

## 基于靶标图像的高分辨率空间相机微振动测量方法

曹启鹏 刘静宇 叶钊 黄敏

(航天东方红卫星有限公司,北京,100094)

**摘要:** 高分辨率卫星在轨成像过程中,由于微振动影响造成相机内部敏感光学元件之间的相对运动,引起图像质量的退化。为了准确测量微振动对高分辨率卫星成像的影响,本文提出一种基于靶标图像的空间相机微振动测量方法。文章首先对微振动中影响图像质量的不同因素进行了阐述。然后介绍了在图像上直接测量像移的方法,分析了微振动对空间相机成像的影响,得到像移偏差的准确数值,为卫星成像质量的影响分析及最终修正以提升卫星成像质量提供依据。最后,以某空间相机为研究对象,对此相机在整星条件下的微振动试验数据进行了分析,得到微振动在相机焦面产生的像移,研究了微振动对高分辨率卫星成像的影响。研究实例证明了文章提出方法的可行性,研究结果可为改进设计、隔振和抑振提供参考。

**关键词:** 高分辨率;微振动;靶标;图像分析

**中图分类号:** TP75;V443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2019)S-0083-05

## Micro-vibration Measurement Method of High-Resolution Space Camera Based on Target Image

CAO Qipeng, LIU Jingyu, YE Zhao, HUANG Min

(Dongfanghong Small Satellite Limited Company, Beijing, 100094, China)

**Abstract:** When high-resolution satellite is imaging on orbit, the relative motion between the sensitive optical elements inside the camera may be caused by micro-vibration, which results in degraded images. In order to study the effect of micro-vibration on high resolution satellite imaging, a micro-vibration impact analysis method of space camera based on target image is proposed. Firstly, the different factors of micro-vibration which affect the image quality in different degrees are introduced. Then, the method which can realize the direct measurement of image motion in the image is proposed. The method can analyze the impact of micro-vibration on the space camera directly and get the accurate number of the image motion, which can provide the basis for the influence analysis of the satellite image quality and the final correction. Finally, we take a factual space camera for example to calculate and analyze the test data by using the model on the condition of the satellite. We get the image motion caused by the micro-vibration on focal plane and accomplish the influence analysis method of micro-vibration on high resolution satellite imaging. It is concluded that the proposed method is reasonable and practical. The method proposed by the paper can be reference for improved design and vibration suppression.

**Key words:** high-resolution; micro-vibration; target; image analysis

随着我国科学技术的不断进步,我国光学遥感卫星分辨率已提升至米级、亚米级,高分辨率光学遥感卫星已成为我国对地观测卫星中的主要力量。随着卫星需求、研制水平的不断发展,用户对

**收稿日期:** 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

**通信作者:** 曹启鹏,男,高级工程师,硕士,E-mail: caoqipeng2004@126.com。

**引用格式:** 曹启鹏,刘静宇,叶钊,等. 基于靶标图像的高分辨率空间相机微振动测量方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 83-87. CAO Qipeng, LIU Jingyu, YE Zhao, et al. Micro-vibration Measurement Method of High-Resolution Space Camera Based on Target Image[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 83-87.

图像质量的要求也日益提高。

卫星在轨期间,星上活动部件如动量轮、陀螺的转动、天线指向控制和太阳帆板调整等运动的影响均会使相机光轴产生相对于观测目标的抖动,从而对图像质量产生影响<sup>[1-2]</sup>。这种在抖动响应中不能依靠控制系统进行测量和加以抑制的成分称为微振动响应。星上微振动正成为影响高分辨率光学遥感卫星图像质量的重要因素之一。因此,必须加强卫星微振动测量研究,进一步提升高分辨率遥感卫星的图像质量。

对光学遥感卫星的微振动情况进行地面测量,可以及早评估卫星的微振动情况。当然,由于重力、背景噪声以及试验设备的影响,测量数据与在轨的真实情况存在一定差异,但作为一种代价小、易于早期实施的评估手段,地面微振动测量有其重要意义。

目前,国外在微振动测量系统方面已经开发出了相对成熟的测量装置/系统。NASA、ESA均对此开展了大量研究<sup>[3]</sup>。美国的Honeywell公司利用卫星控制试验台测试高精度望远镜测量系统的光学输出。美国喷气推进实验室JPL建立了MPI试验台,以验证星上微振动集成建模分析技术。针对NASA“起源”计划中大量的高精度遥感卫星的设计分析,MIT空间系统试验室研制了OT试验台来验证微振动集成建模分析技术。国内微振动测试相对国外起步较晚,但借鉴了国外相关技术成果,目前测试能力与国外相比差距不大。北京航空航天大学、浙江大学和航天五院等单位均开展了微振动影响的相关研究<sup>[3-4]</sup>。

本文针对我国星上微振动测量装置和系统的现状,提出了一种基于靶标图像的空间相机微振动影响分析方法,该方法不同于传统的采用加速度计或其他传感器测量角度或位移,再通过仿真分析得到相机像移的方法,实现了在图像上直接测量微振动引起的像移准确值,并通过研究实例验证了该方法的可行性。

## 1 星上微振动引起像移分析

高分卫星在正确姿态下沿轨道方向正常工作时,要求地面景物在相机焦平面上形成的像移速度与CCD电荷包转移速度相匹配。但是卫星在实际运行时,由于振动的存在,会使卫星偏离其正确姿态,使相机焦平面上产生非正常像移,从而导致图像模糊,尤其对于使用TDICCD的高分卫星,多级积分的像移匹配对于振动更为敏感。

卫星微振动可以分解为沿滚转轴(推扫方向)、

俯仰轴(线阵方向)、偏航轴(光轴)3个方向的平移振动和绕3个方向的转动振动,各方向的振动会引起空间相机在该方向上相应的平移或转动位移,并最终导致相机焦平面上产生非正常像移<sup>[5-6]</sup>。除了振动方向以外,微振动的振幅、频率以及TDICCD的级数等因素也都会影响像移的大小,进而对图像的质量产生不同程度的影响<sup>[7]</sup>。

## 2 星上微振动分析方法

### 2.1 传统方法及对比

传统卫星的微振动测量主要有加速度传感器测量和激光测振两种方法。加速度传感器可以实现多点同时测试,可以置于卫星内部测量,便于空间应用。激光测振是一种成熟的非接触式测量技术,其原理是利用多普勒频移和干涉技术进行测量,其优点是对被测结构无影响;但对组装起来的卫星,由于结构遮挡,有些部位难以测量,且测点不宜很多。鉴于以上两种测量方法的特点,在卫星地面测试方法的研究和应用中,以加速度传感器测试为主,采用激光测振作为结果校验的辅助手段。

但以上方法均不能直观反映微振动对空间相机成像质量的影响,要知道微振动对图像的影响,最直观的是得到卫星微振动引起的像点偏移量,也就是像移。在卫星微振动测试中直接分析像移偏差,主要存在的问题:(1)常用的表贴加速度传感器方法只能得到微振动的响应,无法与空间相机图像受微振动的影响建立映射关系;(2)卫星微振动测量的传递特性测试只能分析微振动源到空间相机本体这条路径,无法建立微振动源到相机焦平面的微振动影响分析;(3)卫星微振动幅值小,频率高,空间相机的像移如何在地面测试中准确测量;(4)从卫星可靠性和安全性的要求,以及卫星不可返修的特点出发,如何设计像移偏差测量方法。

本文提出一种基于靶标图像的空间相机微振动分析方法,首先搭建成像系统,将包含特定空间频率的、黑白相间的高对比度矩形靶标放在平行光管焦面处,靶标通过高稳定性均匀的光源照亮作为物目标,通过平行光管和空间相机,成像在相机焦面上,得到清晰的靶标图像,采用灰度质心法进行分析,得到准确的像移偏差数值,本文在光学测量的基本原理上结合图像分析,实现了在图像上直接测量像移,直接分析微振动对空间相机成像的影响,为卫星成像质量的影响分析及最终改进卫星成像质量提供依据<sup>[8-10]</sup>。

## 2.2 像移量测量方法

基于图像的空间相机微振动分析,直接分析微振动引起的像移。空间相机对景物模拟器成像过程中,由于星上扰动源造成的微振动,如果相机相对于景物模拟器之间相对的角度发生变化,会导致靶标在焦面上所成的像位置发生偏移。图1所示为本文微振动使空间相机产生像移的示意图。利用这一原理,可以通过计算在成像过程中景物模拟器靶标在焦面上所成像位置的变化来反映成像过程中相机与景物模拟器之间相对角度的变化。如认为景物模拟器自身未发生变化(不考虑环境影响),则可以求得成像过程中,相机指向的变化。

基于图像的空间相机微振动分析测量方法,采集足量微振动测试中靶标图像,截取其中最清晰的一段黑白靶标图像,逐行利用质心公式(式(1))来求每行的灰度质心,然后利用式(2)消除零偏,就可以得到微振动造成的像元偏移量,最后将像元偏移量绘制成曲线图以供后续分析。这就是利用图像的变化来反映微振动对相机指向的影响。当空间相机传感器为线阵 CCD,也就是一维的,所以求得的像元偏移量只是一个方向的偏移量,根据灰度质心法的原理,可以得出求得沿线阵方向的偏移量,即整个扰振沿线阵方向的分量。如图1所示。

$$L(i) = \frac{\sum_{j=1}^n (\text{DN}(i,j) \times \text{LOC}(i,j))}{\sum_{j=1}^n \text{DN}(i,j)} \quad (1)$$

式中:DN( $i,j$ )为第*i*行第*j*列的像元灰度值;LOC( $i,j$ )为第*i*行第*j*列的像元序号; $L(i)$ 为像元质心位置。

$$\text{Warp}(i) = L(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(i) \quad (2)$$

式中:Warp( $i$ )为每行受扰振的像元偏移量; $L(i)$ 为每行的灰度中心位置; $N$ 为截取图像数据的行数, $N$ 取值为正整数。

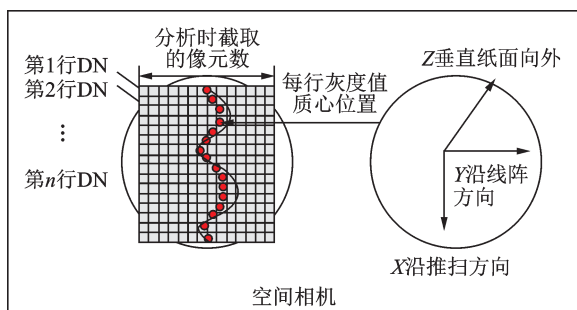


图1 空间相机的图像质心法分析示意图

Fig.1 Analysis sketch of image centroid method for space camera

## 2.3 具体实施方式

图2所示为本文靶标图像的空间相机微振动影响测试系统示意图,该系统包括景物模拟器、空间相机和快视设备,其中景物模拟器包括平行光管和光源。为了实现高精度测量,其中平行光管焦距应不小于空间相机的焦距;光源的均匀性优于2%,稳定性优于1%。

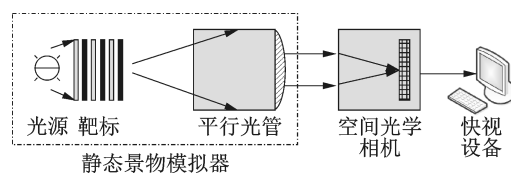


图2 靶标图像的空间相机微振动影响测试系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of micro-vibration impact test system for space camera of target image

靶标应满足以下要求:

- (1) 为了保证测试的精度,靶标上的条纹宽度应能覆盖相机 CCD 超过 5 个像元;
- (2) 靶标的调整装置具有旋转靶标和相位调整的功能。

基于靶标图像的空间相机微振动试验方法,具体包括如下实施步骤:

- (1) 搭建测试系统,将靶标安装在平行光管的焦平面上,使靶标的刻线方向同时垂直于平行光管的光轴和空间相机探测器的线阵方向。
- (2) 调整景物模拟器位置,使相机入光口与景物模拟器出光口对准,靶标成像在空间相机焦面处,调整空间相机的参数,得到靶标清晰的黑白条纹像。

(3) 测试准备;包括噪声和各种外界扰动控制,包括电磁、噪声、气流、人员和设备移动。

(4) 设置卫星不同工况(对应扰动部件的工作状态)。

(5) 模拟器和空间相机开机,在卫星扰动部件进入稳定状态后采集空间相机输出的图像,重复采集图像 3~5 次。

(6) 对存储的靶标图像使用灰度质心法进行分析,得到质心位置偏差量 Warp( $i$ ),即像面偏移量。

## 3 应用及分析

按 2.3 节搭建基于靶标的高分辨率空间相机微振动分析测试系统。图3是某空间相机所成靶标像,从中选取最清晰的亮条纹通过质心法分析质心变化情况(式(1—2))。

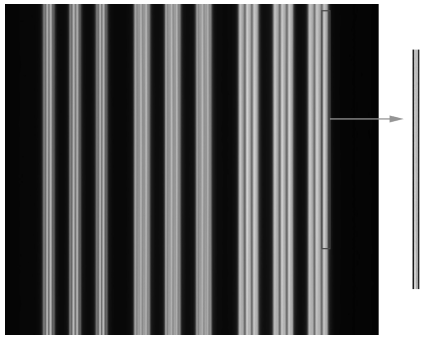


图3 基于靶标的高分辨率相机微振动分析图像  
Fig.3 Micro-vibration analysis image of high-resolution camera based on target

使用质心法分析星上扰动部件全未开机(工况1)和星上沿光轴方向动量轮开机(工况2)两种情况下的微振动影响。

质心法分析工况1和工况2下的靶标图像,绘制灰度质心位置变化曲线如图4所示,工况1的质心位置的峰峰值最大偏差0.69个像元;工况2的质

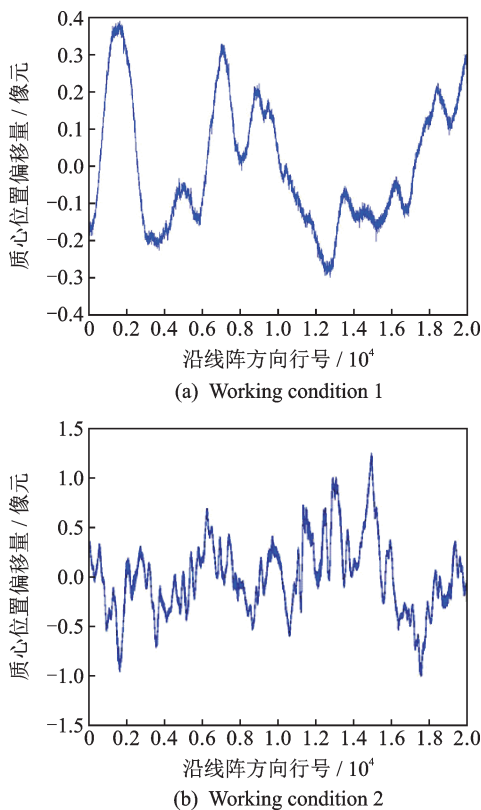


图4 质心位置随成像时间的变化情况

Fig.4 Curve of centroid position with imaging time

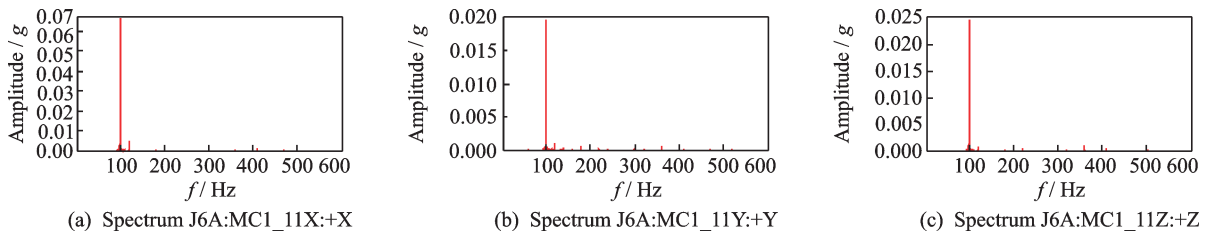


图6 工况2加速度传感器分析结果

Fig.6 Analysis results of accelerometer under working condition 2

心位置的峰峰值最大偏差1.90个像元;从灰度质心位置变化曲线可以看出,工况2的微振动影响大于工况1。

工况2,沿光轴方向动量轮开机,转速6 000 r/min,频域图像分析显示动量轮在100 Hz左右处对图像有明显的影响,如图5所示。而工况1的频域分析则很干净,无主要微振动影响的激励点。工况2的频域分析与加速度传感器测量的结果一致,如图6所示,微振动在100 Hz处有明显影响。表1所示为微振动引起像移统计表,从表1中数据也可以看出,工况2各指标更差一些。

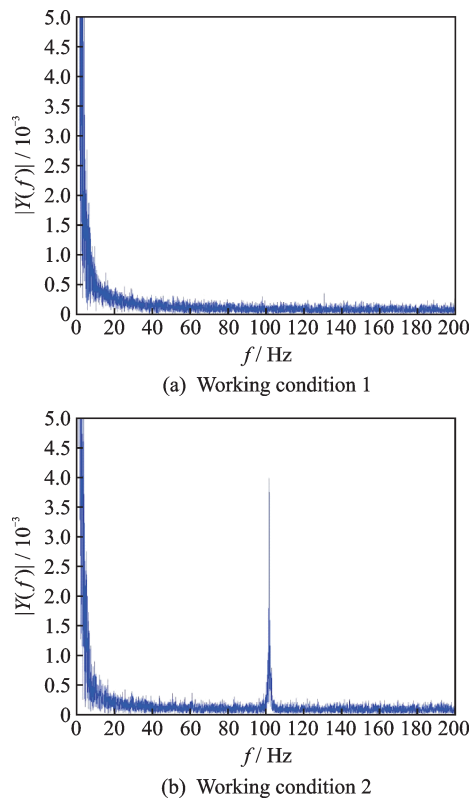


图5 微振动影响频域分析

Fig.5 Frequency domain analysis of micro-vibration impact

表1 微振动引起像移统计表

Tab.1 Statistical table of image shift caused by micro-vibration

工况序号	1	2
峰峰值偏差/像元	0.690	1.897
均方根	0.167	0.329

## 4 结 论

高分辨率光学遥感卫星的成像质量受到广泛关注,而星上微振动对图像的影响一直难以准确量化和有效控制。本文从理论分析到实际测试,将微振动对空间相机的影响作了论述分析。首先对微振动中影响图像质量的不同因素进行了阐述;然后提出了基于靶标图像使用灰度质心法直接分析微振动引起的像移的分析方法;最后结合实际测试做了进一步说明。

从本文的试验数据分析,使用空间相机作为传感器对靶标成像测量微振动的方法是可行的。但是,由于这种方法是直接测量位移,其对低频的振动更为敏感,所以更容易受外界环境影响。在使用该方法进行微振动测量,卫星和景物模拟器均需采用良好的隔振措施,且相机作为传感器需实现对微振动高频次采样,因此在相机成像参数设置时,需与卫星微振动的频段相匹配。

### 参考文献:

- [1] 刘国青,罗文波,高行素. 微振动源与支撑结构耦合特性研究综述[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 141-148.  
LIU Guoqing, LUO Wenbo, GAO Xingsu. The coupling characteristics between micro vibration source and supporting structure [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(2): 141-148.
- [2] 杨会生,张银鹤,柴方茂. 离轴三反空间相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 948-954.  
YANG Huisheng, ZHANG Yinhe, CHAI Fangmao. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 948-954.
- [3] 赵鸿志,黄菁菁,曹启鹏. 一种星上微振动引起像移量的测量方法[J]. 航天器工程, 2014, 23(5): 35-40.  
ZHAO Hongzhi, HUANG Jingjing, CAO Qipeng. Method of measuring image offset caused by onboard micro-vibration [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(5): 35-40.
- [4] 冯华君,邓勤,郑珍珍. 卫星颤振光学成像仿真模型分析[J]. 光电工程, 2013, 40(2): 1-7.  
FENG Huajun, DENG Qin, ZHENG Zhenzhen. Analysis of the simulation model based on remote sensing imaging under vibration [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(2): 1-7.
- [5] 张博文. 微振动对刚体空间相机图像质量的影响分析[C]//第二届高分辨率对地观测学术年会. 北京: [s.n.], 2013: 1-10.  
ZHANG Bowen. Analysis on effect of micro-vibration on rigid-body space camera imaging [C]// 2nd China High Resolution Earth Observation Conference. Beijing: [s.n.], 2013: 1-10.
- [6] 邓勤. 卫星颤振对遥感卫星成像质量影响研究及实验验证[D]. 杭州:浙江大学, 2013.  
DENG Qin. Research of motion estimation algorithm based on digital images [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [7] 薛旭成,傅瑶,韩诚山. TDICCD相机的卫星姿态稳定度确定[J]. 中国光学, 2016, 6(5): 767-772.  
XUE Xucheng, FU Yao, HAN Chengshan. Confirmation of satellite attitude stabilization for TDICCD camera [J]. Chinese Optics, 2016, 6(5): 767-772.
- [8] 石俊霞,郭永飞. 空间遥感TDICCD相机振动补偿的优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 1086-1111.  
SHI Junxia, GUO Yongfei. Optimal design on vibration compensation of space remote sensing TDICCD cameras [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(4): 1086-1111.
- [9] 虞自飞,周徐斌,申军烽. 卫星飞轮隔振与吸振联合减振系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 897-903.  
YU Zifei, ZHOU Xubin, SHEN Junfeng. Design of joint vibration reduction system combined isolation and absorption for flywheel [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 897-903.
- [10] 付中梁,冯华君,徐之海. 二维任意运动形式模糊图像的恢复[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 369-372.  
FU Zhongliang, FENG Huajun, XU Zhihai. Restoration of image blurred by any form motion in two-dimension [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 369-372.

(编辑:陈珺)