

高分七号卫星激光载荷指向变化规律分析及应用

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 作为我国自主研发的首颗 1:10000 比例尺立体卫星, 高分七号(GF-7)卫星搭载的全波形激光测高仪和双阵光学相机为全球范围内数字高程模型的建立提供了新的途径。为确定激光脚点在双阵立体影像中的位置, 进而实现两者的复合测绘功能, 监视激光指向的足印相机和双阵相机一般需要在白天同时工作, 以确定激光光斑在双阵相机图像坐标系下的位置。采用同步曝光模式时, 足印相机中的光斑图像往往与地物和云层重叠, 在强背景噪声条件下由足印相机图像提取的光斑中心精度较差, 甚至无法提取光斑中心。基于多轨足印相机图像的分析, 激光器在连续工作时, 光斑中心随其工作时间的增加在 X 方向正向偏移并呈现一定的线性, 其线性变化规律受激光器出光能量波动的影响; 而在 Y 方向上则基本稳定, 可以采用分段线性拟合、数据插值的方式来获取强背景噪声条件下光斑中心的位置, 从而提升激光数据的利用效率。激光指向的变化规律也为后续激光载荷系统误差标定与计算提供了依据和参考, 也为后续激光测高仪数据的分析和处理提供了新的思路。

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

中图分类号 TP732

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2328003

Variation Law Analysis and Application of GaoFen-7 Laser Pointing

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

Abstract The GaoFen-7 satellite (GF-7) is the first 1:10,000 scale stereo satellite independently developed by China. The full-waveform laser altimeter and dual-linear array camera carried by the GF-7 provide a new way of establishing worldwide digital elevation models. The active and passive composite mapping function of the laser footprint and dual-linear array stereo image can be fulfilled when the position of the laser footprint in the dual-linear array stereo image is determined. To this end, the laser footprint camera monitoring the laser pointing needs to work simultaneously with the dual-linear array camera in the daytime to determine the laser spot position in the image coordinate system of the dual-linear array camera. Due to the operating characteristics of the laser footprint camera in the synchronous exposure mode, the spot image overlaps with those of ground objects or clouds. With strong background noise, either the spot center position obtained from an image captured by the laser footprint camera is poor in accuracy, or no spot center position is obtained. According to an analysis of multi-track images captured by the laser footprint camera, when the laser works continuously, the spot center shifts in the positive X direction with the increase in working time and presents linear characteristics that are affected by fluctuation of laser output energy. In contrast, it is stable in the Y direction. Piecewise linear fitting and data interpolation can be used to obtain the spot center position under strong background noise and thus to greatly improve the utilization efficiency of laser data. The variation law of laser pointing not only serves as a reference for later calibration and calculation of systematic errors in laser pointing but also provides a new idea for the analysis and processing of laser altimeter data in the future.

收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-05-31; 录用日期: 2021-06-17

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: *ls@whu.edu.cn

Key words remote sensing; GaoFen-7 satellite; laser altimeter; laser pointing; laser footprint camera; strong background noise; spot center

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获取地表脚点位置的高精度距离信息,结合卫星姿态、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。2003 年美国航空航天局(NASA)发射了世界上首颗以对地观测激光测高仪为主载荷的冰、云和陆地高程(ICESat)卫星^[1],2019 年美国又发射了全球生态系统动力学研究(GEDI)对地观测激光测高仪^[2],在冰盖检测、树高反演等领域取得了丰硕的成果。与美国 ICESat 和 GEDI 卫星配置不同,我国的高分七号(GF-7)卫星^[3]和资源三号 03 星(ZY3-03)星均采用了激光载荷和双线阵立体相机复合的模式^[4],将激光数据当作双线阵相机生成的立体影像的高程控制点来使用。将激光测高仪观测成果提供的地面高程控制点与前后视相机生成的数字高程模型(DEM)联合解算,即可实现无控的大比例尺测图。

以 GF-7 号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,足印相机既监视激光脉冲光束指向,也直接对地成像,通过与前后视相机的图像匹配,确定激光足印在前后视图像坐标系中的位置^[5]。可见,足印相机是实现激光与光学相机数据融合的关键。光斑在图像上的位置本质上表明的是激光的指向,如果光斑位置变化较大,激光的指向就需要重新计算,否则激光测距值会产生偏差^[6]。

双线阵立体相机一般工作在白天,这时光照强烈、地物特征明显,双线阵相机图像质量好^[7]。相应地,在激光载荷和双线阵立体相机以复合测绘模式工作下,激光载荷也需要在白天工作。受到背景地物信息的影响,足印相机中光斑图像质量较差,光斑往往存在边界不清、能量明显偏离类高斯分布的情况。无论是基于光斑几何分布,还是基于能量分布的中心定位算法都无法得到好的定位结果。在极端情况下,光斑还存在无法定位的问题^[8]。基于 GF-7 号卫星多轨实测数据,在强噪声背景情况下,激光光斑在足印相机内中心定位误差一般超过 0.5 pixel,相当于 0.6"的激光指向误差。

在一景线阵相机图像中,激光光斑数为 18 个,

但是受到云层遮挡等因素的影响,一般有回波的光斑数在 10~14 个之间。若足印相机光斑图像与地物图像重叠,光斑图像模糊不清,光斑中心定位不准,从而导致指向偏差较大^[9],足印相机内质量较好的光斑数仅占有回波光斑数的 1/4 左右,即每景双线阵相机图像中优质光斑个数只有 3~5 个,数量不足以覆盖图像的目标区域。本文针对足印相机的光斑位置变化规律,确定了高背景噪声条件下的光斑中心位置,以提升一景图像中激光光斑的数据利用率,并结合星上其他传感器参数,分析激光指向变化规律以及突变因素,为后续激光数据精细化处理,提供了依据和指导。

2 同步模式足印图像特点

高分七号激光器大部分激光能量透过取光组件后,经过二级扩束系统准直后在地面形成足印,剩余部分能量经过接收望远镜到达足印相机和光轴监视相机焦面。足印相机可同时对地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。GF-7 号卫星利用足印相机实时记录每发脉冲的能量分布,以确定光束在足印相机坐标系下的准确指向;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 卫星足印相机通常工作在同步曝光模式下,即足印相机同时对光斑和地面进行成像^[10],同步曝光模式下足印相机获得的图像如图 1 所示。

图 1 中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,在后续计算激光光斑在前后视相机中的位置时,需要做一个修正^[11]。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^[12]。图 1(a)中的光斑落在裸露山地,光斑边缘部分与地物特征在图像中灰度值近似,光斑样式不清晰,光斑尺寸看起来偏小。图 1(b)中的光斑与林地重叠,整体背景灰度值较低,光斑尺寸较左图偏大,说明强噪声背景地物的特征会影响到图像上光斑尺寸与能量分布,以及光斑中心的定位精度^[12]。

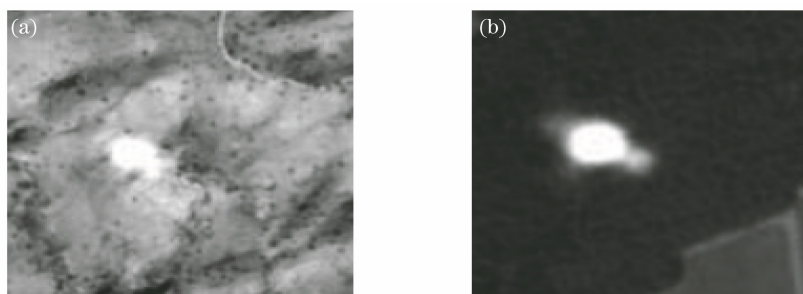


图 1 同步模式足印相机图像。(a)裸露山地中光斑图像;(b)林地中光斑图像

Fig. 1 LFC synchronous mode image. (a) Light spot image in bare mountain area; (b) light spot image in forest area

GF-7 号激光器重复频率为 3 Hz,受到温度等外部因素影响,激光光束的指向会有微小的变化。黄庚华等^[10]表示激光载荷地面实验时,基于激光光轴监视相机的光斑质心解算结果,光束指向的最大跳动值不超过 0.3 pixel,同时在激光器连续工作的 5 min 时间内,激光质心逐渐向一个方向缓慢地变化。下面根据激光器连续工作时,足印相机坐标系下多轨光斑中心位置的数据,进一步分析激光载荷在轨工作时的指向变化规律。

3 高分七号光斑质量分级

足印相机同步曝光模式下光斑质量除了受到激光光斑本身状态的影响之外,还与地物反射特征息息相关。为了判别光斑图像本身的质量,可以从地物特征、发射激光能量、光斑能量分布三个维度来评

价,从而确定中心定位的置信度。

(1) 地物特征

同步曝光模式下,光斑与地物同时成像于足印相机,地物的信息会叠加在光斑上,使得光斑的能量分布和轮廓产生变化。足印相机像面上的光斑尺寸一般在 100~200 pixel 之间,可以选取光斑附近 32 pixel×32 pixel 区域作为感兴趣区域(ROI)。根据对多轨数据的统计,白天足印相机上的光斑灰度值一般在 6000 pixel 以上,地物背景灰度值在 5500 pixel 以下。除去灰度值大于 6000 pixel,当 ROI 区域像素平均灰度值在 4500 pixel 以下时,地物特征对光斑能量分布影响较小;灰度值越大对光斑定位精度影响越大。在足印相机图像中存在四种典型背景地物,分别为森林植被、裸露山地、农田(城市)、云层,四种典型地物的反射率、灰度特征如表 1 所示。

表 1 四种典型区域足印相机图像特征

Table 1 Features of four typical area LFC images

Feature	Reflectivity	Grayscale /pixel	Definition	Confidence
Forest	Low	<3500	Clear	High
Farm/urban	Medium	3500~4500	Relatively Clear	Medium
Bare mountain	High	4500~7000	Vague	Low
Cloud	Extremely high	>7000	Indistinguishable	None

一般将森林植被区域认为是低噪声环境,农田(城市)区域认为是中噪声环境,裸露山地和云层区

域为高噪声环境,不同噪声环境下典型光斑 ROI 区域图像灰度直方图如图 2 所示。

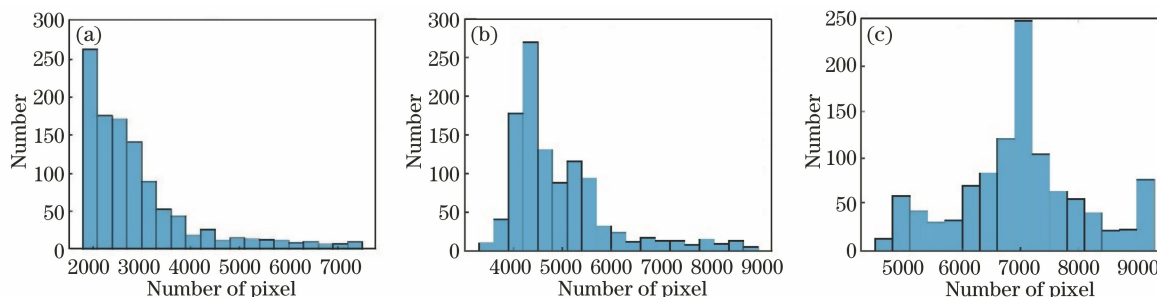


图 2 不同噪声条件下光斑 ROI 区域灰度直方图。(a)低噪声;(b)中噪声;(c)高噪声

Fig. 2 Grayscale histogram of spot ROI region under different noise conditions. (a) Low noise; (b) medium noise; (c) high noise

图 2 显示:中低噪声条件下,地物噪声与光斑的灰度值相差较大,光斑的灰度直方分布基本不变,说明光斑样式稳定,高斯特性一定程度上得到了保留。这时地表与光斑区分度高,易实现对光斑中心的准确定位。在高噪声情况下地物背景与光斑灰度值相当,两者叠加后甚至超出了足印相机的灰度阈值,导致图像饱和。此时光斑图像基本偏离高斯,光斑中心定位精度较差。即使此时激光脉冲光束质量较好,但是在足印相机中光斑图像过于模糊中心位置定位不准,后续与双线阵相机图像融合质量较差。

(2) 发射激光能量

星上系统对激光的发射脉冲能量进行实时记录,可以根据发射脉冲能量变化,来评价激光器在附近一段时间内的稳定性,从而判别该脉冲是否处于

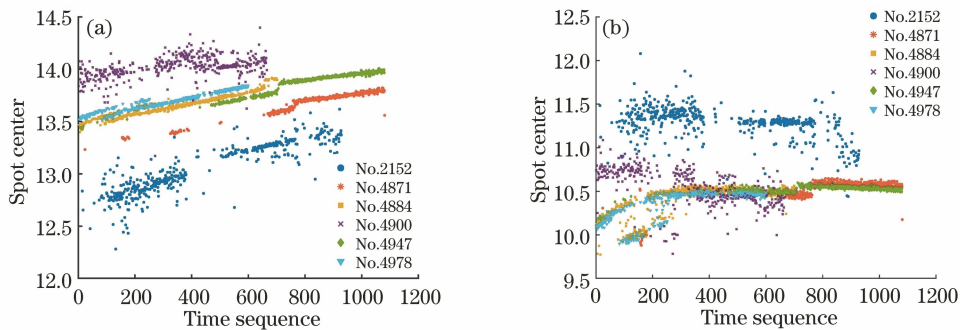


图 3 六轨优质光斑中心在 X 和 Y 向的分布图

Fig. 3 X-direction and Y-direction statistical image of the six-track quality spot center

图 3 的横轴为时间序列,激光器重复频率为 3 Hz,每一个时间序列计数值对应 1/3 s,纵轴为光斑中心在 ROI 区域的像素位置。由图 3 可知光斑中心在 X 方向随激光器开机时间的延续有明显的偏移,整体过程呈一定线性;而在 Y 方向上前 210 个序列(70 s)缓慢增加,70 s 后进入稳定状态,光斑中心点的 Y 向的坐标几乎不变。

可以明显地看出,轨道中大部分光斑中心位置随时间具有缓变特征。线性特征明显的轨道如 4884、4978 号,激光器均在夜间工作,足印图像中背景地物干扰小;其他光斑中心弥散程度较大的轨道,激光器均为白天工作,足印图像中地物背景噪声相对较大,这充分说明足印相机中背景噪声的强弱是决定光斑中心定位精度的主要因素。不同轨道间的光斑中心位置变化规律有一定相似性,但是整体上存在一个固定的偏差。此外还可以看出在 4884 号、4947 和 4978 号轨道中,光斑中心位置点变化具有

激光器稳定工作状态。

(3) 光斑能量分布特征

在光斑呈椭圆高斯分布时,可以获取光斑的长短轴之比、长轴像素数、光斑总像素数、光斑倾角和定位方法的均方根误差。将长短轴之比小于 1.5、长轴像素数在 10~18 pixel 之间、光斑倾角小于 30°,均方根误差由于 10^{-5} 的光斑图像称为优质光斑图像。

4 足印相机下光斑中心规律

4.1 光斑中心整体特点

选取 GF-7 号卫星 2020 年 3 月、6 月、9 月共 6 轨 1 号激光器在足印相机光斑图像,并确定每发脉冲的光斑中心位置,光斑中心在 X、Y 方向随时间的变化如图 3 所示。

明显的间断特征。

4.2 强背景噪声下光斑中心定位方法

4.1 节描述的激光光斑中心位置具有一定的线性变化特征,对于高背景噪声的光斑,可以根据前后序列的光斑位置进行插值求解其中心位置。以 2107 号轨道为例,在强背景噪声条件下,对光斑中心进行定位,图 4 为所有光斑中心位置与优质光斑中心位置在 X 方向的位置对比图。

由图 4(a)中可以明显看出,2107 号轨道有回波的光斑中心位置在 X 轴方向随时间的增加而增加,具有明显的线性特征。光斑中心位置在 X 方向上跨度很大,最小接近于 11.2 pixel 位置,最大超过了 13.5 pixel,抖动范围明显超过了 0.3 pixel 的正常抖动范围。选取三幅典型位置的足印相机图像,分别为偏离较小的 339 号图像、偏离较大的 610 号图像和无偏离的 621 号图像进行详细分析,所选数据在图中以红圈标注。足印相机实测图像如图 5 所示。

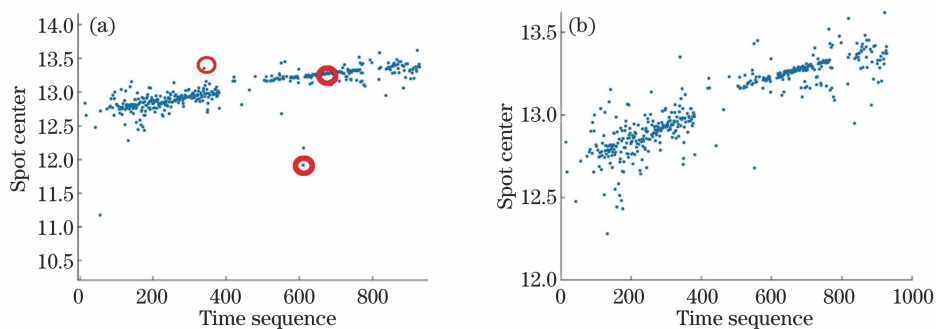


图 4 2107 号轨道光斑中心 X 方向对比图。(a)所有光斑;(b)优质光斑
Fig. 4 X-direction contrast of orbit 2107 spot center. (a) All spot X position on orbit 2107;
(b) all quality spot X position on orbit 2107

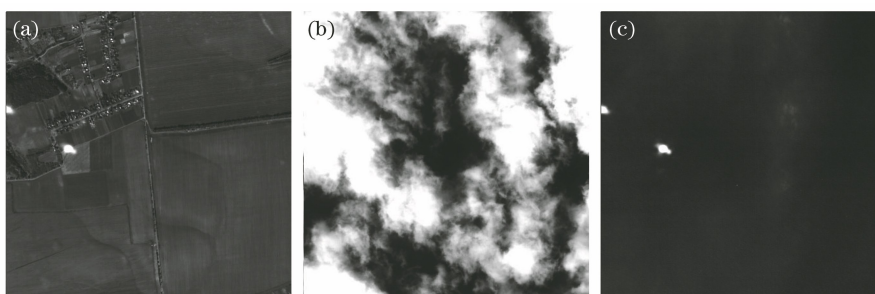


图 5 典型足印相机图像样式。(a) 339 号图像;(b) 610 号图像;(c) 621 号图像
Fig. 5 Typical LFC image. (a) Image 339; (b) image 610; (c) image 621

339 号光斑图像与高反射率的农田相重叠,按照文中提出的噪声分类方式属于中等噪声情况,光斑样式清楚但光斑中心定位有一定的误差。2107 号轨道激光器在白天工作,即使在普通的农田、城市背景下,光斑中心位置依然偏离直线。610 号光斑图像与云层重叠,难以分辨光斑的样式,仅从单幅图像入手,其中心定位精度很差,中心定位结果几乎不可信。621 号光斑背景灰度值低,噪声较低,中心定位精度较高,置信度较高。激光器在稳定工作状态下,短时间内光斑中心变化不会很大。尤其是 610 号与 621 号光斑,仅仅相隔 4 s,在图像坐标系中光斑中心产生剧烈的变化,说明根据单一光斑图像的光斑中心提取方法有很多的不足,需要根据前后序列的质量较好光斑的中心位置估算质量较差光斑的中心位置。610 号光斑图像上虽然与云层重叠,实际光斑从图像中间无云处到达了地面,接收系统并接收到了回波。该光斑可以用于后续双线阵立体相机图像高程控制点,其足印相机图像不应被舍弃。

针对光斑的缓变过程,采用一种直线拟合方法来描述光斑在足印相机中 X 方向上的位置,以实现对背景噪声较大的光斑中心位置的确定。针对光斑中心变化特征,可以采用随机抽样一致(RANSAC)方法来实现直线的拟合。操作流程如下所示:

- 1) 随机选择数据集中两个点;
- 2) 通过这两个点,计算出这两个点所表示的模型方程 $y=ax+b$;
- 3) 计算所有数据点到该直线模型的距离;
- 4) 找到所有满足距离阈值 0.05 pixel 的点,并记录点数 N ;
- 5) 然后再重复步骤 1)~4),直到达到 500 次迭代后,以 N 最大的拟合直线模型作为该轨道的中心位置计算模型。

根据上述流程得到直线拟合图如图 6 所示。

对于 2107 号轨道而言,其光斑中心在 X 方向

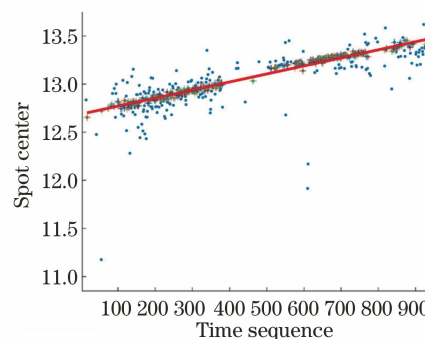


图 6 2107 号轨道光斑中心 X 方向拟合直线
Fig. 6 Fitting line in the X direction of orbit 2107 spot center

上可以认为是一条随着时间的增加向 X 正方向偏移的直线,拟合直线公式为

$$X = 8.3545 \times 10^{-4} T + 12.687, \quad (1)$$

式中, X 为光斑中心在 X 方向上的像素坐标, T 为该光斑的时间序列值。根据上述拟合公式可以得到修正后的 339 号、610 号和 621 号光斑中心位置的 X 坐标如表 2 所示。

表 2 典型光斑 X 方向位置修正对比表

Table 2 Comparison table of typical spot X direction position correction

Sequence	Before correction / pixel	After correction / pixel	Deviation / pixel
339	13.3501	12.9702	-0.3799
610	11.9250	13.1966	1.2716
621	13.2252	13.2058	-0.0194

通过上述方法,利用光斑中心的时变规律,以同一轨道中背景地物噪声低的光斑为基础,修正质量较差的光斑中心位置,同时对不能定位的光斑进行定位,使得由足印相机得到光斑位置中心更为准确,并且对于高反射率地表或云层重叠的足印相机图像修正效果较好,这说明足印相机内的光斑中心定位,不能只从单幅足印图像入手,而是要与同一轨道内优质图像结合,从而实现足印相机图像坐标系内光斑中心的定位。同理,Y 方向上处理与 X 方向上类似,可以得到 Y 方向上光斑中心位置随时间变化较小。

在高分七号的系统设计中,额外增加光轴监视相机用于监视激光器出光质量和指向变化。光轴监视相机具有曝光时间短的特点,其图像中只包含光斑图像,无地物特征图像,噪声较低,光斑质量很高。但是由于其缺少地物信息,无法与双线阵相机图像进行特征点匹配,故在光轴监视相机主要用于观察激光光斑的质量,无法根据其指向变化确定光斑在地面的位置。为了验证直线拟合方法的正确性,本文利用星上光轴监视相机中光斑中心位置的结果与足印相机中光斑中心位置的结果进行对比。2107 号轨道光轴监视相机光斑中心 X 方向上位置如图 7 所示。

图 7 中可以看出 2107 号轨道光斑中心在 X 方向上具有间断性,时间序列 400 号前后两段点云直线斜率有微小的差异,整体采用直线拟合的方式精度稍差。在光轴监视相机中,两段直线的斜率分别为 8.63×10^{-4} 和 6.08×10^{-4} 。忽略间断性特点,

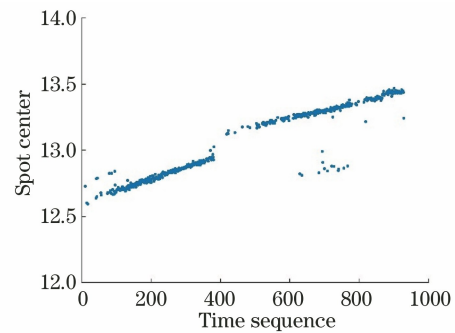


图 7 2107 号轨道光轴监视相机光斑中心 X 方向位置
Fig. 7 X-direction contrast of orbit 2107 in optical axis surveillance camera

整体斜率为 9.54×10^{-4} 略大于(1)式中的 8.35×10^{-4} 。由于光轴监视相机图像与足印相机图像虽均为 $550 \text{ pixel} \times 550 \text{ pixel}$ 分辨率,但光斑位置不完全一致,无法用(1)式中拟合得到光斑中心位置与图 7 光斑中心位置进行比对。不过仍然可以看出,针对足印相机图像光斑图像,采用线性拟合的方式,可以修正强背景噪声情况下光斑中心位置问题,从而得到每一发激光光斑在图像坐标系下的准确位置。采用上述直线拟合的方式,不考虑光斑中心的间断性特征,分析图 3 中 6 轨光斑中心 X 方向上变化规律如表 3 所示。

表 3 六轨光斑中心 X 方向变化规律

Table 3 X-direction change rule of the spot center in the six-track

Orbit	Fitted slope / 10^{-4}	Duty / s	Range / pixel	X	Time
2107	8.35	310	0.537	12.6	Daytime
4871	5.35	360	0.328	13.3	Night
4884	5.45	234	0.429	13.5	Night
4900	1.97	221	0.152	14.0	Daytime
4947	5.25	360	0.528	13.5	Night
4978	7.65	259	0.338	13.5	Daytime

由表 3 可知,高分七号激光器指向变化规律在不同轨道存在一定的差异。激光器在夜晚工作时,激光指向变化规律较为一致,拟合得到的直线斜率相大致相同,斜率在 5.35×10^{-4} 。夜晚光斑中心初值位置大体相近, X 方向在 13.5 左右, Y 方向在 10.2 左右。白天光斑中心初值位置偏差较大,不同轨道间的光斑位置偏差最大可达 1.5 pixel,对应着 $1.8''$ 的指向偏差,这说明在夜晚条件下,激光器的指向比较稳定,除了指向初值略不同之外,指向变化规律比较一致。而在白天工作时,不同轨道拟合得到的直线的斜率差异很大,说明激光器随时间的指向

漂移特性不一致。高分七号卫星正常在白天工作时,不同轨道间激光指向变化特征相关性较低,激光指向判断应以其同轨数据为基础,不同轨道的数据意义有限。

4.3 光斑中心位置突变原因

在光轴监视相机中,2107 号轨道光斑在 X 轴方向上成两段式分布。前半段看起来似乎斜率更大,后半段斜率更小。高分七号卫星在白天工作时,在足印相机中光斑中心位置比较弥散,光斑中心突变特征不明显。为了更好地分析光斑中心位置的突变原因,分析图 8 中 4871 和 4947 号两轨夜间光斑中心位置变化规律。在 X 方向上,两轨光斑中心位置变化趋势相似,甚至有同时的一段上扬的弧线,光斑中心在 X 方向上的位置如图 8 和图 9 所示。

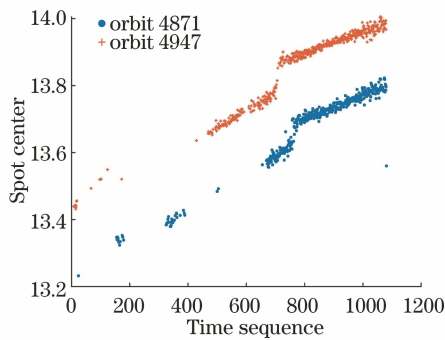


图 8 4871 号和 4947 号轨道光斑中心 X 方向位置
Fig. 8 X-direction spot center of orbit 4871 and 4947

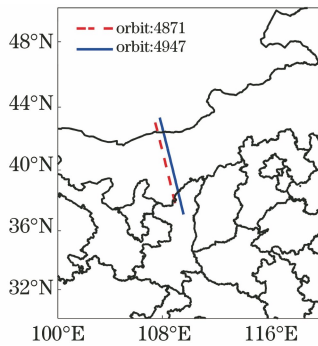


图 9 4871 号和 4947 号轨道过境区域
Fig. 9 Transit areas of orbit 4871 and orbit 4947

由图 8 可以看出,两轨光斑中心位置 X 方向上变化规律相似度很高。两轨光斑均在北京时间 23 点过境我国内蒙古自治区和陕西省,激光器夜晚工作光斑样式清晰,背景干扰小。两轨激光连续工作时间均为 360 s,可以明显看出其光斑中心在 X 方向上与时间序列成线性相关,光斑中心每 1 min 在 X 方向上偏移 0.1 pixel。按照激光器一次工作开机 5 min 计算,星上实测激光指向变化在 0.5 pixel 左右,略大于发射前地面测量值 0.3 pixel。同时位置

变化规律具有明显的分段特性,每一段内光斑中心抖动较小。在 730~790 时间序列之间,光斑中心位置在 X 方向上存在一个明显的跳变,跳变过程持续约 20 s。

以 4871 号轨道为例讨论分段和跳变原因:在足印相机的设计中,无论是否有激光回波,足印相机都会记录下每一发射激光脉冲,将无回波响应的激光脉冲也一并计算其在 X 方向上的中心位置,如图 10 所示。

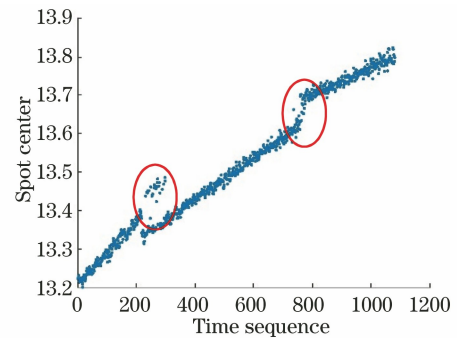


图 10 4871 号轨道所有光斑中心 X 方向位置
Fig. 10 All spot centers on orbit 4871 in X direction

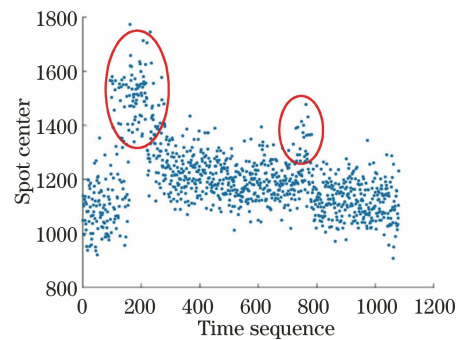


图 11 4871 号轨道发射激光能量变化
Fig. 11 Emits laser energy changes of orbit 4871

图 10 可以明显看出,4871 号轨道的光斑中心位置明显被分为三段,每一段点云线性规律明显,斜率依次下降,出现了明显的分段特征,在 220 序列处和 800 序列上出现了突变区域。分析图 11 所示的 4871 号轨道激光发射能量变化,可以发现激光器发射脉冲相对能量主要分布在 1000~1350 之间。与图 10 光斑中心位置分段特性相似,相对能量散点图成三段式分布,出线两个相对尖峰(如红圈表示),尖峰范围与 X 方向上突变范围和时间相一致。说明激光指向 X 方向上位置的突变主要是由发射能量的变化导致,指向变化在 0.1 pixel 左右。当发射脉冲相对能量不稳定时,光斑中心在 X 方向上会产生明显的偏移,待能量稳定后,光斑位置逐渐稳定。其他轨道也有类似的发现,这说明激光器发射能量的

变化会导致光斑中心位置的偏移。为了准确修正光斑中心的位置,需要对该轨道的光斑能量进行分析,被修正的光斑处于激光器能量稳定状态,则可以修正。由于激光器能量发生突变导致的激光指向变化,无规律可循,故不稳定时间内的光斑中心位置只能根据前后稳定状态时的中心位置进行估计,无法拟合得到经验关系公式。

5 激光指向变化对标定的影响

GF-7 号卫星采用地面探测器的方式对激光指向进行标定工作,过去一般认为激光指向的系统误差为非时变系统误差,可以在很长一段时间内当作定值处理。实际上,在足印相机中光斑中心位置随时间有一个明显地缓变特征,在 5 min 的工作时长中,中心位置变化可以超过 0.5 pixel。根据星上足印相机与星敏固连关系,在高分七号卫星正常工作时,足印相机相对于卫星本体坐标系未发生偏移,因此可以将激光指向在足印相机中的抖动认为是激光指向在卫星本体坐标系中发生了变化。激光指向规律表明激光测高仪在正常工作中,激光光轴会随着时间产生规律性的变化。在后续搭载类似激光载荷的卫星中,宜增加类似的光轴监视相机和足印相机,用于监测星上激光指向的规律。

在同一轨中激光指向会随着时间产生规律性变化。在实际工作中,光斑位置需要利用整轨光斑的变化规律差值得到,而非简单地对单幅光斑图像进行光斑中心定位。此外,激光器每一次开会会产生 0.2~1.5 pixel 的随机抖动,相当于 1"~3"的激光随机指向抖动。这一现象说明每一轨激光指向,需要与标定轨道的激光指向做一定的修正才能使用,而不同轨道的激光指向问题,则需要通过拟合光斑中心直线的方式,以直线的差异来表征不同轨道间激光指向的差异。

作为星上监视激光指向的设备,足印相机可以通过光斑中心在图像坐标系下的变化特征,来计算激光指向的变化,激光指向误差包含随机误差和系统误差两大类。根据前述光斑中心变化特征,激光指向随机误差主要来源于三个方面:一是激光器稳定状态下正常激光指向微小抖动;二是激光器能量突变导致的激光指向随机抖动;三是激光器每次开关机激光指向的随机抖动。在足印相机的图像坐标系下,三者分别在 0.02 pixel 量级、0.1 pixel 量级和 1 pixel 量级,随机误差部分只能通过更准确的单发脉冲指向测量来消除。激光指向的系统误差则是与

时间呈线性相关,每一发激光脉冲指向系统误差,可以通过线性拟合的方式进行求解。对于 GF-7 号星载激光测高仪而言,激光指向的系统误差除了一个常数项误差外还叠加了一个线性时变项。白天时不同轨道间线性时变项的斜率不同,其斜率特征还有待于进一步研究。本文适用于目前所发现的激光指向变化规律,新的激光指向修正和标定方法将另文叙述。

6 结 论

激光光斑在作为星上用于监视激光指向设备的足印相机中的中心定位问题,不能简单地看成单幅图像光斑中心定位问题来处理。激光光斑受到地物噪声的影响,光斑中心定位问题应该当作长时间的光斑中心定位问题来处理。基于足印相机工作模式、地物噪声信息和光斑中心缓变特征,在足印相机图像坐标系下,以低背景噪声光斑中心位置为基础,对高噪声背景光斑采用直线拟合的方式来确定光斑中心,该方式可以大大地提高光斑的利用率,将高噪声环境下的光斑中心修正到合理位置。根据 GF-7 号实测数据,激光器的能量不稳定和开关机会导致光斑中心的一个随机偏移,使得激光指向产生不确定性。鉴于激光器出光的不稳定性,应该采用分段的方式来直线拟合,从而提升光斑中心定位精度,而开关机导致光斑中心随机偏移,则表明每一轨、每一个光斑指向均需要和标定光斑及其标定轨道的指向进行对比修正,才能得到当前激光的正确指向,从而实现激光指向的修正。

从 GF-7 号足印相机图像光斑中心位置的变化规律可以看出,激光器在夜间工作,其激光指向变化规律比较一致;而在正常业务化运行的白天,不同轨道指向变化规律差异较大。通过足印相机对激光指向的监视,可以有效地分离激光指向主要几类误差项的可能来源及其量级大小。激光指向的随机误差可能由激光微小抖动、激光器出光能量突变和激光器开关机导致,其中出光能量突变和激光器的开关机对激光指向影响最大,在图像坐标系下分别造成 0.1 pixel 量级和 1 pixel 量级的随机漂移,而激光指向的系统误差除了固定偏差项外,还存在随时间缓变的项。

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] Li G, Tang X, Yuan X, et al. Vertical accuracy assessment of zy-3 digital surface model using icesat/glas laser altimeter data [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-1/W1: 23-28.
- [4] 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.
- [5] Cao H Y, Dai J, Xu C, et al. ZY-3 series satellites and their applications [J]. Satellite Application, 2020 (10): 11-13.
曹海翊, 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] 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.
曹海翊, 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.
- [12] 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.