

DOI:10.11784/tdxbz202310008

## 微角振动对遥感相机成像质量的影响分析

李醒飞<sup>1,2</sup>, 杨辰熙<sup>1</sup>, 拓卫晓<sup>1,2</sup>, 邢伟达<sup>1</sup>, 蒋颢娇<sup>1</sup>, 封善斋<sup>1,3</sup>

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072;

2. 深海技术科学太湖实验室, 无锡 214000;

3. 海克斯康制造智能技术(青岛)有限公司, 青岛 266114)

**摘要:** 针对高空间分辨率航天器遥感成像受微角振动影响模糊化的问题, 从理论建模、仿真分析和实验验证 3 个维度量化了微角振动幅值、频率、初始相位等特性对遥感相机成像质量的影响。首先, 从成像原理出发, 建立了图像退化模型, 分析了微角振动导致图像模糊和几何形变的机理。其次, 分析了角振动参数对像移的影响规律, 建立了不同角振动频率对应的调制传递函数(MTF)的解析计算式, 分析了角振动幅值、角振动频率和初始曝光时刻对 MTF 的影响规律。然后, 利用 MATLAB 搭建仿真平台, 以调制传递函数面积(MTFA)作为评价指标, 量化分析了角振动幅值、角振动频率和初始曝光时刻对图像模糊度的贡献程度。最后, 搭建了振动实验平台, 实验验证了各个振动参数对成像质量的影响规律。结果表明: 图像像质随角振动振幅的增加而下降, 频率 100.0 Hz 的角振动幅值从 0.0064°增加至 0.0281°时, MTFA 由 0.2776 下降至 0.1192; 低频角振动作用下成像质量与角振动初始相位、振幅、频率有关, 高频非整周期振动会造成 MTF 曲线的波动, 且非整周期振动对成像质量的影响随着角振动频率的增加而减小。曝光时间为角振动周期的整数倍时, 初始曝光时刻对图像像质的影响可以忽略。微角振动对遥感影像几何精度的影响规律能够为高轨遥感相机微角振动的测量与抑制提供理论支撑。

**关键词:** 微角振动; 遥感成像; 图像退化; 调制传递函数

中图分类号: TP751.1

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)10-1070-10

## Analysis of the Influence of Micro-Angular Vibration on the Imaging Quality of Remote Sensing Cameras

Li Xingfei<sup>1,2</sup>, Yang Chenxi<sup>1</sup>, Tuo Weixiao<sup>1,2</sup>, Xing Weida<sup>1</sup>, Jiang Haojiao<sup>1</sup>, Feng Shanzhai<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214000, China;

3. Hexagon Manufacturing Intelligence (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266114, China)

**Abstract:** To address the image blurring caused by micro-angular vibration in high-resolution spacecraft remote sensing imaging, this study thoroughly examined the effects of micro-angular vibration characteristics, such as amplitude, frequency, and initial phase, on the imaging quality of remote sensing cameras. This examination was conducted from three distinct perspectives: theoretical modeling, simulation analysis, and experimental verification. First, based on imaging principles, an image degradation model was established to analyze the mechanisms behind image blurring and geometric deformations induced by micro-angular vibration. Next, we investigated the influence of angular vibration parameters on image shift. Analytical expressions for the modulation transfer function (MTF) of

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-12-04.

作者简介: 李醒飞 (1966—), 男, 博士, 教授, lixf\_mhd@163.com.

通信作者: 拓卫晓, tuoweixiao@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62203322); 深海技术科学太湖实验室“揭榜挂帅”项目(2022JBGS03001); 中国博士后科学基金资助项目(2022M712372).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62203322), the Enlisting and Leading Program of the Taihu Laboratory of Deep Sea Technology and Science (No. 2022JBGS03001), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022M712372).

different angular vibration frequencies were derived, and the effects of angular vibration amplitude, frequency, and initial exposure time on MTF were examined. Then, a simulation platform was constructed using MATLAB. The modulation transfer function area (MTFA) served as an evaluation criterion, enabling us to quantitatively analyze the contributions of angular vibration amplitude, frequency, and initial exposure time to image blurring. Ultimately, a vibration experimental platform was set up to validate the influence of various angular vibration parameters on imaging quality. Our findings revealed that image quality deteriorated as angular vibration amplitude increased. When the amplitude of the angular vibration at a frequency of 100.0 Hz increased from  $0.0064^\circ$  to  $0.0281^\circ$ , the MTFA decreased from 0.277 6 to 0.119 2. Under the impact of low-frequency angular vibration, the image quality was related to the initial phase, amplitude, and frequency of the angular vibration. High-frequency noninteger-period vibrations can cause fluctuations in the MTF curve, and the impact of noninteger-period vibrations on imaging quality decreased as the angular vibration frequency increased. When the exposure time was an integer multiple of the angular vibration period, the impact of the initial exposure time on the image quality became negligible. The effect rules of micro-angular vibration on the geometric accuracy of remote sensing images can provide theoretical support for the measurement and suppression of micro-angular vibrations in high-orbit remote sensing cameras.

**Keywords:** micro-angular vibration; remote sensing imaging; image degradation; modulation transfer function (MTF)

遥感成像技术在生态建设、航空航天、军事侦察等领域发挥着重要的作用,是建设自主创新科技强国的重要组成部分<sup>[1]</sup>。卫星平台在轨运行期间极易诱发幅值小、频带宽、难测量的微角振动<sup>[2]</sup>。随着中国航空航天事业对光学遥感卫星分辨率的要求不断提高,遥感图像受微角振动影响愈发严重,无法满足资源调查等高精度应用所需的亚像素级分辨率。抑制微角振动影响是高分辨率遥感成像系统需要解决的首要问题。

目前,学者们围绕微角振动抑制问题开展了诸多研究。我国高分七号卫星采用控制力矩陀螺隔振装置,减弱了控制力矩陀螺工作时产生的微角振动对光学载荷的影响<sup>[3]</sup>。张庆君等<sup>[4]</sup>采用物理隔振技术实现了遥感相机敏感载荷与平台微角振动间的隔离。Teshima 等<sup>[5]</sup>提出了基于修正姿态数据对模糊图像进行校正的方法,在焦平面上平行布置传感器观测波段之间的时间延迟,再利用图像相关性计算时间延迟内两个波段的相对偏差来估计航天器姿态,利用修正的姿态对图像进行校正。徐沪萍等<sup>[6]</sup>利用星图和星空背景估计振动点扩散函数(point spread function, PSF),并使用(Richardson-Lucy, RL)复原算法实现振动模糊图像的复原。Pan 等<sup>[7]</sup>基于卫星影像估计平台抖动信息,提出了一种能够反映卫星真实推扫模式的连续动态拍摄模型,并利用亚像素匹配法实现了振动模糊图像的复原。Wang 等<sup>[8-9]</sup>利用光纤陀螺探测卫星平台姿态数据,结合稳态重成像模型实现了抖动图像的校正。胡堃等<sup>[10]</sup>将星敏感器测姿数据和高频角位移颤振补偿数据有效结合,优化严密成像几何模型,最大

程度地消除平台颤振导致的影像内部几何畸变。赵苓等<sup>[11]</sup>利用磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)角速度传感器探测颤振信息,并使用全变差(total variation, TV)正则化算法实现了模糊图像的复原。综上所述,物理隔离、数字图像处理和基于颤振探测的图像复原是目前抑制微角振动对遥感图像影响的3种主要技术手段。

明晰微角振动对成像质量的影响机理是实现微角振动抑制的基础,对航空相机的光机结构优化和图像去模糊都具有重要的意义。针对这一问题,国内外学者们进行了诸多研究。龚小雪等<sup>[12]</sup>分析了飞轮微振动对光学遥感卫星成像的影响机理,指出微振动会使图像像移具有谐波特性和模态特性。Hadar 等<sup>[13-14]</sup>建立了匀速直线运动和正弦振动作用下的成像系统调制传递函数(modulation transfer function, MTF)模型,将正弦振动分为高频振动和低频振动,针对固定的正弦振动参数,研究了振动对成像质量的影响。智喜洋等<sup>[15]</sup>建立了基于时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)推扫成像的MTF降质模型。钱义先等<sup>[16]</sup>采用运动概率密度函数量化分析了线性运动、正弦振动和随机振动对图像MTF的影响,正弦运动下的MTF随着振幅的增大而迅速降低。石进峰等<sup>[17]</sup>对光电载荷进行定频微振动实验,利用实验过程中MTF实测数据来确定载荷所能承受的微振动量级,实验表明定频实验中振动量级与MTF近似呈正比关系。李玉龙等<sup>[18]</sup>推导了图像MTF与振动参数间的关系,指出图像MTF随振幅增加逐渐下降,且振幅越大,MTF减小越快。孙崇尚等<sup>[19]</sup>利用基于空间域计算方

法对曝光时间为振动周期整数倍情况下的 MTF 进行了计算,指出曝光时间为振动周期非整数倍时初始曝光时刻对成像质量的影响具有随机性,但未给出初始曝光时间对调制传递函数的具体影响规律.然而,目前的研究大多集中在基于空间域扩散函数的理论分析,不适用于任意振动频率,无法明晰瞬变微角振动对成像质量的影响规律.此外,对角振动的分析只关注曝光时间为振动周期整数倍的特殊情况,无法量化二者没有整数倍关系时颤振参数对像质的影响规律.

本文首先从图像退化过程出发,分析了微角振动导致图像降质的机理,然后计算了不同角振动情况对应的 MTF,仿真分析了像质随角振动参数变化的规律,最后搭建了成像系统,实验验证了各个角振动参数对图像质量的影响规律.

### 1 角振动导致图像退化的机理

图像拍摄过程中,相机与物体间相对运动、光学系统像差、图像传感器传递特性等多种因素均会导致图像产生失真或变形,这种现象叫做图像退化<sup>[20]</sup>.图像退化过程可分为运动模糊退化和噪声退化,如图 1 所示.

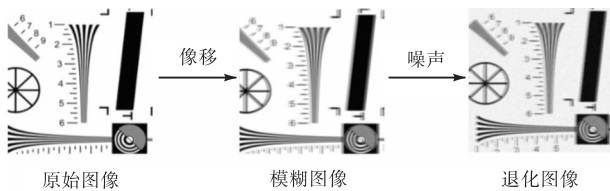


图 1 图像退化过程  
Fig.1 Image degradation process

图 1 所示的图像退化模型可表示为

$$g(x) = h(x) * f(x) + n(x) \tag{1}$$

式中:  $f(x)$  为原始图像;  $h(x)$  为点扩散函数;  $n(x)$  为噪声信号;  $g(x)$  为退化图像.

角振动会导致相机视轴出现抖动,从而在相机曝光过程中引入像移,造成图像模糊.光学相机的几何成像关系如图 2 所示.

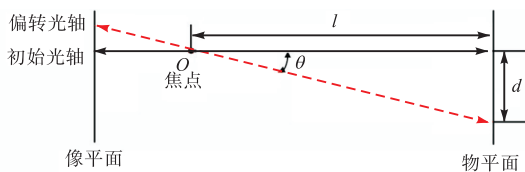


图 2 相机几何成像关系  
Fig.2 Geometric imaging relationship of the camera

由图 2 可以建立像移  $d$  与相机焦距  $l$  和角振动角

度  $\theta$  间的关系为

$$d = l \tan \theta \tag{2}$$

单频正弦角振动导致像点在像平面上做正弦运动,像点的运动方程可描述为

$$x(t) = D \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \tag{3}$$

式中:  $D$  为像点振动幅值;  $T$  为角振动周期;  $\varphi$  为初始相位.

相机曝光时间内,光学系统的角振动将导致接收到的光能被分散,描述像点运动过程中光能分布的 PSF 随之变化,如图 3 所示.



(a) 静态光能分布



(b) 振动光能分布

图 3 光能分布点扩散函数

Fig.3 Point spread function of light energy distribution

单频正弦角振动作用下 PSF 的计算式为

$$h(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 + x^2}} \tag{4}$$

对式(4)进行傅里叶变换并取模,可以得到能够评价成像系统解析力 MTF 的计算式为

$$MTF(f) = \left| \frac{1}{t_c} \int_{t_s}^{t_s+t_c} \exp[-2j\pi f x(t)] dt \right| \tag{5}$$

式中:  $t_c$  为曝光时间;  $t_s$  为初始曝光时刻;  $f$  为空间频率.

### 2 角振动对 MTF 的影响分析

根据相机曝光时间与角振动周期之比,可将平台角振动分为角振动周期大于曝光时间的低频角振动和振动周期小于曝光时间的高频角振动 ( $t_c / T > 1$ ).本节将推导不同角振动作用下,成像系统 MTF 的解析计算表达式.

#### 2.1 低频角振动

低频角振动条件下,曝光时间内的像点位移与初始曝光时刻的关系如图 4 所示.图中,  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  表示不同初始曝光时刻、相同曝光时间对应像点的绝对位移,可以看出不同初始曝光时刻像点的绝对位移不同,当曝光时间均匀分布于振动中心时,最大像移为  $d_{max}$ .

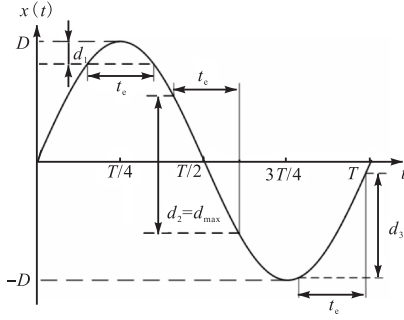


图4 低频角振动的曝光时间和像点位移关系

Fig.4 Relationship between the exposure time and image shift of low-frequency angular vibration

将式(3)代入式(5)中,并将被积函数写成贝塞尔级数的形式,可得

$$\begin{aligned} \text{MTF}(f, t_s) = & \left| \frac{1}{t_e} \int_{t_s}^{t_s+t_e} \left[ J_0(2\pi f D) + \right. \right. \\ & \left. \left. 2 \sum_{k=1}^{+\infty} J_{2k}(2\pi f D) \cos\left(\frac{4k\pi}{T} t\right) \right] dt - \right. \\ & \left. j \frac{1}{t_e} \int_{t_s}^{t_s+t_e} 2 \sum_{k=1}^{+\infty} J_{2k-1}(2\pi f D) \sin\left(\frac{(4k-2)\pi}{T} t\right) dt \right| \quad (6) \end{aligned}$$

式中  $J_n$  为  $n$  阶贝塞尔函数。

式(6)中两个无穷级数在  $[0, +\infty)$  一致收敛,交换式(6)中积分与求和顺序,并将积分项进行化简,可得

$$\begin{aligned} \text{MTF}(f, t_s) = & \left| J_0(2\pi f D) + \right. \\ & 2 \sum_{k=1}^{+\infty} J_{2k}(2\pi f D) \frac{\sin\left(2k\pi \frac{t_e}{T}\right)}{2k\pi \frac{t_e}{T}} \cos\left(2k\pi \frac{2t_s+t_e}{T}\right) - \\ & 2j \sum_{k=1}^{+\infty} J_{2k-1}(2\pi f D) \frac{\sin\left[(2k-1)\pi \frac{t_e}{T}\right]}{(2k-1)\pi \frac{t_e}{T}} \\ & \left. \sin\left[(2k-1)\pi \frac{2t_s+t_e}{T}\right] \right| \quad (7) \end{aligned}$$

初始曝光时刻为 0, 曝光时间为 20 ms, 像点振幅分别为  $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$ , 角振动频率分别为 20.0 Hz 和 40.0 Hz, 对应的 MTF 曲线如图 5 所示。当角振动频率为 20.0 Hz, 振幅为  $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$  时, 空间频率 50 cy/mm 处的 MTF 值分别为 0.9099、0.6902 和 0.4832。当角振动频率为 40.0 Hz, 像点振动幅值为  $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$  时, 空间频率 50 cy/mm 处的 MTF 值分别为 0.4764、0.3821 和 0.2552。由此可见, 低频微角振动的幅值和频率均会降低成像质量, MTF 曲线的衰减程度随着像点振动幅值的增加而加剧。在相同像点振动幅值下, MTF 随

着角振动频率增加而减小。

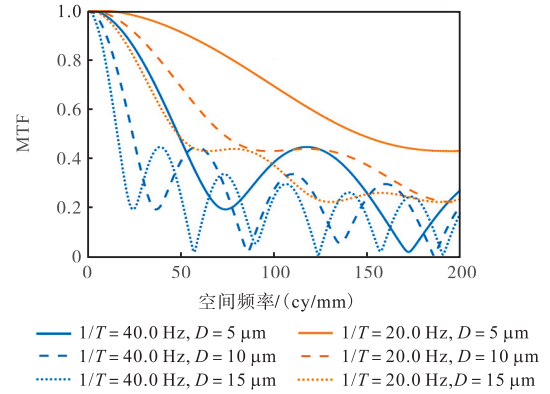


图5 低频振动 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves under low-frequency vibrations

## 2.2 高频角振动

卫星平台在轨角振动的幅值会随着角振动频率的增加而衰减<sup>[21]</sup>。高频角振动时, 有  $t_e = nT + \Delta T$ , 像点的最大位移为  $2D$ , 如图 6 所示。根据曝光时间和角振动周期之间的关系, 可以将高频角振动分为曝光时间是角振动周期的整数倍和非整数倍两种情况, 下面对两种情况下的 MTF 分别进行计算。

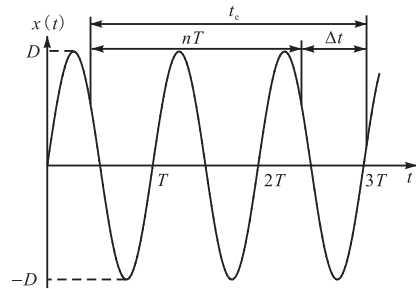


图6 高频角振动像点运动曲线

Fig.6 Motion curves of the image point under high-frequency angular vibrations

### 2.2.1 曝光时间为角振动周期的整数倍

曝光是角振动周期的整数倍时, 有  $t_e = nT$ , 此时式(7)中中级数项等于 0, 则有

$$\text{MTF}(f) = |J_0(2\pi f D)| \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 当曝光时间为高频角振动周期的整数倍时, 成像系统的 MTF 与角振动周期和初始曝光时刻无关, 仅与像点振动幅值  $D$  有关。当像点振动幅值为  $15 \mu\text{m}$ , 初始曝光时刻为随机数, 角振动频率分别为 50.0 Hz、100.0 Hz、150.0 Hz 和 200.0 Hz 对应的 MTF 曲线如图 7 所示。角振动频率为 50.0 Hz, 初始曝光时刻为随机数, 像点振动幅值从  $6 \mu\text{m}$  增加至  $12 \mu\text{m}$  对应的 MTF 曲线如图 8 所示。可以看出, MTF 曲线基本不随角振动频率发生变化, 且

随像点振动幅值增加, MTF 曲线衰减速度逐渐加快.

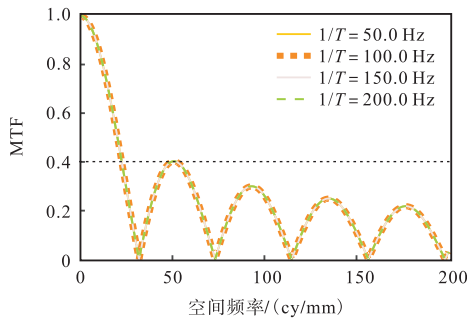


图 7 高频整数倍不同角振动频率 MTF 曲线

Fig.7 MTF curves under high-frequency integer-period vibrations with different angular vibration frequencies

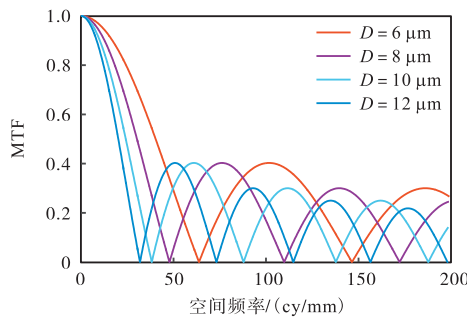


图 8 高频整数倍不同像点振动幅值 MTF 曲线

Fig.8 MTF curves under high-frequency integer-period vibrations with different pixel vibration amplitudes

### 2.2.2 曝光时间与角振动周期之比为非整数

当曝光时间不等于角振动周期的整数倍时,  $\Delta T \neq 0$ , 此时 MTF 的计算公式为

$$\begin{aligned}
 \text{MTF}(f, t_s) = & \left| J_0(2\pi f D) + \right. \\
 & 2 \sum_{k=1}^{+\infty} J_{2k}(2\pi f D) \cos\left(2k\pi \frac{2t_s + \Delta t}{T}\right) \frac{\sin\left[2k\pi\left(\frac{t_e}{T} - n\right)\right]}{2k\pi \frac{t_e}{T}} - \\
 & 2j \sum_{k=1}^{+\infty} J_{2k-1}(2\pi f D) \sin\left[(2k-1)\pi \frac{2t_s + \Delta t}{T}\right] \cdot \\
 & \left. \frac{\sin\left[(2k-1)\pi\left(\frac{t_e}{T} - n\right)\right]}{\left[(2k-1)\pi \frac{t_e}{T}\right]} \right| \quad (9)
 \end{aligned}$$

当曝光时间为 20 ms, 初始曝光时刻为 0, 像点振动幅值分别为 5 μm、10 μm 和 15 μm, 角振动频率为 125.0 Hz 和 375.0 Hz 时绘制的 MTF 曲线如图 9 所示. 当角振动频率为 125.0 Hz, 像点振动幅值为 5 μm、10 μm 和 15 μm, 在空间频率 50 cy/mm 处对应的 MTF 值分别为 0.495 4、0.321 4 和 0.267 0. 当角振动频率为 375 Hz, 像点振动幅值为 5 μm、10 μm 和 15 μm, 在空间频率 50 cy/mm 处对应的 MTF 值分别

为 0.474 7、0.306 2 和 0.266 0. 由此可见, MTF 曲线的衰减程度随像点振动幅值增加而增大. 在相同像点振动幅值下, MTF 数值随着角振动频率增加而减小.

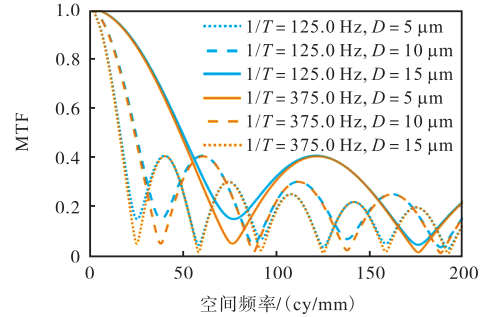


图 9 高频非整数倍 MTF 曲线

Fig.9 MTF curves under high-frequency non-integer-period vibrations

## 3 仿真分析

本节利用 MATLAB 搭建仿真平台, 使用归一化的调制传递函数面积(modulation transfer function area, MTFA)量化分析不同角振动参数对图像模糊的贡献度. 仿真平台面板如图 10 所示, 可以实现导入振动参数计算并绘制振动曲线和 MTF 曲线.

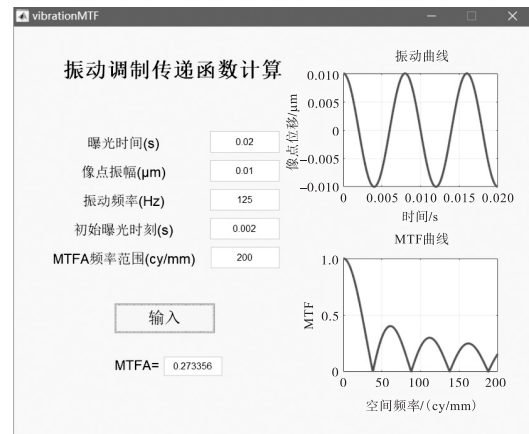


图 10 角振动成像 MTF 计算仿真平台

Fig.10 Simulation platform for the MTF calculation of angular vibration imaging

### 3.1 MTFA 随像点振动幅值的变化规律仿真分析

文献[22]资料表明, 图像受到的振动作用达到一个像元以上的幅度时, MTF 下降明显. 对于焦距为 35 mm、像元尺寸为 3.45 μm 的相机而言, 像点振动幅值从 5 μm 增加至 15 μm 时, 对应的角振动幅值从 143 μrad 增加至 429 μrad. 曝光时间为 20 ms, 初始曝光时刻为 0, 角振动频率 25.0 Hz、125.0 Hz 和 250.0 Hz 对应的 MTFA 随像点振动幅值变化的曲线

如图 11 所示. 随着像点振动幅值的增大, 25.0 Hz 角振动频率对应的 MTFA 从 0.962 0 减小至 0.718 0, 125.0 Hz 角振动频率对应的 MTFA 从 0.820 0 减小至 0.482 0, 250.0 Hz 角振动频率对应的 MTFA 从 0.812 0 减小至 0.459 0. 由此可见, 随着角振动幅值的增加, 图像质量明显下降, 角振动幅值相同时, 角振动频率越高对应的 MTFA 越小.

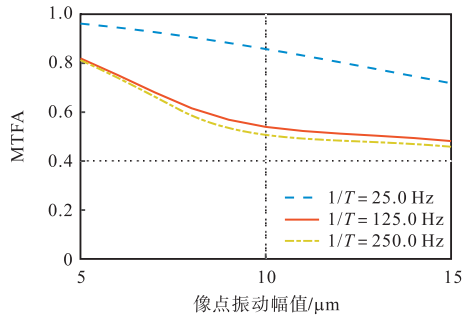


图 11 不同角振动频率下 MTFA 随像点振动幅值变化曲线  
Fig.11 MTFA variation curves with pixel vibration amplitude under different angular vibration frequencies

### 3.2 MTFA 随角振动频率的变化规律仿真分析

曝光时间为 20 ms, 初始曝光时刻为 0, 像点振动幅值为 10 μm 的条件下, 当角振动频率从 20.0 Hz 增加至 700.0 Hz 时, 图像 MTFA 对频率的变化曲线如图 12 和图 13 所示. 在 20.0 ~ 50.0 Hz 角振动频率范

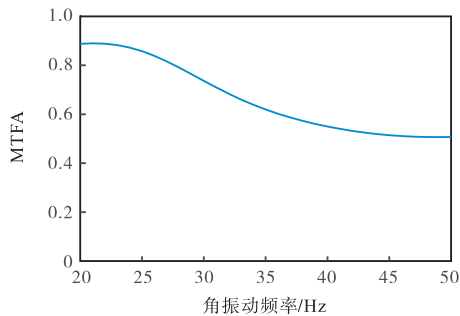


图 12 低频角振动对应的 MTFA 随角振动频率变化曲线  
Fig.12 Curve of MTFA variation with angular vibration frequency under low-frequency angular vibrations

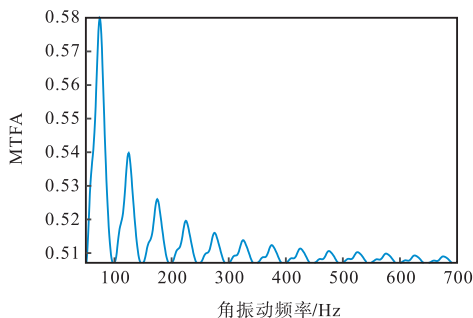
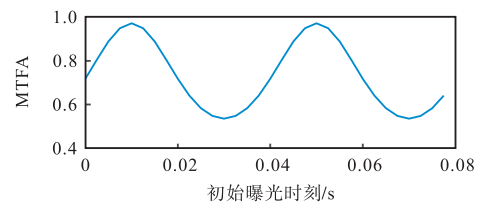


图 13 高频角振动对应的 MTFA 随角振动频率变化曲线  
Fig.13 Curve of MTFA variation with angular vibration frequency under high-frequency angular vibrations

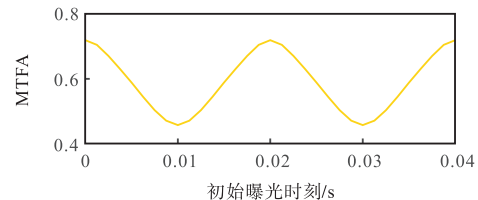
围内, MTFA 随角振动频率的增加逐渐下降, 从 0.887 8 下降至 0.507 1. 在 50.0 ~ 700.0 Hz 频率范围内, MTFA 随角振动频率的增加整体呈下降的趋势, 但在较窄的角振动频率范围内, 会出现波动. MTFA 在 50.0 Hz、100.0 Hz、150.0 Hz 等间隔 50.0 Hz 的频点处取到相同的谷值, 此时曝光时间为角振动周期的整数倍. MTFA 在 75.0 Hz、125.0 Hz、175.0 Hz 等间隔 50.0 Hz 的频点处取到峰值, 即曝光时间内角振动的非整周期部分为半个周期. 因此高频角振动 MTFA 的波动可能是受非整周期部分的影响.

### 3.3 MTFA 随初始曝光时刻的变化规律仿真分析

曝光时间为 20 ms、像点振动幅值为 15 μm、角振动频率为 12.5 Hz 条件下, 当初始曝光时刻从 0 增加至 0.08 s 时 (间隔 0.002 5 s), 图像的 MTFA 变化如图 14 (a) 所示. MTFA 随初始曝光时刻周期性变化, 当初始时刻为 0.03 s 和 0.07 s 时, 相机曝光时间内像移最大, MTFA 取最小值 0.535 0. 在 0.01 s 和 0.05 s 时, 曝光时间分布于振动峰谷值, 此时像移最小, MTFA 取最大值 0.972 0. 曝光时间和像点振动幅值不变, 角振动频率为 25.0 Hz 条件下, 初始曝光时刻从 0 增加至 0.04 s (间隔 0.001 25 s), 图像的 MTFA 变化如图 14 (b) 所示. 初始时刻 0.01 s 和 0.03 s 时, 相机曝光时间内像移最大, MTFA 取最小值 0.458 6. 在 0 s、0.02 s 和 0.04 s 时, 曝光时间分布于振动峰谷值, 此时像移最小, MTFA 取最大值 0.718 0.



(a) 角振动频率 12.5 Hz

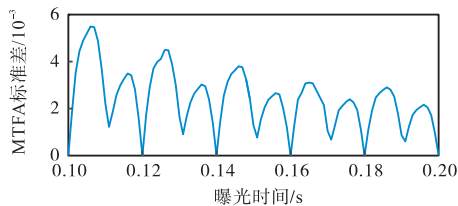


(b) 角振动频率 25.0 Hz

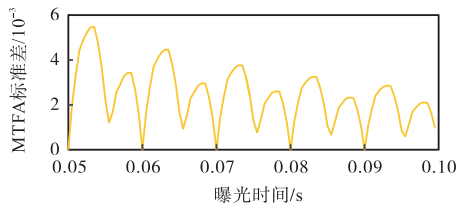
图 14 MTFA 随初始曝光时刻变化曲线  
Fig.14 Curves of MTFA variation with the initial exposure time

高频角振动下初始曝光时刻对 MTFA 的影响与低频时相似, 但 MTFA 的大小受初始曝光时刻影响较小, 为了判断高频角振动时初始曝光时刻对图像质量的影响是否可以忽略, 计算曝光时间为角振动周期

的多倍数情况下不同初始曝光时刻对应的 MTFA, 并用同一曝光时间的不同 MTFA 的标准差  $\sigma$  评价初始曝光时刻的影响程度. 在像点振动幅值为  $15\ \mu\text{m}$ 、角振动周期为  $0.02\ \text{s}$  的振动条件下, 当曝光时间从  $0.10\ \text{s}$  增加至  $0.20\ \text{s}$ , 每个曝光时间下, 令初始曝光时刻从  $0$  增加至曝光时长, 计算每个初始曝光时刻下的 MTFA, 计算每个曝光时间对应的不同初始曝光时刻 MTFA 的标准差, 标准差随曝光时间的变化曲线如图 15(a) 所示. 像点振动幅值不变、角振动周期  $0.01\ \text{s}$  的角振动条件下, 当曝光时间从  $0.05\ \text{s}$  增加至  $0.10\ \text{s}$ , 计算绘制 MTFA 的标准差如图 15(b) 所示. 由此可见, 高频角振动不同角振动周期情况下, 随曝光时间的增加, MTFA 的标准差整体呈下降趋势. 在曝光时间为振动周期的非整数倍范围内, 标准差出现波动. 出现这一现象的原因可能是曝光时间内包含了振动的非整周期部分. 当曝光时间为振动周期的整数倍时, 标准差为零, 说明此时初始曝光时刻对 MTF 没有影响.



(a) 角振动频率为 50.0 Hz



(b) 角振动频率为 100.0 Hz

图 15 不同初始曝光时刻角振动 MTFA 标准差随曝光时间变化曲线

Fig.15 Curves of MTFA standard deviation of angular variation at different initial exposure times as a function of exposure time

### 4 实验分析

为了验证上文理论和仿真分析结论的正确性, 搭建了如图 16 所示的实验系统进行验证. 考虑本文研究主要围绕微角振动的影响展开, 并未考虑大气湍流等因素. 实验中将磁流体动力学角振动传感器与面阵相机刚性固定在 105-AVT 高频角振动台上, 实验使用面阵工业相机进行成像, 相关参数列于表 1. 在实验室环境下无法模拟实际卫星拍摄遥感图像所受的大气环境影响, 将在后续研究中改进. 采用单轴角

振动台产生绕成像相机光轴的微弧级正弦角振动, 固定光圈, 将 ISO 12233 标准分辨率测试卡靶标固定在距离面阵相机约  $1\ \text{m}$  处, 由上位机给出激励信号控制角振动系统. 采用 NI 公司的 16 位数据采集卡 (NIUSB-6361) 采集角振动传感器的输出信号. 利用上位机进行数据分析和处理. 使用倾斜刃边法获得模糊图像的 MTF 曲线, 并用 MTFA 量化分析不同角振动参数对图像模糊的贡献度.

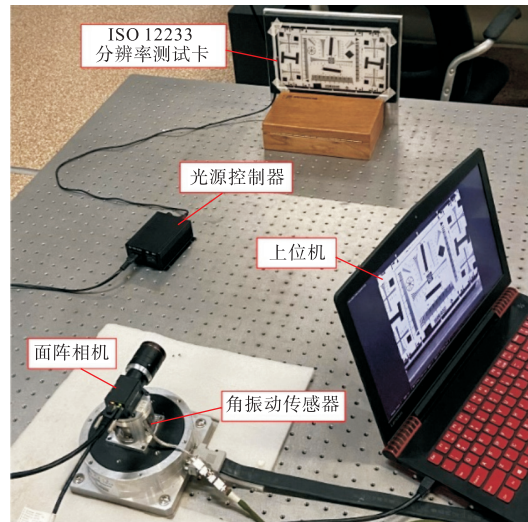


图 16 实验系统实物图

Fig.16 Physical diagram of the experimental system

表 1 面阵相机相关参数  
Tab.1 Parameters of the array scan camera

焦距 /mm	像元尺寸/ (像素/ $\mu\text{m}$ )	分辨率	快门方式	传感器类型
35	3.45	$2\ 448 \times 2\ 048$	全局快门	CMOS

#### 4.1 角振动幅值实验分析

受角振动台传递特性限制, 相同激励下角振动频率越高角振动幅值越低, 且角振动幅值对激励的灵敏度逐渐减小, 无法在不同频点得到同一角振动幅值的图像. 在曝光时间为  $20\ \text{ms}$ 、角振动频率为  $25.0\ \text{Hz}$  的条件下, 当角振动台激励从  $0.02\ \text{V}$  增加至  $0.10\ \text{V}$ , 角振动幅值从  $0.006\ 1^\circ$  增加至  $0.032\ 9^\circ$ . 曝光时间不变, 角振动频率  $100.0\ \text{Hz}$  条件下激励从  $0.5\ \text{V}$  增加至  $1.5\ \text{V}$ , 角振动幅值从  $0.006\ 4^\circ$  增加至  $0.028\ 1^\circ$ . 曝光时间不变, 角振动频率  $175.0\ \text{Hz}$  条件下激励从  $1.5\ \text{V}$  增加至  $3.0\ \text{V}$ , 角振动幅值从  $0.008\ 6^\circ$  增加至  $0.017\ 0^\circ$ . 不同角振动频率对应的模糊图像 MTFA 随角振动幅值变化曲线如图 17 所示.  $25.0\ \text{Hz}$  时, MTFA 从  $0.446\ 2$  下降至  $0.133\ 3$ ;  $100.0\ \text{Hz}$  时, MTFA 从  $0.277\ 6$  下降至  $0.119\ 2$ ;  $175.0\ \text{Hz}$  时, MTFA 从  $0.242\ 7$  下降至  $0.173\ 2$ . 由此可见, 不同角振动频率

下图像质量均随着角振动幅值增大而下降,得到的结论与文献[16]的分析结果相吻合。

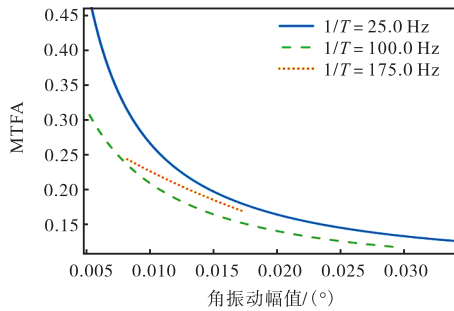


图 17 不同角振动频率下 MTFA 随角振动幅值变化曲线  
 Fig.17 Curves of MTFA variation with angular vibration amplitude under different angular vibration frequencies

#### 4.2 角振动频率实验分析

当曝光时间为 20 ms,角振动频率从 20.0 Hz 增加至 400.0 Hz,间隔 10.0 Hz,并通过调整角振动激励将角振动幅值控制在 0.006°。模糊图像 MTFA 随角振动频率变化曲线如图 18 所示。在 20.0~50.0 Hz 频率范围内,MTFA 随角振动频率的增加逐渐下降,从 0.429 5 下降至 0.311 1,50.0~400.0 Hz 频率范围内,MTFA 随角振动频率的增加整体呈下降趋势,伴随少量波动,最终下降至 0.217 1。可以看出图像质量随角振动频率的增大呈下降趋势。

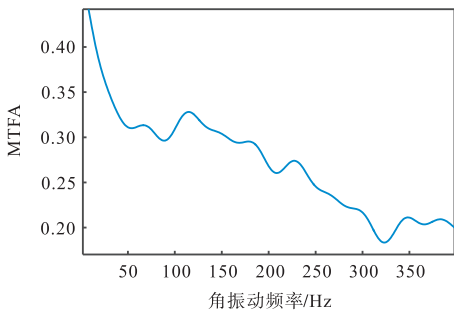


图 18 20.0~400.0 Hz MTFA 随角振动频率变化曲线  
 Fig.18 Curve of MTFA variation with angular vibration frequency at frequencies of 20.0—400.0 Hz

为探究 MTFA 曲线产生波动的原因,令角振动频率从 100.0 Hz 增加至 150.0 Hz,间隔 2.0 Hz,曝光时间 20 ms,调整角振动台激励将角振动幅值控制在 0.006 0°。模糊图像 MTFA 随振动频率变化曲线如图 19 所示,呈先增加后降低的趋势,最大值 0.333 0 出现在 112.0 Hz 处,可以看出,角振动的非整周期部分会影响图像质量。

#### 4.3 初始曝光时刻实验分析

在曝光时间为 20 ms,角振动幅值为 0.006 0°上

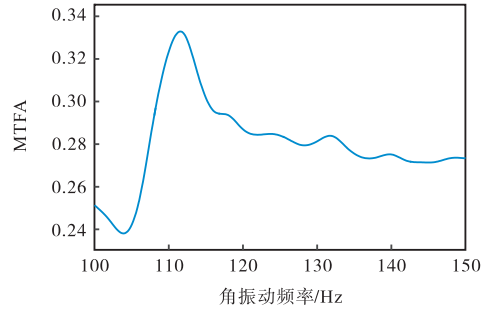


图 19 100.0~150.0 Hz MTFA 随角振动频率变化曲线  
 Fig.19 Curve of MTFA variation with angular vibration frequency at frequencies of 100.0—150.0 Hz

下,25.0 Hz、100.0 Hz、175.0 Hz 3 个角振动频率的角振动条件下,重复拍摄图像,得到随机初始曝光时刻下的角振动模糊图像。不同角振动频率下多个初始曝光时刻的 MTF 曲线如图 20 所示。可以看出低频角振动时不同初始曝光时刻的 MTF 曲线离散程度较大,高频角振动时离散程度较小,计算得到 25.0 Hz 所有曲线的 MTFA 标准差为 0.039 5,100.0 Hz 时 MTFA 标准差为 0.001 3,175.0 Hz 时 MTFA 标准差为 0.010 1,说明角振动频率越高初始曝光时刻对成像质量的影响越小,且角振动周期为曝光时间整数倍时初始曝光时刻对 MTF 没有影响。

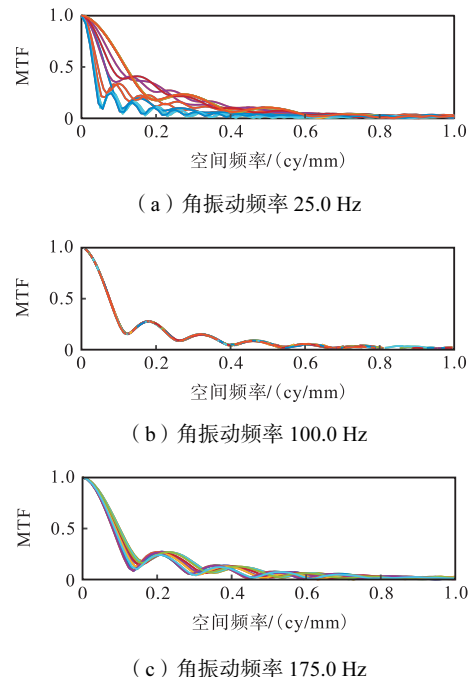


图 20 3 个频点不同初始曝光时刻下 MTF 曲线  
 Fig.20 MTF curves at the three frequency points with different initial exposure times

## 5 结 语

本文建立了图像退化模型,分析了微角振动对图

像退化的影响机理,对不同角振动频率情况下的 MTF 进行了建模,探讨了角振动频率、振幅、初始相位等参数对 MTF 的影响规律.利用 MATLAB 搭建了仿真平台,评估了各个角振动参数对图像质量的影响程度.以 MTFA 为评价图像模糊程度的指标,搭建实验平台验证了振动参数对成像质量的影响规律.结果表明,图像质量随角振动幅值的增加而降低,频率 100 Hz 的角振动幅值从  $0.0064^\circ$  增加至  $0.0281^\circ$  时,MTFA 由 0.2776 下降至 0.1192,低频角振动下,成像质量随角振动初相位呈周期性变化,随角振动频率的增加而下降.高频角振动下,当曝光时间为角振动周期的整数倍时,不同角振动初始相位的 MTF 曲线变化较小,100.0 Hz 的角振动 MTF 曲线的 MTFA 标准差仅为 0.0013,成像质量受角振动初相位的影响可以忽略,当曝光时间为角振动周期的非整数倍时,角振动会造成 MTF 曲线的波动.

#### 参考文献:

- [1] 张 兵. 光学遥感信息技术与应用研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 1-5.  
Zhang Bing. A survey of developments on optical remote sensing information technology and applications[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(1): 1-5 (in Chinese).
- [2] 王红娟, 王 炜, 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.  
Wang Hongjuan, Wang Wei, Wang Xin, et al. Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(10): 1212-1217 (in Chinese).
- [3] 吴 琼, 张新伟, 罗 敏, 等. 高分七号卫星控制力矩陀螺隔振装置设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 123-130.  
Wu Qiong, Zhang Xinwei, Luo Min, et al. Design of micro-vibration isolation system for GF-7 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 123-130 (in Chinese).
- [4] 张庆君, 王光远, 郑钢铁. 光学遥感卫星微振动抑制方法及关键技术[J]. 宇航学报, 2015, 36(2): 125-132.  
Zhang Qingjun, Wang Guangyuan, Zheng Gangtie. Micro-vibration attenuation methods and key techniques for optical remote sensing satellite[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(2): 125-132 (in Chinese).
- [5] 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.
- [6] 徐沪萍, 付文兴, 马 杰. 一种遥感图像振动模糊复原方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 28-32.  
Xu Huping, Fu Wenxing, Ma Jie. Vibration blur restoration method of remote sensing image[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(3): 28-32 (in Chinese).
- [7] Pan J, Guo Y, Zhu Y, et al. Jitter detection and image restoration based on continue dynamic shooting model for high-resolution TDICCD satellite images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(6): 4915-4933.
- [8] Wang M, Zhu Y, Jin S Y, et al. Correction of ZY-3 image distortion caused by satellite jitter via virtual steady reimaging using attitude data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 119: 108-123.
- [9] 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.
- [10] 胡 堃, 黄 旭, 张永军, 等. 基于高频角位移数据的卫星平台颤振检测与影像几何质量补偿[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1525-1531.  
Hu Kun, Huang Xu, Zhang Yongjun, et al. Satellite platform jitter detection and image geometric quality compensation based on high-frequency angular displacement data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(7): 1525-1531 (in Chinese).
- [11] 赵 苓, 费 融, 李醒飞, 等. 基于 MHD 角速度传感器的面阵相机模糊图像复原[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(8): 796-806.  
Zhao Ling, Fei Rong, Li Xingfei, et al. Blurred image restoration of area scan camera based on magnetohydrodynamics angular rate sensor[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(8): 796-806 (in Chinese).
- [12] 龚小雪, 张 雷, 宣 明. 光学遥感卫星飞轮微振动仿真和地面实验研究[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 138-146.  
Gong Xiaoxue, Zhang Lei, Xuan Ming. Modeling and ground-based experimental jitter researches on earth observation satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 138-146 (in Chinese).

- [13] Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer functions: A new method[EB/OL]. <https://doi.org/10.1117/12.45718>, 1991-12-01.
- [14] 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): 566-578.
- [15] 智喜洋, 张树青, 张伟, 等. TDICCD 相机平台振动所致的 MTF 空间移变降质[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1432-1438.  
Zhi Xiyang, Zhang Shuqing, Zhang Wei, et al. MTF space-variant blurring resulted from platform vibration of TDICCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1432-1438 (in Chinese).
- [16] 钱义先, 梁伟, 高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 192-196.  
Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high-resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 192-196 (in Chinese).
- [17] 石进峰, 成鹏飞, 袁灏, 等. 微振动对空间光电载荷成像影响分析与验证[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0520001.  
Shi Jinfeng, Cheng Pengfei, Yuan Hao, et al. Analysis and verification of effect of micro-vibration on space photoelectric payload imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0520001 (in Chinese).
- [18] 李玉龙, 何忠波, 白鸿柏, 等. 角振动对光学成像系统传递函数影响分析[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(15): 1784-1788.  
Li Yulong, He Zhongbo, Bai Hongbai, et al. Analysis of influences of angular vibration on MTF in optical imaging systems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(15): 1784-1788 (in Chinese).
- [19] 孙崇尚, 丁亚林, 王德江, 等. 正弦振动对航空相机成像影响的分析与验证[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0711001.  
Sun Chongshang, Ding Yalin, Wang Dejiang, et al. Analysis and verification of influence of sinusoidal vibration on imaging of aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0711001 (in Chinese).
- [20] 沈 峤, 李舜韶, 毛建国, 等. 数字图像复原技术综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(9): 1764-1775.  
Shen Huan, Li Shunming, Mao Jianguo, et al. Digital image restoration techniques: A review[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(9): 1764-1775 (in Chinese).
- [21] 马 晶, 韩琦琦, 于思源, 等. 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案[J]. *激光技术*, 2005, 29(3): 228-232.  
Ma Jing, Han Qiqi, Yu Siyuan, et al. The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 228-232 (in Chinese).
- [22] Sutton S S, Boyd A K, Kirk R L, et al. Correcting spacecraft jitter in HiRISE images[C]//2017 International Symposium on Planetary Remote Sensing and Mapping. Hong Kong, China, 2017: 141-148.  
(责任编辑: 孙立华)