

一种基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机 颤振检测方法

赵薇薇¹, 范城城^{2,3,4*}, 王艳¹, 商鼎会^{2,3,4}, 张永合^{2,3,4}, 尹增山^{2,3,4}

¹北京市遥感信息研究所, 北京 100192;

²上海微小卫星工程中心, 上海 201210;

³中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201210;

⁴中国科学院微小卫星重点实验室, 上海 201210

摘要 星上运动部件所引起的颤振是当前影响超高分辨率、超高机动成像质量的一个重要因素。针对该信号难以被精确业务化检测识别的问题, 提出一种基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机颤振检测方法, 进一步采用高频角位移与高精度参考的数字正摄影像/数字高程模型(DOM/DEM)数据进行效果验证与评价。对 2020 年发射的某高分型号卫星进行了分析, 分析结果表明所设计的检测方法可以有效识别空间相机成像过程中的颤振特性, 颤振频率主要集中在 156 Hz 左右, 补偿后的全色影像相对几何精度可提升 1.2 pixel 左右。

关键词 遥感; 超高分辨率卫星; 卷帘快门 CMOS; 颤振检测; 高频角位移; 分时成像

中图分类号 P236

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0228001

Jitter Detection Method Based on Rolling Shutter CMOS Imaging for Space Cameras

Zhao Weiwei¹, Fan Chengcheng^{2,3,4*}, Wang Yan¹, Shang Dinghui^{2,3,4},
Zhang Yonghe^{2,3,4}, Yin Zengshan^{2,3,4}

¹Institute of Beijing Remote Sensing Information, Beijing 100192, China;

²Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201210, China;

³Innovation Academy for Microsatellites of CAS, Shanghai 201210, China;

⁴Key Laboratory of Microsatellites of CAS, Shanghai 201210, China

Abstract The jitter caused by onboard motion components is an important factor affecting the quality of ultra-high-resolution and super-maneuverability imaging. Given that it is difficult to conduct accurate operational detection and identification of the jitter signal, this paper proposes a jitter detection method based on rolling shutter CMOS imaging for space cameras and verifies and evaluates the method with digital orthophoto map/digital elevation model (DOM/DEM) data by using high-frequency angular displacement and high-precision reference. A Gaofen satellite launched in 2020 is discussed as an example. The analysis results show that the proposed detection method can effectively identify the jitter characteristics in the imaging process of space cameras, and the jitter frequency is mainly concentrated at about 156 Hz. The relative geometric accuracy of panchromatic images after compensation is improved by about 1.2 pixel.

Key words remote sensing; ultra-high-resolution satellite; rolling shutter CMOS; jitter detection; high-frequency angular displacement; time-resolved imaging

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(42001408)、中国科学院青促会项目(2017357)、中国科学院国防科技重点实验室基金(CXJJ-19S012)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)、空间科学背景型号项目(XDA15020305)

通信作者: *fance@microstate.com

1 引言

空间相机颤振主要指卫星在轨工作期间,由于星上姿轨控等运动部件所引起的颤振信号响应。随着对地观测技术高速发展,超高分辨率、超强机动成像能力成为当前高分辨率光学卫星的重要发展趋势^[1-2]。超高分辨率意味着相机光学系统设计与制造水平的提升和相机角分辨率的提高。超强机动成像能力意味着更高效率的影像获取能力,包括凝视成像、凝扫成像以及旋转成像等动中成像模式。空间相机颤振是当前实现超高分辨率、超强机动成像能力的重要影响因素之一。对于空间分辨率优于 0.1~0.3 m 的光学卫星,单个像素的角分辨率优于 0.1',即振幅为 0.1'的微弱颤振可引起像素级畸变;相对于常规成像模式,机动成像模式下相机的颤振特性更加复杂,难以模型化^[3-6]。因此,为实现超高分辨率、超强机动成像影像的精准处理与后续应用,空间相机颤振的业务化精确检测与建模成为亟须解决的重要课题。

根据当前我国在轨的遥感系列、高分系列卫星长期在轨遥测数据以及影像地面处理结果分析,空间相机颤振信号谱峰值主要集中在 100,150,200,300 Hz 等频段,这些频段的颤振相比于线阵推扫成像上万赫兹行频,属于低频颤振^[7-10]。当成像行频低于颤振频率,成像积分时间内包含多类型周期颤振信号,这将会降低光学系统调制传递函数,导致影像存在模糊;成像行频高于颤振频率时,将会产生像移,影响波段配准、立体成像以及视场拼接等精度^[11-12]。针对空间相机颤振检测、建模以及补偿方法,国内外相关机构与学者已经开展了相关的工作。国外方面,日本 ALOS 卫星通过搭载角位移传感器进行颤振信号检测,其观测精度高达 0.01',频率高达 500 Hz;法国国家空间研究中心的 Roques 等基于立体像对生成视差图,分别对卫星平台翻滚、俯仰和偏航三个方向的颤振进行检测与补偿,并利用仿真数据进行了验证分析;法国 Pleiades 卫星通过采用在轨测试期间对恒星进行凝视推扫成像的方式,进一步分析成像结果并进行颤振检测^[13-16]。国内方面,武汉大学朱映等^[17]以及同济大学 Tong 等^[18]利用资源三号多光谱影像、三线阵立体影像的成像视差,对资源三号卫星进行了相机颤振的检测实验,研究表明资源三号在成像过程中在垂轨、沿轨方向确实存在不同程度的颤振,并进一步采用稳态重成像以及最速梯度下降等方法进行补

偿,以有效提升影像产品质量;Wang 等^[19]和赵薇薇等^[20]分别基于高频角位移、线加速度计开展相机颤振信号在轨检测的可行性研究,并取得一定的研究成果。综上所述,基于遥感视差成像方式进行颤振检测的方式依赖匹配精度且计算量大,无法完全覆盖颤振信号检测频段;基于高频传感器的颤振检测方法存在难以直接精确感知相机焦平面的颤振信号、信号存在一定衰减与不一致,以及受卫星结构材料特性以及空间外部环境影响的问题,因此需对颤振信号的传递规律进行准确建模。

针对上述存在的问题,本文提出了一种基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机颤振检测方法,采用 2020 年发射的某型号遥感卫星的真实在轨数据进行处理分析,并利用不同检测手段互比较方法以及高精度参考数据对本文提出的算法进行验证与评价。

2 基于卷帘快门 CMOS 成像的颤振检测方法

20 世纪 70 年代,美国国家航天宇航局喷气推进实验室研制出无源像素传感器结构 CMOS 图像传感器,受制于当时的工艺水平,其得到的图像质量与 CCD 相差甚远。直到 1997 年,英国爱丁堡 VLSI Version 公司成功研制了世界首个商业化 CMOS 图像传感器,至此拉开了该传感器广泛应用的序幕。CMOS 图像传感器发展至今主要经历三个阶段:无源像素传感器、有源像素传感器以及数字像素传感器。根据工作模式,可将 CMOS 图像传感器分为全局快门模式和卷帘快门模式。利用全局快门模式进行成像时,所有像元都在同一时刻曝光成像,且曝光时间相同,生成影像帧序列;利用卷帘快门模式进行成像时,将各行像元依次曝光,依次结束曝光,各行影像曝光时间相同,但成像时刻不同。针对卷帘快门独特的成像方式,当 CMOS 相机与被拍摄目标存在相对运动时,所获取的影像将会产生运动畸变,即 RS 效应。根据该成像模式与效应,卷帘快门 CMOS 传感器作为一种新型颤振检测设备已搭载 2020 年发射的国内某高分型号卫星进行在轨测试与使用。图 1 表示某高分型号卫星卷帘快门模式所获取的序列卫星影像,设置卷帘方向与卫星飞行方向垂直,影像存在明显的由 RS 效应所导致的运动拉伸畸变现象,且通过帧频调节保证前后帧影像间沿飞行方向存在一定重叠区,以进行后续的颤振信号检测。

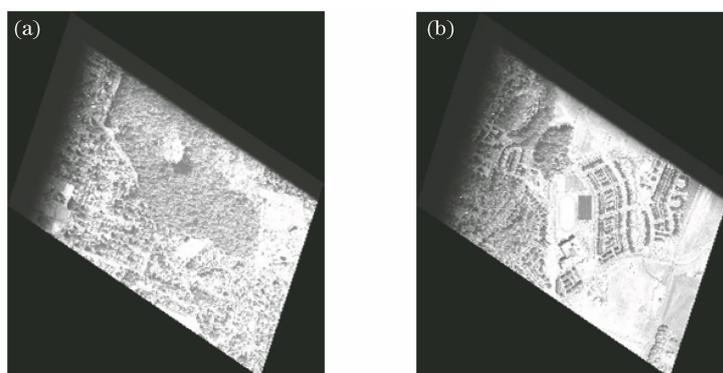


图 1 CMOS 卷帘快门模式拍摄的卫星遥感序列影像。(a)前一帧影像;(b)后一帧影像
Fig. 1 Satellite remote sensing sequence images captured by CMOS rolling shutter mode.

(a) Previous image; (b) next frame image

该卫星采用太阳同步轨道,具有一定机动成像能力,对地观测成像范围较大。主相机分系统由全色和多光谱线阵推扫组成,近地点全色相机的最高分辨率可优于 0.3 m。为准确获取空间相机颤振信息,设计卷帘快门 CMOS 传感器与空间相机焦平面固连安装,其检测原理如下:在线阵推扫相机进行对地成像的过程中,卷帘快门 CMOS 传感器开始工作,其对每一行依次开始曝光,不断记录整个成像过程中的颤振信息,通过对连续的帧与帧之间重叠区域相对位移量的检测,即可反演相应的颤振信息。颤振信息采样频率为 CMOS 每行曝光时间间隔,帧与帧之间重叠区域的成像时间间隔为开窗大小乘以每行曝光时间间隔,且可以通过开窗大小设置进行调节,实现颤振信息全覆盖感知。根据当前在轨遥感卫星长期遥测信息分析,在平台与载荷之间的柔性安装设计下,能传递到相机上的颤

振信息主要集中在 100, 150, 200, 300 Hz, 基本都小于 500 Hz, 颤振周期大于 2 ms, 而卷帘快门 CMOS 行曝光时间间隔为 20 μ s 左右。根据采样定理,为实现颤振信号的准确检测,采样频率应大于颤振信号频率的 2 倍及以上,很显然以上设计与分析可以满足该要求。

如图 2 所示,本文设计的基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机颤振检测方法的主要处理流程包括:CMOS 内部畸变与外部安装参数定标、卷帘模式影像的逐行像移校正、帧间相对-绝对定向、颤振相对偏移量的逐行计算、颤振拟合参数计算和绝对颤振参数反演等模块。利用卷帘快门 CMOS 成像原理进行空间相机颤振信号检测的第一步是消除 CMOS 传感器内部畸变等因素对检测结果的影响,采用全局快门模式获取已有定标场区域的 CMOS 面阵影像,通过控制点的自动密集匹配提取以及几

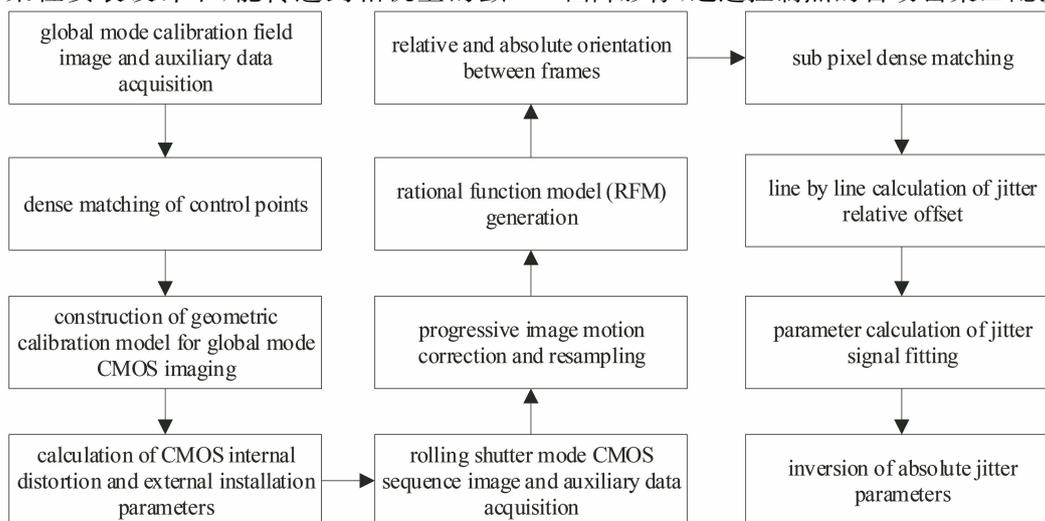


图 2 基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机颤振检测处理流程

Fig. 2 Jitter detection flow chart for space camera based on rolling shutter CMOS imaging

何定标模型,可实现内外部几何参数计算。进一步采用卷帘快门模式获取连续多帧 CMOS 影像,受 RS 效应的影响,在每帧影像的卷帘方向,行与行之间存在固定参数的像移畸变,本文采用如下方法进行像移逐行校正与重采样。假设某帧 CMOS 影像首行成像时间为 t_1 ,第 n 行成像时间为 t_n ,焦平面上实际像移速度为 v_{img} , x_n 、 y_n 分别表示影像行、列号,则补偿前后影像灰度值 f_{t_n} 与 f'_{t_n} 满足如下重采样关系:

$$f_{t_n}(x_n, y_n) = f'_{t_n}(x_n + v_{\text{img}} \cdot t_n - v_{\text{img}} \cdot t_1, y_n) \quad (1)$$

由于卷帘快门模式 CMOS 获取的连续帧影像存在强相关性,故像移不会影响颤振信息检测结果。基于以上方法可实现每帧影像的像移校正,进一步采用有理函数模型(RFM)对每帧影像的严密成像几何模型进行通用化处理,得到有理多项式系数(RPCs)。理论上连续帧影像间同名点应交会于同一点,但由于受姿态观测误差、轨道观测误差、高程数据误差等多种因素的影响,同名点投影到物方点的坐标会存在一定差异,为了得到精确的空间相机颤振信息,必须对相关干扰误差进行消除。本文基于 RFM 进行立体相对-绝对定向,具体数学模型如下:

$$\begin{cases} l_n + A_0 + A_1 l_n + A_2 s_n = \frac{\text{Num}_L(U, V, W)}{\text{Den}_L(U, V, W)} \\ s_n + B_0 + B_1 l_n + B_2 s_n = \frac{\text{Num}_S(U, V, W)}{\text{Den}_S(U, V, W)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$ 表示误差补偿参数; (l_n, s_n) 表示像方归一化坐标; $\text{Num}_L(U, V, W)$ 、 $\text{Den}_L(U, V, W)$ 、 $\text{Num}_S(U, V, W)$ 、 $\text{Den}_S(U, V, W)$ 分别表示物方归一化坐标行方向有理函数分子参数、物方归一化坐标行方向有理函数分母参数、物方归一化坐标列方向有理函数分子参数和物方归一化坐标列方向有理函数分母参数。基于上述模型,利用帧间匹配的一定数量连接点构建立体像对的误差补偿 RFM 观测方程,即可解算得到相应误差补偿参数。为得到帧间相对颤振偏移量信号,需进一步采用定向后的 RFM 和帧间密集匹配同名点进行计算反演,即将立体像对前帧影像上的同名点像点坐标进行正投影,得到同名点物方坐标;然后通过反投影将物方坐标反算到立体像对后帧影像上,得到其在后帧影像上的反算像点坐标;在立体像对后帧影像上,计算基于每个同名点反算的像点坐标与匹配坐

标的坐标差,包括沿轨方向的像素坐标差和垂轨方向的像素坐标差,即相机颤振引起的相对偏移量。由于单个采样行所能匹配的同名点数量和精度受限,通过前期分析,空间相机在轨颤振频率约为 CMOS 采样频率的 1/100,故可以认为 CMOS 卷帘方向多个连续行的颤振信息基本一致,将每次采样的行设为中心并扩展成多行,形成卷帘方向的小幅影像,这样可以提高颤振检测精度。

基于以上方法可以得到时间序列的相对偏移量振动曲线,进一步采用傅里叶拟合模型计算得到相应的相对振动参数,且采用以下振动转换模型可得到绝对振动参数,具体推导如下:任意振动方程均可表示成正弦级数,假设振动方程为 $y = A \sin(\omega t + \varphi)$ (其中 A 为振动信号的振幅, φ 为信号相位, ω 为信号角频率, t 为时间, y 为振动信号),则第 p 帧影像的第 i 列元素的振动偏移量 $y_1 = A \sin(\omega t_i + \varphi)$ (t_i 为第 i 列成像时刻),第 $p+1$ 帧影像的第 i 列元素的振动偏移量 $y_2 = A \sin[\omega(t_i + nT_{\text{row}}) + \varphi]$ (T_{row} 为行曝光时间间隔),进一步得到第 p 帧影像的第 i 列元素与 $p+1$ 帧影像的第 i 列元素之间的相对偏移量 Δy 为

$$\begin{aligned} \Delta y &= y_1 - y_2 = \\ &= A \sin[\omega(t_i + nT_{\text{row}}) + \varphi] - A \sin(\omega t_i + \varphi) = \\ &= 2A \sin\left(\frac{\omega n T_{\text{row}}}{2}\right) \sin\left[\omega\left(t_i + \frac{nT_{\text{row}}}{2} + \frac{T_0}{4}\right) + \varphi\right], \end{aligned} \quad (3)$$

式中: T_0 为绝对振动周期。进一步得到实际绝对振动参数为

$$\begin{cases} T_0 = T_{\text{fit}} \\ A_0 = A_{\text{fit}} \left/ \left[2 \sin\left(\frac{\pi n T_{\text{row}}}{T_{\text{fit}}}\right) \right] \right., \\ \varphi_0 = \varphi_{\text{fit}} - \frac{\pi n T_{\text{row}}}{T_{\text{fit}}} - \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: T_{fit} 为振动拟合曲线周期; A_{fit} 为振动拟合曲线振幅; T_{row} 为行曝光时间间隔; φ_{fit} 为振动拟合曲线相位。

综上所述,基于 CMOS 成像传感器卷帘快门的特性,振动参数检测的采样周期为卷帘方向行与行的曝光时间间隔,实际影像帧频为整个传感器开窗大小曝光时间总和,这样利用较低帧频的图像序列即可检测到较高频率振动的相关参数,且可通过设置开窗大小实现颤振信号全覆盖。

3 实验与分析

下面以某高分型号卫星为例,对本文提出的基

于卷帘快门 CMOS 成像的颤振检测方法进行分析与验证,实验所采用的数据为该卫星在轨测试期间下载的数据。卷帘快门 CMOS 成像相机搭载某高分型号卫星发射前,载荷研制单位在地面实验室已开展相关物理仿真验证。本文主要从地面应用系统用户角度,开展卫星在轨测试,并进一步验证本文提出的算法。

为综合评价卫星平台与相机载荷的在轨颤振信号特性以及空间关联,某高分型号卫星同时也搭载了高频角位移传感器,该传感器的采样频率为 10000 Hz,颤振信号的测量范围为 0.2~450 Hz。从卫星设计与研制角度考虑,因高频角位移难以与

空间相机焦平面固连,故该传感器测量的微振动主要为平台信息。图 3 表示基于高频角位移传感器获取的测量信息以及通过对其进行处理得到的平台颤振信号统计信息。通过分析可以看出,平台三个方向的颤振信号频率较多,主要集中在 50,100,158,220,250 Hz 等,振幅处于 10^{-4} 量级。根据测算,某高分型号卫星全色相机的单个像素角分辨率约为 $0.08'$,一般认为当平台的稳定度达到 1/100 时,才能将由平台颤振引起的影像内部几何精度控制在单个像素以内。很明显,若在平台与相机载荷隔振效果不是很好的情况下,平台颤振传递可以引起像素级的几何畸变误差。

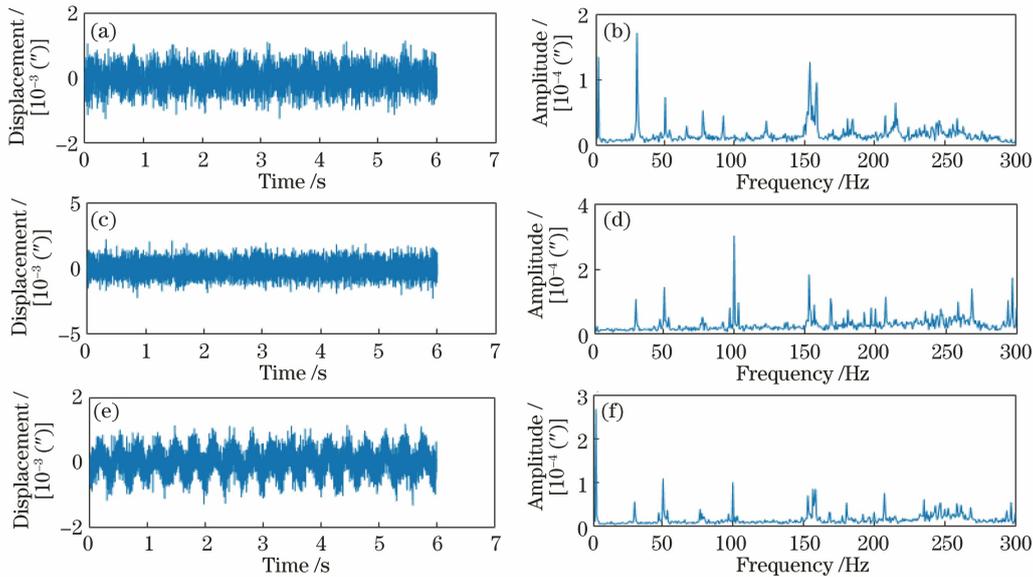


图 3 基于高频角位移的卫星平台颤振信息统计图。(a) x 方向颤振信息;(b) x 方向颤振频谱;
(c) y 方向颤振信息;(d) y 方向颤振频谱;(e) z 方向颤振信息;(f) z 方向颤振频谱

Fig. 3 Jitter information statistical charts of satellite platform based on high frequency angular displacement. (a) Jitter information in x direction; (b) jitter spectrum in x -direction; (c) jitter information in y direction; (d) jitter spectrum in y -direction; (e) jitter information in z direction; (f) jitter spectrum in z -direction

在某高分型号卫星空间相机对地成像过程中,搭载的 CMOS 相机以卷帘成像模式进行同步观测,

采用本文提出的算法与模型进行空间相机内部颤振信息检测。图 4、5 分别表示通过序列 CMOS 影像

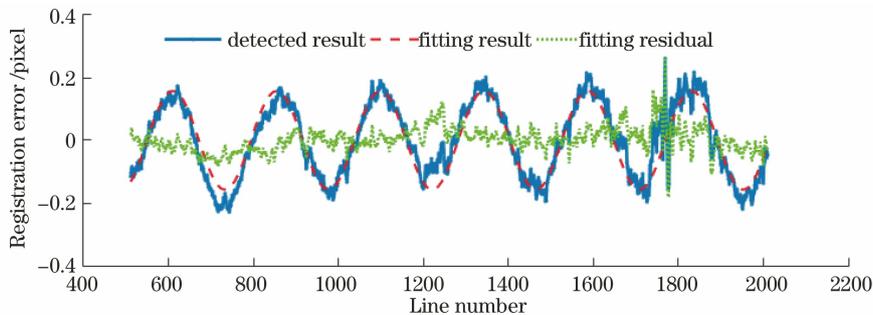


图 4 基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机垂轨方向颤振信息统计图

Fig. 4 Statistical chart of jitter information of space camera in direction perpendicular to rail based on rolling shutter CMOS imaging

反演得到的垂轨与沿轨方向的颤振统计图,通过分析得到,两个方向均存在规律性的颤振信号,频率主要集中在 156 Hz 左右,振幅取值范围为 $-0.199 \sim 0.199$ pixel,此处的像素表示 CMOS 相机探测器的实际尺寸,而该卫星的主载荷相机分系统由全色和多光谱线阵推扫组成,全色相机与 CMOS 相机的探测器的物理尺寸之比约为 1:2,则进一步反推得到

相同的颤振信号将引起 $-0.5 \sim 0.5$ pixel 的全色相机影像几何畸变。另外,对比高频角位移检测结果可以看出,两种手段检测出的颤振信号频率范围基本一致,且通过相机与平台之间的颤振隔离,平台自身的绝大部分颤振信号被有效抑制,没有进一步传递到主载荷相机。

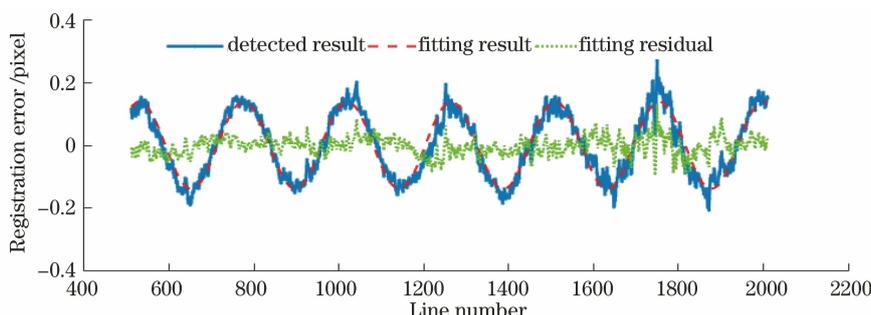


图 5 基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机沿轨方向颤振信息统计图

Fig. 5 Statistical chart of jitter information of space camera in direction along rail based on rolling shutter CMOS imaging

为充分论证本文提出的检测原理与算法模型的可靠性,进一步开展 5 组实验,并进行了分析统计,如表 1 所示。通过在轨测试期间的连续观测与反演计算,发现某高分型号卫星空间相机在对地成像过程中存在规律性的颤振信号(主要集中在 154~156 Hz 频段),CMOS 相机垂轨方向的幅值绝对值范围为 0.181~0.283 pixel,沿轨方向的幅值绝对值范围为 0.135~0.195 pixel,同样此处的像素表示 CMOS 相机探测器的实际尺寸。基于多次实验统计的颤振信号特性,开展 CMOS 相机与全色相机补偿转换模型构建,进行卫星地面应用系统预处理,并基于已有高精度数字正摄影像/数字高程模型(DOM/DEM)参考数据,评估颤振检测信号的准确

性。表 2 表示颤振补偿前后主载荷全色相机影像的相对几何精度统计情况,相对几何精度的常用计算方法包括两种:1)基于基准点的计算方法,即计算检查点相对于基准点的误差,并统计相应的中误差或者 CE 90/LE 90 (circular error at the 90th percentile/linear error at the 90th percentile);2)无需基准点的计算方法,该方法分别计算两两组合的检查点的相对误差,然后统计相对误差的中误差或者 CE 90/LE 90。通过分析可以看出,相比于颤振补偿前统计结果,全色相机影像的垂轨与沿轨方向的相对几何精度总体提升 1.2 pixel,本文提出的方法可以有效改善颤振引起的全色相机影像的几何畸变,受限于 CMOS 成像分辨率,补偿效果难以得到进一步提高。

表 1 基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机绝对振动参数

Table 1 Absolute vibration parameters of space camera based on rolling shutter CMOS imaging

Time	Place	Amplitude and frequency in direction along rail		Amplitude and frequency in direction along rail	
		Frequency /Hz	Amplitude /pixel	Frequency /Hz	Amplitude /pixel
2020-08-15T11:25	Area 1	156.036	-0.181	155.481	-0.135
2020-08-26T13:28	Area 2	155.304	-0.235	155.835	-0.195
2020-09-10T12:35	Area 3	154.812	-0.283	154.705	-0.177
2020-09-21T13:48	Area 4	155.972	-0.199	155.663	-0.184
2020-09-30T11:14	Area 5	156.491	-0.207	156.382	-0.172

表 2 颤振补偿前后的全色影像的相对几何精度

Table 2 Relative geometric accuracy of panchromatic images before and after flutter compensation pixel

Time	Place	Relative error before compensation		Relative error after compensation	
		Direction	Direction	Direction	Direction
		perpendicular to rail	along rail	perpendicular to rail	along rail
2020-08-15T11:25	Area 1	3.811	3.393	2.736	2.293
2020-08-26T13:28	Area 2	5.606	4.573	4.366	3.273
2020-09-10T12:35	Area 3	5.773	3.912	4.443	2.861
2020-09-21T13:48	Area 4	3.006	5.582	1.716	4.282
2020-09-30T11:14	Area 5	6.483	3.763	5.203	2.513
RMS		5.105	4.313	3.906	3.124

4 结 论

针对当前超高分辨率、超强机动成像光学卫星存在颤振且难以业务化补偿的问题,提出了一种基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机颤振检测方法,且对 2020 年发射的某高分型号光学卫星的真实在轨数据进行实验分析。研究表明:该卫星平台的颤振信号被有效抑制,传递到光学系统内部的颤振信号主要集中在 156 Hz 左右;所提出的检测方法可以有效识别颤振信号,有利于提高卫星影像的相对几何精度。

参 考 文 献

- [1] Fan C, Li Y C, Yi H W, et al. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(9): 1714-1718.
樊超, 李英才, 易红伟, 等. 颤振对 TDICCD 相机像质的影响分析 [J]. *光子学报*, 2007, 36(9): 1714-1718.
- [2] Li D R, Zhang G, Jiang Y H, et al. Research on image geometric precision of domestic optical satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(1): 1-9.
李德仁, 张过, 蒋永华, 等. 国产光学卫星影像几何精度研究 [J]. *航天器工程*, 2016, 25(1): 1-9.
- [3] Wang M, Zhu Y, Fan C C. Development of platform jitter geometric analysis and processing for high-resolution optical satellite imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1899-1908.
王密, 朱映, 范城城. 高分辨率光学卫星影像平台震颤几何精度影响分析与处理研究综述 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(12): 1899-1908.
- [4] Xu B Q. Study on image compensation technology for spaceborne cameras under micro-vibration circumstances [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
许博谦. 星载相机微振动下卫星影像补偿技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [5] Jacobsen K. Geometry of satellite images-calibration and mathematical models [D]. Hannover: University of Hannover, 2007.
- [6] Toutin T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(10): 1893-1924.
- [7] Ma Y Y, Sun T, Lei B. Analysis of satellite attitude jitter on Gaofen-1 [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(6): 104-109.
马媛媛, 孙韬, 雷斌. 高分一号卫星平台颤振检测研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(6): 104-109.
- [8] 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光学卫星影像内部误差补偿方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0928002.
- [9] Zhu Y, Wang M, Cheng Y F, et al. An improved jitter detection method based on parallax observation of multispectral sensors for Gaofen-1 02/03/04 satellites [J]. *Remote Sensing*, 2018, 11(1): 16.
- [10] Liu S J, Tong X H, Wang F X, et al. Attitude jitter detection based on remotely sensed images and dense ground controls: a case study for Chinese ZY-3 satellite [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(12): 5760-5766.
- [11] Hu K, Huang X, Zhang Y J, et al. Satellite platform jitter detection and image geometric quality compensation based on high-frequency angular displacement data [C] // The fourth annual meeting of high resolution earth observation. Beijing: China

- High Resolution Earth Observation Conference, 2017: 726-747.
- 胡堃, 黄旭, 张永军, 等. 基于角位移数据的卫星平台高频颤振检测补偿与质量评价[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. 北京: 高分辨对地观测学术年会, 2017: 726-747.
- [12] 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.
- [13] Iwata T, Kawahara T, Muranaka N, et al. High-bandwidth attitude determination using jitter measurements and optimal filtering [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, August 10-13, 2009, Chicago, Illinois. Virginia: AIAA, 2009.
- [14] Iwata T. Precision pointing, attitude, and position determination and control for the advanced land observing satellite (ALOS): development and flight results [J]. *Journal of the Japan Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2013, 61: 329-339.
- [15] Bouillon A, Bernard M, Gigord P, et al. SPOT 5 HRS geometric performances: using block adjustment as a key issue to improve quality of DEM generation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(3): 134-146.
- [16] Roques S, Jahan L, Rouge B, et al. Satellite attitude instability effects on stereo images [C] // 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 17-21, 2004, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2004: 477-480.
- [17] 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.
- [18] Tong X H, Xu Y S, Ye Z, et al. Attitude oscillation detection of the ZY-3 satellite by using multispectral parallax images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(6): 3522-3534.
- [19] Wang M, Fan C C, Pan J, et al. Image jitter detection and compensation using a high-frequency angular displacement method for Yaogan-26 remote sensing satellite [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 32-43.
- [20] Zhao W W, Fan C C, Wang Y, et al. Feasibility analysis of detecting satellite image jitter on-orbit by linear accelerometer [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(5): 49-56.
- 赵薇薇, 范城城, 王艳, 等. 线加速度计在轨检测卫星影像颤振的可行性分析[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(5): 49-56.