

一种高分七号卫星激光足印光斑质心的高精度提取算法

任守峰^{1,2,3,4}, 唐新明^{1,2*}, 祝小勇^{2**}, 李傲², 曲典²

¹兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

²自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

³地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;

⁴甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 激光足印光斑质心的精确提取, 对于提升国产卫星激光测高平面精度具有重要的实际意义。本文比较了灰度重心法、高斯拟合法和椭圆拟合法三种传统光斑质心提取算法, 综合分析后提出了一种利用高斯拟合法和 Canny 边缘检测设置灰度阈值和距离阈值, 并最终使用灰度重心法进行光斑质心提取的算法。对 100 组仿真光斑进行测试后的结果表明, 本文算法提取的质心偏移量的标准差小于 0.05 pixel, 精度较其他三种算法高。使用本文提出的算法对高分七号卫星获取的某一段连续激光数据进行光斑质心提取, 结果显示, 高分七号卫星两束激光足印光斑在地面抖动的范围均在 0.55 cm 以内。本文算法和结论可为后续高分七号卫星激光测高数据的使用和研究提供一定参考。

关键词 遥感; 传感器; 质心提取; 高斯拟合法; 灰度重心法; 高分七号卫星激光足印光斑

中图分类号 P236

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1012001

A High-Precision Extraction Algorithm for Centroid of Laser Footprint Spot of GF-7 Satellite

Ren Shoufeng^{1,2,3,4}, Tang Xinming^{1,2*}, Zhu Xiaoyong^{2**}, Li Ao², Qu Dian²

¹Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

²Land Satellites Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;

³National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for

National Geographic State Monitoring, Lanzhou, Gansu 730070, China;

⁴Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract The precise extraction of the centroids of laser footprint spots has important practical significance for improving the plane accuracy of laser altimetry by domestic satellites. This paper compared three traditional extraction algorithms of spot centroids, i. e., gray centroid algorithm, Gaussian fitting algorithm, and ellipse fitting algorithm. Then, we proposed a algorithm in which the grayscale and distance thresholds were set by the Gaussian fitting algorithm and Canny edge detection and the spot centroid was extracted by the gray centroid algorithm. The tests of 100 sets of simulated spots reveal that the mean square deviation of the centroid offset extracted by the proposed algorithm is less than 0.05 pixel, and the accuracy is higher than that of the other three algorithms. Furthermore, this algorithm was used to extract the spot centroid of a certain segment of continuous laser data acquired by the Gaofen-7 (GF-7) satellite. The results show that the two laser footprint spots of the GF-7 satellite are within 0.55 cm in the case of ground jitter. Our work can provide a certain reference for the subsequent usage research on laser altimetry data from the GF-7 satellite.

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-11-30; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504903, 2016YFB0501402)

* E-mail: tangxinming99@qq.com; ** E-mail: 176051619@qq.com

Key words remote sensing; sensors; centroid extraction; Gaussian fitting algorithm; gray centroid algorithm; laser footprint spot of GF-7 satellite

OCIS codes 120.0280; 120.4820; 150.1135

1 引言

激光具有方向性好、发散度小的特点,在航天测绘领域得到了广泛应用。20 世纪 70 年代,美国率先开始了激光测高技术的研究,并于 20 世纪 90 年代实现了南北纬 57° 范围内全球高精度控制点信息的获取^[1-5]。2016 年 5 月我国发射了资源三号 02 星,该卫星首次搭载了试验性激光测高仪,证实了国产卫星激光测高数据能够有效提高立体影像无地面控制的高程精度^[6],为接下来国产卫星激光测高的应用提供了重要参考。

我国首颗民用亚米级光学传输型立体测绘卫星高分七号于 2019 年 11 月 3 日成功发射,其搭载了一个两波束激光测高仪,并以 3Hz 的观测频率进行对地观测。该卫星可以同时监测两侧的高程,还可以记录激光测高的全波形数据。此外,高分七号卫星还配置了记录激光发射时能量分布状态的 CMOS 足印相机,以确定激光的指向和光斑的位置^[7]。虽然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,但其平面定位精度还有很大的提升空间,所以,对其足印光斑质心的精确提取具有重要的现实意义。

当前,提取激光足印光斑质心的方法比较多,如比较经典的 Hough 变换法^[8]、曲线拟合法^[9]、灰度重心法^[10](GCM)、高斯拟合法^[11](GFM)等。刘兆蓉等^[12]在重心法的基础上引入了曲线拟合算法来提高激光光斑中心定位的精度。孔兵等^[13]根据最小二乘原理用圆来逼近激光光斑轮廓,该方法可以检测光斑半径,且精度较高,计算速度较快。潘登等^[14]为了应对光线斜入射导致的光斑形状变化,使用相较于圆拟合能更准确描述光斑位置和形状的椭圆拟合法进行了多光斑中心的提取。袁小棋等^[15]在高斯拟合法的基础上结合椭圆拟合法提出了一种基于高斯阈值的椭圆拟合方法,该方法的拟合精度较高。陈和等^[16]结合高斯拟合法和灰度重心法,提出了一种激光光斑定位的改进算法,该算法的定位准确性相比传统算法大幅提高。但是,上述方法在对星载激光光斑质心提取时的抗干扰能力不够强,精度不够高。鉴于此,本文针对高分七号卫星激光光斑的特点,结合高斯拟合法和灰度重心法,并加入

了图像去噪处理和 Canny 边缘检测,对仿真光斑和高分七号卫星的激光光斑数据进行了实验,为后续高分七号卫星在激光测距方面的应用提供参考。

2 实验方法

2.1 灰度重心法

灰度重心法的本质是将图像的灰度值作为权值的加权形心法,该方法的精度较高,原理简单,计算速度快,对于对称性良好且光强分布均匀的光斑中心的拟合精度极高,但若干扰较大导致光斑光强分布不够理想时,往往会产生较大的误差^[17]。设待拟合光斑图像的尺寸为 $M \times N$ (pixel \times pixel),则光斑中心坐标的计算公式为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_m \cdot F(x_m, y_n)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F(x_m, y_n)} \\ y_0 = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_n \cdot F(x_m, y_n)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F(x_m, y_n)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $F(x_m, y_n)$ 代表位于灰度图中第 m 行第 n 列像元的灰度值; x_0 和 y_0 为所求光斑质心的横纵坐标; x_m 和 y_n 分别为 m 行 n 列处的横纵坐标。

2.2 椭圆拟合法

椭圆拟合法 (EFM) 是在得到边缘检测结果以后,根据最小二乘原理拟合椭圆,逼近光斑的轮廓,并使用椭圆的中心作为光斑的中心^[15]。椭圆拟合法简单,可以通过多次迭代来提高算法精度,但其抗干扰能力太差,对光斑的对称性和边缘的明确性要求较高,外界干扰较大时会出现较大误差。

椭圆的一般公式为

$$k_1 x^2 + k_2 xy + k_3 y^2 + k_4 x + k_5 y + k_6 = 0, \quad (2)$$

式中: $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 为参数。根据最小二乘原理可以拟合出具体点的椭圆方程,并进一步计算出椭圆的中心坐标,即光斑的质心坐标。质心坐标 (x_0, y_0) 可以表示为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{k_2 k_5 - 2k_3 k_4}{4k_1 k_3 - k_2^2} \\ y_0 = \frac{k_2 k_4 - 2k_1 k_5}{4k_1 k_3 - k_2^2} \end{cases}. \quad (3)$$

2.3 高斯拟合法

对于绝大部分激光光斑,认为其成像窗口内的像素值即为点扩散函数的离散采样值,大致服从二维高斯分布^[18]。对其建立的高斯函数为

$$F(x, y) = F_0 \cdot \exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{\delta_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\delta_2^2}\right]\right\}, \quad (4)$$

式中: $F(x, y)$ 为图像在 (x, y) 处的灰度值; F_0 为图像灰度的最大值; δ_1, δ_2 分别为 x 和 y 方向上的标准差,即 x 和 y 方向上的半径长。

对(4)式两侧取对数即可得到

$$\ln[F(x, y)] = \ln(F_0) - \left[\frac{(x-x_0)^2}{\delta_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\delta_2^2}\right]. \quad (5)$$

将(5)式化简为多项式,可得

$$z = ax^2 + by^2 + cx + dy + f. \quad (6)$$

(6)式中各参数的表达式为

$$\begin{cases} a = -\frac{1}{\delta_1^2} \\ b = -\frac{1}{\delta_2^2} \\ c = \frac{2x_0}{\delta_1^2} \\ d = \frac{2y_0}{\delta_2^2} \\ f = \ln(F_0) - \frac{x_0^2}{\delta_1^2} - \frac{y_0^2}{\delta_2^2} \\ z = \ln[F(x, y)] \end{cases}, \quad (7)$$

(7)式取残差可得

$$\epsilon_i = (ax_i'^2 + by_i'^2 + cx_i' + dy_i' + f) - z_i', \quad (8)$$

式中: x_i', y_i' 为第 i 个像元的 x, y 坐标; z_i' 为 (x_i', y_i') 处的实际灰度值。令 $t = [a \ b \ c \ d \ f]^T$,则 n 个像元

组成的方程组可表示为

$$Bt = \begin{bmatrix} x_1'^2 & y_1'^2 & x_1' & y_1' & 1 \\ x_2'^2 & y_2'^2 & x_2' & y_2' & 1 \\ x_3'^2 & y_3'^2 & x_3' & y_3' & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n'^2 & y_n'^2 & x_n' & y_n' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1' \\ z_2' \\ z_3' \\ \vdots \\ z_n' \end{bmatrix}. \quad (9)$$

令 $z = [z_1' \ z_2' \ \dots \ z_n']^T$,根据(9)式和最小二乘原理可得

$$t = (B^T B)^{-1} B^T z. \quad (10)$$

计算得到 t 后,根据(7)式可得到

$$\begin{cases} x_0 = -\frac{c}{2a} \\ y_0 = -\frac{d}{2b} \\ F_0 = \exp\left(f - \frac{c^2}{4a} - \frac{d^2}{4b}\right) \end{cases}. \quad (11)$$

2.4 本文算法

理想情况下的激光光斑应严格服从高斯分布,但是在实际应用中会有光斑形状不规则、光强分布不均匀、背景噪声过大的情况,在这种情况下使用上述方法进行光斑质心提取会产生较大误差。本文结合高斯拟合法和灰度重心法(GGM),充分利用高斯拟合法的高稳定性和灰度重心法对形状规则、对称的光斑质心提取精度高的特点,并引用边缘检测方法,提出了一种提升光斑质心提取精度的算法。

具体提取方法为:输入图像后,使用中值滤波去除光斑图像中的噪声点,然后根据高斯拟合结果和高斯光斑的性质设置灰度阈值,接着使用边缘检测方法,根据边缘检测结果设置距离阈值,最后在约束后的剩余区域内使用灰度重心法提取质心。本文算法流程图如图 1 所示。

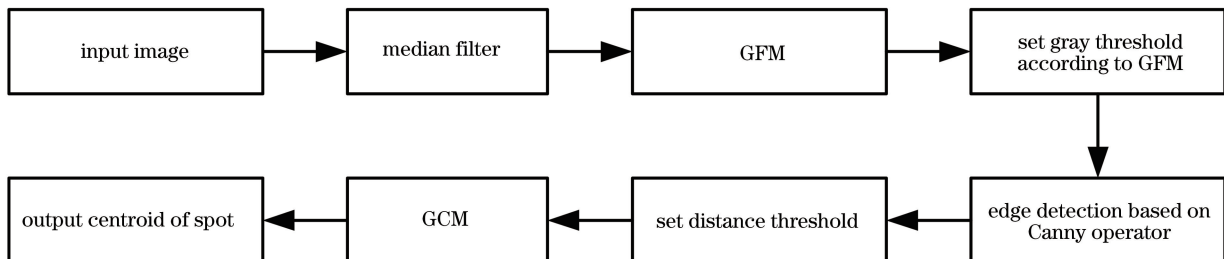


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of our algorithm

2.4.1 滤波去噪

星载激光光斑或者其他工程应用中的光斑,通常会有大量的颗粒噪声,这对光斑质心的提取精度

造成了比较大的影响,因此需要先对目标光斑图像进行去噪处理。当前常用的降噪方法包括平滑滤波、中值滤波、锐化滤波等。本文采用对于颗粒噪声

去除效果较好的中值滤波^[19]对光斑图像进行降噪处理。该方法的基本原理是用图像上某一像元周围邻域内的一系列像元灰度值的中值来代替该点的灰度值,但这样做会使图像的最大灰度值降低。中值滤波的公式为

$$F'(x, y) = \underset{A}{\text{median}}\{F(x, y)\} \quad (12)$$

式中: $F(x, y)$ 为 (x, y) 处的灰度值; A 为 (x, y) 周围的邻域窗口; $F'(x, y)$ 为邻域内像元灰度值的中值; $\text{median}\{\}$ 表示在该邻域内所有像元灰度值的中值。窗口大小的选择对处理结果的影响较大,窗口越大,去噪能力越强,但是会去除更多的图像特征,窗口越小则相反。

2.4.2 灰度阈值的选取

对于降噪后的光斑图像,使用高斯法计算光斑质心。在初步得到光斑的高斯峰值和质心坐标后,还需要确定灰度阈值的大小,将其作为进一步的约束条件。高斯光束的束宽通常有两种定义,一种是最大光强 $1/e^2$ 处的宽度,另一种是最大光强 $1/2$ 处的宽度,还有人使用最大光强 86.5% 处的圆直径来定义束宽^[20]。本文采用光强不小于中心光强 $1/e^2$ 的部分称为光斑这一定义,并将其作为光斑质心提取的第一层约束条件。光斑图像中各像元的赋值为

$$F'(x, y) = \begin{cases} 0, & F(x, y) < F(x_0, y_0) \cdot \frac{1}{e^2} \\ F(x, y), & F(x, y) \geq F(x_0, y_0) \cdot \frac{1}{e^2} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $F(x_0, y_0)$ 为采用高斯法拟合后计算得到的最

大灰度值; $F'(x, y)$ 为重新赋值后 (x, y) 处的灰度值。

2.4.3 距离阈值的选取

对于经灰度阈值分割后的光斑图像,使用Canny算法^[21]进行边缘检测,得到更精确的光斑范围。取高斯法计算出的质心与Canny边缘检测得出的点集距离的最小值作为距离阈值,大于该阈值部分的像元灰度值置为0,其余像元灰度值不变,进一步缩小光斑范围。

3 实验数据及结果

3.1 仿真数据

本文首先通过仿真得到了一个理想的光斑,用以验证所提出的算法。该光斑图像的大小与后续待提取的高分七号激光光斑图像相同,均为 $26 \text{ pixel} \times 26 \text{ pixel}$ 。仿真光斑的灰度值为 $0 \sim 255$,为了模拟真实光斑,在光斑中加入最大强度为最大灰度值 15% 的随机噪声,暂不考虑平台抖动、温度变化和云层地物能量反射等因素对光斑的影响。

首先需要自行设置仿真光斑的半径,如式(14)所示。

$$F(x, y) = \begin{cases} 0, & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} > R \\ a, & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq R \end{cases}, \quad (14)$$

式中: R 为仿真光斑的半径。 a 的取值服从高斯函数,如(15)式所示。仿真光斑的半径 R 为8,中心坐标为 $(12, 12)$,如图2所示。

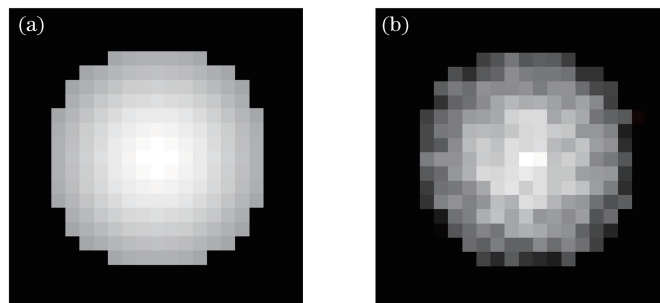


图2 仿真光斑。(a)理想的仿真光斑;(b)加入 15% 随机噪声的仿真光斑

Fig. 2 Simulated spot images. (a) Ideal simulated spot; (b) simulated spot with 15% random noise

$$a = 255 \exp \cdot \left[-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right], \quad (15)$$

式中: μ_x 和 μ_y 表示峰值点在 x 和 y 方向上的偏移量; σ_x 和 σ_y 表示 x 和 y 方向上的标准差。

3.2 高分七号卫星激光光斑数据

高分七号卫星搭载的激光测高仪有两个激光器,发射两道激光束。在两个激光发射器前分别安装一个带有分光器的取光组件,激光进入取光组件后分出来的一部分光先后经过反射和衰减等处理,

最终被引入到两个足印相机(LFC),分别对这两束激光光斑成像,称为激光足印光斑影像(LFI)。高分七号卫星还搭载了一个激光光轴监视相机(LOASC),同时对两束激光光斑成像,称为激光监视光斑影像(LOASI),两个光斑分别定义为 LOASI-1、LOASI-2。LOASI 焦面与地面光学投影的关系如图 3 所示,激光监视光斑影像如图 4 所示,图像的大小为 550 pixel×550 pixel,左上光斑定义为 LOASI-1,左下光斑定义为 LOASI-2。LFI 和 LOASI 均为 16 位图像,每个像元灰度值为 0~65535。为了保证每个足印光斑的完整性和后续处理的效率,本文统一所有提取的光斑图像尺寸为 26 pixel×26 pixel。

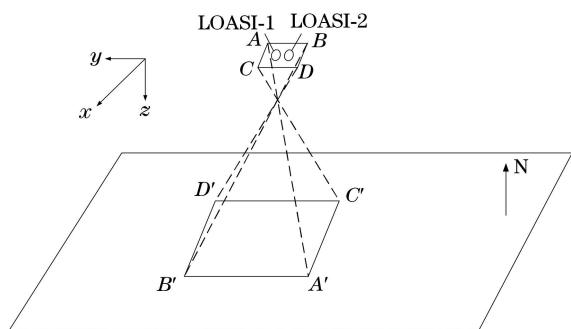


图 3 LOASI 与地面光学投影的关系

Fig. 3 Relationship between LOASI and ground optical projection

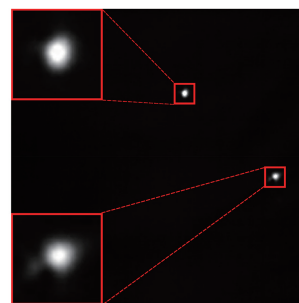


图 4 激光监视光斑影像

Fig. 4 Laser optical axis surveillance image

26 pixel×26 pixel。

本文研究的数据是高分七号卫星 2020 年 8 月 19 日在轨运行期间获取的连续 80 s 共计 240 个 LOASI 数据。每组 LOASI 包括两个激光器的两个光斑 LOASI-1 和 LOASI-2,针对这两个光斑分别使用本文算法提取其质心,进行统计分析,并对高分七号卫星激光光斑的稳定性进行评价。

3.3 方法对比

使用 2.4 节的方法生成 100 组具有不同随机噪声的仿真光斑,分别使用灰度重心法、椭圆拟合法、高斯拟合法和本文算法(GGM)进行质心提取。取 100 组光斑质心坐标的平均值进行统计分析,结果如表 1 所示。仿真光斑的质心坐标为(12 pixel, 12 pixel)。

表 1 不同算法提取的仿真光斑的质心统计结果

Table 1 Centroid statistics of simulated spots extracted by different algorithms

unit: pixel

Method	Mean		Range		RMSE		
	x	y	x	y	x	y	xy
GCM	12.1480	12.1279	0.1963	0.1895	0.1061	0.1015	0.1468
GFM	12.2450	12.1889	0.3913	0.5320	0.1375	0.1867	0.2319
EFM	12.6884	12.7949	0.6884	0.7949	0.3234	0.4133	0.5248
GGM	12.0704	12.0617	0.1270	0.1094	0.0360	0.0300	0.0469

表 1 中 Mean 为均值,Range 为极差值,RMSE 为标准差。通过表 1 的统计结果可知,使用本文算法(GGM)提取的光斑质心坐标最接近光斑的实际质心坐标,100 组光斑质心坐标拟合结果与实际光斑质心坐标的标准差不到 0.05 pixel,提取结果明显优于其他三种传统算法。灰度重心法(GCM)和高斯拟合法(GFM)对光斑质心的提取精度高于椭圆拟合法(EFM),这可能是因为拟合的光斑形状较为规则对称,其能量分布与高斯分布的契合度较高;若存在外界干扰,导致光斑形状不规则或能量分布不均匀时,可能会产生较大误差。

3.4 高分七号卫星激光光斑质心提取

首先选取一幅成像于 2020 年 8 月 19 日的高分

七号卫星激光光斑图像进行光斑质心提取测试。分别使用三种传统算法和本文算法提取光斑质心,并统计提取结果。提取结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 不同算法提取的高分七号卫星激光光斑质心统计

Table 2 Centroid statistics of GF-7 laser spots extracted by different algorithms

unit: pixel

Method	x	y	Display
GCM	13.693	13.552	Triangle
GFM	14.074	13.482	Circle
EFM	14.340	14.878	Square
GGM	13.989	12.929	Cross

图 5 所示为不同算法提取的 LOASI 光斑质心的结果,图中三角形为灰度重心法的提取结果,圆形为高斯拟合法的提取结果,正方形为椭圆拟合法的

提取结果, 十字形为本文算法的提取结果, 目视可以看出本文算法提取出的质心更接近于光斑中心。

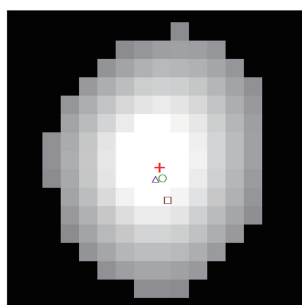


图 5 不同算法提取的 LOASI 光斑质心
Fig. 5 Centroid of LOASI spot extracted by different algorithms

由于高分七号卫星在轨运行期间的激光测高数据不连续, 开机时间不固定, 每次运行时长也不固定, 因此暂时难以对其光斑的稳定性和抖动规律进行准确评价。使用本文算法对高分七号卫星 2020 年 8 月 19 日在轨运行期间获取的连续 80 s 240 个 LOASI 数据中的 LOASI-1 和 LOASI-2 进行质心提取, 并进行统计分析。两束激光成像的光斑质心提取结果如图 6 所示。

图 6 中横坐标为数据编号, 纵坐标分别为 LOASI-1、LOASI-2 质心在 x 、 y 方向的坐标, 单位为 pixel。为评价光斑的稳定性, 本文使用贝塞尔公式^[22]对实验结果进行计算, 然后进行统计, 统计结果如表 3 所示。贝塞尔公式为

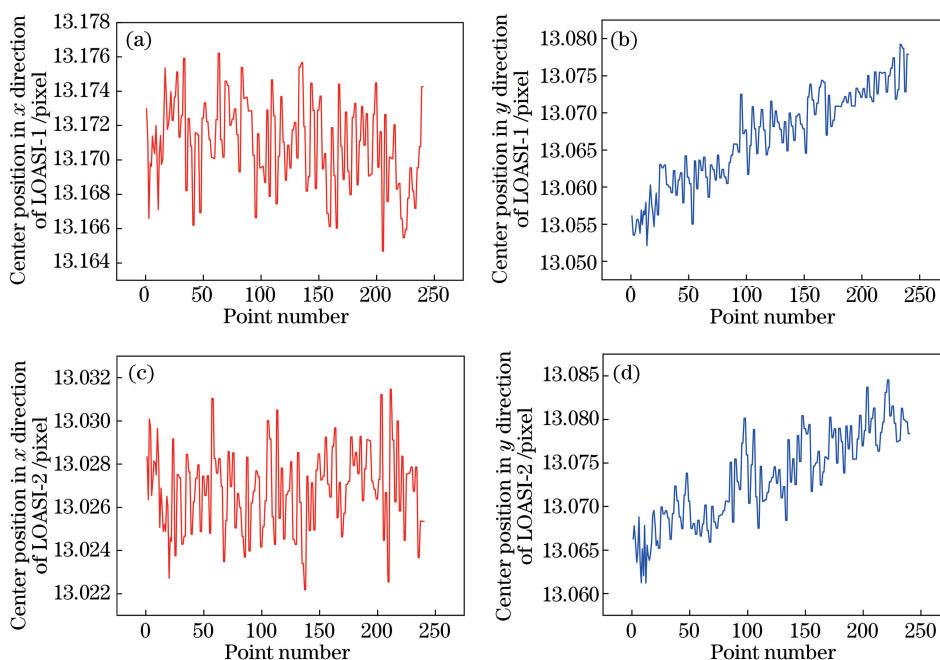


图 6 2020 年 8 月 19 日高分七号卫星 LOASI-1、LOASI-2 质心坐标统计。(a) LOASI-1, x 方向;
(b) LOASI-1, y 方向;(c) LOASI-2, x 方向;(d) LOASI-2, y 方向

Fig. 6 GF-7 LOASI-1, LOASI-2 centroid coordinate statistics in August 19, 2020. (a) LOASI-1, in x direction;
(b) LOASI-1, in y direction; (c) LOASI-2, in x direction; (d) LOASI-2, in y direction

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \\ \sigma_y = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum (y_i - \bar{y})^2} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: n 为数据点的个数; x_i 、 y_i 为第 i 个光斑质心

的横纵坐标; \bar{x} 、 \bar{y} 为每一组光斑质心横纵坐标的均值; σ_x 、 σ_y 为通过贝塞尔公式计算得到的每一组光斑质心横纵坐标的标准差。

综合图 6 和表 3 的统计结果来看, 在高分七号

表 3 2020 年 8 月 19 日高分七号卫星 LOASI-1、LOASI-2 质心提取实验的统计结果

Table 3 Statistical results of LOASI-1, LOASI-2 centroid extraction experiment of GF-7 in August 19, 2020

Item	Mean		Range		RMSE		
	x	y	x	y	x	y	xy
LOASI-1	13.1709	13.0668	0.0115	0.0271	0.0026	0.0062	0.0067
LOASI-2	13.0268	13.0734	0.0093	0.0233	0.0019	0.0052	0.0055

unit: pixel

卫星每次开机运行的 80 s 内, LOASI-1、LOASI-2 均比较稳定, 质心抖动较小(LOASI-1 质心抖动的标准差为 0.0067 pixel, LOASI-2 质心抖动的标准差为 0.0055 pixel), 且两光斑质心在 x 方向的抖动均略小于在 y 方向的抖动。高分七号卫星激光足印影像的分辨率为 3.2 m, 去除图像扩束的影响后, LOASI-1 和 LOASI-2 质心抖动标准差对应地面的位置变化分别约为 0.54 cm 和 0.44 cm, 均在设计精度范围之内。

4 结 论

星载激光测高仪记录的光斑通常会受平台抖动、地物高反射能量、垫面云层和温度等的影响而出现光斑形状不规则、能量分布不均匀等现象。本文首先使用中值滤波对光斑图像进行去噪处理; 然后利用高斯拟合法初步找到光斑的质心和最大灰度值, 并根据得到的最大灰度值和光斑性质设置灰度阈值, 以缩小光斑范围; 再使用 Canny 算子对缩小后的光斑进行边缘检测, 并将边缘到质心的最小值作为距离阈值, 以进一步缩小光斑范围; 最后对剩余的形状较为规则的光斑使用灰度重心法进行质心的提取。这种方法在较大程度上去除了噪声和高反射能量对光斑几何和性质的干扰, 提升了光斑质心提取的精度。本文使用这种方法对仿真光斑和高分七号卫星 LOASI 数据进行了质心提取, 实验结果如下:

1) 使用灰度重心法、高斯拟合法和椭圆拟合法这三种传统算法和本文算法对 2020 年 8 月 19 日高分七号卫星获取的某一个 LOASI 数据进行质心提取, 证明了本文算法在针对该光斑提取质心时有更好的效果。

2) 使用本文算法对 2020 年 8 月 19 日高分七号卫星获取的连续 80 s 共计 240 个 LOASI 数据进行质心提取, 结果显示, 在该段时间内 LOASI-1 和 LOASI-2 质心在地面上的抖动范围分别约为 0.54 cm 和 0.44 cm, 均有较好的精度和稳定性。

由于能够获取的数据有限, 所以本文仅根据获取的部分数据进行了实验, 并证明了在该段数据内本文算法具有较高的精度, 但本文算法是否具有普适性和推广性还需要进一步研究。接下来拟针对更长时序的 LOASI 数据进行研究, 结合卫星的硬件信息、外界因素干扰规律和更有效的图像处理算法等, 进一步对光斑进行降噪和提取, 以获取更高的激光指向精度和测距平面精度。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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(1/2/3/4): 451-479.
- [3] Smith D E, Zuber M T, Frey H V, et al. Mars Orbiter Laser Altimeter: experiment summary after the first year of global mapping of Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23689-23722.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Kong B, Wang Z, Tan Y S. Profile measurement in micro order precision by confocal image [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 25(11): 1151-1154.
- [12] Liu Z R, Wang Z Q, Liu S J, et al. Research of precise laser spot center location algorithm [J]. Computer Simulation, 2011, 28(5): 399-401,409.
刘兆蓉, 王志乾, 刘绍锦, 等. 激光光斑中心精确定位算法研究 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 399-401,409.
- [13] Kong B, Wang Z, Tan Y S. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 275-279.
孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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] 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] 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.
- [22] 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.