

高分七号卫星足印相机激光光斑中心定位方法研究

伍煜¹, 龙小祥², 杨坚¹, 韩启金², 李庆鹏², 李松^{1*}¹武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;²中国资源卫星应用中心, 北京 100094

摘要 使用足印相机同时对激光光斑和地表成像会导致相机中的激光光斑影像与地面影像重叠,造成激光光斑的中心定位精度较差。本文针对 GF-7 卫星足印相机实测的图像特点,提出地物噪声图像分类方法,优化高斯拟合光斑中心定位的处理流程,同时分析不同地物噪声背景下光斑图像的分类方法以及对应的光斑中心的提取精度。实验结果表明,所提方法在低中高的不同噪声条件下,中心定位精度分别为 0.11, 0.13, 0.16 pixel, 定位方差分别为 0.020, 0.262, 0.341 pixel。在信噪比更好的夜间,光斑定位精度为 0.02 pixel, 定位方差为 0.0036 pixel, 说明噪声是影响光斑中心定位精度的最主要因素。

关键词 遥感; 高分七号卫星; 激光测高仪; 足印相机; 背景噪声; 光斑中心定位

中图分类号 TP732

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1728001

Laser Spot Center Positioning Method in Gaofen-7 Footprint Camera

Wu Yu¹, Long Xiaoxiang², Yang Jian¹, Han Qijin², Li Qingpeng², Li Song^{1*}¹School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;²China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

Abstract With a footprint camera for surface imaging of laser spot and at the same time, it will cause the laser spot image in the camera to overlap with the ground image, resulting in poor center positioning accuracy of the laser spot. In this paper, according to the characteristics of the images measured by GF-7 satellite footprint camera, the ground noise image classification method is proposed to optimize the Gaussian fitting spot at the same time, the classification method of the spot image and the extraction accuracy of the corresponding spot center under the background of different ground noise are analyzed. Experimental results show that the proposed method has a center positioning accuracy of 0.11, 0.13, 0.16 pixel, and a positioning variance of 0.020, 0.262, 0.341 pixel, respectively, under different noise conditions of low, medium, and high. At night when the signal-to-noise ratio is better, the spot positioning accuracy is 0.02 pixel, and the positioning variance is 0.0036 pixel, indicating that the noise is the most important factor affecting the spot center positioning accuracy.

Key words remote sensing; Gaofen-7; laser altimeter; footprint camera; background noise; spot center positioning

OCIS codes 280.3400; 140.3430; 200.4560

1 引言

星载激光测高仪是一种新型对地观测设备,通过接收目标反射的激光脉冲回波可以获取地表脚点处的高精度距离信息,融合卫星姿态以及卫星和激光指向数据后可以获取激光脚点位于地表的精确三

维坐标。国内外已经发射多颗搭载星载激光测高仪载荷的卫星,其测量成果已成功应用于极地冰盖变化和高精度地形测量等领域^[1]。全球首台星载激光测高仪系统 GLAS(Geo-science Laser Altimeter System)于 2003 年升空,其数据产品不仅被用于监测冰川高度的变化,在大气、植被和海洋等关键参数

收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-03-08; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 对地高分国家科技重大专项(11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A11-9001-17/18)

通信作者: *wuhanpeople@126.com

的反演中也得到了广泛应用^[2]。2016 年我国在资源三号 02(ZY3-02) 星上首次搭载了激光测高仪试验载荷, 在平地区域实现了 1 m 的测距精度^[3-4], 通过激光与影像的联合处理, 无控条件下测图的高程精度达到 5.0 m, 局部地区可以达到 2.5 m, 充分验证了星载激光测高仪在全球范围内作为高精度高程控制点的可行性^[5]。2019 年和 2020 年我国先后发射了搭载星载激光测高仪的高分七号(GF-7) 卫星^[6]和资源三号 03(ZY3-03) 星^[7], 两颗卫星完成了大量的在轨实验后交付用户使用。

与美国搭载 GLAS 系统的 Ice-SAT 卫星的配置不同, 我国的 GF-7 卫星和 ZY3-03 星均采用了激光载荷和双线阵立体相机复合的模式。以 GF-7 星载激光测高仪为例, 为建立激光载荷与光学相机之间的关联, 卫星上配备了激光足印相机(Laser Footprint Camera, LFC)、光轴监视相机(Laser Optical Axis Surveillance Camera, LOASC)以及双线阵相机^[8]。其中光轴监视相机主要用于确定激光光束的指向变化^[9], 双线阵相机用于生成地表立体影像乃至后续的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM), 而足印相机既监视激光脉冲的光束指向, 又可以直接对地成像, 通过前后视相机的图像匹配可以确定激光足印在地面或者在前后视图像坐标系中的位置^[10]。可见, 足印相机是实现激光与光学相机数据融合的关键。将激光测高仪所提供的地面高程控制点与前后视相机生成的 DEM 联合解算, 即可实现无控的大比例尺测图。

在实际工作中, 足印相机需要同时对地面和激光光斑成像。受地面目标和激光传输过程中云层的干扰, 相机中的光斑边界模糊不清, 能量分布偏移原始的高斯分布^[11], 导致光斑中心定位不准。GF-7 卫星中足印相机的地面像元分辨率为 3.2 m, 足印相机内光斑中心定位 1 pixel 的误差会导致地面光斑定位产生 3.2 m 的误差, 即 1.28" 的激光指向误差^[12]。为了提高激光与图像数据的融合精度, 有必要针对足印相机的图像特点构建一种新的光斑中心定位模型, 以提高足印相机中光斑中心定位的精度。

2 高分七号卫星中足印相机的工作模式

GF-7 卫星利用足印相机实时记录每一发脉冲的能量分布, 可以进一步确定光束在足印相机坐标系中的准确指向。基于足印相机与双线阵相机的图像匹配, 计算得到激光光斑中心在前后视相机图像

中的具体位置。GF-7 卫星的激光发射与监视系统组成如图 1 所示^[10]。

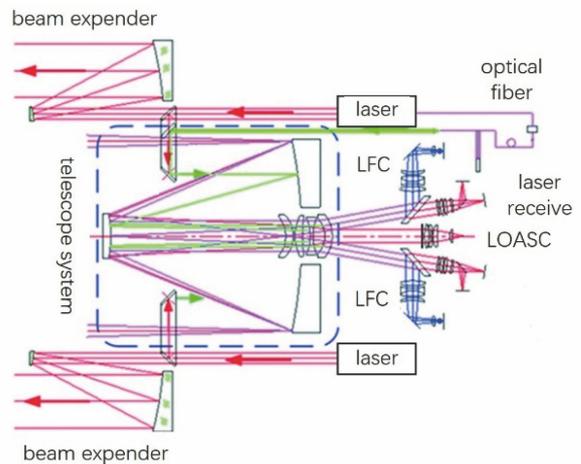


图 1 激光发射与监视系统的框图^[10]

Fig. 1 Block diagram of laser emission and monitoring system^[10]

从图 1 可以看到, 在激光器的出光光路中设计了取光组件, 用来监视激光器的光轴。大部分激光能量透过取光组件后, 再经过二级扩束系统准直后会在地面形成足印, 剩余的部分能量经过接收望远镜后到达足印相机和光轴监视相机的焦面。足印相机可同时地对物以及激光光斑进行成像, 光轴监视相机可对两个方向的激光光斑进行成像。通过提取到的激光光斑质心位置的变化可以反映激光指向在轨的变化情况。

足印相机有两种工作模式, 即同步曝光模式和异步曝光模式^[13]。GF-7 卫星中的足印相机通常工作在同步曝光模式下, 即足印相机可同时对光斑和地面进行成像^[14], 同步曝光模式下激光足印相机获得的图像如图 2 所示。

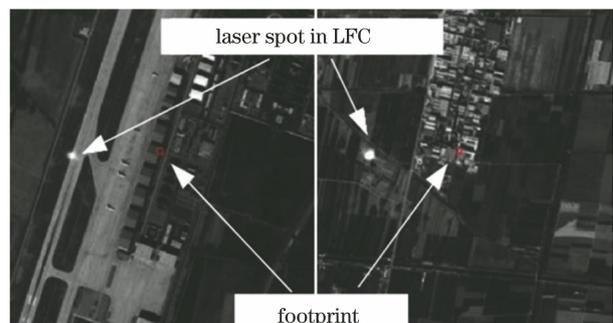


图 2 同步曝光模式下足印相机拍摄的图像

Fig. 2 Images taken by LFC in synchronous exposure mode

图 2 中的光斑在足印相机上的位置与光斑在地面上的真实位置(圆圈处)之间会有一个固定偏差, 偏差由激光导光光路造成。在激光光轴指向与足印

相机耦合关系非常稳定的前提下,该误差理论上可视为一个常数,对应足印影像(Laser Footprint Image, LFI)上为一个平移量^[15]。同步曝光模式下地表图像与光斑图像同时生成,但是激光光斑在图像上的位置并非光斑落在地表的真实位置,两者之间存在一个固定偏移,当计算激光光斑在前后视相机中的位置时,需要对其进行修正。同步模式下的光斑图像叠加了地表地物等背景,导致光斑能量分布不一定准确,光斑样式较差。图 2 中的光斑图像与地

物重叠,左图中的光斑落在跑道边缘。由于光斑边缘部分与地物特征在图像中的灰度值近似,所以光斑右侧的边缘不清晰。右图中的光斑与农田重叠,整体背景的灰度值较大,光斑尺寸较左图偏大,说明背景地物的特征会影响到光斑尺寸与能量分布,当然也会影响对光斑中心的定位。

在异步曝光模式中,足印相机只负责拍摄地面上的地物信息,激光光斑由光轴监视相机拍摄,两种相机拍得的图像如图 3 所示。

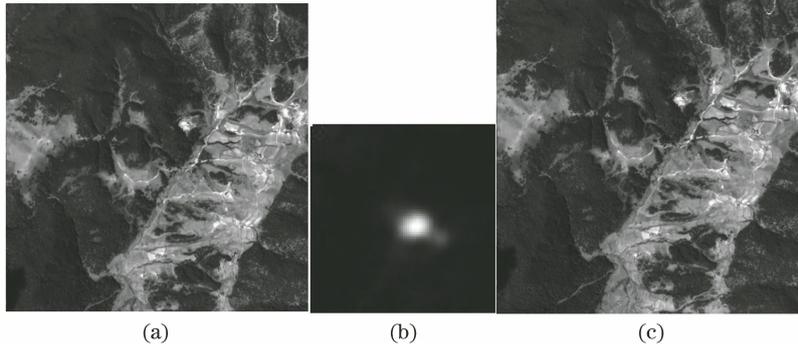


图 3 异步工作模式下的光斑图像。(a)地物图像 1 ;(b)光斑图像 ;(c) 地物图像 2

Fig. 3 Spot images in asynchronous mode. (a) Ground image 1; (b) spot image; (c) ground image 2

从图 3 可以看到,异步工作模式下的光斑清晰度高,但是足印相机所拍摄的图像中不含光斑图像。异步曝光模式下相机的曝光时间短,地面背景亮度低,对光斑中心定位的影响较小。但是在异步曝光模式下,三幅图像的拍摄时间间隔比较大^[16],而且时间插值方式确定的光斑定位精度低,为此该方式在实际工作中应用较少。考虑到 GF-7 卫星大多工作在同步模式下,故本文着重研究同步曝光模式下光斑中心的定位问题。

3 高分七号光斑中心定位方法

3.1 高斯拟合中心定位原理

从 GF-7 卫星对激光器的监视情况来看,激光光斑具有明显的椭圆高斯特性,故本文设计采用二维高斯函数拟合的方法来定位光斑中心,同时进行光斑质量的评价。二维高斯函数可表示为^[17]

$$f(x, y) = G \cdot \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right], \quad (1)$$

式中: G 为高斯函数的幅值; (x, y) 为像素点在图像中的位置; $f(x, y)$ 为点 (x, y) 处的灰度值; σ_x 和 σ_y 分别为 x 方向和 y 方向的标准差; (x_0, y_0) 为光斑的中心位置。对(1)式两边取对数后乘 f 并展开平方项(f 即为 $f(x, y)$),整理后为

$$f \times \ln f = f \times \left[\ln G - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2} \right] + \frac{x_0^2}{\sigma_x^2} \times xf + \frac{y_0^2}{\sigma_y^2} \times yf - \frac{x^2 f}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2 f}{2\sigma_y^2}. \quad (2)$$

设定光斑内有 N 个像素点,可以使用二维矩阵来表达光斑内的灰度分布。由于二维高斯函数中的未知数有 5 个,以 GF-7 卫星足印相机的实测结果为例, N 值一般大于 100。二维矩阵可表示为^[18]

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} \times \mathbf{C}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{A} 为 $N \times 1$ 的矩阵, \mathbf{A} 中的元素 $a_i = f_i \times \ln f_i$,其中 $i=1, 2, \dots, N$; \mathbf{B} 为 $N \times 5$ 的矩阵; \mathbf{C} 为由高斯参量组成的矩阵。 \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 可分别表示为

$$\mathbf{B} = [f_i \quad f_i x_i \quad f_i y_i \quad f_i x_i^2 \quad f_i y_i^2], \quad (4)$$

$$\mathbf{C}^T = \left[\ln G - \frac{x_0^2}{\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{\sigma_y^2} \quad \frac{x_0}{\sigma_x^2} \quad \frac{y_0}{\sigma_y^2} \quad -\frac{1}{2\sigma_x^2} \quad -\frac{1}{2\sigma_y^2} \right]. \quad (5)$$

高斯拟合法的本质是以二维高斯函数为模板对光斑图像进行滤波。本文通过正交(QR)分解^[19]来进一步计算 \mathbf{C} 中的各项参量。对 \mathbf{B} 进行 QR 分解,则(3)式可改写为

$$\mathbf{A} = (\mathbf{Q}\mathbf{R})\mathbf{C}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{Q} 为正交(酉)矩阵; \mathbf{R} 为非奇异三角矩阵。根据 QR 分解的相关性质, \mathbf{C} 可以表示为

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Q}^T \mathbf{A}). \quad (7)$$

QR 分解的方式具有计算量较小,适合进行矩阵计算。 N 个像素点的误差列向量 $\mathbf{E} = \mathbf{A} - \mathbf{B} \times \mathbf{C}$, 使 N 个点的均方差(MSE)最小,MSE 的计算公式为

$$M_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \|\mathbf{E}\|^2 = \frac{1}{N} \mathbf{E}^T \mathbf{E} = \frac{1}{N} (\mathbf{A} - \mathbf{B} \times \mathbf{C})^T (\mathbf{A} - \mathbf{B} \times \mathbf{C}). \quad (8)$$

一般以 MSE 的大小作为拟合后定位精度的指标。当 MSE 值小于 10^{-5} 时,可以认为该次中心定位的精度较高。

根据实际观测,光斑的长短轴之比约为 1.25, 光斑面积在 100~200 pixel 之间,光斑长轴近似与 X 轴平行。采用二维高斯函数拟合的方法对足印相机中的光斑进行中心定位,得到在足印相机像素坐标系下光斑中心的坐标。光斑中心定位的具体操作流程如图 4 所示,处理步骤如下。

- 1) 读取该轨道激光的各类数据,包括回波标志、编号和时间等。
- 2) 读取对应的激光和足印相机数据,如果该发激光脉冲有回波则进入步骤 3)。
- 3) 提取尺寸为 32 pixel×32 pixel 的光斑 ROI

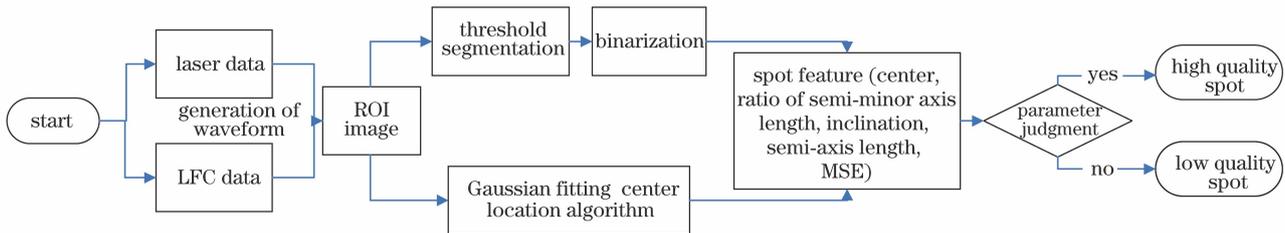


图 4 光斑中心的定位处理流程

Fig. 4 Flowchart of spot center positioning

3.2 光斑中心定位方法的精度评估

根据足印相机同步曝光的过程,可以认为同步模式下足印相机所拍摄图像由激光光斑、云层和地表背景等生成,灰度图像可表示为

$$\mathbf{I}(x, y) = \mathbf{S}(x, y) + \mathbf{n}(x, y), \quad (9)$$

式中: \mathbf{I} 为同步曝光图像; \mathbf{S} 为激光光斑所形成的图像; \mathbf{n} 为地面和云层等反射所形成的噪声图像。由于卫星平台中激光器的总体性能稳定,光斑位置变化通常在几个像素之间。为了减小计算工作量,在 32 pixel×32 pixel 的区域内进行光斑中心的求解。

为了更好地获取光斑先验知识以及减小地物信息对光斑的影响,利用几乎不含噪声的异步曝光模式下的实测光斑图像作为激光光斑形成的图像,如图 5 所示。

(Region of Interest)图像。

4) 对光斑区域进行阈值分割,确定光斑的闭合连通域。

5) 将光斑的闭合连通域进行二值化处理,用来获取光斑实际的尺寸和周长信息,从而确定光斑内拟合的像素点数 N 。

6) 采用高斯拟合中心定位原理来求解光斑的中心位置 (X, Y) 、长短轴之比 C 、长轴像素个数 L_A 、光斑倾角 θ 和 MSE。

7) 对参数进行判断,选取长短轴之比、长轴像素点数、均方根误差和倾角满足预设指标要求的光斑作为优质光斑,其光斑中心位置为优质光斑的中心位置。优质光斑的判断标准: $C \in (1, 1.5)$, $L_A \in (10, 18)$, $M_{\text{MSE}} < 10^{-5}$, $\theta \in (-30^\circ, 30^\circ)$ 。

上述处理流程首先采用阈值分割的方式来获取光斑的连通域,对连通域进行二值化处理可以确定光斑的轮廓和尺寸,也可以确定光斑内数据点的个数 N 。采用高斯拟合方法对光斑内数据进行中心定位,轮廓外的数据不予处理,可以降低地表背景噪声对光斑中心定位的影响。

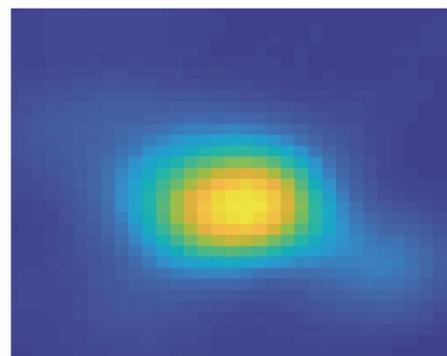


图 5 不含噪声的光斑图像

Fig. 5 Spot image without noise

为了验证中心定位方法的精度,采用 3.1 节的高斯拟合方法计算得到原始图像 \mathbf{S} 的光斑中心位置 (X_0, Y_0) 并将其作为中心真值。根据 GF-7 卫星中足印相机的 14 bit 灰度图像特征,白天光斑的灰

度值一般在 7000 以上,地表背景像素点的灰度值在 5500 以下。本文将像素点灰度值集中在 4000 以下的噪声图像称为弱噪声图像,灰度值在 4000~4500

之间的噪声图像称为中等噪声图像,灰度值大于 4500 的噪声图像称为强噪声图像。不同类型图像的典型灰度直方图如图 6 所示。

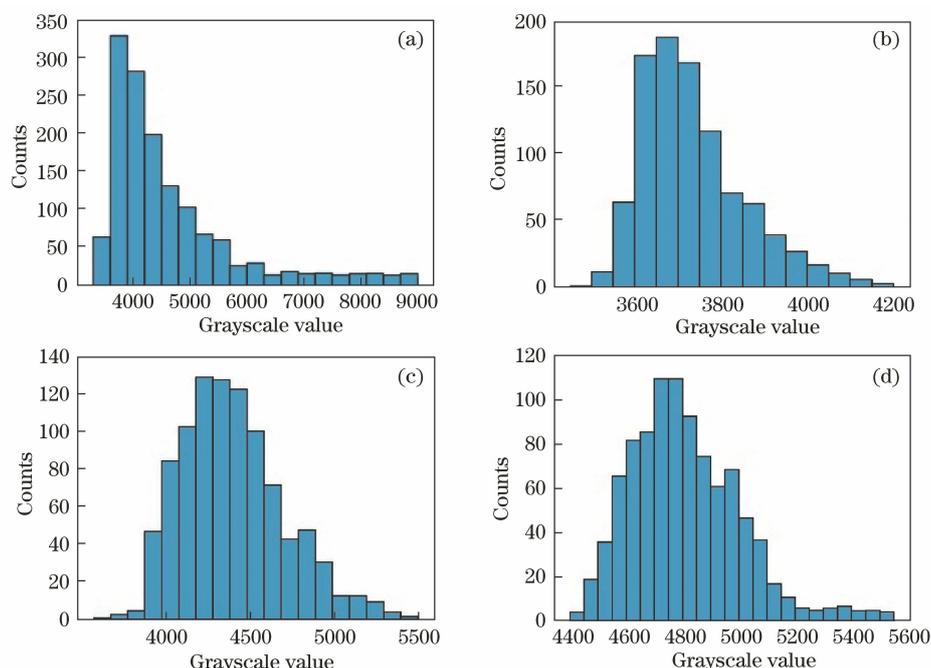


图 6 不同类型图像的典型灰度直方图。(a)含光斑图像;(b)弱噪声图像;(c)中等噪声图像;(d)强噪声图像

Fig. 6 Typical gray histograms of different types of images. (a) Spot image; (b) weak noise image; (c) moderate noise image; (d) strong noise image

随机选取不同轨道内且不含光斑区域的地表噪声图像作为反射形成的地表噪声图像 n , 尺寸与图像 S 一致, 均为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 。分别选取低噪

声、中等噪声和强噪声的地表图像各 7000 幅。将原始图像 S 与地表噪声 n 叠加后得到测试图像 I 。测试图像的样例如图 7 所示。

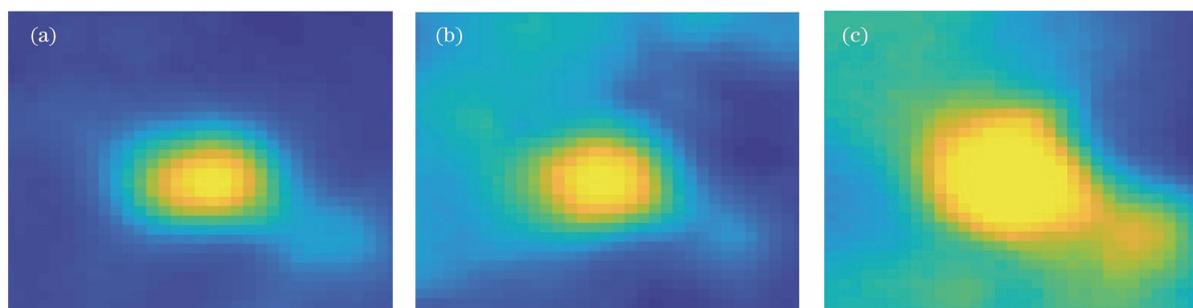


图 7 测试图像的典型样例。(a)弱噪声的测试图像;(b)中等噪声的测试图像;(c)强噪声的测试图像

Fig. 7 Typical example of test image. (a) Test image of weak noise; (b) test image of moderate noise; (c) test image of strong noise

从图 7 可以看到,由于地表物体的灰度值在足印相机中不同,所以光斑样式存在差异。强噪声情况下,光斑的形状和能量出现了明显的变化,影响了对光斑中心的定位。

采用 3.1 节的高斯拟合中心定位方法来求解所有测试图像 I 中的光斑中心位置 (X_i, Y_i) , 统计与图像 S 的中心位置 (X_0, Y_0) 的偏差, 得到不同噪声条件下中心定位方法的误差散点, 如图 8 所示。

通过半实物仿真,可以计算出不同噪声条件下 7000 幅图像的光斑中心定位误差。在三种不同噪声条件下,高斯拟合方法的中心定位误差分别为 0.11, 0.13, 0.16 pixel, 方差分别为 0.020, 0.262, 0.341 pixel, 说明噪声越小,光斑中心的定位结果越稳定。与 Ren^[9] 已实现的 0.7 pixel 中心定位精度相比,本文方法的光斑中心定位精度有了明显提升,说明抑制地表噪声对光斑中心定位的影响,可以很

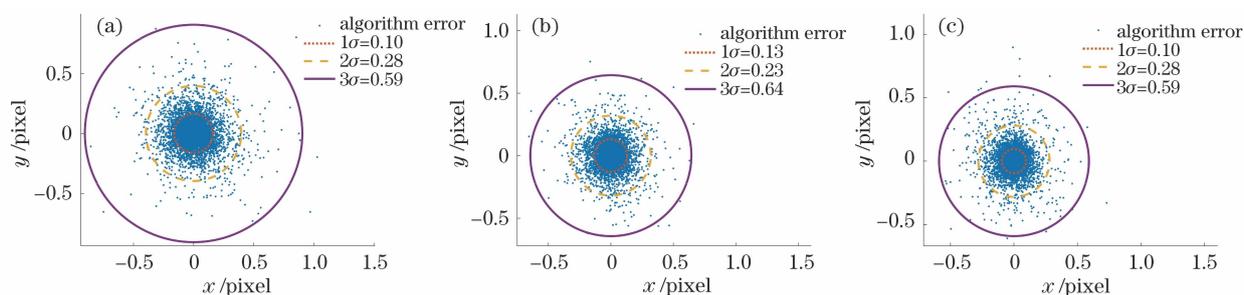


图 8 不同噪声条件下高斯拟合中心定位方法的误差散点分布。(a)弱噪声图像;(b)中等噪声图像;(c)强噪声图像

Fig. 8 Error scatter distribution of Gaussian fitting center location method under different noise conditions.

(a) Weak noise image; (b) moderate noise image; (c) strong noise image

好地提高光斑中心的定位精度。

GF-7 卫星激光测高仪偶尔也会在夜间工作。与白天工作不同,夜晚足印相机的增益低,光斑内像素的灰度值在 1500~2000 之间,背景噪声的灰度值在 300~500 之间,信噪比约为 4,远高于白天 1~2 的信噪比。采用同样的半实物仿真模拟过程,得到夜间条件下高斯拟合中心定位方法的误差散点,如图 9 所示。

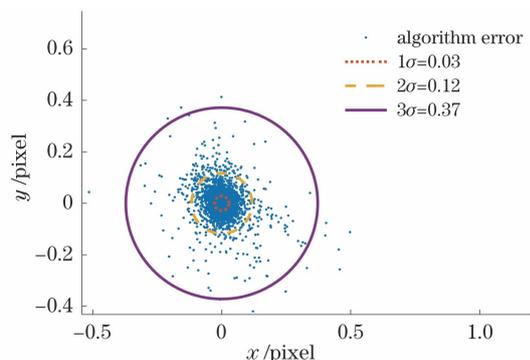


图 9 夜间高斯拟合中心定位方法的误差散点分布

Fig. 9 Error scatter distribution of Gaussian fitting center location method at night

与白天正常工作状态相比,足印相机在夜间下光斑的中心定位精度为 0.03 pixel,方差为 0.0036 pixel,说明噪声水平是影响光斑中心定位精度的最主要因素。

4 结 论

本文根据 GF-7 卫星足印相机的工作模式和成像特点,提出一种图像噪声分类方法,优化高斯拟合中心定位方法,建立光斑中心定位处理流程。对于半实物仿真,在弱噪声、中等噪声和强噪声的条件下,中心定位精度分别为 0.11, 0.13, 0.16 pixel,方差分别为 0.020, 0.262, 0.341 pixel,证明该方法能很好地抑制地物背景,提高光斑中心的定位精度。

通过对夜间足印相机光斑数据的仿真分析,可以发现夜间下的光斑中心定位精度为 0.02 pixel,方差为 0.0036 pixel。夜间下的光斑中心定位精度和稳定性均远优于白天,说明地物背景噪声是影响足印相机中光斑中心定位最主要的因素。

本文提出的方法适用于 GF-7 卫星或类似工作体制的激光测高卫星足印相机中光斑中心的定位,可以作为基本手段来分析图像坐标系下激光指向特征或变化规律等。本文的方法对后续卫星激光数据的处理具有参考价值,目前在 GF-7 卫星真实的数据处理中也得到实际的应用。

参 考 文 献

- [1] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat mission [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21): L21S01.
- [2] Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography [J]. Science of Remote Sensing, 2020, 1: 100002.
- [3] Tang X M, Xie J F, Fu X K, et al. ZY3-02 laser altimeter on-orbit geometrical calibration and test [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(6): 714-723.
唐新明, 谢俊峰, 付兴科, 等. 资源三号 02 星激光测高仪在轨几何检校与试验验证 [J]. 测绘学报, 2017, 46(6): 714-723.
- [4] Li G, Tang X, Yuan X, et al. Vertical accuracy assessment of ZY-3 digital surface model using ICESat/GLAS laser altimeter data [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-1/W1: 23-28.
- [5] 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.
- [6] Tang X M, Xie J F, Liu R, et al. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(1): e2019EA000777.
- [7] Cao H Y, Dai J, Xu C, et al. ZY-3 series satellites and their applications[J]. Satellite Application, 2020 (10): 11-13.
曹海翔, 戴君, 徐驰, 等. 资源三号系列卫星及其应用概况[J]. 卫星应用, 2020(10): 11-13.
- [8] Tang X M, Yao J Q, Li G Y, et al. Cloud scattering influence on satellite laser altimetry data and its correction[J]. Applied Optics, 2020, 59(13): 4064-4075.
- [9] Ren C F, Xie J F, Zhi X D, et al. Laser spot center location method for Chinese spaceborne GF-7 footprint camera[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2319.
- [10] 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.
- [11] Wang Z W, Li S, Luo M. Laser footprint center extraction method based on LM algorithm[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(4): 501-506.
王志文, 李松, 罗敏. 一种基于 LM 算法的激光足印中心提取方法[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 501-506.
- [12] Han Y, Li S, Yu S Z, et al. Laser pointing error estimation based on energy data of LOLA system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0528001.
韩越, 李松, 余诗哲, 等. 基于 LOLA 系统的能量数据估算激光指向误差[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0528001.
- [13] Cao H Y, Zhang X W, Zhao C G, et al. System design and key technologies of the GF-7 satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(5): 1-9.
曹海翔, 张新伟, 赵晨光, 等. 高分七号卫星总体设计与技术创新[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(5): 1-9.
- [14] Yuan X Q. Study on the footprints image simulation of satellite laser altimeter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018: 25-32.
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: 25-32.
- [15] Guo A Y, Dai J, Zhao C G, et al. Design and on-orbit validation of GF-7 satellite laser altimeter[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 43-48.
国爱燕, 戴君, 赵晨光, 等. 高分七号卫星激光测高仪总体设计与在轨验证[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 43-48.
- [16] Li S N, Fan X F, Li B B, et al. Error analysis of satellite laser altimeter and footprint camera [C] // Proceedings of the 7th China high resolution earth observation conference, November 17, 2020, Changsha, China. Changsha: Union of China High Resolution Earth Observation, 2020: 1-14.
李少宁, 范秀芳, 李贝贝, 等. 星载激光测高雷达与足印相机测量系统误差分析[C]//第七届高分辨率对地观测学术年会论文集, 长沙, 中国. 长沙: 高分辨率对地观测学术联盟, 2020: 1-14.
- [17] 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.
- [18] Feng X X, Zhang L Y, Ye N, et al. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512002.
冯新星, 张丽艳, 叶南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512002.
- [19] Ye J P, Li Q. A two-stage linear discriminant analysis via QR-decomposition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(6): 929-941.