平面精度,但是高分七号卫星影像平面精度主要为系统误差,使用少量平面控制点便可消除绝大部分误差。考虑到实际作业中平面控制点的来源多样性(外业实测点、已有参考底图、开源底图等),因此完全可以使用稀少平面控制点加激光测高数据的组合来提升区域网平面和高程精度。

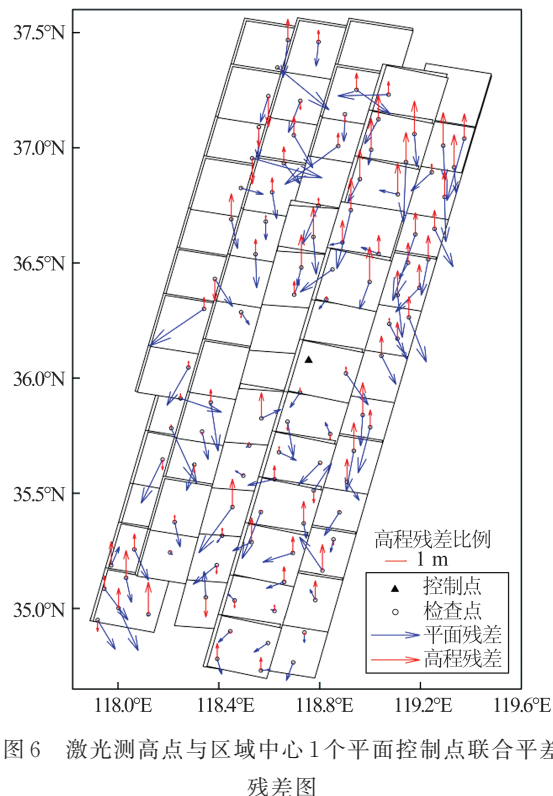


图6 激光测高点与区域中心1个平面控制点联合平差残差图

Fig.6 Residual of Block Adjustment with One Horizontal Control Point and Laser Altimetry Data

3 结语

高分七号卫星激光测高是中国对地高程观测的又一重要工程实践,提供的激光测高数据进一步丰富了卫星影像区域网平差控制资料来源。利用其极高的高程精度,在区域网平差中作为高程控制,可有效提高区域网高程精度,实验区高程中误差可达0.79 m,最大高程误差可优于1.5 m。

高分七号卫星立体影像平面误差主要为系

统误差,少量平面控制点便可有效提高平面精度,因此结合激光测高点,在稀少控制条件下便可同步提高平面和高程精度,这对于减少外业工作量、提高区域网平差作业效率具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Grodecki J, Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Functions[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(1):59-68
- [2] Li Deren, Zhang Guo, Jiang Wanshou, et al. SPOT-5 HRS Satellite Imagery Block Adjustment Without GCPs or With Single GCP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 377-381(李德仁,张过,江万寿,等. 缺少控制点的SPOT-5 HRS影像RPC模型区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(5): 377-381)
- [3] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21):L21S01
- [4] Shuman C A, Zwally H J, Schutz B E, et al. ICE-Sat Antarctic Elevation Data: Preliminary Precision and Accuracy Assessment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7):L07501
- [5] Gonzalez J H, Bchmann M, Scheiber R, et al. Definition of ICESat Selection Criteria for Their Use as Height Reference for TanDEM-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6):2 750-2 757
- [6] Li Guoyuan, Tang Xinming, Gao Xiaoming, et al. ZY-3 Block Adjustment Supported by GLAS Laser Altimetry Data[J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(153):88-107
- [7] Wang Jianyu, Shu Rong, Chen Weibiao, et al. Spaceborne Laser Altimeter of Chang'E-1[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 2010, 40(8):1 063-1 070(王建宇,舒嵘,陈卫标,等. 嫦娥一号卫星载激光高度计[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2010,40(8):1 063-1 070)
- [8] Hu Wenming, Di Kaichang, Yue Zongyu, et al. Corssover Analysis and Adjustment for Chang'E-1 Laser Altimeter Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2):218-224(胡文敏,邸凯昌,岳宗玉,等. 嫦娥一号激光高度计数据交叉点分析与平差处理[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 218-224)
- [9] Wu Bo, Guo Jian, Hu Han, et al. Integration of Chang'E-1 Imagery and Laser Altimeter Data for Precision Lunar Topographic Modeling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12):4 889-4 903
- [10] Tang Xinming, Xie Junfeng, Fu Xingke, et al. ZY3-02 Laser Altimeter On-orbit Geometrical Calibration and Test[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(6):714-723(唐新明,谢俊峰,付兴科,等. 资源三号02星激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. 测绘学报, 2017,46(6): 714-723)
- [11] Tang Xinming, Chen Jiyi, Li Guoyuan, et al. Error Analysis and Preliminary Pointing Angle Calibration of Laser Altimeter on Ziyuan-3 02 Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11):1 611-1 619(唐新明,陈继溢,李国元,等. 资源三号02星激光测高误差分析与指向角粗标定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11):1 611-1 619)
- [12] Li Guoyuan, Tang Xinming. Analysis and Validation of ZY-3 02 Satellite Laser Altimetry Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12):1 939-1 949(李国元,唐新明. 资源三号02星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12):1 939-1 949)
- [13] Li Guoyuan, Tang Xinming, Gao Xiaoming, et al. Integration of ZY3-02 Satellite Laser Altimetry Data and Stereo Images for High-Accuracy Mapping[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2018, 84(9):569-578
- [14] Cao Ning, Zhou Ping, Wang Xia, et al. Refined Processing of Laser Altimeter Data-Aided Satellite Geometry Model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(4): 599-610(曹宁,周平,王霞,等. 激光测高数据辅助卫星成像几何模型精化处理[J]. 遥感学报, 2018,22(4):599-610)
- [15] Tang Xinming, Xie Junfeng, Liu Ren, et al. Overview of the GF-7 Laser Altimeter System Mission[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(2): e2019EA000777
- [16] Tang Xinming, Xie Junfeng, Mo Fan, et al. GF-7 Dual-beam Laser Altimeter On-orbit Geometric Calibration and Test Verification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(3):384-395(唐新明,谢俊峰,莫凡,等. 高分七号卫星双波束激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. 测绘学报, 2021,50(3):384-395)
- [17] Tao C V, Hu Yong. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing[J]. *Photogrammetric Engineering and Re-*

- ote Sensing*, 2001, 67(12):1 347-1 357
- [18] Tang Xinming, Liu Changru, Zhou Ping, et al. Satellite-Imagery Geometric Accuracy Improvement Based on Direct Correction of Dominant Coefficients [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2020, 86(4):215-224
- [19] Wang Mi, Yang Bo, Li Deren, et al. Technologies and Applications of Block Adjustment Without Control for ZY-3 Images Covering China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4):427-433 (王密,杨博,李德仁,等. 资源三号全国无控制整体区域网平差关键技术及应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4): 427-433)

GF-7 Satellite Stereo Images Block Adjustment Assisted with Laser Altimetry Data

TANG Xinming¹ LIU Changru¹ ZHANG Heng¹ WANG Xia¹ LI Guoyuan¹
MO Fan¹ LI Fengxiang²

¹ Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China

² Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan 250102, China

Abstract: Objectives: Improving the accuracy of block adjustment with few or even no ground control points (GCP) is one of the core issues for high-precision mapping of areas difficult to get GCP, and it is also a major technical difficulty. In order to make full use of the footprint image and the excellent high accuracy of elevation, and the high relative accuracy between the laser altimetry data and stereo images, we propose a combined adjustment method of Gaofen-7 (GF-7) satellite stereo images aided with laser altimetry data. **Methods:** In this method, the elevation control points are automatically extracted by registering the laser footprint images and stereo images, and then they are used as the vertical control in the combined adjustment to improve the elevation accuracy. **Results:** The combined block adjustment experiments performed in Shandong with different terrains show that using only laser altimetry data as elevation control, the root mean square errors of elevation can be significantly improved from the original 7.97 m to 0.79 m, and the maximum elevation error is better than 1.5 m. **Conclusions:** The experimental results reveal that the proposed method can substantially improve the elevation accuracy of satellite imagery. Additionally, with integration of few horizontal control points, the plane accuracy and elevation accuracy can be simultaneously improved. The proposed method is of great significance to reduce the field survey and improve the efficiency of block adjustment.

Key words: Gaofen-7 satellite; satellite laser altimetry data; block adjustment; height control; footprint image match

First author: TANG Xinming, PhD, professor, specializes in space photogrammetry. E-mail: tangxm@lasac.cn

Corresponding author: LIU Changru, master. E-mail: liucr@lasac.cn

Foundation support: The Special Fund for High Resolution Images Surveying and Mapping Application System(42-Y30B04-9001-19/21); the Fund for Universal Key Technology Research on High Resolution Earth Observation System Application (11-Y20A13-9001-17/18); National Key Research and Development Program for Strategic International Scientific and Technological Innovation Cooperation of China (2016YFE0205300).

引文格式: TANG Xinming, LIU Changru, ZHANG Heng, et al. GF-7 Satellite Stereo Images Block Adjustment Assisted with Laser Altimetry Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10):1423-1430. DOI:10.13203/j.whugis.20210417 (唐新明, 刘昌儒, 张恒, 等. 高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10):1423-1430. DOI: 10.13203/j.whugis.20210417)