

## 载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真

李珂<sup>1</sup>, 王晓蕊<sup>1</sup>, 郭冰涛<sup>2</sup>, 刘虎<sup>2</sup>, 袁航<sup>1</sup>

- (1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 研究了载体平台振动条件下红外系统成像模糊效应模型, 实现了系统成像模糊效应动态仿真。依据红外系统成像原理及平台振动规律, 建立载体平台振动下红外系统成像模糊效应模型; 通过研究模糊效应纹理预生成及实时采样方法, 实现载体平台振动下系统成像模糊效应实时计算; 基于仿真结果定量分析了载体平台不同振动条件下, 红外系统成像质量退化程度。结果表明: 载体平台振动时, 振动振幅或振动频率增大都会导致红外系统成像质量严重退化; 而且观测距离越远, 载体平台振动对系统成像质量影响越明显。

**关键词:** 红外系统; 模糊效应; 平台振动; 纹理; 动态仿真; 成像质量

**中图分类号:** TN972    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0904004

## Dynamic simulation of infrared system imaging blur effect caused by carrier platform vibration

Li Ke<sup>1</sup>, Wang Xiaorui<sup>1</sup>, Guo Bingtao<sup>2</sup>, Liu Hu<sup>2</sup>, Yuan Hang<sup>1</sup>

- (1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The model of infrared system imaging blur effect caused by carrier platform vibration was studied. Considering the theory of infrared system imaging and the vibration regularity of carrier platform, the model of infrared system imaging blur effect caused by carrier platform vibration was established. The pre-generation method of the blur effect texture was studied, on the basis of which the real-time sampling method of the texture mentioned-above was built. Then the infrared system imaging blur effect was simulated dynamically. The degradation degree of the infrared system imaging quality under different vibration conditions was quantitatively analyzed. The results show that, the increase of carrier platform vibration amplitude or frequency would result in more serious degradation of the infrared system imaging quality; Furthermore, the farther the observation distance is, the worse the carrier platform vibration influence on the system imaging quality is.

**Key words:** infrared system; blur effect; platform vibration; texture; dynamic simulation; imaging quality

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-10

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2016208B001); 国家自然科学基金(61377007, 61575152, 61775174)

作者简介: 李珂(1993-), 女, 博士生, 主要从事光电成像系统设计与仿真方面的研究。Email: yika\_li@163.com

导师简介: 王晓蕊(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像系统工程优化设计、协同仿真、性能测试与评估等方面的研究。Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

## 0 引言

在实际工况下,红外成像系统武器装备(如制导武器、机载稳瞄系统、舰载跟踪系统等)往往会受到各种内外界因素干扰,如气流、质量不均匀、控制系统工作引起的颠簸、摇摆和晃动等。这些不同形式的干扰因素会引起载体平台(如光具座)振动、单次曝光时间内目标所成的像在红外系统焦平面上运动,从而导致目标成像细节不能被有效的分辨,系统成像质量下降<sup>[1]</sup>,严重影响系统探测识别、跟踪或精确瞄准性能。因此,开展载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真技术研究,可为系统作战任务性能预测提供数据支撑,为系统进一步改进方向提供理论依据。

纵观国内外公开文献,现有学者从多个方面开展了载体平台振动下红外系统成像模糊效应研究:(1)通过原始图像和载体平台振动的位移路径模拟载体平台振动后的图像,例如王晓燕提出了时间等分运动模糊图像的仿真方法<sup>[2]</sup>,唐秋艳提出了基于像移矩阵的等权时间图像退化方法<sup>[3]</sup>等;(2)研究不同振动形式对系统成像的影响,例如王婉婷在分析了视轴抖动的原因及特点的基础上,提出了按图像灰度算法分析振动模糊图像的方法<sup>[4]</sup>等;(3)搭建实验平台测量载体平台的振动特性,例如刘玉可等人设计了单质体振动实验平台<sup>[5]</sup>等;(4)结合成像系统探测器阵列的性能指标研究载体平台的振动对系统成像性能的影响,例如 Timothy R. tuinstra 提出了一个包括非全局运动的算法,将目标运动与背景运动分离<sup>[6]</sup>等。上述研究工作已经为载体平台振动下红外系统成像特性研究做出贡献,但是目前尚未实现红外系统成像模糊效应动态仿真。

针对上述不足之处,文中在研究载体平台振动下红外系统成像模糊效应时,首先,根据载体平台振动下红外系统成像模糊效应模型预计算载体平台不同振动条件下的点扩散函数;其次,把预计算得到的载体平台不同振动条件下的离散点扩散函数以纹理的形式保存下来,在仿真过程中,实时采样所需载体平台振动条件下的离散点扩散函数;最后,分析载体平台不同振动条件对系统成像模糊效应的影响,进一步分析载体平台振动对红外成像系统成像质量的影响。

## 1 载体平台振动下红外系统成像模糊效应建模

为实现载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真,有必要建立载体平台振动下红外系统成像模糊效应模型。任意形式振动都可以分解为若干正弦振动的叠加,因此文中重点研究载体平台正弦振动条件下红外系统成像模糊效应。

载体平台高频正弦振动时,将探测器单次曝光时间等分为  $N$  段(单个时间段远小于载体平台振动周期),则单个时间段内载体平台运动速度和方向变化可忽略不计,即单个时间段内载体平台振动都可近似为匀速直线运动,运动方向、速度由时刻点决定。

假设载体平台静止情况下输出图像为  $f(x, y)$ , 振动条件下输出图像为  $g(x, y)$ ,  $(x, y)$  表示成像系统像元位置。当载体平台做一种平面运动时,输出图像可表示为<sup>[7]</sup>:

$$g(x, y) = \int_0^T f(x-x_0(t), y-y_0(t)) dt \quad (1)$$

式中:  $x_0(t)$  和  $y_0(t)$  分别表示在  $t$  时刻,图像沿探测器水平和竖直方向上的运动像元变化分量。

当载体平台沿与探测器  $x$  轴夹角  $\theta$  方向做正弦振动时,将探测器单次曝光时间等分为  $N$  段( $t_0 \sim t_1, t_1 \sim t_2, \dots, t_{N-1} \sim t_N$ ),每个时间段内载体平台振动都近似为匀速直线运动。则在  $t_{i-1} \sim t_i$  时间段内,系统输出图像  $g_i(x, y)$  可表示为:

$$g_i(x, y) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} f\left(x - \frac{v_x \cos \theta}{d_w} t, y - \frac{v_y \sin \theta}{d_h} t\right) dt \quad (2)$$

$$v_i = A\omega \cos(\omega t_i + \phi_i) \quad (3)$$

式中:  $A$  表示载体平台振动角幅度;  $\omega$  表示振动角频率;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  表示振动频率;  $\phi_i$  为振动初始相位;  $d_w$  表示探测器像元宽度;  $d_h$  表示探测器像元高度。

公式(2)可变换成对  $t_{i-1} \sim t_i$  时间段内每个时刻图像扩散的距离进行离散求和,因为匀速直线运动速度不变,所以每个时刻图像扩散的距离相同,图像扩散一个像素数所需要的时间也是相等的,因此,将公式(2)根据图像扩散的像素数进行离散可得:

$$g_i(x, y) = \sum_{l=0}^{L_i-1} \sum_{k=0}^{K_i-1} f(x-k_i, y-l_i) \Delta t \quad (4)$$

式中:  $K_i$  为探测器单次曝光时间内第  $t_{i-1} \sim t_i$  时间段图

像在  $x$  方向上扩散的像素数;  $L_i$  为探测器单次曝光时间内第  $t_{i-1} \sim t_i$  时间段图像在  $y$  方向上扩散的像素数;  $\Delta t$  为图像扩散一个像素数所需要的时间。

从物理角度看, 因运动而产生的模糊图像实质上就是同一目标经过距离延迟后相叠加的效果, 并以图像的形式生成。所以要将一幅清晰的图像转变成因正弦振动而产生模糊的图像, 可以通过以下公式来实现:

$$g_i(x, y) = \frac{1}{L_i + K_i} \sum_{l_i=0}^{L_i-1} \sum_{k_i=0}^{K_i-1} f(x-k_i, y-l_i) \quad (5)$$

利用卷积运算表示正弦振动模糊模型如下:

$$g_i(x, y) = f_i(x, y) * h_i(x, y) \quad (6)$$

其中

$$h_i(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{L_i + K_i} & 0 \leq x \leq L_i - 1, 0 \leq y \leq K_i - 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $h_i(x, y)$  为点扩散函数。

以上是  $t_{i-1} \sim t_i$  时间段内目标图像因载体平台正

弦振动产生的模糊效果以及图像由清晰变模糊所用的点扩散函数。通过对单次曝光时间  $N$  个时间段的图像模糊效果累加, 可得到载体平台正弦振动条件下红外系统输出图像及点扩散函数:

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^N g_i(x, y) \quad (8)$$

$$h(x, y) = \sum_{i=1}^N h_i(x, y) \quad (9)$$

## 2 载体平台振动下红外系统成像动态模糊效应建模

### 2.1 红外系统成像动态模糊效应建模

为实现载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真, 文中结合上述红外系统成像模糊效应模型, 通过研究点扩散函数纹理预生成方法<sup>[8]</sup>, 实现红外系统成像动态仿真过程中系统模糊效应实时计算。具体实现流程如图 1 所示。

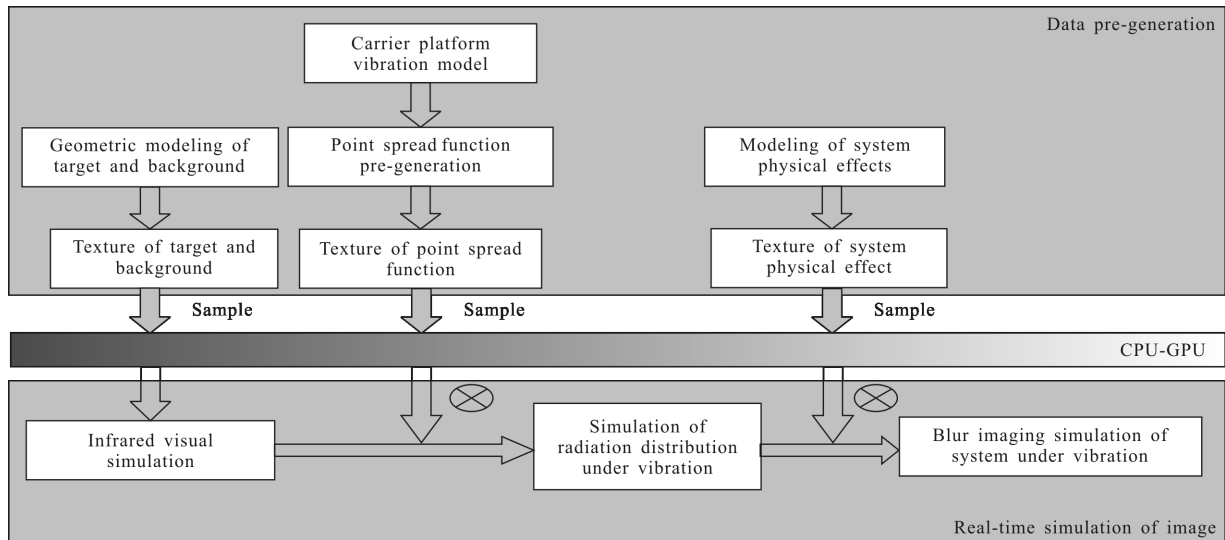


图 1 载体平台振动下红外系统成像动态仿真流程图

Fig.1 Flow chart for dynamic simulation of infrared system imaging caused by carrier platform vibration

首先, 通过对目标背景几何建模, 结合目标背景纹理数据构建红外视景仿真场景, 实现目标背景红外辐射特性实时计算。

其次, 利用载体平台振动下红外系统成像模糊效应模型计算不同振动条件下系统点扩散函数数据, 并生成点扩散函数纹理; 在系统仿真过程中, 根据载体平台振动条件, 通过实时采样点扩散函数纹

理<sup>[9]</sup>得到相应振动条件下点扩散函数, 并与无振动条件下红外视景仿真图像卷积, 计算得到载体平台振动下视景辐射能量在系统像面空间分布。

最后, 结合红外系统参数生成系统物理效应纹理; 在仿真过程中, 通过实时采样系统物理效应纹理数据, 实现载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真。

### 2.2 模糊效应纹理生成及实时采样

系统成像模糊效应模型与载体平台振动频率、幅度、方向以及系统曝光时间、像元尺寸等密切相关，直接利用该模型计算不同振动条件下系统成像结果，将涉及大量计算过程，严重影响系统成像仿真的实效性。因此，文中拟通过研究点扩散函数纹理生成方法，实现红外系统成像动态仿真过程中系统模糊效应实时计算。

根据系统成像模糊效应建模过程可知，特定振动条件下系统模糊效应模型输出主要包含系统像素位置(横坐标、纵坐标)、点扩散函数值等，如图 2 所示。图中， $h(i,j)$ 表示利用系统成像模糊效应模型计算像元  $(i,j)$ 位置成像灰度时  $(i,j)$ 位置的点扩散函数值。

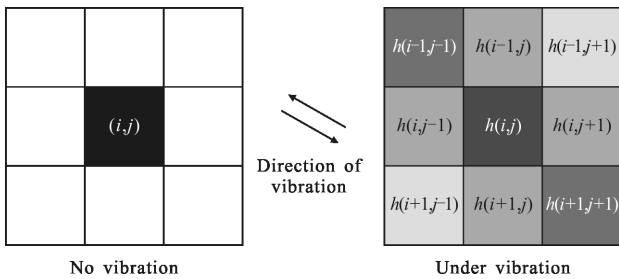


图 2 红外系统模糊效应模型输出

Fig.2 Output of the infrared system blur effect model

为建立点扩散函数纹理，文中通过建立不同振动条件下系统模糊效应模型，并依据模型计算结果生成点扩散函数纹理，如图 3 所示。假设纹理大小为

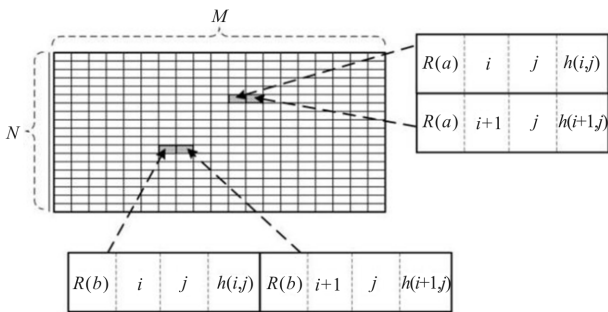


图 3 红外系统模糊纹理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the infrared system blur texture

$M \times N$ ，每个纹理单元包含 4 个通道，分别存储振动条件标识  $R$ 、相应振动条件下系统模糊效应模型输出像素位置(横坐标  $i$ 、纵坐标  $j$ )、像素位置  $(i,j)$ 对应的点扩散函数值  $h(i,j)$ 。其中，每一个振动条件对应一

个振动条件标识符  $R$ ，在存储红外系统模糊纹理过程中按照特定的规律把每一个振动条件下的点扩散函数信息逐行顺序存储。图中  $R(a)$ 、 $R(b)$ 分别表示两种不同振动条件下的振动条件标识。

为实现载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真，需要在系统仿真过程中，根据载体平台振动条件实时采样点扩散函数纹理，得到相应振动条件下的点扩散函数。具体流程如图 4 所示：首先，根据振动条件，按照红外系统模糊纹理生成规律确定该振动条件下的振动标识符  $R$ ，从而确定该振动条件下系统模糊效应模型计算结果在纹理中的存储位置；其次，根据纹理中的存储位置，依次提取纹理中存储的系统像素位置及点扩散函数值；最后，与无振动条件下红外系统成像仿真图像卷积，计算得到载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真。

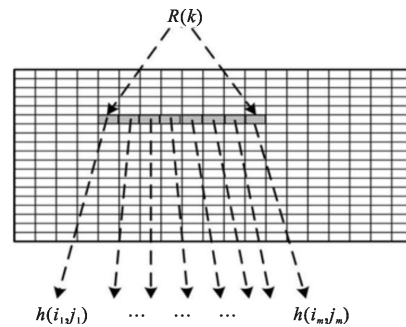


图 4 红外系统模糊纹理采样示意图

Fig.4 Schematic diagram of the infrared system blur texture sampling

### 3 仿真结果及分析

为了进一步研究载体平台振动对红外成像系统成像的模糊影响，文中根据上述载体平台振动下红外系统成像模糊效应模型，得到载体平台振动下点扩散函数，结合载体平台静止时红外系统成像仿真图像，获得载体平台相应振动条件下红外系统成像模糊图像，实现载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真，并基于仿真结果定量分析了载体平台振动对红外系统成像质量的影响。

红外成像系统参数设置如下：响应波段  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ，视场角  $8^\circ \times 6^\circ$ ，视口大小  $640 \times 512$ ，探测器单个曝光时间  $20 \text{ ms}$ ，探测元几何光敏面积  $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ ，光



学系统的  $f$  数  $F=1.6$ , 光学系统的光谱透过率  $\tau_0=0.9$ 。设置目标位置 (5 000, 200, -500 m), 探测器位置 (6 700, 500, 500 m)。考虑了探测器物理效应, 载体平台静止情况下红外成像系统仿真结果如图 5 所示, 图中白色方框放大部分表示红外成像系统中的目标。

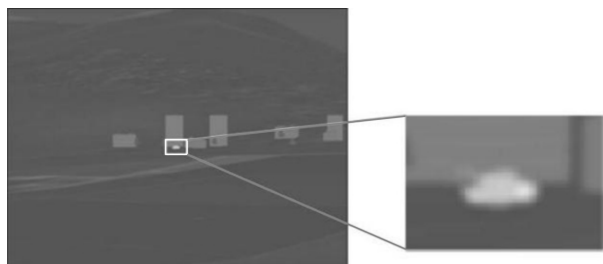


图 5 载体平台静止时系统仿真结果

Fig.5 Simulation results of carrier platform in static

### 3.1 载体平台振动影响红外系统成像质量仿真结果

为定量研究载体平台振动对红外系统成像质量的影响, 文中在载体平台静止情况下、红外成像系统仿真结果的基础上, 结合载体平台不同振动条件下的点扩散函数, 对载体平台振动后红外成像系统的成像质量进行了实时仿真。设置目标位置(5 000, 200, -500 m), 探测器位置(6 700, 500, 500 m), 考虑探测器物理效应, 载体平台不同振动条件下红外系统成像质量仿真结果如图 6 所示。图 6(a)~(c)表示载体平台振动振幅  $A$  为 0.01 mm, 振动频率分别为 5、10、15 Hz 时红外成像系统仿真结果; 图 6(d)~(f)表示载体平台振动振幅  $A$  为 0.02 mm, 振动频率分别为 5、10、15 Hz 时红外成像系统仿真结果。

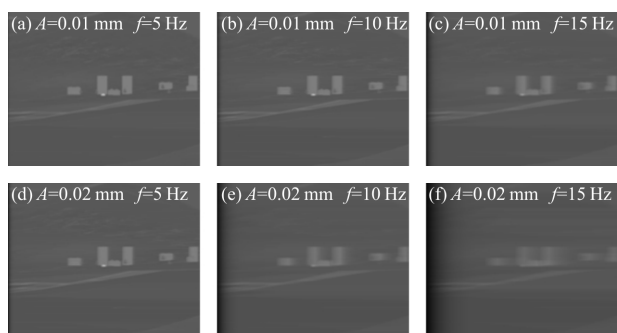


图 6 载体平台振动下红外成像系统仿真结果

Fig.6 Simulation results of infrared imaging system caused by carrier platform in vibration

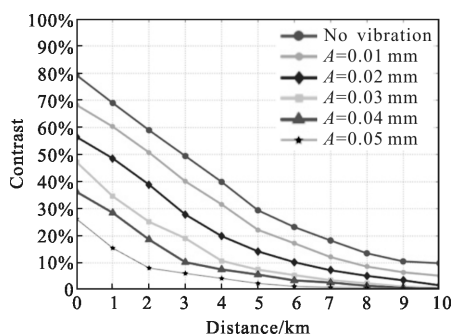
从仿真结果可以看出: 在载体平台静止情况下, 红外成像系统仿真输出图像无模糊效果; 在载体平

台振动条件下, 单次曝光时间内目标所成的像在红外系统焦平面上运动, 导致目标成像细节不能被有效地分辨; 在载体平台不同振动条件下, 红外成像系统仿真输出图像皆有明显模糊效果。载体平台振动振幅恒定振动频率变化时, 振动频率越大, 模糊效果越明显; 载体平台振动频率恒定振动振幅变化时, 振动振幅越大, 模糊效果越明显。

### 3.2 载体平台振动影响红外系统成像质量分析

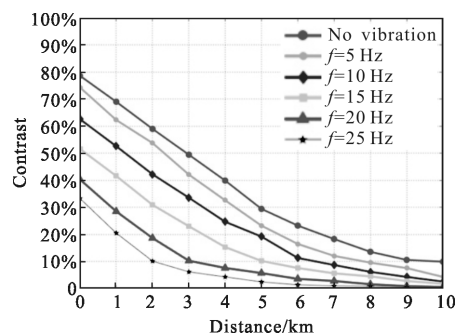
红外成像系统的成像质量可由目标与背景的对比如来反映。载体平台振动后目标和背景会产生模糊效果, 从而影响目标与背景的对比如; 另外, 当探测器与目标的距离变化时, 探测器的探测性能也会受到影响, 导致目标与背景的对比如发生变化。

为了进一步研究载体平台振动对红外系统成像质量的影响, 文中计算了不同距离处载体平台振动后目标与背景对比度的变化, 结果如图 7(a)和图 7(b)所示, 并进一步计算了目标与背景对比度衰减程度的变化, 结果如图 8(a)和图 8(b)所示。图 7(a)和图 8(a)分别表示载体平台振动频率  $f=5$  Hz、振动振幅分别



(a) 目标与背景对比度随振幅变化

(a) Change of contrast between target and scene with amplitude



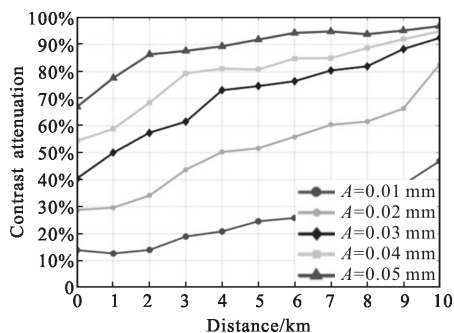
(b) 目标与背景对比度随频率变化

(b) Change of contrast between target and scene with frequency

图 7 目标与背景对比度的变化

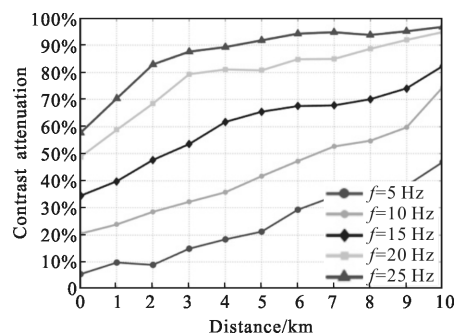
Fig.7 Change of contrast between target and scene

为  $A=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$  mm 情况下, 目标与背景的对比度以及对比度的衰减随探测器与目标的距离变化而变化的曲线图; 图 7(b) 和图 8(b) 分别表示载体平台振动振幅  $A=0.01$  mm、振动频率分别为  $f=5, 10, 15, 20, 25$  Hz 情况下, 目标与背景的对比度以及对比度的衰减随探测器与目标的距离变化而变化的曲线图。



(a) 目标与背景对比度衰减随振幅变化

(a) Attenuation change of contrast between target and scene with amplitude



(b) 目标与背景对比度衰减随频率变化

(b) Attenuation change of contrast between target and scene with frequency

图 8 目标与背景对比度衰减的变化

Fig.8 Attenuation change of contrast between target and scene

从计算结果可以看出:(1) 随着观测距离增大, 目标与背景对比度降低, 载体平台振动对系统成像质量影响越明显 (不考虑大气衰减的影响)。如观测距离 3 km、振动频率 5 Hz、振幅 0.01 mm 时, 系统成像对比度为 40.3%; 观测距离 8 km、振动频率 5 Hz、振幅 0.01 mm 时, 系统成像对比度为 10.1%;(2) 在相同探测距离的情况下, 载体平台在不同振动条件下振动, 无论振动振幅增加或者振动频率增大, 都会导致系统成像质量严重下降。如观测距离 5 km、振

动频率 25 Hz、振幅 0.01 mm 时, 系统成像对比度下降达到 90.8%。

## 4 结 论

文中通过建立载体平台振动下红外系统成像模糊效应模型、研究模糊效应纹理预生成及实时采样方法, 实现了载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真。在此基础上定量分析了载体平台振动对红外系统成像质量的影响。文中研究工作可为载体平台复杂振动条件下红外系统设计提供理论依据与数据支撑。

## 参考文献:

- [1] Wang Q, Tan L, Ma J, et al. A novel approach for simulating the optical misalign-ment caused by satellite platform vibration in the ground test of satellite optical communication systems [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (2): 1033-1045.
- [2] Wang Xiaoyan, Yan Jiqing, Tang Yi, et al. Simulation and analysis of high frequency sinusoidal vibration blurred image [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 346-350. (in Chinese)
- [3] Tang Qiuyan, Tang Yi, Wang Xiaoyan, et al. Synthetical imaging simulation of satellite vibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 803-810. (in Chinese)
- [4] Wang Wanting, Guo Jin, Jiang Zhenhua, et al. Study of image quality degraded by Los jitter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 1-9. (in Chinese)
- [5] Liu Yuke, Wang Fubin, Lv Jianying, et al. Design of vibration experiment platform and restoration of vibration blurred image [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017(1): 50-54. (in Chinese)
- [6] Tuinstra T R, Hardie R C. High resolution image reconstruction from digital video by exploitation of non-global motion [C]//Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference, 1998: 710209.
- [7] Xu Tingfa, Zhao Peng. Object' s translational speed measurement using motion blur information[J]. *Measurement*, 2010, 43(9): 1173-1179.
- [8] Lu Zhifeng, Gao Wen, Hong Zehua, et al. Research on dynamic real-time complicated scene generation technology [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(1): 76-81.
- [9] Huang Xi, Zhang Jianqi, Zhang Shaoze, et al. Realistic infrared image generation method of target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1084-1090. (in Chinese)