

基于线加速度计的高分辨率光学影像颤振检测与重建方法*

范城城¹, 王密¹, 金淑英¹, 潘俊¹, 王艳², 张彪²

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079; 2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100192)

摘要: 卫星平台颤振条件下, 推扫式高分辨率光学影像成像往往产生扭曲, 从而影响影像的定位及信息提取精度。针对当前颤振下影像成像扭曲补偿的问题, 提出一种基于线加速度计测量平台颤振下的稳态重成像模型实现高分辨率卫星颤振扭曲影像的重建。采用受平台颤振影响而扭曲变形的高分某型号卫星全色影像数据进行验证。分析结果表明: 提出的线加速度计可以有效检测并测量出平台的颤振, 设计的颤振影像地面重建模型可以有效提高光学影像成像质量, 补偿后影像扭曲变形现象明显消除。

关键词: 高分辨率光学卫星; 颤振检测; 颤振补偿; 线加速度计; 稳态重成像模型

中图分类号: P236 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)05-145-5

Jitter detection and reconstruction method for high-resolution optical satellite images using linear accelerometer

FAN Chengcheng¹, WANG Mi¹, JIN Shuying¹, PAN Jun¹, WANG Yan², ZHANG Biao²

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Institute of Beijing Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

Abstract: Under the condition of satellite platform's jitter, the push-broom high-resolution optical imaging often produces distortion, which affects the accuracy of the image positioning and information extraction. According to the critical compensation issue for distorted images, a steady-state imaging model with the linear accelerometer directly measuring platform jitter was proposed to achieve reconstruction of high-resolution distorted images. The effectiveness was validated by using the distorted panchromatic image of a high-resolution satellite affected by platform jitter. The analysis results show that the linear accelerometer can effectively detect and measure the platform jitter, the designed on-ground reconstruction model of jitter image can effectively improve the distorted imaging of push-broom optical image caused by platform jitter, and the jitter image's distortion phenomenon can be obviously eliminated.

Key words: high-resolution optical satellite; jitter detection; jitter compensation; linear accelerometer; steady imaging model

卫星平台颤振, 又称卫星微振动, 是指卫星在轨运行期间, 天上运动部件周期性运动或因变轨冷热交变等因素引发的扰动使形体产生的一种幅值较小、频率较高的颤振会响应^[1]。高频的平台颤振会导致获取的影像产生模糊, 低频的颤振会使影像产生复杂几何畸变, 影响其相对定位精度。对于卫星平台颤振带来的影响, 可以利用硬件通过动力学方法采取隔振和抑振措施。在硬件隔振技术不成熟条件下, 则需通过直接或者间接的方式进行平台颤振测量, 并利用数据后处理方法消除其影响^[2]。早期, 由于卫星姿态敏感器硬件技术的限制, 传统的姿态测量系统主要为星敏感器和陀螺, 但是二者组合的频率比较低(一般为10 Hz), 无法测量高频

颤振信息, 地面处理时往往将其作为噪声进行滤除。随着光学遥感卫星分辨率的不断提高, 平台颤振对成像质量的影响不容忽视。

针对卫星平台颤振对光学卫星成像的影响以及相关的补偿方法, 国内外已经开展了相关的研究工作。国内范大鹏、徐鹏等提出基于卫星振动仿真的方法分析不同频率与振幅的颤振对光学卫星成像质量的影响, 仿真结果表明卫星成像存在基频, 其大小等于行曝光时间的倒数。大于基频的颤振会产生影像模糊, 低于基频的颤振会产生几何变形^[1-2]。国外 Roques 等提出基于立体成像直接对卫星平台的颤振进行补偿, 该方法主要基于视差成像的原理进行检测与补偿, 属于被动

* 收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371430, 91438112, 91438203, 91438111, 40901209); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB744201, 012CB719902, 2012CB719901)

作者简介: 范城城(1986—), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, E-mail: ccfan@whu.edu.cn;
王密(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wangmi@whu.edu.cn

的平台颤振检测补偿方法,依赖于匹配、特征提取精度。由于缺少绝对参考,某些频段的颤振信号无法被有效检测,在无颤振测量数据条件下该方法所发挥的效能有限^[3]。

在颤振检测方面,国外的 Mattson 等基于两台相机间重叠区影像对卫星平台颤振进行检测^[4-5]。国内朱映、Tong 等基于多光谱影像研究分析资源三号卫星平台颤振规律,研究结果表明受各方面外在因素影响,卫星在滚动和俯仰方向确实存在规律性颤振^[6-7]。同时,国外已有相关卫星上搭载了高频角位移、高频角振动以及高频角加速度等传感器,如日本的 ALOS 卫星等,开展了一系列基于高频颤振传感器对卫星平台颤振进行直接测量并用于颤振影像补偿方面的研究工作,研究结果表明受颤振传感器与相机焦平面间传递关系影响,该方法只能某种程度地改善颤振影像成像质量^[8-9]。国内受到硬件条件限制,相关的研究开展得较晚。由于推扫式光学卫星成像在一定平台颤振条件下其影像会产生扭曲,将严重影响光学影像的正射校正及后续多源数据的配

准、融合、变化检测等。针对上述存在的问题,国内刘斌提出虚拟稳态重成像方法,解决了推扫式影像有理函数拟合精度不足的问题^[10]。

1 基于线加速度计的光学卫星影像颤振补偿方法

高分辨率光学卫星侦照不同地区影像需要执行各种姿态机动,受太阳翼振动以及自身携带液体燃料晃动等因素影响,侦照的影像受平台颤振影响较大。传统基于星敏感器与陀螺组合定姿得到的姿态频率为 10 Hz,无法满足颤振影像几何处理需要。随着中国硬件技术发展,相关卫星上逐渐配置了高频线加速度计传感器,其可以直接测量并输出高频姿态数据,为颤振影像的地面补偿提供了一条新的途径。图 1 为基于线加速度计的光学卫星影像颤振检测与补偿流程图(图中 CCD 为电荷耦合元件)。其主要处理步骤包括:星敏感器与线加速度计的高精度组合定姿、轨道坐标系下颤振频谱检测以及基于稳态重成像模型的颤振影像重建。

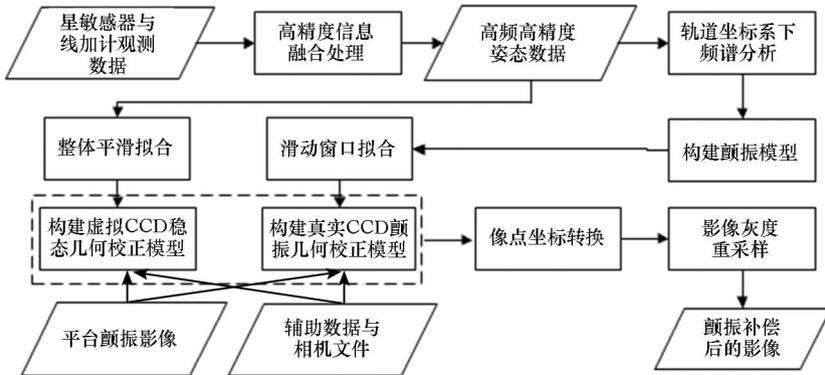


图 1 基于线加速度计的光学卫星影像颤振检测与补偿流程图

Fig. 1 Flow chart of optical satellite image jitter detection and compensation using linear accelerometer

线加速度计作为一种惯性姿态传感器,采用国产石英挠性加速度计(以下简称石英表)作为微加速度敏感部件,其测量的平台颤振频率范围为 0.2 ~ 200 Hz,采样率为 1024 Hz,测量精度优于 0.000 1",原始的输出数据为线加速度数据,经过星上解析处理可以直接输出高频的角增量数据,得到的测量数据含义是惯性坐标系下相对于平衡位置的平台振动幅值。线加速度计在轨工作过程中存在的误差项包括安装误差、标度因数误差以及测量噪声等,故进一步得到线加速度计的误差测量模型为:

$$\omega_g + \omega_s = (1 + \Delta + \Lambda)\omega + \eta_g \quad (1)$$

式中, ω_g 为线加速度计测量输出的角增量转换得到的角速度大小, ω_s 表示卫星绕地球的转动角速

度大小, Δ 表示线加速度计安装误差, Λ 表示线加速度计标度因数误差, ω 为卫星本体相对于惯性坐标系的真实角速度, η_g 为线加速度计测量噪声,这里假设线加速度计测量噪声为高斯白噪声,即 $\eta_g \sim N(0, \sigma_g^2)$ 。

进一步将基于多星敏感器组合定姿得到的离散卫星姿态与线加速度计数据进行时标对齐,构建附有限制条件的间接平差模型。假设离散的卫星姿态参数时间序列为 $Q_0, Q_1, \dots, Q_{k-1}, Q_k, \dots, Q_{n-1}, Q_n$, 线加速度计基于角增量数据转换得到的角速度时间序列为 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{k-1}, \omega_k, \dots, \omega_{n-1}, \omega_n$, 则附有限制条件的间接平差模型^[11-12]为:

$$\begin{cases} \mathbf{v} = \hat{\mathbf{Q}}_k - \mathbf{Q}_k \\ \hat{\mathbf{Q}}_k = \hat{\mathbf{Q}}_{k-1} \otimes \Delta \mathbf{Q}_{k-1,k} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\hat{\mathbf{Q}}_k$ 表示最优估计值, $\Delta \hat{\mathbf{Q}}_{k-1,k}$ 表示基于线加速度计数据积分得到的单个采样周期内的角增量四元数, \mathbf{v} 表示残差;

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{Q}}_k = e^{\frac{1}{2} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Omega(\omega_{k-1}) dt} \cdot \hat{\mathbf{Q}}_{k-1} \\ \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Omega(\omega_{k-1}) dt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} dt \end{cases} \quad (3)$$

将附有限制条件的间接平差模型转化成如下标准形式^[13]:

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L} \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{W}_X = \mathbf{0} \end{cases} \quad (4)$$

进一步推导得到:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{BB} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \\ \mathbf{W} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \\ \mathbf{N}_{CC} = \mathbf{C} \mathbf{N}_{BB}^{-1} \mathbf{C}^T \\ \hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{N}_{BB}^{-1} - \mathbf{N}_{BB}^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{N}_{CC}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{N}_{BB}^{-1}) \mathbf{W} - \mathbf{N}_{BB}^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{N}_{CC}^{-1} \mathbf{W}_X \end{cases} \quad (5)$$

其中, \mathbf{B} 表示误差方程观测矩阵, \mathbf{L} 表示误差方程常数项, \mathbf{V} 表示误差方程观测残差, \mathbf{C} 表示条件方程观测矩阵, \mathbf{W}_X 表示条件方程常数项, $\hat{\mathbf{X}}$ 表示估计参数, \mathbf{N}_{BB} 表示误差方程的法方程矩阵, \mathbf{W} 表示误差方程的常数项矩阵, \mathbf{N}_{CC} 表示条件方程的法方程矩阵, \mathbf{P} 表示观测值权阵, 最终将估计参数 $\hat{\mathbf{X}}$ 作为高频高精度姿态数据。

基于以上得到的高频高精度姿态数据, 采用稳态重成像模型对颤振影像进行补偿, 具体方法如下: ①在相机焦平面上设计一条完整的虚拟时间延迟积分电荷耦合元件 (Time Delayed and Integration Charge Coupled Device, TDI CCD) 线阵, 与实际 TDI CCD 共享一套轨道姿态、相机焦距和主点参数; ②对姿态数据进行整体拟合, 且基于稳态几何校正模型建立虚拟扫描景像点与物方空间的坐标映射关系; ③在满足物方几何定位精度一致的前提下, 对姿态数据进行滑动窗口拟合, 且基于实际 TDI CCD 的颤振几何校正模型建立物方空间与原始影像像点的坐标映射关系, 由此建立虚拟扫描景与原始影像的像点坐标对应关系, 最终通过灰度重采样生成颤振补偿后的影像。

稳态几何校正模型表示基于虚拟 TDI CCD 线阵、整体拟合姿态以及严密几何成像方程构建的模型; 颤振几何校正模型表示基于真实 TDI CCD 线阵、滑动拟合姿态以及严密几何成像方程构建的模型。对平台颤振影像进行稳态重成像校正, 基于探元指向角的严密几何成像方程进行建模^[14-15]:

$$\begin{pmatrix} \tan(\psi_x(s)) \\ \tan(\psi_y(s)) \\ 1 \end{pmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}} \mathbf{R}_{\text{wgs}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X_g - X_{\text{gps}} \\ Y_g - Y_{\text{gps}} \\ Z_g - Z_{\text{gps}} \end{bmatrix}_{\text{wgs}} - \begin{bmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{bmatrix}_{\text{body}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} \psi_x(s) = a_0 + a_1 \times s + a_2 \times s^2 + a_3 \times s^3 \\ \psi_y(s) = b_0 + b_1 \times s + b_2 \times s^2 + b_3 \times s^3 \end{cases}$$

(X_g, Y_g, Z_g) 表示地物点的物方坐标; ($\psi_x(s), \psi_y(s)$) 表示探元号 s 的指向角大小; a_i, b_i ($i=0, 1, 2, 3$) 表示多项式拟合系数; ($X_{\text{gps}}, Y_{\text{gps}}, Z_{\text{gps}}$) 与 (B_X, B_Y, B_Z) 分别表示对地相机摄影中心的物方坐标与 GPS 偏心误差; λ 表示比例系数; $\mathbf{R}_{\text{wgs}}^{\text{J2000}}$, $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}}$, $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}}$ 分别表示 WGS84 坐标系相对于惯性坐标系的旋转矩阵、惯性坐标系相对于卫星本体坐标系的旋转矩阵以及卫星本体坐标系相对于相机测量坐标系的旋转矩阵。

2 实验与分析

2.1 实验平台与数据

2015年9月中国发射了高分某型号卫星, 该卫星采用太阳同步轨道, 轨道高度为 645 km。为扩大对地观测相机可视范围, 该卫星具有侧摆与俯仰机动能力, 最大侧摆与俯仰角为 $\pm 45^\circ$ 。相机分系统由全色相机和多光谱相机组成, 其中全色相机的星下点地面像元分辨率为 0.7 m 左右。星上除了配置常用姿态敏感器 (星敏感器、陀螺) 外, 还配置了高频线加速度计传感器。为直观分析与验证本文算法的可行性, 本文实验所采用的数据为 2016 年 4 月 1 日侦察的明显存在颤振影响并产生扭曲变形的飞机场全色影像数据、姿轨辅助数据以及高频线加速度计观测数据。

2.2 线加速度计数据处理及分析

高分某型号卫星配置的线加速度计直接与相机镜筒固连, 可以直接测量相机本身的颤振信息。当卫星侦察该景飞机场数据时, 卫星的偏航角为

1.028°, 滚动角为 -28.000°, 俯仰角为 35.718°, 属于大俯仰大侧摆侦察模式。在卫星完成姿态机动、对地面进行推扫成像过程中,其受到太阳翼以及自带液体燃料的抖动影响,存在一定的平台颤振。图 2 表示线加速度计测量得到的相机本身在偏航、滚动以及俯仰三个方向相对于平衡位置的颤振幅值大小。通过分析可以得到,相机本身在偏航方向的颤振幅值处于 ±0.05"、滚动方向的颤振幅值处于 ±0.1"、俯仰方向的颤振幅值处于 ±0.15",颤振主要集中在滚动和俯仰方向。高分某型号卫星的轨道高度为 645 km, 全色相机地面像元分辨率为 0.7 m 左右,故根据摄影测量原理得到一个像素对应的颤振幅值为 0.223"左右。因此,根据图 2 的分析结果可知相机在滚动和俯仰方向的颤振大小会对侦察的影像在垂轨与沿轨方向产生相应的几何变形,需要进行在轨补偿,消除平台颤振对卫星成像质量的影响。

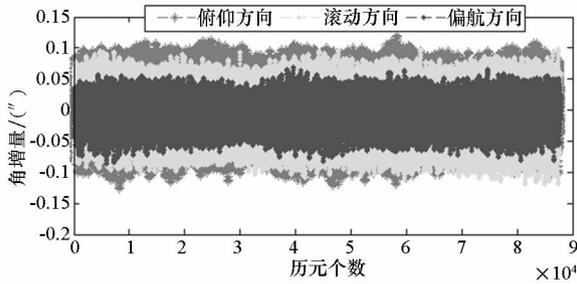


图 2 线加速度计输出的角增量大小随时间变化的统计图

Fig. 2 Flow chart of outputting angular increment by linear accelerometer

卫星成像的基频大小等于行曝光时间的倒数,其中 TDI CCD 的行曝光时间等于积分时间与积分级数的乘积。根据该原理得到该景飞机场全色影像的积分时间为 95.519 μs,积分级数为 48 级,则得到该景数据的成像基频为 218.105 Hz。颤振分为高频颤振和低频颤振两种,高频颤振使图像发生模糊,而低频颤振会使图像产生复杂形变,这两种颤振都可以通过线加速度计传感器测量出来。但地面对于因高频颤振导致的原始成像过程中出现的分辨率下降的影响无法消除,只能对引起几何变形的低频颤振进行校正和补偿。图 3 为对线加速度计输出的颤振信号进行频谱分析得到的频谱分布图,表 1 进一步按照颤振幅值由大到小进行排序,统计颤振幅值大小随颤振频率的变化规律。由分析可以得到,相机本身在偏航、俯仰以及滚动方向都存在一定的颤振,颤振频率主要集中在 100 Hz 左右,偏航方向的颤振最大

幅值达到 0.019",滚动方向为 0.031",俯仰方向为 0.065"。一般认为当平台的稳定度达到 1/100 像素即 0.002 23"时,由于平台颤振引起的内部几何畸变将处于一个像素以内。故很明显需要对该景全色影像进行颤振几何纠正补偿。

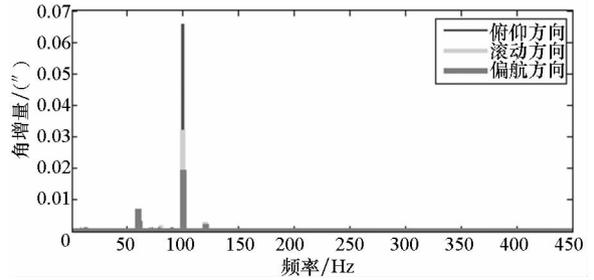


图 3 卫星平台颤振频谱分布统计图

Fig. 3 Flow chart of amplitude and frequency distributions of attitude jitter

表 1 卫星平台颤振频率与幅值大小统计表

Tab. 1 Statistic table of amplitude and frequency distributions of attitude jitter

偏航方向	偏航方向	滚动方向	滚动方向	俯仰方向	俯仰方向
频率/	向幅值/	向频率/	向幅值/	向频率/	向幅值/
Hz	(")	Hz	(")	Hz	(")
100.000	0.019	100.000	0.031	100.000	0.065
59.937	0.006	60.000	0.006	99.937	0.004
60.062	0.004	59.937	0.006	100.062	0.003
59.875	0.003	99.937	0.005	59.937	0.003
60.000	0.002	100.062	0.004	60.000	0.002
60.125	0.002	99.875	0.002	99.875	0.002
120.125	0.002	100.125	0.002	60.062	0.001
59.812	0.001	120.125	0.002	100.125	0.001
60.187	0.001	60.062	0.002	100.187	0.001
60.250	0.001	99.812	0.002	80.125	0.001
59.687	0.001	120.437	0.001	59.875	0.001
59.625	0.000	60.125	0.001	80.312	0.001

2.3 颤振影像稳态重建实验分析

本文进一步将线加速度计观测数据与星敏感器观测数据进行高精度信息融合得到的高频高精度姿态数据用于颤振影像的几何畸变补偿。图 4(a) 表示未进行颤振补偿前原始的飞机场全色影像图,图 4(b) 表示基于稳态重成像模型对颤振影像进行补偿后得到的全色影像图。分析图 4(a) 可以看出,2016 年 4 月 1 日高分某型号卫星侦察的飞机场全色影像全色存在明显的跑道扭曲变形,扭曲程度达到整像素级以上。对比分析图 4(a) 与图 4(b) 可以发现,飞机跑道的扭曲变形现象明显消失,基于本文提出的基于线加速度

计的稳态重成像模型可以有效改善卫星平台颤振对成像质量的影响,基本消除卫星平台颤振所产生的影像几何畸变。



(a) 补偿前结果

(a) Results before compensation



(b) 补偿后结果

(b) Results after compensation

图4 基于线加速度计补偿前后的飞机场全色影像结果

Fig.4 Airport panchromatic images before and after compensation based on linear accelerometer

3 结论

1) 高分某型号卫星平台在实验影像成像时,偏航、俯仰以及滚动方向都存在一定的颤振,最大幅值分别达到 $0.019''$ 、 $0.065''$ 和 $0.031''$, 颤振频率主要集中在 100 Hz 左右,使得内部几何畸变将大于一个像素;

2) 本文基于线加速度计卫星平台颤振测量,利用稳态虚拟重成像模型进行推扫式高分辨率光学卫星颤振下扭曲成像影像重建的方法可以有效消除平台颤振下高分某型号卫星影像成像的扭曲变形。

参考文献 (References)

[1] 范大鹏, 刘华, 朱华征, 等. 结构振动对卫星图像质量的影响分析[C]//高分辨率遥感卫星结构振动及控制技术研讨会, 2011.
FAN Dapeng, LIU Hua, ZHU Huazheng, et al. Effect of

structural vibration analysis of satellite image quality [C]// Proceedings of High-resolution Remote Sensing Satellite Structural Vibration and Control Technology Seminar, 2011. (in Chinese)

[2] 徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 259-263.
XU Peng, HUANG Changning, WANG Yongtian, et al. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 259-263. (in Chinese)

[3] Roques S, Jahan L, Rougé B, et al. Satellite attitude instability effects on stereo images[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004.

[4] Mattson S, Robinson M, McEwen A, et al. Early assessment of spacecraft jitter in LROC-NAC [C]//Proceedings of 41st Lunar and Planetary Institute Science Conference, 2010.

[5] Mattson S, Boyd A, Kirk R, et al. HiJACK: correcting spacecraft jitter in HiRISE images of Mars [C]//Proceedings of European Planetary Science Congress, 2009.

[6] 朱映, 王密, 李树文, 等. 基于多光谱影像的资源三号卫星平台颤振检测方法研究[C]//第二届高分辨率对地观测学术年会, 2013.
ZHU Ying, WANG Mi, LI Shuwen, et al. Detection of ZY-3 satellite platform jitter using multi-spectral imagery [C]// Proceedings of the Second Annual Conference of High-resolution Earth Observation, 2013. (in Chinese)

[7] 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.

[8] Iwata T, Kawahara T, Muranaka N, et al. High-bandwidth attitude determination using jitter measurements and optimal filtering[C]//Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 2009.

[9] Iwata T, Kawahara T, Muranaka N. High-bandwidth pointing determination for the advanced land observing satellite (ALOS) [C]//Proceedings of 24th International Symposium on Space Technology and Science, 2004.

[10] 刘斌. 高分辨光学卫星空地一体化定姿及姿态抖动下影像几何处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
LIU Bin. Space-ground integrated attitude determination of high-resolution satellite and geometric image processing under jitter conditions [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese)

[11] 吕振铎, 雷拥军. 卫星姿态测量与确定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
LYU Zhenduo, LEI Yongjun. Satellite attitude measurement and determination [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013. (in Chinese)

[12] Wertz J R. Spacecraft attitude determination and control [M]. Netherlands, USA: Springer Netherlands, 1978.

[13] Markley F L, Crassidis J, Cheng Y. Nonlinear attitude filtering methods [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005.

[14] Jacobsen K. Geometry of satellite images-calibration and mathematical models [D]. Germany: University of Hannover, 2007.

[15] 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.