

高分七号卫星多源遥感数据精度优化与评估

胡柳茹¹, 唐新明², 张 智¹, 李国元², 陈继溢², 田怀启¹, 张帅台^{2,3}, 乔俊平¹, 李 昕¹

- (1. 自然资源部第一地形测量队, 陕西 西安 710054;
2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
3. 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 高分七号卫星是国内首个亚米级双线阵立体成像卫星, 同时配有两套激光测高仪和激光足印相机, 可同期获取多源遥感数据。文中采用高分七号卫星获取的多源遥感数据进行平面和高程精度优化, 利用激光测高数据对立体影像密集匹配的 DSM 进行偏度、中值、线性和二阶多项式模型和高程优化评估, 利用足印影像对 DOM 进行一阶仿射变换方法和平面优化评估, 并利用外业控制点对无控平面高程、激光高程优化、足印-激光平面高程优化、外业-激光平面高程优化等不同优化模型的结果进行精度评估。实验结果表明, 利用激光测高数据可明显优化 DSM 高程精度, 无控 DSM 高程误差平均值为-4.268 m, 中误差为 4.518 m, 经过中值模型优化后的 DSM 高程误差平均值提升为-0.272 m, 中误差提升为 1.508 m, 经过线性模型优化后的 DSM 高程误差平均值提升为-0.320 m, 中误差提升为 1.351 m; 利用足印影像可改善 DOM 的平面精度, 平面误差平均值从 13.606 m 提升到 5.341 m, 中误差从 13.626 m 提升到 5.495 m。

关键词: 高分七号; 激光测高; 足印影像; 精度优化

中图分类号: P228 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210458

Accuracy optimization and assessment of GF-7 satellite multi-source remote sensing data

Hu Liuru¹, Tang Xinming², Zhang Zhi¹, Li Guoyuan², Chen Jiayi²,
Tian Huaiqi¹, Zhang Shuaitai^{2,3}, Qiao Junping¹, Li Xin¹

- (1. The First Topographic Surveying Brigade of Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Xi'an 710054, China;
2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;
3. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The GF-7 satellite is the first sub-meter two-line-array stereo imaging satellite of China. It is equipped with two sets of laser altimeters and laser footprint cameras to capture multi-source remote sensing data simultaneously. In this paper, the multi-source remote sensing data of GF-7 satellite were used to promote the horizontal and vertical accuracy, which used laser altimetry data to optimize the vertical accuracy by skewness, median, linear polynomial and quadratic polynomial model, and the footprint image was used to optimize the horizontal accuracy in the first-order affine transformation method. Moreover, the accuracy of uncontrolled plane-elevation, laser elevation optimization, footprint-laser plane-elevation optimization and field-laser plane-elevation optimization were evaluated through the field control points. The experimental results show that the vertical

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-09-27

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项 (42-Y30B04-9001-19/21)

作者简介: 胡柳茹, 女, 工程师, 硕士, 主要从事激光测高与高程控制点提取方面的研究。

accuracy of DSM can be improved significantly with the support of laser altimetry data. The mean vertical error of the DSM produced without GCPs is -4.268 m and the mean square error is 4.518 m. While the mean vertical error and mean square error of the DSM optimized by the median model are improved to -0.272 m and 1.508 m, and the mean vertical error and mean square error of the DSM optimized by linear model reach -0.320 m and 1.351 m. The horizontal accuracy of DOM can be improved by the footprint image. The mean horizontal error is optimized from 13.606 m to 5.341 m, and the mean square error is optimized from 13.626 m to 5.495 m.

Key words: GF-7; laser altimetry; footprint image; accuracy optimization

0 引言

随着激光测高技术的发展,激光足印直径不断减小,定位精度不断提高,高程精度可达亚米级,观测范围不断扩大,足印影像具有更多的应用价值,为高程控制点的获取提供了一个新途径^[1],为提高平面和高程精度优化与评估提供了新方法。李国元等^[2]提出多准则约束算法,筛选 ICESat/GLAS(Ice, cloud, and land elevation satellite/Geo-science Laser Altimetry System)数据中高精度的高程控制点,有效提高境外地区无地面控制点的立体测图精度。王密等^[1]基于 ICESat-2/ATLAS(Advanced topographic laser altimeter system)全球激光数据产品 ATL08,研究自动提取高程控制点的方法,从而获取点位密度大、精度高的全球高程控制点,为地面控制点稀少地区的立体测绘和产品质量检验提供了数据支持。Li 等^[3]提出利用激光测高数据获取控制点的高程信息,利用足印影像和立体影像获取控制点的平面信息。

高分七号(GF-7)卫星是中国第一颗亚米级的高分辨率对地观测遥感卫星,其高精度的高程测量能力服务于多学科,可用于资源探测、大地观测及其他工程化应用^[4-5]。高分七号激光测高系统获取的高精度高程信息,可辅助开展全球 1:10000 立体测图和大范围的地理信息数据更新。高分七号激光测高系统第一次同时配有激光足印相机(Laser Footprint Camera, LFC)和激光光轴监控相机(Laser Optical Axis Surveillance Camera, LOASC),激光足印相机平行排列于卫星轨道飞行方向,具备卫星轨道两侧的足印影像获取能力^[6]。与资源三号 02 星激光测高仪对比,高分七号激光测高仪将有更高的测距精度和全波形记录性能^[7-8],从而实现更高的地面定位精度,更有利于地形信息提取与分析^[9]。

前期研究证明基于 GLAS 数据分别利用偏度、中

值、线性、二次多项式等进行 DSM(Digital Surface Model)误差修正,均能有效地消除 DSM 系统误差,其中基于二次多项式方法更适用于平地和丘陵地貌,线性模型更适用于高山地貌^[10]。文中介绍了基于高分七号的激光测高数据,优化高分七号高分辨率线阵影像无控生产的 DSM,同时基于高分七号的足印影像数据优化高分七号高分辨率线阵影像生产的 DOM(Digital Orthophoto Map),并利用外业控制点对精度优化前后结果进行评估对比。

1 高分七号多源遥感数据精度优化原理

高分七号卫星能够获取更多不同类型的同期高精度数据,让同期多源遥感数据控制成为可能。激光测高可以快速、直接地获取三维空间信息,是一种有效、快速地获取高程控制点的方法^[11]。优化高分七号多源遥感数据 DSM 生产技术的原理是利用激光测高数据作为高程控制点对 DSM 进行模型改正,有效提高无控测量高程精度,并对最终 DSM 进行质量评估^[10](图 1)。足印相机在激光出光时刻同时对激光光斑与地面成像,形成足印影像。光轴监视相机在星上同步捕获两束激光光斑,监视激光光轴变化。因此,足印影像与激光之间有准确的相互位置关系,为同期卫星遥感数据平面控制提供可能。

2 平面高程精度优化模型

2.1 DOM、DSM 平面精度优化模型

足印影像是与激光测高数据同期拍摄的具有地理信息的小影像,地面分辨率为 3.2 m。足印相机与激光测高仪具有稳固的相对关系,通过足印影像实现激光测高数据与立体影像关联,从而实现激光、立体影像多源数据处理。文中引入基于足印影像特征点的平面一阶仿射变换,辅助提高高分七号同期平面精度。

足印影像特征点选取清晰、无云的影像,且影像

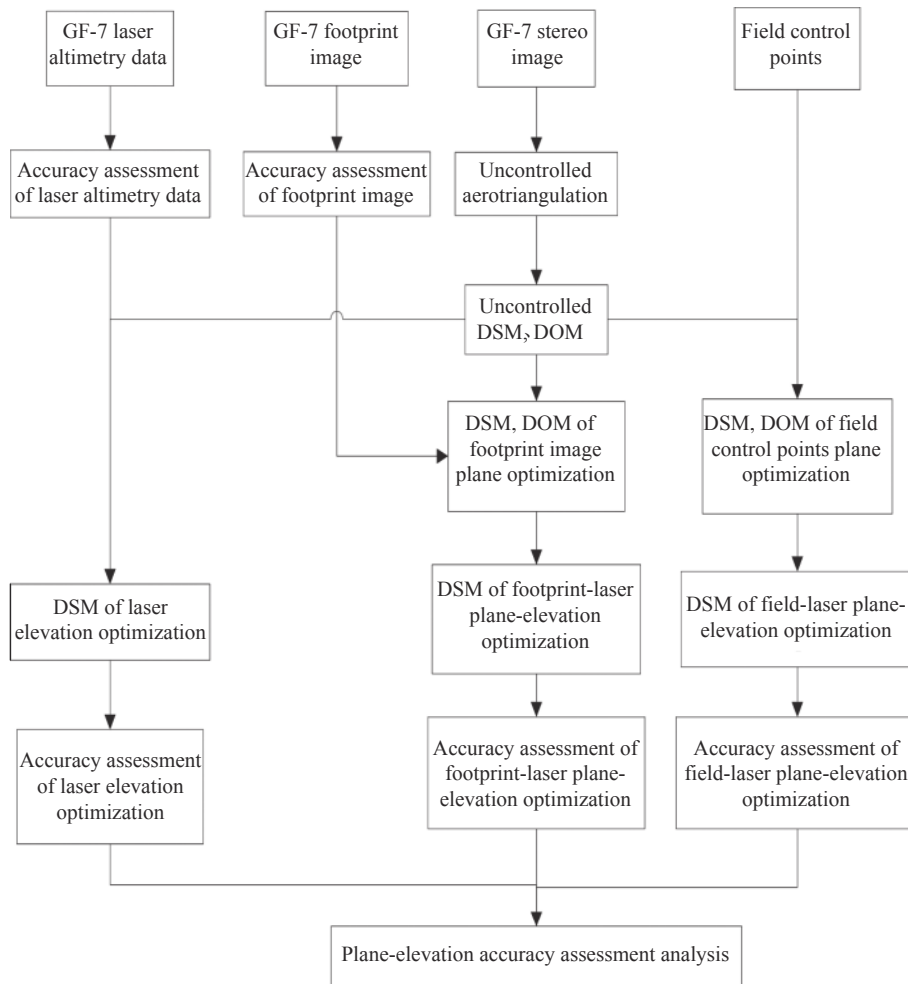


图 1 高分七号多源遥感数据高程和平面控制技术流程

Fig.1 Technical process of GF-7 satellite multi-source remote sensing data elevation and plane control

均可正确判读、量测。点位应选在影像明显的线状地物交角(交角应在 30°~150°之间),宽度小于 2 m 的道路交叉口,小于 3 m 的点状地物上或影像明显的灌木上,在林区可选在影像明显的树冠上。利用足印影像特征点有效配准或自动找到立体影像上的同名点,利用同名点建立足印影像与立体影像的仿射变换关系,从而求得仿射变换后立体影像。

基于一阶仿射变换模型是利用足印影像上特征点作为平面控制点直接对无控影像进行几何校正方法,不考虑成像时的空间几何状态^[12],回避了足印影像和激光点作为控制点进行空三加密,把影像的变形作为旋转、平移、缩放及更高级别的弯曲等多种基本变形共同作用引起的变化,通过选择一种合适的仿射变换多项式来构建影像纠正的转换关系,实用性强。其中变换后坐标值和变换前坐标值的数学关系如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x' , y' 为变换后坐标值; X, Y 为变换前坐标值。

2.2 DSM 高程精度优化模型

一般平坦且地物稀少的地区获取的激光数据精度更高,但在空三加密过程中,匹配的同名点易产生误差,因此,文中提出的激光数据优化 DSM 的方法主要是点对面模型,有效地避免了同名点匹配造成的误差。首先利用筛选后的控制点,求解 DSM 与控制点之间的高差 Δh ; 利用最小二乘法拟合 Δh 与 DSM 经纬度 x, y 之间的系数,即 $\Delta h = f(x, y)$; 然后,将 x, y 代入 $f(x, y)$ 中求得改正后的 $\Delta h'$ 。文中针对 $f(x, y)$ 提出线性和二次多项式改正模型,具体优化模型如下。

线性优化模型:

$$\begin{aligned} f_1(x, y) &= ax + by + c \\ H'_{DSM} &= H_{DSM} + f_1(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

二次多项式优化模型:

$$f_2(x,y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p20 \cdot x^2 + p11 \cdot x \cdot y + p02 \cdot y^2$$

$$H'_{DSM} = H_{DSM} + f_2(x,y) \quad (3)$$

式中: x 为纬度 (latitude); y 为经度 (longitude); Δh 为改正前高差值; H_{DSM} 为改正前 DSM 高程; H'_{DSM} 为改正后 DSM 高程。

统计过程中, (x,y) 的数据区间在 (100, 120) 和 (30, 40) 之间, 而 Δh 的数据区间在 (-10,10) 之间, 地理范围跨度较大, 且数据中心有偏差, 为避免二次多项式拟合过程中出现拟合值极大或极小情况, 造成拟合结果误差, 故在拟合过程中, 对经纬度进行归一化处理, 归一化处理如下:

$$x' = \frac{x - \text{mean}(x)}{\text{std}(x)}$$

$$y' = \frac{y - \text{mean}(y)}{\text{std}(y)} \quad (4)$$

根据输入的 (x,y) , 得到 x 的归一化参数为 $\text{mean}(x) = 110.1, \text{std}(x) = 0.092 92$, y 的归一化参数为 $\text{mean}(y) = 34.74, \text{std}(y) = 0.122 4$, 以下的一阶、二阶多项式优化模型中归一化后的为 (x',y') 。

实验发现, 个别实验区域存在正数个数和负数个数明显相差甚远, 因此提出偏度和中值改正模型。

偏度 (Skewness) 是反应高差和高差个数之间非对称程度的指标^[13], 偏度可以有效地度量高差分布对称性的偏移程度。文中实验以偏度 Skewness 作为改正值, 具体优化模型见公式 (5):

$$H_{DSM}' = H_{DSM} + \text{Skewness} \quad (5)$$

中值能将数据集划分为相等的上下两部分, 代表离散数列的分布状态, 在不受极值的影响下反应数列的偏态。文中实验将高差按大小顺序进行排列, 取中值 Median 作为改正数, 具体优化模型见公式 (6):

$$H'_{DSM} = H_{DSM} + \text{Median} \quad (6)$$

3 试验分析

3.1 试验区域

华阴地区位于陕西省中东部, 涉及陕西省渭南市、商洛市以及山西省运城市, 平地、丘陵地、山地、高山地均有分布, 范围为 [109°50'00", 110°21'30"]E, [34°18'30", 34°59'30"]N。华阴地区属大陆性季风气候,

暖温带半干旱气候带, 森林覆盖较高。试验区内道路分布极不均衡, 行政村以上居民地均有公路通达, 农村道路交通情况良好, 山区和高山区道路稀疏且不易通达。

3.2 试验数据及精度

华阴地区的外业控制点数据坐标系统为 WGS-84 大地坐标系, 采用地理坐标, 单位为 (°)、(')、(")。高程系统为基于 WGS-84 椭球的大地高程系统, 单位为 m, 小数点后保留 3 位 (0.001 m)。利用“陕西北斗卫星导航定位基准站系统”, 采用网络 RTK 进行外业检测点采集, 利用该测区 GPS C 级以上网点成果检测外业精度。在华阴试验区范围内, 有 5 个已有的 GPS A、B、C 级点等级控制点成果, 可用于检测外业检测点的成果精度, 得到平面中误差为 0.023 m, 高程中误差为 0.025 m, 满足进行外业检测的精度要求。

高分七号立体卫星影像于 2020 年 4 月~5 月获取, 为激光测高数据的同期立体影像, 全色波段影像原始地面分辨率为 0.65 m, 多光谱影像原始地面分辨率为 2.6 m。

利用 GNSS-RTK 方法测得的外业检测点分布见图 2, 其中影像检测点共 112 个; 足印影像检测点 41 个, 分布于 6 个影像对, 主要集中于影像重叠处, 涉及 11 个激光点且两个波束平均分布; 激光检测点共 79 个, 分布于 6 个影像对。

(1) 激光数据精度评估

根据激光点与选取激光点的所有检测点的高程平均值 ($H1$)、选取激光点周围 20 m 范围内的检测点高程平均值 ($H2$) 和最近检测点的高程值 ($H3$) 的高差按 m_ECP_Flag 统计结果平均值 (ME) 和中误差 (RMSE)、个数 (N) 见表 1, 其中 m_ECP_Flag 为高程质量控制标识, 代表推荐激光点作为高程控制点的建议。m_ECP_Flag 是基于 SRTM-DEM 的粗差剔除、测距属性参数的粗粒度筛选、回波波形特征参数的精细筛选以及 GlobeLand30(30 m 全球地表覆盖数据) 的地物筛选的多准则约束高程控制点筛选结果^[2], 1 代表激光点非常适合作为高程控制点使用, 高程精度非常可靠, 2 代表激光点能作为高程控制点使用, m_ECP_Flag 的值为其他则作为高程控制点使用时建议适当降权。

从表 1 可得, m_ECP_Flag=1 和 2 的点有很高的

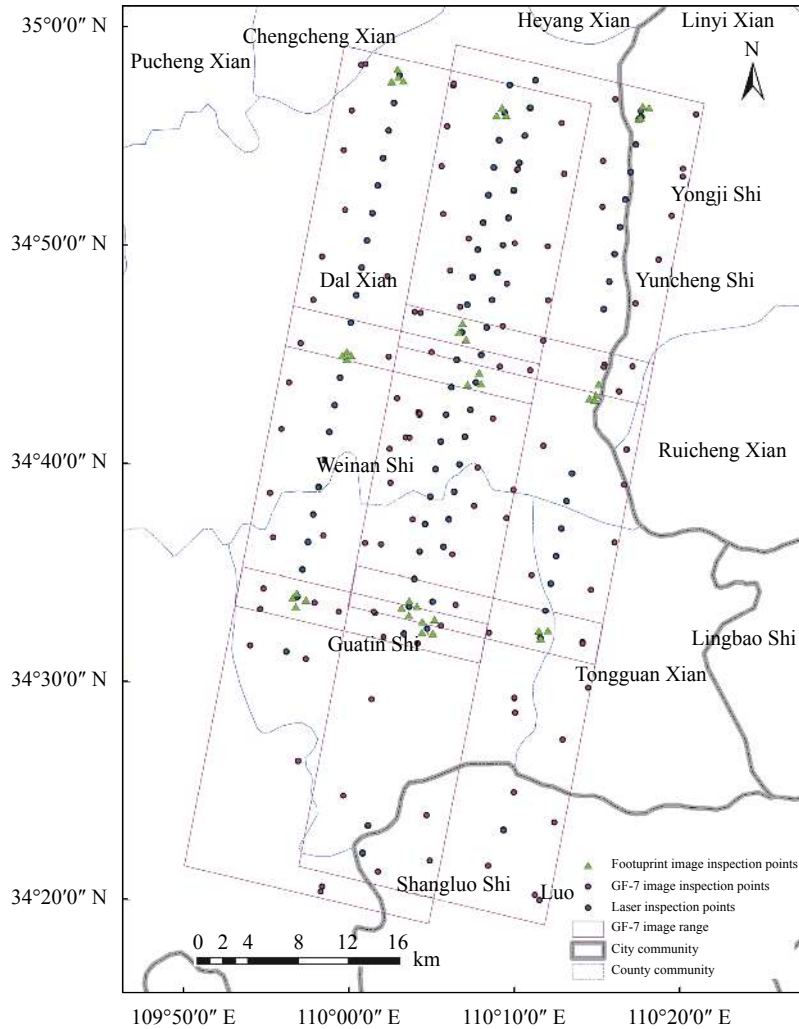


图 2 外业检测点分布图

Fig.2 Distribution of field inspection points

表 1 激光点精度检测分类统计表

Tab.1 Statistical table of laser spot accuracy detection classification

Item	dH1		dH2		dH3		N
	ME/m	RMSE/m	ME/m	RMSE/m	ME/m	RMSE/m	
Total	0.872	2.208	0.886	2.243	0.913	2.274	79
m_ECP_Flag=1	0.327	0.657	0.263	0.583	0.270	0.566	26
m_ECP_Flag=2	0.315	0.392	0.321	0.401	0.378	0.460	26
m_ECP_Flag=other	1.934	3.701	2.040	3.796	2.056	3.847	27

高程精度,可作为后续试验的高程控制点优化无控 DSM,但主要集中分布于平地 and 丘陵地之间,因此,后续的试验主要选取平地 and 丘陵地集中的 4 个影像对开展。

(2) 足印影像精度评估

足印影像检测点的点位选取,影像应清晰、无云,具有良好观测条件,实地和影像中均可正确判读、量

测。选取的足印影像检测点在满足分辨率判读条件的前提下,可作为外业检测点使用。每景立体影像上需检测三四景足印影像,每景足印影像上需检测三四个足印影像检测点,尽量分布均匀且位于不同波束,检测的足印影像在立体影像上需间隔分布。在华阴试验区共检测 41 个足印影像检测点,实测足印影像外业检测点分布图如图 2 中足印影像检测点所示,利

用足印影像检测点对足印影像平面精度进行检测, 分别从东西方向 (East-West)、南北方向 (North-South) 和平面 (Plane) 分别统计平均值 (ME)、中误差 (RMSE)、最大值 (MAX)、最小值 (MIN) 统计结果见表 2。

激光足印影像共 23 个外业检测点, 涉及 11 景, 平面误差平均值为 4.363 m, 中误差 4.895 m。足印影

像的平面精度高于高分七号无控精度, 因此可利用足印影像优化高分七号的平面精度。

3.3 无控平面高程精度评估

采用常规的影像生产软件, 对高分七号立体影像进行无控加密并生成 DSM 和 DOM。利用陕西境内外业实测的 21 个分布均匀的平高控制点作为检测点, 其分布如图 3 所示, 分别从高程 (Elevation) 和平面 (Plane) 对无控的 DSM 和 DOM 进行精度评估, 得出平均值 (ME)、中误差 (RMSE)、绝对值最大值 (Abs MAX)、绝对值最小值 (Abs MIN), 统计结果见表 3。

从上述试验结果可得, 高分七号空三加密后的无控 DSM 高程误差平均值为 -4.268 m, 中误差为 4.518 m, DOM 平面误差平均值为 13.606 m, 高程中误差为 13.626 m。

表 2 足印影像平面误差统计表

Tab.2 Statistical table of planar error of footprint image

Item	ME/m	RMSE/m	MAX/m	MIN/m
East-West	3.536	4.347	8.271	-1.605
North-South	-0.859	2.250	5.795	-5.163
Plane	4.363	4.895	8.523	0.569

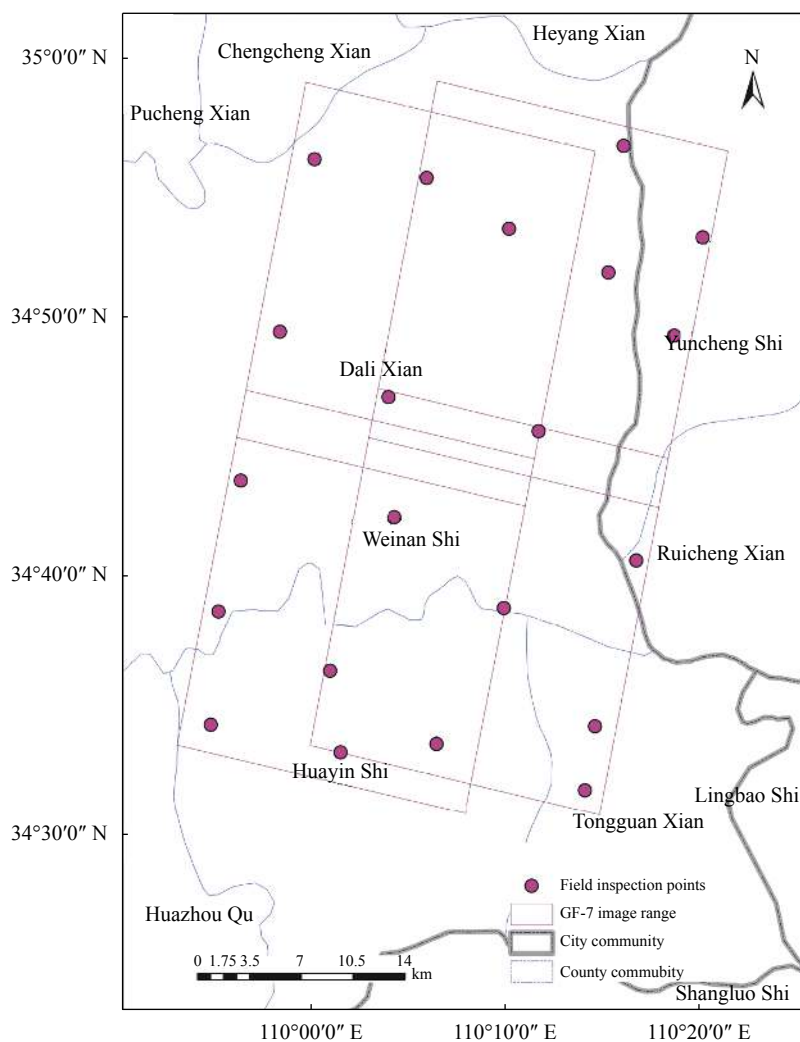


图 3 21 个外业检测点分布图

Fig.3 Distribution of 21 field inspection points

表 3 无控 DSM 和 DOM 平面高程精度评估

Tab.3 Plane-elevation accuracy evaluation of uncontrolled DSM and DOM

Item	ME/m	RMSE/m	Abs MAX/m	Abs MIN/m
Elevation	-4.268	4.518	6.921	1.031
Plane	13.606	13.626	15.962	12.049

3.4 激光高程优化精度评估

利用 50 个 m_ECP_Flag=1 和 2 的激光点对无控

DSM 进行偏度、中值、线性和二次多项式精度优化, 激光点分布见图 4, 并利用上述 21 个分布均匀的检查点, 评估优化后的 DSM 精度。首先利用 50 个分布均匀的激光数据对无控 DSM 进行初评估, 统计无控 DSM 的平均值 (ME)、中误差 (RMSE)、绝对值最大值 (Abs MAX)、绝对值最小值 (Abs MIN) 和偏度 (Skewness), 以及正负数的统计, 包括正数个数 (PN)、正数均值 (PME)、负数个数 (NN)、负数均值 (NME) 和总个数 (N), 见表 4。

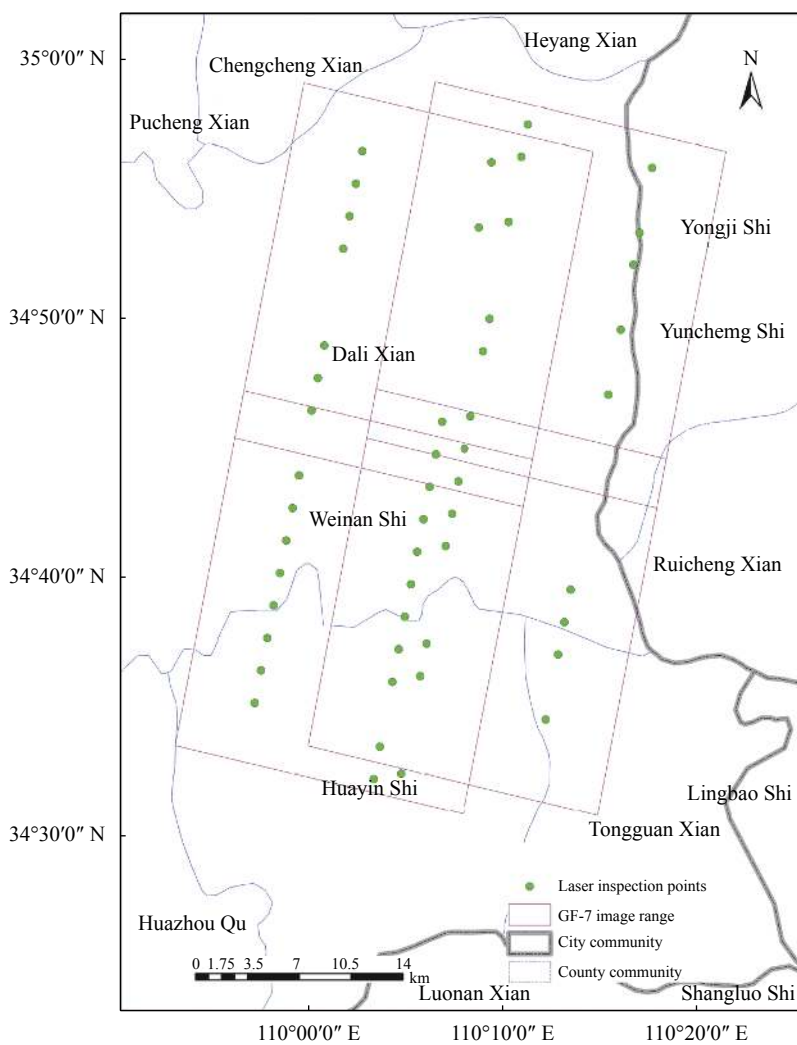


图 4 激光检测点分布图

Fig.4 Distribution of laser detection point

表 4 激光数据对无控 DSM 的初评估统计表

Tab.4 Statistical table preliminary evaluation of uncontrolled DSM by laser data

Item	ME/m	RMSE/m	Abs MAX/m	Abs MIN/m	Skewness/m
Statistical result	-3.878	4.085	6.062	0.246	50
Item	PN	PME/m	NN	NME/m	N
Statistical result	1	1.272	49	-3.984	50

将激光数据对无控 DSM 的统计结果拟合得到线性、二阶多项式为:

$$\begin{aligned}
 f_1(x',y') &= -3.878 - 0.176x' + 0.5505y' \\
 f_2(x',y') &= -4.207 - 0.1675x' + 0.5245y' + \\
 &\quad 0.2003x'^2 - 0.596x'y' + 0.338y'^2 \quad (7)
 \end{aligned}$$

对无控的 DSM 进行偏度 (Skewness)、中值 (Median)、线性 (Linear polynomial) 和二阶多项式优化 (Quadratic polynomial), 利用外业检测点对激光改正后的 DSM 进行重新统计, 见表 5 统计结果。

表 5 激光高程优化精度评估统计表

Tab.5 Statistical table of accuracy evaluation by laser elevation optimization

Item	ME/m	RMSE/m	Abs MAX/m	Abs MIN/m
Skewness	-0.389	1.549	3.043	0.117
Median	-0.272	1.508	2.965	0.001
Linear polynomial	-0.320	1.351	2.937	0.028
Quadratic polynomial	-0.610	1.751	3.208	0.177

从表 3 和 5 中对比可得, 进行优化后的 DSM 精度均优于 1 m, 得到了较大的改善, 其中值模型的误差平均值最小为 -0.272 m, 线性模型的中误差最小为 1.351 m。

3.5 足印-激光平面高程优化精度评估

利用足印影像辅助提高高分七号立体影像无控平面定位精度, 由于足印影像和激光点的局限性, 常规软件目前难以实现联合平差, 因此, 文中实验将足印影像上的特征点作为平面控制点纠正无控的 DOM 和 DSM, 足印影像的特征点分布图如图 5 所示, 并将平面纠正后的 DSM 利用激光点进行高程优化, 平面高程优化后的结果见表 6。

从表 3 和表 6 对比可得, 平面误差平均值从 13.606 m 优化为 5.341 m, 中误差 13.626 m 改善为 5.495 m, 说明足印影像可明显改善 DOM 的平面无控精度。从表 5 和表 6 对比分析可得, 经过足印影像平

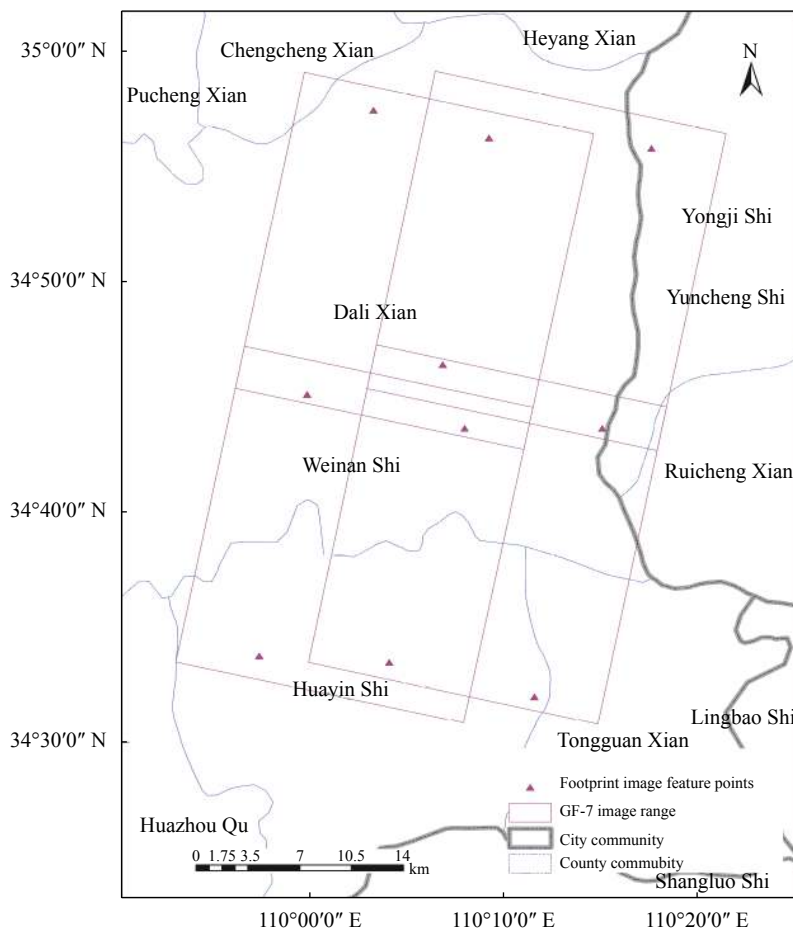


图 5 足印影像特征点分布图

Fig.5 Distribution of footprint image feature points

表 6 足印-激光平面高程优化精度评估统计表

Tab.6 Statistical table of accuracy evaluation by footprint-laser plane-elevation optimization

Item	ME/m	RMSE/m	Abs MAX/m	Abs MIN/m
Plane	5.341	5.495	8.244	3.388
Elevation of plane optimization	-4.334	4.600	-1.031	-6.921
Elevation of skewness optimization	-0.391	1.273	2.416	0.034
Elevation of median optimization	-0.305	1.250	2.330	0.009
Elevation of linear polynomial optimization	-0.335	1.131	1.751	0.004
Elevation of quadratic polynomial optimization	-0.540	1.427	2.408	0.054

面纠正后的高程精度平均值整体变化不明显,中误差和绝对值最大值略有改善,4种优化模型改正后的高程中误差均小于1.5m,且绝对值最大值均小于2.5m。

3.6 外业-激光平面高程优化精度评估

利用外业采集的平面控制点对DOM进行纠正,外业平面控制点选取图5中的足印影像特征点的同名点,并将平面纠正后的DSM利用激光点进行优化,优化后的结果见表7。

从表6和表7对比可得,平面精度经过外业控制点纠正后平均值为3.174m,中误差为3.299m,说明经过足印影像优化DOM的平面精度相较于外业控制点仍存在不足,与表2中足印影像精度相对应。从表5~7中分析可得,经过激光点优化后的DSM均能有效改进高程精度,其中利用外业-激光平面高程优化后的高程精度效果最佳,平均值为-0.279m,中误差为1.160m。

表 7 外业-激光平面高程优化精度评估统计表

Tab.7 Statistical table of accuracy evaluation by field-laser plane-elevation optimization

Item	ME/m	RMSE/m	Abs MAX/m	Abs MIN/m
Plane	3.174	3.299	4.920	1.669
Elevation of plane optimization	-4.249	4.432	6.351	1.943
Elevation of skewness optimization	-0.338	1.307	2.441	0.047
Elevation of median optimization	-0.291	1.295	2.393	0.095
Elevation of linear polynomial optimization	-0.279	1.160	1.955	0.0025
Elevation of quadratic polynomial optimization	-0.484	1.429	2.269	0.002

4 总结与展望

论文对高分七号生成无控DOM和DSM进行同平台的精度优化,根据上述结果可得到以下结论:

(1) 利用激光测高数据,可明显优化DSM高程精度,无控DSM高程平均值为-4.268m,中误差为4.518m,经过中值模型优化后的DSM高程误差平均值最小为-0.272m,线性模型的中误差最小为1.351m。

(2) 利用足印影像可改善DOM的平面精度,平面误差平均值从13.606m优化为5.341m,中误差从13.626m改善为5.495m。但与外业控制点优化后的平面误差平均值为3.174m,中误差3.299m,仍有差距。

(3) 经过足印影像和外业控制点平面纠正后的DSM高程精度,优化效果不明显。

高分七号同平台的激光点高程精度优化和足印影像平面精度优化后,高程精度能满足1:1万比例尺地形图要求,平面精度虽然有较大改善,但仍有待提高,且如何有效提高无控条件下高分七号平面精度是下一步研究的方向。

参考文献:

[1] Wang Mi, Wei Yu, Yang Bo, et al. Extraction and analysis of global elevation control points from ICESat - 2 /ATLAS data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 184-192. (in Chinese)

[2] Li Guoyuan, Tang Xinming, Zhang Chongyang, et al. Multi-criteria constraint algorithm for selecting ICESat/GLAS data as elevation control points [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(1): 96-104. (in Chinese)

- [3] Li B, Xie H, Tong X, et al. Research on the control point extraction method of Chinese Gaofen7 satellite using altimeter and footprint camera[C]//EPJ Web of Conferences, The 29th International Laser Radar Conference (ILRC 29), 2020, 237: 01016.
- [4] Tang X, Xie J, Liu R, et al. Overview of the GF-7 Laser Altimeter System Mission [J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(1): e2019EA000777.
- [5] Gao Xiaoming, Li Guoyuan, Guo Jinquan, et al. Discussion on the development of laser altimetry satellite for tri-polar regions observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200233. (in Chinese)
- [6] Ren C, Xie J, Zhi X, et al. Laser spot center location method for Chinese spaceborne GF-7 footprint camera [J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2319.
- [7] Zuo Zhiqiang, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200251. (in Chinese)
- [8] Li Guoyuan, Yao Jiaqi, Zhao Yiming, et al. Progress and prospect of atmospheric scattering correction for laser altimetry satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200234. (in Chinese)
- [9] Li G, Guo J, Tang X, et al. Preliminary quality analysis of GF-7 satellite laser altimeter full waveform data [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, XLIII-B1-2020: 129-134.
- [10] Hu Liuru, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Quality assessment and accuracy optimization of DSM using GLAS laser altimetry data [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019, 0(11): 39-43. (in Chinese)
- [11] Carabajal C, Boy J P. ICESAT-2 altimetry as geodetic control [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, XLIII-B3-2020: 1299-1306.
- [12] Wang Lei. Research on the geometric correction of remote sensing images and the distribution law of distortion error[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] Feng Siyu, Ma Xiaozhou, Dong Guohai. Study on high order spectral numerical model of wave height nonlinear probability distribution [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(3): 44-51. (in Chinese)