

高分七号卫星立体影像与激光数据 复合测绘处理原理及方法

周平, 唐新明

自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048

摘要: 高分七号卫星 (GF-7) 是全球首颗同步搭载了光学立体相机和激光测高仪的对地观测卫星, 其可以同时获取亚米分辨率的两线阵光学立体影像和稀疏地面激光高程点。为保障 GF-7 卫星能够实现全球范围 1:1 万比例尺立体测图精度, 本文根据光学相机和激光测高仪工作过程中的误差传播机理, 分析了利用激光高程点提升立体影像高程精度的基本原理; 设计了一种 GF-7 立体影像与激光高程点复合测绘处理方法, 构建了激光高程点在立体影像上自动精确量测方法、激光高程点与立体影像联合区域网平差模型等, 力求通过激光高程点实现立体影像高程精度的有效提升。为验证本文所述方法的有效性, 选取了河北省北部区域 70 景 GF-7 立体影像和 463 个激光高程点开展复合测绘处理试验。结果表明: 立体影像在平地、丘陵、山地、高山地和全区域的高程中误差分别由原来的 3.00 m、4.68 m、2.86 m、2.48 m 和 3.19 m, 降低至 0.35 m、0.66 m、0.74 m、0.91 m 和 0.68 m; 平面中误差分别是 4.99 m、3.52 m、4.42 m、5.99 m 和 4.82 m。影像平面和高程精度均能满足中国 1:1 万比例尺立体测图的精度要求。此外, 采用本文所述方法构建的 GF-7 立体影像与激光高程点复合测绘处理系统已在 GF-7 卫星牵头主用户单位实现业务化应用, 对未来全球范围 1:1 万比例尺地理信息资源建设具有重要意义。

关键词: 遥感, 高分七号卫星, 立体影像, 激光高程点, 复合测绘处理, 1:10000 比例尺测图

中图分类号: P228.3/P237/P2

引用格式: 周平, 唐新明. 2024. 高分七号卫星立体影像与激光数据复合测绘处理原理及方法. 遥感学报, 28(6): 1539-1550

Zhou P and Tang X M. 2024. Principle and method of GF-7 satellite integrated processing of stereo image and laser data. National Remote Sensing Bulletin, 28(6): 1539-1550 [DOI: 10.11834/jrs.20222063]

1 引言

高分七号卫星 (GF-7) 是中国首颗亚米分辨率民用光学立体测图卫星, 主要服务于全球范围 1:10000 比例尺立体测图。GF-7 卫星采用了同时安装双线阵立体相机和激光测高仪的独特设计, 期望利用激光测高技术来提升立体影像的几何精度。因此通过开展立体影像和激光测高数据的复合测绘处理, 有效提升光学立体影像几何精度, 是保障 GF-7 卫星实现全球范围 1:1 万比例尺立体测图的关键。

卫星激光测高是当前新兴的新型航天遥感技术, 能主动获取地表离散点位的高精度高程信息。美国先后于 2003 年和 2018 年发射的 ICESat-1 和

ICESat-2 卫星上面均搭载了对地观测的激光测高仪 (Schutz 等, 2005; Neumann 等, 2019), 获取了大量的地面激光高程点。已有研究将 ICESat 卫星的激光高程点作为高程控制, 与其他卫星的光学影像开展联合处理, 可将立体影像的高程精度提升至 2—6 m 水平 (Yoon 和 Shan, 2005; E 等, 2009; Takaku 等, 2014; Li 等, 2016; Zhou 等, 2017; 曹宁 等, 2018)。中国在 2016 年发射的资源三号 02 星 (ZY3-02) 上也搭载了一颗试验性质的激光测高仪, 但功能单一, 没有足印相机, 寿命极短, 获取的激光高程点数据极少 (Xie 等, 2018)。利用这些激光高程点作为控制, 开展资源三号卫星立体影像和激光高程点的联合区域网平差, 可将立体影像的高程精度提升到 3 m 左右 (Li 等,

收稿日期: 2022-02-21; 预印本: 2022-05-12

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项 (民用部分) (编号: 42-Y30B04-9001-19/21, 11-Y20A13-9001-17/18)

第一作者简介: 周平, 研究方向为航天数据处理。E-mail: zhoup@lasmac.cn

通信作者简介: 唐新明, 研究方向为自然资源卫星遥感。E-mail: txm@lasmac.cn

RFM (Rational Function Model) 文件和元数据文件等。激光高程点产品在内容上包括地面足印中心点的精确高程值、足印中心点的概略经纬度坐标、足印影像以及激光足印中心点在足印影像上的精确像点坐标等。

2.2 激光高程点及立体影像几何精度定量分析

相关研究表明, 推扫式光学影像几何精度的主要受姿态测量、轨道测量、偏置补偿矩阵(它是几何检校成果, 用于补偿包括星上设备安装误差在内的各种系统误差)和相机探元指向角(它是相机内方位元素的一种表现形式)等误差的影响(周平, 2016; 周平等, 2018)。GF-7卫星精密轨道测量数据的精度优于3 cm, 其影响可以忽略。因此GF-7卫星传感器校正影像的几何精度主要受姿态测量、偏置补偿矩阵和相机探元指向角等误差的综合影响。

激光高程点几何精度的主要受姿态测量误差、轨道测量误差、激光指向角误差、大气延迟、地球潮汐、测距硬件误差、波形数据处理误差、地形起伏和地表粗糙等的影响(李国元, 2017)。在激光高程点产品生产过程中, 利用了最小二乘法高斯曲线拟合(Hofton等, 2000)方法对激光全波形数据进行精确拟合和分解, 开展了合理频次的在轨几何检校(唐新明等, 2021)来消除测距硬件误差和降低激光指向角误差, 采用了大气延迟改正模型(Herring和Quinn, 2012)和潮汐改正模型(Fricker等, 2012)对激光测距值进行了误差改正。因此测距硬件误差、波形数据处理误差、大气延迟和地球潮汐影响等均得到了有效改正, 并不是影响激光高程点精度的主要误差。最后激光高程点产品在对外分发时还会根据激光回波波形脉宽、波峰数、足印影像质量、地形坡度等信息, 对激光高程点进行质量控制(李国元等, 2021), 剔除了那些足印范围内地形起伏或地表粗糙的激光高程点。因此姿态测量误差和激光指向角误差是影响激光高程点高程精度的最主要误差源。为简化分析过程, 本文仅详细分析这两种误差对GF-7激光高程点几何精度的综合影响。

姿态测量、偏置补偿矩阵、相机探元指向角和激光指向角误差都是角度误差, 均可以分解为俯仰角误差、滚动角误差和偏航角误差。

俯仰角误差所造成的立体影像和激光高程点

的高程误差如图2所示。可见, 细实线为前视相机 S_1 和后视相机 S_2 的实际的成像光线, 粗实线为激光测高仪 L 的实际激光光线, D 是其实际交会的地面点。由于存在俯仰角误差, 立体影像计算的地面交汇点为 A_{img} , 激光测高数据计算的地面足印中心点为 A_{laser} 。 dh_{img_pitch} 和 dh_{laser_pitch} 分别是立体影像和激光高程点的高程误差。 B 为基线, H 为轨道高度, ρ 为激光测距值。 θ_1 和 θ_2 分别是前视和后视相机的俯仰角, $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 分别是前视和后视相机成像时刻的俯仰角误差; θ_{laser} 是激光指向角在俯仰方向分量, $\Delta\theta_{laser}$ 为激光测高时俯仰角误差。 a_1 , d_1 和 a_2 , d_2 分别为 A_{img} 和 D 点投影在前视和后视相机焦平面上的像点位置; o_1 和 o_2 分别为前视和后视相机的主点; f 是前、后视相机的焦距。

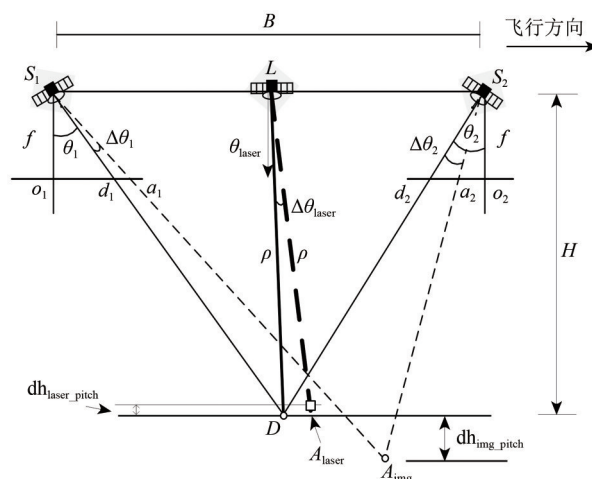


图2 俯仰角误差对立体影像和激光高程点高程精度影响
Fig. 2 The diagram for elevation accuracy influence on stereo images and LAPs due to pitch angle error

设垂直天底方向角度为0, 逆时针旋转为正, 根据图2中关系, 可以得到地面点 A_{img} 和 D 在前视和后视相机中的左右视差 P_a 、 P_d 为

$$P_a = \left| \overrightarrow{o_1 a_1} - \overrightarrow{o_2 a_2} \right| = f \cdot (\tan(\theta_1 + \Delta\theta_1) - \tan(\theta_2 + \Delta\theta_2)) = \frac{f \cdot B}{H} \quad (1)$$

$$P_d = \left| \overrightarrow{o_1 d_1} - \overrightarrow{o_2 d_2} \right| = f \cdot (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) = \frac{f \cdot B}{H - dh_{img_pitch}} \quad (2)$$

$$P_d - P_a = \frac{f \cdot B}{H} \cdot \frac{h}{H - dh_{img_pitch}} \approx \frac{f \cdot B \cdot dh_{img_pitch}}{H^2} \quad (3)$$

由于 H 约为505 km, $dh_{img_pitch} < 1$ km, 因此 $H - dh_{img_pitch} \approx H$, 则俯仰角误差对立体影像高程影响:

$$dh_{img_pitch} = \frac{H^2}{B} \cdot ((\tan \theta_1 - \tan \theta_2) - ((\tan(\theta_1 + \Delta\theta_1) - \tan(\theta_2 + \Delta\theta_2))) \quad (4)$$

由于GF-7卫星的前、后视相机以俯仰方向的不同视角来获取立体影像。因此,俯仰角误差会对立体影像高程精度造成影响,而滚动角和偏航角误差主要造成同名光线无法一一交会,通过自由网平差就可以有效消除(王之卓,1979),不会影响高程精度。因此立体影像的高程误差 dh_{img} 为

$$dh_{img} = dh_{img_pitch} \quad (5)$$

根据图2中关系,可以得到俯仰角误差对激光高程点的高程影响:

$$dh_{laser_pitch} = (\cos \theta_{laser} - \cos(\theta_{laser} + \Delta\theta_{laser})) \cdot \rho \quad (6)$$

由于滚动角误差对激光高程点高程精度的影响原理及效果与俯仰角误差一致,则滚动角误差 $\Delta\varphi_{laser}$ 导致的激光高程点高程误差 dh_{laser_roll} 为

$$dh_{laser_roll} = (\cos \varphi_{laser} - \cos(\varphi_{laser} + \Delta\varphi_{laser})) \cdot \rho \quad (7)$$

式中, φ_{laser} 为激光指向角在滚动角方向的分量。

偏航角误差仅会造成激光高程点平面误差,而不会造成高程误差。由于俯仰角和滚动角误差系独立传播,则其导致的激光高程点高程误差 dh_{laser} 为

$$dh_{laser} = \sqrt{dh_{laser_pitch}^2 + dh_{laser_roll}^2} \quad (8)$$

2.3 激光高程点提升立体影像几何精度可行性

GF-7卫星姿态测量的俯仰角和滚动角理论误差均为 $0.6''$ 。开展影像几何检校后,偏置补偿矩阵和相机探元指向角的俯仰角误差均优于 $0.4''$ 。因此影响光学影像高程精度的俯仰角误差最大值为 $1.4''$ 。根据式(5)计算获得立体影像的理论高程误差为 $1.2\text{—}11.5\text{ m}$ (当式(4)中 $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2$ 时,高程误差最小;当 $\Delta\theta_1 = -\Delta\theta_2$ 时,高程误差最大)。

开展激光数据几何检校后,激光指向角的俯仰角和滚动角误差均 $<0.8''$,再加上姿态测量数据误差的影响,则影响激光高程点几何精度的俯仰角和滚动角误差最大值均为 $1.4''$ 。已知激光指向角在俯仰角和滚动角方向的分量均 $<1^\circ$,轨道高度 505 km , $\rho \approx H$,卫星滚动角为 0° 。根据式(8)计算获得姿态测量误差和激光指向角误差导致的激光高程点理论高程误差约为 0.1 m 。测距硬件误差、波形数据处理误差、大气延迟和地球潮汐影响等也会对激光高程点的高程精度产生一定影响,但

是在激光高程点生产过程中对这些误差进行了针对性的减弱或消除,因此其综合影响程度(即导致的高程误差)一般不会超过姿态测量误差和激光指向角误差的综合影响。因此可以认为GF-7卫星激光高程点的理论高程误差不 $>0.2\text{ m}$ 。

根据上述结果可知,GF-7卫星激光高程点的理论高程精度远远高于同平台获取的立体影像,也超过了 $1:10000$ 比例尺立体测图的高程精度要求。因此在理论上,利用激光高程点作为控制,将立体影像的高程精度提升至 $1:10000$ 比例尺测图精度要求是完全可行的。

图3为利用激光高程点提升立体影像几何精度的最终效果。可知:将激光高程点作为高程控制,通过复合测绘处理,使得立体影像的前方交会高程值与激光高程点的高程值趋近,亦即实现了立体影像高程精度的有效提升。

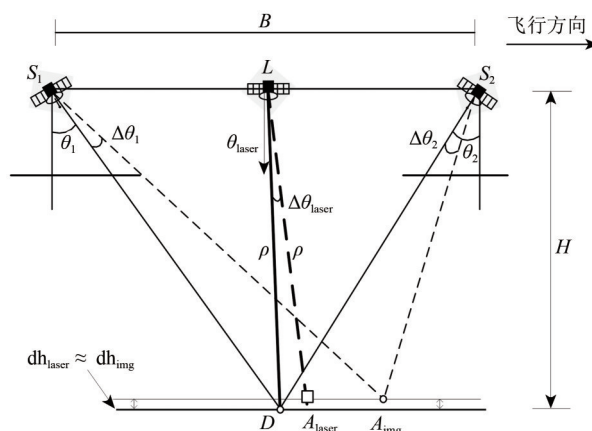


图3 复合测绘处理后立体影像精度提升示意图

Fig. 3 The diagram for stereo images accuracy improvement after integrated processing

3 复合测绘处理方法

3.1 复合测绘处理步骤

激光高程点与立体影像复合测绘处理的流程如图4所示。具体流程如下:

(1) 将同轨连续多景或大区域的立体影像构建平差区域网,在每景立体影像内部自动匹配密集的连接点,在相邻景立体影像之间的重叠区域自动匹配适量的公共连接点;随后针对立体影像开展自由网平差,实现立体影像的高精度相对定向,为后续其他操作提供相对定向后的立体影像。

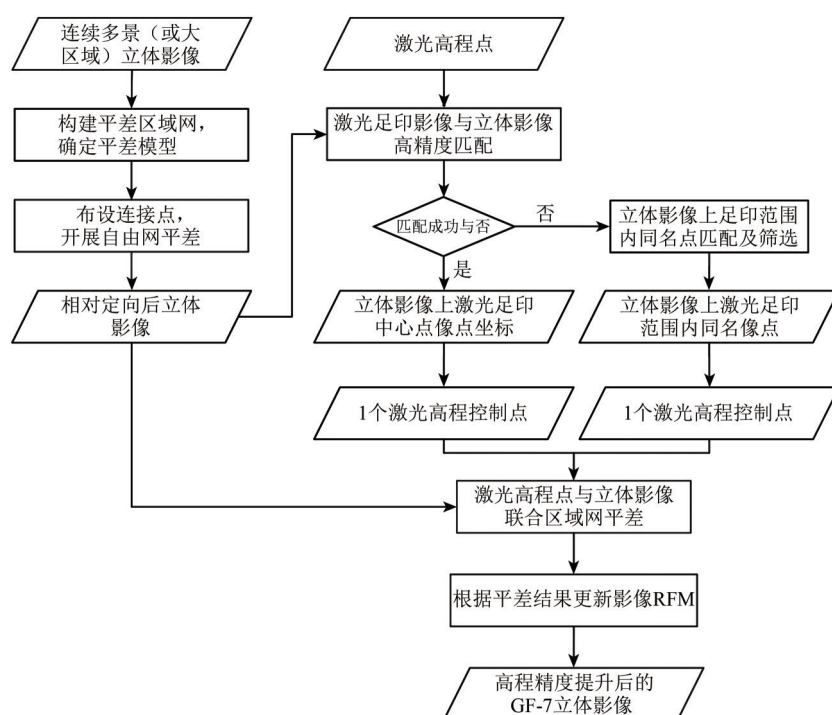


图4 激光高程点与光学立体影像复合测绘处理流程图

Fig. 4 Workflow of integrated processing of the stereo image and LAPs

(2) 采用3.2.1节方法将激光足印影像与立体影像进行高精度影像匹配，获取激光高程点在立体影像上的精确像点坐标，并将激光高程点作为区域网平差的高程控制点。

(3) 针对无法采用3.2.1节方法量测的激光高程点，采用3.2.2节方法在立体影像上的激光足印范围内获取同名像点，并将其作为高程控制点，其高程值为该激光高程点地面足印中心点的高程值。

(4) 采用3.3节的区域网平差模型，开展立体影像和激光高程点的联合区域网平差，提升立体影像高程定位精度。最后根据区域网平差结果更新立体影像的RFM。

3.2 激光高程点在立体影像上的自动量测

将激光高程点在立体影像上进行量测，即计算获取激光高程点在立体影像上的准确像点坐标。

3.2.1 使用足印影像时激光高程点量测

GF-7激光高程点产品包括了足印影像以及激光足印中心点在足印影像上的精确像点坐标（精度优于1个像素）。通过激光足印影像与立体影像的高精度匹配，获取足印影像上激光足印中心点的像点在立体影像上的同名像点，该同名像点亦即激光高程点在立体影像上的像点坐标。具体步骤包括：

(1) 根据激光足印影像的空间分辨率和成像角度，对后视全色影像进行降采样和重投影，生成与足印影像拥有相似空间分辨率和成像倾角的重投影影像，以期提升足印影像与立体影像的匹配成功率。

(2) 采用尺度不变特征转换 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特征匹配 (Lowe, 2004) 和最小二乘匹配 (Gruen, 1985) 相结合的方式，对重投影影像与足印影像开展影像匹配，获取足印影像上激光足印中心点的像点在重投影影像上的同名像点。根据重投影影像与后视影像的对应关系，计算该同名像点在后视影像上的对应像点位置。

(3) 采用SIFT特征匹配和最小二乘匹配相结合的方式，对后视影像与其他影像开展影像匹配，获得后视影像上激光足印中心点的像点在其他影像上的同名像点。这样就获得了激光高程点在一个立体影像上的准确像点坐标。

由于SIFT特征匹配和最小二乘匹配相结合的方式能够实现亚像素级别同名像点匹配，因此采用本节方法获取的激光高程点在立体影像上的像点坐标的精度极高（优于1个像素）。

3.2.2 无法使用足印影像时激光高程点量测

受地形、云斑等因素影响，部分激光高程点

无法采用3.2.1节方法完成在立体影像上的量测。为了论述方便,将这部分激光高程点称为“待量测激光高程点”,将采用上节方法完成了量测的激光高程点称为“已量测激光高程点”。由于足印范围内存在地形起伏和地表粗糙的激光高程点在生产过程中已经被剔除,所以用户使用的激光高程点的地面足印范围内地表高程几乎一致。因此,可在立体影像上待量测激光高程点足印范围内获取1个同名像点作为高程控制点。具体步骤包括:

(1) 待量测激光高程点与所在后视影像在经度和纬度方向的平面相对误差改正量 Δlon 和 Δlat 的计算公式如下:

$$\begin{aligned}\Delta\text{lon} &= \Delta\text{lon}_{\text{pro}} + \frac{n}{N} \cdot (\Delta\text{lon}_{\text{next}} - \Delta\text{lon}_{\text{pro}}) \\ \Delta\text{lat} &= \Delta\text{lat}_{\text{pro}} + \frac{n}{N} \cdot (\Delta\text{lat}_{\text{next}} - \Delta\text{lat}_{\text{pro}})\end{aligned}\quad (9)$$

式中, $\Delta\text{lon}_{\text{pro}}$ 和 $\Delta\text{lat}_{\text{pro}}$ 是同轨同波束的前一个已量测激光高程点与后视影像在经度和纬度方向的平面相对误差, $\Delta\text{lon}_{\text{next}}$ 和 $\Delta\text{lat}_{\text{next}}$ 是同轨同波束的后一个已量测激光高程点与后视影像在经度和纬度方向的平面相对误差。其是利用已量测激光高程点在后视影像上的像点坐标,开展空间前方交会获取的对应地面经纬度坐标,减去该已量测激光高程点自带的经纬度坐标而获得的。 N 是同轨同波束的前一个与后一个已量测激光高程点之间的激光高程点理论数量。 n 是同轨同波束的前一个已量测激光高程点与该待量测激光高程点之间的激光高程点理论数量。若前一个已量测激光高程点不存在,则令 $n/N = 1$ 。若后一个已量测激光高程点不存在,则令 $n/N = 0$ 。

(2) 利用 Δlon 和 Δlat 对待量测激光高程点的经纬度坐标进行改正后,通过后视影像成像几何模型和待量测激光高程点的高程值,计算待量测激光高程点在后视影像上像点坐标。再根据激光足印半径,即可获得待量测激光高程点地面足印在后视影像上的像素范围。

(3) 将后视影像和其他影像开展影像匹配,获取多个同名像点。剔除粗差后,选取分布于后视影像上激光地面足印范围内的离激光足印中心点距离最近的一个同名像点,将其作为激光高程控制点,其高程值为激光高程点的高程值。

本节方法由于改正了激光高程点与立体影像之间的相对平面误差,使得两者之间的相对平面误差可低于2—4 m,远小于GF-7激光高程点的足印半径

(约10 m)。这确保了采用本节方法获取的立体影像同名像点必然位于激光足印之内,因此将同名像点的坐标作为激光高程点在立体影像上的像素坐标,并不会影响激光高程点作为高程控制时的正确性。

3.3 联合区域网平差模型

GF-7卫星传感器校正影像只附带RFM,因此联合区域网平差需基于RFM开展。RFM是利用有理多项式建立影像的像素坐标(r, c)与其对应的地面点的大地坐标(X, Y, Z)之间的数学映射关系,其基本方程定义如下(Fraser和Yamakawa, 2004):

$$\begin{aligned}r &= \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \\ c &= \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}\end{aligned}\quad (10)$$

式中,为避免因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(r, c)和(X, Y, Z)均归一化至-1—1,以增强参数求解的稳定性。 P_i ($i = 1, 2, 3, 4$)表示一般多项式,式中各个变量的幂均不超过3次,所有变量的幂之和也不超过3次,其形式如下:

$$\begin{aligned}P_i &= a_{i0} + a_{i1}Z + a_{i2}Y + a_{i3}X + a_{i4}ZY + \\ & a_{i5}ZX + a_{i6}YX + a_{i7}Z^2 + a_{i8}Y^2 + \\ & a_{i9}X^2 + a_{i10}ZYX + a_{i11}Z^2Y + a_{i12}Z^2X + \\ & a_{i13}Y^2Z + a_{i14}Y^2X + a_{i15}ZX^2 + \\ & a_{i16}YX^2 + a_{i17}Z^3 + a_{i18}Y^3 + a_{i19}X^3\end{aligned}\quad (11)$$

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

RFM的误差补偿采用像方仿射变换补偿模型(Fraser和Yamakawa, 2004),式(10)中描述的像点坐标和对应的大地坐标之间的关系被修正为

$$\begin{aligned}r + a_0 + a_1 \cdot r + a_2 \cdot c &= \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \\ c + b_0 + b_1 \cdot r + b_2 \cdot c &= \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}\end{aligned}\quad (12)$$

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

分别逐点为连接点和激光高程点构建误差方程,形成联合区域网平差模型:

$$V_1 = At + B_1x_1 - L_1, W_1 \quad (13)$$

$$V_2 = At + B_2x_2 - L_2, W_2 \quad (14)$$

式(13)为连接点列出的误差方程,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;式(14)是为激光高程点列出的误差方程,它将RFM的仿射变换参数和激光高程点地面经纬度作为未知数。

式 (13) 和 (14) 中, V_1 和 V_2 分别为连接点和激光高程点在影像上的像点坐标观测值残差向量。 $t = [\Delta a_0 \ \Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \Delta b_0 \ \Delta b_1 \ \Delta b_2]^T$ 为仿射变换参数的改正数向量。 $x_1 = [\Delta X_{tie} \ \Delta Y_{tie} \ \Delta Z_{tie}]^T$ 为连接点对应的地面三维坐标的改正数向量。 $x_2 = [\Delta X_{laser} \ \Delta Y_{laser}]^T$ 为激光高程点地面经纬度的改正数向量。 $A = \begin{bmatrix} 1 & r & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r & c \end{bmatrix}$ 、 $B_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial X_{tie}} & \frac{\partial r}{\partial Y_{tie}} & \frac{\partial r}{\partial Z_{tie}} \\ \frac{\partial c}{\partial X_{tie}} & \frac{\partial c}{\partial Y_{tie}} & \frac{\partial c}{\partial Z_{tie}} \end{bmatrix}$ 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 t 、 x_1 和 x_2 对应的偏导数系数矩阵。 $L_i (i = 1, 2)$ 为利用初值代入误差方程计算得到的常数项。 $W_i (i = 1, 2)$ 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。

4 试验设计与结果分析

4.1 试验区域及试验数据

选择覆盖河北省太行山区域的 GF-7 传感器校

正立体影像和激光高程点产品作为试验数据。收集试验区域内高精度 GPS 点作为检查资料, GPS 点的平面和高程精度均优于 0.1 m。试验数据的详细情况如表 1 所示。

表 1 试验数据详细信息

Table 1 Details information of experiment data

地形类型	传感器校正影像			激光高程点		GPS 点数量
	覆盖面积/km ²	影像数量	影像轨道号	激光点数量	数据轨道号	
平地	3500		2449	134	3267	40
丘陵	4200		3267	84	6786	26
山地	17300	70	5806	244	6868	124
高山地	2000		5880	1	7679	11
全区域	27000		5962	463	8652	201

由于天气和卫星侧摆等因素影响, 所选激光高程点和立体影像中仅有一轨是同轨获取, 其他均为非同轨获取。试验区域地形类型是根据中国 1 : 50000 比例尺地形图各图幅的地形类型来确定的。试验区域内地形起伏从海拔 50—3000 m。试验区域及试验数据的地理分布如图 5 所示。

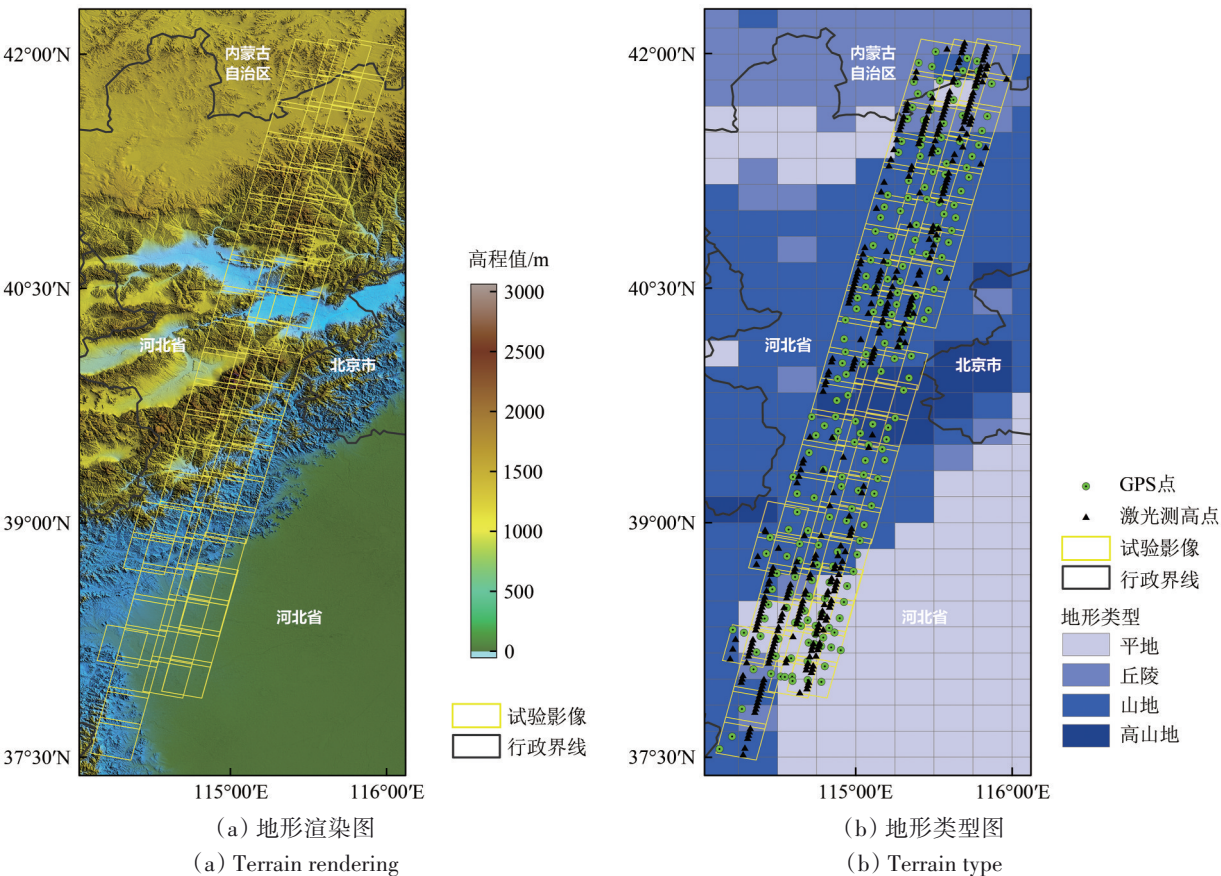


图 5 试验区及试验数据分布示意图
Fig. 5 Geographic distribution of experiment area and data

4.2 立体影像及激光高程点初始精度验证

4.2.1 立体影像初始精度验证

采用影像匹配技术在每景立体影像内部和相邻立体影像的重叠区域匹配均匀分布的连接点，分布密度约为0.5个/km²。将所有GPS点作为检查点（GPS点通过人工量测方式在立体影像上进行量测，像点量测精度优于1像元）。采用式（13）对试验影像开展自由网平差。试验结果如表2所示，检查点残差如图6所示。可见：立体影像的平面中误差可以满足1：10000比例尺测图精度要求，但是高程精度在大部分地形区域无法满足1：10000比例尺测图精度要求（注：中国1：10000比例尺精度要求平地、丘陵、山地和高山地区的平面中误差应分别小于5 m、5 m、7.5 m和7.5 m；高程中误差应分别小于0.5 m、1.2 m、2.5 m和5 m（国家测绘地理信息局，2014））。

表2 自由网平差后立体影像几何精度
Table 2 Geometric accuracy of stereo image after free network adjustment

地形类型	检查点数量	平面精度/m		高程精度/m	
		中误差	最大误差	中误差	最大误差
平地	40	5.00	9.26	3.07	-6.72
丘陵	26	3.81	6.40	4.68	-7.14
山地	124	4.32	8.12	2.86	-7.17
高山地	11	6.36	8.89	2.48	6.23
全区域	201	4.93	9.26	3.19	-7.17

注：在平差解算中，连接点点坐标残差中误差<0.3像素，最大残差<1.2像素。

4.2.2 激光高程点精度验证

由于激光高程点地面足印范围内没有GPS点分布，因此无法直接利用GPS点对激光高程点的几何精度进行验证。为此，采用3.2.1节方法将激光高程点在立体影像上进行量测，将量测成功的421个激光高程点作为检查点，对自由网平差后的立体影像高程精度进行检测，结果如表3所示。可见各地形和全区域的高程中误差与表2中对应值的差距均在±0.13 m以内，已知GPS点的高程精度优于0.1 m，因此激光高程点的高程精度至少应该优于0.1±0.13 m的绝对值，超过了1：10000比例尺立体测图的高程精度要求，也远高于立体影像的实际高程精度。表2和表3基本验证了本研究

推算的激光高程点和立体影像理论精度结果的正确性。

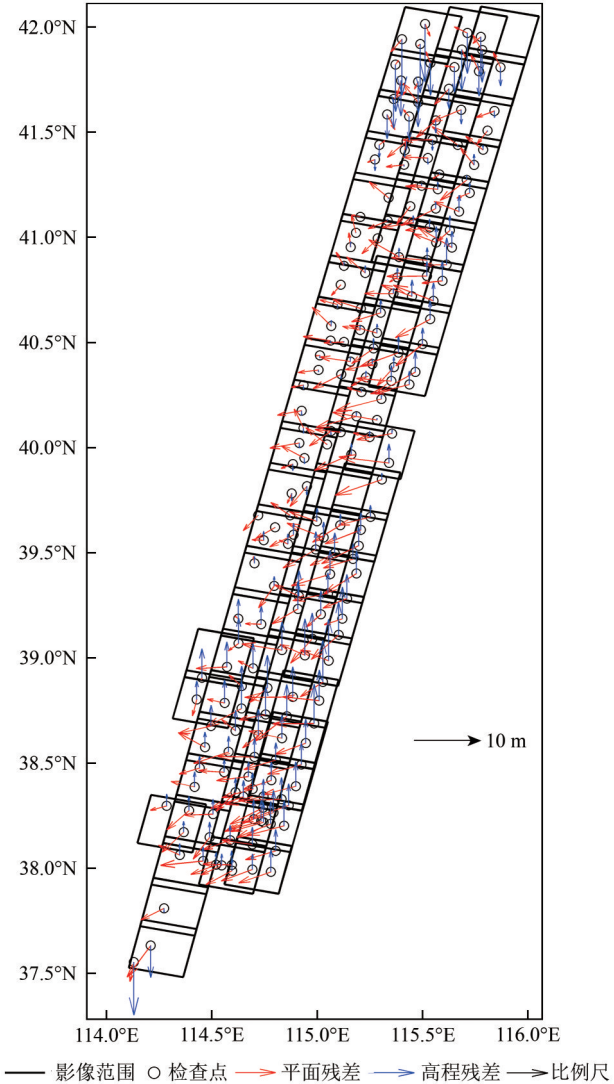


图6 自由网平差残差图

Fig. 6 Residuals diagram of free network adjustment

表3 激光高程点作为检查点获取的立体影像几何精度
Table 3 Geometric accuracy of stereo image utilizing LAPs as checkpoints

地形类型	激光点数量	高程精度/m	
		中误差	最大误差
平地	129	2.96	-6.33
丘陵	75	4.76	-8.06
山地	216	2.95	-8.22
高山地	1	2.41	2.41
全区域	421	3.32	-8.22

4.3 复合测绘处理精度验证

为验证复合测绘处理精度，按照3.1节所述处理步骤，开展如下3组试验：（1）采用3.2.1节方

法将激光高程点在立体影像上进行量测，共成功量测 421 个激光高程点。对未量测成功的 42 个激光高程点，采用 3.2.2 节方法将其在立体影像上进行量测。采用 3.2.1 节方法和 3.2.2 节方法量测的激光高程点在高程精度和最终的使用上几乎没有差别。将所有 GPS 点作为检查点，采用 3.3 节所述的区域网平差模型，开展立体影像的区域网平差，以验证激光高程点能否有效提升立体影像高程精度。(2) 额外选取适量 GPS 点作为平面控制点，

将剩余 GPS 点作为检查点；参照第 1 组实验的方案开展试验，以验证引入其他平面控制点后，激光高程点能否有效提升立体影像高程精度。(3) 选取适量 GPS 点作为平高控制点，将剩余 GPS 点作为检查点，开展立体影像区域网平差，以反映采用高精度控制条件下，立体影像能够达到的精度水平。上述 3 组试验中，均采用了 4.2.1 节自由网平差试验的连接点。表 4—6 分别为上述 3 组试验的结果，其检查点残差如图 7 所示。

表 4 复合测绘处理第 1 组试验结果

Table 4 Results of first set of integrated processing experiment

地形	GPS 检查点					激光高程控制点		
	GPS 检查 点数量	平面精度		高程精度		激光高程 控制点数量	高程残差	
		中误差	最大误差	中误差	最大误差		中误差	最大误差
平地	40	4.99	8.39	0.35	-0.72	134	0.33	-0.94
丘陵	26	3.52	6.72	0.66	-1.40	84	0.63	1.33
山地	124	4.42	7.54	0.74	2.07	244	0.71	1.61
高山地	11	5.99	8.08	0.91	1.80	1	1.00	1.00
全区域	201	4.82	8.39	0.68	2.07	463	0.61	1.61

表 5 复合测绘处理第 2 组试验结果

Table 5 Results of second set of integrated processing experiment

地形	GPS 检查点					激光高程控制点			平面控制点		
	GPS 检查 点数量	平面精度		高程精度		激光高程 控制点数量	高程残差		平面控制 点数量	平面残差	
		中误差	最大误差	中误差	最大误差		中误差	最大误差		中误差	最大误差
平地	29	1.65	3.30	0.35	-0.72	134	0.34	0.98	11	1.61	2.78
丘陵	17	2.41	3.65	0.66	-1.03	84	0.43	0.88	9	2.28	3.41
山地	91	2.34	4.23	0.79	1.94	244	0.61	1.21	33	2.02	3.86
高山地	7	2.50	3.81	0.85	1.68	1	1.03	1.03	4	1.68	2.42
全区域	144	2.23	4.24	0.71	1.94	463	0.52	1.21	57	1.98	3.86

表 6 复合测绘处理第 3 组试验结果

Table 6 Results of third set of integrated processing experiment

地形	GPS 检查点					GPS 平高控制点				
	GPS 检查 点数量	平面精度		高程精度		GPS 平高 控制点数量	平面残差		高程残差	
		中误差	最大误差	中误差	最大误差		中误差	最大误差	中误差	最大误差
平地	29	1.64	3.25	0.92	1.33	11	1.63	2.89	0.77	1.54
丘陵	17	2.40	3.60	0.95	1.86	9	2.31	3.33	0.84	-1.75
山地	91	2.34	4.16	0.88	2.21	33	2.05	3.85	0.88	2.09
高山地	7	2.51	3.86	0.94	-1.53	4	1.67	2.41	0.83	-1.28
全区域	144	2.23	4.16	0.90	2.21	57	1.99	3.84	0.85	2.09

由表 4 可见第 1 组试验中检查点的高程精度相对表 2 中的对应值而言，有了显著提升，全区域的整体高程中误差由原来的 3.19 m 降低至 0.68 m，其中平地、丘陵、山地和高山地区域的高程中误差分别为 0.35 m、0.66 m、0.74 m 和 0.91 m，已经完

全满足中国 1：10000（甚至 1：5000）比例尺立体测图的精度要求。该结果充分验证了本文提出复合测绘方法的有效性。由于激光高程点并没有作为平面控制点，所以表 4 中检查点的平面精度值相对表 2 中的对应值几乎没有变化，全区域的整体平

面中误差为4.82 m,在平地、丘陵、山地和高山地
区域的平面中误差分别为4.99 m、3.52 m、4.42 m和

5.99 m,也已经达到了中国1:10000比例尺立体
测图的平面精度要求。

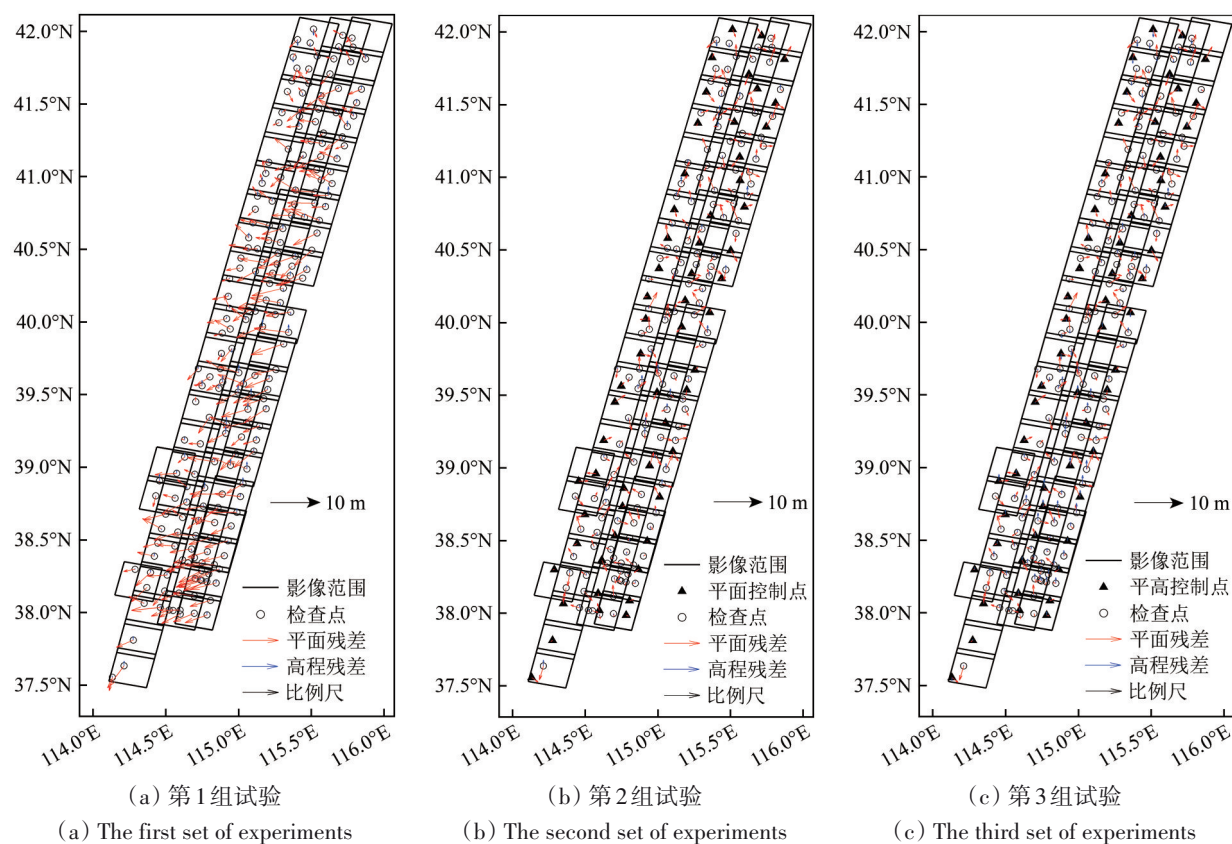


图7 各组试验检查点的残差图

Fig. 7 Residuals diagram of check points for each experiment

由表5可见,第2组试验中检查点的高程精度
值与表4中的对应值几乎一致。表5中检查点的平
面精度高于表4中的对应值,并且与表6中的对应
值基本一致。这表明在复合测绘处理中,引入其
它的平面控制点后,既可以显著提升立体影像平
面精度,又没有影响激光高程点对立体影像高程
精度的提升效果。

由表6可见,第3组试验中检查点的高程精度
优于表2中的对应值,但却低于表4和表5中的
对应值,这表明在提升立体影像高程精度方面,
本文提出的复合测绘技术,等同于甚至优于采用
适量高精度地面控制点的区域网平差(当然,这
与第1组和第2组试验中激光高程点的数量远
多于第3组实验中GPS控制点也有一定关系)。

5 结论

针对GF-7卫星可同平台获取激光高程点和立
体影像的独特设计,本文从理论上分析了利用激

光高程点提升立体影像几何精度的原理和可行
性,在此基础上设计了针对激光高程点与立体影
像开展复合测绘处理的技术方法,选取了河北
省太行山区域的70景GF-7立体影像和463个
激光高程点开展了多组复合测绘处理试验,对
本研究提出的技术方法进行验证,主要结论如
下:

(1) 理论推导和分析得到的GF-7激光高程
点的理论高程误差 <0.2 m,高于1:10000
比例尺立体测图精度要求,也远小于同平台
获取的立体影像的理论高程误差(1.18—11.49
m),因此通过复合测绘处理方法来提升立体
影像高程精度,在理论上是完全可行的。而试
验获得的激光高程点和立体影像的实际高程
精度与理论精度基本相符,证明了本文理论
精度推导结果的正确性。

(2) 将激光高程点作为高程控制点,采用
本文方法开展复合测绘处理后,试验影像在
平地、丘陵、山地、高山地和整个区域的高
程中误差大幅降低至0.35 m、0.66 m、0.74
m、0.91 m和0.68 m,

全面满足中国 1 : 10000 (甚至 1 : 5000) 比例尺立体测图的精度要求。其高程精度甚至优于使用适量 GPS 点作为控制的区域网平差结果。试验影像在平地、丘陵、山地、高山地和整个区域的平面中误差分别为 4.99 m、3.52 m、4.42 m、5.99 m 和 4.93 m, 与试验影像原始平面中误差基本一致, 也已满足 1 : 10000 比例尺立体测图的精度要求。

(3) 在复合测绘处理过程中, 在加入了其他平面控制点之后, 并没有影响立体影像高程精度提升效果, 还可以进一步确保立体影像的平面精度满足 1 : 10000 比例尺立体测图的精度要求。

因此, 从理论分析和试验验证两个方面结果来看, 采用本文所述复合测绘处理方法, 可以将 GF-7 立体影像的高程精度提升至满足中国 1 : 10000 比例尺测图精度要求。

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 (in Chinese)*, 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]
- 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 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 Goddard Space Flight Center
- Gruen A W. 1985. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14(3): 175-187
- Herring T A and Quinn K J. 2012. The Algorithm Theoretical Basis Document for the Atmospheric Delay Correction to GLAS Laser Altimeter Ranges. NASA Goddard Space Flight Center
- Hofman M A, Minster J B and Blair J B. 2000. Decomposition of laser altimeter waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(4): 1989-1996 [DOI: 10.1109/36.851780]
- Jiang Y H, Zhang G, Tang X M, Li D R, Huang W C and Pan H B. 2014. Geometric calibration and accuracy assessment of ZiYuan-3 multispectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(7): 4161-4172 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2280134]
- Li G Y. 2017. *Earth Observing Satellite Laser Altimeter Data Processing Method and Engineer Practice*. Wuhan: Wuhan University: 38-53 (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: 38-53)
- Li G Y, Tang X M, Chen J Y, Yao J Q, Liu Z, Gao X M, Zuo Z Q and Zhou X Q. 2021. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(10): 1338-1348 (李国元, 唐新明, 陈继溢, 么嘉棋, 刘诏, 高小明, 左志强, 周晓青. 2021. 高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证. *测绘学报*, 50(10): 1338-1348) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210025]
- 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]
- Lowe D G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91-110 [DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94]
- National Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation. 2014. CH/T 9009.1-2013 Digital products of fundamental geographic information—1: 5000 1: 10000 1: 25000 1: 50000 1: 100000—Part 1: digital line graphs. Beijing: Surveying and Mapping Press (国家测绘地理信息局. 2014. CH/T 9009.1-2013 基础地理信息数字成果 1: 5000 1: 10000 1: 25000 1: 50000 1: 100000 第 1 部分: 数字线划图. 北京: 测绘出版社)
- Neumann T A, Martino A J, Markus T, Bae S, Bock M R, Brenner A C, Brunt K M, Cavanaugh J, Fernandes S T, Hancock D W, Harbeck K, Lee J, Kurtz N T, Luers P J, Luthcke S B, Magruder L, Pennington T A, Ramos-Izquierdo L, Rebold T, Skoog J and Thomas T C. 2019. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 mission: a global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111325 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111325]
- Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, Hancock D and DiMarzio J P. 2005. Overview of the ICESat mission. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21S01 [DOI: 10.1029/2005GL024009]
- Takaku J, Tadono T and Tsutsui K. 2014. Algorithm development of high resolution global DSM generation by ALOS prism//Proceedings of 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE: 4784-4787 [DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947564]
- Tang X M, Xie J F, Mo F, Dou X H, Li X, Li S N, Li S, Huang G H, Fu X K, Liu R, Zhu G B, Ouyang S D, Tang H Z and Chen H. 2021. GF-7 dual-beam laser altimeter on-orbit geometric calibration and test verification. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(3): 384-395 (唐新明, 谢俊峰, 莫凡, 窦显辉, 李新, 李少宁, 李松, 黄庚华, 付兴科, 刘仁, 朱广彬, 欧阳斯达, 唐洪钊, 陈辉. 2021. 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. *测绘学报*, 50(3): 384-395) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200397]

- Tang X M, Zhou P, Zhang G and Wang X. 2014. Research on a production method of sensor corrected products for ZY-3 satellite. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(3): 287-294 (唐新明, 周平, 张过, 王霞. 2014. 资源三号测绘卫星传感器校正产品生产方法研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 39(3): 287-294) [DOI: 10.13203/j.whugis20120033]
- Wang Z Z. 1979. *The Principle of Photogrammetry*. Beijing: Surveying and Mapping Press (王之卓. 1979. *摄影测量原理*. 北京: 测绘出版社)
- Xie J F, Huang G H, Liu R, Zhao C G, Dai J, Jin T Y, Mo F, Zhen Y, Xi S L, Tang H Z, Dou X H and Yang C C. 2020. Design and data processing of China's first spaceborne laser altimeter system for earth observation: GaoFen-7. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 1034-1044 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2977935]
- 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*, 33(163): 341-362 [DOI: 10.1111/phor.12249]
- Yao J Q, Li G Y, Chen J Y, Huang G H, Yang X D and Zhang S T. 2021. Cloud detection and centroid extraction of laser footprint image of GF-7 satellite laser altimetry. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 4(3): 1-12 [DOI: 10.11947/j.JGGS.2021.0301]
- 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]
- Zhou P. 2016. *Key Technology of High Precision Geometric Processing and Evaluation of Mapping Efficiency for ZY-3 Remote Sensing Image*. Wuhan: Wuhan University (周平. 2016. *资源三号卫星遥感影像高精度几何处理关键技术与测图效能评价方法*. 武汉: 武汉大学)
- Zhou P, Tang X M, Wang X, Liu 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.whugis20160486]
- 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]
- Zhou T, Popescu S C, Krause K, Sheridan R D and Putman E. 2017b. Gold-A novel deconvolution algorithm with optimization for waveform LiDAR processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129: 131-150 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.04.021]

Principle and method of GF-7 satellite integrated processing of stereo image and laser data

ZHOU Ping, TANG Xinming

Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of P.R. China, Beijing 100048, China

Abstract: The GF-7 satellite is the world's first Earth observation satellite synchronously equipped with an optical stereo camera and an operational laser altimeter, which can simultaneously obtain submeter resolution dual linear-array stereo images and sparse ground Laser Altimetry Points (LAPs). LAPs can be used for improving the elevation accuracy of stereo images to ensure that the GF-7 satellite can be applied to the global 1:10,000-scale stereo mapping. On the basis of the error propagation principle of the working processes of satellite cameras and laser altimeter, the basic principles of improving the elevation accuracy of stereo images by utilizing LAPs was first analyzed in this study. Then, an integrated processing method of GF-7 satellite stereo images and LAPs, including the construction of precise measurement method of LAPs on stereo images and the combined block adjustment model of LAPs and stereo images, was designed. Finally, the elevation accuracy of the stereo images was effectively improved. A total of 70 stereo images and 463 LAPs of the GF-7 satellite in the northern region of Hebei Province, China, were selected to conduct integrated processing experiments. Results show that the vertical Root Mean Square Error (RMSE) of stereo images in the flat, hilly, mountainous, high-mountainous, and entire regions was reduced from the original 3.0, 4.68, 2.86, 2.48, and 3.19 m to 0.35, 0.66, 0.74, 0.91, and 0.68 m, respectively, and the horizontal RMSE of stereo images was 4.99, 3.52, 4.42, 5.99, and 4.82 m, respectively. These results reveal that the horizontal and vertical accuracy of the GF-7 stereo images satisfied the accuracy requirements of China's 1:10,000-scale mapping. At present, the integrated processing software system of GF-7 satellite stereo images and LAPs constructed by the method described in this study has achieved business application, which is vital for the future construction of global 1:10000-scale geographical information resources.

Key words: remote sensing, GF-7 satellite, stereo images, laser altimetry point, integrated processing, 1:10000-scale mapping

Supported by Key Application Generic Technology of China High-resolution Earth Observation System (No. 42-Y30B04-9001-19/21, 11-Y20A13-9001-17/18)