

基于高频角位移的高分辨率光学卫星影像 内部误差补偿方法

许 斌¹ 雷 斌² 范城城^{3*} 丁一帆¹ 孙 韬²

¹北京市遥感信息研究所处理中心, 北京 100192

²中国科学院电子学研究所空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190

³武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

摘要 针对当前震颤影像内部误差难以补偿的问题, 提出一种基于高频角位移的稳态重成像模型实现高分辨率 (HR) 卫星震颤检测和内部几何精度补偿, 并进一步采用几何定标场的数字正射影像/数字高程模型参考数据进行精度验证。以 2015 年发射的某型号 HR 光学卫星为例, 分别进行了以下三个实验: 平台震颤检测、姿态数据处理滤波器收敛性分析以及震颤补偿效果验证。结果表明, 所设计的平台震颤地面补偿模型可以有效改善成像质量, 且补偿后的震颤影像内部几何精度可以达到 1.5 pixel。

关键词 遥感; 高分辨率光学卫星; 震颤补偿; 星敏感器; 高频角位移; 稳态成像模型

中图分类号 P236 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0928002

Internal Error Compensation Method Based on High-Frequency Angular Displacement for High-Resolution Optical Satellite Images

Xu Bin¹ Lei Bin² Fan Chengcheng³ Ding Yifan¹ Sun Tao²

¹ Processing Center, Institute of Beijing Remote Sensing Information, Beijing 100192, China

² Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing and Application System,
Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

Abstract In order to address the critical compensation issue for attitude jitter in high-resolution (HR) images, a steady-state imaging model based on high-frequency angular displacement is proposed to detect attitude jitter and internal geometric accuracy compensation of HR satellite, and the accuracy of geometric calibration field is validated using digital orthograph images/digital elevation model reference data. In the case of HR optical satellite launched in 2015, three experiments are carried out as follows: platform jitter detection, convergence analysis of attitude processing filter, and verification of jitter compensating effect. The compensation results show that the proposed platform jitter compensation model can effectively improve the imaging quality, and the internal geometric accuracy of jitter image reaches 1.5 pixel after compensation.

Key words remote sensing; high-resolution optical satellite; jitter compensation; star sensor; high-frequency angular displacement; steady-imaging model

OCIS codes 280.4788; 200.4560; 200.3050

收稿日期: 2016-03-24; 收到修改稿日期: 2016-04-24

作者简介: 许 斌(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事遥感卫星数据处理与应用方面的研究。

E-mail: xubin_iecas@163.com

导师简介: 雷 斌(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感信息处理与应用方面的研究。

E-mail: leibin@mail.ie.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: ccfan@whu.edu.cn

1 引 言

卫星平台震颤是影响高分辨率光学卫星影像内部几何质量的重要因素之一^[1]。所谓卫星平台震颤是指卫星在轨运行期间,由于变轨导致的冷热交变,或因星上搭载的运动部件周期性运动等因素,卫星本体产生一种幅值较小、频率较高的颤振响应,将直接导致成像过程中非平稳采样,对推扫成像影像的相对几何定位精度产生影响^[2]。根据摄影测量基本原理仿真计算,在理想条件下,对于轨道高度为 500 km,空间分辨率为 3 m 的光学卫星,若平台存在 0.36" 的未模型化低频震颤,由平台震颤引起的单景影像内部几何误差约为 0.4 pixel;在同样卫星平台成像条件下,若光学卫星空间分辨率达到 0.3 m,平台震颤引起的单景内部几何误差将达到 4~5 pixel,随着空间分辨率进一步提高,平台震颤引起的内部几何误差将达到十几个像素,这将严重影响卫星影像后续的正射校正,以及多源数据的配准、融合、变化检测等遥感应用^[3]。

平台的震颤主要来源于卫星姿态调整、指向控制、各运动部件的运动以及外部环境的影响^[1]。针对卫星平台震颤对光学卫星成像的影响以及相关的补偿方法,国内外学者已经开展了相关的研究工作。文献[1-4]主要研究卫星平台震颤的规律以及不同频率与幅度的震颤对光学卫星成像质量的影响。文献[5-10]提出基于影像对卫星平台的震颤进行检测与补偿,该方法主要基于视差成像的原理进行检测与补偿,属于被动的平台震颤检测补偿方法。文献[11-12]提出基于角位移、角速度以及角加速度等高频角度传感器直接测量卫星平台存在的震颤,但是如何基于高频测量信息对震颤影像进行检测与补偿没有给出具体方法。综上所述,基于影像的震颤分析是一种较为被动的震颤处理方法,依赖于匹配、特征提取精度,由于缺少绝对参考,在无震颤测量数据条件下所发挥的效能有限。一直以来,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与陀螺的组合,但是二者组合后频率较低(一般为 10 Hz),无法测量高频颤振信息,故无法直接姿态信息对颤振影像进行补偿。

针对上述存在的问题,本文提出了一种基于高频角位移的稳态重成像模型对卫星影像进行震颤检测与补偿方法,并采用 2015 年发射的某型号高分辨率光学卫星在轨数据进行分析,利用高精度几何定标场数据对本文算法进行验证与评价。

2 基于高频角位移的光学影像震颤补偿方法

2.1 星敏感器与高频角位移组合定姿

高频角位移实际上是一种环形激光器,用于测量高频角位移相对于惯性空间的转动角速度,其测量原理是基于光学萨尼亚克效应,在任意形状的闭合环形光路中,从固定在环路上的某点发出的一对光波沿相反方向运行一周后再次回到该点时,这两束光波所经历的光程之差与闭合光路相对于惯性空间的转动角速度成正比。高频角位移输出的测量数据表示一定采样间隔内角位移变化量,其存在的误差源包括安装误差、标度因素误差、漂移误差以及测量噪声。根据上述原理得到,假设角位移传感器数据采样周期为 T ,某一时刻 t 的卫星三轴角位移观测值分别为 N_x 、 N_y 、 N_z ,则得到该时刻 t 的三轴角速度 ω_x 、 ω_y 、 ω_z ,具体展开为

$$\omega_x = \frac{N_x}{T}, \omega_y = \frac{N_y}{T}, \omega_z = \frac{N_z}{T}。 \quad (1)$$

故进一步得到角位移传感器的测量模型为

$$\omega_g = (1 + \Delta + \Lambda)\omega + b + \eta_g, \quad (2)$$

式中 ω_g 为角位移传感器测量得到的角速度大小, Δ 表示角位移传感器安装误差, Λ 表示角位移传感器标度因数误差, ω 为卫星本体相对于惯性空间的真实角速度, b 表示角位移传感器漂移大小, η_g 为角位移传感器测量噪声。这里假设角位移传感器测量噪声为高斯白噪声,即 $\eta_g \sim N(0, \sigma_g^2)$ 。

图 1 表示星敏感器与高频角位移传感器高精度组合定姿的地面处理算法流程。星敏感器可以输出单个历元时刻的绝对姿态,且误差不会累积;高频角位移传感器输出上万赫兹的姿态相对变化量数据,由于漂移误差的存在,基于运动学方程进行积分得到的姿态参数会存在累积误差。基于多个星敏感器的光轴矢量观测数据进行信息融合得到离散的卫星姿态数据,进一步构建相应的观测方程和系统状态方程,采用双向滤波整体加权平滑的方法实现高频高精度姿态数据最优估计。具体滤波算法如图 1 所示。

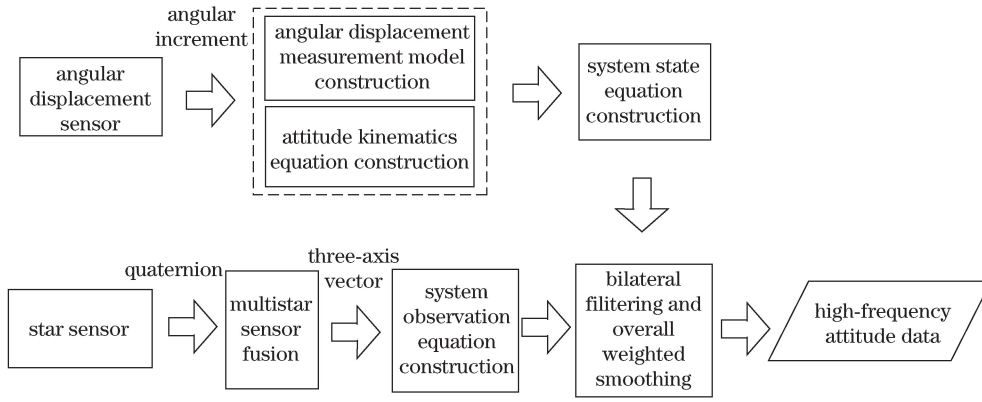


图 1 基于双向滤波整体加权平滑的星敏感器与角位移组合定姿流程图

Fig. 1 Flow chart of the star sensor and angular displacement attitude determination based on bilateral filtering overall weighted smoothing

1) 基于角位移测量信息进行姿态预测

基于角位移测量信息在 t_{k-1} 时刻进行积分,可以得到卫星姿态四元数预测值

$$\hat{q}_{k/k-1} = \frac{1}{2} \hat{q}_{k-1} \otimes \hat{\omega}_{k-1}, \quad (3)$$

式中 \hat{q}_{k-1} 表示 t_{k-1} 时刻四元数最优估计值, $\hat{\omega}_{k-1}$ 表示 t_{k-1} 时刻角速度最优估计值。

角位移漂移预测值 $\hat{b}_{k/k-1}$ 的预测模型为

$$\hat{b}_{k/k-1} = \hat{b}_{k-1}. \quad (4)$$

2) 基于星敏感器测量值进行姿态修正

在 t_k 时刻,根据系统观测方程计算观测矩阵 \mathbf{H}_k 。进一步计算滤波增益 K_k 为

$$K_k = P_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k P_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \quad (5)$$

式中 $P_{k/k-1}$ 表示误差协方差阵预测值,则相应的系统状态变量 \hat{X}_k 为

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{X}_{k/k-1}). \quad (6)$$

卫星姿态四元数 t_k 时刻的修正更新值 \hat{q}_k 与角位移漂移的修正更新值 \hat{b}_k 分别为

$$\begin{cases} \hat{q}_k = \hat{q}_{k/k-1} \otimes \Delta \hat{q}_k \\ \hat{b}_k = \hat{b}_{k/k-1} + \Delta \hat{b}_k \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\Delta \hat{q}_k$ 表示误差四元数估计值, $\Delta \hat{b}_k$ 表示误差漂移量估计值, \mathbf{R}_k 表示星敏感器测量噪声方差阵, \mathbf{Z}_k 表示观测矢量。

根据上述过程进行初始滤波、反向滤波以及正向滤波:1)到2)为初始滤波;2)到1)为反向滤波;最后1)到2)为正向滤波。每次滤波的初始值为上次滤波的结果,最终基于正向滤波与反向滤波结果进行整体加权平滑。

$$\begin{cases} \hat{q}_{fb}(k) = \hat{q}_b^{-1}(k) \otimes \hat{q}_f(k) \\ \Delta \hat{x}_{fb}(k) = \{\text{sgn}(\hat{q}_{fb0}) [\hat{q}_{fb1} \quad \hat{q}_{fb2} \quad \hat{q}_{fb3}] [\hat{b}_f(k) - \hat{b}_b(k)]^T\}^T \\ \hat{P}_s(k) = [\hat{P}_f^{-1}(k) + \hat{P}_b^{-1}(k)]^{-1} \\ \Delta \hat{x}_s(k) = [\Delta \hat{q}_s^T(k) \quad \Delta \hat{b}_s^T(k)]^T = \hat{P}_s(k) \hat{P}_f^{-1}(k) \Delta \hat{x}_{fb}(k) \\ \Delta \hat{q}_{s0}(k) = \text{sqrt}[1 - \Delta \hat{q}_{s1}^T(k) \Delta \hat{q}_{s1}(k) - \Delta \hat{q}_{s2}^T(k) \Delta \hat{q}_{s2}(k) - \Delta \hat{q}_{s3}^T(k) \Delta \hat{q}_{s3}(k)] \\ \hat{q}_s(k) = \hat{q}_b(k) \otimes \Delta \hat{q}_s(k) \\ \hat{b}_s(k) = \hat{b}_b(k) + \Delta \hat{b}_s(k) \end{cases}, \quad (8)$$

式中根符号“f”表示正向滤波结果,根符号“b”表示反向滤波结果,根符号“s”表示整体加权平差结果。星敏感器的测量精度主要影响光学影像的绝对几何定位精度(无控点几何定位精度),而高频角位移的测量精度则会影响光学影像的相对几何精度(内部几何精度),将两者的观测信息进行信息融合可以得到高频、高精度的姿态数据,可用于线阵推扫影像的高精度几何处理。

2.2 顾及卫星平台震颤的稳态成像模型构建

卫星平台的震颤抖动会造成影像扭曲变形,基于星敏感器与高频角位移组合定姿解算的高频姿态数据以及姿态数学拟合模型,采用基于物方一致性的影像虚拟化处理,可以得到平稳成像的虚拟影像,有效减弱卫星平台颤振对光学遥感影像几何质量的影响。如图 2 所示,具体处理流程包括:1)对卫星平台震颤数据进行滤波处理,平滑卫星成像过程中的抖动,利用共线条件,建立稳态成像严密几何模型;2)以物方为基准建立稳态成像影像与平台震颤成像影像的像点对应关系,生成稳态成像影像;3)基于稳态成像模型,生成稳态成像影像的高精度有理多项式(RPC)模型参数。

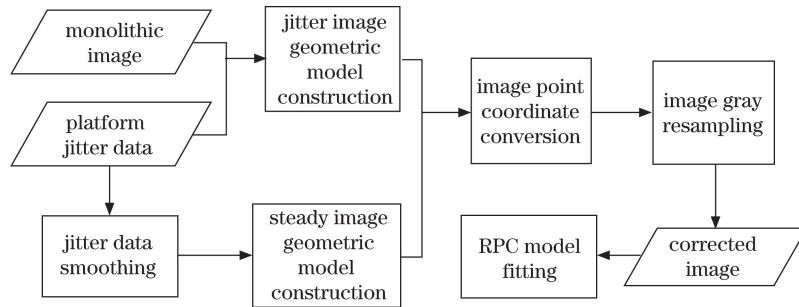


图 2 基于物方一致性的震颤影像稳态成像模型构建流程图

Fig. 2 Flow chart of steady-imaging model based on object space consistency for attitude-jitter image

采用基于探元指向角模型的严密几何成像模型,具体形式为

$$\begin{Bmatrix} \tan[\psi_x(s)] \\ \tan[\psi_y(s)] \\ 1 \end{Bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}} \left\{ \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}} \mathbf{R}_{\text{wgs}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X_g - X_{\text{gps}} \\ Y_g - Y_{\text{gps}} \\ Z_g - Z_{\text{gps}} \end{bmatrix}_{\text{wgs}} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{body}} \right\}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \psi_x(s) = ax_0 + ax_1 \times s + ax_2 \times s^2 + ax_3 \times s^3 \\ \psi_y(s) = ay_0 + ay_1 \times s + ay_2 \times s^2 + ay_3 \times s^3 \end{cases}, \quad (10)$$

式中 (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, $(X_{\text{gps}}, Y_{\text{gps}}, Z_{\text{gps}})$ 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全球定位系统(GPS)偏心误差, λ 表示比例系数, $\mathbf{R}_{\text{wgs}}^{\text{J2000}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}}$ 分别表示由 WGS84 坐标系到 J2000 坐标系旋转矩阵、由 J2000 坐标系到卫星本体坐标系旋转矩阵以及由卫星本体坐标系到相机测量坐标系的旋转矩阵。

3 实验与分析

以 2015 年发射的某型号高分辨率光学卫星为例,对所提出的基于高频角位移震颤影像地面补偿算法进行分析与验证。该卫星采用太阳同步轨道,轨道高度为 490 km,为扩大对地观测相机可视范围,卫星具有侧摆机动能力,全色相机的星下点地面像元分辨率为亚米级。实验所采用的数据包括该卫星多天多轨对不同几何定标场成像时所下传的震颤测量原始数据以及全色相机影像。

1) 基于高频角位移数据平台震颤检测与分析

高分辨率卫星在推扫成像过程中,由于各种载荷的运行导致卫星平台存在一定的震颤,高频角位移传感器可以输出上万赫兹的角增量数据,且能够感应的平台震动频率范围为 0.2~450 Hz,故可以直接基于角位移的观测数据对平台存在的震颤进行直观分析。角位移输出的角增量数据表示采样时间间隔内发生的位移量,需要将其转换到相对于平衡位置的角增量,即扣除卫星绕地球运动所产生的固有角增量。图 3 表示卫星平台在偏航、滚动以及俯仰三个方向的震颤变化情况,由分析可以得到,卫星平台在偏航方向的震颤幅度处于 $\pm 0.02''$,滚动方向的震颤幅度处于 $\pm 0.06''$,俯仰方向的震颤幅度处于 $\pm 0.08''$,震颤主要集中在滚动和俯仰

方向,会对光学影像的沿轨和垂轨方向的相对几何精度产生影响。

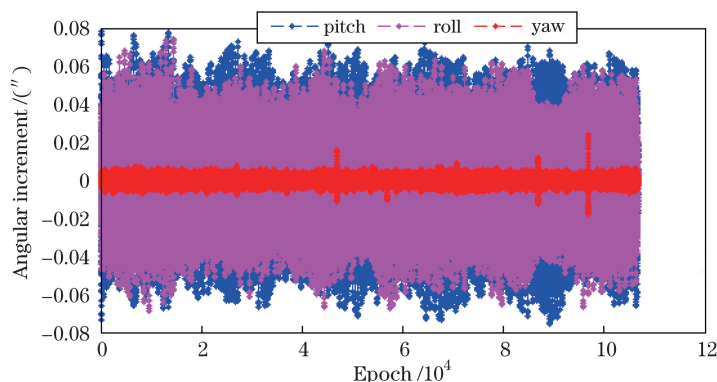


图 3 嵩山定标场角位移输出的角增量随时间变化统计图

Fig. 3 Statistic chart of angular-displacement increments at the Songshan calibration field

图 4 进一步对角位移输出的震颤信号进行频谱分析,得到卫星平台震颤的频域分布图。由分析可以得到卫星平台的震颤主要集中在俯仰方向和滚动方向,震颤频率主要集中在 200, 300, 350 Hz 附近,震颤最大幅值达到 0.025"。由于该卫星的轨道高度为 490 km, 全色影像分辨率达到亚米级, 一个像素误差对应的姿态误差为 0.210"。一般认为当平台的稳定度达到 1/100 pixel, 即 0.0021"时, 由平台震颤引起的内部几何精度才能控制在一个像元以内, 故很明显需要对光学影像进行震颤几何补偿。

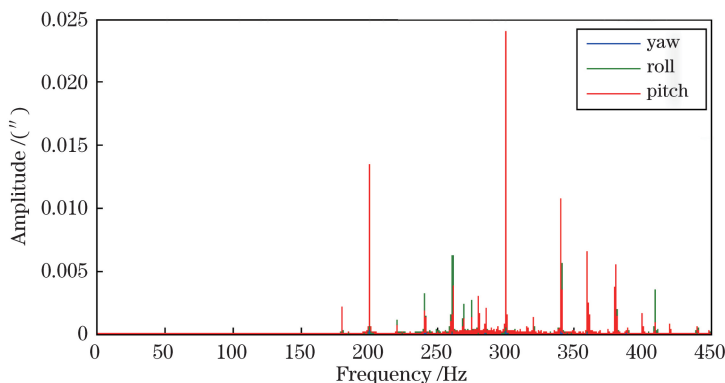


图 4 嵩山定标场卫星平台震颤频谱分布统计图

Fig. 4 Statistic chart of amplitude and frequency distribution of attitude jitter at the Songshan calibration field

2) 姿态数据处理结果收敛性与稳定性分析

单独使用角位移数据无法实现震颤影像的内部几何精度补偿, 需要将高频角位移与星敏感器进行高精度组合定姿得到高频姿态数据用于影像的几何处理。对星敏感器与角位移进行组合定姿地面处理, 滤波器选用双向卡尔曼滤波整体加权平差, 状态量为误差四元数与误差漂移。以 2015 年 8 月 29 日卫星对嵩山定标场成像时上传的姿态敏感器原始观测数据为数据源, 实现星敏感器与角位移组合定姿的地面处理, 并对相应的实验结果进行分析。

系统状态误差参数变化趋势是判定滤波器性能的重要指标, 故可以基于状态误差参数变化特性对本文设计的滤波器收敛性与稳健性进行评价。图 5、6 分别统计了系统状态量误差四元数部分转化成欧拉角后大小随时间变化情况以及角位移漂移误差量随时间变化情况。由上述分析可以得到, 经过本文滤波器处理后姿态误差欧拉角在偏航、滚动以及俯仰方向成随机变化; 角位移漂移误差在 XYZ 三个方向也随机变化, 分别用 b_x 、 b_y 、 b_z 表示, 故星敏感器高频测量噪声、角位移测量噪声被有效抑制。图 7 表示基于星敏感器估算的角位移漂移大小随时间变化情况, 研究结果表明, 基于本文滤波器解算的漂移大小随时间呈稳态变化, 漂移量处于 $0.5(^{\circ})/h$ 以内, 故本文设计的信息融合滤波器是稳健与收敛的。

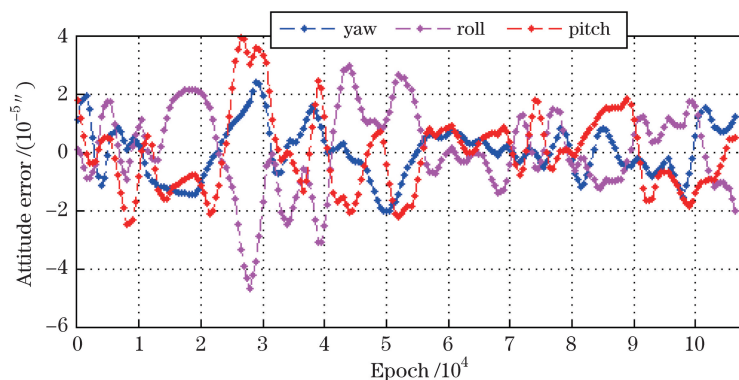


图 5 基于星敏感器与角位移组合的卫星姿态误差欧拉角变化统计图

Fig. 5 Statistic chart of satellite attitude errors Euler angles based on star sensor and angular displacement

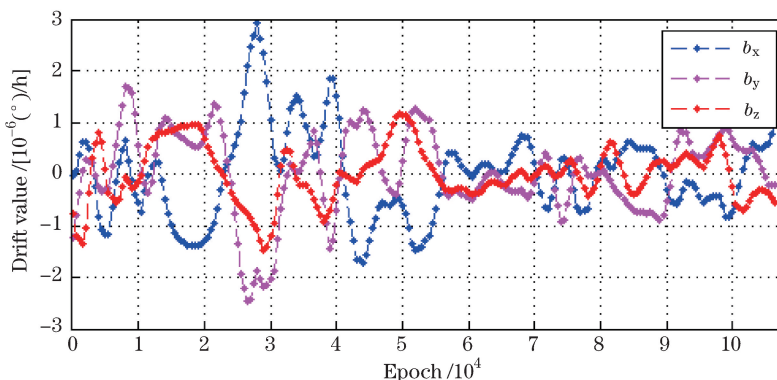


图 6 基于星敏感器与角位移组合的角位移漂移误差变化统计图

Fig. 6 Statistic chart of angular displacement drift errors based on star sensor and angular displacement

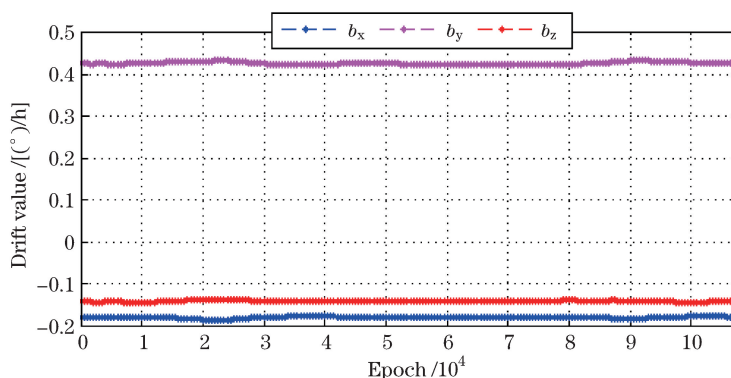


图 7 基于星敏感器与角位移组合的角位移漂移大小的时间序列统计图

Fig. 7 Time series statistic chart of angular displacement drift value based on star sensor and angular displacement

3) 影像震颤补偿效果验证与评价

基于星敏感器与高频角位移组合定姿得到的高频姿态数据,采用所设计的基于物方一致性的稳态成像模型,对震颤影像进行几何补偿。图 8 表示利用高频姿态数据稳态重成像后得到的虚拟化影像与几何定标场数字正射影像(DOM)参考数据之间匹配得到的同名点分布情况,用于对稳态虚拟化成像后的影像进行内部几何精度分析。在验证分析相对几何精度时,采用的影像为单片 CCD 成像影像,主要是为了避免多片 CCD 拼接误差对实验分析结果的影响。图 9 统计分析了基于星敏感器/高频角位移组合得到的高频高精度姿态数据虚拟化后影像的内部几何精度分布情况,表 1、2 统计了多轨获取的定标场影像分别基于星上处理姿态数据与角位移补偿后的稳态虚拟化影像相对几何精度分布和均方误差(MSE)。由上述分析可以得到,相比于星上处理得到的姿态数据,星敏感器与高频角位移组合定姿得到的高频姿态数据相对精度可以达到

0.3",且利用角位移可以有效对平台震颤影像进行相对几何精度补偿,补偿后影像的相对几何精度为1.5 pixel左右。

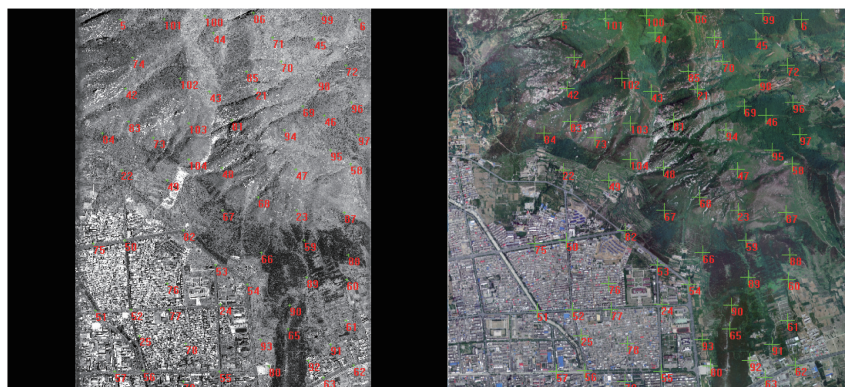


图 8 嵩山定标场稳态成像影像与相应的 DOM 影像之间匹配的同名点分布图
Fig. 8 Homonymy points distribution of steady-imaging image at the Songshan calibration field and corresponding DOM image

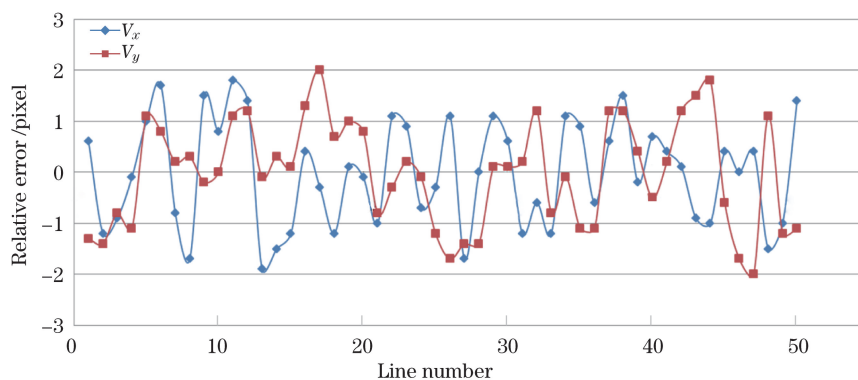


图 9 嵩山定标场稳态成像影像相对几何精度统计图

Fig. 9 Statistic chart of relative geometric accuracy of steady-imaging image at the Songshan calibration field

表 1 基于星上姿态数据补偿后的稳态成像影像相对几何精度统计表

Table 1 Statistic table of relative geometric accuracy of steady-imaging image with on-board attitude data compensation

Time	Side swing / (°)	Regions	Relative accuracy	Average relative error		MSE of relative error	
				V_x	V_y	M_x	M_y
2015-08-29 14:08	-4.965	Songshan	3.729	0.037	0.008	3.114	2.052
2015-08-31 16:26	4.727	Yili	3.069	-0.011	-0.009	2.401	1.912
2015-09-03 13:42	-8.428	Anyang	3.412	-0.015	0.031	2.588	2.224
2015-09-16 16:19	-6.299	Yili	4.314	0.018	0.019	3.841	1.965
2015-09-26 13:52	-7.711	Dongying	3.817	-0.006	0.009	3.187	2.101

表 2 基于角位移补偿后的稳态成像影像相对几何精度统计表

Table 2 Statistic table of relative geometric accuracy of steady-imaging image with angular displacement compensation

Time	Side swing / (°)	Regions	Relative accuracy	Average relative error		MSE of relative error	
				V_x	V_y	M_y	M_x
2015-08-29 14:08	-4.965	Songshan	1.454	-0.024	-0.014	1.026	1.031
2015-08-31 16:26	4.727	Yili	1.562	0.013	0.007	1.211	0.987
2015-09-03 13:42	-8.428	Anyang	1.323	-0.011	0.021	0.854	1.011
2015-09-16 16:19	-6.299	Yili	1.425	0.009	-0.023	1.246	0.693
2015-09-26 13:52	-7.711	Dongying	1.459	0.005	0.007	1.104	0.955

4 结 论

针对当前高分辨率遥感卫星影像存在震颤影响且难以补偿的问题,提出了一种基于高频角位移的稳态虚拟重成像方法,并对2015年发射的某型号高分辨率光学卫星真实在轨原始数据进行实验分析。研究结果表明:1)该卫星在俯仰与滚动方向存在一定的平台震颤,且影响影像的内部几何质量;2)基于星敏感器与角位移组合定姿地面处理算法设计的滤波器是稳健与收敛的,且星敏感器与角位移的高频测量噪声得到了有效抑制;3)所提出的基于高频角位移的震颤影像补偿方法可以对震颤影像的几何处理发挥一定的作用。

参 考 文 献

- 1 Fan Dapeng, Liu Hua, Zhu Huazheng, *et al.* Effect of structural vibration analysis of satellite image quality[C]. High-Resolution Remote Sensing Satellite Structural Vibration and Control Technology Seminar, 2011.
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.
- 2 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.
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.
- 3 Li Haoyang, Liu Zhaojun, Xu Pengmei. Influence of satellite fitter on imaging quality of space-born remote sensing systems[J]. Computer Simulation, 2012, 29 (1): 25-27.
李浩洋, 刘兆军, 徐彭梅. 平台颤振对空间光学传感器成像质量的影响[J]. 计算机仿真, 2012, 29 (1): 25-27.
- 4 Pang Shiwei, Shi Weizhe. Development in micro vibration test technology of high-resolution remote sensing satellite[C]. High-Resolution Remote Sensing Satellite Structural Vibration and Control Technology Seminar, 2011.
庞世伟, 史伟哲. 高分辨率遥感卫星微振动试验技术发展研究[C]. 高分辨率遥感卫星结构振动及控制技术研讨会, 2011.
- 5 Teshima Y, Iwasaki A. Correction of attitude fluctuation of Terra spacecraft using ASTER/SWIR imagery with parallax observation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 222-227.
- 6 Iwasaki A. Detection and estimation of satellite attitude jitter using remote sensing imagery[J]. Advances in Spacecraft Technologies, 2011: 257-272.
- 7 Amberg V, Dechoz C, Bernard L, *et al.* In-flight attitude perturbances estimation: Application to PLEIADES-HR satellites[C]. SPIE, 2013, 8866: 886612.
- 8 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.
- 9 Tong X, Ye Z, Xu Y, *et al.* Framework of jitter detection and compensation for high resolution satellites[J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 3944-3964.
- 10 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): 1395-1410.
- 11 Huo Hongqing, Ma Mianjun, Li Yunpeng, *et al.* High precision measurement technology of satellite's angle microvibration[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 20(3): 4-9.
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): 4-9.
- 12 Toyoshima M, 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.