

## 高分七号卫星足印光斑质心提取方法与稳定性监测

王星<sup>1,2</sup>, 唐新明<sup>1,2</sup>, 祝小勇<sup>2\*</sup>, 任守峰<sup>2</sup>, 李傲<sup>1,2</sup>, 曲典<sup>1,2</sup><sup>1</sup> 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;<sup>2</sup> 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048

**摘要** 高分七号卫星激光测高仪搭载激光监视相机和激光足印相机, 获取的激光光斑和光学足印影像可辅助激光定位。提出一种考虑外界环境对足印光斑成像质量影响的足印光斑质心提取方法。将足印光斑和监视光斑进行最小二乘影像匹配, 获取转换模型; 由灰度重心法提取监视光斑质心; 利用监视光斑质心、通过转换模型得到足印光斑质心。对 100 组仿真光斑和 1 轨高分七号卫星足印光斑数据进行测试。结果表明: 本文方法提取的光斑质心偏移量标准差小于 0.08 pixel, 较灰度重心法和高斯拟合法提高 0.1 pixel 以上。对时间跨度为 7 个月的 30 轨高分七号卫星足印光斑进行测试, 得到两束足印光斑质心在地面的抖动范围均小于 1.2 m, 且其具有较好的中长期稳定性的结论。实验结果表明高分七号卫星激光测高仪激光器与光学足印影像之间的几何关系稳定, 可以使用光学足印影像辅助激光器进行在轨指向标定和几何定位处理。

**关键词** 遥感; 光斑质心; 高分七号卫星激光足印相机; 灰度重心法; 最小二乘影像匹配

中图分类号 P236

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2428001

## Centroid Extraction Method of Gaofen-7 Satellite Footprint Spots and Stability Monitoring

Wang Xingxing<sup>1,2</sup>, Tang Xinming<sup>1,2</sup>, Zhu Xiaoyong<sup>2\*</sup>, Ren Shoufeng<sup>2</sup>, Li Ao<sup>1,2</sup>, Qu Dian<sup>1,2</sup><sup>1</sup> College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;<sup>2</sup> Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China

**Abstract** The laser altimeter of the Gaofen-7 satellite is equipped with a laser surveillance camera and a laser footprint camera to obtain laser spots and optical footprint images, so as to assist laser positioning. In this paper, we proposed a method of extracting the footprint spot centroid that took into account the influence of the external environment on the image quality of the footprint spot. The least squares image matching between the footprint spot and the surveillance spot was carried out to obtain the conversion model. Then, the surveillance spot centroid was extracted by the gray centroid method. Finally, the surveillance spot centroid was converted to the footprint spot centroid by the conversion model. The data of 100 groups of simulated spots and 1 track of Gaofen-7 satellite footprint spot were used for the test. The results show that the offset standard deviation of the spot centroid extracted by the proposed method was less than 0.08 pixel and 0.1 pixel larger than those of the gray centroid method and the Gaussian fitting method. 30 tracks of Gaofen-7 satellite footprint spots over a time span of seven months were tested. The results show that both the two footprint spot centroids have a jitter scope of fewer than 1.2 m on the ground, with good long-term stability. The experimental results demonstrate that there is a stable geometrical relationship between the Gaofen-7 laser altimeter laser and the optical footprint image and that the optical footprint image can be used to assist the in-orbit pointing calibration and geometric positioning processing.

**Key words** remote sensing; spot centroid; laser footprint camera of Gaofen-7 satellite; gray centroid method; least squares image matching

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-09-06; 录用日期: 2021-09-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504903, 2016YFB0501402)、高分测绘应用示范项目二期 (42-Y30B04-9001-19/21)

通信作者: \*zhuxytop@163.com

## 1 引言

激光作为一种主动遥感探测工具,由于具有方向性好、发散度小的优点,在航天测绘领域得到了广泛的应用。美国率先开始激光测高技术方面的研究,并在 1971 年阿波罗计划中首次开展了月球表面的激光探测<sup>[1-4]</sup>。我国于 2007 年成功发射嫦娥一号卫星,首次开展了月球表面的高程观测<sup>[5]</sup>,并于 2016 年 5 月成功发射资源三号 02 星,利用其获取的卫星激光测高数据有效提高了立体影像无地面控制的高程精度,也为接下来国产卫星激光测高的应用提供了重要参考<sup>[6]</sup>。2019 年 11 月 3 日成功发射的高分七号卫星是我国首颗民用亚米级光学传输型立体测绘卫星,搭载一个双波束激光测高仪,记录激光回波全波形数据和激光发射时的能量分布状态,以确定激光的指向和光斑位置信息,从而为国产卫星地面高程控制点提供精确的三维坐标数据<sup>[7-9]</sup>。

高分七号卫星搭载的激光测高仪可以高效精准地获取地面高程和地物高度等信息,但平面定位精度还有很大的提升空间,因此以更高精度提取足印光斑质心具有重要的现实意义。目前提取足印光斑质心的方法,如 Hough 变换法<sup>[10]</sup>、曲线拟合法<sup>[11]</sup>、灰度重心法(GCM)<sup>[12]</sup>、高斯拟合法(GFM)<sup>[13]</sup>等,都在其适合的领域有较高的提取精度<sup>[14-24]</sup>。激光足印相机能同时对激光光斑和地面成像,形成足印光

斑影像。受地面地物反射和大气环境等外界因素的干扰,足印光斑会出现光斑形状不规则、光强不均匀的现象,使用上述方法直接获取的激光指向和光斑位置信息的精度不高。

基于上述问题,本文利用高分七号卫星激光测高仪激光监视相机受外界干扰较小的优点,使用灰度重心法提取监视光斑质心,以监视光斑作为模板,使用最小二乘影像匹配法将监视光斑与足印光斑匹配,获取转换模型,将提取的监视光斑质心转换成对应的足印光斑质心。在使用 100 组仿真光斑测试验证方法精度后,选择 1 轨高分七号卫星足印光斑进行实验,以验证所提方法的适用性;同时统计分析高分七号长时间序列的光斑质心变化,监测高分七号卫星激光测高仪激光器与光学足印影像之间几何关系的稳定性,以为后续的星载激光器设计和数据处理提供一定的参考。

## 2 本文方法

如图 1 所示,高分七号卫星搭载的激光测高仪有两个激光器,发射两道激光波束。在两个激光器前分别安装一个带有分光器的取光组件,其中:98%的激光能量透过取光组件,经过二级扩束系统准直后,在地面形成足印光斑;2%的剩余能量经过接收望远镜到达激光监视相机焦面,形成监视光斑<sup>[25]</sup>。

如图 2 所示,利用足印光斑影像同时对光斑与

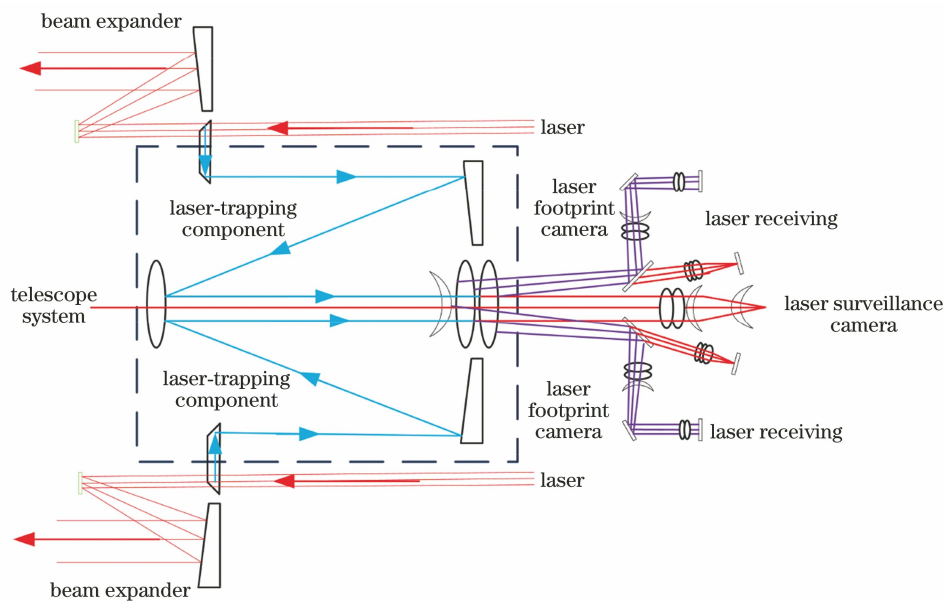


图 1 激光监视相机与激光足印相机的工作示意图<sup>[25]</sup>

Fig. 1 Working diagrams of laser surveillance camera and laser footprint camera<sup>[25]</sup>

地物成像。受地物和天气等因素的影响,曝光过程中会出现光斑形状不规则、光斑强度不均匀等现象,用传统方法直接进行光斑质心提取会产生较大的误差。监视光斑影像是在激光监视相机焦面同时对两

束激光光斑成像的结果,该过程避免了外界的干扰。足印光斑与监视光斑能量强度不同,但两者来自同一束光,光斑的能量分布状态一致,因此可以将监视光斑作为模板。

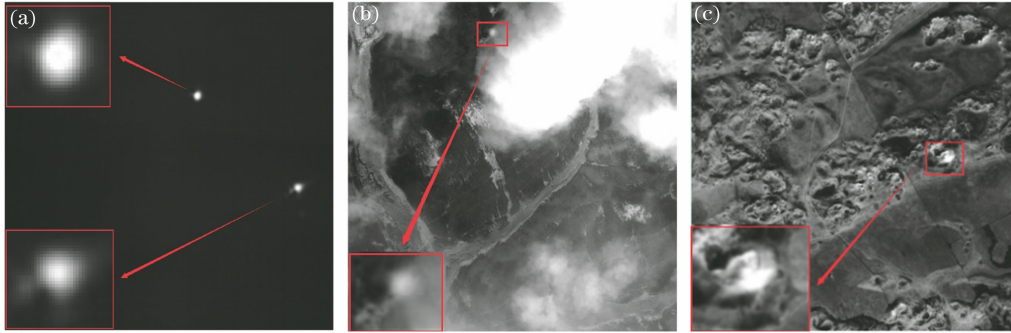


图 2 高分七号监视光斑影像和足印光斑影像。(a)监视光斑影像;(b)足印光斑 1 影像;(c)足印光斑 2 影像

Fig. 2 Gaofen-7 surveillance spot image and footprint spot images. (a) Surveillance spot image; (b) image of footprint spot 1; (c) image of footprint spot 2

考虑到监视光斑的形状规则和能量分布稳定,且灰度重心法在提取形状规则和光强分布均匀的光斑时,拥有极高的精度,所以本文选择灰度重心法提取监视光斑质心,可表示为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J i \times G(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G(x_i, y_j)} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J j \times G(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G(x_i, y_j)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $G(x_i, y_j)$ 代表位于图像中第*i*行、第*j*列像元的灰度值; $x_0, y_0$ 分别为所求光斑质心的横、纵坐标;图像的大小为*I*×*J*。

基于监视光斑和足印光斑的能量分布状态一致的特点,使用最小二乘影像匹配法对足印光斑和监视光斑进行匹配,即

$$g_1(x, y) + n_1(x, y) = h_0 + h_1 g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y) + n_2(x, y), \quad (2)$$

式中: $g_1(x, y), g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)$ 分别为监视光斑和足印光斑的灰度分布; $h_0, h_1$ 为线性畸变参数; $n_1(x, y), n_2(x, y)$ 分别为  $g_1(x, y), g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)$ 中所存在的随机噪声; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为变形参数。

迭代计算  $g_1(x, y)$ 和  $g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)$ 之间的相关系数,若该相关系数小于前一次迭代后所求得的相关系数,则迭代结束;同时,

在本次实验中,当相关系数大于 0.95 时,判断匹配成功。

由(2)式可得足印光斑和监视光斑的转换模型,通过转换模型将灰度重心法提取的监视光斑质心转换为足印光斑质心,即

$$\begin{cases} x_s = a_0 + a_1 x_0 + a_2 y_0 \\ y_s = b_0 + b_1 x_0 + b_2 y_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $x_s, y_s$ 分别为需要求取的足印光斑质心的横、纵坐标。算法流程图如图 3 所示。

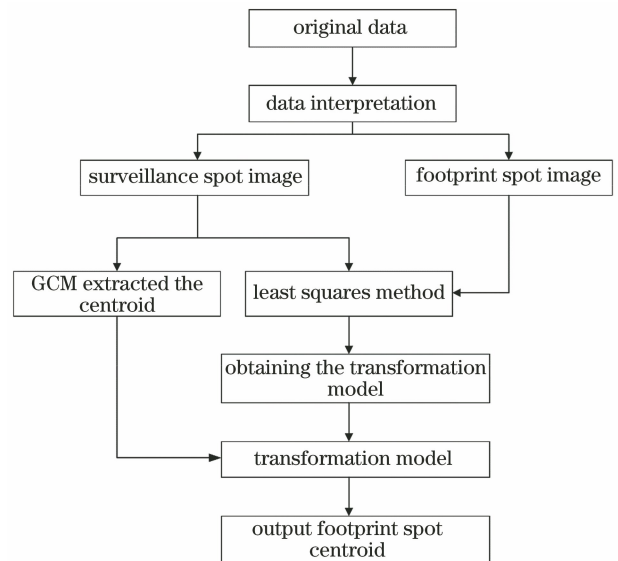


图 3 本文方法

Fig. 3 Method in this paper

### 3 仿真和实验结果

由于足印光斑所在位置的真值未知,为防止出



现提取的足印光斑质心结果稳定但偏离真值较大的情况,将灰度重心法、高斯拟合法和本文方法进行对比实验。首先使用仿真光斑验证各个方法的精度,再利用 1 轨高分七号卫星足印光斑验证各个方法的适用性。通过监测高分七号卫星长时间序列的足印光斑质心,验证高分七号卫星激光测高仪激光器与光学足印影像几何关系的稳定性。为了保证每个足印光斑的完整性和后续处理的效率,将仿真光斑图像大小设置为与高分七号激光光斑图像一致,均为 26 pixel×26 pixel。

### 3.1 仿真和实验数据

#### 3.1.1 仿真数据

为验证算法的可靠性,根据高斯能量分布特点

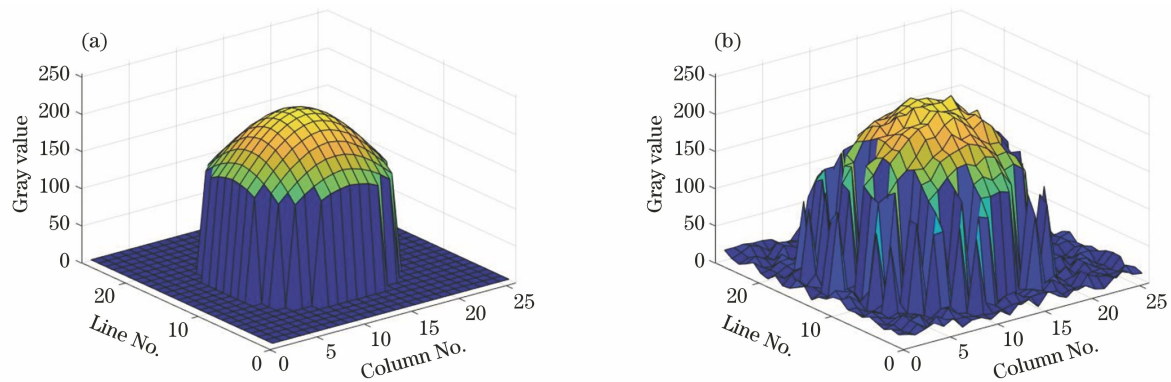


图 4 仿真光斑能量分布。(a)理想仿真光斑能量分布;(b)加入随机形变、随机噪声的仿真光斑能量分布  
Fig. 4 Simulated spot energy distributions. (a) Ideal simulated spot energy distribution; (b) simulated spot energy distribution with random deformation and random noise

#### 3.1.2 高分七号卫星数据

实验数据为高分七号卫星 2020 年 4—10 月在轨运行期间获取的监视光斑影像和足印光斑影像,按时间顺序,每周选择一轨,共 30 轨。

将两台激光足印相机横向置于高分七号卫星飞行方向上,分别对激光测高仪左、右两侧的激光光斑和地面进行成像,将成像结果称为足印光斑影像,将左边的光斑定义为足印光斑 1,右边的光斑定义为足印光斑 2,其焦面与地面光学投影的关系、足印光斑影像如图 5 所示。另外搭载一个激光监视相机,同时对两束激光光斑进行成像,将成像结果称为监视光斑影像,将左边的光斑定义为监视光斑 1,右边的光斑定义为监视光斑 2,其焦面与地面光学投影的关系、监视光斑影像如图 6 所示。

### 3.2 方法验证

#### 3.2.1 仿真光斑质心提取

通过仿真得到 100 组光斑,每组包含理想仿真光斑和添加了 12.5%随机噪声、50%随机形变的仿

仿真理想光斑<sup>[26]</sup>,灰度值为 0~255。

$$G(x, y) = \begin{cases} 0 & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} > R \\ g & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq R \end{cases}, (4)$$

$$g = 255 \times \exp \left[ -\frac{(x-x_{\max})^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_{\max})^2}{2\sigma_y^2} \right], (5)$$

式中: $G(x, y)$ 为仿真光斑 $(x, y)$ 处的灰度值; $R$ 为半径; $x_{\max}, y_{\max}$ 分别为光斑灰度峰值点的横、纵轴坐标; $\sigma_x, \sigma_y$ 分别为 $x, y$ 方向上能量分布的标准差。本文仿真中光斑半径 $R=8$ ,中心坐标以 $(12, 12)$ 作为真值,仿真一个理想光斑,光斑能量分布如图 4(a)所示;仿真一个加入了 12.5%的随机噪声和 50%的随机形变的光斑,光斑能量分布如图 4(b)所示。

真光斑。利用理想仿真光斑模拟高分七号卫星监视光斑,并利用加入随机噪声和随机形变的仿真光斑模拟高分七号卫星足印光斑,分别使用灰度重心法、高斯拟合法和本文方法进行质心提取,仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同方法提取的仿真光斑质心结果统计  
Table 1 Statistics of extracted results of simulating spot centroid by different methods pixel

Method	Mean		Range		RMSE		
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$xy$
GCM	11.96	12.06	0.36	0.36	0.11	0.13	0.17
GFM	12.11	12.11	0.49	0.42	0.14	0.18	0.23
LS-GCM	12.02	12.03	0.13	0.15	0.04	0.04	0.06

表 1 中 Mean、Range、RMSE 分别为均值、极差和标准差。根据统计结果,使用本文方法(LS-GCM)提取的光斑质心坐标结果最接近光斑实际质心坐标,100 组仿真光斑质心提取结果与真值的标准差为 0.06 pixel,极差小于 0.15 pixel,本文方法

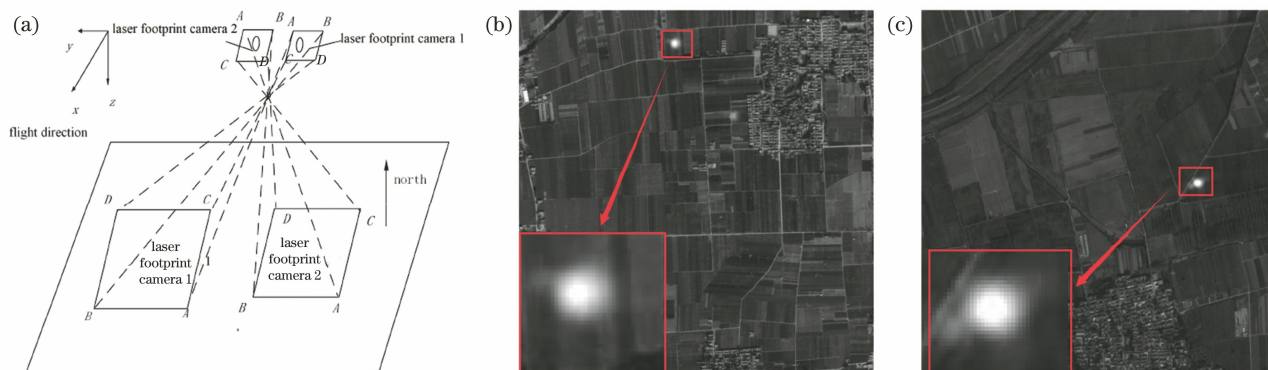


图 5 激光足印相机和地面光学投影的关系以及足印光斑影像。(a)激光足印相机与地面光学投影的关系；(b)足印光斑 1 影像；(c)足印光斑 2 影像

Fig. 5 Relationship between laser footprint camera and ground optical projection and footprint spot images. (a) Relationship between laser footprint camera and ground optical projection; (b) image of footprint spot 1; (c) image of footprint spot 2

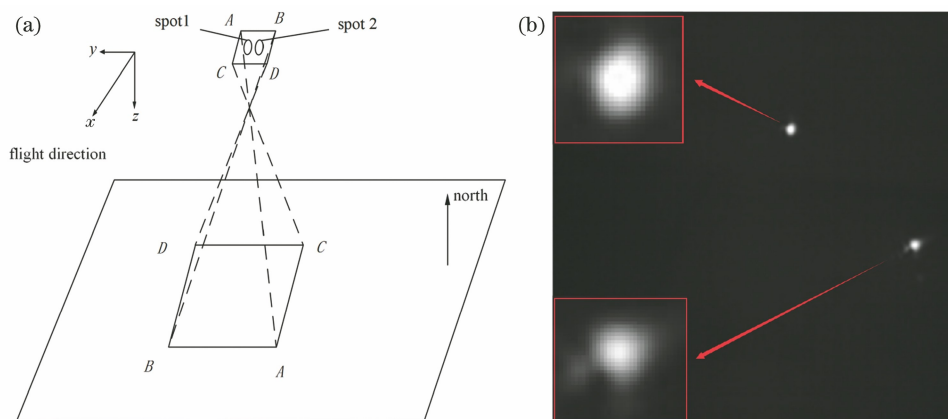


图 6 激光监视相机和地面光学投影的关系以及监视光斑影像。(a)激光监视相机和地面光学投影的关系；(b)监视光斑影像

Fig. 6 Relationship between laser surveillance camera and ground optical projection, and surveillance spot image. (a) Relationship between laser surveillance camera and ground optical projection; (b) surveillance spot image

的提取精度明显优于其他两种传统方法。

### 3.2.2 高分七号卫星足印光斑质心提取

选取 1 轨成像于 2020 年 9 月 4 日的高分七号卫星光学足印影像,分别使用 GCM、GFM 和 LS-GCM 对足印光斑 1 进行提取测试,统计结果如表 2、图 7~9 所示。

图 7~9 分别为三种方法提取 1 轨光斑质心的

表 2 不同方法提取的高分七号测试光斑质心结果统计

Table 2 Statistics of extracted results of spot centroid in Gaofen-7 test for different methods pixel

Method	Mean		Range		RMSE		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>xy</i>
GCM	12.90	13.28	0.98	1.49	0.13	0.20	0.24
GFM	13.31	13.68	2.49	3.01	0.33	0.35	0.48
LS-GCM	13.37	13.62	0.07	0.29	0.02	0.08	0.08

结果,横坐标为光斑数据编号,纵坐标分别为不同方法提取的足印光斑质心的 *x*、*y* 两方向的坐标。可以观察到使用本文方法提取出的光斑质心整体波动较小,同时没有出现偏离程度过大的质心提取结果。为评价不同方法对高分七号卫星足印光斑质心提取的适用性和稳定性,表 2 统计了各个方法的实验结果。

综合图 7~9 和表 2 可知,本文方法提取的光斑质心的抖动标准差为 0.08 pixel,极差小于 0.3 pixel,分别高于传统方法 0.15 pixel 和 0.6 pixel 以上。实验结果和上文中的仿真结果吻合,表明本文方法对高分七号卫星足印光斑数据有很强的适用性。GFM 提取的光斑质心均值更接近本文方法,但其标准差和极差均大于 GCM,推测其原因是:部分获取的高分七号卫星足印光斑形状不规则、能量分布不均匀的情况较严重,导致这两种方

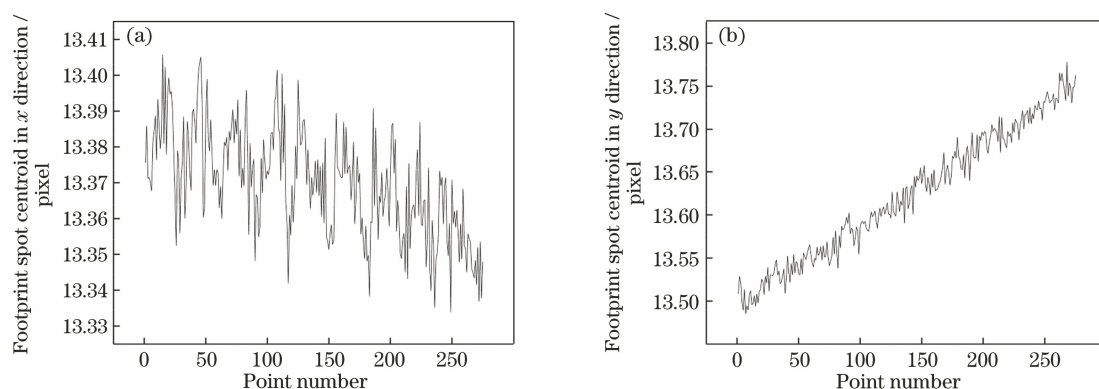


图 7 LS-GCM 提取的光斑质心结果统计。(a)  $x$  方向;(b)  $y$  方向

Fig. 7 Statistics of spot centroid extracted by LS-GCM. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

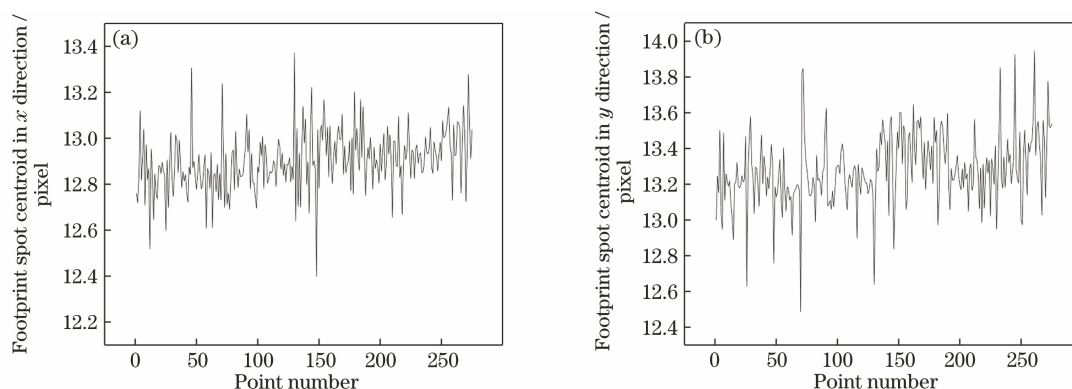


图 8 GCM 提取的光斑质心结果统计。(a)  $x$  方向;(b)  $y$  方向

Fig. 8 Statistics of spot centroid results extracted by GCM. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

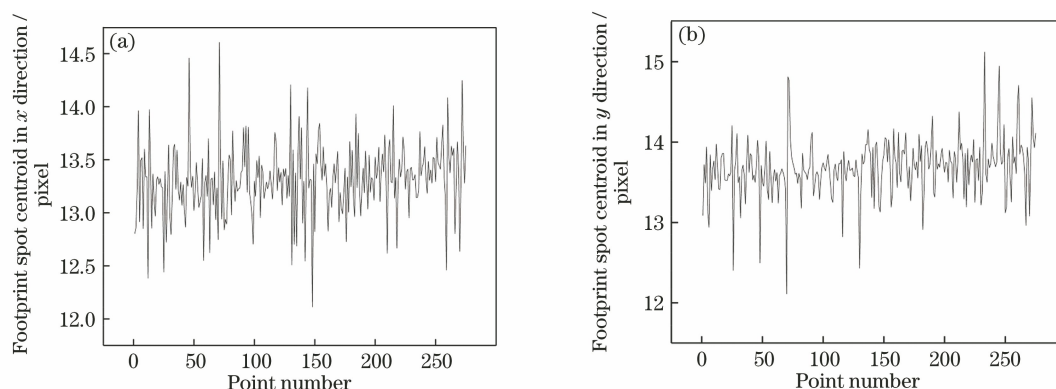


图 9 GFM 提取的光斑质心结果统计。(a)  $x$  方向;(b)  $y$  方向

Fig. 9 Statistics of spot centroid results extracted by GFM. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

法提取的光斑质心的精度和稳定性均不理想。

### 3.3 稳定性监测

为监测高分七号卫星激光测高仪激光器与足印光学影像几何关系的稳定性,针对高分七号卫星 2020 年 4—10 月在轨运行期间的光学数据,每周选择 1 轨(共 30 轨)激光足印数据,使用本文方法进行光斑质心提取。将实验获取的 30 轨数据的光斑质心取平均值,以  $x$ 、 $y$  为纵轴,影像拍摄时间所在周序列为横轴建立坐标系。

如图 10 所示,足印光斑 1 的质心坐标的  $x$  值在  $[13.0, 13.6]$  之间、 $y$  值在  $[13.3, 14.5]$  之间波动;足印光斑 2 的质心坐标的  $x$  值在  $[14.1, 15.0]$  之间、 $y$  值在  $[13.3, 14.6]$  之间波动,整体表现出一定的规律性。为评价光斑稳定性,表 3 统计了其平均值、极差和标准差。

如表 3 所示,不论是足印光斑 1 还是足印光斑 2,其质心抖动均较稳定,标准差分别为 0.32 pixel 和 0.35 pixel。对于高分七号光学足印影像,单景

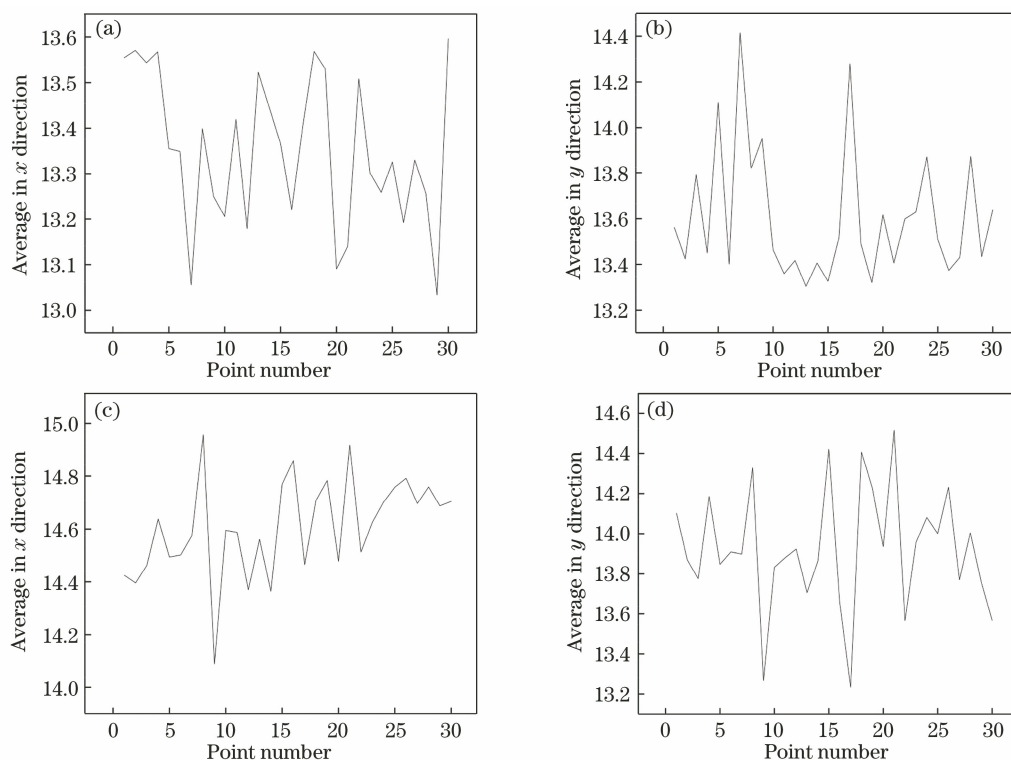


图 10 30 轨足印光斑质心坐标平均值统计。足印光斑 1 质心坐标(a)x 方向和(b)y 方向平均值；足印光斑 2 质心坐标(c)x 方向和(d)y 方向平均值

Fig. 10 Average of 30 track footprint spot centroid coordinates. Average of centroid of footprint spot 1 of (a)  $x$  coordinate and (b)  $y$  coordinate; average of centroid of footprint spot 2 of (c)  $x$  coordinate and (d)  $y$  coordinate

表 3 30 轨足印光斑质心的  $x$ 、 $y$  数据统计

Table 3 30 track footprint spot centroids in  $x$  and  $y$

Spot	directions						pixel	
	Mean		Range		RMSE		$x$	$y$
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$		
Footprint spot 1	13.35	13.61	0.97	1.49	0.16	0.28	0.32	
Footprint spot 2	14.61	13.92	0.87	1.28	0.18	0.30	0.35	

影像尺寸为 550 pixel $\times$ 550 pixel,而单景影像范围为 1.76 km $\times$ 1.76 km,其分辨率为 3.2 m。除去影像扩束影响,质心变化的标准差对应地面影像的质心变化分别为 1.06 m 和 1.12 m,均在设计的精度范围内,这证明高分七号卫星激光测高仪激光器与光学足印影像的几何关系稳定。

## 4 结 论

星载激光足印光斑影像能辅助提升激光定位精度。基于高分七号卫星激光监视相机和激光足印相机的工作模式,提出一种考虑外界环境对足印光斑成像质量影响的足印光斑质心提取方法。对仿真数据和高分七号卫星数据进行实验,可得如下结论:

1) 对 100 组仿真光斑分别使用 GCM、GFM 和

本文方法进行光斑质心提取测试。实验结果表明,使用本文方法提取的光斑质心坐标结果最接近光斑实际质心坐标,100 组仿真光斑质心提取结果与真值的标准差低于 0.06 pixel,极差小于 0.15 pixel,本文方法的提取精度明显优于其他两种传统方法。

2) 针对 1 轨 2020 年 9 月 4 日高分七号卫星足印光斑,使用 GCM、GFM 和本文方法进行光斑质心提取测试。实验结果表明,本文方法提取的光斑质心比较稳定,质心抖动标准差为 0.08 pixel,高于其他方法 0.15 pixel 以上,这表明本文方法对高分七号卫星足印光斑有很好的适应性。

3) 对选取的 2020 年 4—10 月期间每周 1 轨,共 30 轨高分七号卫星足印光斑数据进行实验,结果显示两束光斑的标准差分别为 0.33 pixel 和 0.35 pixel,对应的地面影像的质心变化分别为 1.06 m 和 1.12 m,均在设计的精度范围内。实验结果表明高分七号卫星激光测高仪激光器与光学足印影像的几何关系稳定,光学足印影像能辅助进行激光在轨指向标定和几何定位处理。

接下来可以针对时间序列更长、外界干扰更大的足印光斑影像进行研究,结合卫星运行状态及其他硬件信息,进一步提升光斑质心提取精度,从而辅



助提升激光水平定位精度。

### 参 考 文 献

- [1] Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission [J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/2/3/4): 209-241.
- [2] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Topography of the moon from the clementine lidar [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, 102(E1): 1591-1611.
- [3] Cavanaugh J F, Smith J C, Sun X L, et al. The mercury laser altimeter instrument for the MESSENGER mission [J]. *Space Science Reviews*, 2007, 131(1): 451-479.
- [4] Garvin J, Bufton J, Blair J, et al. Observations of the Earth's topography from the Shuttle Laser Altimeter (SLA): laser-pulse echo-recovery measurements of terrestrial surfaces [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(9/10): 1053-1068.
- [5] Shu R, Huang G H, Kong W. Development and review of space-based laser altimetry technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20201047.  
舒嵘, 黄庚华, 孔伟. 空间激光测高技术发展及展望 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(11): 20201047.
- [6] Yuan X Q. Study on the footprints image simulation of satellite laser altimeter [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.  
袁小棋. 星载激光测高仪足印影像仿真研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [7] Li G Y, Tang X M. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12): 1939-1949.  
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): 1939-1949.
- [8] Tang X M, Chen J Y, Li G Y, 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): 1611-1619.  
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): 1611-1619.
- [9] Yang X D, Li G Y, Wang P X, et al. Laser pointing changes detection method for space-borne laser spot image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(12): 1591-1599.  
杨雄丹, 李国元, 王佩贤, 等. 星载激光光斑影像激
- 光指向变化探测法 [J]. *测绘学报*, 2020, 49(12): 1591-1599.
- [10] Yang Y Q, Shi R, Yu X N, et al. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on hough transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12): 1655-1660.  
杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法 [J]. *光学学报*, 1999, 19(12): 1655-1660.
- [11] Shang X J, He M Y, Wang J L. Research of method in light-spot location based on linear CCD [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 730-731, 740.  
尚学军, 何明一, 王军良. 基于线阵 CCD 的光斑定位算法研究 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(7): 730-731, 740.
- [12] Shortis M R, Clarke T A, Short T. Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2350: 239-250.
- [13] Kong B, Wang Z, Tan Y S. Profile measurement in micro order precision by confocal image [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35(11): 1151-1154.  
孔兵, 王昭, 谭玉山. 利用共焦成像原理实现微米级的三维轮廓测量 [J]. *西安交通大学学报*, 2001, 35(11): 1151-1154.
- [14] Ren S F, Tang X M, Zhu X Y, et al. A high-precision extraction algorithm for centroid of laser footprint spot of GF-7 satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1012001.  
任守峰, 唐新明, 祝小勇, 等. 一种高分七号卫星激光足印光斑质心的高精度提取算法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1012001.
- [15] Chen H, Yang Z H, Guo P, et al. Research of the high precision laser spot center location algorithm [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(2): 181-185.  
陈和, 杨志浩, 郭磐, 等. 激光光斑中心高精度定位算法研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(2): 181-185.
- [16] Pan D, Li Y L, Gao D, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1410001.  
潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1410001.
- [17] Wang M, Zhao J Y, Chen T. Center extraction method for star-map targets based on anisotropic Gaussian surface fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0515006.



- 王敏, 赵金宇, 陈涛. 基于各向异性高斯曲面拟合的星点质心提取算法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515006.
- [18] Li K, Zhang Y S, Meng W C, et al. Point-source-target-based method for space remote sensing geometric calibration and positioning accuracy improvement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1828003.  
李凯, 张永生, 孟伟灿, 等. 基于点源靶标的航天遥感几何定标与定位精度提升方法[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1828003.
- [19] Weeks A R, Kasparis T, Keif B. Adaptive median filter for the removal of periodic interference from an image[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2238: 207-217.
- [20] Hu Q Y. Research on comprehensive measurement of laser parameters[J]. Journal of Jinan University, 1996, 6(3): 68-74.  
胡庆云. 激光参数综合测量研究[J]. 济南大学学报, 1996, 6(3): 68-74.
- [21] Chen Y S, Wu J B, Wang J Y, et al. Improved laser-spot-position resolution model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0904004.  
陈云善, 吴佳彬, 王景源, 等. 改进的激光光斑位置分辨率模型[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0904004.
- [22] Yuan Q Q, Zhang G, Chen X J, et al. Regularization of point cloud features by fusing improved Canny algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 162801.
- 袁俏俏, 章光, 陈西江, 等. 融合改进 Canny 算法的点云特征规则化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 162801.
- [23] Tao Y G, Gao C J. Error theory and data analysis [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1997.  
陶云刚, 高诚镜. 误差理论与数据分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [24] Jiang J W, Kang J H, Wu B. High precision positioning and compensation algorithm for laser spot center[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1412002.  
蒋佳雯, 康杰虎, 吴斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1412002.
- [25] Huang G H, Ding Y X, Wu J C, et al. Design and implementation of key technology of GF-7 satellite laser altimeter subsystem [J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 68-73.  
黄庚华, 丁宇星, 吴金才, 等. 高分七号卫星激光测高仪分系统关键技术设计与实现[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 68-73.
- [26] Yuan X Q, Li G Y, Tang X M, et al. Centroid automatic extraction of spaceborne laser spot image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 135-141.  
袁小棋, 李国元, 唐新明, 等. 星载激光光斑影像质心自动提取方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 135-141.