

基于时域集成分析的空间相机动态像移评估方法

王小勇, 张博文*, 梅强, 周楠

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 建立了一种包括干扰模型、结构模型、光学模型及采样成像模型的时域集成分析方法, 实现了空间相机从微振动干扰输入到图像输出的端到端系统集成仿真, 并开发了基于 MATLAB 的数据转换工具, 实现了结构分析与光学分析之间的序列数据传递。以某空间相机的地面微振动实验为例进行了时域集成分析, 结果表明: 在两种不同的成像模式工况下, 该相机的动态像移统计最大值分别达到 0.42 pixel 和 0.27 pixel, 采样成像仿真得到的图像调制传递函数下降因子分别为 0.951 和 0.974, 与原始图像无明显的直观差异, 为该相机微振动影响的有效预估提供了依据。

关键词 测量; 微振动; 空间相机; 时域集成分析; 动态像移; 采样成像

中图分类号 V474.2+6

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0612001

Assessment of Dynamic Image Motion of Space Camera Based on Integrated Time-Domain Analysis

Wang Xiaoyong, Zhang Bowen*, Mei Qiang, Zhou Nan

Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China

Abstract We develop an integrated analysis process on time domain comprising models of disturbances, structures, optical systems, and sampled imaging, and realize the end-to-end system integrated simulation of the space camera from micro-vibration disturbance input to imaging output. Accordingly, a data-transforming toolkit is developed in MATLAB for transferring the structural analysis results to the optical analysis software. The integrated time-domain analysis is carried out in the ground micro-vibration tests of a space camera. The analysis results denote that: under load conditions of two different imaging modes, the maximum statistical values of the dynamic image motions of the camera are 0.42 pixel and 0.27 pixel, respectively; the descending factors of the modulation transfer function of images from the sampled-imaging simulations are 0.951 and 0.974, respectively, which have no obviously visual difference compared with that of original images. These results provide a guidance for the effective prediction of the micro-vibration influence of the space camera.

Key words measurement; micro-vibration; space camera; integrated time-domain analysis; dynamic image motion; sampled imaging

OCIS codes 120.7280; 200.4880; 350.6090

1 引 言

随着遥感图像应用的不断拓展以及空间相机性能的不断提高, 在轨微振动对空间相机成像的影响逐渐变得不可忽略, 研究人员从微振动干扰源、空间相机成像机理等方面开展了广泛研究^[1-2]。微振动在空间相机成像过程中一直发生, 导致空间相机光学系统各元件发生微位移和微变形, 影响光学系统的瞬时传递函数和视轴指向, 致使成像性能呈现动

态变化的特征, 这就对空间相机的性能分析提出了快速、动态、有效等要求。集成建模分析技术正是为了满足上述需求才发展起来的。

集成建模分析的核心是通过扰动作用的传递过程, 建立起空间相机的结构、光学等不同子系统间的物理联系, 将各子系统的模型集成到同一个分析流程中^[3], 方便数据在各种分析工具间传输, 节省工作时间, 提高分析质量, 并且可以实现扰动输入与性能影响输出之间的动态联系。张博文等^[4]应用集成建

收稿日期: 2018-12-19; 修回日期: 2019-01-14; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2016YFB0500802)

* E-mail: zhangbw508@163.com

模方法得到了微振动干扰对系统图像调制传递函数(MTF)的影响,给出了静态性能的评价结果;王红娟等^[5]考虑了成像曝光时间,用静态光学系统的点列图弥散斑变大来评价动态光学系统的像移;朱俊青等^[6]通过集成分析得到了成像质量的频率响应结果,采用成像曝光时间内的统计分析得到了系统动态评价指标,并完成了实验对比验证。但以上文献均未将光学系统性能的时域动态变化,与时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)多级积分成像过程结合起来,没有开展针对采样成像过程的图像仿真。

本文针对空间相机建立了一种集干扰、结构、光学、采样成像为一体的建模分析方法。该集成建模方法能够利用地面微振动实验或在轨遥测获得的时域测量数据,获得空间相机在一定时间段内的像移动态变化;进一步通过采样成像过程的仿真,将动态像移与成像参数结合起来,以图像的形式直观地反映出来,为结构优化和微振动隔离抑制设计提供依据。在目前实现的分析过程中,集成模型采用商业软件建立,另外通过一个基于 MATLAB 自行开发的数据转换工具包 PaToC 实现结构分析与光学分析之间的数据传递,以及光学分析的时序动态重复。

2 时域集成分析原理与建模

TDICCD 空间相机的成像过程可以看作是景物信息输入到图像输出的信息流过程,包括两个部分:第一部分是相机镜头对景物成像的过程,物方点发出的光线经过光学系统在焦面上形成会聚光斑;第二部分是相机 TDICCD 的采样与延迟积分过程,探测器在成像时钟信号的控制下进行单次曝光、转移和多级积分。由于微振动干扰的持续作用,相机镜头在焦面的输出状态呈现时域动态变化的特征,并反映到探测器的采样过程中,如图 1 所示。时域集成分析的原理是在时间尺度上对相机的成像过程展开分析,将空间相机的干扰模型、结构模型、光学模型与采样成像模型串联起来,实现图像级的系统集成仿真。

2.1 干扰模型

引起航天器在轨工作时微振动的干扰源可以分为外部干扰源和内部干扰源。外部干扰源包括太阳风扰动、地球引力场变化、低大气阻尼、进出阴影冷热交变的热冲击等。内部干扰源包括动量轮、控制力矩陀螺(CMG)、星上发动机、数传天线、太阳翼调姿的干扰等。以上干扰源形式各异,目前只有部分干扰源依据理论推导或实验数据建立了较为有效的

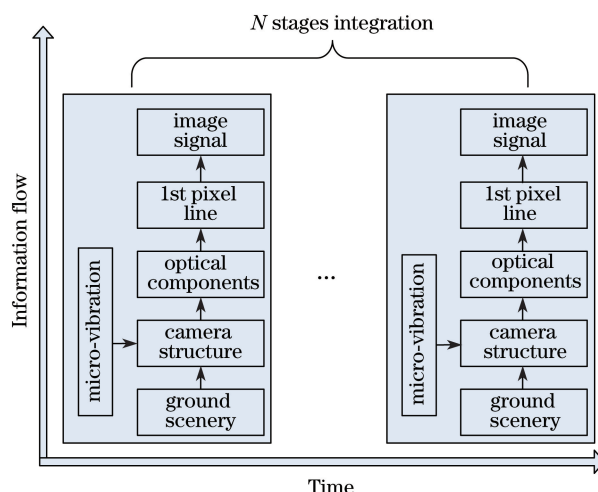


图 1 TDICCD 相机成像过程原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of imaging process of TDICCD camera

数学模型。研究表明:动量轮、CMG 转动是最大的干扰源,它引起的振动可以近似看作是一系列的正弦振动^[7-9],其频率与转动速度相关。这些振动载荷通过卫星平台传递到空间相机与平台的连接面处,进而对空间相机的光机结构产生作用。

该型空间相机在研制过程中对十余种工况开展了整星地面微振动实验,测得了各工况条件下连接面处的 3 个方向角位移振动数据。选择其中反映实际成像条件的 2 种典型工况的测量数据来构建干扰模型,数据测量时间总长为 30 s。工况的描述如表 1 所示,两个工况中的相机柔性支撑处于锁定状态,CMG 的转速为 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。对角位移测量数据进行频域分析可以得到角位移的频谱特性,如图 2 和图 3 所示。可以看到:角位移的最大峰值均出现在 100 Hz 处,此处正是 CMG 的工作频率;工况 1 的角位移干扰比工况 2 更剧烈;工况 1 处于多个条带拼接的成像模式下,卫星平台有侧摆机动,故其绕 X 轴的角位移幅值最大。

表 1 微振动实验工况

Table 1 Load conditions of micro-vibration tests

Number	Load condition
1	Imaging four strips in a single pass (20° off-nadir angle)
2	Imaging an area and transmitting to the ground in real time

2.2 结构模型

结构模型是一个典型的有限元模型。通过结构设计与分析之间的集成,分析人员能够结合几何模型制定更加合理的建模策略,保留关系到微振动传

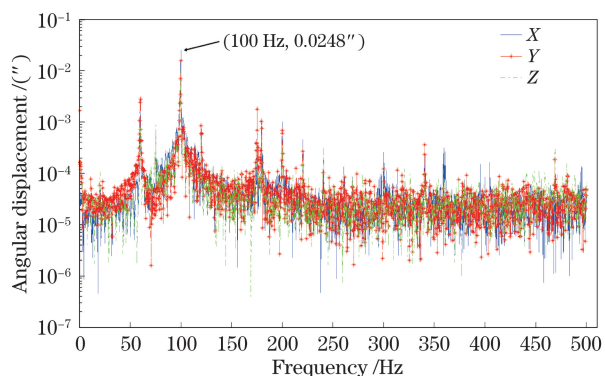


图 2 工况 1 时角位移测量数据的频域分析

Fig. 2 Frequency-domain analysis of measured angular displacement under load condition 1

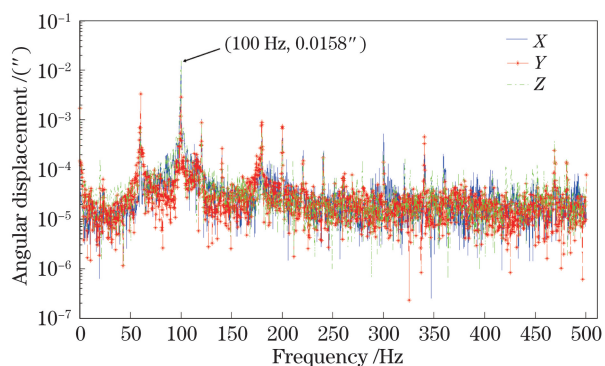


图 3 工况 2 时角位移测量数据的频域分析

Fig. 3 Frequency-domain analysis of measured angular displacement under load condition 2

递特性和响应情况的结构细节,同时可以有效缩减模型的规模,节省建模时间。

在干扰的作用下,空间相机结构模型会发生不同的变形,其中任意时刻光学系统中各镜面的变形可以分为两部分:1)各镜面的微位移,包括沿 X、Y、Z 轴平移和绕 X、Y、Z 轴旋转;2)各镜面的微变形,包括非球面方程系数、面形精度等的变化。

在微振动条件下各镜面的非球面方程系数和面形精度等的变化非常微小,可以忽略不计,只对镜面的微位移进行分析。

为了使结构模型能更准确地反映空间相机的动态特性,光学系统中的主镜、次镜、三镜等反射镜及焦平面均采用了完整的实体或曲面建模,如图 4 所示。各镜面的微位移通过对镜面节点位移进行统计运算得到,计算过程由 PaToC 工具完成。其中,X、Y、Z 轴的定义为右手直角坐标系的 3 个坐标轴,分别对应滚转轴、俯仰轴、偏航轴。

2.3 光学模型

光学模型在 Code V 光学仿真软件中建立。典

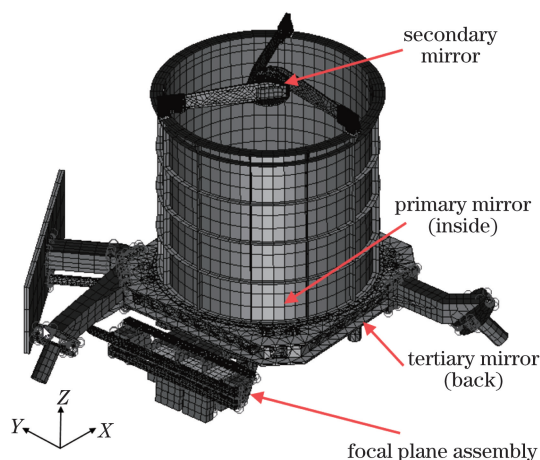


图 4 空间相机的结构模型

Fig. 4 Structural model of space camera

型的 Code V 光学设计模型采用相对坐标系,即曲面 i 的本地坐标系参照前一个曲面 $(i-1)$ 的本地坐标系设置,并且软件规定绕 X 和 Y 轴的旋转以左旋为正,绕 Z 轴的旋转以右旋为正^[10];结构模型采用全局坐标系,且均以右旋为正^[11]。为了保证两个模型间数据传递的方便准确,需要将光学模型由相对坐标系转换到与结构模型相匹配的全局坐标系中,同时注意各坐标轴的方向与旋转的对应关系。该对应关系应由分析人员在模型完成之前协调好,并更新 PaToC 中的设置。该型空间相机的光学系统模型如图 5 所示。

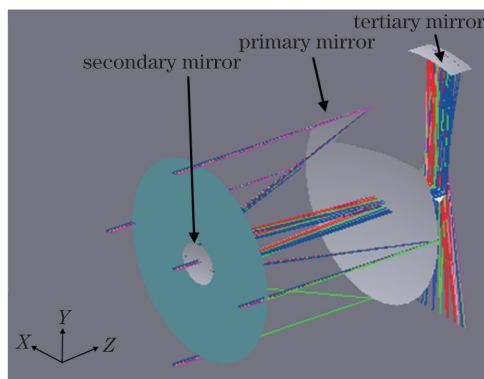


图 5 光学系统模型的三维图

Fig. 5 Three-dimensional plot of optical system model

各镜面的微位移在 Code V 软件中体现为各个曲面的 decenters 设置。Code V 规定曲面在发生偏移设置时,先做平移,再顺序完成绕 X 轴、绕 Y 轴和绕 Z 轴的旋转。但对于微小的转动来说,旋转的先后顺序对于总坐标变换矩阵的影响可以忽略^[12]。

2.4 MATLAB 数据转换工具

在 MATLAB 中开发的数据转换工具 PaToC

是实现结构有限元分析与光学仿真分析集成的关键^[13-14],其核心功能是处理结构分析的结果,建立 MATLAB 与 Code V 之间的 COM(component object model)连接,并调用 Code V 软件功能进行光线追迹,进而得到光学系统的像移量。图 6 给出了简化的程序流程图。该工具可以对结构分析的一个序列结果进行循环,从而得到光学系统性能关于频率或时间的动态变化。

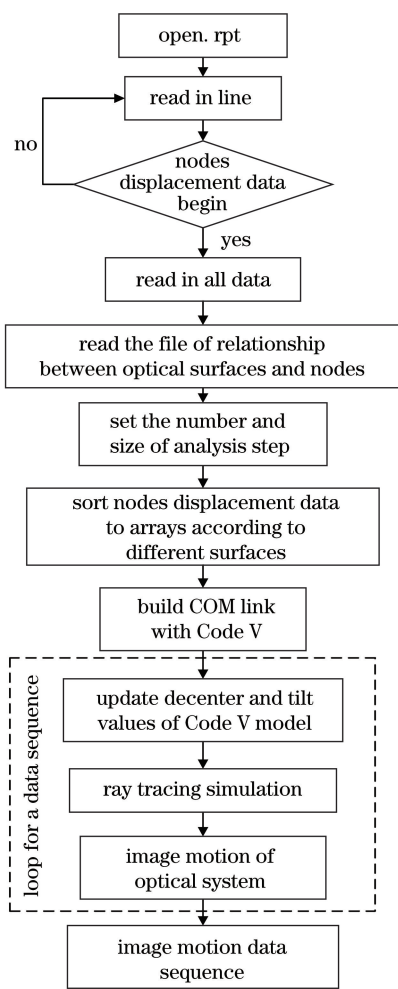


图 6 PaToC 程序的简化流程图

Fig. 6 Simplified flow chart of PaToC procedure

2.5 采样成像模型

采样成像模型是对 TDICCD 成像过程的数学化抽象。将时间延迟积分的每一个单级积分时间展开,TDICCD 成像过程是一个连续的时间历程,而微振动引发的光学系统像移量变化也是一个连续的时间历程,两者可以通过成像过程的仿真紧密结合起来。为了更鲜明地反映像移对像元灰度的影响,采样成像模型选用一幅高清标准靶标图代表地物场景。假设理想条件下目标的像点位于空间相机像元的中心,即像素阵列的中心。对于单级积分时间为

t 、积分级数为 N 、行数为 M 的成像过程来说,对应的仿真过程为:

1) 在时间 t 内,像点将沿着不同时刻的像移矢量先后移动到图片的一系列位置上,以每个像点位置为中心做双线性重采样,得到一组灰度值,将其进行叠加求均值;

2) 重复步骤 1) N 次并求均值,得到一行仿真图像;

3) 重复步骤 1) 和步骤 2) M 次得到一幅 M 行的仿真图像。

当像移矢量始终为 0 时即得到了理想条件下的仿真图像。通过两者的对比就能直观地看出微振动引起的像移对遥感器图像产品的影响。

仿真过程示意图如图 7 所示。图 7 的上半部分表示步骤 1) 的计算,中心方框代表理想位置,序号 ①~④代表 4 个不同时刻的像移矢量所确定的像点位置;下半部分表示步骤 2) 和步骤 3) 的计算。仿真过程考虑了电荷耦合器件(CCD)时钟信号占空比。

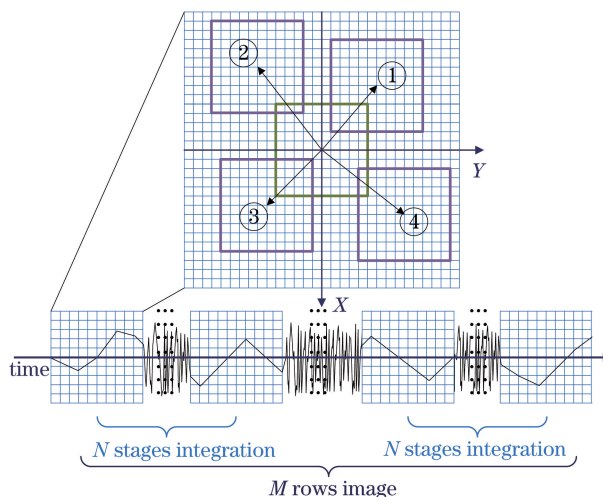


图 7 采样成像仿真过程示意图

Fig. 7 Schematic of sampled-imaging simulation process

3 分析结果

应用时域集成分析模型分别对两个工况的实验数据进行分析,得到各自的光学系统像移变化情况。像移量随时间的变化曲线,以及在一个像元内的像点分布如图 8 所示。其中,像点的分布由微振动幅频的特性决定,从而呈现一定的规律性。可以看出:在 30 s 内,工况 1 下光学系统的最大像移变化量约为 0.42 pixel, Y 向(线阵方向)变化量大于 X 向(积分方向)变化量;在工况 2 下,光学系统的最大像移变化量约为 0.27 pixel,小于工况 1。

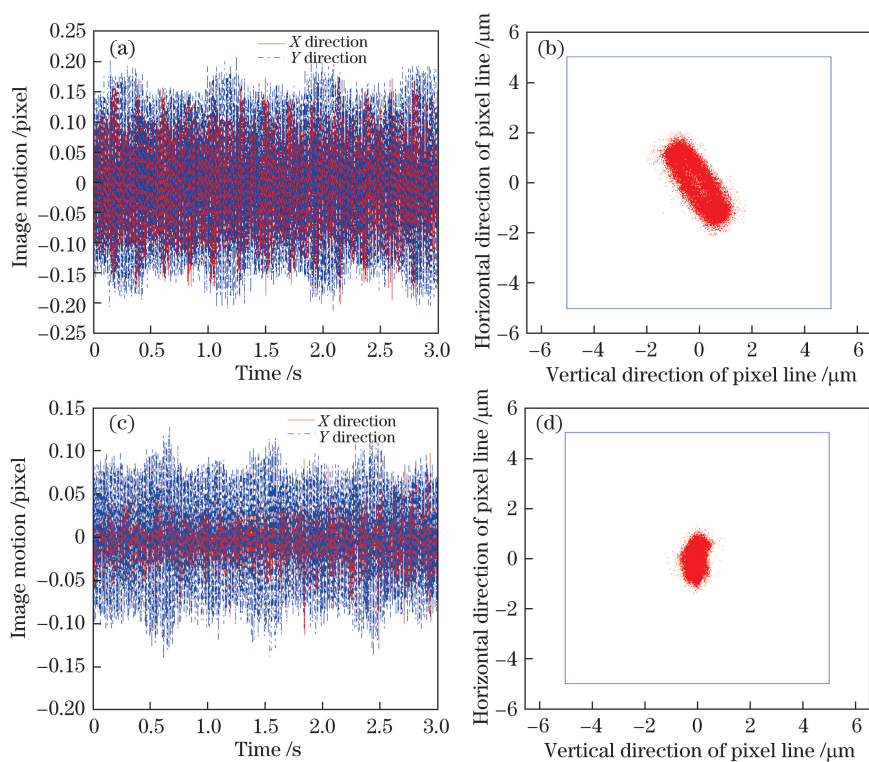


图 8 不同工况下的像移-时间曲线及像点分布示意图(蓝色框代表 1 个传感器单元)。(a) 工况 1, 像移-时间曲线;
(b) 工况 1, 像点分布;(c) 工况 2, 像移-时间曲线;(d) 工况 2, 像点分布

Fig. 8 Plots of image motion versus time and pixel-space distributions under different load conditions (blue box represents one sensor unit). (a) Load condition 1, plots of image motion versus time; (b) load condition 1, pixel-space distribution; (c) load condition 2, plots of image motion versus time; (d) load condition 2, pixel-space distribution

一般认为,当像移量大于 0.3 pixel 时,像移的影响就不可以忽略了。如不进行采样成像仿真,仅从像移分析的统计最大值来看,在两种典型工况所代表的成像模式下,微振动对该型空间相机成像性能都有显著影响。但是,实际的成像曝光时间要远小于实验数据选取的 30 s,每次曝光成像过程中发生的像移量可能小于统计的最大值,并且因成像时刻不同而存在行间差异。因此,只考虑统计最大值就无法充分利用实验数据,难以有效预估实际的成像效果。

进一步完成采样成像仿真,取积分级数 $N = 48$,结果如图 9 所示。其中,图 9(a)为原始图像;图 9(b)和图 9(c)分别为加入工况 1 和工况 2 像移数据后的仿真图像。直观比较 3 幅图像几乎无法看出像移的影响。在图像上选取 10 个位置的刃边区域进行 MTF 检测,得到原始图像的平均 MTF 为 0.390,加入工况 1 和工况 2 像移数据后的仿真图像的平均 MTF 分别为 0.371 和 0.380,相应的 MTF 下降因子为 0.951、0.974。根据采样成像仿真的结

果可以看出:该型空间相机在两种典型工况条件下,因微振动引发动态像移而导致的成像质量的下降十分微小,处于可接受范围。

4 结 论

构建了微振动对空间相机光学系统成像影响的时域集成分析过程和相应模型,开发了数据转换工具,实现了对时域序列数据的自动处理和采样成像过程的仿真模拟。集成模型的仿真分析结果和理论分析趋势完全相符,采样成像仿真结果表明:该型空间相机在 4 条带拼接成像和对某特定区域成像的两种工况下都发生了动态像移,导致成像质量退化,但退化程度微小,处于可接受范围。将延迟积分成像参数引入到采样成像模型中,使得微振动影响分析深入到空间相机的曝光过程,对微振动影响的合理评价起到了很好的促进作用。同时也应当看到,该集成分析过程所用的干扰数据来自于地面微振动实验,不能定量地反映真实的在轨情况。

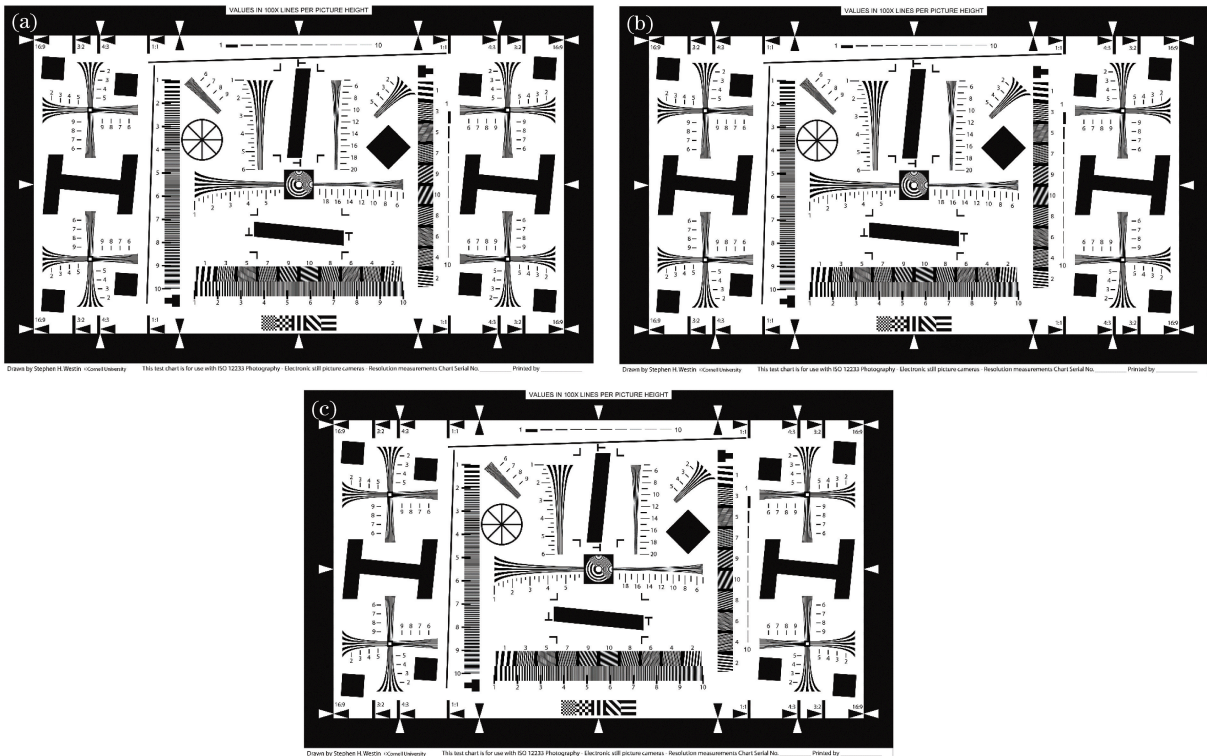


图9 采样成像仿真图像。(a) 原始图像;(b) 加入工况1像移数据后的仿真图像;
(c) 加入工况2像移数据后的仿真图像

Fig. 9 Simulation results of sampled imaging. (a) Original image; (b) simulation image after adding image motion of load condition 1; (c) simulation image after adding image motion of load condition 2

参 考 文 献

- [1] Liu H Q, Yan D J, Wang D, *et al.* Space camera image motion model analysis caused by spacecraft vibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612001.
刘海秋, 闫得杰, 王栋, 等. 飞船振动引起的空间相机像移模型分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612001.
- [2] 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.
- [3] Miller D W, Mosier G E. Framework for multidisciplinary integrated modeling and analysis of space telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4757: 1-18.
- [4] Zhang B W, Wang X Y, Hu Y L. 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.
- [5] Wang H J, Wang W, Wang X, *et al.* Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(10): 1212-1217.
王红娟, 王伟, 王欣, 等. 航天器微振动对空间相机像质的影响[J]. *光子学报*, 2013, 42(10): 1212-1217.
- [6] Zhu J Q, Sha W, Chen C Z, *et al.* Frequency response of imaging quality by micro-vibration for large-aperture space-borne telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1118-1127.
朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 大口径空间相机像质的微振动频率响应计算[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1118-1127.
- [7] Eyerman C E. A system engineering approach to disturbance minimization for spacecraft utilizing controlled structures technology[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990: 37-42.
- [8] Hadar O, Fisher M, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer function[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(3): 581-589.
- [9] Ding Y W, You Z, Lu E. Influences of dimension instability of space optical remote sensor opto-structural system on imaging quality[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(3): 1-4.

- 丁延卫, 尤政, 卢镔. 航天光学遥感器光机结构尺寸稳定性变化对成像质量的影响[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(3): 1-4.
- [10] CODE V reference manual[Z]. Optical Research Associates, 2004.
- [11] MSC. Patran user's guide[Z]. MSC Software Corporation, 2008.
- [12] Howard J M. Optical modeling activities for NASA's James Webb space telescope (JWST): IV. Overview and introduction of MATLAB based toolkits used to interface with optical design software[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6668: 666804.
- [13] Hyde T T, Ha K Q, Johnston J D, *et al.* Integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope: optical jitter analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5487: 588-599.
- [14] Howard J M. Optical modeling activities for the James Webb Space Telescope (JWST) project I. The linear optical model[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5178: 82-88.