

资源三号 03 星立体影像与激光测高点联合区域网平差处理及精度验证

周平¹, 唐新明¹, 李丹丹², 王霞¹

1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

2. 清华大学 地球系统科学系, 北京 100084

摘要: 利用国产卫星影像开展全球范围地理信息资源建设的前提条件之一是提升卫星影像无地面控制条件下几何精度水平。2020年7月成功发射资源三号 03 星 (ZY3-03) 是资源三号系列卫星中的第3颗高分辨率立体测绘卫星, 主要用于全球范围 1:5 万比例尺测图应用。卫星搭载了3台全色线阵推扫式光学相机和一台多光谱相机, 可获取优于 2.5 m 分辨率的三线阵立体影像和 5.8 m 分辨率的多光谱影像。为了提升卫星影像的高程精度, 卫星还设计搭载了一台单波束激光测高仪, 可同步获取高精度激光测高点。本文提出了一种 ZY3-03 星激光测高点与立体影像联合区域网平差处理方法。利用激光测高点和同轨获取的正视影像相对平面误差较小的特性, 准确获取激光测高点在立体影像上的像方位置; 将激光测高点作为立体影像高程控制, 并以整轨立体影像为单位开展立体影像与激光测高点的联合区域网平差, 实现立体影像高程精度大幅提升。选取黑龙江省中部地区和河北省太行山地区的 ZY3-03 星三线阵立体影像及其同轨获取的激光测高点开展联合区域网平差试验, 结果表明, 平地 and 丘陵地形区域的 ZY3-03 星立体影像的高程中误差从 5.27 m 降低至 2.58 m, 山地地形区域的 ZY3-03 立体影像的高程中误差从 11.25 m 降低至 4.45 m, 均能满足中国 1:5 万比例尺立体测图的精度要求。

关键词: 遥感, 资源三号 03 星, 三线阵立体影像, 激光测高点, 联合区域网平差, 几何精度

中图分类号: P236/P2

引用格式: 周平, 唐新明, 李丹丹, 王霞. 2024. 资源三号 03 星立体影像与激光测高点联合区域网平差处理及精度验证. 遥感学报, 28(4): 1089-1100

Zhou P, Tang X M, Li D D and Wang X. 2024. Combined adjustment of the stereo imagery and laser altimetry points of the ZY3-03 Satellite and its accuracy verification. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 1089-1100 [DOI: 10.11834/jrs.20221117]

1 引言

2020年7月25日成功发射的资源三号 03 星 (ZY3-03) 是资源三号卫星系列的第3颗卫星, 它与2012年1月9日发射的资源三号 01 星 (ZY3-01) 和2016年5月30日发射的资源三号 02 星 (ZY3-02) 一道组网运行, 形成了中国首个民用 1:5 万比例尺光学立体测绘卫星星座, 主要服务于全球范围 1:5 万比例尺的立体测图。由于境外区域高精度控制资料获取十分困难, 因此开展全球范围 1:5 万比例尺立体测图的最大难点是确保在无地面控制点条件下卫星影像几何精度能达到 1:5 万测图精度要

求。国内外学者针对 ZY3-01 和 ZY3-02 星影像开展了大量精度评价和分析工作 (唐新明等, 2012; Tang等, 2015a, 2015b; Zhou等, 2017), 表明资源三号系列卫星立体影像在无地面控制点条件下的平面中误差一般介于 6—20 m, 基本能够满足中国 1:5 万比例测图精度要求 (即平地、丘陵、山地和高山地地形区域的平面中误差应分别优于 25 m、25 m、37.5 m 和 37.5 m), 而高程中误差一般介于 5—10 m, 无法满足中国 1:5 万比例测图精度要求 (即平地、丘陵、山地和高山地地形区域的高程中误差应分别优于 3 m、5 m、8 m 和 14 m)。因此提升无地面控制点条件时卫星影像的高程精度, 成为了保障

收稿日期: 2021-03-05; 预印本: 2022-03-08

基金项目: 高分遥感测绘应用示范系统 (二期) 项目 (编号: 42-Y30B04-9001-19/21); 自然资源三维确权登记卫星影像支撑项目 (编号: 121133000000190009)

第一作者简介: 周平, 研究方向为航天遥感数据处理理论和应用研究。E-mail: zhoup@lasac.cn

资源三号卫星影像开展全球范围立体测图的重要前提。为此, ZY3-03 星专门搭载了一台单波束激光测高仪, 用于在获取立体影像的同时, 同步获取高精度的激光测高点。卫星激光测高是利用卫星平台搭载的激光测高仪发射激光脉冲信号, 并记录经地表反射后的激光回波信息, 实现地表高程信息的测定(李鑫等, 2014), 具有测距精度高和重复频率高等特点。根据 ZY3-03 星的设计指标, 以及卫星在轨测试情况来看, 其激光测高点的高程中误差在平原地区优于 0.5 m、丘陵地区优于 0.8 m、山地地区优于 1 m; 而其三线阵立体影像精度与 ZY3-01 和 ZY3-02 星基本相当。因此如何利用激光测高点提升 ZY3-03 星立体影像的高程精度, 成为了 ZY3-03 星影像能否实现全球范围 1:5 万比例尺立体测图应用的关键。

一些学者针对立体影像与激光测高点的联合处理开展了相关研究。目前针对地外星球的光学影像和激光测高数据联合处理方面的研究相对较多。Yoon 和 Shan (2005) 将 1996 年发射的火星全球勘探者号宇宙飞船上的激光测高仪 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) 的激光测高数据和轨道勘测相机 MOC (Mars Orbiter Camera) 影像开展联合区域网平差, 以 MOLA 激光点的测距值作为约束, 将 MOC 影像与 MOLA 激光点的相对高程精度从 325 m 提升到几十米。Lin 等 (2010) 以 MOLA 生产的数字高程模型 (DEM) 作为控制, 实现了 HRSC 和 HiRISE 影像 (2006 年发射的火星勘测轨道飞行器上的光学影像) 的定向和相互间的配准。Rosiek 等 (2001) 将美国 Clementine 探月卫星的激光高程点作为高程控制, 提升 Clementine 光学影像的几何精度。Di 等 (2010) 提出了一种利用嫦娥一号卫星激光测高仪生成 DEM 为控制, 提升三线阵 CCD 立体相机立体影像的方法。随后 Di (2012) 还提出了针对激光数据的轨道交叉点分析和平差, 进一步提升三线阵立体影像的几何与激光测高数据的配准精度。由于地外星球探测的环境和观测要求与对地观测存在较大差异, 如地外星球观测卫星大多采用低轨道重复观测, 获取的激光点密度较高, 与光学影像联合处理时激光点的冗余观测值较多; 且地外星球的激光点与光学影像联合处理的精度要求也远远低于对地观测的要求, 一般达到几米甚至数十米即可。因此这些研究与对地观测中的激光点与光学影像联合处理有较大差别。

在对地观测领域, Yamanokuchi 等 (2007) 和 E 等 (2009) 将美国 ICESat 卫星搭载的激光测高仪器—GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 数据作为高程控制, 直接用于其他光学卫星影像的区域网平差。Li 等 (2016) 和 Zhou 等 (2017) 提出了将 GLAS 激光高程点作为高程控制与资源三号 01 星立体影像进行联合平差, 可将 ZY3-01 星立体影像的高程精度提升到中国 1:50000 比例尺水平。ZY3-02 星也曾搭载过一台功能简单的测试性的激光测高仪, 在生命周期内获取了 44 轨激光测高数据, 共筛选出 8435 个位于地表平坦区域的精度可靠的激光高程点 (Xie 等, 2018)。Li 等 (2018)、曹宁等 (2018) 和 Zhang 等 (2019) 通过优选部分精度较高的激光测高点, 开展了 ZY3-02 星激光测高点和三线阵立体影像联合区域网平差试验, 有效提升了光学立体影像的高程精度。由于 GLAS 和 ZY3-02 星的激光测高点没有足印影像, 在利用其作为高程控制点时, 只能根据激光点的经纬度坐标和高程值, 通过立体影像的成像几何模型来计算获取激光点在影像上的像点位置坐标。因此在丘陵、山地地形区域, 必然要求激光测高点与立体影像的相对平面误差极小, 方能避免因激光测高点在影像上的像点位置与其真实位置误差过大而引入额外的高程误差。然而 GLAS 和 ZY3-02 星激光测高点与立体影像的相对平面误差无法保证。因此, 前述的这些研究均主要挑选分布于平原地形的激光测高点作为控制, 基本舍弃了山地和高山地等区域的激光点, 在激光点的使用上有一定的局限性, 从而影响了地表起伏区域的立体影像几何精度的提升效果。

本文针对 ZY3-03 星激光测高点和光学立体影像同平台获取的特点, 设计了 ZY3-03 星三线阵立体影像和激光测高点的联合区域网平差方法。将激光高程点作为控制, 利用同轨获取的激光测高点和正视影像相对平面误差较小等特性, 准确获取各类地形区域的激光测高点在三线阵立体影像上的像方坐标; 并以条带为单位将整轨三线阵立体影像构建平差区域网, 开展同轨获取的激光测高点与立体影像的联合区域网平差, 达到提升各类地形区域的立体影像高程精度的目的。最后选择了中国黑龙江省中部区域和河北省太行山区域作为试验区, 利用三线阵立体影像和其对应的激光测高点开展多组联合区域网平差试验, 并对试验结果进行了分析。

2 ZY3-03星简介

ZY3-03星运行于505 km高度的太阳同步回归圆轨道，降交点地方时为上午10:30，可对地球南北纬84°以内的地区实现无缝影像覆盖，轨道重返周期为59 d，±32°侧摆能力保障了5 d时间内可对同一地区进行重访，设计寿命为8 a。卫星搭载了3台全色线阵列推扫式光学相机和一台包含近红外、红、绿和蓝4个谱段的多光谱相机，3台全色相机分别为沿轨向前倾22°的前视相机、近乎垂直对地的正视相机和沿轨向后倾22°的后视相机，可以同时获取三线阵立体影像和4谱段多光谱影像。其中正视相机的地面分辨率2.1 m，前视和后视相机的地面分辨率2.5 m，光谱相机的地面分辨率5.8 m。幅宽均大于51 km。光学相机主要设计指标如表1所示。

表1 光学相机主要设计指标
Table 1 Main design specifications of cameras

指标	正视相机	前视相机	后视相机	多光谱相机
谱段数量	1	1	1	4
空间分辨率/m	2.1	2.5	2.5	5.8
幅宽/km	50	50	50	52
观测倾角/(°)	0	+22	-22	0
基高比	0.89			—
光谱范围/μm	0.5—0.8			0.45—0.52
				0.52—0.59
				0.63—0.69
				0.77—0.89

ZY3-03星的激光测高仪采用多通道阈值法获取激光测高仪到地面距离，再结合卫星姿态和轨道测量数据，以及激光指向角度等，获得激光足印点在地面上的三维坐标。ZY3-03星激光测高仪并没有配备足印相机，无法获取激光足印区域的地面光学影像，这对激光测高点在立体影像上的准确定位带来了不利影响。激光测高仪主要设计指标如表2所示。

表2 激光测高仪主要设计指标
Table 2 Main design specifications of laser altimeter

指标	参数
激光波束	1波束
重复频率/Hz	2
测距精度/m	≤1
单脉冲能量/mJ	≥180
激光器工作波长/μm	1.064
地面足印大小	50 m@500 km
激光脉冲宽度/ns	≤4
作用距离/km	500±20
足印影像	无

ZY3-03星三线阵立体影像和单波束激光测高数据获取方式如图1所示。

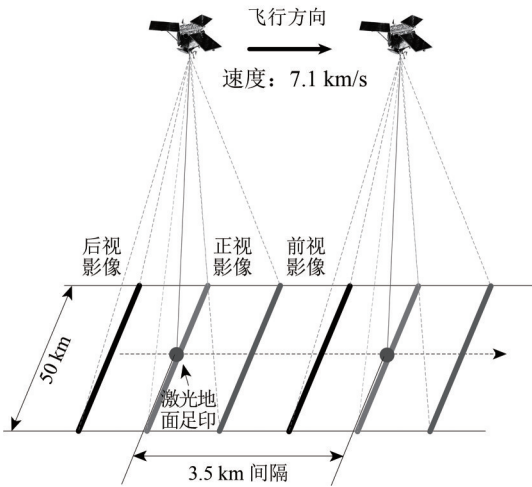


图1 “三线阵相机+单波束激光测高仪”数据获取方式
Fig. 1 Acquisition method of triple linear-array stereo imagery and laser altimetry point

3 立体影像与激光测高点联合区域网平差方法

3.1 联合处理步骤

ZY3-03星的激光测高仪以2 Hz的观测频率进行对地观测，理想情况下，每标准景立体影像范围（注：每标准景影像成像时长约7 s）内可获取14个激光测高点，但由于受到云斑、激光地面足印范围内地表起伏或地物复杂等因素影响，有相当部分激光测高点精度较低而无法使用。ZY3-03星的激光地面处理系统会根据激光回波数据进行处理和判断，仅对外分发精度可靠的激光测高点，简称有效的激光测高点。

ZY3-03星的立体影像产品是以标准景（每景影像宽度为幅宽，长度约为51 km）为单位进行存储和分发的，为了更加有效利用激光测高点，避免部分景影像上由于某些原因导致有效的激光测高点较少甚至缺乏等情况，本文将以轨道为单位，开展整轨立体影像和其对应激光测高点的联合区域网平差。具体流程如图2所示，描述如下：

- (1) 将整轨三线阵立体影像构建平差区域网，在三线阵立体影像内部匹配密集的连接点，在相邻的三线阵立体影像之间应匹配适量的公共连接点。
- (2) 利用本文3.2节所述方法，获取所有有效

的激光测高点在立体影像的像点位置坐标, 并将其作为高程控制点。

(3) 利用前述两步获取的连接点和高程控制点, 采用本文3.3节所述区域平差模型, 针对光学立体影像开展区域网平差, 实现光学立体影像的高程精度提升, 最后根据平差结果更新光学立体影像的成像几何模型。

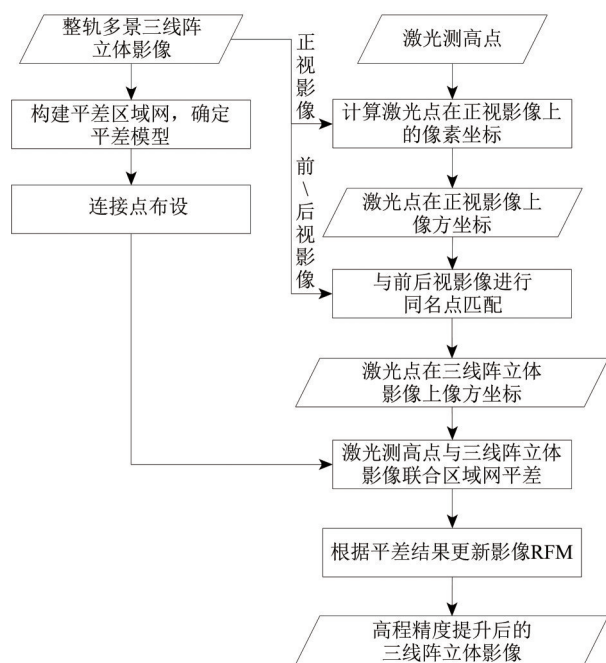


图2 激光测高点与立体影像联合区域网平差处理流程图
Fig. 2 Workflow of the combined adjustment of stereo imagery and laser altimetry point

3.2 立体影像上激光测高点像点坐标获取

将激光测高点作为立体影像的高程控制点, 核心步骤是获取激光测高点在立体影像上的准确像方坐标。若激光测高点在立体影像上的像点位置与实际像点位置偏差较大, 当地表起伏较大时, 等效于为激光测高点引入了额外的高程误差, 将会影响联合区域平差效果。由于ZY3-03星的激光测高仪没有配备足印相机, 因此无法通过将立体影像与激光足印影像匹配的方式来准确获取激光测高点在立体影像上的像方坐标。为此, 本文设计了如下获取激光测高点在立体影像上的像方坐标的策略:

(1) 根据激光测高点的经纬度坐标和高程值, 通过正视影像的有理函数模型 (RFM), 计算获取激光测高点在正视影像上的像方坐标, 简称正视影像上的激光像点。

(2) 分别将前、后视影像与正视影像开展高精度的同名点匹配, 获取正视影像上的激光像点在前、后视影像上的同名点, 亦即前视影像和后视影像上的激光像点。

激光测高点和同轨正视影像的平面相对误差极小是确保上述步骤正确性和合理性的前提和关键。光学影像和激光测高点出现几何误差是卫星工作过程中受平台自身和外部环境的各类误差综合影响的结果。影响光学影像几何精度的误差主要包括外方位元素误差 (卫星姿态测量误差、卫星轨道测量误差、时间同步误差) 和内方位元素误差 (CCD线阵误差、镜头畸变) 等 (周平等, 2018)。影响激光测高点精度的误差主要包括外方位元素误差 (卫星姿态测量误差、卫星轨道测量误差、时间同步误差)、内方位元素误差 (激光测距值测量误差、激光参考点坐标误差)、激光测距值测量误差、环境误差和被观测目标误差等 (李国元, 2017)。

在光学影像和激光测高数据的几何处理过程中, 针对光学相机和激光测高仪开展了在轨几何检校, 已经有效消除卫星平台上的各类系统误差, 包括星上设备安装误差 (如光学相机、激光测高仪、其他测量装置等的安装误差)、光学相机内方位元素误差、激光测高仪内方位元素误差、激光测距值误差, 以及姿态和轨道测量数据中的系统误差部分。由于ZY3-03星采用了精密授时和守时技术, 时间同步精度可以优于20 us, 时间同步误差基本可以忽略。利用卫星下传的双频GPS机的载波相位信号进行事后处理, ZY3-03星精密定轨数据的精度优于3 cm (赵春梅和唐新明, 2013), 其影响也可以忽略。此外, 激光测高数据的处理过程中, 还采用相关模型有效消除了大气和潮汐等环境误差的影响 (Herring和Quinn, 2012; Fricker等, 2012)。因此影响ZY3-03星光学影像和激光测高点几何精度的误差来源主要为姿态测量误差。

姿态俯仰角误差 $\Delta\varphi$ 将造成影像或激光测高点沿轨向平面定位误差 dp_{pitch} , 姿态滚动角误差 $\Delta\omega$ 将造成影像或激光测高点垂轨向平面定位误差 dp_{roll} (周平等, 2018):

$$\begin{aligned} dp_{pitch} &= H \cdot \Delta\varphi \cdot (1 + \tan^2(\varphi)) \\ dp_{roll} &= H \cdot \Delta\omega \cdot (1 + \tan^2(\omega)) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, H 为轨道高度, φ 和 ω 分别为光学相机主光

轴指向角和激光测高仪指向角的俯仰角和滚动角。

姿态偏航角误差 $\Delta\kappa$ 将导致影像或激光测高点的垂轨向平面定位误差 $dp_{yaw\perp}$ 和沿轨向平面定位误差 $dp_{yaw\parallel}$ 分别为 (周平等, 2018):

$$\begin{aligned} dp_{yaw\parallel} &= \frac{Y}{2} \cdot \sin(\Delta\kappa) \\ dp_{yaw\perp} &= \frac{Y}{2} \cdot (1 - \cos(\Delta\kappa)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Y 为影像像点或激光测高点距离偏航旋转中心的距离。

在ZY3-03星设计中, 激光测高仪的指向角和正视相机主光轴指向角均垂直对地 (即角度一致)。虽然实际在轨运行时受卫星发射和运行环境变化等因素影响, 两者的角度可能会发生细微变化, 但在轨检校结果表明, 两者的相对角度变化在5角秒以内, 因此可以认为两者的姿态俯仰角、滚动角和偏航角是相同的。同时, 激光测高点和正视影像上足印范围内的像点的 Y 值也可以认为是一致的。此外, 根据激光测高仪与正视相机在星上的安装位置关系, 两者获取同一地面区域数据的时间间隔应小于0.1 s。由于ZY3-03星基本不存在姿态高频颤振, 因此在一个较短的时间间隔内, 卫星姿态误差可以视为一个系统性误差, 则两者的俯仰角误差、滚动角误差和偏航角误差可以认为是相同的。根据式(1)可知, 姿态俯仰角误差或滚动角误差导致两者的平面误差是一致的。根据式(2)可知, 姿态偏航角误差导致两者的平面误差也是一致的。因此姿态误差导致的两者相对平面误差几乎为0。

综上所述, 正视影像和同轨获取的激光测高点的平面相对误差极小, 因此采用本文方法获取的激光测高点在立体影像上的像点位置与实际真实位置偏差也极小, 必然也远远小于ZY3-03星激光测高点的地面足印半径 (约25 m), 因此可以忽略由激光测高点像点位置偏差带来的额外高程误差影响。

3.3 区域网平差模型

ZY-3卫星基础影像产品附带RFM, RFM是利用有理多项式建立影像的像素坐标与其对应的地面点大地坐标之间的数学映射关系。本文的区域网平差基于RFM开展, 并构建一个影像像方坐标点的仿射变换模型, 对RFM计算获得的像点坐标进行误差改正, 其基本方程定义如下 (Fraser和Yamakawa, 2004; Fraser和Hanley, 2005):

$$\begin{aligned} r + \Delta r &= \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \\ c + \Delta c &= \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 为避免计算过程中参数数值量级差别过大而引入舍入误差, 需要将影像像点坐标和对应的地面点坐标归一化到-1—1, 以增强参数求解的稳定性。 (X, Y, Z) 和 (r, c) 分别是归一化后的地面点坐标和影像坐标。 $P_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别表示一般多项式, 式中各变量 X_n, Y_n, Z_n 的幂均不超过3次, 所有变量的幂之和也不超过3次, 其形式如下:

$$\begin{aligned} P_i &= a_{i0} + a_{i1}Z + a_{i2}Y + a_{i3}X + a_{i4}ZY + a_{i5}ZX + \\ &\quad a_{i6}YX + a_{i7}Z^2 + a_{i8}Y^2 + a_{i9}X^2 + a_{i10}ZYX + \\ &\quad a_{i11}Z^2Y + a_{i12}Z^2X + a_{i13}Y^2Z + a_{i14}Y^2X + \\ &\quad a_{i15}ZX^2 + a_{i16}YX^2 + a_{i17}Z^3 + a_{i18}Y^3 + a_{i19}X^3 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $a_{ij} (i = 1, 2, 3, 4; j = 0, 1, \dots, 19)$ 为有理多项式系数。

$(\Delta r, \Delta c)$ 为像点坐标 (r, c) 的系统误差像方补偿值, 其值为

$$\begin{aligned} \Delta r &= a_0 + a_1 \cdot r + a_2 \cdot c \\ \Delta c &= b_0 + b_1 \cdot r + b_2 \cdot c \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$ 为仿射变换参数。

本文采用的联合区域网平差误差方程表述如下:

$$\begin{aligned} V_1 &= A_1 t + B_1 x_1 - L_1 - P_1 \\ V_2 &= A_2 t + B_2 x_2 - L_2 - P_2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 一共包括两类误差方程, 第一类误差方程为立体影像上连接点构建的误差方程, 将RFM的仿射变换参数和连接点对应的地面三维坐标作为未知数; 第二类误差方程为激光测高点构建的误差方程, 将RFM的仿射变换参数和激光点地面经纬度坐标作为未知数。 $V_1 = [v_{R1} \ v_{C1}]^T$ 和 $V_2 = [v_{R2} \ v_{C2}]^T$ 分别为连接点和激光点在影像上行、列坐标观测值残差向量; $t = [\Delta a_0 \ \Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \Delta b_0 \ \Delta b_1 \ \Delta b_2]^T$ 为影像RFM的仿射变化补偿参数的改正数向量; $x_1 = [\Delta X_{tie} \ \Delta Y_{tie} \ \Delta Z_{tie}]^T$ 为连接点对应地面大地坐标的改正数向量; $x_2 = [\Delta X_{laser} \ \Delta Y_{laser}]^T$ 为激光测高点地面经纬度的改正数向量; $A = \begin{bmatrix} 1 & r & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r & c \end{bmatrix}$ 是未知数 t 对应的偏导数系数矩阵;

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial X_{tie}} & \frac{\partial r}{\partial Y_{tie}} & \frac{\partial r}{\partial Z_{tie}} \\ \frac{\partial c}{\partial X_{tie}} & \frac{\partial c}{\partial Y_{tie}} & \frac{\partial c}{\partial Z_{tie}} \end{bmatrix} \text{ 和 } B_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial X_{laser}} & \frac{\partial r}{\partial Y_{laser}} \\ \frac{\partial c}{\partial X_{laser}} & \frac{\partial c}{\partial Y_{laser}} \end{bmatrix}$$

分别是未知数 x_1 和 x_2 对应的偏导数系数矩阵; $L_i =$

$\begin{bmatrix} r - r^0 \\ c - c^0 \end{bmatrix} (i = 1, 2)$ 为利用初值代入观测方程计算得到的常数项, (r^0, c^0) 为利用未知数的近似值通过 RFM 计算出的连接点像点行、列坐标; $P_i (i = 1, 2)$ 为各观测值的权矩阵, 通常各类观测值的权值由他们的先验信息确定, 一般可取观测值 10 倍先验标准差, 并在每次平差迭代计算后重新计算各类观测值的权。

平差求解时, 通过对方程式 (6) 构建改化法方程, 分别消去连接点对应的地面三维坐标和激光点地面经纬度坐标等未知数, 达到降低未知数数量, 简化平差模型的目的。则有:

$$\begin{aligned} [A_1^T P_1 A_1 - A_1^T P_1 B_1 (B_1^T P_1 B_1)^{-1} B_1^T P_1 A_1] \cdot t = \\ A_1^T P_1 L_1 - A_1^T P_1 B_1 (B_1^T P_1 B_1)^{-1} \times (B_1^T P_1 L_1) \\ [A_1^T P_2 A_1 - A_1^T P_2 B_2 (B_2^T P_2 B_2)^{-1} B_2^T P_2 A_1] \cdot t = \\ A_1^T P_2 L_2 - A_1^T P_2 B_2 (B_2^T P_2 B_2)^{-1} \times (B_2^T P_2 L_1) \end{aligned} \quad (7)$$

联立上述两个方程, 则可得到:

$$N \times t = M \quad (8)$$

式中,

$$\begin{aligned} N = A_1^T P_1 A_1 + A_1^T P_2 A_1 - A_1^T P_1 B_1 \times \\ (B_1^T P_1 B_1)^{-1} \times B_1^T P_1 A_1 - A_1^T P_2 B_2 \times \\ (B_2^T P_2 B_2)^{-1} \times B_2^T P_2 A_1 \\ M = A_1^T P_1 L_1 + A_1^T P_2 L_2 - A_1^T P_1 B_1 \times \\ (B_1^T P_1 B_1)^{-1} \times B_1^T P_1 L_1 - A_1^T P_2 B_2 \times \\ (B_2^T P_2 B_2)^{-1} \times B_2^T P_2 L_2 \end{aligned} \quad (9)$$

则 t 的最小二乘解为

$$t = N^{-1} M \quad (10)$$

4 试验与分析

4.1 试验区域和试验数据

选定中国黑龙江省中部地区和河北省太行山地区作为试验区域, 为后文叙述方便, 分别简称为黑龙江试验区和河北试验区。

黑龙江试验区面积约 5 万 km^2 , 地形起伏从海拔 120 m 到 510 m, 其中南部是平地地形, 北部主要是丘陵地形。试验数据选用 2020 年 11 月 4 日获取的一轨三线阵立体影像和对应的激光测高点数据。三线阵立体影像为传感器校正影像产品, 共计 12 景, 影像附带 RFM。有效的激光测高点数为 81 个, 由于受到云斑、地表起伏等因素影响, 导致有三景立体影像上没有激光测高点分布。河北试验区面积约为 5 万 km^2 , 地形起伏从海拔 50 m 到 2100 m, 主要是山地地形。试验数据选用 2020 年

9 月 4 日获取的一轨三线阵立体影像和对应的激光测高点数据。三线阵立体影像为传感器校正影像产品, 共计 7 景, 影像附带 RFM。由于受到山地地形影响, 激光测高点的有效率比较低, 有效的激光测高点的点数仅为 6 个, 中间连续 4 景影像上没有激光测高点分布, 其余 3 景影像上每景只有 2 个激光测高点。

此外, 分别收集到黑龙江试验区和河北试验区内的 270 个和 115 个采用全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 连续运行参考站技术测量的高精度外业 GPS 点作为控制点和检查点。所有 GPS 点的大地基准为 WGS84 坐标系, 高程基准为 WGS84 椭球高, 平面和高程精度均优于 0.1 m。黑龙江试验区和河北试验区的试验数据地理分布分别如图 3 和图 4 所示。

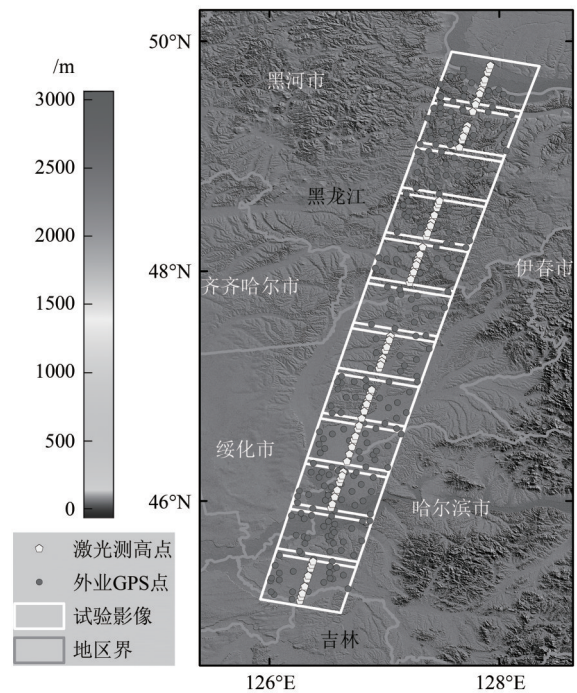


图 3 黑龙江试验区及试验数据分布示意图

Fig. 3 Distribution of the experimental data in the Heilongjiang experimental area

4.2 试验方案和过程

采用人工判读和量测方式获取 GPS 点在试验影像上的像点坐标, 像点量测精度优于 0.5 像元。针对每个试验区均开展了如下 5 组区域网平差试验:

(1) 开展无任何控制条件下的立体影像自由网平差;

(2) 选取适量 GPS 点作为平高控制点, 针对

立体影像开展控制网平差；

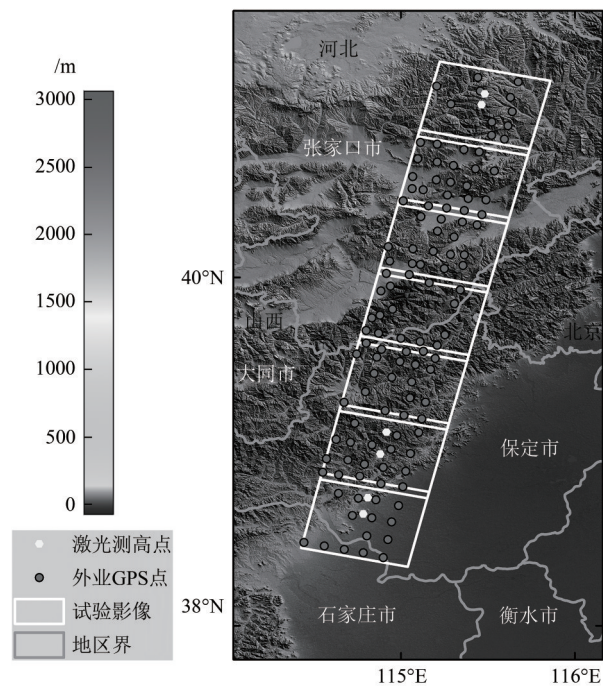


图4 河北试验区及试验数据分布示意图
Fig. 4 Distribution of the experimental data in the Hebei experiment area

- (3) 采用本文所述方法，将激光测高点作为高程控制，开展立体影像与激光测高点联合区域网平差；
- (4) 采用本文所述方法，将激光测高点作为

高程控制，同时选取少量GPS点作为平面控制点，开展立体影像与激光测高点联合区域网平差；

(5) 将所有GPS作为平高控制点、激光测高点作为高程检查点，针对立体影像开展区域网平差。

每个试验区的5组区域网平差均采用同一套连接点。采用影像匹配技术，平均每个三线阵立体像对上均匀布设100个连接点，相邻立体影像之间平均布设10个公共连接点。在上述各组区域网平差中，连接点的像方中误差均小于0.25像素，最大残差均小于1.2像素。

由于无法获取试验区域内激光测高点地面足印范围内的GPS点，以及试验区域内高精度和高分辨率的数字高程模型产品（如高精度机载激光雷达点云数据等），因此无法利用高精度控制资料直接验证激光测高点自身高程精度。作为替代，本文的第5组试验中将所有GPS点作为控制点，而将所有激光测高点作为高程检查点，对立体影像进行区域网平差，以此间接验证激光测高点的自身高程精度。

4.3 试验结果与分析

黑龙江试验区各组区域网平差精度如表3所示。黑龙江试验区各组区域网平差的残差如图5所示。河北试验区各组区域网平差试验结果如表4所示。河北试验区各组区域网平差的残差如图6所示。

表3 黑龙江试验区区域网平差试验结果
Table 3 Experimental results of bundle adjustment in the Heilongjiang experimental area

试验分组	激光 点数	控制点数	控制点中		控制点最大		检查点 数量	检查点中		检查点最大	
			误差/m		误差/m			误差/m		误差/m	
			平面	高程	平面	高程		平面	高程	平面	高程
①自由网平差	0	0	—	—	—	—	270	15.26	5.27	25.02	12.29
②控制网平差	0	14(平高控制)	2.51	1.23	4.39	3.21	256	4.99	2.41	18.56	7.25
③激光点与立体影像联合平差	81	0	—	1.56	—	-3.93	270	15.35	2.58	25.69	-7.63
④带平面控制的激光点与立体影像联合平差	81	14(平面控制)	2.55	1.21	4.46	3.32	256	5.04	2.56	18.59	-7.74
⑤GPS 做控制、激光点做检查的立体影像平差	81	270(平高控制)	2.10	0.99	7.14	-2.54	81 (注:激光点)	—	0.98	—	3.03

通过上表3、表4、图5和图6可以看出：(1) 黑龙江试验区的试验影像覆盖平地 and 丘陵地形区域，自由网平差后的影像高程中误差5.27 m，平面中误差15.26 m。河北试验区的试验影像覆盖山地地形区域，自由网平差后的影像高程中误差11.25 m，

平面中误差26.99 m。两个试验区试验影像的高程精度均无法满足中国1:50000比例尺立体测图高程精度要求；但两个试验区试验影像的平面精度可以满足1:50000比例尺立体测图平面精度要求。

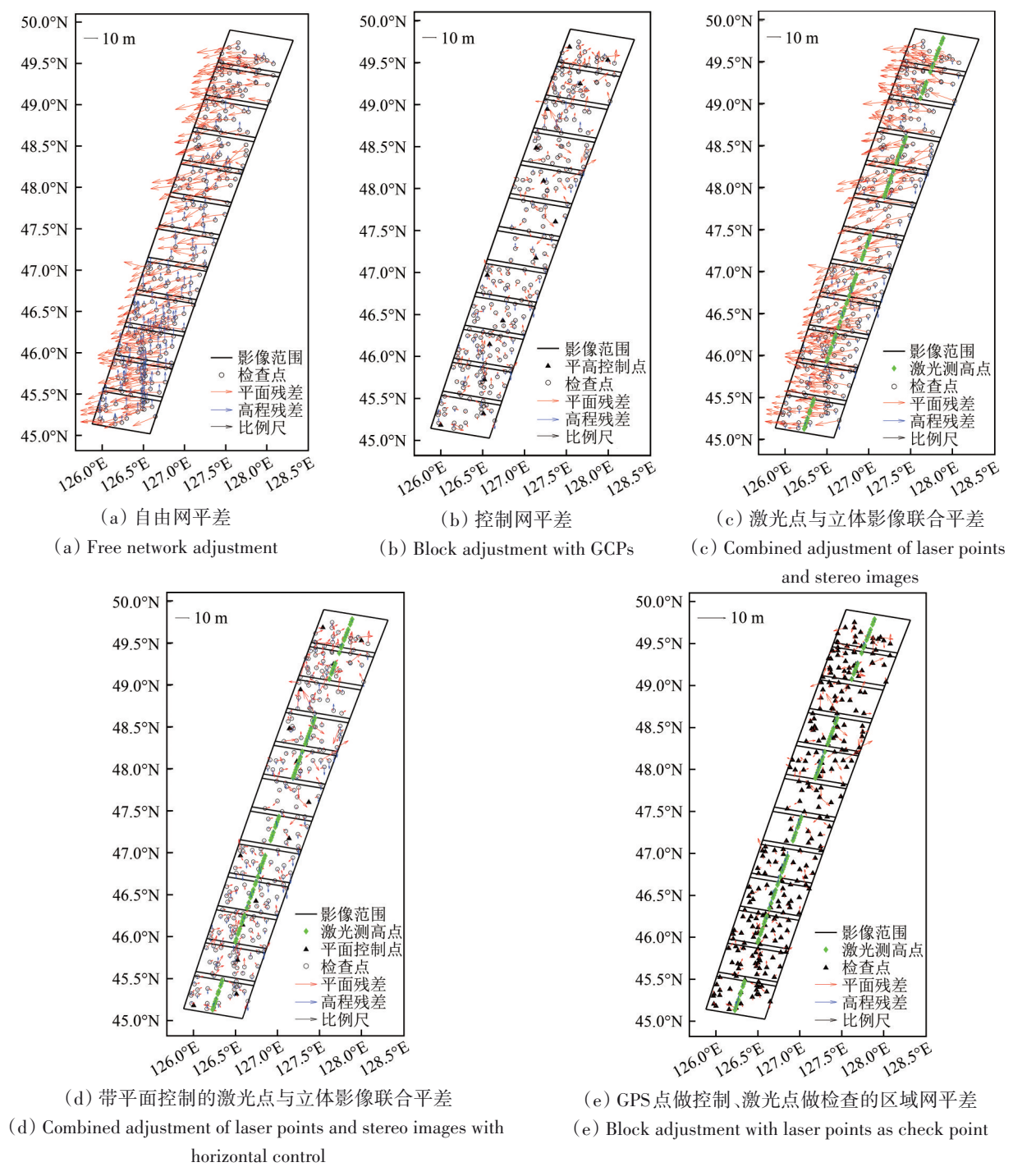


图5 黑龙江试验区各组区域网平差残差图
Fig. 5 Residual plots of each group block adjustment in the Heilongjiang experimental area

表4 河北试验区区域网平差试验结果

Table 4 Experimental results of bundle adjustment in the Hebei experimental area											
试验分组	激光 点数	控制点数	控制点中		控制点最大		检查点数量	检查点中		检查点最大	
			误差/m		误差/m			误差/m		误差/m	
			平面	高程	平面	高程		平面	高程	平面	高程
①自由网平差	0	0	—	—	—	—	115	26.99	11.25	42.94	−26.80
②控制网平差	0	9(平高控制)	2.43	0.99	4.54	1.71	106	5.98	3.32	18.28	−10.11
③激光点与立体影像联合平差	6	0	—	1.92	—	−3.62	115	27.43	4.45	45.01	−10.69
④带平面控制的激光点与立体影像联合平差	6	9(平面控制)	2.41	1.93	4.55	−3.70	106	5.97	4.31	18.27	−10.37
⑤GPS做控制、激光点做检查的立体影像平差	6	115(平高控制)	2.47	0.92	7.35	−2.04	6(注:激光点)	—	1.47	—	2.44

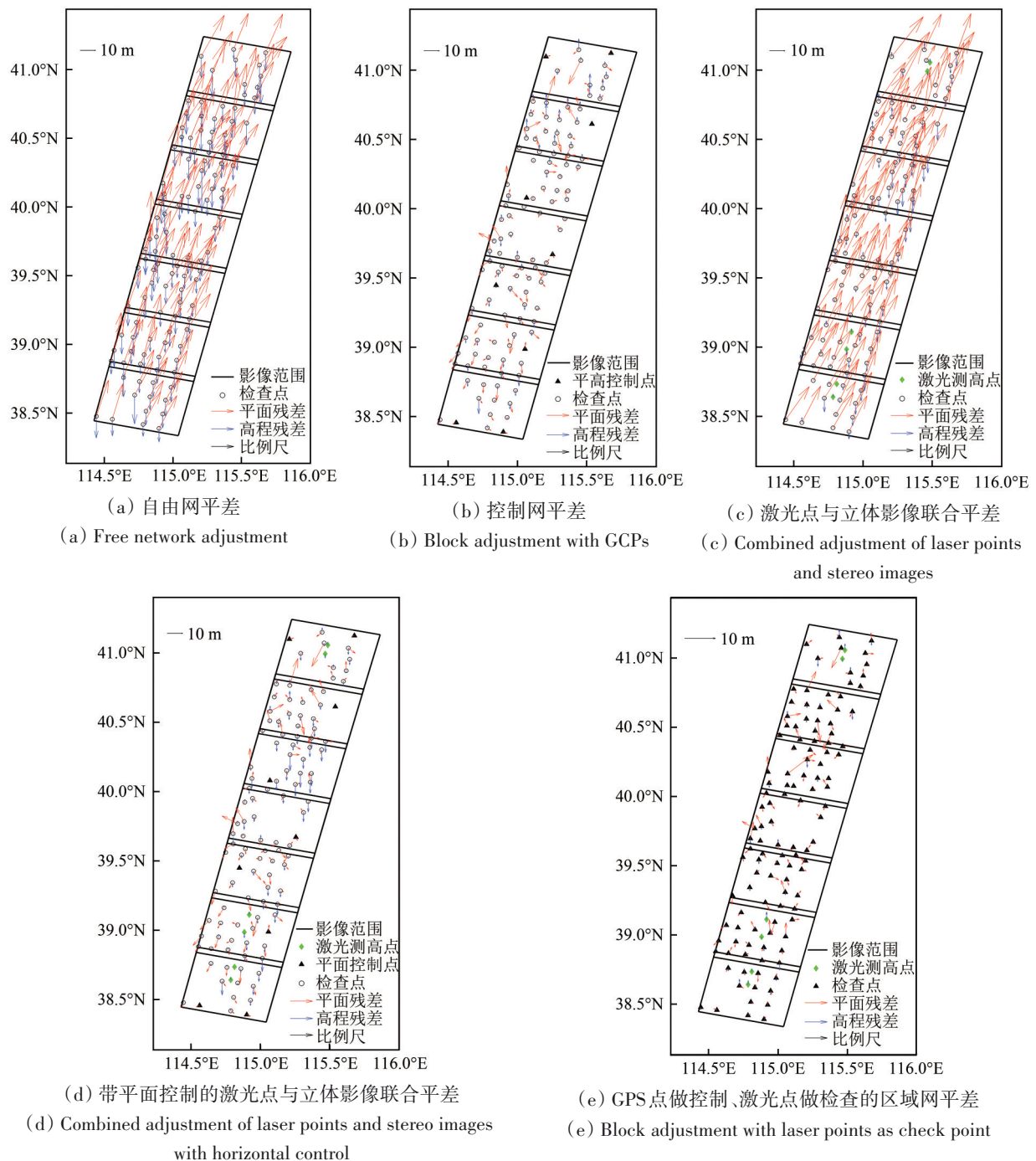


图6 河北试验区各组区域网平差残差图

Fig. 6 Residual plots of each group block adjustment in the Hebei experimental area

(2) 采用少量的平高控制点, 针对立体影像开展区域网平差后, 立体影像的几何精度均显著提升。黑龙江试验区试验影像的平面中误差4.99 m, 高程中误差2.41; 河北试验区试验影像的平面中误差5.98 m, 高程中误差3.32。两个试验区试验影像的几何精度基本相当, 均能完全满足中国1:50000比例尺立体测图精度要求。也表明试验影像的几何误差主要是系统误差, 通过适量控制点

即可以有效提升影像精度。

(3) 以激光测高点作为控制, 采用本文方法开展联合区域网平差后, 黑龙江试验区试验影像的高程中误差降低至2.58 m, 已经完全满足1:50000比例尺立体测图在平地 and 丘陵地形区域的高程精度要求, 且与使用高精度平高控制点的区域网平差的精度相当。河北试验区试验影像的高程中误差降低至4.45 m, 也能完全满足1:50000比例尺立

体测图在山地地形区域的高程精度要求。但是受限于山地地形区域内有效激光测高点数量偏少等不利因素, 试验影像的高程精度低于使用高精度平高控制点区域网平差的精度, 也低于黑龙江试验区的平差精度, 这表明立体影像高程精度的提升与激光测高点的几何分布和数量等密切相关, 在山地地形区域内, 由于有效激光测高点数量稀少, 导致影像高程精度低于平地 and 丘陵地形区域。由于激光测高点在区域网平差过程中并没有对立体影像进行任何平面控制, 所以两个试验区的立体影像的平面精度相对于自由网平差结果而言, 几乎没有任何变化。

(4) 在两个试验区域的激光测高点与立体影像开展联合区域网平差时, 加入少量的平面控制点后, 既可以显著提升试验影像平面精度, 也没有影响激光测高点对立体影像高程精度的提升效果。

(5) 将两个试验区内所有 GPS 点作为平高控制点、激光测高点作为检查点开展区域网平差时, 由于控制点分布比较均匀且密集, 此时控制点的平面和高程中误差可以视为区域网平差后试验影像的实际几何精度。黑龙江试验区 (主要为平地 and 丘陵地形) 试验影像的控制点高程中误差为 0.99 m, 作为检查点的激光测高点的高程中误差 0.98 m (注: 检查点的高程精度实质上反映了激光测高点的自身高程精度), 虽然从数值略微低于 ZY3-03 星激光测高点在平地 and 丘陵地形的标称高程精度 (即平地优于 0.5 m、丘陵地优于 0.8 m), 但也基本可以满足作为 1:5 万控制点时在平地 and 丘陵地形的精度要求 (注: 根据测绘标准规定, 1:5 万控制点在平地、丘陵、山地、高山地的高程中误差应分别优于 0.8 m、1.0 m、1.2 m 和 2.5 m)。河北试验区 (主要为山地地形) 试验影像控制点高程中误差为 0.92 m, 作为检查点的激光测高点的高程中误差 1.47 m, 在数值上略微低于 ZY3-03 星激光测高点在山地地形的标称高程精度 (即山地地形优于 1.0 m、高山地地形优于 1.5 m), 但也十分接近作为 1:5 万控制点在山地和高山地地形的精度要求。需要说明的是, 虽然两个试验区第 5 组试验的结果表面激光测高点的高程精度低于其标称精度, 但这主要是受立体影像精度不高以及检测方法局限等导致, 通过笔者单位对 ZY3-03 星激光

测高点几何精度的持续监控结果表明, 大多数情况下, ZY3-03 星激光测高点能够满足其标称精度, 也完全能够满足作为 1:5 万控制点的高程精度要求。

5 结 论

本文针对 ZY3-03 星能够同步获取三线阵立体影像和激光测高点的特点, 设计了一种适用于各类地形区域的获取激光测高点在立体影像上精确像点坐标的技术方案, 并将激光测高点作为高程控制, 通过开展立体影像和激光测高点的联合区域网平差, 实现了无地面控制条件下, 各类地形区域的 ZY3-03 星立体影像高程精度的大幅提升。分别选取中国黑龙江省平地 and 丘陵地形区域的 12 景三线阵立体影像和同轨获取的 81 个激光测高点, 以及中国河北省山地地形区域的 7 景三线阵立体影像和同轨获取的 6 个激光测高点作为试验数据, 开展了多组区域网平差对比试验。结果表明: ZY3-03 星立体影像的原始高程精度并不能满足 1:5 万比例尺测图精度, 通过开展立体影像和激光测高点联合区域网平差, 可大幅提升立体影像高程精度, 使其能够满足中国 1:50000 比例尺立体测图的精度要求, 这为未来无地面控制条件下开展全球范围的 1:50000 比例尺测图应用提供了保障。然而立体影像几何精度提升效果与激光测高点的数量和分布等密切相关, 由于山地地形区域的激光测高点数量偏少, 导致山地地形区域试验影像高程精度略低于平地 and 丘陵地形区域。此外, 由于激光测高点在联合区域网平差并未起到任何平面控制的作用, 所以并没有改变立体影像的原始平面精度。但是在激光测高点与立体影像联合区域网平差中加入少量平面控制点后, 在不影响激光测高点对立体影像高程精度提升效果的同时, 还可以显著提升试验影像的平面精度。

受限于境外区域控制资料获取困难等因素, 本文选取的试验区域均在境内区域。虽然从理论和历史经验而言, 本文所述方法的适用性不受地理区域分布的影响, 但是从科学研究的严谨性考虑, 待后续客观条件满足后, 还需选取包括境外区域在内的更多有代表性的试验区域开展试验验证, 进一步证明和完善本文所述技术方法。

参考文献(References)

- Cao N, Zhou P, Wang X, Tang X M and Li G Y. 2018. Refined processing of laser altimeter data-aided satellite geometry model. *Journal of Remote Sensing*, 22(4): 599-610 (曹宁, 周平, 王霞, 唐新明, 李国元. 2018. 激光测高数据辅助卫星成像几何模型精化处理. *遥感学报*, 22(4): 599-610) [DOI: 10.11834/jrs.20187252]
- Di K, Yue Z, Peng M and Liu Z. 2010. Co-registration of Chang'E-1 stereo images and laser altimeter data for 3D mapping of lunar surface//*Proceedings of ASPRS/CaGIS 2010 Fall Specialty Conference*. Orlando, Florida: [s.n.]
- Di K C, Hu W M, Liu Y L and Peng M. 2012. Co-registration of Chang'E-1 stereo images and laser altimeter data with crossover adjustment and image sensor model refinement. *Advances in Space Research*, 50(12): 1615-1628 [DOI: 10.1016/j.asr.2012.06.037]
- E D C, Shen Q, Xu Y and Chen G. 2009. High-accuracy topographical information extraction based on fusion of ASTER stereo-data and ICESat/GLAS data in Antarctica. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(5): 714-722 [DOI: 10.1007/s11430-009-0055-6]
- Fraser C S and Hanley H B. 2005. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(8): 909-915 [DOI: 10.14358/PERS.71.8.909]
- Fraser C S and Yamakawa T. 2004. Insights into the affine model for high-resolution satellite sensor orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(5/6): 275-288 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2003.10.001]
- Fricker H A, Ridgway J R, Minster J B, Yi D H and Bentley C R. 2012. The Algorithm Theoretical Basis Document for Tidal Corrections. NASA
- Herring T A, Quinn K J. 2012. The Algorithm Theoretical Basis Document for the Atmospheric Delay Correction to GLAS Laser Altimeter Ranges. NASA
- Li G Y. 2017. Earth Observing Satellite Laser Altimeter Data Processing Method and Engineer Practice. Wuhan: Wuhan University (李国元. 2017. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践. 武汉: 武汉大学)
- Li G Y, Tang X M, Gao X M, Wang H B and Wang Y. 2016. ZY-3 Block adjustment supported by glas laser altimetry data. *The Photogrammetric Record*, 31(153): 88-107 [DOI: 10.1111/phor.12138]
- Li G Y, Tang X M, Gao X M, Wang X, Fan W F, Chen J Y and Mo F. 2018. Integration of ZY3-02 satellite laser altimetry data and stereo images for high-accuracy mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 84(9): 569-578 [DOI: 10.14358/PERS.84.9.569]
- Li X, Liao H, Zhao M L, Zhou W L, Cao S Y and Zhou S H. 2014. Research on LiDAR surveying satellite detection capacity for different terrains. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 43(12): 1238-1244 (李鑫, 廖鹤, 赵美玲, 周文龙, 曹水艳, 周世宏. 2014. 激光测绘卫星对不同地形地貌探测能力分析. *测绘学报*, 43(12): 1238-1244) [DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0188]
- Lin S Y, Muller J P, Mills J P and Miller P E. 2010. An assessment of surface matching for the automated co-registration of MOLA, HRSC and HiRISE DTMs. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3/4): 520-533 [DOI: 10.1016/j.epsl.2009.12.040]
- Rosiek M R, Kirk R L, Howington-Kraus A. 2001. Combining lunar photogrammetric topographic data with clementine LIDAR data//*Proceedings of the ISPRS WG IV/9: Extraterrestrial Mapping Workshop "Planetary Mapping 2001"*, Flagstaff: [s.n.]
- Tang X M, Zhang G, Zhu X Y, Pan H B, Jiang Y H, Zhou P, Wang X and Guo L. 2012. Triple linear-array imaging geometry model of ZiYuan-3 surveying satellite and its validation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(2): 191-198 (唐新明, 张过, 祝小勇, 潘红播, 蒋永华, 周平, 王霞, 郭莉. 2012. 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. *测绘学报*, 41(2): 191-198)
- Tang X M, Zhou P, Zhang G, Wang X, Jiang Y H, Guo L and Liu S H. 2015a. Verification of ZY-3 satellite imagery geometric accuracy without ground control points. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(10): 2100-2104 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2450251]
- Tang X M, Zhou P, Zhang G, Wang X and Pan H B. 2015b. Geometric accuracy analysis model of the Ziyuan-3 satellite without GCPs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81(12): 927-934 [DOI: 10.14358/PERS.81.12.927]
- Xie J F, Tang X M, Mo F, Tang H Z, Wang Z M, Wang X, Liu Y X, Tian S Q, Liu R and Xia X F. 2018. In-orbit geometric calibration and experimental verification of the ZY3-02 laser altimeter. *The Photogrammetric Record*, 2018, 33(163): 341-362 [DOI: 10.1111/phor.12249]
- Yamanokuchi T, Doi K and Shibuya K. 2007. Combined use of InSAR and ICESat/GLAS data for high accuracy DEM generation on Antarctica//*Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Barcelona: IEEE: 1229-1231 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423028]
- Yoon J S and Shan J. 2005. Combined adjustment of MOC stereo imagery and MOLA altimetry data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(10): 1179-1186 [DOI: 10.14358/PERS.71.10.1179]
- Zhang G, Xu K, Jia P, Hao X Y and Li D R. 2019. Integrating stereo images and laser altimeter data of the ZY3-02 satellite for improved earth topographic modeling. *Remote Sensing*, 11(20): 2453 [DOI: 10.3390/rs11202453]
- Zhao C M and Tang X M. 2013. Precise Orbit Determination for the ZY-3 satellite mission using GPS receiver. *Journal of Astronautics*, 34(9): 1202-1206 (赵春梅, 唐新明. 2013. 基于星载GPS的资源三号卫星精密定轨. *宇航学报*, 34(9): 1202-1206)
- Zhou P, Tang X M, Wang X, Liu C R and Wang Z M. 2018. Geometric accuracy evaluation model of domestic push-broom mapping satellite image. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(11): 1628-1634 (周平, 唐新明, 王霞, 刘昌儒, 王甄铭. 2018. 国产推扫式测图卫星影像几何精度评估模型. *武汉大学学报: 信息科学版*, 43(11): 1628-1634) [DOI: 10.13203/j.whugis.20160486]
- Zhou P, Tang X M, Wang Z M, Cao N and Wang X. 2017. Vertical accuracy effect verification for satellite imagery with different GCPs. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(8): 1268-1272 [DOI: 10.1109/LGRS.2017.2705339]

Combined adjustment of the stereo imagery and laser altimetry points of the ZY3-03 Satellite and its accuracy verification

ZHOU Ping¹, TANG Xinming¹, LI Dandan², WANG Xia¹

1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100048, China;

2. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: When using domestic satellites for global geographic resource construction, one of the most important promises is to improve the geometric accuracy of satellite imagery lacking Ground Control Points (GCPs). The Ziyuan3-03 (ZY3-03) satellite, launched on July 25, 2020, was the third high-resolution stereo mapping satellite of the Ziyuan3 series. ZY3-03 is mainly used for the global application of 1:50000-scale mapping. Triple linear-array push-broom panchromatic cameras with a resolution of ≤ 2.5 m and a multispectral camera with a resolution of 5.8 m were loaded on this satellite. Moreover, an additional single-beam laser altimeter was loaded on the ZY3-03 satellite to improve its vertical accuracy. This addition enables satellites to simultaneously obtain high-vertical-accuracy Laser Altimetry Points (LAPs). The integration of stereo-images and LAPs for improving the vertical accuracy of stereo-images is considered the key to realizing the application of 1:50,000-scale stereo mapping of ZY3-03 images with sparse or no GCPs.

A combined block adjustment method involving ZY3-03 triple linear-array stereo-images and synchronous orbit LAPs was proposed to improve the elevation accuracy of images. First, a method for accurately obtaining the image coordinates of LAPs on stereo-images was designed. Given the slight differences in relative planar errors between LAPs and synchronous nadir images, the image coordinates of LAPs on synchronous orbit nadir images could be correctly acquired using the image rational function model (RFM) and the ground geodetic coordinates of the LAPs. Then, accurate pixel coordinates of the LAPs on the triple linear-array stereo-images were determined via high-precision image matching between the forward/backward images and nadir images. The use of whole-orbital stereo-images as the operation unit allowed for the construction of a combined block adjustment model based on RFM and a combined block adjustment strategy.

A total of 12 ZY3-03 satellite triple linear-array stereo image pairs and 81 synchronous orbit LAPs of plain and hilly terrains in Heilongjiang Province, China, were selected as the experimental data. Simultaneously, 270 global positioning system (GPS) points were collected as checkpoints. For the combined adjustment between stereo-images and LAPs, the vertical root mean square error (RMSE) of the images was reduced from 5.27 to 2.58 m. Then, seven ZY3-03 satellite triple linear-array stereo image pairs and six synchronous orbit LAPs of mountainous terrains in Hebei Province were selected as experimental data, with 115 GPS points taken as checkpoints. After performing the combined block adjustment, the vertical RMSE of the images decreased from 11.25 to 4.45 m. The experimental results indicate that the vertical accuracy of the ZY3-03 images increased significantly. The obtained data can satisfy the precision requirements of 1:50,000-scale stereo mapping in China.

The combined block adjustment method can be effectively implemented regardless of the terrain (i.e., flat, hilly, or mountainous). The vertical accuracy of stereo-images can be greatly improved to satisfy the accuracy requirements of 1:50000-scale stereo mapping in China.

Key words: remote sensing, Ziyuan3-03 satellite, triple linear-array stereo imagery, laser altimetry point, combined block adjustment, geometric accuracy

Supported by Special Fund for High Resolution Images Surveying and Mapping Application System (No. 42-Y30B04-9001-19/21); Satellite Imagery Support for 3D Registration of Natural Resources (No. 121133000000190009)