

# 正弦振动对航空相机成像影响的分析与验证

孙崇尚<sup>1,2</sup> 丁亚林<sup>1</sup> 王德江<sup>1\*</sup> 黄厚田<sup>1</sup> 田大鹏<sup>1</sup> 姚 园<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中科院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 航空相机拍照时, 由于受到振动影响成像分辨率会降低。采用动态调制传递函数研究正弦振动对成像的影响, 通过基于空间域的计算方法对高频和低频振动的调制传递函数(MTF)进行了分析, 指出了曝光时间不等于振动周期整数倍的一般情况时, 高频振动对成像质量的影响也具有随机性, 但没有低频振动的随机性明显。采用快速反射镜作为振动源进行成像实验, 对获得的振动图像使用小波变换提取图像的高频信息。实验中将曝光时间设定为 20 ms, 振动频率为 50 Hz 时, 高频信息波动范围仅为  $0.0582 \times 10^4$ , 可以认为基本没有波动。当振动频率为 15 Hz 时, 波动范围为  $0.6233 \times 10^4$ , 随机性很明显, 而振动频率为 65 Hz 时, 波动范围为  $0.1245 \times 10^4$ , 随机性不明显。通过高频信息与 MTF 的对应关系, 实验证明了理论分析的正确性。在理论分析和实验的基础上, 总结了正弦振动对成像影响的普遍性结论。该结论可用于分析成像系统光机结构设计, 也可应用于图像去模糊, 具有一定的意义。

**关键词** 成像系统; 航空相机; 正弦振动; 调制传递函数; 快速反射镜

中图分类号 V245.6 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0711001

## Analysis and Verification of Influence of Sinusoidal Vibration on Imaging of Aerial Camera

Sun Chongshang<sup>1,2</sup> Ding Yalin<sup>1</sup> Wang Dejiang<sup>1</sup> Huang Houtian<sup>1</sup>  
Tian Dapeng<sup>1</sup> Yao Yuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The imaging resolution of aerial camera is limited by vibration during exposure. Dynamic modulation transfer function is used to study the impact of the sinusoidal vibration on imaging. Modulation transfer function (MTF) of high-frequency and low-frequency vibrations are analyzed through the calculation method based on spatial domain. When exposure time is not equal to an integer multiples of the vibration cycle, the impact of high-frequency vibrations on image quality is also random, but the randomness is less apparent than low-frequency vibration. The fast steering mirror is used to simulate vibrations, complementary metal oxide semiconductor (CMOS) sensor is used to capture images, wavelet transform is used to extract high frequency information. Exposure time is set to 20 ms, when the vibration frequency is 50 Hz, the fluctuation range of high-frequency information is only  $0.0582 \times 10^4$ , which can be ignored compared with the total number of high-frequency information. When the vibration frequency is 15 Hz, the fluctuation range is  $0.6233 \times 10^4$  and randomness is obvious. But when the vibration frequency is 65 Hz, the fluctuation range is  $0.1245 \times 10^4$  and randomness is not obvious. By the correspondence between high-frequency information and MTF, the correctness of theoretical analysis is proved. On the basis of theoretical analysis and experiments, the general conclusion of sinusoidal vibration's effect on imaging is summed. This conclusion can not

收稿日期: 2014-02-18; 收到修改稿日期: 2014-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61308099, 61304032)

作者简介: 孙崇尚(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事航空相机像移补偿方面的研究。E-mail: sun2007cn@163.com

导师简介: 丁亚林(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl\_1964@126.com

\* 通信联系人。E-mail: wangdj04@ciomp.ac.cn

only be used to analyze the design of the imaging system structure, but also can be applied to image deblurring.

**Key words** imaging systems; aerial camera; sinusoidal vibration; modulation transfer function; fast steering mirror

**OCIS codes** 110.0100; 110.4100; 120.0280; 110.2960

## 1 引 言

航空相机照相时,受到飞行器部件和相机本身的振动以及气流波动引起的振动,会影响相机的成像质量,使图像的分辨率下降,尤其对于大视场、长焦距的成像系统,图像质量的下降更为明显。因此,研究振动对成像质量的影响,并对其进行量化分析,确定振幅和振动频率对成像质量的影响,对光学机械结构的设计和图像处理都具有重要的意义<sup>[1]</sup>。振动对航空成像质量的影响,目前大多以图像的调制传递函数(MTF)作为评价标准,同时由于在积分时间内,振动对成像的影响是一个动态过程,调制传递函数成为动态传递函数。

正弦振动作为振动的基本形式之一,便于研究和分析,国内外很多学者做了很多工作,但多数仅限于理论分析与仿真。Hadar 等<sup>[2]</sup>提出了求解正弦振动动态传递函数的两种方法:1)基于频域上的分析方法,根据正弦目标通过系统成像后调制度的变化推导动态 MTF;2)基于空域上的分析方法,根据光学系统的线扩散函数(LSF)与曝光时间内振动的概率密度函数(PDF)等价得到线扩散函数,对其作一维傅里叶变换得到动态传递函数<sup>[3]</sup>。在此基础上,国内外学者分别引入 Taylor 级数展开、数值方法等数学方法计算动态传递函数<sup>[4-6]</sup>。文献<sup>[7]</sup>对多种振动下光轴的抖动引起 MTF 的下降进行了研究,对相机像移补偿系统的设计和图像恢复具有重要意义<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8-12]</sup>将动态传递函数的分析方法分别引入到推扫相机<sup>[8]</sup>、航空相机<sup>[9-11]</sup>和 TDICCD 相机中<sup>[12]</sup>,详细分析了各种形式的振动对具体成像系统的影响,在实际工程中很有意义<sup>[8-12]</sup>。

当前振动对成像影响的分析主要存在两个问题:1)缺乏相应的实验验证,由于目前主要采用振动台等进行实验,导致实验的精度低,产生的振动频率低;2)对高频正弦振动只关注了曝光时间为振动周期整数倍的特殊情况,而忽略了二者没有整数倍关系时的一般情况。

采用基于空间域的计算方法对各种频率的正弦振动对成像的影响进行了分析,重点分析了高频正弦振动的一般情况,得到了更加普遍意义的结论。然后在此基础上用快速反射镜作为振动源模拟各种频率的正弦振动,通过对靶标成像获得振动图像。

由于调制传递函数(MTF,  $f_{\text{MTF}}$ )和图像中的高频信息之间存在对应关系,采用小波变换等图像处理方法提取图像的高频信息,进而验证了理论分析的正确性。该结论可用于分析成像系统光机结构设计,也可应用于图像去模糊,具有一定的意义。

## 2 正弦振动对成像影响的动态传递函数分析

动态传递函数的计算方法主要有基于空间频率域的计算方法和基于空间域两类计算方法,Hadar 等<sup>[2-3]</sup>分别作了详细论述。基于空间域的计算方法由于只需要相机和景物之间相对位移的信息,而不需要景物的先验信息,而且计算量小,因此被广为使用,本文也采用这种方法。

基于空间域的计算方法的基本思想是曝光时间内物体与相机之间相对运动的概率密度函数(PDF,  $f_{\text{PDF}}$ )  $f_x(x)$  等价于系统的线扩散函数(LSF,  $f_{\text{LSF}}$ )<sup>[3]</sup>。LSF 的一维傅里叶变换就是光学传递函数(OTF,  $f_{\text{OTF}}$ ),即

$$f_{\text{OTF}} = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) \exp(-j2\pi fx) dx, \quad (1)$$

式中  $f$  为空间频率。

正弦振动对成像的影响,取决于曝光时间  $t_e$  与振动周期  $T_0$  之比,将其分为两类:低频振动和高频振动。下面对两种情况逐一论述,并在此基础上对高频振动的一般情况进行分析。

1) 当曝光时间大于正弦振动的周期时( $t_e > T_0$ ),即高频正弦振动。此时若  $t_e = nT_0$ ,即曝光时间为振动周期的整数倍时,对每一个振动周期  $x(t) = D \sin\left(\frac{2\pi}{T_0}t\right)$ ,其中  $0 \leq t \leq T_0$ ,其位移的概率密度函数为

$$f_x(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - x^2}}, \quad (2)$$

则整个曝光时间  $t_e = nT_0$  内的概率密度函数为

$$f_x(x) = \frac{1}{n} \times \frac{n}{\pi \sqrt{D^2 - x^2}} = \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - x^2}}, \quad (3)$$

进而通过傅里叶变换可求得调制传递函数为

$$f_{\text{MTF}} = |J_0(2\pi fD)|, \quad (4)$$

2) 当曝光时间小于正弦振动的周期时( $t_e <$

$T_0$ ), 即低频正弦振动, 低频正弦振动对成像质量的影响比较复杂。由于曝光时间只是振动周期的一部分, 像移量的大小取决于曝光发生在振动周期的时间。曝光可以发生在振动周期的任意时刻, 因此这是一个随机过程。低频振动的 LSF 是通过高频振动的概率密度函数(2)来计算的, 对低频时的情况(2)式只取曝光开始  $t_s$  到曝光结束  $t_s + t_e$  的部分。

图 1 表示了低频振动的两种最极端情况的 MTF 的计算方法, 最小的像移量发生在以振动周期的极值点为中心的曝光时间内, 其 MTF 近似等于 1。最大的像移量发生在以零点为中心的曝光时间内, 其传递函数可用线性运动的近似, 即  $f_{MTF} = |\text{sinc}(\pi f d_{\max})|$ , 如图 2 所示。因此由于曝光时刻具有随机性, 低频振动的 MTF 没有确定的解析表达式。

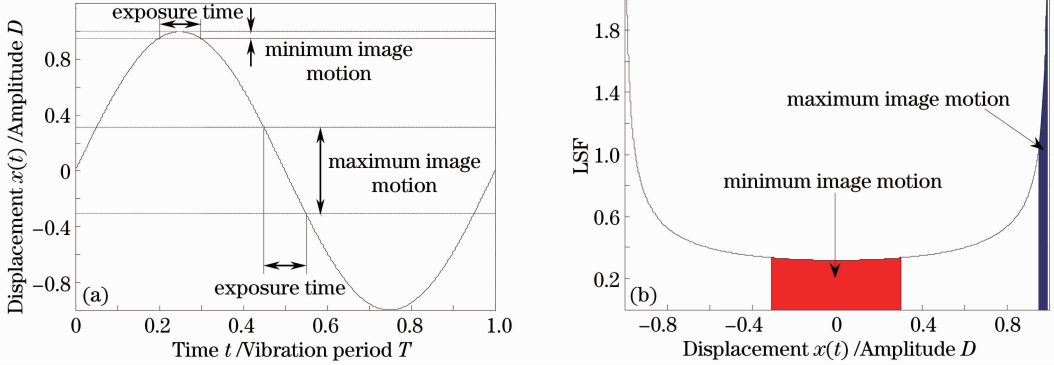


图 1 通过高频振动位移的概率密度函数计算低频振动的 LSF 和 MTF

Fig. 1 Calculation of line spread function (LSF) and modulation transfer function (MTF) for low-frequency vibrations based on the probability density function (PDF) of  $x(t)$  for high-frequency vibrations

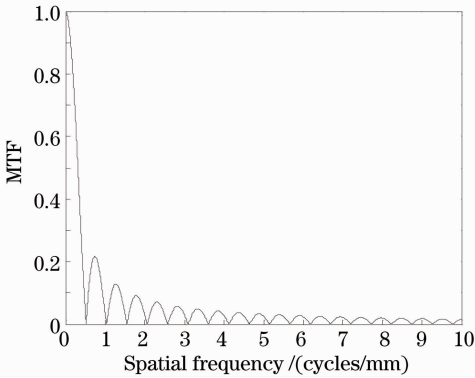


图 2 线性运动的动态传递函数  $f_{MTF}$

Fig. 2 Dynamic MTF for linear motion  $f_{MTF}$

3) 对高频振动的一般情况, 曝光时间不等于振动周期的整数倍, 这种情况前人的文献中基本很少提及, 但在实际情况中却是最常遇到的。此时  $t_e = nT_0 + \Delta t$ , 其中  $0 < \Delta t < T_0$ , 如图 3 所示, 概率密度函数等于整数个周期的概率密度函数与  $\Delta t$  时间内  $x(t)$  的概率密度函数的叠加, 即:

$$f_{LSF} = f_x(x) = \frac{nT_0}{t_e} \times \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - x^2}} + \frac{\Delta t}{t_e} \times f_{PDF_{\Delta t}}, \quad (5)$$

由于初始曝光时刻的随机性,  $\Delta t$  时间内  $x(t)$  的概率密度函数  $PDF_{\Delta t}$  具有随机性, 但由于  $\Delta t$  的概率密度函数在整个概率密度函数中只占一部分, 而且  $n$

越大, 比重越小。因此, 高频振动对成像的影响也具有一定的随机性, 但没有低频振动时那么明显, 而且当  $n$  越大时, 随机性越不明显, 此时动态传递函数可以用第一种情况近似。

基于以上讨论, 将以上三种情况总结概括, 正弦振动对成像的影响可以表述为: 当曝光时间等于振动周期的整数倍时 ( $t_e = nT_0$ ), 正弦振动对成像的影响是相同的, 有确定的 MTF 解析表达式; 当曝光时间不等于振动周期的整数倍时 ( $t_e = nT_0 + \Delta t$ , 其中  $0 < \Delta t < T_0$ ), 正弦振动对成像的影响具有随机性。  $n$  越大时, 随机性越不明显, 此时动态传递函数可以用第一种情况的近似。

### 3 实验设计

为了验证理论分析的正确性, 设计了如图 4 所示的验证实验。积分球照亮靶标, 光束经平行光管后变成平行光, 经快速反射镜折转后进入光学系统镜头, 由 (CMOS) 探测器接收光束成像。通过快速反射镜控制器控制快速反射镜按不同频率的正弦形式摆动, 模拟航空相机照相时正弦振动引起的像移。同时通过探测器控制器控制 CMOS 探测器连续曝光 (曝光时间设定为 20 ms), 采集 200 张图像, 实验装置如图 5 所示。

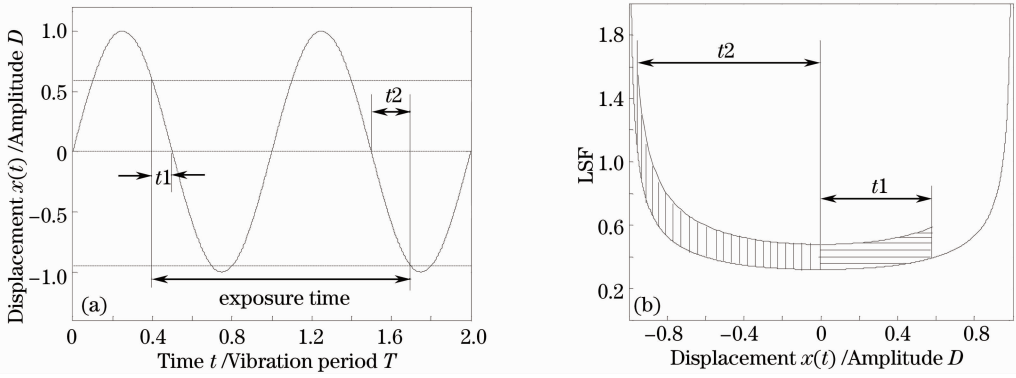


图 3 通过  $x(t)$  的概率密度函数计算曝光时间/振动周期=1.3 时高频振动的 LSF  
 Fig. 3 Calculation of LSF and MTF for high-frequency vibrations when exposure time/vibration cycle=1.3 based on the PDF of  $x(t)$

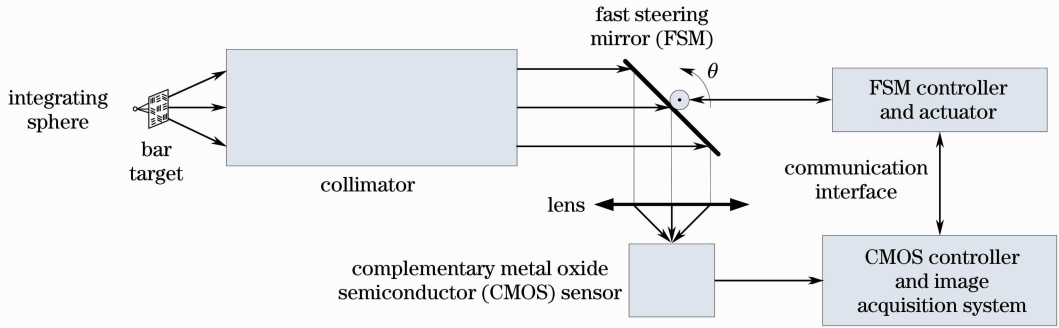


图 4 实验装置原理图  
 Fig. 4 Sketch of experimental setup

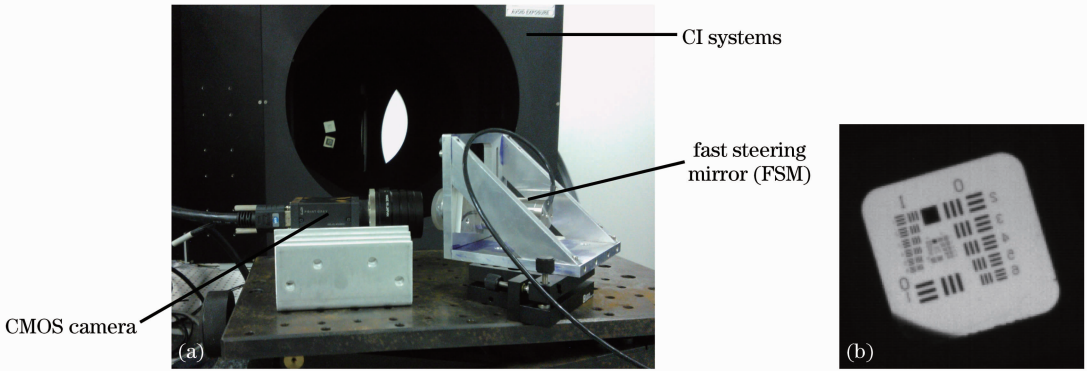


图 5 实验装置和静态靶标图像,其中 CI Systems 是包括靶标、积分球、平行光管的系统检测设备  
 Fig. 5 Experimental device and static drone image, in which CI Systems is a system testing equipment including bar target, integrating sphere and collimator

### 3.1 振动源的选择

航空相机在拍照时受到的正弦振动,有机械振动引起的,也有气流波动引起的,频率可从几十赫兹到几千赫兹不等。因此,模拟正弦振动的振动源要具有两个特点:1)带宽要高,也就是要能涵盖所有频率的正弦振动;2)精度要高,可以通过控制器和传感器实现高精度的闭环控制。

快速反射镜(FSM)一般用音圈电机或分辨率

达到纳米量级的压电陶瓷驱动器驱动,因此具有谐振频率高、转动惯量小、响应速度快、动态滞后误差小等优点。快速反射镜相对于一般反射镜的优点主要有两点:1)快速反射镜的带宽宽,响应速度快;2)快速反射镜的定位精度高,能够实现亚微弧度的定位。因此,选择快速反射镜作为振动源模拟航空相机受到的正弦振动,本实验使用的快速反射镜是由 PI 公司生产的 S-330.4SL 压电陶瓷快速反射镜,

闭环行程 5 mrad,空载谐振频率 3.3 kHz。为了保证实验的精度,使快速反射镜在频率范围 5~100 Hz 时,以振幅 0.5 mrad 做正弦摆动,模拟航空相机受到的正弦振动。本实验使用的 CMOS 相机焦距为 50 mm,像元尺寸 5.5  $\mu\text{m}$ ,则一整个正弦振动周期的像移量约为 18.2 pixel。

### 3.2 图像后处理

图 6 为航空相机受到的典型高频振动的 MTF 曲线,振幅逐渐增大,分别对应快速反射镜振幅为 0.3、0.4、0.5、0.6 mrad 的图像,图中虚线为高频信息和低频信息的分界线。虚线右侧部分对应图像的高频信息,高频部分的 MTF 曲线越高,对应的高频信息就越多,图像就越清晰,这就是传递函数的意义。在实际图像中振幅越小的图像包含的高频信息越多,对应图 6 中高频部分 0.3 mrad 的 MTF 曲线更高。因此通过小波变换提取序列图像的高频信息,高频信息的多少反映了 MTF 曲线的高低。与通过对矩形靶标成像计算 MTF 相比,图像高频信息的评价标准更为直观,更易获得,也更为可靠。

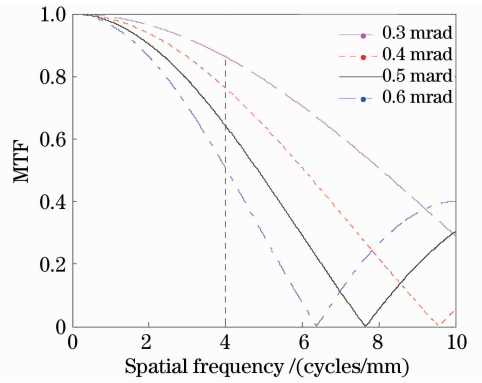


图 6 高频振动的动态传递函数  $f_{\text{MTF}}$

Fig. 6 Dynamic MTF for high-frequency vibration  $f_{\text{MTF}}$  动图像的高频信息进行统计,得到的图像的高频信息分布以及相应的 MTF 曲线。由图 8 和图 9 可以看出图像的高频信息波动很大,波动范围分别为  $0.6233 \times 10^4$  和  $0.2094 \times 10^4$ ,证明低频正弦振动对成像的影响具有随机性。由于相机初始曝光时刻的不确定性,可能得到图 7 中的图像(a)和(c)(对应以振动周期的极值点为中心的曝光时间,最小像移量),也有可能得到图 7 中的图像(b)和(d)(对应以零点为中心的曝光时间,最大像移量)。图 8 和图 9 中右图的 MTF 曲线,最大像移量和最小像移量的 MTF 差别很大,与图像的高频信息波动相吻合。

## 4 实验结果分析

图 8~图 12 是对各种频率下获得的 200 张振

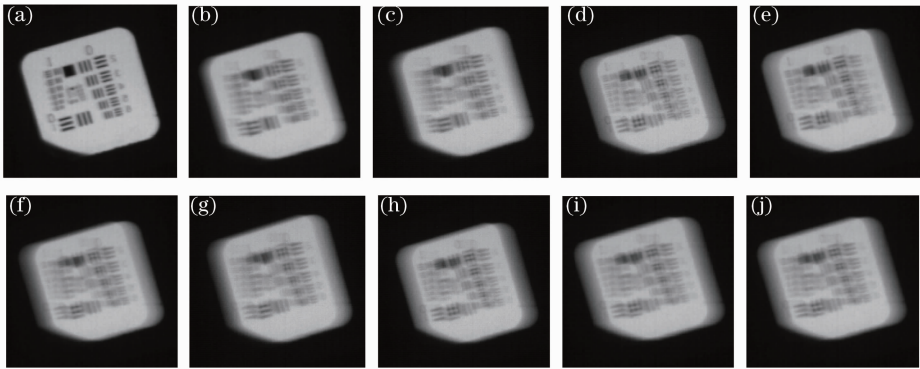


图 7 带振动的靶标图像。(a),(b)分别为曝光时间/振动周期=0.3 时最小像移与最大像移的图像;(c),(d)分别为曝光时间/振动周期=0.7 时最小像移与最大像移的图像;(e),(f)分别为曝光时间/振动周期=1.3 时最小像移与最大像移的图像;(g),(h)分别为曝光时间/振动周期=1.7 时最小像移与最大像移的图像;(i),(j)分别为曝光时间/振动周期=1.0 和 2.0 时的图像

Fig. 7 Diagrams of drones with vibrations. (a), (b) Are images for exposure time/vibration cycle = 0.3 with minimum image motion and maximum image motion; (c), (d) are images for exposure time/vibration cycle = 0.7 with minimum image motion and maximum image motion; (e), (f) are images for exposure time/vibration cycle = 1.3 with minimum image motion and maximum image motion; (g), (h) are images for exposure time/vibration cycle = 1.7 with minimum image motion and maximum image motion; (i), (j) are images for exposure time/vibration cycle = 1.0 and 2.0

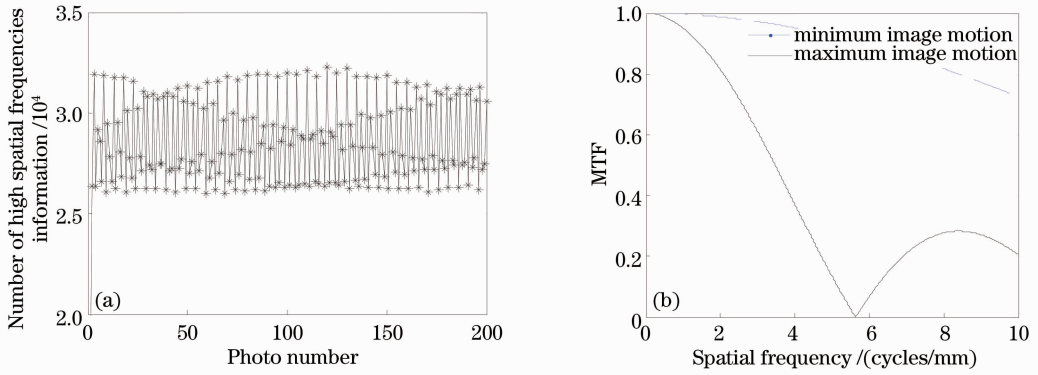


图 8 曝光时间/振动周期=0.3 时图像高频信息统计和 MTF 曲线

Fig. 8 High-frequency information statistics and MTF for exposure time/vibration cycle = 0.3

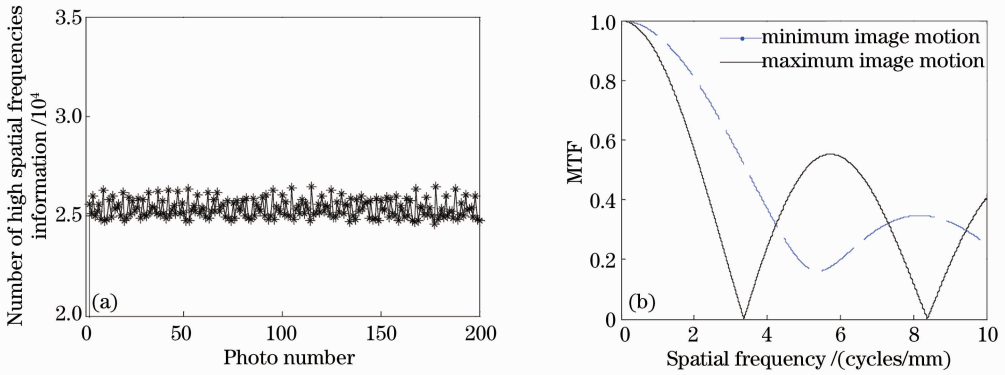


图 9 曝光时间/振动周期=0.7 时图像高频信息统计和 MTF 曲线

Fig. 9 High-frequency information statistics and MTF for exposure time/vibration cycle = 0.7

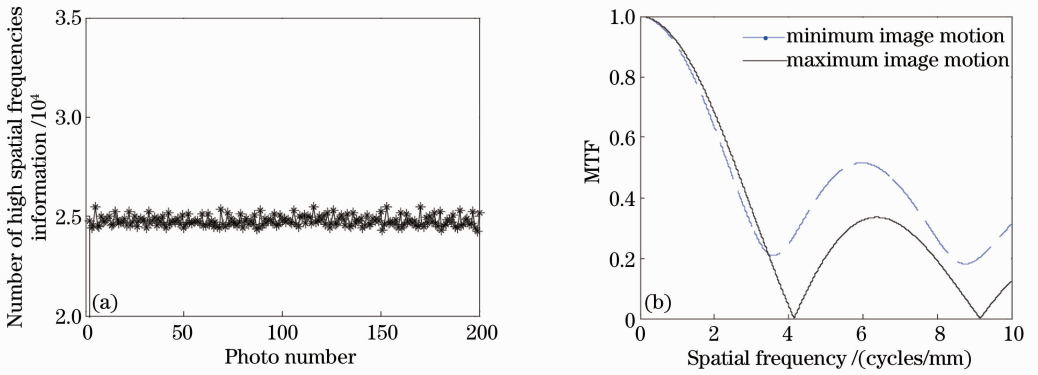


图 10 曝光时间/振动周期=1.3 时图像高频信息统计和 MTF 曲线

Fig. 10 High-frequency information statistics and MTF for exposure time/vibration cycle = 1.3

图 12 中当曝光时间/振动周期=1.0 和 2.0 时, 对应的高频信息的波动范围很小, 分别为  $0.0582 \times 10^4$  和  $0.0579 \times 10^4$ , 可以认为基本没有波动, 说明当曝光时间为振动周期的整数倍时[对应的图像分别为图 7 中的(i)和(j)], 高频正弦振动对成像的影响是相同的, 从反面证明了 MTF 有确定的解析表达式, 如图 6 所示。图 10 和图 11 对应高频正弦振动的一般情况, 即曝光时间与振动周期之间没有整数倍关系, 图像的高频信息也有波动, 波动范围分别

为  $0.1245 \times 10^4$  和  $0.0923 \times 10^4$ , 但与低频时相比波动性不明显, 从而证明了成像也具有一定随机性, 图 10 和图 11 中右图的 MTF 曲线, 最大像移量和最小像移量 MTF 曲线也说明了这一点。此外, 这点由得到的靶标图像也可以反映出来, 图 7 中的(e)和(f)、(g)和(h)的成像质量差别不大, 用肉眼很难辨别。

## 5 结 论

航空相机拍照时受到振动的影响, 分辨率明显

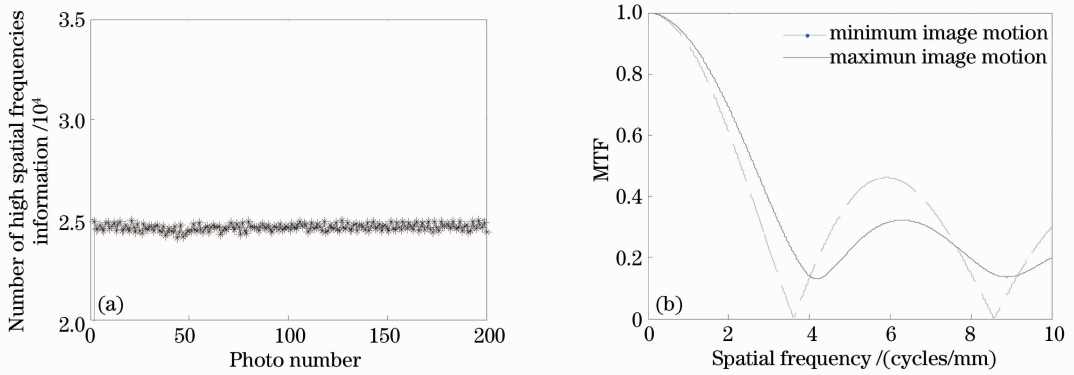


图 11 曝光时间/振动周期=1.7 时图像高频信息统计和 MTF 曲线

Fig. 11 High-frequency information statistics and MTF for exposure time/vibration cycle = 1.7

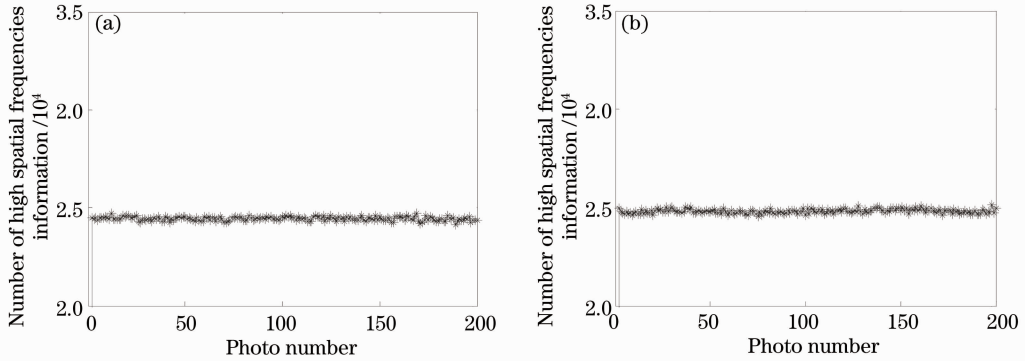


图 12 曝光时间/振动周期=1.0 和 2.0 时图像高频信息统计

Fig. 12 High-frequency information statistics for exposure time/vibration cycle = 1.0 and 2.0

下降。采用基于空间域的计算方法分析了正弦振动对航空相机成像的影响,以 MTF 作为评价标准,得出了具有普遍意义的一般性结论。通过快速反射镜模拟航空相机受到的正弦振动进行成像实验,使用小波变换提取图像的高频信息,通过 MTF 与高频信息的对应关系,验证了结论的正确性。该结论可用于航空相机光机结构设计时分析振动对调制传递函数的影响,也可以作为先验理论用于航空图像的去模糊。

参 考 文 献

- 1 R D Fiete. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras [M]. Bellingham: SPIE Press, 2010. 99-108.
- 2 O Hadar, M Fisher, N S Kopeika. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer function [J]. Opt Eng, 1992, 31(3): 581-589.
- 3 O Hadar, I Dror, N S Kopeika. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part I V: numerical calculation of optical transfer function and experiment verification [J]. Opt Eng, 1994, 33(4): 566-578.
- 4 A Stern, N S Kopeika. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion and vibrations using moments [J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14(2): 388-396.
- 5 A Friedenberg. Simulation of the MTF due to low-frequency and correlated vibrations [J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(3): 401-407.

- 6 Wang Zhile, Zhuang Xuxia, Zhang Lanqing. Numerical calculation and analysis of dynamic MTF [J]. Optical Technique, 2011, 37(5): 590-596.
- 王治乐, 庄绪霞, 张兰庆. 动态 MTF 的数值计算与分析 [J]. 光学技术, 2011, 37(5): 590-596.
- 7 R Vollmerhausen, M H Friedman, J Reynolds, et al.. Modeling the blur associated with vibration and motion [C]. SPIE, 2007, 6543: 65430U.
- 8 Xu Peng, Hao Qun, Huang Changning, et al.. Degradation of modulation transfer function in push-broom camera caused by mechanical vibration [J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35(7): 547-552.
- 9 Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 314-320.
- 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 314-320.
- 10 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.
- 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.
- 11 Liao Jingyu, Gao Xiaodong, Liang Wei. Dynamic MTF analysis and research for aerial camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 679-683.
- 廖靖宇, 高晓东, 梁伟. 航空相机动态调制传递函数分析与研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(5): 679-683.
- 12 Liang Jiong, Xu Tingfa, Shi Mingzhu, et al.. A parameter identification method of high frequency vibration model on TDI image [C]. SPIE, 2013, 9045: 90450X.

栏目编辑: 张浩佳