

基于能量对称分布相位相关配准的资源三号 02 星 颤振探测

谢俊峰^{1,2}, 莫凡^{1*}, 王怀¹, 李响^{1,2}, 朱红¹

¹自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

²辽宁技术工程大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000

摘要 颤振是卫星平台在轨运行的固有现象之一,也是高分辨率对地观测卫星研究的难点和热点。针对资源三号 02 星在轨运行过程中的平台颤振情况,提出了一种基于能量对称分布的相位相关配准算法。结合多光谱相机各谱段相机之间的安装关系,考虑到平台的线性平滑运动特性,采用二次函数消除系统变化量,得到线性拟合的平台颤振曲线,最后利用星敏陀螺数据联合滤波得到卫星姿态复合验证曲线。实验结果表明:在模拟数据情况下,所提配准算法的配准精度能够达到 0.05 pixel,可有效辅助探测卫星平台的颤振,并首次探测到资源三号 02 星平台存在 0.63~0.65 Hz 的颤振,振幅为 0.41"~1.12"。

关键词 遥感; 资源三号 02 星; 颤振; 相位相关配准; 多光谱影像

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0628003

Jitter Detection of ZY3-02 Satellite Platform Using Phase-Correlation Registration Based on Symmetrical Energy Distribution

Xie Junfeng^{1,2}, Mo Fan^{1*}, Wang Huai¹, Li Xiang^{1,2}, Zhu Hong¹

¹Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;

²School of Surveying and Geographical Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

Abstract Jitter is an inherent phenomenon of on-orbit satellite platforms and is a difficult issue concerning high-resolution earth observation satellites. With respect to ZY3-02 platform's jitter, herein, we propose a phase-correlation registration algorithm based on symmetrical energy distribution. Combining the installation relation among charge-coupled devices at different spectral bands in the multi-spectral camera and considering the linearly smoothing motion characteristics of the satellite platform, we obtain a linear-fitted jitter curve using a quadratic function to eliminate system variation. Finally, satellite attitude data filtered from star tracker and gyro data are used to verify the obtained curve. Experimental results demonstrate that the matching accuracy of the proposed algorithm can reach 0.05 pixel using the simulated data, and thus it can effectively assist in the jitter detection of satellite platforms. Using the proposed method, jitter with the amplitude of 0.41"-1.12" at the frequency of 0.63-0.65 Hz is detected in the ZY3-02 satellite platform for the first time.

Key words remote sensing; ZY3-02 satellite; jitter; phase-correlation registration; multi-spectral image

OCIS codes 280.4788; 120.4820; 040.1880; 100.2000

1 引 言

卫星平台颤振是指卫星在轨运行期间,平台的姿态控制、太阳帆板调整、星上运动部件周期性运动

或因变轨冷热交变等因素引发的一种幅值较小的振动^[1-2],它不仅会影响星体内部之间的安装关系,还会造成数据获取异常,导致后续数据处理难度较大或产品质量较差。因此,平台颤振探测是高分辨率

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2019-01-15; 录用日期: 2019-02-26

基金项目: 国家基础测绘项目(2018KJ0302)、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)、航天预研项目(D040106)

* E-mail: surveymofan@163.com

对地观测卫星数据处理过程中的必要环节^[3-5],也是高分辨率对地观测卫星研究的重点和难点。

卫星平台颤振探测方法近年来取得了一定发展,根据探测所依赖的参考基准,可将其归纳为4类:基于角位移传感器高频数据的探测^[6-7]、基于密集地面控制的探测^[8-9]、基于光学影像及其产品的探测^[10-12]和基于卫星辅助数据的探测^[13]。

2016年5月30日,资源三号02星在太原卫星发射中心成功进入预定轨道^[14]。资源三号02星是继资源三号01星之后的又一颗高分辨率立体测图业务卫星。双星组网运行,大幅提高了我国1:50000立体测图信息源的获取能力。目前,针对资源三号01星平台颤振探测的研究较多,结合多光谱相机各波段电荷耦合器件(CCD)之间的安装关系,利用高精度亚像素相位相关配准算法获取多光谱各波段影像的视差曲线,最终得到平台的颤振情况。亚像素相位相关配准算法根据计算原理包括三类:拟合插值^[15-16]、奇异值分解^[17-18]和局部上采样^[19-20]。局部上采样亚像素相位相关配准采用零填充的方式将频域灰度矩阵放大后再进行互相关,具有理论简单的特点,但配准精度难以达到设计值,且计算量较大。奇异值分解亚像素相位相关配准的核心是奇异值分解和相位解缠,具有较高的抗干扰性,但理论复杂,且解缠过程易引入不确定解。拟合插值亚像素相位相关配准是对互相关信息逆变换后的最优值计算,配准精度取决于最优值的提取精度,受影像质量的影响较大。研究表明:资源三号01星平台颤振的频率为0.65 Hz左右,在轨初期的振幅较大,可达到3",在轨稳定后,振幅小于1"。资源三号02星与01星采用相同的平台,部分载荷进行了升级,且新增了一套实验性激光测高载荷。为了探测资源三号02星的平台颤振情况,考虑到资源三号02星多光谱影像数据质量较优,本文在拟合插值亚像素相位相关配准方法范畴内提出了一种基于能量对称的相位相关配准算法,采用模拟数据和真实数据验证所提配准算法的精确性和可靠性,通过高精度亚像素的密集配准获取逐像素的视差图,根据平台的线性平滑运动特性拟合平台的颤振曲线,利用扩展卡尔曼滤波(EKF)处理原始星敏感器数据和陀螺数据,得到卫星平台的真实姿态数据,最后基于真实的平台姿态数据对颤振探测结果进行复合验证。

2 卫星平台颤振探测

平台颤振探测对遥感卫星而言具有重要价值,

学者们针对多颗遥感卫星平台开展了研究工作,颤振探测结果如表1所示^[21]。可以看出,不同的卫星因搭载载荷、内部安装关系、轨道高度等不同,颤振的频率和振幅也不尽相同。

2.1 资源三号02星多光谱相机结构

资源三号02星搭载的多光谱相机采用多色TDI CCD推扫式成像系统。为了更好地获取地面的多光谱信息,各波段CCD需紧密安装在同一扫描列上,TDI CCD的物理特性使得每个波段之间均存在固定的物理间隔,导致各波段在成像上具有时间差。各波段CCD成像示意图如图1所示。

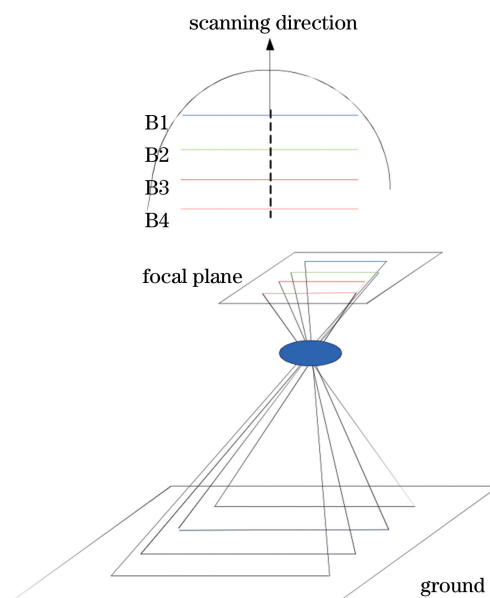


图1 资源三号02星多光谱相机成像示意图
Fig. 1 Schematic of multi-spectral camera imaging on ZY3-02 satellite

资源三号02星多光谱相机包含蓝、绿、红和近红外4个波段,依次记为B1、B2、B3和B4,地面分辨率均为5.8 m。多光谱各波段共视场成像,即同一时刻各波段CCD拍摄区域对应地面相隔一定距离的地面区域,同一区域被各波段CCD在不同的连续时刻拍摄到。每个波段由3片CCD组成,每片CCD包含3072个探测元器件。为了方便后期进行影像拼接,波段内相邻CCD之间具有195 pixel的重叠,每个像素大小为0.02 mm。在相机焦平面上,4个波段线阵CCD器件在沿轨方向上依次平行摆放,其不同谱段各片CCD的安装物理关系如图2所示。

多光谱相机相邻谱段同列CCD之间的安装间隔固定,卫星在飞行过程中相邻谱段CCD对同一地物不同时刻成像,获取的影像为含有微小时间差异

表 1 不同卫星平台颤振的频率和振幅
Table 1 Jitter frequency and amplitude of different satellite platforms

Satellite or sensor	Launch year	Frequency ^a /Hz	Amplitude ^b /m
ISS ^[22-23]	1993	0.01-300.00	—
ETS-VI ^[13]	1994	0.39-250.00	—
MOC-NA ^[3]	1996	1-4	≈15
ASTER ^[4,24-25]	1999	1.5-1.6	6-7
QuickBird ^[4]	2001	1.0, 4.3	2.5, 0.1
SPOT 5 ^[4]	2002	≈0.003	≈20
ALSat-1 ^[26]	2002	0.5	—
Nigeria Sat ^[26]	2003	0.5	—
UK-DMC ^[26]	2003	0.6	—
MEX-HRSC ^[27-28]	2003	0.1-0.2, 1.7	8
HiRISE ^[4,29]	2005	≈1.6	≈1
Beijing-1 ^[30]	2005	200	3
ALOS ^[31-32]	2006	6-7, 60-70	1000, 100
Kompsat-2 ^[33]	2006	210	0.14
LROC ^[29,34]	2009	6	0.1-1.0
Mapping Satellite-1 ^[35]	2010	0.105, 0.635, 4.000	0.2, 0.1, 0.1
Pleiades-HR ^[22]	2011	70.9-78.4	0.14
ZY3-01 ^[5,10,12,36-37]	2012	0.6-0.7	2.5-7.5
Yaogan-26 ^[6]	2014	100, 200, 300	0.1, 0.1, 0.1

^a Satellite attitude jitter frequency may be detected in roll, pitch, or both; the information listed here are from either or both.
^b The amplitude has been transformed from on-orbit arcsec or pixel to ground meter (from satellite to ground), which can show the influence of jitter intuitively. Amplitudes not listed in existing records and research are indicated by “—”.

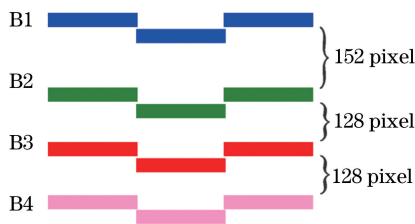


图 2 多光谱相机不同波段各片间的安装关系
Fig. 2 Installation relation among CCDs at different spectral bands in multi-spectral camera

的影像集。影像对中的各影像是在不同时刻获取的,通过高精度的影像配准能够获得微小时间内卫星平台相对姿态变化的信息。

2.2 基于能量对称的相位相关配准

相位相关影像配准法利用傅里叶变换将待配准的影像块转换到频域进行互相关,只采用影像块频域互功率谱中的相位信息,降低了图像灰度值的影响,

减小了对影像内容的依赖,具有较高的抗干扰性^[38]。

相位相关影像配准法的原理是基于傅里叶变换的平移特性,即当两影像块只存在平移时,在频率域上体现出一个线性的相位角差。若待配准的两个影像块函数 g 和 f 之间的偏移量分别为 Δx 和 Δy , 则^[22]

$$g(x, y) = f(x - \Delta x, y - \Delta y)。 \quad (1)$$

对(1)式两边分别进行傅里叶变换,并结合傅里叶变换的平移性质可得

$$\mathbf{G}(u, v) = \mathbf{F}(u, v) \exp[-i(u\Delta x + v\Delta y)], \quad (2)$$

式中 \mathbf{G} 和 \mathbf{F} 分别为影像 g 和 f 的傅里叶变换矩阵。对(2)式变形可得到两影像块的互功率谱函数 $Q(u, v)$ 为

$$Q(u, v) = \exp[-i(u\Delta x + v\Delta y)] = \frac{\mathbf{F}(u, v) \cdot \bar{\mathbf{G}}(u, v)}{|\mathbf{F}(u, v) \cdot \bar{\mathbf{G}}(u, v)|}, \quad (3)$$

式中： \bar{G} 为 G 的共轭。对(3)式所示的互功率谱函数进行傅里叶逆变换，可得到 $(\Delta x, \Delta y)$ 处的单位脉冲函数 $\delta(\Delta x, \Delta y)$ 为

$$\delta(\Delta x, \Delta y) = f_{\text{IFT}}[Q(u, v)] = f_{\text{IFT}}\{\exp[-i(u\Delta x + v\Delta y)]\}, \quad (4)$$

式中： f_{IFT} 为快速傅里叶逆变换函数。当两影像块为同一区域的影像时，在脉冲函数的 $(\Delta x, \Delta y)$ 处会取得峰值，其他位置处的值则远小于峰值，且接近 0。

在基于能量对称的相位相关配准算法中，峰值前后值的大小次序决定着形式略有不同的计算公式，因此峰值计算分 3 种情况来讨论，当峰值前面的值大于后面的值时，峰值计算示意图如图 3 所示。

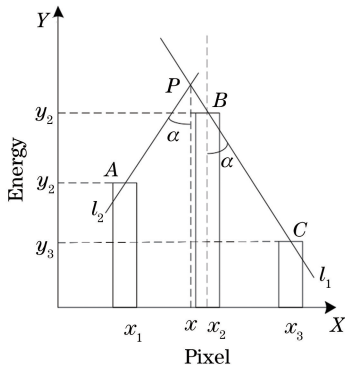


图 3 能量峰值计算示意图

Fig. 3 Schematic of energy peak calculation

峰值点 $B(x_2, y_2)$ 周围的点 $A(x_1, y_1)$ 和 $C(x_3, y_3)$ 存在 $y_1 > y_3$ 的关系。过 C 点和 B 点做直线 l_1 ，其与过 B 点垂线的夹角为 α ，根据能量对称分布可知，存在另外一条直线 l_2 与 l_1 关于峰值点 P 的垂线对称。因此，从 A 点以倾角为 $90^\circ - \alpha$ 做直线 l_2 交 l_1 于 P 点，其中 P 点的横坐标 x 与 B 点横坐标 x_2 之差 $x - x_2$ 即为亚像素偏移量。

根据图 3 可知，存在两个几何关系，用公式表示如下：

$$\begin{cases} \frac{x_3 - x}{y - y_3} = \frac{x - x_1}{y - y_1} \\ \frac{y - y_3}{x_3 - x} = \frac{y_2 - y_3}{x_3 - x_2} \end{cases} \quad (5)$$

通过对(5)式进行推导化简，可得一元二次方程：

$$2(y_3 - y_2)x^2 + (10y_2 - y_1 - 9y_3)x + (3y_1 - 12y_2 + 9y_3) = 0. \quad (6)$$

(6)式可以简化为

$$ax^2 + bx + c = 0, \quad (7)$$

式中： $a = 2(y_3 - y_2)$ ； $b = 10y_2 - y_1 - 9y_3$ ； $c = 3y_1 -$

$12y_2 + 9y_3$ 。则(7)式根据一元二次方程解可得

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (8)$$

其中，满足 $x_1 < x < x_2$ 的解即为所求。

同理，当峰值点 $B(x_2, y_2)$ 周围的点 $A(x_1, y_1)$ 和 $C(x_3, y_3)$ 存在 $y_1 < y_3$ 的关系时，可得

$$2(y_1 - y_2)x^2 + (6y_2 - 7y_1 + y_3)x + (5y_1 - 4y_2 - y_3) = 0. \quad (9)$$

利用(7)~(8)式可求得(9)式的 x 值，其中满足 $x_2 < x < x_3$ 的解即为所求。

当峰值前面的值小于后面的值时，仅将 x_1 和 x_3 的值调换，推导过程同上。特殊情况下，当峰值点 $B(x_2, y_2)$ 周围的点 $A(x_1, y_1)$ 和 $C(x_3, y_3)$ 存在 $y_1 = y_3$ 的关系时，则认为影像块无偏移，即 $x = 0$ 。

2.3 卫星姿态复合验证平台颤振

2.3.1 基于波形叠加理论的卫星颤振复原

利用多光谱不同波段间的影像配准获得像方视差，能够探测到平台中存在的颤振，该颤振属于相对姿态变化。为了得到卫星平台绝对姿态的变化，需要采用基于波形叠加理论将相对姿态转化为绝对姿态。

如图 4 所示， t_1 时刻，卫星 b 波段拍摄地面点 O ，经过 L/v 时间后，卫星 a 波段拍摄地面点 O ，此时的时间为 t_2 (可知 $t_2 - t_1 = L/v$)，抖动探测的值实际为在 $t_2 - t_1$ 时间段内卫星平台发生的姿态相对抖动。探测结果可以表示^[39]为

$$g(t_1) = f(t_2) - f(t_1), \quad (10)$$

式中： $f(t_1)$ 和 $f(t_2)$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻的绝对抖动量； $g(t_1)$ 为 t_1 时刻的相对抖动量。

根据波形的基本合成与分解理论，在相对抖动的振幅、频率、初相位、常值以及绝对抖动的频率已知的基础上，可以求解绝对抖动模型中的各个参数，(10)式中的各参数可以表示为

$$\begin{cases} g(t_1) = a_g \cos(2\pi\omega t_1 + b_g) \\ f(t_1) = a_f \cos(2\pi\omega t_1 + b_f) \\ f(t_2) = a_f \cos(2\pi\omega t_1 + b_f + \Delta b_f) \end{cases} \quad (11)$$

式中： a_f 和 a_g 为绝对抖动和相对抖动的振幅； b_f 和 b_g 为 t_1 时刻绝对抖动和相对抖动的初相位； Δb_f 为 t_2 时刻相对于 t_1 时刻初相位的变化量。

将(11)式代入(10)式，可以求得 a_f 和 b_f ，即：

$$a_f = a_g [2 - 2\cos(\Delta b_f)]^{-\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

$$b_f = \sin^{-1} \left[\frac{a_g \cos b_g}{2a_f \sin\left(\frac{\Delta b_f}{2}\right)} \right] - \frac{\Delta b_f}{2}. \quad (13)$$

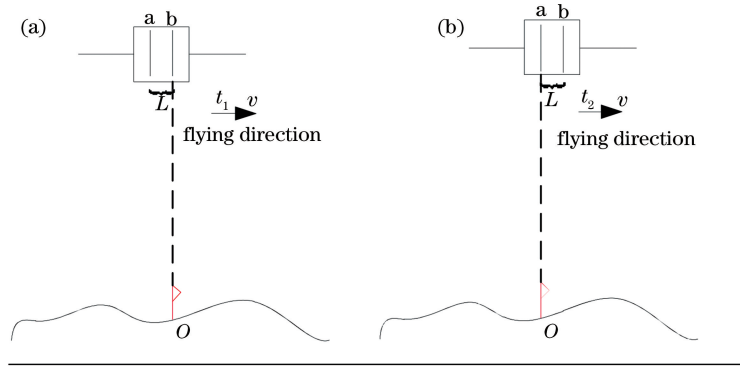


图 4 卫星平台抖动探测示意图。(a) t_1 时刻卫星 b 波段拍摄地面点 O ; (b) t_2 时刻卫星 a 波段拍摄地面点 O

Fig. 4 Schematic of jitter detection of satellite platform. (a) b-band camera scanned ground point O at moment t_1 ; (b) a-band camera scanned ground point O at moment t_2

将(12)式代入(13)式,可进一步简化求解得到

$$b_f = b_g - \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta b_f}{2}. \quad (14)$$

2.3.2 基于联合滤波的姿态确定

星敏陀螺组合的定姿策略是姿态确定系统的一种可靠的方案,可以得到较高的精度^[40]。在星敏陀螺联合定姿系统中,陀螺为系统提供相对姿态值,是主要的姿态敏感器,星敏为姿态确定提供绝对姿态值,一般作为陀螺的辅助姿态敏感器,通常利用星敏传感器的测量值来修正陀螺的漂移误差等。

星敏的测量方程为

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t), \quad (15)$$

式中: t 为时刻; $\mathbf{Z}(t)$ 为实际观测向量; $\mathbf{H}(t)$ 为观测矩阵; $\mathbf{X}(t)$ 为观测变量; $\mathbf{V}(t)$ 为观测噪声方差阵。

陀螺的测量方程为

$$\boldsymbol{\omega}_g = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{b} + \boldsymbol{\eta}_g, \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}_g$ 为卫星相对惯性空间的转速在本体系中的实际值; $\boldsymbol{\omega}$ 为卫星相对惯性空间的转速在本体系中的理想值; \mathbf{b} 为常值漂移; $\boldsymbol{\eta}_g$ 为均值为零的白噪声。

线性连续滤波状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{W}(t), \quad (17)$$

式中: $\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} -[\hat{\boldsymbol{\omega}} \times] & -0.5\mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$, $[\hat{\boldsymbol{\omega}} \times]$ 为

$\hat{\boldsymbol{\omega}}$ 的对角阵, $\hat{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega}_g - \hat{\mathbf{b}}$, $\hat{\mathbf{b}}$ 为 \mathbf{b} 的估计值; $\mathbf{W}(t) = \begin{bmatrix} -0.5\boldsymbol{\eta}_g \\ \boldsymbol{\eta}_b \end{bmatrix}_{6 \times 3}$, $\boldsymbol{\eta}_b$ 为均值为零的白噪声。

2.3.3 姿态与颤振相关性验证

通过高精度配准得到的平台颤振数据与利用 EKF 得到的姿态数据均可以反映平台的姿态变化,将两者之间的系统差值消除后,理论上两者具有较

强的一致性。采用皮尔逊相关系数^[41]验证颤振探测结果与姿态数据的相关性:

$$\mathbf{R}(i, j) = \frac{\mathbf{C}(i, j)}{\sqrt{\mathbf{C}(i, i)\mathbf{C}(j, j)}}, \quad (18)$$

式中: \mathbf{C} 为列向量 i 和 j 的协方差矩阵。相关系数在 \mathbf{R} 矩阵的副对角线上。

3 实验验证与分析

3.1 配准算法精度验证

采用模拟数据和在轨数据,通过逐像素的密集配准获取亚像素配准结果,与其他相位相关配准算法相比,验证所提配准算法(PC)的配准精度。这里的对比算法包括:基于抛物线拟合的相位相关配准(PF)、基于 sinc 函数拟合的相位相关配准(SC)、基于曲面拟合的相位相关配准(SF)、基于奇异值分解的相位相关配准(SVD)和基于上采样的相位相关配准(UP)。

模拟数据由更高分辨率的影像降采样获取,即在高分辨率影像上截取范围为第 1 行至第 $3n_{\text{line}}$ 行且第 1 列至第 $3n_{\text{sample}}$ 列的 $(1-3n_{\text{line}}, 1-3n_{\text{sample}})$ 影像块,3 倍降采样至 $(1-n_{\text{line}}, 1-n_{\text{sample}})$, 作为左影像;在同一张高分辨率影像上截取范围为第 2 行至第 $3n_{\text{line}} + 1$ 行且第 2 列至第 $3n_{\text{sample}} + 1$ 列的 $(2-3n_{\text{line}} + 1, 2-3n_{\text{sample}} + 1)$ 影像块,3 倍降采样至 $(1-n_{\text{line}}, 1-n_{\text{sample}})$, 作为右影像。理论上,左右影像对的逐像素行列方向视差真值为 $1/3$ pixel,能够较好地评价亚像素配准精度。模拟影像对的尺寸为 $600 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ($n_{\text{line}} = 600, n_{\text{sample}} = 200$),理论影像偏移为 $1/3$ pixel。采用 6 种配准算法获得视差图,为了直观显示,消除视差中的理论偏移,得到如图 5 所示的配准误差图。

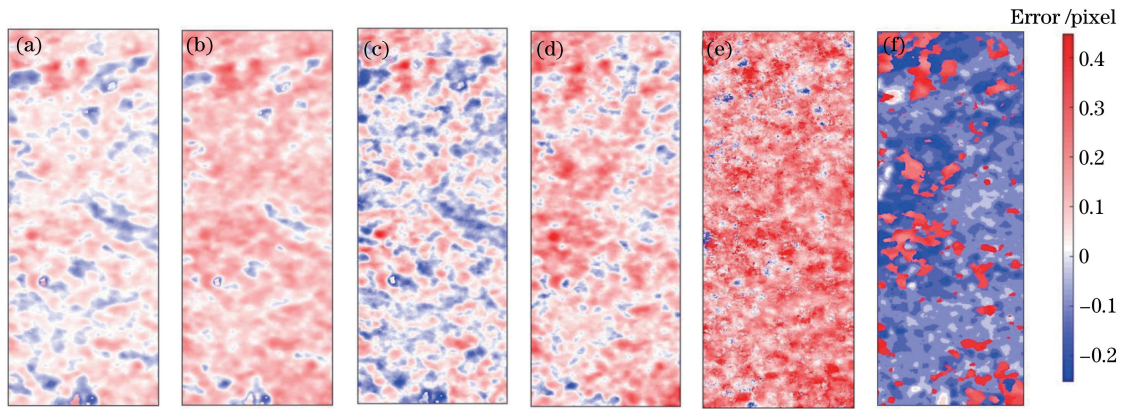


图 5 模拟数据配准误差图。(a) PC;(b) PF;(c) SC;(d) SF;(e) SVD;(f) UP

Fig. 5 Images of registration error acquired form simulation data. (a) PC; (b) PF; (c) SC; (d) SF; (e) SVD; (f) UP

由图 5 可以看出,PC 得到的视差整体分布均匀。为了定量获取配准误差,计算配准误差的均值和均方根误差,结果如表 2 所示,可见,与其他几种算法相比,所提算法的均值和均方根误差(RMSE)最小,具有较大的精度优势。

表 2 模拟数据配准误差统计值

Table 2 Statistics of registration error acquired form simulation data

Algorithm	Error /pixel	
	Mean	RMSE
PC	-0.007	0.046
PF	0.068	0.088
SC	0.032	0.060
SF	0.069	0.089
SVD	0.143	0.156
UP	-0.078	0.085

将 6 种配准算法应用到在轨数据中,对比各个算法对平台微小颤振引起的像方偏移的探测能力。理论上,卫星在轨飞行期间,平台的颤振平滑性较好,因此探测结果的平滑性可以作为衡量配准精度的一种方法。实验随机选取一景多光谱数据,6 种算法的颤振探测结果如图 6 所示。可见,相较于其他几种算法,PC 探测结果具有较好的平滑性,能够反映平台的平滑运动特性。

所提算法具有较高的配准精度,能够有效获取卫星平台颤振引起的视差,为资源三号 02 星平台的颤振探测提供了技术参考。

3.2 卫星平台颤振探测实验

3.2.1 实验方案

基于所提算法探测资源三号 02 星的平台颤振,

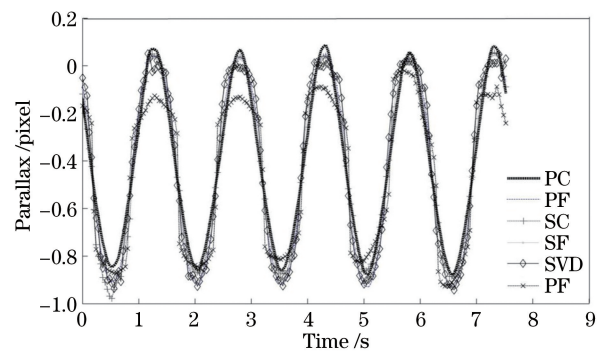


图 6 不同算法的在轨数据颤振探测曲线图

Fig. 6 Jitter curves detected from on-orbit data using different algorithms

设计了如图 7 所示的实验方案。选取多光谱分片 CCD 影像对(选定 CCD1 和 CCD2 的蓝绿谱段),采用基于能量对称的相位相关配准算法获得影像对的视差图,对同一行视差图求均值,计算所有列,得到配准视差曲线,采用卫星姿态叠加理论将相对姿态转化为绝对姿态。卫星姿态确定方法采用 EKF 方法对星敏和陀螺数据联合滤波,得到高精度的卫星姿态数据。验证视差图得到的姿态与星敏陀螺定姿结果的一致性,最后利用快速傅里叶变换求解平台的颤振频率与振幅。

3.2.2 实验结果及分析

选取 2016 年 7 月 16 日拍摄的 718 轨 108 景、2016 年 8 月 28 日拍摄的 1379 轨 235 景、2018 年 6 月 7 日拍摄的 11229 轨 268 景和 2018 年 6 月 16 日拍摄的 11365 轨 257 景进行实验。每景多光谱影像包含 3 组分片 CCD 影像,每组分片 CCD 影像由蓝、绿、红和近红外 4 个谱段组成。选取第 1 组分片 CCD 的蓝谱段和绿谱段作为实验数据,采用相位相关配准算法获取视差图,4 景影像视差如图 8 所示。

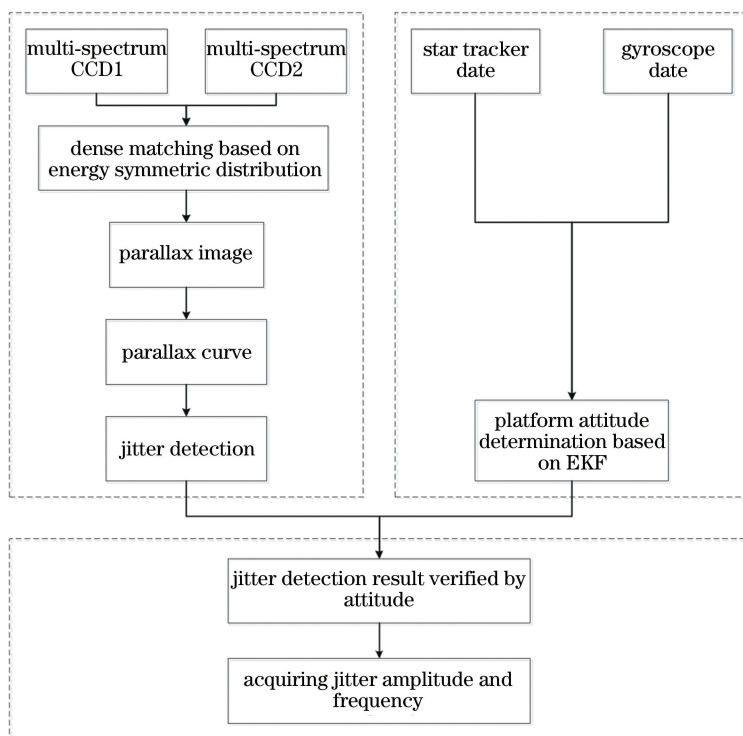


图 7 实验方案

Fig. 7 Experimental scheme

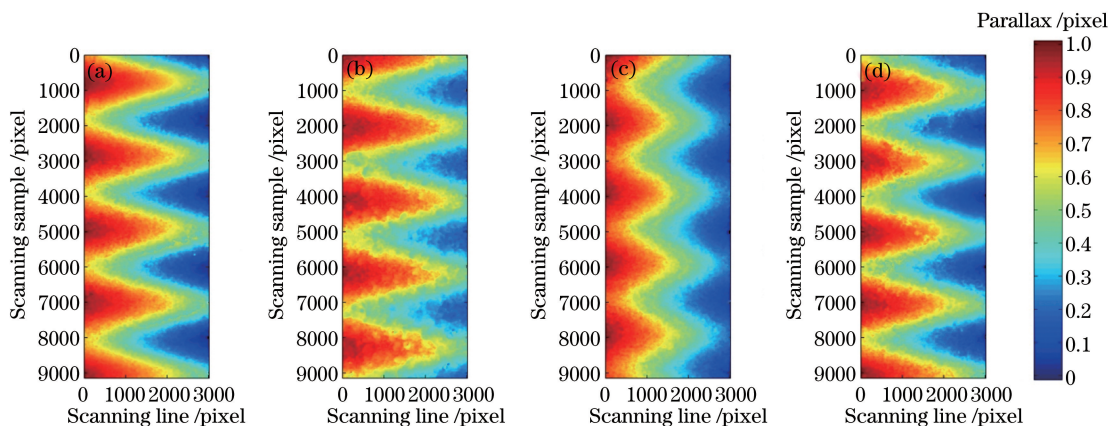


图 8 蓝绿谱段间的影像视差图。(a) 718 轨;(b) 1379 轨;(c) 11229 轨;(d) 11365 轨

Fig. 8 Parallax images between blue and green spectra. (a) Track 718; (b) track 1379; (c) track 11229; (d) track 11365

通过影像配准视差图可以直观地发现,影像由于姿态颤振引起的视差具有较明显的规律性。为了进一步定量探测卫星平台的颤振情况,逐行求影像配准视差图的均值,将视差图转化为便于数据分析的二维相对视差曲线图。由于相对视差曲线图仅记录卫星平台在短时间间隔内的相对姿态,为了能有效反应卫星平台的绝对姿态,需要采用(12)式和(14)式将相对视差曲线转化为绝对姿态变化曲线。

为了验证多光谱影像探测颤振的可靠性,采用EKF联合处理原始星敏陀螺数据,将获得的定姿结

果作为复合参考数据,依据颤振探测值和姿态值的时间序列,复合叠加对比两者之间的差异。由于卫星平台在消除航偏角和地球曲率影响等过程中引入了线性变化量,故而这里利用一阶多项式拟合抑制姿态数据中部分线性的变化量。复合验证实验结果如图9所示。

光滑曲线为探测得到的平台颤振曲线,折线中的数据点为星敏陀螺联合滤波得到的姿态数据。结合两列数据的相关系数计算结果(图9)可以看出,卫星姿态数据与平台颤振探测曲线具有很高的一致

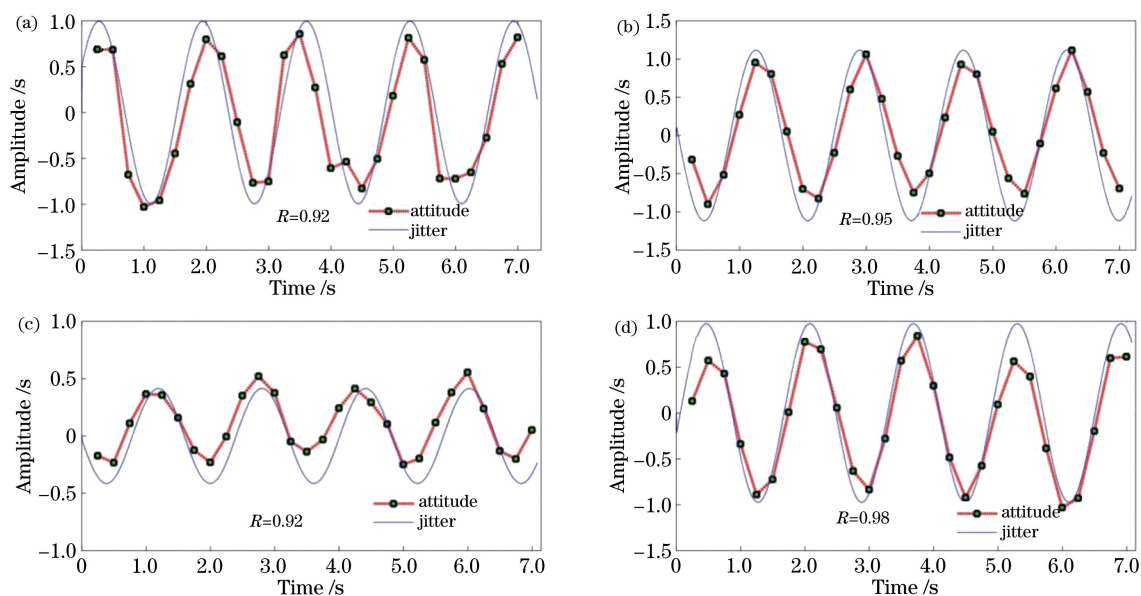


图9 卫星姿态数据复合平台颤振图。(a) 718 轨;(b) 1379 轨;(c) 11229 轨;(d) 11365 轨

Fig. 9 Satellite attitude data verify platform jitter. (a) Track 718; (b) track 1379; (c) track 11229; (d) track 11365

性,验证了探测结果的可靠性。采用快速傅里叶变换对4景影像探测到的颤振曲线进行分析,可以得到资源三号02星卫星平台的颤振信息,如表3所示。

表3 实验数据的颤振信息

Table 3 Jitter information for experimental data

Track ID	Frequency /Hz	Amplitude /s
718	0.63	0.99
1379	0.63	1.12
11229	0.65	0.41
11365	0.65	0.97

根据探测结果可知,资源三号02星卫星平台存在的颤振为0.63~0.65 Hz,振幅为0.41"~1.12",且具有一定的随机性。

4 结 论

本课题组提出了一种基于能量对称分布的相位相关配准算法,该算法的配准精度可达0.05 pixel。通过匹配多光谱影像不同谱段的CCD影像,获得了短时间内像方视差变化信息,用以探测资源三号02星平台的颤振信息,采用星敏陀螺数据联合滤波得到的姿态数据作为参考复合数据,验证了多光谱影像配准得到的平台颤振与姿态数据具有较高的一致性,明确了颤振探测方法的可靠性。首次得出资源三号02星平台存在频率为0.63~0.65 Hz、振幅为0.41"~1.12"的颤振。

参 考 文 献

- [1] Amberg V, Dechoz C, Bernard L, *et al.* In-flight attitude perturbances estimation: application to PLEIADES-HR satellites [J]. Proceedings of the SPIE, 2013, 8866: 886612.
- [2] Johnston J D, Thornton E A. Thermally induced dynamics of satellite solar panels [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(5): 604-613.
- [3] Kirk R L, Howington-kraus E, Redding B, *et al.* High-resolution topomapping of candidate MER landing sites with Mars Orbiter Camera narrow-angle images[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(E12): 343-358.
- [4] Ayoub F, Leprince S, Binet R, *et al.* Influence of camera distortions on satellite image registration and change detection applications [C]//IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 7-11, 2008, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2008: II-1072-II-1075.
- [5] Tong X H, Ye Z, Xu Y S, *et al.* Framework of jitter detection and compensation for high resolution satellites[J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 3944-3964.
- [6] 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.
- [7] 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. Reston, VA: AIAA, 2009: 7349-7369.
- [8] Delevit J M, Greslou D, Amberg V, *et al.* Attitude assessment using pleiades-HR capabilities [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX-B1: 525-530.
- [9] Grodecki J, Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(1): 59-68.
- [10] Pan J, Che C B, Zhu Y, *et al.* Satellite jitter estimation and validation using parallax images [J]. Sensors, 2017, 17(1): 83.
- [11] 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.
- [12] Tong X H, Ye Z, Li L Y, *et al.* Detection and estimation of along-track attitude jitter from Ziyuan-3 three-line-array images based on back-projection residuals [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4272-4284.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Takita K, Aoki T, Sasaki Y, *et al.* High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlayion [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2003, E86-A(8): 1925-1934.
- [16] Tang D, Tu D, Gan Y L. The subpixel estimation of image registration parameter based on the method of phase correlation and template matching [J]. Microelectronics & Computer, 2007, 24(12): 128-130.
唐玓, 涂丹, 甘亚莉. 基于相位相关和模板匹配的亚像素图像配准参数估计 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(12): 128-130.
- [17] Tong X H, Ye Z, Xu Y S, *et al.* A novel subpixel phase correlation method using singular value decomposition and unified random sample consensus [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(8): 4143-4156.
- [18] Fan D Z, Shen E H, Li L, *et al.* Small baseline stereo matching method based on phase correlation [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(2): 154-157.
范大昭, 申二华, 李禄, 等. 基于相位相关的小基高比影像匹配方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(2): 154-157.
- [19] Wang C L, Cheng Y, Zhao C X, *et al.* Robust subpixel image registration technique based on local phase correlation [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(3): 427-432.
王彩玲, 程勇, 赵春霞, 等. 局部相位相关用于图像亚像素级配准技术研究 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 427-432.
- [20] Shen E H. Research on small baseline stereo matching with high precision [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2013: 41-66.
申二华. 小基高比条件下高精度影像匹配技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013: 41-66.
- [21] Tong X H, Ye Z, Liu S J. Essential technology and application of jitter detection and compensation for high resolution satellites [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1500-1508.
童小华, 叶真, 刘世杰. 高分辨率卫星颤振探测补偿的关键技术方法与应用 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1500-1508.
- [22] Savino R, Lappa M. Assessment of thermovibrational theory: application to g-jitter on the Space Station [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1971, 40(2): 201-210.
- [23] Dong Y H. Spacecraft micro vibration: theory and practice [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2015: 1-11.
董瑶海. 航天器微振动: 理论与实践 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015: 1-11.
- [24] Iwasaki A. Detection and estimation of satellite attitude jitter using remote sensing imagery [M]// Hall J. Advances in Spacecraft Technologies. Rijeka: InTech, 2011: 257-272.
- [25] 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.
- [26] Mumtaz R, Palmer P. Attitude determination by

- exploiting geometric distortions in stereo images of DMC camera [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 1601-1625.
- [27] Gwinner K, Scholten F, Preusker F, *et al.* Topography of Mars from global mapping by HRSC high-resolution digital terrain models and orthoimages: characteristics and performance [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(3/4): 506-519.
- [28] Gläser P, Haase I, Oberst J, *et al.* Co-registration of laser altimeter tracks with digital terrain models and applications in planetary science [J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 89: 111-117.
- [29] Mattson S, Bartels A, Boyd A, *et al.* Continuing analysis of spacecraft jitter in LROC-NAC [C]// *Proceedings of 42nd Lunar and Planetary Science Conference*, March 7-11, 2011, Woodlands, Texas, USA. [S.l.: s.n.], 2011, 1608: 2756.
- [30] Ran Q, Chi Y B, Wang Z Y. Property and removal of jitter in Beijing-1 small satellite panchromatic images [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37: 929-933.
- [31] Tadono T, Ishida H, Oda F, *et al.* Precise global DEM generation by ALOS PRISM [J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, II-4: 71-76.
- [32] Takaku J, Tadono T. High resolution DSM generation from ALOS PRISM-processing status and influence of attitude fluctuation [C] //2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 25-30, 2010, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE, 2010: 4228-4231.
- [33] Lee D H, Yang J Y, Seo D C, *et al.* Image restoration of the asymmetric point spread function of a high-resolution remote sensing satellite with time-delayed integration [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(4): 690-701.
- [34] 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*, March 1-5, 2010, Woodlands, Texas, USA. [S.l.: s.n.], 2010, 1533: 1871.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Heid T, Käab A. Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 339-355.
- [39] 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.
- [40] Yang F, Zhou Z X, Liu S G. Satellite attitude determination algorithm based on star-sensor and FOG [J]. *Control Engineering of China*, 2006, 13(4): 374-376, 393.
杨锋, 周宗锡, 刘曙光. 基于星敏感器/光纤陀螺的卫星定姿算法 [J]. *控制工程*, 2006, 13(4): 374-376, 393.
- [41] Pearson K. Note on regression and inheritance in the case of two parents [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1895, 58: 240-242.