

## 光学遥感影像和星载激光雷达混合源摄影测量

张鑫磊<sup>1,2,3\*</sup>, 徐青<sup>1,2,3</sup>, 邢帅<sup>1,2,3</sup>, 高铭<sup>1,2,3</sup>, 李鹏程<sup>1,2,3</sup>, 张国平<sup>1,2,3</sup>, 王晋<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;<sup>2</sup>智慧中原地理信息技术河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;<sup>3</sup>时空感知与智能处理自然资源部重点实验室, 河南 郑州 450001

**摘要** 针对我国对星载激光雷达的研究还不够充分, 拟开展光学遥感影像和星载激光雷达混合源摄影测量研究。通过对星载激光雷达光子数据进行数字高程模型 (DEM) 面积元轨迹匹配, 建立激光测高点轨迹与遥感影像生成数字表面模型 (DSM) 间的对应关系。将筛选后地面光子与高分辨率光学遥感影像进行联合区域网平差, 并基于顾及激光测高点坐标误差的迭代求解方法, 实现卫星遥感影像立体定位精度的提高。星载激光雷达数据 ATL03、高分七号 (GF-7) 和天绘三号 (TH-3) 卫星遥感影像用于验证该方法的性能。实验结果表明, 本文方法可以有效提高无地面点控制下卫星遥感影像立体定位精度, 高程精度可达 1.258 m。

**关键词** 遥感; 星载激光雷达; 卫星遥感影像; 联合平差; 数字高程模型匹配; ICESat-2

中图分类号 P236

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2428001

## Hybrid Source Photogrammetry of Optical Remote Sensing Images and Space-Borne LiDAR

Zhang Xinlei<sup>1,2,3\*</sup>, Xu Qing<sup>1,2,3</sup>, Xing Shuai<sup>1,2,3</sup>, Gao Ming<sup>1,2,3</sup>, Li Pengcheng<sup>1,2,3</sup>,Zhang Guoping<sup>1,2,3</sup>, Wang Jin<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>*Institute of Geospatial Information, PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, Henan, China;*<sup>2</sup>*Collaborative Innovation Center of Geo-Information Technology for Smart Central Plains, Zhengzhou 450001, Henan, China;*<sup>3</sup>*Key Laboratory of Spatiotemporal Perception and Intelligent Processing, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450001, Henan, China*

**Abstract** As the research on space-borne LiDAR in China is insufficient, we explore the hybrid source photogrammetry of optical remote sensing images and space-borne LiDAR. The surface-element trajectory matching of digital elevation model (DEM) is performed on photon data of space-borne LiDAR to establish the correspondence between the trajectory of laser altimetry points and the digital surface model (DSM) generated by remote sensing images. Then, the selected ground photons and high-resolution optical remote sensing images are combined with the joint block adjustment method. By the iterative solution method considering coordinate errors of laser altimetry points, the stereo positioning accuracy of satellite remote sensing images can be promoted. The data ATL03 of space-borne LiDAR, as well as satellite remote sensing images from Gaofen-7 (GF-7) and Tianhui-3 (TH-3), are used to verify the performance of the method. The experimental results indicate that the proposed method can effectively improve the stereo positioning accuracy of satellite remote sensing images without ground control points, and the elevation accuracy can reach 1.258 m.

**Key words** remote sensing; space-borne LiDAR; satellite remote sensing images; combined adjustment; digital elevation model matching; ICESat-2

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-24; 录用日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(41876105, 41371436)

通信作者: \*zx19602@163.com

## 1 引言

近年来,蓬勃发展的星载激光雷达(LiDAR)在地表信息获取方面具有独特的优势。美国 2018 年发射的 ICESat-2 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-2) 卫星是目前全球最先进的激光雷达遥感卫星,其携带的先进地形激光高度计系统(ATLAS)使用 532 nm 激光,具有 10 kHz 的发射频率,可以得到地面直径约为 17 m、沿轨方向间距为 0.7 m、高程精度优于 0.8 m 的激光点,其能够精确表达全球地表信息<sup>[1-5]</sup>,但其垂轨方向间隔超过 3 km,分辨率较低,因此无法实现大面积区域高分辨率地表信息的获取。但将 ICESat-2 卫星与高分辨率遥感影像进行结合,则可以显著提高遥感影像的定位精度<sup>[6]</sup>。

近年来,国内外学者持续针对卫星激光雷达数据与遥感影像的联合平差进行了研究,证明了结合卫星激光测高数据可以有效提高遥感影像的无控定位精度。前期研究大多集中在行星探测方面,将 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter)、LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) 等激光测高数据与遥感影像相结合,可实现对火星、月球表面的形貌测绘,解决火星、月球表面缺少控制数据的问题<sup>[7-10]</sup>。随后,结合 ICESat 卫星获取的激光测高数据,开展了针对地球的联合区域网平差技术研究,该研究显著提高了我国资源三号<sup>[11-13]</sup>、天绘一号<sup>[14]</sup> 卫星遥感影像的无控定位精度。

但目前针对 ICESat-2 卫星数据的联合区域网平

差技术研究较少,仅进行了初步的实验验证。这主要是因为:ATLAS 没有足印相机,使得激光测高点平面位置无法精确确定;卫星立体遥感影像的定向参数存在误差,造成激光点的物像不一致;激光点反投影的同名像点坐标有偏差等。针对以上问题,本文提出了一种针对遥感影像和星载激光雷达数据的联合区域网平差方法,重点解决星载激光点平面坐标精度不足与物像一致性较差的问题,以有效提升激光测高点与影像的对准精度以及定位精度。利用河南郑州地区的遥感影像和星载激光测高点对联合区域网平差进行实验,以验证算法的有效性。

## 2 基本原理

目前,高分辨率遥感影像的定向参数都以有理函数模型(RFM)参数的形式提供<sup>[15]</sup>,因此本文是在 RFM 的基础上,提出了光学影像与激光测高数据联合平差的新方案。本方法首先对测区内立体遥感影像进行自由区域网平差,然后进行影像密集匹配生成测区的数字表面模型(DSM),并将其与星载激光测高数据进行轨迹匹配,之后将 DSM 上的匹配轨迹点依据平差后的影像 RFM 参数进行反投影,得到对应的像点坐标。接着,采用多种约束条件对星载激光点进行筛选,得到可靠的激光点数据。最后,利用筛选后的激光点数据和卫星影像数据进行顾及激光点平面坐标误差的光束法联合区域网平差,得到更精确的影像 RFM 参数,该方法的流程如图 1 所示。

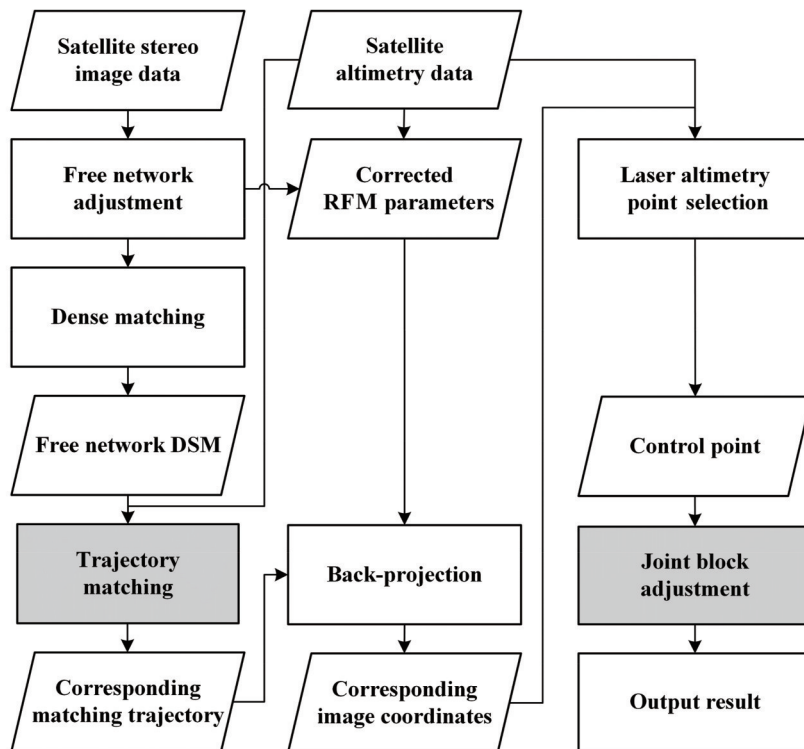


图 1 针对遥感影像与星载激光雷达数据的联合区域网平差方法流程图

Fig. 1 Flow chart of joint block adjustment method of remote sensing images and satellite-based LiDAR data

本文的联合区域网平差方法的具体流程如下:对测区的遥感立体影像数据进行自由区域网平差,得到

改正后的遥感立体影像 RFM 参数;依据改正后的遥感立体影像 RFM 参数,对遥感立体影像进行密集匹配,

得到测区的 DSM 数据;将测区内每轨星载激光雷达数据与 DSM 数据进行轨迹匹配,得到每轨星载激光雷达数据在 DSM 上的对应轨迹;根据每轨星载激光雷达数据在 DSM 上对应轨迹的空间坐标,利用改正后的遥感立体影像 RFM 参数对其进行反投影,求得对应影像上的像点坐标;依据测高点的类别、类别置信度、局部地形坡度等约束条件,对全部星载激光雷达数据进行筛选,保留置信度高且局部地形平坦的地面激光点作为控制点<sup>[16]</sup>;将筛选后的激光测高点作为控制条件,与遥感立体影像联立进行顾及激光测高点平面坐标误差的光束法联合区域网平差,得到更新的遥感立体影像 RFM 参数。该方法综合考虑星载激光测高点与卫星遥感立体影像的物方与像方坐标误差,利用轨迹匹配与联合区域网平差等关键技术,重点解决了物像不一致和同名像点不匹配问题,可以有效提高平差精度。

### 2.1 基于数字高程模型面积元的轨迹匹配方法

ICESat-2 卫星的每一条激光束的地面轨迹都是由一系列三维激光测高点组成,将其称为激光点轨迹(LPT)。LPT 和 DSM 的匹配实质上就是在 DSM 上找到与 LPT 最相似的一条轨迹。常规的匹配方法是:根据先验知识在 DSM 上确定一条与 LPT 对应的初始轨迹,然后统计两个轨迹之间对应脚点的高程均方差作为匹配测度,接着在初始轨迹邻域内以一定步长进行移动,得到新的轨迹,每次移动均重新计算相应的高程均方差,遍历完毕后以高程均方差最小的轨迹作为 LPT 在 DSM 上的匹配轨迹<sup>[17-19]</sup>。显然,这种搜索匹配方法具有一定的盲目性,效率不高且容易出现误匹配。

针对上述匹配方法存在的问题,本文提出了一种基于数字高程模型(DEM)面积元的轨迹匹配方法,引入了自然表面的数学近似<sup>[20-22]</sup>,运用最小二乘法计算单条 LPT 和测区 DSM 之间的最佳匹配位置。

图 2 中采用 3 个表面斑块(分别标记为 1、2、3)来示意 DEM 面积元匹配方法。斑块 3 即为地球表面反射激光点的真实位置,除实时布置激光探测器外,无法知道激光点的确切位置,而是必须依赖于 ICESat-2 发

布的激光点空间坐标,该位置由斑块 2 标记。斑块 1 显示了 ICESat-2 LPT 在 DEM 面积元匹配后的最佳一致性位置,从斑块 2 到斑块 1 的向量称为平移向量。

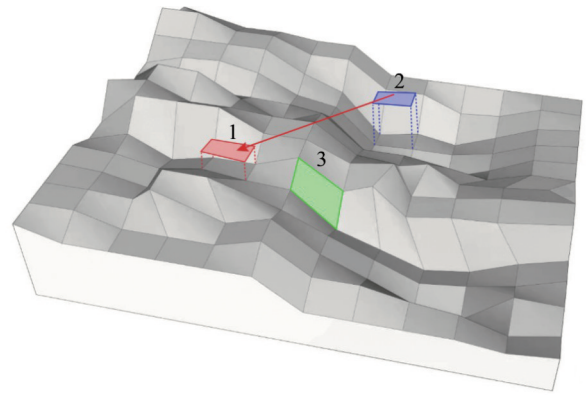


图 2 DEM 面积元匹配示意图

Fig. 2 DEM area element matching diagram

为了获得 LPT 和 DEM 轨迹之间的差异函数,可以通过 LPT 附近的面积元来近似模拟 DEM。为了寻找 LPT 与 DEM 之间具有最佳一致性的位置,在匹配过程中,将 LPT 中的激光点垂直投影到地表,以该点为中心开设大小为  $n \times n$  的窗口,窗口内每个 DEM 面积元的表达式可由采样点坐标确定。计算 ICESat-2 激光点到各个 DEM 面积元的最短距离  $d$ ,即

$$d = x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - \rho, \quad (1)$$

式中:  $\cos \alpha$ 、 $\cos \beta$ 、 $\cos \gamma$ 、 $\rho$  为面积元的平面参数。

误差方程可表示为

$$v = (x + \Delta x) \cos \alpha + (y + \Delta y) \cos \beta + (z + \Delta z) \cos \gamma - \rho - d, \quad (2)$$

式中:  $(x, y, z)$  为激光点的三维坐标;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  为激光点坐标的改正数。通过对 LPT 中所有激光点构建误差方程,进行联立求解,解算出单轨 LPT 与 DEM 数据的最佳匹配位置。如图 3 所示,基于 DEM 面积元的轨迹匹配方法处理流程分为 4 个步骤:

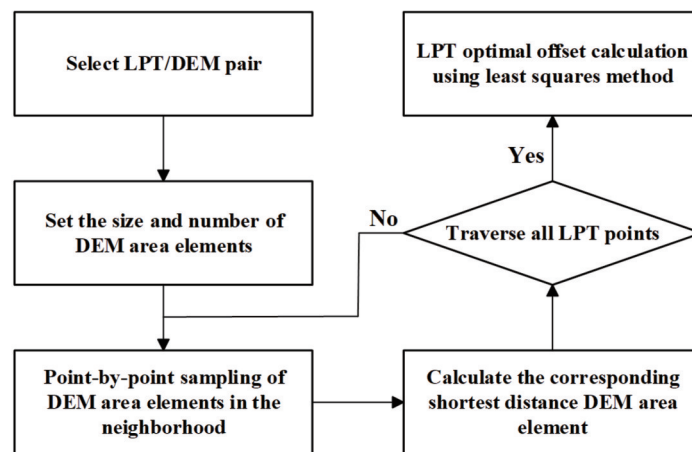


图 3 DEM 面积元匹配流程图

Fig. 3 Flow chart of DEM area element matching

1) 选择 ICESat-2 强光束中的一段 LPT 并将其映射到 DEM 上, 先计算其粗差, 若粗差较大, 则舍弃该条激光点轨迹。每一个 LPT/DEM 对为一个计算单元。

2) 沿着 LPT, 通过一系列面积元来模拟 DEM。面积元的大小取决于 DEM 的地形、其采样大小和预期平移向量的大小。本文选择了 5 m × 5 m 的面积元大小, 并采用 1 m 间隔下共 25 个采样点来拟合 DEM 面积元, 得到激光点垂直投影 DEM 对应点邻域附近 25 个 DEM 面积元。

3) 计算 ICESat-2 激光点最邻近 DEM 面积元, 对于 LPT 上的每个点, 确定其对应 DEM 面积元中距离最小的一个。

4) 运用最小二乘算法计算 LPT/DEM 组合的最佳偏移量, 由于平差计算是线性的, 因此不需要对未知

参数进行近似, 也不需要迭代。

### 2.2 顾及激光点坐标误差的迭代求解方法

尽管通过轨迹匹配可以解决激光点物像不一致问题的影响, 但影像 RFM 参数的误差和激光点的平面坐标误差仍未完全消除, 因此本文在区域网联合平差解算中提出一种顾及激光点坐标误差的迭代求解方法 (图 4), 该方法可以得到更精确的影像 RFM 参数和激光点平面坐标的改正数。该方法首先通过提取和匹配得到大量的连接点, 计算其初始空间坐标, 然后针对星载激光点可能会反投影到多景立体影像上的情况, 在多景影像中选择侧视角最小的下视影像上的像点作为基准像点, 再通过匹配得到其他景影像上的同名像点坐标, 接着分别对激光点和连接点组建误差方程并进行法化答解, 得到新的 RFM 参数、连接点空间坐标和激光点平面坐标, 进行反复迭代直至满足阈值条件。

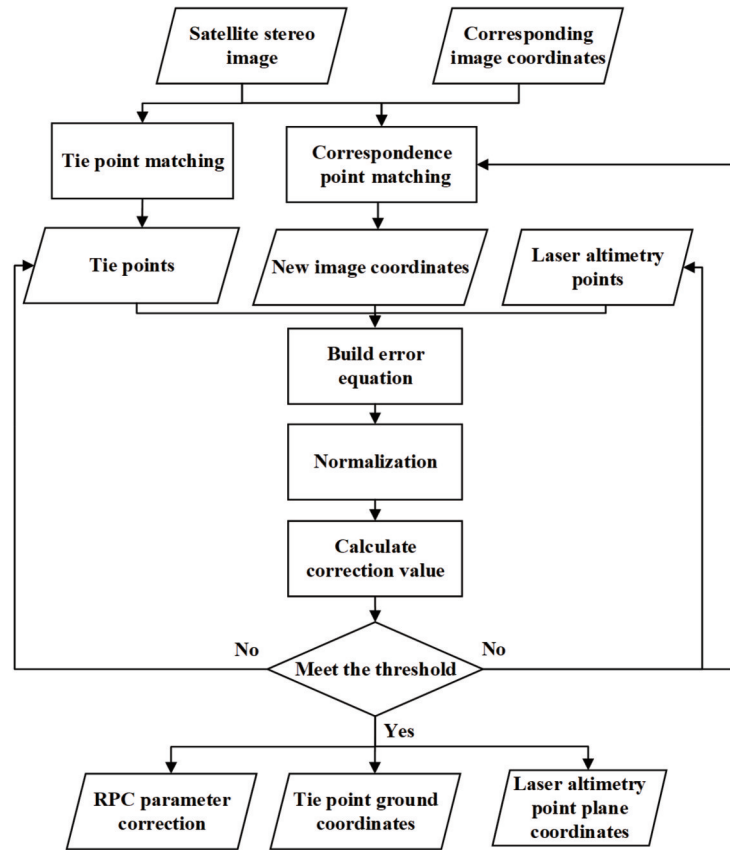


图 4 顾及激光点坐标误差的迭代求解方法流程图

Fig. 4 Flow chart of iterative solution method considering coordinate error of laser altimetry points

激光点的误差方程及其平面坐标存在误差的附加方程为

$$\begin{cases} V_{ij} = A_{ij}\Delta_j + B_{ij}\Delta_i - L_{ij} & P_{ij} \\ \begin{pmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} p_{xi} \\ p_{yi} \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $i$  为激光测高点的序号;  $j$  为立体影像的序号;  $V_{ij}$  是第  $j$  个立体影像中第  $i$  个激光测高点的残差矩阵;  $\Delta_j$  和  $\Delta_i$  分别为立体影像 RFM 参数的仿射变换系数矩阵与激光点平面坐标的改正数矩阵;  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为立体

影像 RFM 参数的仿射变换系数矩阵与激光点平面坐标的改正数的系数矩阵;  $L_{ij}$  是常数矩阵;  $X_i$  和  $Y_i$  为激光点平面坐标的计算值;  $X'_i$  和  $Y'_i$  为激光点平面坐标的观测值;  $v_{xi}$  和  $v_{yi}$  为激光点平面坐标残差;  $P_{ij}$  为相应权矩阵;  $p_{xi}$  和  $p_{yi}$  为权值。

连接点的误差方程为

$$V_{kj} = A_{kj}\Delta_j + B_{kj}\Delta_i - L_{kj} & P_{kj}, \quad (4)$$

式中:  $k$  为连接点的序号;  $j$  为立体影像的序号; 其余参数与式 (3) 类似。

### 3 分析与讨论

为了验证本文联合平差方法提高区域网平差结果的有效性,选择了河南郑州地区 6 景 TH-3 和 3 景 GF-7 立体影像,两组影像的详细信息如表 1 所示,该地区海拔在 73~1475 m 之间,地形复杂,上述提出的联合平差优化算法针对该地区可产生较好的检验效果。实验选取 12 对 ATLAS ATL03 数据<sup>[23]</sup>,

数据获取时段为 2018 年 10 月 25 日到 2021 年 6 月 21 日,大地基准为 WGS-84 坐标系,高程基准为 WGS-84 椭球高。本次实验共采用 37 个实测检查点,定位精度优于 0.1 m,卫星影像范围、激光点轨迹及筛选后激光测高点位分布如图 5 所示,图中黑色线段表示激光点轨迹,黑色边框表示卫星影像分布范围,实心圈表示检查点,实心三角形表示筛选后激光测高点。

表 1 卫星影像的详细信息

Table 1 Detail information of satellite images

Satellite type	TH-3	GF-7
Acquisition date	2021-03-03, 2021-09-02	2021-01-17
Latitude range	34.04°N-35.12°N	34.31°N-34.94°N
Longitude range	112.52°E-113.54°E	113.46°E-113.87°E
Image number	6	3
Range / (km×km)	40×40	20×20
Image resolution / m	0.65 (backward-view), 0.8 (forward-view)	0.65 (backward-view), 0.8 (forward-view)

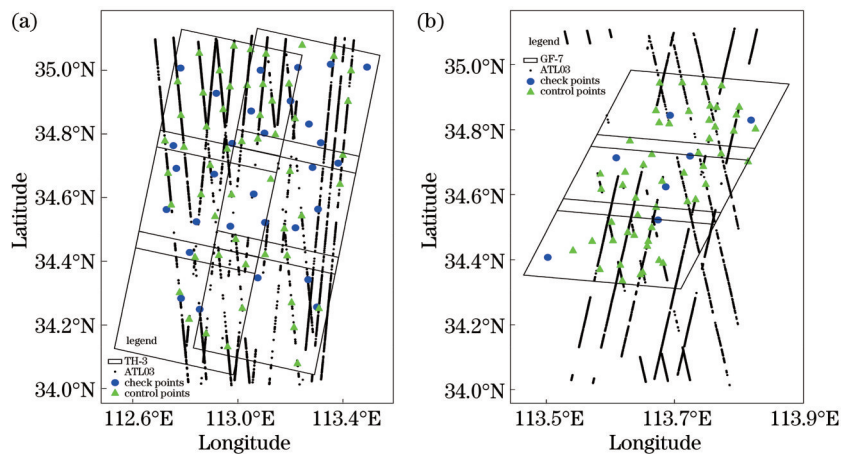


图 5 实验数据分布图。(a) TH-3; (b) GF-7

Fig. 5 Experimental data distributions. (a) TH-3; (b) GF-7

#### 3.1 DEM 面积元匹配实验

如图 6 所示,TH-3 平差实验所选控制点的对应轨迹整体平移量小于 GF-7,这可能与 TH-3 立体影像原始定位精度优于 GF-7 立体影像有关。ATLAS 激光测高点经轨迹匹配后,搜索到 DSM 上的最佳匹配位置。通过将 DSM 上的匹配轨迹点依据平差后的影像定向参数进行反投影,得到星载激光点对应的像点坐标。该方法充分利用了自由网平差后影像与 DSM 之间符合精度高的优势,通过三维数据的空间匹配来建立影像与激光点之间的几何对应关系,可以大幅减小卫星遥感影像定向参数误差的影响,从而提高后续联合平差精度。

#### 3.2 TH-3 联合区域网平差实验

本实验使用 8 对 ATLAS ATL03 激光测高点与 TH-3 卫星立体影像进行联合平差。为研究 DEM 面积元匹配对平差结果的影响,分别采用无控自由网平

差方案(记为方案一)、直接联合激光测高点的平差方案(记为方案二)与本文方案(记为方案三)进行实验。TH-3 联合区域网平差实验结果如表 2 所示,各个方案的检查点误差分布如图 7 所示。

在无任何约束条件下,高程方向、东西向、南北向精度分别为 1.970、3.470、3.429 m。加入 ATL03 激光点,进行顾及激光点坐标误差迭代求解后,高程方向精度提升明显,提高了 31%,平面方向精度提升有限,东西向、南北向精度分别提升了 2% 和 5%。使用 DEM 面积元匹配后,相较第二种方案,高程方向精度提升了 7%,东西向精度提升了 4%,南北向精度相当。由于 TH-3 原始平面定位精度较高,方案三能在顾及激光点坐标误差迭代求解基础上进一步提升精度,但提升幅度不大,整体高程精度优于 1.3 m。

#### 3.3 GF-7 联合区域网平差实验

为进一步验证 DEM 面积元匹配提高平差结果的

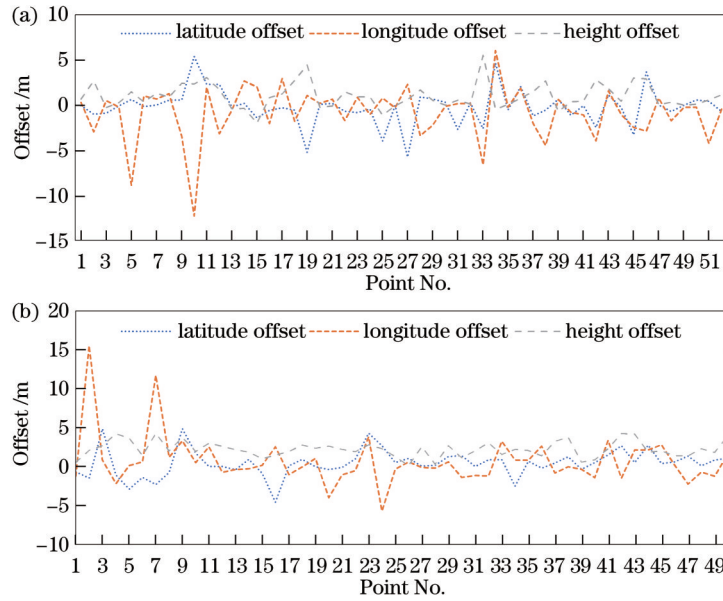


图 6 DEM 面积元匹配最佳偏移量。(a) TH-3 平差实验所选控制点对应轨迹最佳偏移量；(b) GF-7 平差实验所选控制点对应轨迹最佳偏移量

Fig. 6 DEM area element matching optimal offset. (a) Optimal offset of trajectory corresponding to selected control points in TH-3 adjustment experiment; (b) optimal offset of trajectory corresponding to selected control points in GF-7 adjustment experiment

表 2 TH-3 立体影像的总体平差结果

Table 2 Total adjustment results of TH-3 stereo images

Scheme	unit: m		
	Height	East	North
Scheme 1	1.970	3.470	3.429
Scheme 2	1.353	3.385	3.256
Scheme 3	1.258	3.252	3.285

有效性,本实验使用 4 对 ATLAS ATL03 激光测高点与 GF-7 卫星立体影像进行联合平差,平差方案与第 3.2 节相同。GF-7 联合区域网平差实验结果如表 3 所示,各个方案的检查点误差分布如图 8 所示。

未添加激光点时,高程方向、东西向、南北向精度分别为 4.643、13.101、7.119 m,平面和高程误差有明显的系统性分布。方案二相较方案一,ATLAS 激光测高点的精度优于所选影像的原始精度,高程方向、东

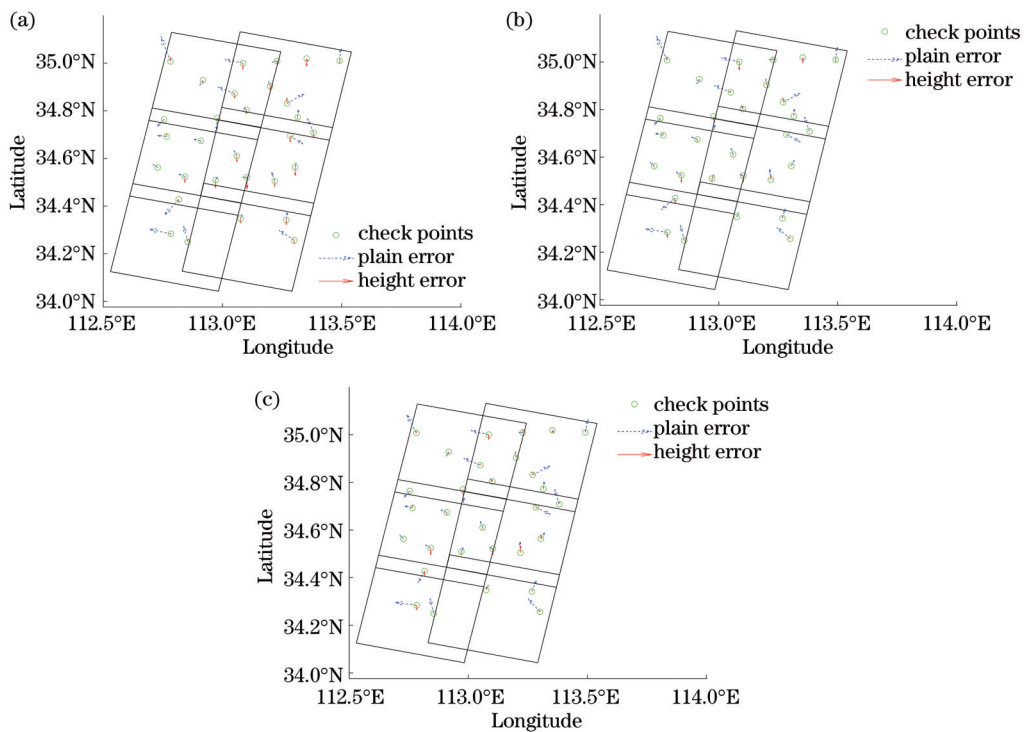


图 7 不同 TH-3 区域网平差方案的残差比较。(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3

Fig. 7 Comparison of residuals of TH-3 block adjustment schemes. (a) Scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3

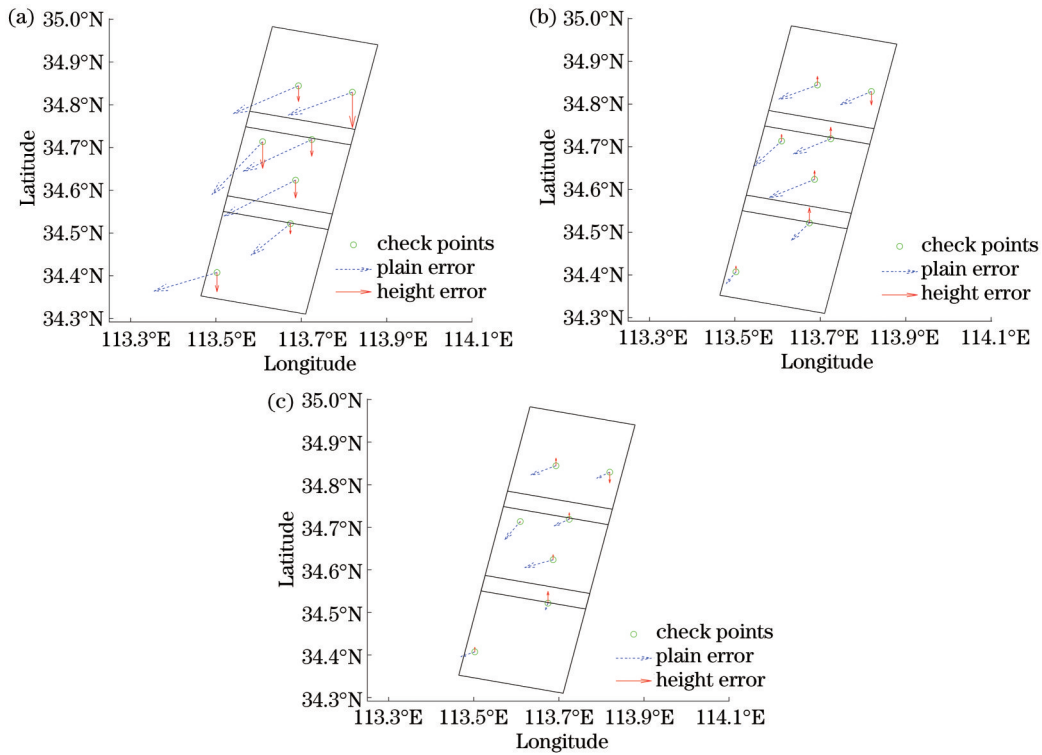


图 8 不同 GF-7 区域网平差方案的残差比较。(a)方案 1;(b)方案 2;(c)方案 3

Fig. 8 Comparison of residuals of GF-7 block adjustment schemes. (a) Scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3

表 3 GF-7 立体影像总体平差结果

Table 3 Total adjustment results of GF-7 stereo images

Scheme	unit: m		
	Height	East	North
Scheme 1	4.643	13.101	7.119
Scheme 2	2.198	7.421	3.659
Scheme 3	1.637	5.734	2.972

西向、南北向精度分别提高了 53%、43%、49%。ATLAS 激光测高点经轨迹匹配后,高程方向、东西向、南北向精度分别提高了 26%、23%、19%,精度提升效果显著,测区平面系统误差明显消除,高程扭曲明显改善。通过将激光测高数据与参考 DSM 进行匹配,能够更准确地计算激光测高点对应的像点坐标,提高其像方精度,进而可有效提升平差结果精度。从两组实验对比结果可以看出,当卫星立体影像原始定位精度较低时,采用本文联合平差方法能够有效消除系统误差,平差精度提升更显著。

## 4 结 论

针对星载激光测高数据与卫星立体遥感影像进行联合定位时激光测高数据的平面精度不足、物像一致性有待提高的问题,提出了光学遥感影像和星载激光雷达混合源摄影测量方法,利用星载激光测高点与立体遥感影像自由网平差生成的 DSM 进行 DEM 面积元匹配和顾及激光测高点平面坐标误差的光束法联合区域网平差等技术,提升激光测高数据的平面精度和

物像一致性,从而提高整体平差精度。利用郑州地区 ICESat-2 激光测高数据与 TH-3、GF-7 遥感立体影像数据进行实验,高程精度可分别达到 1.258 m 和 1.637 m,同时可提升平面精度。本文目前仅利用郑州地区的数据进行理论验证的实验,后续可以利用不同地形区域的数据进一步验证本文所提方法的可靠性和普适性。

## 参 考 文 献

- [1] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260-273.
- [2] Xie H, Xu Q, Ye D, et al. A comparison and review of surface detection methods using MBL, MABEL, and ICESat-2 photon-counting laser altimetry data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 7604-7623.
- [3] Popescu S C, Zhou T, Nelson R, et al. Photon counting LiDAR: an adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 208: 154-170.
- [4] 周鑫, 杨坚, 李松. 星载单光子激光雷达海面回波信号模型[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1928002. Zhou X, Yang J, Li S. Model of sea surface echos from spaceborne single photon lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1928002.
- [5] 么嘉祺, 唐新明, 李国元, 等. 激光测高卫星 ICESat-2 云检测及其相关算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020,

- 57(13): 131408.
- Yao J Q, Tang X M, Li G Y, et al. Cloud detection of laser altimetry satellite ICESat-2 and the related algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131408.
- [6] 李傲, 唐新明, 祝小勇. 基于统一验证场法的国产高分辨率卫星影像几何定位精度评估[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0328001.
- Li A, Tang X M, Zhu X Y. Geometric positioning accuracy evaluation of domestic high-resolution satellite images based on unified verification field method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0328001.
- [7] Rosiek M R, Kirk R L, Archinal B A, et al. Utility of Viking orbiter images and products for Mars mapping[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(10): 1187-1195.
- [8] Yoon J S, Shan J. Combined adjustment of MOC stereo imagery and MOLA altimetry data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(10): 1179-1186.
- [9] Di K C, Hu W M, Liu Y L, et al. Co-registration of Chang' E-1 stereo images and laser altimeter data with crossover adjustment and image sensor model refinement [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(12): 1615-1628.
- [10] 何钰, 吴绍民, 邢帅. 基于 RFM 的嫦娥一号 CCD 影像区域网平差研究[J]. *测绘科学*, 2013, 38(6): 5-6, 15.
- He Y, Wu S M, Xing S. Block adjustment of Changè-1 CCD images based on RFM[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(6): 5-6, 15.
- [11] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. ZY-3 Block adjustment supported by GLAS laser altimetry data[J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(153): 88-107.
- [12] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. Improve the ZY-3 height accuracy using ICESat/GLAS laser altimeter data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B1: 37-42.
- [13] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. Integration of ZY3-02 satellite laser altimetry data and stereo images for high-accuracy mapping[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2018, 84(9): 569-578.
- [14] 王晋, 张勇, 张祖勋, 等. ICESat 激光高程点辅助的天绘一号卫星影像立体区域网平差[J]. *测绘学报*, 2018, 47(3): 359-369.
- Wang J, Zhang Y, Zhang Z X, et al. ICESat laser points assisted block adjustment for mapping satellite-1 stereo imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 359-369.
- [15] Tao C V, Hu Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [16] 张鑫磊, 邢帅, 徐青, 等. ATLAS 数据与资源三号 02 星影像联合区域网平差[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 20200194.
- Zhang X L, Xing S, Xu Q, et al. Joint block adjustment for ATLAS data and ZY3-02 stereo imagery[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200194.
- [17] Filin S, Csathó B. Improvement of elevation accuracy for mass-balance monitoring using in-flight laser calibration [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 330-334.
- [18] Filin S. Recovery of systematic biases in laser altimetry data using natural surfaces[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(11): 1235-1242.
- [19] Filin S. Calibration of spaceborne laser altimeters-an algorithm and the site selection problem[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(6): 1484-1492.
- [20] Magruder L A, Brunt K M, Alonzo M. Early ICESat-2 on-orbit geolocation validation using ground-based corner cube retro-reflectors[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3653.
- [21] Hofton M A, Blair J B, Luthcke S B, et al. Assessing the performance of 20-25 m footprint waveform lidar data collected in ICESat data corridors in Greenland[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24501.
- [22] Tang X M, Xie J F, Gao X M, et al. The in-orbit calibration method based on terrain matching with pyramid-search for the spaceborne laser altimeter[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(3): 1053-1062.
- [23] Neumann T A, Martino A J, Markus T, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 mission: a global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111325.