

基于空间相机时间延迟积分传感器拼接区 图像的像移测量

刘海秋^{1,2} 徐抒岩¹ 王 栋¹ 闫得杰¹ 李伟雄¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了对由飞船姿态不稳或隔振装置的振动抑制残余量等因素产生的宽频带像移进行测量,提出了基于时间延迟积分(TDI)传感器拼接区所成图像的像移测量方法。定义了偏移系数,用以衡量成像期间像移速度与 TDI 传感器积分时间之间的失配度,以调制传递函数(MTF)为相机成像质量评价指标,分析了失配度与成像质量之间的关系,确定了满足成像质量的像移测量方法的精度范围;利用两片 TDI 传感器拼接区所拍图像存在相同内容、拍摄时刻不同的特点,阐述了基于 TDI 传感器拼接区图像的像移测量原理。实验结果表明测量精度达到 0.2377 pixel,测量频带达到 228 Hz,证明该方法能够对宽频带、高精度的像移进行有效测量。

关键词 测量;空间相机;时间延迟积分传感器;拼接区域;像移测量

中图分类号 V448.15⁺1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0212001

Space Camera Image Motion Measurement Based on Images from Time Delayed Integration Sensors Overlapped Area

Liu Haiqiu^{1,2} Xu Shuyan¹ Wang Dong¹ Yan Dejie¹ Li Weixiong¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to measure the wide-frequency-range image motion caused by spacecraft attitude instability or residual vibration of the vibration isolation devices, image motion measurement method using images taken from time delayed integration (TDI) sensors, overlapped area is proposed. Offset coefficient is defined to measure the mismatch between image motion velocity and integration time. The relationship between mismatch and image quality using modulation transfer function (MTF) as image quality evaluation index is analyzed. The image motion measuring accuracy range is determined. By taking full advantage of features of the images taken from TDI sensors, overlapped area that have the same content but are taken at the different time, the theory of image motion measurement method based on images taken from TDI sensors, overlapped area is elaborated. Experimental results show that the measurement precision can reach 0.2377 pixel, and the measurement bandwidth can reach 228 Hz, proving that this method can effectively achieve wide-frequency-range, high-precision measurement of image motion.

Key words measurement; space camera; time delayed integration sensor; overlapped area; image motion measurement

OCIS codes 120.0280; 040.1490

1 引 言

空间相机在轨拍摄期间,由于各种因素导致的

目标在焦面上映射的像与焦面之间的相对运动称为像移^[1-2]。从形成原理分析,像移分为两部分:由飞

收稿日期: 2013-07-15; 收到修改稿日期: 2013-08-07

基金项目: 中国科学院领域前沿创新项目基金(201204)、吉林省科技发展计划项目基金(20090311)

作者简介: 刘海秋(1987—),女,博士研究生,主要从事航天遥感器像移测量的研究和实现等方面的研究。

E-mail: shangyue_2008@126.com

导师简介: 徐抒岩(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感器计算机控制、图像处理等方面的研究。

E-mail: xusy@ciomp.ac.cn

船的沿轨道运动和地球自转引起的变化规律相对简单、随机性较小的像移；由飞船姿态不稳定、调姿动量轮变速转动、指向控制、太阳帆板调整等运动，会产生各种频率的振动，从而产生像移。其中幅值较大、频率较低的振动可以通过调姿机构进行补偿，一定频率以上的振动可以通过隔振装置进行抑制，经过调姿机构和隔振装置的振动补偿和抑制，大部分振动会被抑制掉，但是仍会剩余一部分残余振动，这些振动表现出幅值小、频带宽、随机性大的特点，并通过飞船平台传递给空间相机，使空间相机随之振动，引起相机焦面的不稳定，最终导致目标在焦面上的像与焦面之间存在相对运动，这是另一部分像移的形成过程，这部分像移具有随机性大、频带宽、幅值小的特点。像移的存在影响空间相机的成像质量，随着空间遥感技术不断提高，空间相机的分辨率不断提高，宽频带、高精度的像移测量方法成为保障高分辨率空间相机成像质量的一个重要方面^[3]。

目前国外公布的空间相机像移测量方面的研究，主要是由德国德累斯顿工业大学的 Janschek 等^[4-5]提出的联合变换相关器法，通过增加辅助面阵图像传感器作为像移测量的传感器，搭配一定的光学设备，获得重叠图像，再通过光学相关器得到像移。这种方法充分利用面阵传感器的积分时间短及拍摄范围大的优点，其测量位置为焦面，更能真实反映焦面处的像移变化，但是由于振动的存在，搭配的光学设备也会随之振动，测量精度会受到限制。国内主要是王家骥等^[6]采用齐次坐标变换和解球面三角形的方法，建立了对地成像模型，根据沿轨道运动、地球自转、飞船姿态等输入参数确定像移，该方

法对于较低频率的像移测量取得了良好的效果，但测量精度依赖于输入参数的精度。因此，在空间相机拍摄期间，需要一种测量精度不受制于飞船姿态稳定性，且不依赖于飞船运行参数的精度的宽频带、高精度的像移测量方法。为此，本文提出了基于时间延迟积分(TDI)传感器拼接区域图像的像移测量方法。

2 像移的产生

飞船传递给空间相机的各种干扰，均会引起目标在焦面上映射的像与焦面之间存在相对运动，这种相对运动可以分解成一对相互作用量，一方面是以焦面为参考，像的运动，即像移，如图 1 中的像移速度 v'_i 在对应时间上累积的位移；另一方面是以像为参考，焦面的运动，如图 1 中的速度 v_i 随时间变化的累积位移，它们大小相等，方向相反。由于像移测量方法带宽和精度限制、测量误差等因素导致最终计算得到的像移速度计算值 v_i 与真实值 v'_i 之间存在一定的偏差，如图 1(a) 所示。在拍摄准备阶段，相机成像控制子系统根据像移速度计算值 v_i 调整 TDI 传感器的积分时间 T ，使之与 v_i 相互匹配，对于 M 级积分、像元尺寸为 $a \times a$ 的 TDI 传感器，令 $v_j = \frac{M \cdot a}{T}$ 为积分速度，满足 $v_j = v_i$ 。然而，由于像移速度计算偏差的存在，使像移速度真实值与计算值之间存在差值 Δv ，导致 $v_j = v_i \neq v'_i$ ，引起像移速度的真实值与积分速度失配，如图 1(b) 所示。将 Δv 分解成垂直于积分方向的速度 Δv_x 和沿积分方向的速度 Δv_y ，如图 1(c) 所示。积分时间与像移速度的失配在时间上的累积作用影响了空间相机的成像质量。

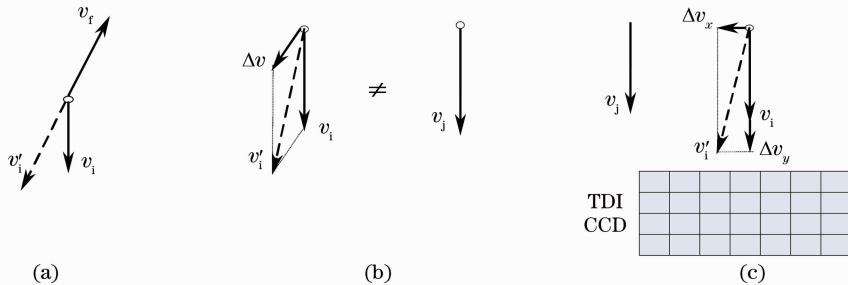


图 1 像移速度示意图

Fig. 1 Image motion sketch map

3 像移对成像质量的影响

以调制传递函数(MTF)为像质评价标准，说明由积分时间与像移速度的失配在时间上的累积作用对空间相机成像质量的影响。图 2 为 4 级 TDI 成

像示意图，两个正方形目标在焦面上映射的像以像移速度 v_i 运动，TDI 积分速度为 v_j ，如果 TDI 积分时间和像移速度相匹配，那么当像移动到传感器矩阵的第一行时，相机对目标进行曝光成像，将光信号

转换成电荷,并将电荷传递到下一行,当像移动到矩阵的第二行时,相机对目标成像得到的电荷与上一行传递的电荷的累积结果传递到下一行,依此类推, M 级 TDI 即为 M 级曝光电荷累积的结果,如图 2(a)所示。然而,事实上 TDI 积分时间和像移速度不完全匹配,即像移速度除了 TDI 积分速度相等的分量 v_i 外,还存在垂直于积分方向的速度 Δv_x 和沿积分方向的速度 Δv_y ,使相机在对目标进行曝光成像时,目标的位置并非理想的曝光位置,由此生成的图像与真实的目标景物之间存在差别,如图 2(b)所示。

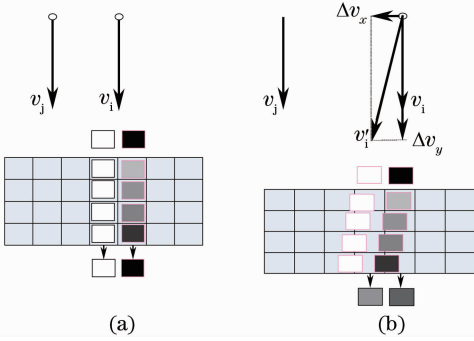


图 2 TDI 传感器成像过程。(a) TDI 积分时间与像移速度相匹配时的成像过程;(b) TDI 积分时间与像移速度不匹配时的成像过程

Fig. 2 TDI sensor imaging process. (a) Imaging process when TDI integral time matches with image motion velocity; (b) imaging process when TDI integral time mismatches with image motion velocity

为了衡量相机系统设定的 TDI 积分时间与像移速度之间的失配度,定义了偏移系数的概念。偏移系数为空间相机焦面上像移速度真实值和设定的 TDI 积分速度之间的差值与 TDI 积分速度之比。偏移系数可分为垂直于 TDI 积分方向和沿 TDI 积分方向的偏移系数,分别用 h_x 和 h_y 表示,TDI 积分级数为 M ,垂直于(沿)积分方向的偏移系数与图像 MTF_x (记为 M_{TF_x})[MTF_y (记为 M_{TF_y})]关系为

$$h_x = \frac{\Delta v_x}{v_i}, \quad (1)$$

$$h_y = \frac{\Delta v_y}{v_i}, \quad (2)$$

$$M_{TF_x} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot M \cdot h_x\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot M \cdot h_x}, \quad (3)$$

$$M_{TF_y} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot M \cdot h_y\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot M \cdot h_y}, \quad (4)$$

式中 f_c 为特征频率, f_N 为奈奎斯特频率,这里取 $f_c = f_N$ 。对于高分辨率空间相机而言,为了保证图像质量,通常要求成像过程中所有因素导致的成像系统整体 MTF 下降不能大于 10%,成像系统整体的 MTF 是成像过程中所有因素的综合作用结果,其中由积分时间和像移失配引起的调制传递函数定义为 MTF_{match} ,根据实际经验, MTF_{match} 的下降不允许超过 5%^[7],分别给垂直于积分方向和沿积分方向的由积分时间和像移失配引起的 MTF 下降分配 2.5%, $h_x M$ 的物理含义是由垂直于积分方向上的像移速度经过积分时间后的累积偏移量,单位是 pixel。 MTF_{match} 与 $h_x M$ 之间的关系如图 3 所示。

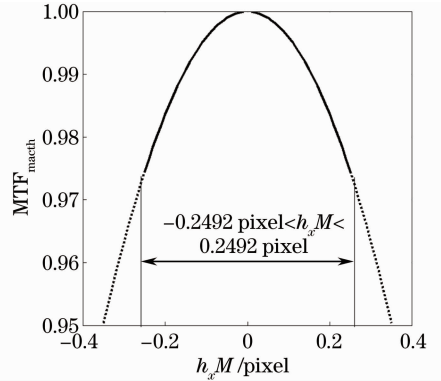


图 3 积分时间与像移速度的失配度与 MTF 之间的关系
Fig. 3 Relationship between MTF and the mismatch of image motion velocity and integral time

在图 3 曲线的实线范围内, MTF_{match} 下降不大于 2.5%,对应的在垂直于积分方向上的经过积分时间后的累积偏移量不能大于 0.2492 pixel,因此,要求像移测量方法的测量精度不低于 0.2492 pixel。

4 基于 TDI 传感器拼接区域的焦面像移计算

4.1 空间相机的焦面 TDI 传感器排布

根据实时拍摄的遥感图像得到焦面像移的重要前提是获得具有一定拍摄时间间隔、一定重叠区域的图像。以 TDI 图像传感器为探测器的空间相机,由于 TDI 图像传感器存在一定的封装宽度,因此,为了保证在垂直于积分方向上获得连续景物的图像,往往将传感器平行交错放置,如图 4 所示,深色区域为两片传感器的拼接区,拼接区的行数等于传感器的积分级数,列数一般根据实际情况而定。随

着飞船的沿轨道运动,相机对目标景物推扫成像,等效于相机不动,目标的像在 TDI 传感器上沿飞行反方向运动,所以两排传感器对同一目标的成像时间存在一定的间隔。因此,空间相机 TDI 传感器拼接区所拍摄的图像满足图像法测量像移的前提要求。

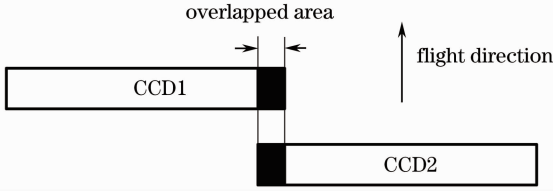


图 4 空间相机 TDI 传感器焦面排布

Fig. 4 Space camera focal plane layout of TDI sensors

4.2 TDI 传感器拼接区图像像移测量原理

以 CCD 图像传感器为例,说明基于 TDI 传感器拼接区域图像的像移测量原理。图 5 描述了由于积分时间和像移速度失配导致同一目标的像在 TDI CCD 拼接区域所成图像中的坐标位置变化过程。图中的 OA1 和 OA2 分别代表图 4 中 CCD1 和 CCD2 的拼接区域中的一部分,矩形为地面目标通过光学系统映射在焦面上的像,由于垂直于积分方向和沿积分方向的像移速度分量 Δv_x 和 Δv_y 的存在,导致矩形目标在 OA1 和 OA2 所成图像 I_1 和 I_2 中的坐标位置为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 不尽相同,它们之间的位置偏移量 Δs_x 和 Δs_y 表示为

$$\Delta s_x = x_2 - x_1, \quad (5)$$

$$\Delta s_y = y_2 - y_1. \quad (6)$$

由偏移量 Δs_x 计算像移的过程如下。以焦面为参照,假设在垂直于 TDI 积分方向上目标的像在焦面上的位移 $s_x(t)$ (像移)随时间变化的曲线如图 6 所示,目标在 t_1 时刻移动到位移 A 处,由 CCD1 的拼接区对其成像,经过时间间隔 Δt 后,同一目标移动到 A' 处,由 CCD2 的拼接区对其成像,在两排

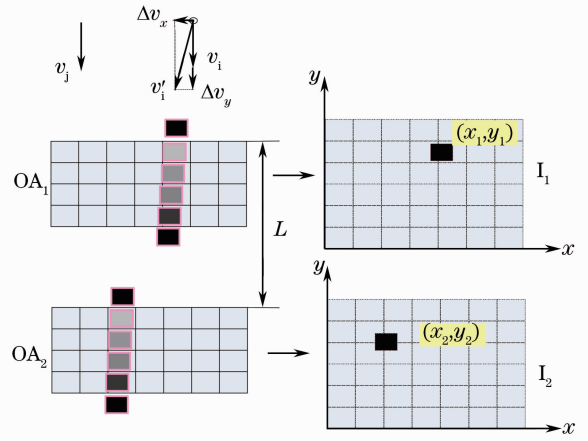


图 5 同一目标在 TDI 传感器拼接区所成图像空间中的位置

Fig. 5 Positions of identical target in the images taken from TDI sensors' overlapped area

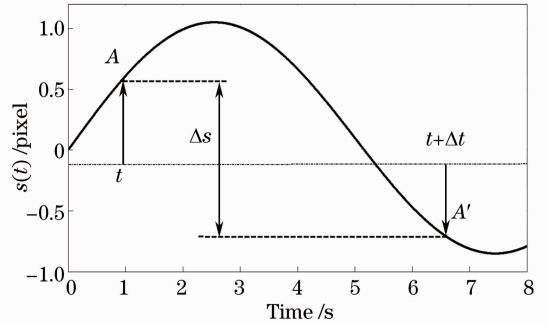


图 6 同一目标在图像中的位置偏移量与像移的关系

Fig. 6 Relationship between image motion and the positions offset of identical target in the images

CCD 拍摄时间间隔 Δt 内,由垂直于积分方向上的像移引起的同一目标在两帧图像中位置偏移量 $\Delta s_x(t)$ 表示为

$$\Delta s_x(t) = [s_x(t + \Delta t) - s_x(t)]. \quad (7)$$

对(7)式两端分别进行傅里叶变换得到

$$\Delta S_x(\omega) = \int_0^{u-\Delta t} \Delta s_x(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt = \int_0^{u-\Delta t} s_x(t + \Delta t) \cdot \exp[-j\omega(t + \Delta t)] - \int_0^{u-\Delta t} s_x(t) \cdot \exp(-j\omega t) = S_x(\omega) [\exp(j\omega\Delta t) - 1]. \quad (8)$$

整理后得到

$$S_x(\omega) = \frac{\Delta S_x(\omega)}{\exp(j\omega\Delta t) - 1}. \quad (9)$$

对(9)式两端进行逆傅里叶变换最终得到位移 $s_x(t)$:

$$s_x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) \exp(j\omega t) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta S_x(\omega)}{\exp(j\omega\Delta t) - 1} \exp(j\omega t) d\omega. \quad (10)$$

为了应用于实际,将上述时域和频域连续的公式转换成时域和频域离散的公式,采样周期为 T_s :

$$T_s = u \cdot N^{-1}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta t}{T_s} = m, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta s_x(n) &= \sum_{n=0}^{N-m} \Delta s_x(t) \cdot \delta(t - k \cdot T_s) = \sum_{n=0}^{N-m} \{ [s_x(t + \Delta t) - s_x(t)] \cdot \delta(t - n \cdot T_s) \} = \\ &= \sum_{n=0}^{N-m} s_x(t + M \cdot T_s) \cdot \delta(t - n \cdot T_s) + \sum_{n=0}^{N-m} s_x(t) \cdot \delta(t - n \cdot T_s) = \\ &= \sum_{n=0}^{N-m} s_x(t) \cdot \delta[t - (n + M) \cdot T_s] + \sum_{n=0}^{N-m} s_x(t) \cdot \delta(t - n \cdot T_s) = s_x(n + m) - s_x(n), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Delta S_x(k) = S_x(k) \left[\exp\left(j \frac{2\pi}{N} mk\right) - 1 \right], \quad (14)$$

$$S_x(k) = \frac{\Delta S_x(k)}{\exp\left(j \frac{2\pi}{N} mk\right) - 1}, \quad (15)$$

$$s_x(n) = \sum_{k=0}^{N-m} S_x(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right) = \sum_{k=0}^{N-m} \frac{\Delta S_x(k)}{\exp\left(j \frac{2\pi}{N} mk\right) - 1} \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right). \quad (16)$$

同理,沿 TDI 积分方向的像移 $S_y(n)$ 可表示为

$$S_y(n) = \sum_{k=0}^{N-m} S_y(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right) = \sum_{k=0}^{N-m} \frac{\Delta S_y(k)}{\exp\left(j \frac{2\pi}{N} mk\right) - 1} \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right). \quad (17)$$

5 实验及结果分析

以某 TDI CCD 空间相机焦面 CCD 拼接区域所成图像为实验对象,验证所提像移测量方法的有效性。该空间相机焦面 CCD 排布如图 7 所示,两片 TDI CCD 间重叠区域宽度为 40 pixel,积分级数为 96。

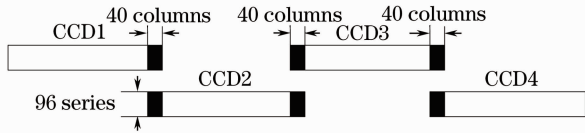


图 7 某空间相机焦面 TDI CCD 排布

Fig. 7 Space camera focal plane layout of TDI sensors

采用该空间相机在北纬 $38.8436^\circ \sim 39.4515^\circ$ 升轨阶段 30 s 内所拍摄的遥感图像为对象,分别采用对地成像模型法(EIM)和基于 TDI 传感器拼接区图像法(TDI SOAI)对垂直于 TDI 积分方向的像移进行测量。TDI CCD 的行周期为 $72.9 \mu\text{s}$,即相机所拍摄的遥感图像的行周期也为 $72.9 \mu\text{s}$,对所拍摄的图像序列每 30 行进行一次计算,得到一个位置偏移量,因此,所提方法的采样频率为 $1/(72.9 \mu\text{s} \times 30) = 457 \text{ Hz}$,根据奈奎斯特采样定理,可测的最大带宽为采样频率的一半,即所提方法的测量带宽为

228 Hz。

图 8 为两种方法获得的焦面像移对比图,其中虚线为对地成像模型法计算得到的像移随时间变化曲线,实线为所提方法测得的像移曲线。可以看出两种方法测得的像移随时间增加的变化趋势大致相同,不同的是所提方法的测量结果在类周期运动基础之上叠加了高频小幅分量。

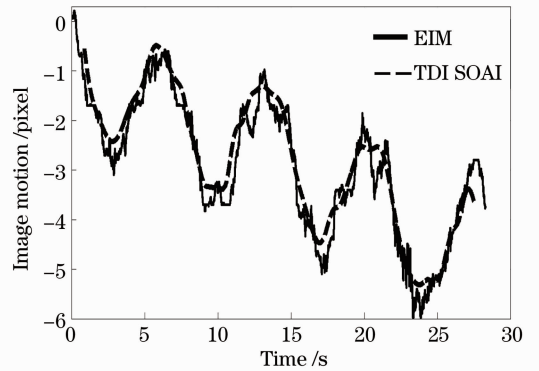


图 8 两种方法获得的像移曲线对比

Fig. 8 Image motion curves comparison of the two methods

对地成像模型法测量像移是通过将轨道参数、地球自转、飞船姿态等参数输入到对地成像模型中计算得到像移,对地成像模型本身没有原理误差,该

像移测量方法的误差只来源于姿态参数测量误差和全球定位系统(GPS)参数测量误差,经空间相机在轨拍摄实验证明,该方法的测量精度可以达到 $0.0657 \text{ pixel}^{[8]}$ 。这是到目前为止公布的全部相关文献中精度最高的像移测量方法,因此,选取对地成像模型法测得的像移为近似真值,将所提方法测量结果与其进行对比。由于所提方法测量带宽为 228 Hz ,对地成像模型法测量带宽为 0.98 Hz ,为了计算所提方法相对于对地成像模型法的测量精度,将所提方法测得的像移数据经过截止频率为 0.98 Hz 的低通滤波器后,只留下 $0\sim 0.98 \text{ Hz}$ 区间的像移分量,图9中实线即为滤波后的像移数据,虚线为对地成像模型法计算得到的像移数据。

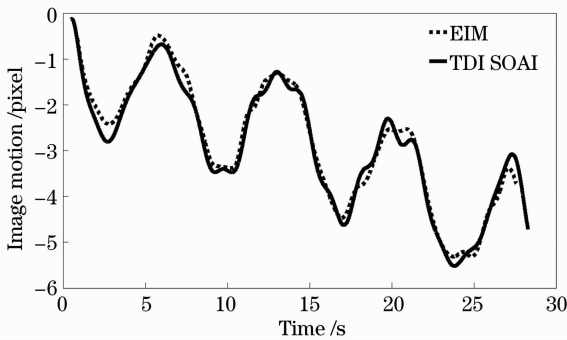


图9 0~1 Hz区间的像移曲线对比

Fig. 9 Image motion curves comparison in 0~1 Hz of the two methods

图10为图9中两条曲线的差值曲线,所提方法测量结果在 $0\sim 0.98 \text{ Hz}$ 内的像移分量与对地成像模型法 $0\sim 0.98 \text{ Hz}$ 内的像移差值的方差为 0.2377 pixel 。由于空间相机在轨拍摄过程中,飞船姿态误差和GPS参数误差都会反映在所拍摄的遥感图像上,即遥感图像本身已经包含了飞船姿态测量误差和GPS参数测量误差,所提方法相对于对地成像模型法的测量误差中包含了地成像模型法相对于真值的误差,因此,所提

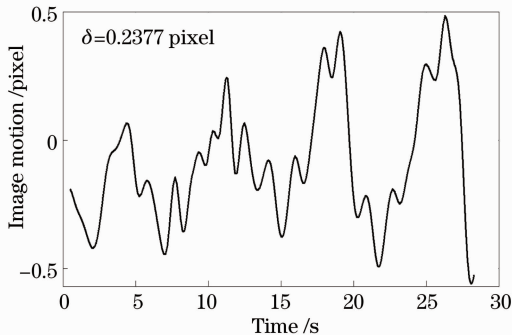


图10 两种方法测得像移差值

Fig. 10 Difference between the two image motion curves in 0~1 Hz

方法相对于真值的误差无需将所提方法相对于对地成像模型法的误差和对地成像模型法相对于真值的误差进行合成,所以,所提方法的测量误差为 0.2377 pixel 。

6 结 论

针对宽频带、高测量精度的像移测量方法对高分辨率空间相机的重要意义,结合目前大多数空间相机焦面图像传感器的类型和排布方式,提出了基于TDI传感器拼接区图像的像移测量方法。以某TDI CCD空间相机在轨拍摄遥感图像为对象,采用本文方法获得图像拍摄期间的垂直于TDI积分方向的像移数据,并经过截止频率为 0.98 Hz 的低通滤波器得到 $0\sim 0.98 \text{ Hz}$ 的像移低频分量,以对地成像模型法计算得到的 $0\sim 0.98 \text{ Hz}$ 的像移为标准,确定所提方法的测量精度,实验结果表明对地成像模型法的测量带宽为 0.98 Hz ,所提方法的测量带宽为 228 Hz ,测量精度为 0.2377 pixel ,满足垂直于积分方向MTF下降不大于 2.5% 的要求。证明了基于TDI传感器拼接区域图像的像移测量方法可以实现宽频带、高精度的像移测量。所提方法选取焦面上TDI传感器拼接区域所成图像为测量数据源,更能反映成像时刻和成像位置的像移的真实情况;可以通过调整采样频率增加测量带宽和改善图像处理技术提高测量精度。

参 考 文 献

- 1 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, *et al.*. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0712006.
樊超, 李英才, 傅洪亮, 等. 光学相关法测量空间相机像移的性能研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0712006.
- 2 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, *et al.*. Influence of defocusing on measurement accuracy of image motion of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1028002.
樊超, 李英才, 傅洪亮, 等. 离焦对光学相关法测量空间相机像移精度的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1028002.
- 3 Zhang Bowen, Wang Xiaoyong, Hu Yongli. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(2): 60-66.
张博文, 王小勇, 胡永力. 微振动对高分辨率空间相机成像影响的集成分析[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(2): 60-66.
- 4 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko. Performances of image motion tracking with optical correlation [C]. Honolulu: 7th IASTED International Conference on Signal and Image Processing, 2005.
- 5 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(3): 333-347.
- 6 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational

- modeling [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1585-1589.
- 王家骥, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- 7 Yan Dejie, Han Chengshan, Li Weixiong. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2224-2229.
- 闫得杰, 韩诚山, 李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2224-2229.
- 8 Li Weixiong. Research on Method of Image Motion Compensation of Space High Resolution Cameras' Collecting Scene Agilely [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 李伟雄. 高分辨率空间相机敏捷成像的像移补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.

栏目编辑: 何卓铭