

文章编号 1004-924X(2015)03-0729-09

机械拼接时间延迟积分 CCD 空间相机的振动参数检测

刘海龙^{1,2}, 韩诚山¹, 李祥之¹, 姜肖楠¹, 孙雪晨¹, 傅 瑶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: 为了获取空间相机在轨摄像期间的振动幅频特性, 提出了一种基于 TDICCD 拼接技术的空间相机振动参数检测方法。根据 TDICCD 拼接原理, 利用拼接结构中的重叠成像区域在不同时刻对同一景象成像, 通过灰度投影算法对所成图像进行比对求取相对偏移量, 拟合偏移量数据, 进而根据拟合结果计算出空间相机振动参数。实验结果表明: 对于一维单一频率的振动, 频率相对误差小于 0.5%, 振幅绝对误差小于 1 个像元; 对于一维混合频率的振动, 频率相对误差小于 3%, 振幅绝对误差小于 2 个像元; 对于沿推扫方向和垂直推扫方向均为单频振动的二维振动, 频率相对误差小于 1%, 振幅绝对误差小于 2 个像元。实验结果验证了检测方法的正确性, 达到了不增加额外设施, 仅利用相机自身结构就能精确测量相机振动参数的目的, 并为后续图像复原提供了数据基础。

关键词: 空间相机; 时间延迟积分(TDICCD); 机械拼接; 振动参数; 灰度投影; 曲线拟合

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0729

Vibration parameter measurement of TDICCD space camera with mechanical assembly

LIU Hai-long^{1,2}, HAN Cheng-shan¹, LI Xiang-zhi¹, JIANG Xiao-nan¹, SUN Xue-chen¹, FU Yao¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: ustclhl@163.com*

Abstract: To obtain the vibration amplitude-frequency characteristics of a in-orbit space camera, a space camera vibration parameter detection method by using TDICCD mechanical assembly technique was presented. According to TDICCD mechanical assembly technology, the images of same scene were taken by a TDICCD overlapping area at different moments, then the images were compared by using gray projection algorithm to derive the relative offset. Finally, the offset data were fitted, and the vibration parameters of the space camera were obtained according to the fitting result. Experimental results show that frequency measurement relative error and the amplitude measurement absolute error are less than 0.5% and 1 pixel respectively for the one dimensional single frequency vibration; and those are less than 3% and 2 pixel respectively for one dimensional mixed frequency vibration. Moreover, for two dimensional vibration which are both single frequency vibration along and vertical to the scanning direction, the frequency measurement error and the amplitude

收稿日期: 2014-01-25; 修订日期: 2014-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61036015); 吉林省青年科研基金资助项目(No. 20150520059JH)

measurement error are less than 1% and 2 pixel, Respectively. Experimental results demonstrate the correctness of detection methods, reach the purpose of detecting vibration parameters without additional facilities except the camera structure, and provide a data base for the subsequent image restoration.

Key words: space camera; Time-delay Integration CCD (TDICCD); mechanical assembly; vibration parameter; gray projection algorithm; curve fitting

1 引言

时间延时积分型电荷耦合器件(TDICCD)是一种面阵结构、线阵输出的新型 CCD,它通过对同一物体多次曝光,利用多级积分来增加积分时间从而增加光能量,在航天遥感领域得到了广泛应用^[1-3]。振动会导致相机在积分成像过程中产生像移,破坏焦面上图像与光生电荷包运动的同步性,影响相机的成像质量。卫星在轨摄像期间,卫星平台的振动会引起相机镜头抖动,对图像质量产生一定的影响^[4-5]。要想获得清晰的图像,须对图像进一步处理,其前提是获取振动参数。

Tico Marius 等提出利用快速 CCD 方法获得卫星平台的振动参数^[6],该方法虽然能有效检测出卫星振动,但需要增加额外设施,而空间相机焦平面空间有限,因而该方法受到了限制。Samson J Timoner 等提出一种利用面阵凝视相机图像序列获取振动参数的方法^[7],但与凝视相机不同,TDICCD 相机为推扫型,不能对同一景物进行多次成像,从而很难利用同一区域的多幅图像来进行振动估计。

随着空间遥感相机技术的不断发展,遥感相机的分辨率不断提高,成像范围也在不断扩大。现有的 CCD 器件尺寸已经不能满足大焦面遥感相机的要求。目前多采用多片 TDICCD 拼接技术来解决这一问题。为了利于各片 TDICCD 所成图像的拼接,在各片 TDICCD 进行首尾搭接时要保证有一定重叠区域。本文根据拼接结构中的重叠成像区域,提出一种利用 TDICCD 拼接技术的空间相机振动参数检测方法,以灰度投影算法处理重叠成像区对同一景象所成图像,通过拟合得到的偏移量求取振动参数,理论推导和实验结果证明了方法的可行性,实现了不增加额外设施,仅利用相机自身结构就能测量相机振动参数。

2 振动参数检测相关技术

2.1 振动对空间相机成像质量影响

卫星上的任意振动可以分解成 3 个方向:沿光轴方向,推扫方向和垂直推扫方向。沿光轴方向的振动对成像质量基本没有影响;沿推扫方向和垂直推扫方向上的低频振动使相机产生大幅度的抖动,使图像发生位置变化,图像的直观变化是变位、像元拉长或压缩;高频振动则使图像模糊,降低了图像调制传递函数^[8]。因此这里主要研究沿推扫方向和垂直推扫方向上的振动参数检测。

2.2 空间相机 CCD 拼接结构简介

目前常见的 CCD 拼接方式可以分为光学拼接和机械拼接。光学拼接法的精度较高,但拼接棱镜时会产生色差,用于透射式光学系统时,可以使拼接的棱镜与透镜组合进行色差校正,但用于全反射系统时会直接引入色差,降低像质。交错机械拼接的方式简单,不受分光棱镜加工长度、胶合长度约束条件的限制,适用于各种形式的光学系统,故得到了较多的应用^[9-10]。

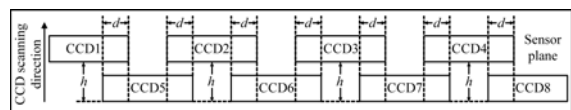


图 1 CCD 拼接结构示意图

Fig. 1 Structure of CCD stitching

CCD 拼接结构如图 1 所示,空间相机的焦平面上是由 8 片 CCD 组成的 CCD 阵列。为了保证首尾相错时具有一定的重叠区域和 CCD 器件本身尺寸的限制,8 片 CCD 排成了 2 排。实际的拼接过程中每个重叠区域的大小相等,重叠区域内一般有 100 个以上的 CCD 像元宽度。

2.3 灰度投影算法

灰度投影算法^[11-12]是将一幅 $M \times N$ 图像的二维灰度信息 $G_k(x, y)$ 映射成 2 个独立的一维投

影序列。

$$G_k(j) = \sum_{i=1}^M G_k(i, j) / M, \quad (1)$$

$$G_k(i) = \sum_{j=1}^N G_k(i, j) / N, \quad (2)$$

其中: $G_k(j)$ 和 $G_k(i)$ 分别为第 k 帧图像中第 j 列和第 i 行的灰度投影值, M 、 N 分别为图像的行数和列数。

通过相关运算建立当前图像投影数据 $\{G_k(j), G_k(i)\}$ 与参考图像投影数据 $\{G_r(j), G_r(i)\}$ 的对应关系, 在当前图像的投影数据中, 找出与参考图像最逼近的投影数据, 计算当前图像相对参考图像的运动矢量。采用最小均方误差 (MSE) 作为最小匹配准则, 构造相关函数:

$$C(\omega) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^N [G_r(j + \omega - 1) - G_k(n + j)]^2}, \quad (3)$$

$$C(v) = \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{i=1}^M [G_r(i + v - 1) - G_k(n + i)]^2}, \quad (4)$$

其中: $1 \leq \omega \leq 2n + 1, 1 \leq v \leq 2m + 1, n, m$ 分别为水平方向和垂直方向上位移探测在一侧的搜索宽度。设 ω_{\min}, v_{\min} 分别为 $C(\omega), C(v)$ 取最小值时的 ω, v 的值, 则第 k 帧相对于参考帧图像在水平和垂直方向上的像移矢量为:

$$\Delta x = m + 1 - \omega_{\min}, \quad (5)$$

$$\Delta y = n + 1 - v_{\min}. \quad (6)$$

2.4 TDICCD 图像振动降质模型

对于 TDICCD, 其图像振动降质模型^[13-14]为:

$$G'(n_k, m, k) = [G(a, b) \otimes \text{PSF}_{\text{vib}}(n_k, m, k)]_{n_k}, \quad (7)$$

其中: $G(a, b)$ 为无振动影响时的 TDICCD 图像, $G'(n_k, m, k)$ 为有振动影响时的第 k 行图像, $\text{PSF}_{\text{vib}}(n_k, m, k)$ 为振动导致的点扩散函数。

根据振动模糊理论, 振动引起的 PSF 等于相机相应位置的概率密度函数 (PDF), 特别是振动为平行于焦平面的二维振动时, PDF 为运动速率的倒数^[15], 因此可以得到第 k 行图像的 PSF 为:

$$\text{PSF}_{\text{vib}}(x, y, k) = \text{PDF}_{\text{vib}}(x, y, k) = \int_{(k-N_{\text{st}})T_{\text{lp}}}^{kT_{\text{lp}}} \frac{1}{v_{\text{vib}}(x, y, t)} dt, \quad (8)$$

其中: $v_{\text{vib}}(x, y, t)$ 为平行于焦平面的二维振动速率方程。这样, CCD_1 对区域 A 成像时, 振动速率

为 $v_{\text{vib}} = v_{\text{vib}}(t_n)$, 而 CCD_5 对区域 A 成像时, 振动速率为 $v_{\text{vib}} = v_{\text{vib}}(t_n + \Delta T)$ 。结合式 (7)、(8), 可以分别得到 CCD_1 和 CCD_5 的振动降质图像。

3 基于 CCD 拼接技术的振动参数检测

TDICCD 每一行图像都是由 N_{st} 次电荷累加得到的, N_{st} 为积分级数, 成像过程中受到振动影响时, 这一行相对于无振动影响图像的偏移量为积分过程中 N_{st} 级积分对应偏移量的平均值, 即 $t - N_{\text{st}} T_{\text{lp}}$ 到 t 时刻之间 N_{st} 级积分对应的偏移量的平均值, T_{lp} 为 CCD 行周期。由于任意振动函数均可展开成傅里叶级数形式, 这里主要以正弦振动为例进行理论推导。设焦面上沿推扫方向上振幅频方程为 $y_0 = A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{vib}}} t + \varphi_0\right)$, 其中: A_0 为振幅, T_{vib} 为振动周期, φ_0 为相位, 则 t 时刻得到的这一行图像的偏移量为:

$$y_1 = \frac{1}{N_{\text{st}} T_{\text{lp}}} \int_{t - N_{\text{st}} T_{\text{lp}}}^t A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{vib}}} \tau + \varphi_0\right) d\tau = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{vib}}} t + \varphi_1\right), \quad (9)$$

其中:

$$A_1 = A_0 \frac{\sin(\pi N_{\text{st}} T_{\text{lp}} / T_{\text{vib}})}{N_{\text{st}} T_{\text{lp}} / T_{\text{vib}}}, \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 - \frac{\pi N_{\text{st}} T_{\text{lp}}}{T_{\text{vib}}}. \quad (11)$$

空间遥感相机推扫式成像如图 2 所示, 两排 CCD 的重叠成像区对同一个景象成像, 先由第一排的 CCD_1 成像; 经过时间 ΔT 后, 由第二排的 CCD_5 对其再次成像。其中, $\Delta T = h / v_{\text{img}}, h$ 为两排 CCD 间的距离, v_{img} 为像在 CCD 焦面上的移动速度。

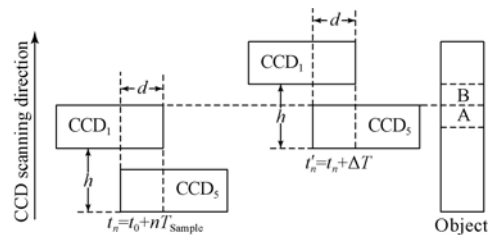


图 2 CCD 对重叠区域成像的示意图
Fig. 2 Area of double imaging by CCD

假设在 t_n 时刻 CCD₁ 对区域 A 成像, $t_n = t_0 + nT_{\text{sample}}$, 其中 T_{sample} 为偏移量测量采样周期, 记所得图像为 A₁-1, 经过 ΔT 后 CCD₅ 对同一区域 A 进行成像得图像 A₅-1。A₁-1 的振动偏移量为 $y_1(t_n)$, A₅-1 的振动偏移量为 $y_1(t_n + \Delta T)$, 则 A₅-1 和 A₁-1 的相对振动偏移量为:

$$\Delta y(t_n) = y_1(t_n + \Delta T) - y_1(t_n), \quad (12)$$

将式(9)代入式(12)中, 得到:

$$\Delta y(t_n) = A \cos \left[\frac{2\pi}{T_{\text{vib}}} t_n + \varphi \right], \quad (13)$$

其中:

$$A = 2A_1 \sin \left[\frac{\pi \Delta T}{T_{\text{vib}}} \right], \quad (14)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \frac{\pi \Delta T}{T_{\text{vib}}}. \quad (15)$$

通过灰度投影算法处理图像 A₁-1 和 A₅-1 可以求得图像间的相对偏移 $\Delta y(t_n)$, 选取合适的采样周期 T_{sample} , 得到一系列 Δy , 拟合偏移量数据, 根据拟合函数求出拟合曲线的周期 T_{fit} 和振幅 A_{fit} , 则:

$$T_{\text{vib}} = T_{\text{fit}}, \quad (16)$$

$$A = A_{\text{fit}}, \quad (17)$$

结合式(10)、(14)、(17)得到:

$$A_0 = A_{\text{fit}} \left/ \left[2 \sin \left[\frac{\pi \Delta T}{T_{\text{vib}}} \right] \cdot \frac{\sin(\pi N_{\text{st}} T_{\text{lp}} / T_{\text{vib}})}{N_{\text{st}} T_{\text{lp}} / T_{\text{vib}}} \right] \right. \quad (18)$$

为了求出振动振幅, 要求 $\pi \Delta T / T_{\text{vib}} \neq n\pi$, $n \in \mathbf{Z}^+$ 。并且由于灰度投影算法求取的偏移量精确度只能达到 1 个像元, 所以当 $A_{\text{fit}} < 1$ pixel 时, 无法测量振动参数。

设焦面上垂直推扫方向上振动幅频方程为 $y'_0 = A'_0 \sin \left[\frac{2\pi}{T'_{\text{vib}}} t + \varphi'_0 \right]$, 与沿垂直推扫方向上振动的推导过程类似, 可以得到相应的计算公式:

$$T'_{\text{vib}} = T'_{\text{fit}}, \quad (19)$$

$$A'_0 = A'_{\text{fit}} \left/ \left[2 \sin \left[\frac{\pi \Delta T}{T'_{\text{vib}}} \right] \cdot \frac{\sin(\pi N_{\text{st}} T_{\text{lp}} / T'_{\text{vib}})}{N_{\text{st}} T_{\text{lp}} / T'_{\text{vib}}} \right] \right. \quad (20)$$

上面分析证明, 利用遥感相机中的 CCD 拼接重叠区域进行振动参数测量是可行的。该方法利用 CCD 重叠图像区域, 解决了推扫式遥感相机难以利用同一个景物的图像进行振动参数测量的问题。

4 振动参数检测实验及结果分析

依据 TDICCD 图像振动降质模型可以模拟 CCD₁ 与 CCD₅ 生成的图像, 对其进行灰度投影计算, 得到偏移量并对偏移量数据进行拟合, 求取振动参数, 对结果进行分析来验证本文提出的测量方法。分别对一维单频振动、一维混合振动、沿推扫方向和垂直推扫方向均为单频振动的二维振动进行实验。选取试验参数如下: 卫星轨道高度为 760 km, 相机焦距为 10 m, 像元尺寸 $a = 10 \mu\text{m}$, 行周期 $T_{\text{lp}} = 100 \mu\text{s}$, 积分级数 $N_{\text{st}} = 16$, CCD 间距 $h = 5 \text{ cm}$, 则 $\Delta T = 0.508 519 \text{ s}$ 。

4.1 一维单频振动参数检测

以垂直推扫方向的单一频率振动为例, 选取频率为 50 Hz, 振幅为 $10 \mu\text{rad}$ 的正弦振动。对于 10 m 焦距的空间相机, $10 \mu\text{rad}$ 的振动幅度反映在焦平面上幅度为 $100 \mu\text{m}$, 即 10 个像元, 则 CCD₁ 拍摄区域 A 时的垂直推扫方向的振动方程为:

$$x_{\text{ccd1}} = 10 \sin(100\pi t + \varphi_0). \quad (21)$$

CCD₅ 拍摄区域 A 时的垂直推扫方向振动方程为:

$$x_{\text{ccd1}} = 10 \sin(100\pi t + \varphi_0 + 50.85\pi). \quad (22)$$

取 $\varphi_0 = 0$, 并将式(21)、(22)代入式(7)、(8), 得到 CCD₁ 和 CCD₅ 的振动降质图像, 如图 3(a) 和 3(b) 所示。图片水平方向为沿推扫方向, 每一列图像的拍摄时间均相差 ΔT 。

分别选取图 3(a) 和 3(b) 中的第 $1 + k \cdot C_s$ 列到第 $N + k \cdot C_s$ 列图像, 应用灰度投影算法, 依次求取垂直推扫方向上的偏移量 Δy_k , 其中 $k \in \mathbf{N}$, $C_s = T_{\text{sample}} / T_{\text{lp}}$, N 为图像采样宽度。以偏移量为纵坐标, 时间为横坐标, 分别进行 1、2、3 阶 Fourier 拟合, 得到拟合曲线及曲线参数, 由式(19)、(20)求出焦面上垂直推扫方向上振动的周期和振幅。拟合曲线如图 4 所示, 其中 p 为偏移量测量数据, F_1 为 1 阶傅里叶拟合曲线, F_2 为 2 阶傅里叶拟合曲线, F_3 为 3 阶傅里叶拟合曲线, 拟合曲线参数及对应的振动参数如表 1 所示。



(a) 振动作用下 CCD₁ 的图像

(a) Image of CCD₁ with vibration



(b) 振动作用下 CCD₅ 的图像

(b) Image of CCD₅ with vibration

图 3 垂直推扫方向振动作用下的降质图像

Fig. 3 Blur image with vibration vertical to scanning direction

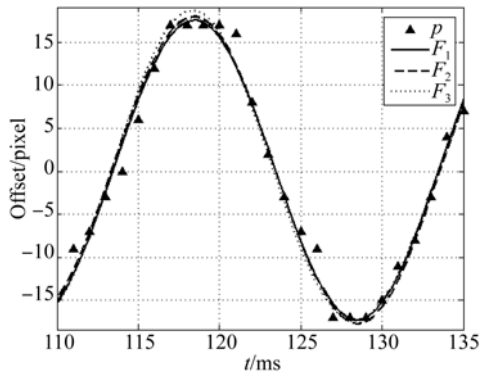


图 4 垂直推扫方向振动作用下的偏移量拟合曲线

Fig. 4 Offset fitting curves with vibration vertical to scanning direction

表 1 垂直推扫方向作用振动下的偏移量拟合结果

Tab. 1 Result of offset fitting with vibration vertical to scanning direction

拟合阶数	拟合曲线			检测结果	
	周期 /ms	振幅 /pixel	确定系数	周期 /ms	振幅 /pixel
1	20.017	17.435	0.952 5	20.017	9.054
2	20.223	17.845	0.953 4	20.223	9.267
3	20.010	18.065	0.955 0	20.010	9.381

4.2 一维混合振动参数检测

对于 10 m 焦距的空间相机, 20 μrad 和 10 μrad 的振动幅度反映在焦平面上幅度分别为 0.2 mm 和 0.1 mm, 即 20 个像元和 10 个像元, 则 CCD₁ 拍摄区域 A 时的沿推扫方向的振动方程为:

$$y_{\text{ccd1}} = 20\sin(40\pi t + \varphi_0) + 10\sin(100\pi t + \varphi_1). \quad (23)$$

CCD₅ 拍摄区域 A 时的振动方程为:

$$y_{\text{ccd1}} = 20\sin(40\pi t + \varphi_0 + 20.34\pi) + 10\sin(100\pi t + \varphi_1 + 50.85\pi). \quad (24)$$

取 $\varphi_0 = 0, \varphi_1 = 0$, 并将式 (23)、(24) 代入式 (7)、(8), 得到 CCD₁ 和 CCD₅ 的振动降质图像, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示。图片水平方向为沿推扫方向, 每一列图像的拍摄时间均相差 ΔT 。



(a) 混合振动作用下 CCD₁ 的图像



(b) 混合振动作用下 CCD₅ 的图像

(b) Image of CCD₅ with mixed vibrations

图 5 沿推扫方向混合振动作用下的降质图像

Fig. 5 Blur image with mixed vibrations along scanning direction

与一维单频振动类似, 对图 5(a) 和图 5(b) 中的振动降质图像应用灰度投影算法, 求取沿推扫方向上的偏移量, 并对偏移量数据分别采用 6、7、8 阶 Fourier 拟合, 得到拟合曲线如图 6 所示, 其

中 p 为偏移量测量数据, F_6 为 6 阶傅里叶拟合曲线, F_7 为 7 阶傅里叶拟合曲线, F_8 为 8 阶傅里叶拟合曲线。

设 Fourier 拟合曲线方程为:

$$y_{\text{fit}} = \sum_{k=0}^n [A_k \sin(k\omega x + \varphi_k)], \quad (25)$$

其中: n 为 Fourier 级数的阶数, 拟合曲线参数如表 2 所示。

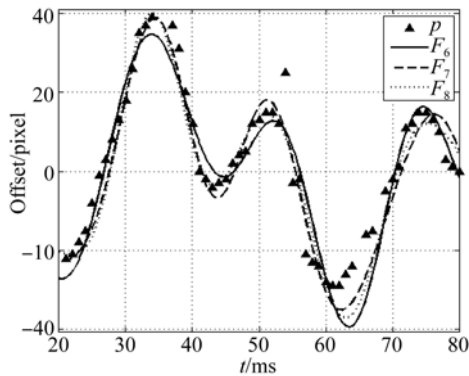


图 6 沿推扫方向混合振动作用下的偏移量拟合曲线

Fig. 6 Offset fitting curves with mixed vibrations along scanning direction

表 2 沿推扫方向混合振动下的偏移量拟合结果

Tab. 2 Result of offset fitting with mixed vibrations along scanning direction

拟合系数	拟合阶数		
	6	7	8
A_0	1.298	1.212	1.256
A_1	2.088	2.298	2.283
A_2	18.203	18.341	18.402
A_3	3.831	3.659	3.678
A_4	1.406	1.195	1.135
A_5	17.702	18.058	17.928
A_6	3.072	1.837	1.861
A_7	—	7.851	5.278
A_8	—	—	2.871
ω	0.060 96	0.061 21	0.061 33
确定系数	0.557 9	0.582 8	0.589 1

从拟合数据可以看出, 偏移量 Fourier 拟合

主要以 2 次谐波和 5 次谐波为主, 分别对应 20 Hz 和 50 Hz 的振动, 由式(16)、(18)可以求出焦面上沿推扫方向上振动的周期和振幅, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 二次谐波参数及对应的检测结果

Tab. 3 Second harmonic parameters and detection results

拟合阶数	拟合曲线			检测结果	
	周期 /ms	振幅 /pixel	确定系数	周期 /ms	振幅 /pixel
6	51.535	18.203	0.557 9	51.535	17.874
7	51.325	18.341	0.582 8	51.325	18.010
8	51.224	18.402	0.589 1	51.224	18.069

表 4 五次谐波参数及对应的检测结果

Tab. 4 Fifth harmonic parameters and detection results

拟合阶数	拟合曲线			检测结果	
	周期 /ms	振幅 /pixel	确定系数	周期 /ms	振幅 /pixel
6	20.614	17.702	0.557 9	20.614	9.193
7	20.530	18.058	0.582 8	20.530	9.377
8	20.490	17.928	0.589 1	20.490	9.310

4.3 焦平面上二维振动参数检测

CCD₁ 拍摄区域 A 时沿推扫方向的振动方程为:

$$y_{\text{ccd1}} = 20 \sin(40\pi t + \varphi_0), \quad (26)$$

CCD₁ 拍摄区域 A 时垂直推扫方向的振动方程为:

$$x_{\text{ccd1}} = 10 \sin(100\pi t + \varphi_1), \quad (27)$$

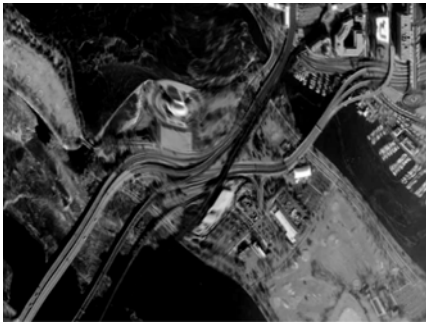
CCD₅ 拍摄区域 A 时沿推扫方向的振动方程为:

$$y_{\text{ccd1}} = 20 \sin(40\pi t + \varphi_0 + 20.34\pi), \quad (28)$$

CCD₅ 拍摄区域 A 时垂直推扫方向的振动方程为:

$$x_{\text{ccd1}} = 10 \sin(100\pi t + \varphi_1 + 50.85\pi), \quad (29)$$

取 $\varphi_0 = 0$, $\varphi_1 = 0$, 并将式(25)、(27)、(38)、(29)代入式(7)、(8), 分别得到 CCD₁ 和 CCD₅ 的振动降质图像, 如图 7(a)和图 7(b)所示。图片水平方向为沿推扫方向, 每一列图像的拍摄时间均相差 ΔT 。



(a) 二维振动作用下的 CCD₁ 的图像

(a) Image of CCD₁ with two dimension vibrations



(b) 二维振动作用下的 CCD₅ 的图像

(b) Image of CCD₅ with two dimension vibrations

图 7 二维振动作用下的降质图像

Fig. 7 Blur image with two dimension vibrations

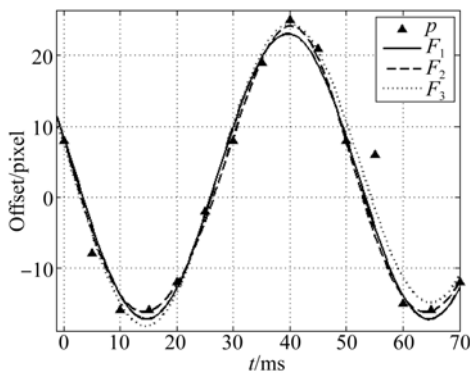


图 8 二维振动沿推扫方向偏移量拟合曲线

Fig. 8 Offset fitting curves with two dimension vibrations along scanning direction

与一维单频振动类似, 对图 7(a) 和图 7(b) 中的振动降质图像应用灰度投影算法, 求取沿推扫方向上和垂直推扫方向上的偏移量, 并对数据进行拟合。分别采用 1、2、3 阶 Fourier 拟合, 得到拟合曲线及曲线参数, 由式(16)、(18)、(19)、(20) 可求出焦面上沿推扫方向上和垂直推扫方向上振动的周期和振幅。沿推扫方向上偏移量拟合曲线如图 8 所示, 垂直推扫方向上偏移量拟合曲线如

图 9 所示, 其中 p 为偏移量测量数据, F_1 为 1 阶傅里叶拟合曲线, F_2 为 2 阶傅里叶拟合曲线, F_3 为 3 阶傅里叶拟合曲线, 沿推扫方向上偏移量拟合曲线参数及对应的振动参数如表 5 所示, 垂直推扫方向上偏移量拟合曲线参数及对应的振动参数如表 6 所示。

表 5 二维振动沿推扫方向偏移量拟合结果

Tab. 5 Result of Offset with two dimension vibrations along scanning direction

拟合阶数	拟合曲线			检测结果	
	周期 /ms	振幅 /pixel	确定系数	周期 /ms	振幅 /pixel
1	49.986	20.176	0.964 2	49.986	19.811
2	49.827	20.250	0.967 8	49.827	19.884
3	50.093	21.450	0.973 1	50.093	21.062

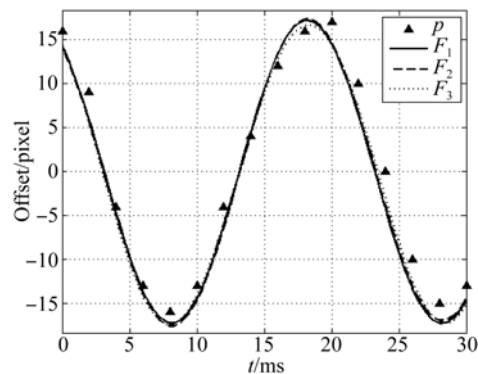


图 9 二维振动垂直推扫方向偏移量拟合曲线

Fig. 9 Offset fitting curve with two dimension vibrations vertical to scanning direction

表 6 二维振动垂直推扫方向偏移量拟合结果

Tab. 6 Result of Offset with two dimension vibrations vertical to scanning direction

拟合阶数	拟合曲线			检测结果	
	周期 /ms	振幅 /pixel	确定系数	周期 /ms	振幅 /pixel
1	20.087	17.253	0.960 6	20.087	8.959
2	20.087	17.470	0.960 9	20.087	9.072
3	20.074	17.635	0.962 7	20.074	9.158

4.4 实验结果分析

利用 TDICCD 拼接技术检测卫星振动, 分别

对一维单频振动、一维混合振动、沿推扫方向和垂直推扫方向均为单频振动的二维振动进行检测实验,选取表 1、表 3、表 4、表 5、表 6 中拟合确定系数最大的一组数据进行对比分析,得到结果如表 7 所示。

表 7 检测结果误差分析

Tab. 7 Error analysis of testing results

振动类型	实际参数		检测数据	
	频率 /Hz	振幅 /pixel	频率相对 误差	振幅绝对 误差/pixel
一维单频 振动	50	10	0.000 5	0.619
一维混合 振动	20	20	0.001 1	0.223
一维混合 振动	50	10	0.023 9	0.690
二维 振动	20	20	0.023 9	1.931
二维 振动	50	10	0.001 9	1.062
二维 振动	20	20	0.003 7	0.842

由实验结果可知,利用本方法可以有效地检测空间相机振动参数。灰度投影算法检测偏移量精确度为 1 pixel,所以本方法对振幅的检测理论精度亦为 1 pixel。对于一维单一频率的振动,由于振动唯一,检测误差最小,频率相对误差小于 0.5%,振幅绝对误差与理论误差精度相符,小于 1 pixel;对于一维混合频率的振动,频率相对误差小于 3%,振幅绝对误差小于 2 pixel,略大于理论误差,这是由于振动相互叠加,对灰度投影算法相

关运算带来影响使得求取到的偏移量出现误差,同时由于 Fourier 拟合阶数限制,降低了拟合精度,也会对最后结果造成影响;对于二维振动,频率相对误差小于 1%,振幅绝对误差小于 2 pixel,同样是因为沿推扫方向和垂直推扫方向的振动相互叠加,影响了偏移量的计算。

5 结 论

本文根据 TDICCD 拼接技术,利用拼接结构中的重叠成像区域,提出了一种空间相机振动参数的检测方法。根据 TDICCD 成像原理进行了理论推导,证明了该方法的可行性,并给出了振动参数的计算公式,同时根据图像振动降质模型仿真振动图像,进行了验证实验。实验结果表明,对于一维单一频率的振动,频率相对误差小于 0.5%,振幅绝对误差小于 1 pixel;对于一维混合频率的振动,频率相对误差小于 3%,振幅绝对误差小于 2 pixel;对于沿推扫方向和垂直推扫方向均为单频振动的二维振动,频率相对误差小于 1%,振幅绝对误差小于 2 pixel。检测结果与实际参数基本吻合,实验结果验证了检测方法的正确性。本方法充分利用了相机自身结构,不增加额外设施就可达到相机振动参数检测的目的,为星上振动实时补偿和后续图像复原的理论研究和实际应用提供了前提。

参考文献:

- [1] 石俊霞,郭永飞,薛旭成,等. 航天时间延迟积分 CCD 相机振动模糊图像的恢复 [J]. 光电子·激光,2012,23(3): 572-578.
SHI J X, GUO Y F, XUE X CH, *et al.*. Motion blurred image restoration of spaceborne TDICCD camera [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(3): 572-578. (in Chinese)
- [2] CHENG H Y. A high-resolution airborne four-camera imaging system for agricultural remote sensing [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88: 13-24.
- [3] 薛旭成,韩诚山,薛栋林,等. 应用双排 TDICCD 提高空间推扫遥感相机动态范围 [J]. 光学精密工程,2012,20(12): 2791-2795.
XUE X CH, HAN CH SH, XUE D L, *et al.*. Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDICCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2791-2795. (in Chinese)
- [4] HADER O, DROR I, KOPEIKA N S. Numerical calculation of MTF for image motion: experimental verification [J]. *SPIE*, 1992, 1697: 183-197.
- [5] 薛旭成,傅瑶,韩诚山. TDI CCD 相机的卫星姿态稳定度确定 [J]. 中国光学,2013,6(5): 767-772.
XUE X CH, FU Y, HAN CH SH. Confirmation of satellite attitude stabilization for TDI CCD camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 767-772. (in Chinese)
- [6] MARIUS T, MEJDI T, MARKKU V. Motion Blur Identification Based On Differently Exposed

- Images [C]. *IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, IEEE*, 2006: 2021-2024.
- [7] TIMONER S J, FREEMAN D M. Multi-image gradient-based algorithms for motion estimation [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40 (9): 2003-2016.
- [8] 孙阳,薛栋林,郑立功,等. 航天器平台在轨振动对遥感成像质量的影响 [J]. *光学技术*, 2013, 6: 553-558.
SUN Y, XUE D L, ZHENG L G, *et al.*. Satellite platform on-orbit vibration's influence to image quality of remote sensing [J]. *Optical Technique*, 2013, 6: 553-558. (in Chinese)
- [9] 郭疆,龚大鹏,朱磊,等. 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1251-1257.
GUO J, GONG D P, ZHU L, *et al.*. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1251-1257. (in Chinese)
- [10] 宁永慧,郭永飞. TDICCD 拼接相机的像元响应非均匀性校正方法 [J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 386-394.
NING Y H, GUO Y F. Correction of pixel response non-uniformity in TDICCD mosaic camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 386-394. (in Chinese)
- [11] 顾学海,王利平,顾国华. 基于灰度投影改进的电子稳像 [J]. *应用光学*, 2013, 6: 957-963.
GU X H, WANG L P, GU G H. Electronic image stabilization based on improved gray projection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 6: 957-963. (in Chinese)
- [12] MAHENX J, CRUIKSHANK J, SEVIGNY L. Video-rate image stabilization system [J]. *SPIE*, 2000, 3414: 232-238.
- [13] WU J G, ZHENG Z Z, FENG H J, *et al.*. Restoration of TDI camera images with motion distortion and blur [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42: 1198-1203.
- [14] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer function—a new method [J]. *SPIE*, 1991, 1533: 61-74.
- [15] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Image-resolution limits resulting from mechanical vibrations, Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer-functions and experimental verification [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(2): 566-78.

作者简介:



刘海龙(1987—),男,吉林长春人,博士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事空间相机像移算法及振动影响研究。E-mail: ustclhl@163.com

导师简介:



韩诚山(1972—),男,辽宁盖县人,博士,研究员,博士生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,1998年、2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间相机自动控制技术研究。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)