

激光与光电子学进展

超分辨率重建在卫星平台颤振探测中的可行性

朱红¹, 谢俊峰^{2*}, 吴向前³, 孙广通¹, 刘小阳¹

¹防灾科技学院生态环境学院, 河北 廊坊 065201;

²自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

³中国人民解放军联勤保障部队作战数据室, 湖北 武汉 430010

摘要 质心定位精度不仅是影响星载激光测高仪姿态精度的关键因素之一,也是探测卫星平台颤振的一种新型技术手段。针对地球科学激光测高系统(GLAS)卫星平台激光光斑数据存在噪声信息、空间分辨率较低、最大能量值不唯一等影响质心定位精度的问题,研究了星载激光光斑空间分辨率提高在卫星平台颤振探测中的可行性。首先,提出一种非光斑下的暗通道模板去噪方法,对长时序激光光斑进行去噪处理;其次,协同反卷积与超分辨率重建方法在改善激光光斑的“拖尾”现象的同时提高其空间分辨率;最后,提出一种质心跟踪的灰度加权亚像素质心方法,对长时序激光光斑进行跟踪定位,以实现卫星平台颤振的初步探测。实验结果表明,本文质心定位方法的残差拟合精度相较于灰度加权法平均约提高0.08 pixel、相较于高斯曲面拟合法平均约提高0.08 pixel、相较于椭圆拟合法平均约提高0.1 pixel,并初步探测到GLAS卫星平台存在周期约为94 min的姿态变化规律。

关键词 测量; 超分辨率重建; 颤振探测; 质心定位; 激光光斑

中图分类号 237

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0314004

Feasibility of Super-Resolution Reconstruction in Satellite Platform Jitter Detection

Zhu Hong¹, Xie Junfeng^{2*}, Wu Xiangqian³, Sun Guangtong¹, Liu Xiaoyang¹

¹College of Ecology and Environment, Institute of Disaster Prevention, Langfang, Hebei 065201, China;

²Land Satellite Remote Sensing Application Center, MNR, Beijing 100048, China;

³Combat Data Laboratory, Joint Logistic Support Force of PLA, Wuhan, Hubei 430010, China

Abstract The centroid positioning accuracy is not only one of the key factors that affect the attitude accuracy of the spaceborne laser altimeter, but also a new type of technical means for satellite platform jitter detection. Aiming at the problems that the laser spot data of geo-science laser altimeter system (GLAS) satellite platform has noise, low spatial resolution, multiple maximum energy values, etc., which affect the centroid positioning accuracy, the feasibility of improving the spatial resolution of spaceborne laser spots in satellite platform jitter detection is mainly studied in this paper. First, a non-spot dark channel template denoising method is proposed to denoise long-sequence laser spots. Second, the collaborative deconvolution and super-resolution reconstruction methods are used to improve the “tailing” phenomenon of laser spots while increasing its spatial resolution. Finally, a gray-weighted sub-

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-06-22; 录用日期: 2020-07-01

基金项目: 廊坊市科学技术研究与发展计划自筹经费项目(2019011053)、中央高校基本科研业务项目(2019011053)、河北省自然科学基金(D2020512001)、河北省教育厅高等学校科学研究计划项目(Z2020119)、“十三五”民用航天技术预先研究项目(D040106)、国家自然科学基金(41571440, 41771360)、国家青年科学基金(41301525)、国家测绘地理信息局青年学术带头人基金(201607)、高分专项(民用部分)科研项目(42-Y20A11-9001-17/18)

*E-mail: junfeng_xie@163.com

pixel centroid method for centroid tracking is proposed to track and locate the long-time laser spot to achieve the preliminary detection of the satellite platform flutter. Experimental results show that the proposed residual fitting accuracy of centroid positioning method is about 0.08 pixel higher than gray-weighted method, 0.08 pixel higher than Gaussian surface fitting method, and 0.1 pixel higher than ellipse fitting method. It is preliminarily detected that there is a 94 min attitude change rule of glas satellite platform.

Key words measurement; super-resolution reconstruction; jitter detection; centroid positioning; laser spot

OCIS codes 120.6085; 120.4640; 280.4688

1 引言

星载激光光斑质心定位是卫星激光测高数据处理的关键所在,对于精确地获取激光指向角具有重要的意义^[1-2]。随着光学载荷空间分辨率的不断提高,激光指向角的精度将直接影响几何定位的精度,决定着遥感测绘卫星平台的无地面控制定位能力^[3-4]。然而,硬件条件的限制导致激光光斑的直径一般为4~8 pixel,使得直接通过质心定位方法获取更高精度定位结果遇到了瓶颈。因此,如何获得高精度亚像元的定位精度是目前研究的重点与难点问题。对于轨道高度为500 km,空间分辨率为1 m的光学遥感卫星,若平台的指向精度存在0.36"的偏差,则将引起平面几何约为0.87 pixel的误差;但在同样成像条件下,对于空间分辨率为0.5 m的光学遥感卫星,将引起平面几何约为1.74 pixel的误差,当分辨率提高到0.1 m时,引起的几何误差将达到8.7 pixel左右。由此可见,只有保证激光光斑的定位精度,才能实现卫星平台颤振规律的精确探测,进而提升卫星的无控制测图能力。

目前,卫星平台颤振规律的探测方法主要分为基于姿态传感器的直接探测法与基于非姿态传感器的间接探测法^[5-8]。基于姿态传感器的直接探测法主要是直接利用姿态角度或者角速度测量输出来进行探测,这类探测法包括利用星敏感器、陀螺仪、角位移传感器(ADS)等测姿载荷进行探测^[9-14]。基于非姿态传感器的间接探测法主要是借助于平台上其他载荷数据,如利用对地相机、恒星相机、激光测高仪等输出数据来开展平台颤振探测^[15-16]。其中,基于激光测高仪的颤振探测属于一种新型的卫星平台颤振探测手段,主要包括基于激光足印坐标的颤振探测与基于激光图像质心轨迹的颤振探测方法。前者是通过分析激光测高仪获取高程与地面实际高程差值的规律性,进而探测卫星平台的颤振^[17-18],后者是通过激光图像质心与质心间的拟合轨迹间接探测卫星平台颤振现象。其中,质心定位方法主要包括灰度

加权^[19]、高斯曲面拟合^[20]、椭圆拟合^[21]等。灰度加权方法主要考虑像素值与权重的关系,进而对激光光斑进行定位,计算较为简单。高斯曲面拟合法是通过高斯函数模拟成像过程的点扩展函数,从而对激光光斑进行定位,稳定性较好,但计算相对复杂。椭圆拟合法是将激光光斑视为椭圆,在形态学提取边缘点的基础上进行最小二乘拟合,从而对光斑质心进行定位,该方法的稳定性欠佳。上述质心定位方法都是基于激光光斑固有成像的空间分辨率,现有质心定位方法也很难再提高其定位精度。

因此,本文在对激光图像去噪的基础上,利用反卷积改善激光光斑存在的“拖尾”现象,引入超分辨率重建方法提高激光光斑图像空间分辨率,协同反卷积与超分辨率重建来解决激光光斑定位精度难以进一步提升的问题,并通过质心跟踪的灰度加权方法对长时序激光光斑图像进行跟踪定位,进而实现卫星平台的颤振探测。

2 原理

针对GLAS激光光斑含有噪声且空间分辨率较低等问题,本文提出了基于暗通道模板的激光光斑去噪方法,结合反卷积来改善激光光斑的“拖尾”现象,并引入超分辨率重建方法提升激光光斑固有的空间分辨率,在此基础上,提出一种质心跟踪的灰度加权亚像素定位方法,对长时序激光光斑图像进行跟踪定位,解决激光光斑图像中最大能量值不唯一并影响其质心定位精度的问题,从而实现对GLAS卫星平台颤振规律的初步探测。

2.1 基于暗通道噪声模板的激光光斑去噪

GLAS激光光斑图像属于非标准的高斯分布,而且光斑数据中存在一定的噪声信息。为了去除噪声信息对质心定位精度的影响,提出了一种非光斑下的暗通道模板去噪方法。在长序列激光光斑数据中,噪声信息发生着微弱的变化,可将其视为系统性背景噪声,同时系统背景噪声的能量值都远远小于光斑的能量值。因此,统计连续多个激光光

斑图像的系统背景噪声信息作为噪声模板,并对长时序激光光斑图像进行去噪处理。对于任意序列的激光光斑 J ,其暗通道噪声模板的数学描述为

$$I^{\text{noise}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{J^1, J^2, \dots, J^n\}} J^c(y) \right], \quad (1)$$

式中: I^{noise} 表示提取的噪声信息; J^c 表示激光图像序列; $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个窗口; y 为激光

图像的像素值。

通过公式计算暗通道噪声模板,得到暗通道噪声模板信息,如图 1 所示。将原始激光光斑图像与暗通道噪声模板进行差分,使得噪声信息与目标光斑分离,从而获取激光光斑。

$$I_{\text{denoising}}^c = J^c - I^{\text{noise}}, \quad c = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中: $I_{\text{denoising}}^c$ 表示星载激光图像的去噪结果。

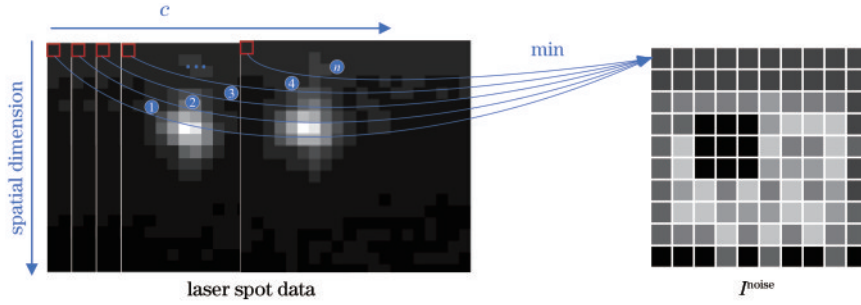


图 1 暗通道噪声模板示意图

Fig. 1 Dark channel noise template diagram

2.2 结合反卷积的激光光斑超分辨率重建

鉴于激光光斑存在一定的“拖尾”现象,同时为了提高激光光斑固有空间分辨率,协同反卷积与最大后验概率方法对激光光斑图像进行超分辨率重建。假设 I_L 为原始激光图像,需要在已知激光图像信息的条件下,估算出最优的高分辨率光斑能量分布 I_H 。依据贝叶斯理论,最大后验概率的数学表达式为

$$I_H = \arg \max_{I_H} P(I_H/I_L) = \arg \max_{I_H} \frac{P(I_L/I_H)P(I_H)}{P(I_L)}, \quad (3)$$

式中: $P(I_H)$ 与 $P(I_L)$ 分别代表高分辨率激光光斑图像 I_H 与低分辨率激光光斑图像 I_L 的先验概率; $P(I_L/I_H)$ 代表当高分辨率激光光斑图像为 I_H 时,对应的低分辨率激光光斑图像 I_L 的条件概率。由于 I_L 是已知的, $P(I_L)$ 可以被视为常数,对于求解高分辨率激光光斑图像 I_H 无关,可以被忽略,其数学描述为

$$I_H = \arg \max_{I_H} P(I_L/I_H)P(I_H). \quad (4)$$

由于激光图像中光斑存在一定的“拖尾”现象,本文通过激光光斑估计点扩展函数,通过点扩展函数对原始光斑图像进行反卷积处理,假设 I_L 为激光光斑数据, f 为反卷积核,在已知激光光斑图像反卷积处理的前提下,再对上式取对数得到

$$I_H = \arg \max_{I_H} [\log P(I_L \times f/I_H) + \log P(I_H)]. \quad (5)$$

在基于最大后验概率估计的超分辨率重建中,先验概率模型 $P(I_H)$ 采用高斯分布函数,条件概率

$P(I_L \times f/I_H)$ 转化为待求高分辨率激光光斑图像与低分辨率激光光斑图像相同来求解。

2.3 基于质心跟踪的灰度加权亚像素定位方法

传统灰度加权是将每个激光光斑作为基元分别提取其质心坐标。不仅容易受到背景噪声的干扰,而且应用于长时序的激光光斑质心定位中,因其最大能量值不唯一,导致激光光斑质心定位精度较低。因此,本文通过质心跟踪约束长时序激光光斑图像的质心坐标初始位置,确保质心定位的精确性,如图 2 所示。

本文将超分辨率重建后的激光光斑质心坐标分为像素级与亚像素级两个部分。首先确定激光光斑中能量最大值所对应的坐标位置,即像素级定位。其次利用灰度加权提取重建后激光光斑的质心坐标,对重建窗口内的质心进行亚像素定位。以最大值为中心建立自适应窗口,利用灰度加权法求取该光斑的质心坐标,并通过前一个激光光斑质心坐标位置约束下一个激光光斑的质心坐标。其中,灰度加权的数学描述为

$$\begin{cases} x_{\text{sub}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i p^2(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p^2(x_i, y_j)} \\ y_{\text{sub}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_j p^2(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p^2(x_i, y_j)} \end{cases}, \quad (6)$$

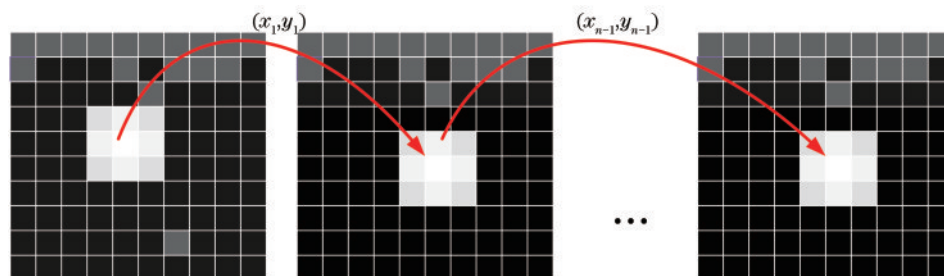


图 2 质心跟踪灰度加权定位方法示意图

Fig. 2 Schematic of gray weighted location based on centroid tracking

式中： (\bar{x}_0, \bar{y}_0) 为质心坐标； n 为窗口内的大小； (x_i, y_i) 为第 i 个像素的坐标； $p(x_i, y_i)$ 为第 i 个像素的灰度值。

3 分析与讨论

本文主要研究了 GLAS 卫星平台所采集的激光光斑图像, 图像大小为 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$, 图像灰度值范围为 $0 \sim 255$, 其中激光光斑散布在几个像素中, 大小一般不超过 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$, 如图 3 所示。

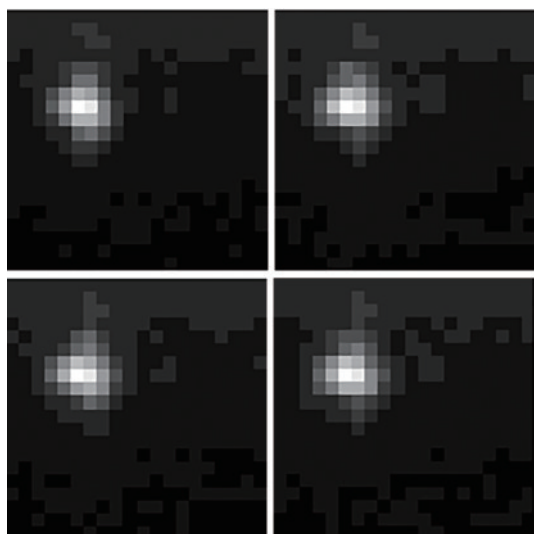


图 3 激光光斑数据

Fig. 3 Laser spot data

随机选取获取的时间为 2015 年 6 月 17 日与 2015 年 10 月 26 日激光光斑图像数据, 以非光斑下同一像素能量最小值为限制条件, 得到暗通道背景噪声信息, 获取的暗通道噪声及其三维可视化结果, 如图 4 所示。

为了进一步验证本文所提方法质心定位的可靠性, 将其与灰度加权、高斯曲面拟合、椭圆拟合方法相对比, 2115—0279 质心提取结果如图 5 所示, 2117—1293 的质心提取结果图 6 所示。

图 5 和图 6 分别为对随机选取的激光光斑数据

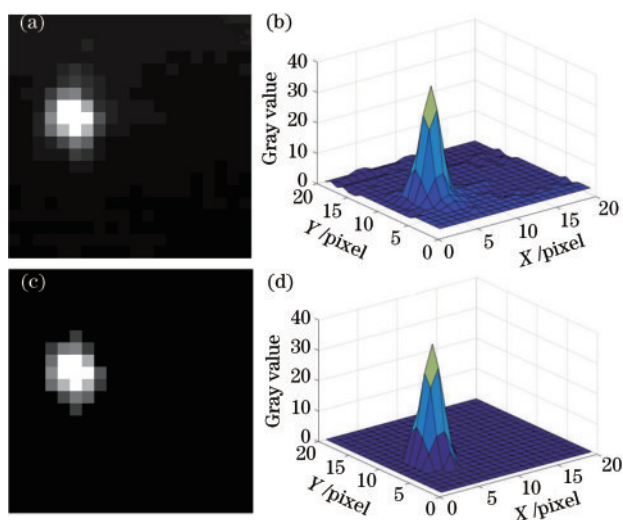


图 4 激光光斑及三维显示结果。(a)原始图像;(b)原始图像的三维显示;(c)去噪后激光光斑图像;(d)去噪后激光光斑图像的三维显示

Fig. 4 Laser spot and three-dimensional display results. (a) Original image; (b) three-dimensional display of original image; (c) laser spot image after denoising; (d) three-dimensional display of laser spot image after denoising

的质心定位结果, 激光光斑质心在 x 方向与 y 方向均呈现出周期性变化, 这也反映出卫星平台在轨运行时存在颤振现象。通过质心处 x 方向与 y 方向的变化规律, 拟合出激光光斑质心变化规律的周期约为 94 min , 振幅约为 $2 \sim 3 \text{ pixel}$ 。光斑质心变化周期与轨道运行周期基本吻合, 也证明了激光光斑质心变化的规律性。为了进一步定性分析不同质心定位方法的精度, 实验利用傅里叶函数对 4 种不同质心提取方法的质心轨迹进行拟合, 计算光斑质心与拟合函数的残差, 实验结果如表 1 所示。

从表 1 可以直观看出, 本文所提质心定位方法的精度明显优于灰度加权、高斯曲面拟合、椭圆拟合质心方法, 相较于灰度加权法的拟合残差平均提高 0.08 pixel 、相较于高斯曲面的拟合残差平均

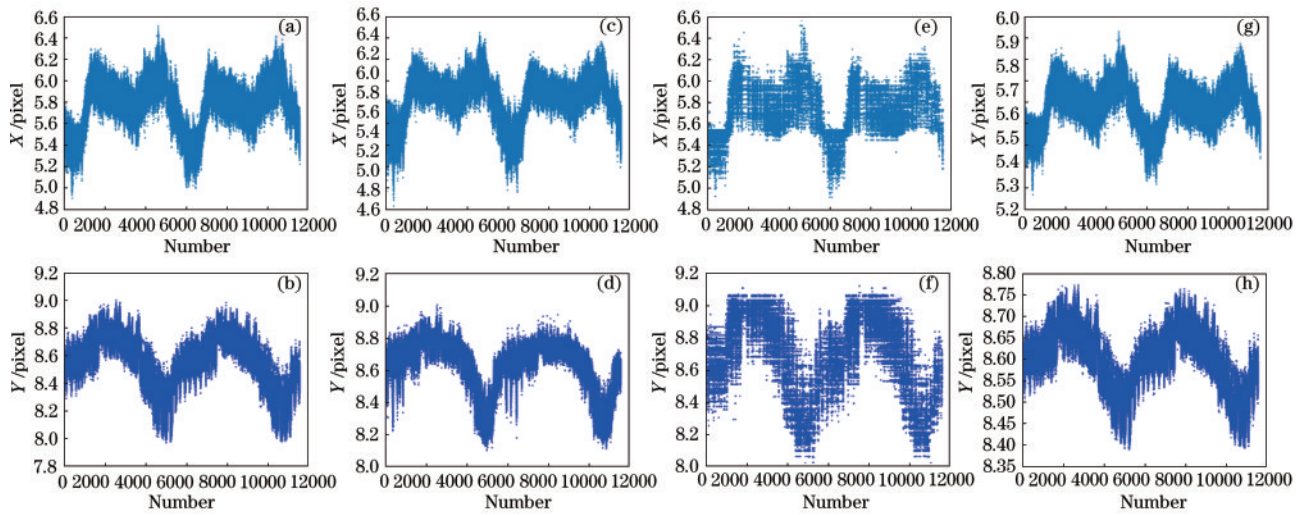


图 5 质心提取结果。(a)(b)灰度加权法 x 、 y 方向质心提取结果；(c)(d)高斯曲面拟合法 x 、 y 方向质心提取结果；(e)(f)椭圆拟合法 x 、 y 方向质心提取结果；(g)(h)本文方法 x 、 y 方向质心提取结果

Fig. 5 Results of centroid extraction. (a) (b) Gray-weighted method centroid extraction results in x and y directions; (c) (d) Gaussian surface fitting method centroid extraction results in x and y directions; (e) (f) ellipse fitting method extraction results in x and y directions; (g) (h) proposed method extraction results in x and y directions

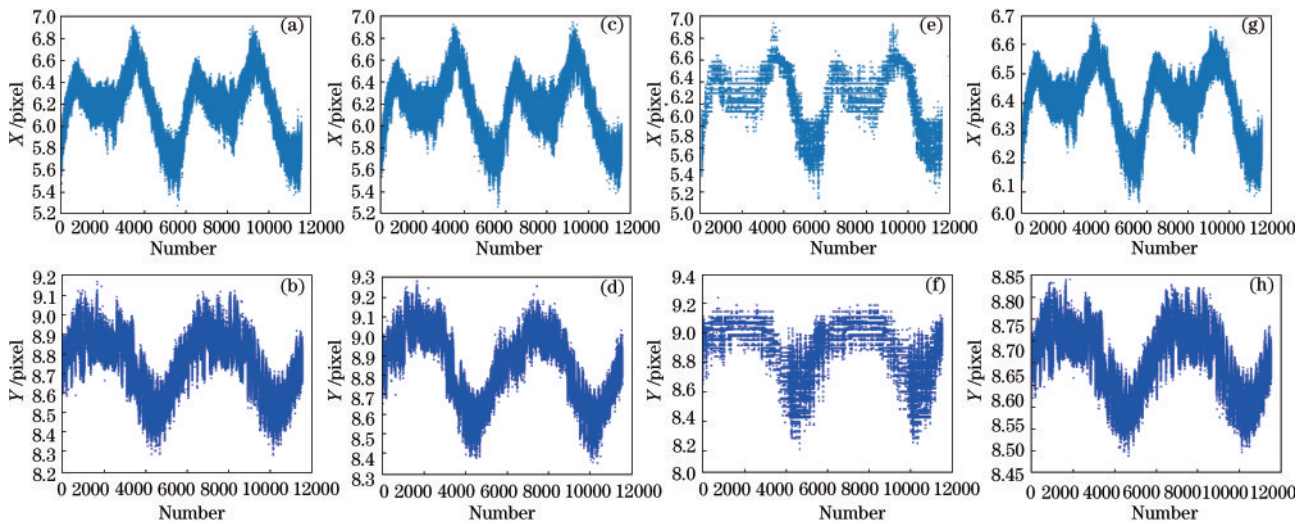


图 6 质心提取结果。(a)(b)灰度加权法 x 、 y 方向质心提取结果；(c)(d)高斯曲面拟合法 x 、 y 方向质心提取结果；(e)(f)椭圆拟合法 x 、 y 方向质心提取结果；(g)(h)本文方法 x 、 y 方向质心提取结果

Fig. 6 Results of centroid extraction. (a) (b) Gray-weighted method centroid extraction results in x and y directions; (c) (d) Gaussian surface fitting method centroid extraction results in x and y directions; (e) (f) ellipse fitting method extraction results in x and y directions; (g) (h) proposed method extraction results in x and y directions

表 1 不同方法的质心定位精度对比结果

Table 1 Comparison results of centroid positioning accuracy of different methods

Centroid	Direction	Gray-weighted /pixel	Gaussian surface fitting /pixel	Elliptic fitting /pixel	Proposed method /pixel
2115—0279	X	0.151	0.164	0.163	0.057
	Y	0.095	0.091	0.134	0.036
2117—1293	X	0.181	0.181	0.201	0.073
	Y	0.076	0.065	0.104	0.033

约提高 0.08 pixel、相较于椭圆拟合的残差平均约提高 0.1 pixel。

4 结 论

本文以 GLAS04 级产品记录的激光轮廓阵列 (LPA) 激光光斑图像作为实验数据, 结合激光光斑图像的自身特点, 以提升激光光斑质心定位精度为出发点, 以探测卫星平台颤振规律为目标, 提出了非光斑下的暗通道去噪方法, 同时结合反卷积与超分辨率重建方法进一步提高激光光斑的空间分辨率, 并利用质心跟踪的灰度加权方法对长时序激光光斑数据进行质心提取, 进而对 GLAS 卫星平台的颤振规律进行探测, 结论如下:

1) 采用三种不同的质心定位方法对激光光斑质心定位精度进行对比, 本文所提质心定位方法的精度明显优于灰度加权、高斯曲面拟合、椭圆拟合质心方法, 其残差拟合精度相较于灰度加权法平均约提高 0.08 pixel、相较于高斯曲面拟合平均约提高 0.08 pixel、相较于椭圆拟合平均约提高 0.1 pixel。

2) 与三种不同方法的质心定位结果进行对比, 不仅可以得出质心定位精度的情况, 同时也探测到 GLAS 卫星平台存在周期约为 94 min 的姿态变化规律, 此周期与 GLAS 卫星轨道周期 90 min 基本一致, 说明激光指向随卫星轨道位置变化而产生偏差, 存在周期性较长的变化规律。因此, 通过监视卫星在轨激光光斑质心变化规律, 获取卫星平台颤振的变化规律, 进而提升激光的指向角精度, 从而提升激光定位精度。

参 考 文 献

- [1] Poli D, Toutin T. Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors [J]. *The Photogrammetric Record*, 2012, 27(137): 58-73.
- [2] Jiang Y H, Zhang G, Tang X M, et al. Detection and correction of relative attitude errors for ZY1-02C [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7674-7683.
- [3] Wang M, Zhu Y, Pan J, et al. Satellite jitter detection and compensation using multispectral imagery [J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(6): 513-522.
- [4] Wang P, An W, Deng X P, et al. A jitter compensation method for spaceborne line-array imagery using compressive sampling [J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(7): 558-567.
- [5] Gong J Y, Wang M, Yang B. High-precision geometric processing theory and method of high-resolution optical remote sensing satellite imagery without GCP [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1255-1261.
龚健雅, 王密, 杨博. 高分辨率光学卫星遥感影像高精度无地面控制精确处理的理论与方法 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1255-1261.
- [6] Tong X H, Li L Y, Liu S J, et al. Detection and estimation of ZY-3 three-line array image distortions caused by attitude oscillation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, 101(10): 291-309.
- [7] Sun T, Long H, Liu B C, et al. Application of attitude jitter detection based on short-time asynchronous images and compensation methods for Chinese mapping satellite-1 [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1395.
- [8] Tang X M, Xie J F, Zhu H, et al. Overview of earth observation satellite platform microvibration detection methods [J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 736.
- [9] Mo F. Research on attitude post-processing of domestic surveying and mapping satellite [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2016.
莫凡. 国产测绘遥感卫星姿态后处理技术研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2016.
- [10] Mo F, Tang X, Xie J, et al. An attitude modelling method based on the inherent frequency of a satellite platform [J]. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-1/W1: 29-33.
- [11] Xie J F. The critical technology of data processing of satellite attitude determination based on star sensor [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
谢俊峰. 卫星星敏感器定姿数据处理关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [12] Zhu Y, Wang M, Pan J, et al. Detection of ZY-3 satellite platform jitter using multi-spectral imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4): 399-406, 413.
朱映, 王密, 潘俊, 等. 利用多光谱影像检测资源三号卫星平台震颤 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(4): 399-406, 413.
- [13] Xu B, Lei B, Fan C C, et al. Internal error compensation method based on high-frequency angular displacement for high-resolution optical satellite images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36

- (9): 0928002.
- 许斌, 雷斌, 范城城, 等. 基于高频角位移的高分辨率卫星影像内部误差补偿方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0928002.
- [14] Araki K. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5): 827-832.
- [15] Pan J, Che C B, Zhu Y, et al. Satellite jitter estimation and validation using parallax images[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 83.
- [16] Sun T, Long H, Zhao D, et al. Detection and compensation of satellite flutter based on image from multispectral camera with five spectral combinations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728005.
孙韬, 龙辉, 赵冬, 等. 基于五谱段合一多光谱相机影像的卫星颤振检测和补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728005.
- [17] Xie J, Tang X, Jiang W, et al. An autonomous star identification algorithm based on the directed circularity pattern[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 39: 333-338.
- [18] 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.
- [19] Yuan Y L, Zheng Y, Du L. High-accuracy centroid algorithm of star points [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(2): 122-126.
原玉磊, 郑勇, 杜兰. 星点中心高精度质心定位算法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(2): 122-126.
- [20] 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.
- [21] 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.