

文章编号 1004-924X(2016)06-1432-07

## TDICCD 相机平台振动所致的 MTF 空间移变降质

智喜洋, 张树青\*, 张 伟, 孙 晷, 傅 斌

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 卫星振动不仅会引起 TDI(Time Delay and Integration)CCD 相机像元采样的不规则性, 还会引起像元弥散斑空间分布的不一致性, 导致图像传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)产生空间变化, 从而制约高分辨率图像振动复原质量。本文从卫星振动对 TDICCD 相机推扫成像采样过程的作用机理出发, 结合理论推导与仿真研究, 得到了平台振动引起的图像空间移变降质及表征方法。然后在振动复原模型的基础上, 推导得出 MTF 空间移变降质对复原处理误差的影响, 并基于实际卫星图像开展了复原实验。实验结果表明: 当振动所致图像 MTF 空间移变降质小于 15% 时, 复原处理后的图像与理想图像的结构相似度优于 0.95, 而且处理误差所导致的图像失真不影响判读质量。

**关键词:** 卫星振动; TDICCD 相机; 复原质量; MTF 空间移变降质

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1432

### MTF space-variant blurring resulted from platform vibration of TDICCD camera

ZHI Xi-yang, ZHANG Shu-qing\*, ZHANG Wei, SUN Xuan, FU Bin

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: ciom.ac@163.com

**Abstract:** The satellite vibration could not only result in the irregularity of pixel sampling of TDI(Time Delay and Integration)CCD camera and the inconsistency of spatial distribution of pixel disc of confusion, but also could make the Modulation Transfer Function (MTF) of image generate space variation caused hereby. Consequently, the restoration quality by vibration of high-definition image may be limited. Starting with the action mechanism of satellite vibration on sampling process of push-scanning image by TDICCD camera and combined with theoretical derivation and simulation research, this paper obtained the blurring and characterization methods of space variance of image resulted from platform vibration. Then, based on restoration model of vibration, the influences of MTF space-variant blurring on restoration processing errors were deduced and obtained. In addition, according to the actual satellite image, the restoration experiment was carried out. The experimental results indicate that: when the MTF space-vibrant blurring of image is lower than 15%, because of vibration, the structural similarity between image which has been treated by restoration and ideal image may be superior to 0.95, and the image distortion caused by processing error may not impact interpretation quality.

**Key words:** satellite vibrations; TDICCD camera; image restoration quality; space-variant MTF

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-03-04.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 613210)

## 1 引言

卫星在轨运行期间,平台振动会引起相机光轴抖动,对于线阵推扫式TDICCD相机而言,光轴抖动在曝光时间内所致的像移不仅会引起相机像元采样的不规则性<sup>[1-5]</sup>,还会使像元弥散斑在推扫方向上的空间分布具有不一致性,具体体现为图像列间图像传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的空间移变性<sup>[6-7]</sup>,简记为MTFsv。这将影响相机的高分辨率成像能力。

受限于高精度姿态稳定控制、稳像和减振等技术的工艺水平,通常要结合图像复原的方法来消除振动引起的图像降质。在低频振动所致的非规则性几何降质以及高频振动所致的图像模糊复原方面已有很多算法<sup>[8-14]</sup>,但这些算法很少考虑低频振动所致的图像MTFsv及其对复原结果的影响,仍直接采用线性空不变模型进行图像模糊复原,这必然导致复原过程存在处理误差,体现为图像局部区域的过处理或欠处理,尽管对图像整体视觉效果影响不大,但很可能导致图像局部细节信息丢失或出现虚假信息,降低利用高分辨率图像进行目标判读的解译能力。

本文从卫星振动对图像质量的作用机理出发,结合理论推导与仿真研究,分析不同频率振动和振幅对图像质量的影响规律及表征方法;然后从振动复原模型出发,得出振动所致的MTFsv对复原质量的影响;最后开展了振动复原实验。

## 2 振动对图像质量的影响分析

卫星平台上的各种运动均会引起相机光轴指向的抖动,导致相机在积分成像过程中产生图像像移,从而影响TDICCD相机的成像质量。虽然该振动形式复杂,但通常可近似表示为若干正弦振动的叠加。根据正弦振动的周期与相机积分时间的关系又可将振动分为低频振动和高频振动。低频振动对图像质量的影响近似于线性运动,沿运动方向形成像移 $x$ 。

图1给出了 $x$ 与振动频率、振幅和初始相位的关系。图像列方向的振动引起的像移可表示

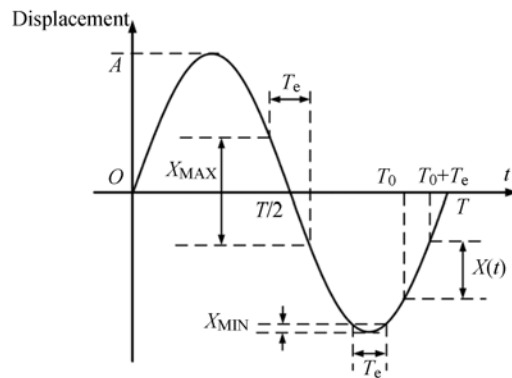


图1 像移与振动频率、振幅和初始相位的关系

Fig. 1 Relations between image shift and vibration frequency, amplitude and initial phase

为<sup>[15]</sup>:

$$x(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right), \quad (1)$$

式中, $A$ 为振幅, $T$ 为振动周期, $t$ 为卫星飞行时间, $\varphi_0$ 为初始相位。

TDICCD相机推扫成像采样过程中,图像各列不是同一时刻采样得到,而是由相机在不同成像时刻获得,因此图像各列像元对应的像移量可能存在着一定的差异。对于TDI多级采样过程而言,采样点的位置可用各个单级采样位置的平均值来表示,则单一频率振动引起的图像像移可表示为:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{k,i,j,n} &= \frac{1}{T_{es}} \int_0^{T_{es}} x_{k,i,j,n}(t) dt = \\ &= \frac{1}{T_{es}} \int_0^{T_{es}} A_k \sin\left(\frac{2\pi}{T_k} \cdot t + \varphi_{k,i,j,n}\right) dt = \\ &= \frac{A_k T_k}{2\pi T_{es}} \left[ \cos(\varphi_{k,i,j,n}) - \cos\left(\frac{2\pi}{T_k} \cdot T_{es} + \varphi_{k,i,j,n}\right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $x_{k,i,j,n}$ 为第 $n$ 级积分时间、第 $k$ 个振动成分对应的像移, $T_{es}$ 为单级积分时间, $A_k$ 、 $T_k$ 为第 $k$ 个振动成分的振幅和周期, $\varphi_{k,i,j,n}$ 为像面 $(i,j)$ 处对应第 $k$ 个振动成分和第 $n$ 级的振动相位, $(i,j)$ 为像元坐标。由于推扫成像中,行方向的像元运动状态一致,因此下文简记为 $j$ 。

卫星全频带振动引起的图像像移可表示成各个单一频率振动像移的叠加,即:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{j,n} &= \sum_k \bar{x}_{k,j,n} = \\ &= \sum_k \frac{A_k T_k}{2\pi T_{es}} \left[ \cos(\varphi_{k,j,n}) - \cos\left(\frac{2\pi}{T_k} \cdot T_{es} + \varphi_{k,j,n}\right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

进一步,将 TDICCD 各级像元采样信号进行叠加,得到:

$$\bar{x}_j = \sum_{n=j}^{j+N} \sum_k \bar{x}_{k,j,n} = \sum_{n=j}^{j+N} \sum_k \frac{A_k f_{es}}{2\pi f_k} \left[ \cos(\varphi_{k,j,n}) - \cos\left(\frac{2\pi}{f_{es}} \cdot f_k + \varphi_{k,j,n}\right) \right], \quad (4)$$

其中,  $f_{es}$  与  $f_k$  分别为  $T_{es}$  与  $T_k$  的倒数,即:相机探测器采样频率和第  $k$  个振动成分对应的频率。

由式(4)可见,相机成像积分时刻所对应振动相位  $\varphi_{k,j,n}$  的不同将造成图像各列间像移的不一致性。这种不一致程度又与振幅和  $f_v/f_e$  有关。

图 2 (a)~(c) 分别给出了在不同初始相位情况下,不同  $f_v/f_e$  下的 MTF 曲线。从图 1 中可见:振动频率较低时,不同相位对应的 MTF 存在较大的不同,这也表明:由低频振动引起的探测器像元采样位置的非规则性会导致图像的非规则性几何变形<sup>[2-3]</sup>,另外,还会引起各图像列对应像元弥散空间分布的不一致性,从而导致图像 MTF<sub>sv</sub>。随着频率的不断增大,相位对 MTF 的影响越来越小,不同相位的 MTF 曲线十分接近,这也表明高频振动的图像 MTF 是空间移不变的。

从图 2 (b)~(c) 可见,随着振动频率的增加,MTF 可能出现 0 值(O 点),文献[16-17]指出尽管 O 点空间频率以外对应的景物信息被采样至像面,但存在部分虚假信息,这将导致图像复原过程出现混叠、振铃等伪像,也是引起 MTF<sub>sv</sub> 的主要原因。为了量化描述,本文中定义了  $P_f$  指标:

$$P_f = \frac{|f_N - f_0|}{f_N} \times 100\% . \quad (5)$$

其中,  $f_N$  为奈奎斯特频率,  $f_0$  为 O 点对应的空间频率。显然,  $P_f$  能够表征振动所致的图像细节信息丢失与失真程度。该值越大,可能损失的景物细节信息越严重,复原处理后引入的伪像也越严重。

图 3 给出了原始遥感图像及  $A=2$  和  $f_v$  分别为  $0.1 f_e$ 、 $0.35 f_e$ 、 $4.23 f_e$  情况下的振动仿真降质图像。从图 3 (b)~(d) 可以看出:不同频率振动引起的图像降质规律是不同的,低频振动的影响主要体现为图像像元的整体平移,即图像的几何变形,而随着频率的增加,振动引起的图像降质

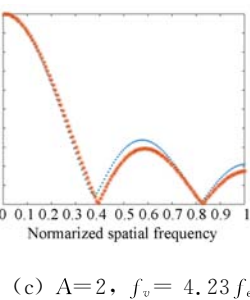
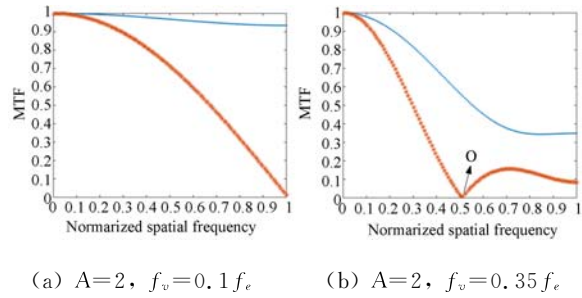


图 2 不同振动频率下的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curves of different vibration frequencies

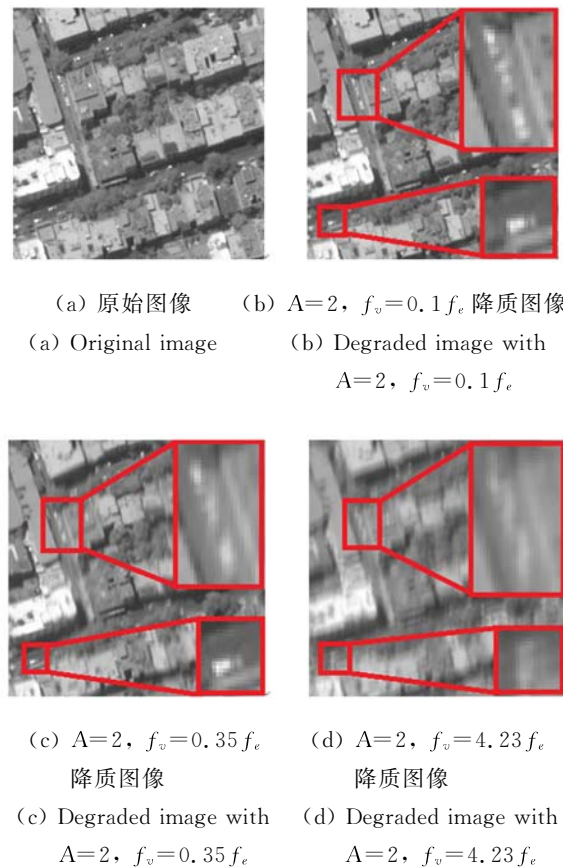


图 3 原始图像及不同振动频率的降质图像

Fig. 3 Original image and degraded images with different vibration frequencies

逐渐体现为图像像元弥散,即图像模糊。从图 3

(b)与(c)中不同图像列对应的目标车辆局部放大图可看出:低频振动时,像元弥散呈现出一定的不一致性,表现为图像模糊随空间而变化,即MTF的空间移变性。而从图3(d)中可看出:高频振动时,图像的像元弥散几乎是空间移不变的,这也与理论分析结果是一致的。

为了量化描述这种振动引起的MTF空间移变性,本文中定义了指标 $SV_{\text{area}}$ :

$$SV_{\text{area}} = \frac{|S_{\text{MTF}}^{\text{max}} - S_{\text{MTF}}^{\text{min}}|}{S_{\text{MTF}}^{\text{max}}} \times 100\%, \quad (6)$$

其中, $S_{\text{MTF}}^{\text{max}}$ 是图像各列MTF曲线中第一个极值点(O点或奈频点)距O点最远的MTF曲线的包络面积; $S_{\text{MTF}}^{\text{min}}$ 是对应极值点最近的MTF曲线的包络面积。显然, $SV_{\text{area}}$ 能够表征振动所致的图像列间MTF的空间移变性,该值越大,MTF空间移变性越大。

### 3 振动对复原处理的影响研究

#### 3.1 振动复原模型及方法

TDICCD卫星遥感图像退化模型描述如下<sup>[3]</sup>:

$$Z = S_A \cdot \hat{H} \cdot \hat{U} + N, \quad (7)$$

其中, $Z$ 表示遥感成像系统获取的像质退化图像, $\hat{U}$ 表示原始场景图像,即理想的无退化图像, $\hat{H}$ 表示遥感成像链路中大气环境、光学系统、探测器、成像电子学、卫星平台等各环节引起的模糊退化, $S_A$ 表示对原始场景图像 $\hat{U}$ 的非规则重采样,能够表征振动所致非规则采样引起的空间移变几何降质退化, $N$ 表示成像过程中引入的噪声。

图像复原问题即是对退化模型(式(7))的逆求解,可通过如下最小化问题的求解实现<sup>[18]</sup>:

$$\min_c \{ \|W_2 \cdot C\|^2 + \lambda \cdot \|W_1 \cdot (S_A \cdot H \cdot C - Z)\| \}, \quad (8)$$

其中 $W$ 为权重矩阵。

#### 3.2 复原处理误差及影响因素

从3.1节可见,现有振动复原算法能够处理低频振动引起的非规则性几何变形以及高频振动引起的图像模糊,但由于模型假定 $H$ 为线性空间移不变系统,因此无法处理低频振动所致MTF空间移变性引起的图像退化。 $H$ 的不适定性必然引入一定的处理误差。假设 $\hat{H}$ 的空间移变性为 $\Delta\hat{H}$ ,则:

$$Z = S \cdot (\hat{H} + \Delta\hat{H}) \cdot \hat{U}_\Delta + N, \quad (9)$$

即:

$$Z = S\hat{H}\hat{U}_\Delta + S\Delta\hat{H}\hat{U}_\Delta + N, \quad (10)$$

式中,第一项 $S\hat{H}\hat{U}_\Delta$ 与式(7)相同,误差项为 $S\Delta\hat{H}\hat{U}_\Delta$ 。

当MTF满足空间移不变时,式(7)是精确成立的,否则 $MTF_{SV}$ 将给复原过程带来处理误差,从 $S\Delta\hat{H}\hat{U}_\Delta$ 中的元素可知,该误差与 $MTF_{SV}$ 的大小密切相关,又与景物信息相互耦合。在复原过程中,耦合在 $S\Delta\hat{H}\hat{U}_\Delta$ 中的景物信息可能被误当做噪声项去抑制,造成景物高频信息损失的图像欠恢复;也可能被当作景物信息去恢复,当空不变系统所采用的MTF比实际系统低时就会造成景物中高频信息被过度增强的图像过恢复。此外,O点也将影响复原结果。O点以外的虚假信息也可能被当作景物信息去增强,从而导致复原后的图像边缘附近出现伪像。这均导致了采用现有振动降质复原算法进行处理时往往存在局部处理不适当的问题。

综上所述,振动所致 $P_f$ 和 $SV_{\text{area}}$ 的大小(即:图像 $MTF_{SV}$ )是影响复原处理性能的主要因素。另外,这些因素所致的处理误差不仅与景物之间相互耦合,而且误差间的关系又较为复杂,很难剥离场景因素对这些因素所致处理误差进行科学表征,因此仅利用后期处理的方法将它们完全消除是十分困难的,这就需要对平台振动造成的空间移变降质进行适当的设计与约束。

### 4 实验及结果分析

#### 4.1 振动降质图像仿真

本文利用式(4)和式(7)仿真不同振动频率、不同振幅条件下的标准场景退化图像。选择10幅标准场景,包含建筑物、机场、平原、靶标等地面景物结构。然后获取了经过几何精校正后的高分辨率卫星图像,并对原始图像进行了4倍欠采样,以消除原始图像中模糊的影响。标准场景图像样本如图4所示。为了更直观地观察振动复原处理引入的伪像效应,选择了包含特征靶标的遥感图像。

每幅模拟振幅 $A$ 在 $[0.5 \text{ pixel}, 2 \text{ pixel}]$ 之间,有6个水平,频率 $f_v/f_c$ 在 $[0.1, 4.5]$ 之间,15个水平,共900次试验。假定TDICCD积分级数为64级。通过将积分时间按TDI级数细分,

模拟卫星平台振动对图像不同列像元弥散不一致性的影响。

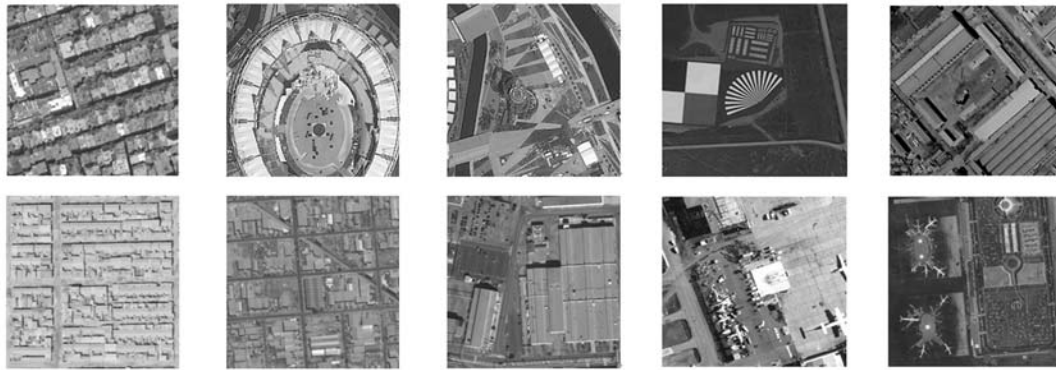


图 4 标准场景图像样本集

Fig. 4 Experiment images of standard landscapes

#### 4.2 复原质量的客观评价

考虑到结构相似度 (Structural Similarity, SSIM)<sup>[19]</sup> 是一种衡量两幅图像相似程度的全参考评价方法, 目前被国际公认并广泛使用。而且, 与传统的峰值信噪比和均方误差评价方法相比, SSIM 将图像的亮度、对比度和结构信息作为 3 个相互独立的评价标准进行比较, 能够更全面地反映复原算法的处理效果。

MTF<sub>SV</sub> 可能导致复原图像的亮度、对比度和结构信息的失真;  $P_f$  可能导致复原图像边缘附近出现虚假信息, 其可由结构信息的失真程度来反映。因此, 在复原算法实验中, 本文采用复原后图像与理想图像的 SSIM 作为客观指标, 并结合主观视觉对复原后的图像失真进行评价, 对比分析复原方法在不同场景对象与振动降质条件下的复原结果。

下面第 4.3 节将以复原后图像与理想图像的 SSIM > 0.95 为应用约束, 分析复原算法对振幅及振动所致 MTF 空间移变性的耐受程度。

#### 4.3 复原实验及结果分析

表 1 列出了几组典型振动频率、振幅条件下的仿真降质图像  $P_f$ 、 $SV_{area}$  及复原后图像与理想图像的 SSIM 指标、主观视觉效果的关系量表。图 5 给出了相应的复原结果。

鉴于像质提升的实际应用需求, 结合表 1 和图 5 可得出:

1) 对于各种频率的振动, 振幅较大时, 振动复原质量均较差。为了保证振动复原质量, 需要将振幅控制在 1 pixel 以内;

表 1 图像复原实验结果

Tab. 1 Experimental results of image restoration

序号	平台振动		MTF 指标		SSIM 指标		主观视觉
	频率	振幅	$P_f$	SV	复原前	复原后	
	$f_v/f_c$	/像素	/%	/%			
1	0.1	0.5	—	—	0.94	0.99	—
2	0.1	1	无	—	0.89	0.98	—
3	0.1	1.5		18	0.80	0.96	出现伪像
4	0.1	2		29	0.70	0.95	明显伪像
5	0.25	0.5	无	13	0.93	0.97	—
6	0.25	1		15	0.90	0.98	—
7	0.25	1.5	19	28	0.85	0.94	明显伪像
8	0.25	2	26	42	0.79	0.90	明显伪像
9	0.35	0.5	无	11	0.91	0.99	—
10	0.35	1	无	29	0.92	0.93	明显伪像
11	0.35	1.5	17	37	0.87	0.90	明显伪像
12	0.35	2	28	41	0.80	0.79	明显伪像
13	4.23	0.5	无	2.3	0.93	0.99	—
14	4.23	1	21	2.4	0.89	0.94	出现伪像
15	4.23	1.5	32	3.2	0.88	0.92	出现伪像

2) 低频与高频振动图像的复原质量较理想 (如图 5(a) 和 (d) 所示), 但从图 5(b) 和 (c) 中正方形靶标的刃边区域和扇形靶标的边缘外侧区域可以看出: 低频到中、高频过度处的复原质量欠佳, 复原图像中出现了明显振铃效应等图像失真;

3) 高频振动时,  $SV_{area}$  较小, 振动所致  $P_f$  是制约复原质量的主要因素, 当振动降质所致  $P_f$  小于 20% 时, 复原处理误差所致的图像失真对图像判读质量的影响很小;

4) 低频振动时,  $P_f$  较小, 振动所致  $SV_{area}$  是制约复原质量的主要因素。当振幅控制在 1 个像

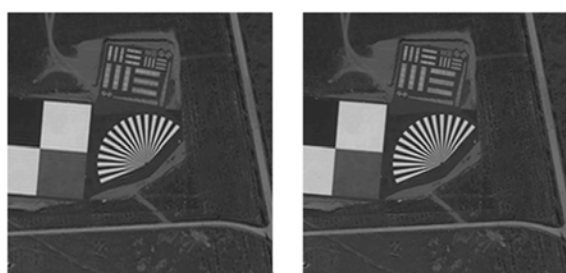
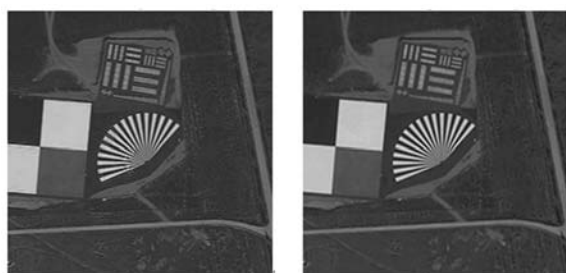
(a)  $A=1, f_v=0.1f_e$ (b)  $A=1, f_v=0.25f_e$ (c)  $A=1, f_v=0.35f_e$ (d)  $A=1, f_v=4.23f_e$ 

图5 不同频率振动降质图像的复原结果

Fig. 5 Restored results of degraded images with different vibration frequencies

## 参考文献:

- [1] RINGABY E, FRIMAN O, FORSSÉN P E, *et al.*. Anisotropic scattered data interpolation for pushbroom image rectification [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(5): 2302-2314.
- [2] STERN A, KOPEIKA N S. Optical transfer function analysis of images blurred by non-harmonic vibrations characterized by their power spectrum density [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, 16(9): 2200-2208.
- [3] 智喜洋, 张伟, 李立源, 等. 卫星振动引起的非规则采样降质图像复原方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(9): 9-14.  
ZHI X Y, ZHANG W, LI L Y, *et al.*. Restoration of irregularly sampled image degradation due to satellite vibrations[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(9): 9-14.
- [4] ZHI X Y, HOU Q Y, SUN X, *et al.*. Degradation and restoration of high resolution TDICCD imagery due to satellite vibrations[C]. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014; International Society for Optics and Photonics*, 2014: 93012I-1-93012I-8.
- [5] 姜博, 葛明锋, 刘敏, 等. 面阵航空相机的图像稳定技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3467-3473.  
JIANG B, GE M F, LIU M, *et al.*. Research on image stabilization technology of area-array aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3467-3473.
- [6] 智喜洋, 张伟, 侯晴宇, 等. 基于空不变图像复原的光学遥感成像系统优化[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1490-1497.  
ZHI X Y, ZHANG W, HOU Q Y, *et al.*. Optimization for optical remote sensing imaging system based on space-invariant image restoration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1490-1497.
- [7] 吕恒毅, 李祥之, 韩诚山, 等. 遥感相机静态调制传递函数的地面测试原理[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(5): 851-856.  
LV H Y, LI X ZH, HAN CH SH, *et al.*. Principle of static modulation transfer function measurement for remote sensing cameras[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 851-856.
- [8] YANG H L, HUANG P H, LAI S H. A novel gradient attenuation Richardson-Lucy algorithm for

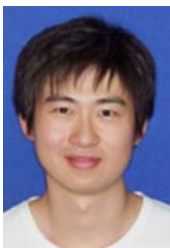
元以内,振动降质所致  $MTF_{SV}$  小于 15% 时,可通过复原处理实现复原后图像与理想图像的  $SSIM > 0.95$ ,且处理误差所致的图像失真不影响判读质量。

## 5 结论

本文从 TDICCD 相机平台振动对图像质量的作用机理出发,结合理论推导与仿真分析找出平台振动所引起的图像的 MTF 空间移变降质及表征方法,进而基于振动复原模型分析得出 MTF 空间移变性对图像复原质量的影响。最后通过开展振动复原实验,得出:为了保证振动复原质量,需要将振幅控制在 1 pixel 以内,并以复原后图像与理想图像的  $SSIM$  优于 0.95,且复原处理误差所致的图像失真不影响判读质量为应用需求,分析出振动所致的图像 MTF 空间移变降质应小于 15%。

- image motion deblurring[J]. *Signal Processing*, 2014, 103:399-414.
- [9] HAGSHENAS J. Effects of satellite platform's vibrations on the image quality of a remote sensing payload: system level design and challenges[C]. *SPIE Optical Systems Design-International Society for Optics and Photonics*, 2015, 96262P.1-14.
- [10] GRÖCHENIG K, STROHMER T. *Numerical and Theoretical Aspects of Nonuniform Sampling of Band-Limited Images*[M]. Nonuniform Sampling, Springer US, 2001: 283-324.
- [11] CHEN H C, WANG W J. Locally edge-adapted distance for image interpolation based on genetic fuzzy system [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 288-297.
- [12] 孟伟, 金龙旭, 李国宁, 等. 调制传递函数在遥感图像复原中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1690-1696.
- MENG W, JIN L X, LI G N, *et al.*. Application of MTF in remote sensing image restoration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1690-1696.
- [13] VAZQUEZ C, DUBOIS E, KONRAD J. Reconstruction of nonuniformly sampled images in spline spaces[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(6): 713-725.
- [14] 付天骄, 张立国, 王文华, 等. 空间相机图像复原的实时处理[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(4): 1122-1130.
- FU T J, ZHANG L G, WANG W H, *et al.*. Real-time processing of image restoration for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1122-1130.
- [15] HOLST G C. *Electro-optical Imaging System Performance*[M]. Washington: Winter Park, Florida and SPIE press, 2003.
- [16] WULICH D, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations[J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(6): 529-533.
- [17] 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, 21(3):581-589.
- [18] CHAMBOLLE A. An algorithm for total variation minimization and applications[J]. *Math. Imaging Vision*, 2004, 20: 89-97.
- [19] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

#### 作者简介:



智喜洋(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,硕士生导师,2012年哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光学遥感信息获取与处理、空间目标探测识别等方面的研究。E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)