

## 基于高频角位移数据的卫星平台颤振检测与影像几何质量补偿

胡堃<sup>\*①②③</sup> 黄旭<sup>③</sup> 张永军<sup>④</sup> 尤红建<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

<sup>③</sup>(俄亥俄州立大学土木、环境与大地测量工程系 美国哥伦布市 43210)

<sup>④</sup>(武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430079)

**摘要:** 随着对地观测卫星成像分辨率和在轨机动性能的提升,卫星平台姿态的高频颤振对成像几何质量的影响更加显著。鉴于传统的基于分时成像数据的颤振检测和补偿方法具有密集匹配计算量大,误差干扰程度高和无法分解各旋角方向的颤振量等缺点。该文以国产遥感系列光学卫星搭载的高频角位移设备为例,研究基于角位移高频测姿数据的直接颤振检测方法和影像几何质量补偿方法。其中包括角位移数据的加窗 FIR 滤波预处理,在俯仰、翻滚和偏航方向随时间变化的颤振曲线分布规律分析,以及基于角位移数据的影像直接定位补偿。将高频颤振补偿应用于卫星平台的姿态复原和基于严格成像几何模型的几何纠正解算。采用北京地区遥感系列光学卫星数据的实验结果表明,该文方法能够显著地改善高频颤振检测的精度和可靠性,有效地提高颤振补偿后卫星影像的内部几何质量,其中长度变形精度提高了 0.5 个像素左右。

**关键词:** 卫星摄影测量; 角位移数据; 高频颤振检测; 直接定位补偿; 几何质量评价

中图分类号: P236

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1525-07

DOI: 10.11999/JEIT170990

## Satellite Platform Jitter Detection and Image Geometric Quality Compensation Based on High-frequency Angular Displacement Data

HU Kun<sup>①②③</sup> HUANG Xu<sup>③</sup> ZHANG Yongjun<sup>④</sup> YOU Hongjian<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Department of Civil, Environmental and Geodetic Engineering, The Ohio State University, Columbus 43210, USA)

<sup>④</sup>(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** With the improvement of imaging resolution and on-orbit mobility of earth observation satellites, the imaging geometric quality is more apparently influenced by the attitude's high-frequency jittering of satellite platform. The traditional time-division imaging data based jitter detection and compensation methods have many drawbacks, which include large amount of calculation and high degree of error interference in dense matching, and it is unable to decompose the jitter quantity in each rotation angle direction. This paper takes the high-frequency angular displacement equipment which is carried by China's remote sensing optical satellite for example, studies on the direct jitter detection method and the image geometric quality compensation method based on high-frequency attitude measurement angular displacement data, which include the windowed FIR filter pre-processing of angular displacement data, the phase distribution analysis on time-dependent jitter curve in pitch, roll and yaw directions, as well as image direct positioning compensation based on angular displacement data. The high-frequency jitter compensation is applied to attitude recovery and geometric rectification based on strict imaging geometric model.

收稿日期: 2017-10-23; 改回日期: 2018-04-12; 网络出版: 2018-05-10

\*通信作者: 胡堃 khk@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41701539, 41701540), 北京市自然科学基金(4184107), 国家留学基金(201704910279)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41701539, 41701540), The Beijing Natural Science Foundation (4184107), The China Scholarship Council (201704910279)

The experimental results of China's remote sensing satellite images in Beijing area illustrate that the methods proposed in this paper can significantly improve the accuracy and reliability of the high-frequency jitter detection, and can effectively improve the internal geometric quality of satellite image after jitter compensation. For example, the length deformation accuracy can be improved by 0.5 pixel.

**Key words:** Satellite photogrammetry; Angular displacement data; High-frequency jitter detection; Direct positioning compensation; Geometric quality evaluation

## 1 引言

高分辨率光学卫星在轨运行期间, 由于变轨导致的冷热交变或是星上搭载的运动部件周期性运动等因素, 卫星本体会产生一种幅值较小、频率较高的姿态振动。当振动的频率和幅值达到某一临界值就会变得发散, 从而产生颤振响应。卫星在轨成像过程中, 平台颤振会导致光学相机的视轴产生周期性的姿态抖动, 进而导致 CCD 扫描行的相对位置不稳。这一方面会使成像采集的地物发生错位, 降低影像绝对定位精度; 另一方面会使多片 CCD 间的重叠区发生错位, 降低影像拼接精度。此外, 在 TDICCD 焦平面上也会出现明显的像移现象, 破坏其与光生电荷运动的同步性, 从而产生多级积分影像的误匹配和影像细节模糊与扭曲<sup>[1,2]</sup>, 降低了高分辨率光学卫星成像的辐射和几何质量<sup>[3,4]</sup>。

卫星平台高频颤振对影像质量的影响程度随传感器空间分辨率的提升更加明显, 采用星敏感器和陀螺等测量的姿态数据质量相对较低, 包含卫星平台颤振的姿态数据直接参与成像几何模型的计算会降低几何定位的精度, 并且每张影像的定位误差都具备各自的特点, 误差向量的方向和大小均不一致<sup>[5]</sup>。因而, 高频颤振的研究逐渐受到卫星总体设计、相机设计以及地面处理与应用部门的重视<sup>[6]</sup>。

国内外众多研究机构对卫星平台高频颤振的特性进行了各类在轨检测和特性分析<sup>[7]</sup>。这些研究主要分为两类: 基于数字图像处理振动曲线提取的高频颤振研究和基于精密检测设备的高频颤振研究<sup>[8]</sup>。其中, 基于数字图像处理振动曲线提取的高频颤振研究是间接地利用了高分辨率光学卫星本身的各种分时成像数据, 基于视差成像原理和各种数学方法检测和补偿姿态颤振。例如, Timoner 等人<sup>[9]</sup>利用视频图像序列获取了运动测量中的颤振参数; Gadi 等人<sup>[10]</sup>和 Haik 等人<sup>[11]</sup>分别利用 CCD 交错排列的方式检测颤振曲线; Roques 等人<sup>[12]</sup>利用立体像对分别从翻滚、俯仰和偏航 3 个方向进行颤振的识别和移除; Amberg 等人<sup>[13]</sup>针对高分辨率敏捷成像的 Pleiadse 卫星进行颤振规律的探索。在国内, Tong 等人<sup>[14,15]</sup>利用资源 3 号卫星的 3 线阵立体像对, 孙韬等人<sup>[16]</sup>利用资源 3 号卫星五谱段合一的多光谱影像对, Jiang 等人<sup>[17]</sup>利用资源 1 号 02C 星的多光谱影像等

分别进行了高频颤振的检测与补偿研究。

上述基于数字图像处理振动曲线提取的高频颤振研究不依赖于特殊的姿态传感器设备, 具有普遍性和通用性等优势。但该类方法均属于事后的被动检测, 主要存在 3 个方面的不足: 其一是影像间密集匹配的计算量大, 为了获取精确的配准误差曲线, 需要在沿轨和垂轨方向密集地采样统计; 其二是严重依赖于影像密集匹配和粗差探测剔除的精度, 无法排除匹配误差对高频颤振检测精度的干扰; 其三是仅能获取在沿轨和垂轨方向的颤振量, 由于配准误差曲线方程的病态性, 无法精确反求在 3 个欧拉角方向的颤振量。

基于精密检测设备的高频颤振研究能够很好地解决上述问题。该类方法利用了高精度陀螺仪、加速度传感器和角位移传感器等高频角度传感器直接测量卫星的振动谱、振动加速度、瞬态加速度、角加速度、角速度和角位移等信息, 并实现颤振补偿<sup>[7,18,19]</sup>。典型的设备包括国际空间站的空间加速度测量系统 SAMS-II 和高级微重力加速度测量系统 AMAMS, 美国的磁流体动力学效应 MHD 角速度传感器, 以及日本的 MHD\_ARS\_12G。这些设备在卫星在轨数据处理中均有应用<sup>[20]</sup>。日本国家空间发展署利用 ETS-VI 实验卫星进行的颤振实验表明, 该平台的颤振能量有 83.6%集中在 0.39~10 Hz 之间, 99%以上在 102 Hz 以下<sup>[19]</sup>。

国内学者在基于精密检测设备的高频颤振研究方面起步较晚, 这主要受到我国星载精密测姿设备数量的限制。如许博谦<sup>[3]</sup>和王泽宇等人<sup>[21]</sup>分别针对不同的高分辨率光学遥感卫星平台开展微振动试验, 许斌等人<sup>[22]</sup>提出了一种基于高频角位移的高分光学卫星影像内部误差补偿方法。本文针对我国遥感系列光学卫星实际搭载的高频角位移精密测姿设备, 探索性地研究高频角增量数据提取、预处理方法, 高频颤振的波谱和频谱统计分析方法, 以及基于角位移高频测姿数据的影像直接定位补偿方法, 能够显著地消除卫星平台颤振导致的成像定位误差, 消除影像内部几何畸变, 提高几何质量, 有利于后续的影响高级处理与应用。

## 2 高频角位移设备姿态颤振的测量原理

为了直接获取更加精确的平台高频颤振数据,我国遥感系列光学卫星的环境监测分系统搭载了高频角位移测姿设备。该设备采用刚体固联方式安装于卫星平台上,在相机开机工作时提前加电记录测量数据,在成像结束后停止记录。它是一种基于 Sagnac 效应的环形激光器,使同一光源发出的光线分别沿环形通路的两个方向运行一周后汇合。当环形激光器存在姿态旋转时,两束光线光程差产生的干涉条纹就会发生移动,并且与姿态旋转的角速度成正比。因此,高频角位移设备能够测量卫星在轨成像过程中本体坐标系 3 轴方向上的相对角增量数据,并以较高的频率输出<sup>[22]</sup>。

角增量数据表示该采样时刻相比上一采样时刻,在时间间隔内在 3 个角方向上产生的角位移变化量。其输出频率可达上万 Hz,远远超过线阵 CCD 的扫描频率(通常为 1000~2000 Hz)和星敏感器的姿态测量频率(通常为 2~8 Hz)。角位移设备输出的高频角增量与角度直接相关,能够直接反映卫星平台高频颤振在俯仰、翻滚和偏航方向的角度瞬时变化,对于直观研究平台颤振规律具有显著的优势。

## 3 角位移数据预处理与频谱统计分析

### 3.1 高频角位移数据预处理方法

遥感系列光学卫星在获取条带影像数据的同时记录高频角增量数据。本文选取的数据轨道编号为 232930,角增量数据的采样输出频率为 10000 Hz,测量频率范围为 2~450Hz,测量精度为 0.05 角秒(Second of arc)( $3\sigma$ )。角位移数据通过 LVDS(Low Voltage Differential Signaling)接口随整星数据包下传,需要根据卫星数据格式,将角位移数据包从整星数据包提取,再将具体角位移数据从角位移数据包中提取和解析。

由于角位移数据的采样频率很高且采样点难免存在各类系统和偶然误差,如角位移设备安装误差、标度因素误差、漂移误差以及测量噪声等,因而本文在使用角位移数据之前采用加窗 FIR 滤波器需进行低通滤波处理。该滤波器容易获取严格的线性相位,能较好地避免高频角位移数据的相位失真,并且稳定和容易实现。FIR 滤波器的系统差分方程描述为

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i x(n-i) \quad (1)$$

其中,  $x(n)$  为有限个采样数值的输入序列;  $y(n)$  为输出序列,即滤波后的角增量值;  $a_i$  为 FIR 滤波器的系数;  $N$  为滤波器的阶数。对式(1)进行  $z$  变换,可

得 FIR 滤波器的系统传递函数为

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i z^{-i} \quad (2)$$

FIR 滤波器的设计思想是:首先令  $z = e^{j\omega}$ , 其中  $\omega$  为数字角频率;给定一个理想的频率响应  $H_d(e^{j\omega})$ ;然后设计时间窗口,采用频率响应函数逐步逼近  $H_d(e^{j\omega})$ 。其中,频率响应函数  $H(e^{j\omega})$  为

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-jn\omega} \quad (3)$$

本文采用升余弦 Hanning 窗对频率响应进行加窗设计,该方法可以看做是 3 个矩形时间窗的频谱之和,能够使主瓣加宽并降低,旁瓣互相抵消,消去高频干扰和漏能。其窗函数  $W(n)$  可表示为

$$W(n) = 0.5 \left( 1 - \cos \frac{2\pi n}{N-1} \right) \quad (4)$$

对高频角位移数据进行处理的加窗 FIR 滤波器的参数设置,如表 1 所示。

表 1 角位移数据采用的加窗 FIR 滤波器的参数设置

滤波器指标类型	具体技术指标
滤波器类型	低通滤波器
采样频率(Hz)	10000
抽头数(个)	600
窗类型	Hanning 窗
最低截止频率(Hz)	450

为清晰地表示对高频角位移数据进行加窗 FIR 低频滤波的效果,实验中选取角位移数据中前 500 个分别在俯仰角 pitch、翻滚角 roll 和偏航角 yaw 3 个方向的角增量采样数据,角增量单位为角秒。本文比较了加窗 FIR 低频滤波前后的角增量数据分布情况,如图 1 所示。

由图 1 观察可知,通过分析高频角位移设备在俯仰角 pitch、翻滚角 roll 和偏航角 yaw 3 个方向观测的角增量变化,表明该高分辨率遥感系列光学卫星在成像过程中,在 3 个旋角方向均存在明显的且随时间规律变化的高频颤振。对于原始观测的高频角位移数据采用加窗 FIR 低频滤波后,能够在较好地反映高频颤振变化规律的前提下,提高观测数据的连续性,并有效地剔除明显偏离的角增量粗差,取得较好的结果,并为后续高频角位移数据的分析和处理创造了良好的条件。

### 3.2 角位移数据频谱分布实验分析

为了进一步统计在一段时期内,高频颤振在俯仰角 pitch、翻滚角 roll 和偏航角 yaw 3 个方向上的

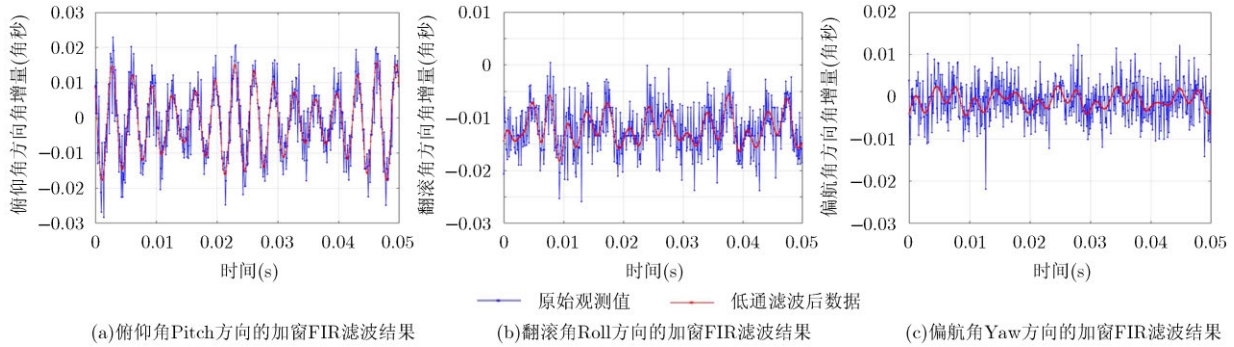


图 1 高频角位移数据 500 个采样点的加窗 FIR 滤波结果

振动规律, 实验中选取高频角位移设备在 6 s 内连续获取的 60000 个角增量采样数据进行高频颤振统计分析。实验结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 由高频角位移设备观测得到的卫星平台高频颤振, 在俯仰角 pitch、翻滚角 roll 和偏航角 yaw 3 个方向上一段时期内都保持稳定的颤振规律。其中俯仰角 pitch 的振幅在  $-0.02 \sim 0.02$  角秒之间; 翻滚角 roll 的振幅在  $-0.02 \sim -0.002$  角秒之间; 偏航角 yaw 的振幅在  $-0.0005 \sim 0.0004$  角秒之间。说明高频颤振主要存在俯仰和翻滚两个方向, 而偏航方向很小; 翻滚方向的高频颤振存在系统的方向性。

实验中继续统计并验证了该遥感系列光学卫星在未进行机动成像期间的 8 min 内在 3 个角度方向上均满足同样的高频颤振规律, 说明高频颤振的固有性和稳定性。该卫星的轨道高度为 500 km, 影像的地面分辨率为 0.45 m。当在俯仰方向上存在 0.02 角秒的高频颤振时, 会导致影像在该方向的内部畸变达到 0.05 m, 即  $1/9$  个像元的定位误差; 当卫星在机动成像过程中, 其卫星平台的高频颤振会出现

明显加剧, 当仅在俯仰方向上高频颤振的幅度达到 0.2 角秒时, 影像内部便会产生 1 个像元的几何畸变。因此, 对卫星平台的姿态高频颤振进行检测与补偿具有重要的实际意义。

#### 4 基于高频角位移数据的颤振补偿方法

低频的星敏感器测姿数据主要用于高精度的影像外部几何定位, 其输出单个历元时刻在俯仰、翻滚和偏航 3 个方向的绝对姿态, 且误差不会累积; 而高频角位移数据能够提供每条 CCD 扫描线对应的瞬时姿态, 用于影像内部几何精度的优化。在传感器高精度在轨几何定标、影像直接定位和几何纠正等几何精准处理工作中, 将星敏感器测姿数据和高频角位移数据联合解算, 可提供更加密集且精准的姿态数据, 改善影像的几何质量。星敏感器测姿数据和高频角位移数据的组合如图 3 所示。

基于角位移数据的卫星平台姿态高频颤振影像直接定位补偿是建立在严格成像几何模型的基础上。将成像时刻拟合的瞬时角增量数据代入线阵推扫式卫星严密成像几何模型中, 整理可得式(5):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_{\text{cam}} = \lambda R_{\text{ins}}^{\text{cam}}(\text{pitch, roll, yaw}) \begin{bmatrix} R_{\text{J2000}}^{\text{ins}}(t) R_{\text{WGSS4}}^{\text{J2000}} \\ X_g - X_{\text{GPS}}(t) \\ Y_g - Y_{\text{GPS}}(t) \\ Z_g - Z_{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix}_{\text{WGSS4}} - R_{\text{sat}}^{\text{ins}} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{Jsat}} \quad (5)$$

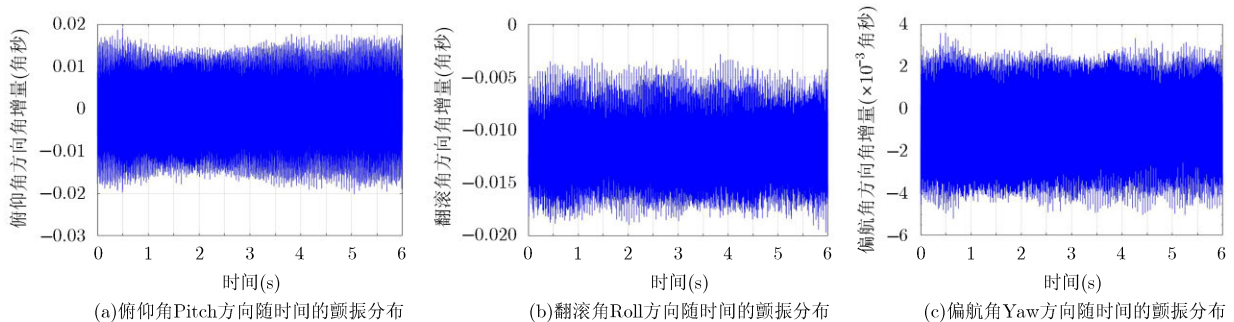


图 2 高频角位移数据 60000 个采样点随时间的颤振分布



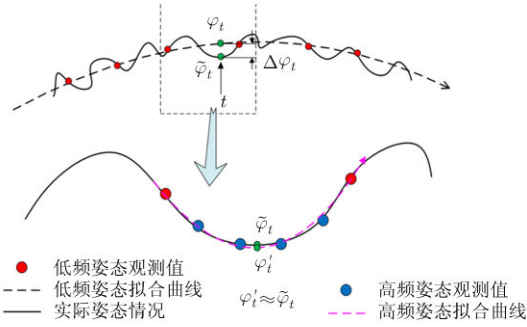


图 3 星敏感器测姿与高频颤振补偿相结合的姿态数据精细化示意图

其中,  $(x, y, -f)_{\text{cam}}$  表示成像焦平面上的 CCD 探元在相机坐标系下的坐标,  $x$  沿线阵 CCD 排列方向,  $y$  沿飞行方向, 对任一线阵 CCD 扫描行, 满足  $y = 0$ ;  $(X_g, Y_g, Z_g)_{\text{WGS84}}$  表示像点  $(x, y)$  对应的物方点在 WGS84 坐标系下的坐标;  $(X_{\text{GPS}}(t), Y_{\text{GPS}}(t), Z_{\text{GPS}}(t))_{\text{WGS84}}$  表示该扫描行对应瞬时时刻的 GPS 天线相位中心在 WGS84 坐标系下的坐标;  $(B_x, B_y, B_z)_{\text{sat}}$  表示传感器投影中心相对于 GPS 天线相位中心的偏移矢量在卫星本体坐标系下的坐标;  $\mathbf{R}_{\text{ms}}^{\text{cam}}(\text{pitch}, \text{roll}, \text{yaw})$  表示星敏感器坐标系相对于相机坐标系的旋转矩阵;  $\mathbf{R}_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}}$  表示地球固定参考系 (CTS) 相对于空间固定惯性参考系 (CIS) 的旋转矩阵, 这里空间固定惯性参考系采用 GPS 位置观测数据所在的 WGS84 坐标系描述;  $\lambda$  为物方空间到像方空间的比例尺系数。

需要特殊指出的,  $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{ins}}(t)$  为星敏感器测姿数据 (空间固定惯性参考系 (CIS) 相对于星敏感器坐标系的旋转角) 和高频角位移数据在  $t$  时刻联合测得的姿态,  $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{ins}}(t)$  由 3 个正交旋角  $(\text{pitch}'(t), \text{roll}'(t), \text{yaw}'(t))$  组成, 具体形式为

$$\left. \begin{aligned} \text{pitch}'(t) &= \text{pitch}_{\text{Star}}(t) + \text{pitch}_{\text{Ang}}(t) \\ \text{roll}'(t) &= \text{roll}_{\text{Star}}(t) + \text{roll}_{\text{Ang}}(t) \\ \text{yaw}'(t) &= \text{yaw}_{\text{Star}}(t) + \text{yaw}_{\text{Ang}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,  $(\text{pitch}_{\text{Star}}(t), \text{roll}_{\text{Star}}(t), \text{yaw}_{\text{Star}}(t))$  为星敏感器

在  $t$  时刻获取的测姿数据,  $(\text{pitch}_{\text{Ang}}(t), \text{roll}_{\text{Ang}}(t), \text{yaw}_{\text{Ang}}(t))$  为高频角位移数据在  $t$  时刻获取的角增量数据。分别根据行时文件在星敏感器测姿数据文件和高频角位移数据文件内插得到。

### 5 影像颤振补偿与几何质量评价实验

为验证基于角位移数据的姿态高频颤振补偿对于卫星影像几何质量的优化, 本节选用经高精度几何定标后的 L1 级遥感系列光学卫星多光谱和全色影像进行数据实验, 分别对是否包含高频颤振补偿的影像进行内部和外部几何质量评价。

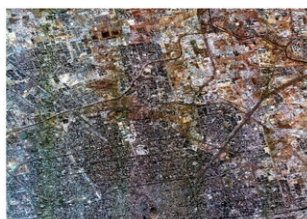
本组实验中遥感系列光学卫星多光谱和全色影像覆盖北京地区, 基本数据规格说明如表 2 所示。

表 2 北京地区遥感系列光学卫星影像基本数据规格说明

数据指标类型	具体技术指标
传感器类型	多光谱 MSS(红、绿、蓝和红外波段)
成像时间	2015 年 7 月 19 日
成像侧摆角 (°)	28.833
成像俯仰角 (°)	35.512
扫描线行数	10000
地面分辨率(m)	1
波段间安装距离(pixel)	76
波段间成像时差(ms)	约 40

北京地区遥感系列光学卫星多光谱和全色影像的缩略图如图 4 所示。

内部几何质量评价是统计几何纠正后影像内部畸变大小和方向的分布情况, 分为长度变形精度评价和角度变形精度评价。其中长度变形精度评价是统计几何纠正后影像上任意两点的地理坐标距离与实际地物距离的均方根误差, 并统计相对误差。角度变形精度评价是统计几何纠正后影像任意两条直线的夹角与实际地物直线夹角的差异。外部几何质量评价, 即绝对定位精度评价, 是统计高频颤振补偿前后影像对应的地理坐标在飞行方向和扫描方向上与实际地物地理位置的均方根误差。



(a) 多光谱影像的缩略图



(b) 全色影像的缩略图

图 4 北京地区遥感系列光学卫星多光谱和全色影像的缩略图

进行高频颤振补偿前后的多光谱和全色影像几何质量评价的实验结果如表3所示。

表3 高频颤振补偿前后多光谱和全色影像的几何质量评价结果

类型	质量评价内容	具体参数	多光谱影像	全色影像
姿态高频颤振补偿前	内部几何精度评价	长度变形精度 (pixel)	2.328516	2.297935
		角度变形精度 (°)	0.621664	0.583275
	外部几何精度评价	绝对定位精度 (pixel)	9.488308	8.734283
		单点最大误差 (pixel)	13.895425	12.373627
姿态高频颤振补偿后	内部几何精度评价	长度变形精度 (pixel)	1.843849	1.683357
		角度变形精度 (°)	0.530665	0.378284
	外部几何精度评价	绝对定位精度 (pixel)	9.213973	8.326826
		单点最大误差 (pixel)	13.336202	11.906717

由表3可知,采用本文所述的基于角位移数据的卫星平台高频颤振检测与补偿方法,能够有效地提高遥感系列光学卫星多光谱和全色影像的内部和外部几何质量。其中,内部几何质量相比于外部几何质量的改善更加明显,特别是长度变形精度提高了0.5个像素左右。该实验结果表明,姿态高频颤振补偿能有效地减少由于卫星平台颤振导致的内部几何畸变。

## 6 结束语

本文紧密结合高分辨率光学遥感卫星影像精细化处理工作中,对于消除卫星平台姿态高频颤振影响和优化成像几何质量的迫切需求,以高分辨率光学遥感卫星搭载的高频角位移设备为例,研究基于精密高频测姿设备的卫星平台高频颤振检测与几何质量补偿的原理及方法。其中主要包括高频角增量数据的加窗FIR滤波预处理方法,各欧拉角方向的颤振曲线相位分析方法,以及基于角位移数据的影像严格模型直接定位补偿方法,为了验证补偿后影像的几何质量,本文还采用了高分辨光学遥感卫星影像的内部和外部几何质量评价方法。最终形成了基于角位移数据的预处理、颤振检测、定位补偿和质量评价完整解决方案,可广泛应用于影像数据的精准处理。本文的主要工作成果总结如下:

(1)当前我国基于高频精密测姿设备的卫星平台高频颤振检测与补偿领域的研究尚处于起步阶段,本文探索性地结合遥感系列光学卫星搭载的高频角位移设备所获取的高频测姿数据进行处理和分

析。

(2)本文提出了基于加窗FIR滤波的高频角增量数据提取和解析预处理方法,能够在保持高频颤振变化测量精度的前提下,提高观测数据的连续性,并有效剔除角增量粗差,有利于角位移数据的后续处理。

(3)本文采用高频角位移设备在6s内连续获取的60000个角增量采样数据进行高频颤振统计分析,获取了在俯仰、翻滚和偏航方向独立的颤振规律,解决了传统方法无法分解欧拉角的难题。

(4)本文提出了基于角位移高频测姿数据的影像直接定位补偿方法,将星敏感器测姿数据和角位移颤振补偿数据有效结合,优化严密成像几何模型,最大程度地消除平台颤振导致的影像内部几何畸变。

实验结果表明,本文的方法能够有效检测分析出卫星平台的颤振规律,显著提高颤振补偿后影像的内部几何质量,为影像后续的高级处理与应用创造了良好的条件。

此外,为进一步提高卫星平台姿态的补偿精度和成像质量,基于角位移高频测姿数据的颤振检测与补偿研究可向基于多模型和自适应的方向发展,建立模型预测和评价方法,并研究基于高频颤振的影像像移补偿技术,从几何和辐射两个方面综合优化卫星影像的质量,使影像更加精确地纳入地理参考框架。

## 参考文献

- [1] 刘光林, 杨世洪, 吴钦章. 一种基于CCD多电极结构的电子像移补偿方法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 974-951. doi: 10.3321/j.issn:1005-0086.2008.07.024.  
LIU Guanglin, YANG Shihong, and WU Qinzhang. An image motion compensation method based on multiphase CCD[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(7): 947-951. doi: 10.3321/j.issn:1005-0086.2008.07.024.
- [2] 石俊霞, 薛旭成, 郭永飞. 卫星振动对TDICCD相机成像质量的影响及补偿方法[J]. 光电工程, 2010, 37(12): 11-16. doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.12.003.  
SHI Junxia, XUE Xucheng, and GUO Yongfei. Effect of satellite vibration on imaging quality of TDICCD camera and compensation method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(12): 11-16. doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.12.003.
- [3] 许博谦. 星载相机微振动下卫星影像补偿技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.  
XU Boqian. Study on image compensation technology for spaceborne cameras under micro-vibration circumstances[D]. [Ph.D. dissertation], Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [4] 樊超, 李英才, 易红伟. 颤振对TDICCD相机像质的影响分析[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1714-1717.  
FAN Chao, LI Yingcai, and YI Hongwei. Influence analysis of

- buffeting on image quality of TDICCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(9): 1714-1717.
- [5] 孙阳. 卫星平台在轨颤振对高分辨率遥感器成像质量影响的研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- SUN Yang. On-orbit platform jitter effect on image quality of high-resolution remote sensor[D]. [Ph.D. dissertation], Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [6] 朱映, 王密, 潘俊, 等. 利用多光谱影像检测资源三号卫星平台颤振[J]. *测绘学报*, 2015, 44(4): 399-406. doi: 10.11947/j.AGCS.2015.20140024.
- ZHU Ying, WANG Mi, PAN Jun, *et al.* Detection of ZY-3 satellite platform jitter using multi-spectral imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4): 399-406. doi: 10.11947/j.AGCS.2015.20140024.
- [7] SUDEY JR J and SCHULMAN J R. In-orbit measurements of Landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances[J]. *Acta Astronautica*, 1985, 12(7/8): 485-503. doi: 10.1016/0094-5765(85)90119-5.
- [8] 刘海龙. 空间相机振动参数检测及降质卫星影像复原[D]. [博士学位论文], 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- LIU Hailong. Space camera vibration parameters detection and blurred image restoration[D]. [Ph.D. dissertation], Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [9] TIMONER S J and FREEMAN D M. Multi-image gradient based algorithms for motion estimation[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(9): 2003-2016. doi: 10.1117/1.1391495.
- [10] GADI H, YITZHAK Y, KOPEIKA N S, *et al.* Restoration of images captured by a staggered time-delay and integration camera in the presence of mechanical vibrations[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(22): 4345-4354. doi: 10.1364/AO.43.004345.
- [11] HAIK O and YITZHAK Y. Superresolution reconstruction of a video captured by a vibrated time delay and integration camera[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, 15(2): 113-128. doi: 10.1117/1.2194042.
- [12] ROQUES S, JAHAN L, ROUGE B, *et al.* Satellite attitude instability effects on stereo images[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, 2004, 3: 477-480. doi: 10.1109/ICASSP.2004.1326585.
- [13] AMBERG V, DECHOZ C, BERNARD L, *et al.* In-flight attitude perturbances estimation: Application to PLEIADES-HR satellites[C]. Proceedings of the International Society for Optical Engineering, San Diego, 2013, 8866: 886612. doi: 10.1117/12.2023275.
- [14] TONG Xiaohua, LI Lingyun, LIU Shijie, *et al.* Detection and estimation of ZY-3 three-line array image distortions caused by attitude oscillation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101: 291-309. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.01.003.
- [15] TONG Xiaohua, XU Yusheng, YE Zhen, *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. doi: 10.1109/TGRS.2014.2379435.
- [16] 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): 276-282. doi: 10.3788/AOS201434.0728005.
- SUN Tao, LONG Hui, ZHAO Dong, *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): 276-282. doi: 10.3788/AOS201434.0728005.
- [17] JIANG Yonghua, ZHANG Guo, TANG Xinming, *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. doi: 10.1109/TGRS.2014.2316419.
- [18] 谭天乐, 朱春艳, 朱东方, 等. 航天器微振动测试、隔离、抑制技术综述[J]. *上海航天*, 2014, 31(6): 36-45. doi: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2014.06.009.
- TAN Tianle, ZHU Chunyan, ZHU Dongfang, *et al.* Overview of micro-vibration testing, isolation and suppression technology for spacecraft[J]. *Aerospace Shanghai*, 2014, 31(6): 36-45. doi: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2014.06.009.
- [19] TOYOSHIMA M and 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. doi: 10.1117/1.1355976.
- [20] 霍红庆, 马勉军, 李云鹏, 等. 卫星微角颤振高精度测量技术[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(3): 4-6. doi: 10.13873/j.1000-97872011.03.015.
- HUO Hongqing, MA Mianjun, LI Yunpeng, *et al.* High precision measurement technology of satellite's angle micro vibration[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(3): 4-6. doi: 10.13873/j.1000-97872011.03.015.
- [21] 王泽宇, 邹元杰, 焦安超, 等. 某遥感卫星平台的微振动试验研究[J]. *航天器环境工程*, 2015, 32(3): 278-285. doi: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.03.010.
- WANG Zeyu, ZOU Yuanjie, JIAO Anchao, *et al.* The jitter measurement and analysis for a remote sensing satellite platform[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32(3): 278-285. doi: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.03.010.
- [22] 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): 293-300. doi: 10.3788/aos201636.0928002.
- XU Bin, LEI Bin, FAN Chengcheng, *et al.* A high-frequency angular displacement based internal geometric accuracy compensation method for high-resolution optical satellite images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 293-300. doi: 10.3788/aos201636.0928002.
- 胡 堃: 男, 1986年生, 助理研究员, 博士, 研究方向为高分辨率光学卫星数据的精准处理、综合分析与质量评价。
- 黄 旭: 男, 1987年生, 工程师, 博士, 研究方向为多视航空和近景影像的密集匹配与3维重建。
- 张永军: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为航天航空和低空摄影测量、影像匹配与3维城市重建。
- 尤红建: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR影像的几何精校正、遥感影像的精配准与变换检测。