

文章编号 1004-924X(2016)增-0632-08

## 基于振动测量的卫星图像复原及要求

智喜洋<sup>1</sup>, 胡建明<sup>1\*</sup>, 李文峰<sup>2</sup>, 孔祥龙<sup>2</sup>, 孙 暄<sup>1</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

**摘要:**针对卫星振动所致 TDICCD 相机图像降质复原的实际应用问题,研究了基于振动测量信息的卫星图像复原方法及其对振动指标要求。首先从卫星振动对图像质量的影响机理出发,给出了振动降质图像的退化规律以及基于振动测量信息的图像复原方法和参数解算方法;然后分析得出了在不同的振动频率、振幅、TDI 级数组合条件下,振动测量误差对图像复原质量的影响规律;最后,通过开展振动复原实验,得出了振动测量误差对图像复原影响的定量关系。实验结果表明:当测量误差小于 0.05 pixel 时,复原后的图像能够满足 SSIM 优于 0.9,几何畸变小于 0.1 pixel 的实际应用需求。为了保证图像复原质量,建议实际应用中超过 150 Hz 的振动进行隔振。

**关键词:**卫星振动降质;图像复原;振动测量;指标要求

**中图分类号:**TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0632

## Satellite image restoration based on measured vibration information and requirements

ZHI Xi-yang<sup>1</sup>, HU Jian-ming<sup>1\*</sup>, LI Wen-feng<sup>2</sup>, KONG Xiang-long<sup>2</sup>, SUN Xuan<sup>1</sup>

- (1. *Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*
  2. *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China*)
- \* *Corresponding author, E-mail: hjm1007491571@163.com*

**Abstract:** Aiming at the practical application problem of restoration for degraded image owing to satellite vibrations, a restoration method based on measured vibration information and the specification requirements were proposed. Firstly, effects of vibrations on image quality were analyzed based on imaging physical-process of TDICCD push-broom system. Then the methods of image restoration and corresponding parameter calculation were presented. Secondly, influence law of vibration measurement error on restored image quality were discussed in the cases of different vibration frequencies, amplitudes and TDIs. Finally, the quantitative relation between the measurement error and restoration performance was established by experiments. Experimental results indicate that the restored images can satisfy the practical requirement that SSIM is higher than 0.9 and geometric distortion is less than 0.1, when the measurement error should be less than 0.05 pixel, and vibrations with frequencies over 150 Hz should be isolated.

收稿日期:2016-05-31;修订日期:2016-06-03.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(91538201)

**Key words:** Satellite vibration degradation; image restoration; vibration measurement; specification requirements

### 1 引言

卫星在轨运行期间,指向控制、姿态调整和帆板运动所导致的各种平台振动会引起相机光轴抖动,特别是对 TDICCD (Time Delay Integration Charge-coupled Device) 相机而言,不仅会引起图像的模糊,而且还会造成探测器像元采样的非规则性,从而导致图像出现非规则性几何畸变<sup>[1-4]</sup>,这将严重影响相机的高分辨率成像和高精度测绘能力。

目前,针对振动所致的非规则采样遥感图像复原方法很多<sup>[5-7]</sup>,一些方法同时具备处理模糊和非规则性几何畸变的能力。但从实际在轨应用角度出发,通常需要引入振动测量信息作为复原算法的输入参数,目前的方法很少综合考虑振动频率对振动测量的影响及分析测量误差对复原结果的影响,目前尚未结合地面图像处理能力提出振动指标要求。

本文针对卫星振动降质图像复原的实际应用问题,分析振动对 TDICCD 相机图像质量的影响规律及振动降质复原处理所需的振动测量信息。在此基础上研究了振动测量误差对图像复原质量的影响,并通过开展振动图像复原实验,给出振动测量误差、振动频率、TDI 级数对图像复原影响的定量关系,从而能够依据图像复原结果提出科学的振动指标建议。

### 2 振动对 TDICCD 相机图像质量的影响

卫星振动对 TDICCD 相机图像质量的影响体现为相机在 TDI 多级积分时间内对景物成像过程中产生的像移。以垂直推扫方向为例,假设像移为  $\epsilon(t)$ ,则振动导致的线扩散函数 LSF 可表示为  $\delta(x - \epsilon(t))$ ,其中,  $\delta(x)$  为狄拉克函数。则在积分时间  $t_e$  内 LSF 可表示为:

$$LSF(x) = h(x) * \frac{1}{t_e} \int_{t_0}^{t_0+t_e} \delta(x - \epsilon(t)) dt, \tag{1}$$

式中  $t_0$  为初始曝光时刻。

由于卷积运算性质,LSF(x) 在  $x$  方向上扩展宽度增大,即对应的弥散斑变大,主要体现为图像的模糊降质。若 LSF 中心位置与  $h(x)$  不重合或者不是对称的( $h(x)$  通常是对称函数),则 LSF 的几何位置也会发生改变,主要体现为图像的几何降质(如图 1 所示)。为更直观地说明不同振动条件对图像质量的影响规律,图 2 和图 3 分别给出了振幅为 2 pixel、TDI 级数为 4、振动频率  $f_v$  与单级采样频率  $f_s$  比值分别为 4 和 0.25 以及振动频率相同、TDI 级数分别为 1 和 48 情况下的振动降质图像。从图中可见:不同振动频率、TDI 级数对图像质量的影响规律不同。高频振动的影响主要体现为图像模糊;而低频振动的影响主要体现为非规则性几何畸变。随着 TDI 级数的增加,振动对图像几何降质的影响变小,但图像模糊程度逐渐增加。

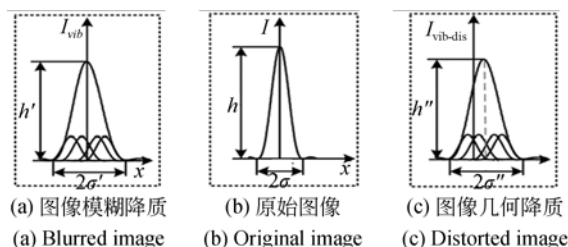


图 1 振动对图像质量的影响机理示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of image degradation owing to vibrations

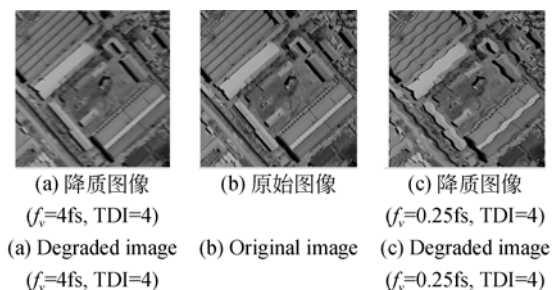


图 2 原始图像及不同振动频率的降质图像  
Fig. 2 Original image and degraded images with different vibration frequencies

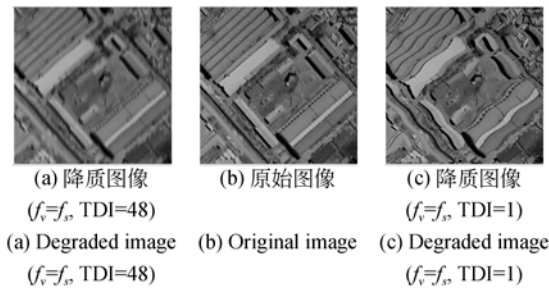


图 3 原始图像及不同 TDI 级数、相同振动频率的降质图像

Fig. 3 Original image and degraded images with different TDIs and in same vibration frequency

### 3 基于振动测量信息的降质图像复原方法

一般情况下,卫星振动所致的图像质量退化过程<sup>[8-9]</sup>可描述为:

$$g = LH u + n, \quad (2)$$

式中,  $u$  表示原始场景图像,即理想的无退化图像;  $g$  表示观测图像,即非规则采样降质的退化图像;  $L$  表示振动所致非规则采样引起的几何降质退化,通常采用空域或频域插值矩阵进行描述;  $H$  表示遥感成像链路中大气环境、光学系统、卫星平台等各环节引起的图像模糊降质退化,  $n$  表示成像过程中引入的噪声,通常假定为高斯白噪声。

振动降质图像复原即是利用退化图像  $g$  及几何畸变参数  $L$  和光学传递函数  $H$  估计原始场景图像  $u$  的过程。针对式(2)逆求解过程的病态性,通过基于全变分正则化的方法构建图像复原的正则化模型:

$$J(u) = \frac{1}{2} \| \mathbf{W}(LHu - g) \|_{2(\Lambda)}^2 + \tau J_d(u), \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{W}$  为加权矩阵,  $l$  为非规则采样过程中插值算法的插值基函数,  $\Lambda$  为非规则采样点位置集合,  $\tau$  为全变分正则化参数,  $J_d(u)$  为全变分  $J_d(u) = \int_{\Omega} |\nabla u|$  的离散化形式。

由于  $\| \mathbf{W}(LHu - g) \|_{2(\Lambda)}^2$  和  $J_d(u)$  均为凸函数,因此所构成的能量函数  $J(u)$  同样为凸函数,故上述函数必然存在唯一的最小值。求解  $u$  可通过最小化式(3)<sup>[10]</sup>得到:

$$u = \underset{u}{\operatorname{argmin}} J(u), \quad (4)$$

基于振动测量的图像复原即是首先利用卫星在轨实测的振动信息解算出  $L$  和  $H$ ,再利用  $L$  和  $H$  估计原始场景图像  $u$ 。显然,当振动测量产生的误差过大时很可能会超出图像复原处理的应用边界。下面首先结合实际应用,给出利用在轨测量的振动像移信息解算几何畸变参数  $L$  和 OTF 参数  $H$  的方法,再分析测量误差导致的  $L$  和  $H$  的解算误差对最终复原质量的影响。

#### (1) $L$ 解算方法

在给定积分时间内,振动产生的像移会导致图像中景物目标点的像素位置偏移,其总偏移量可表示为各时刻像移的平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} x(t) dt, \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} y(t) dt, \quad (6)$$

式中,  $x(t)$  和  $y(t)$  分别表示积分时间内,振动在  $x$  与  $y$  方向产生的像移,  $t_e$  表示积分时间。

由于 TDICCD 水平推扫工作方式下,图像各列的振动像移有所不同,因此表现为图像的非规则性几何畸变。

#### (2) $H$ 解算方法

假设理想成像系统的点扩散函数为  $\delta(X)$ , 振动所致的像移为  $x = x(t)$ , 则任意时刻点扩散函数可表示为  $\delta(x - x(t))$ , 对其进行傅里叶变换得到光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF):

$$\text{OTF}(t, f) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(X - x(t)) \exp(-j2\pi f X) dX =, \quad (7)$$

$$\exp[-j2\pi f x(t)]$$

式中  $f$  为空间频率。

振动在整个积分时间内的 OTF 可表示为各时刻 OTF 叠加的平均值:

$$\text{OTF}(f) = \frac{1}{t_e} \int_{t_0}^{t_0+t_e} \exp[-j2\pi f x(t)] dt, \quad (8)$$

为了实现离散化的数值计算,本文将  $[t_0, t_0 + t_e]$  平均分成  $N$  个时间单元,当  $N$  足够大时,OTF 计算公式可表达为:

$$\text{OTF}(t_0, f) = \frac{1}{t_e} \sum_{n=1}^N \exp[-j2\pi f x(t_n)] - \frac{t_e}{N} =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp[-j2\pi f x(t_n)] \quad (9)$$

式中  $t_n$  为细化的时间单元。

### 4 振动测量误差对复原质量的影响

卫星在轨运行过程中可采用陀螺仪或角度传感器实现振动像移信息的在轨测量。但受到现有工艺水平限制,测量速度和精度均有限,这将导致测量过程存在误差<sup>[11-16]</sup>。下面将分析测量误差对  $L$  和  $H$  的影响。

首先设定振幅  $A$  为 1 pixel、频率  $f$  为 100 Hz、TDI 级数为 4,图 4 给出了像移测量误差为 0.05 pixel 时,测量误差对 MTF 和几何畸变参数解算误差的影响。由于此时卫星的振动频率相对探测器的采样频率处于低频状态,振动对图像质量的影响主要体现为非规则几何畸变。从图 4 (b)中可见:几何畸变参数解算误差的峰值与测振误差的量级基本相同。从图 5 中基于真实参数和测量参数的振动降质图像复原结果可看出,当振动像移的测量误差为 0.05 pixel 时,复原算法仍能够较好地恢复图像。

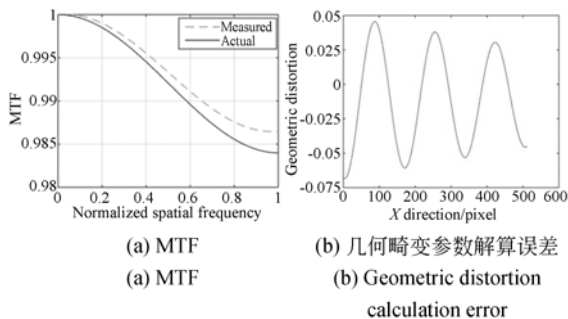


图 4 真实参数与测量参数的解算结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results based on actual parameters and measured ones with measurement error of 0.05 pixel

图 6 给出了同样条件下,测量误差为 0.5 pixel 时,真实像移解算 MTF 和几何畸变量与基于测量值解算结果。从图中可见,此时二者解算误差均较大。从图 7 中基于真实参数和测量参数的振动降质复原结果的对比也可看出:测量误差对图像复原性能影响较大,基于测量参数复原的图像边缘附近出现十分严重的锯齿效应,这将严重影响人眼对目标景物的主观解译能力。

此外,受到振动测量速度的限制,随着振动频

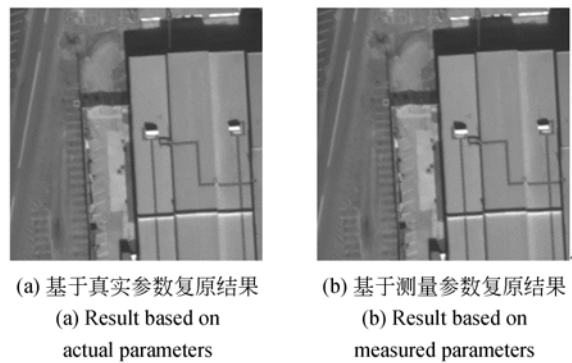


图 5 基于真实参数与测量参数的图像复原结果  
Fig. 5 Image restoration results based on actual parameters and measured ones with measurement error of 0.05 pixel

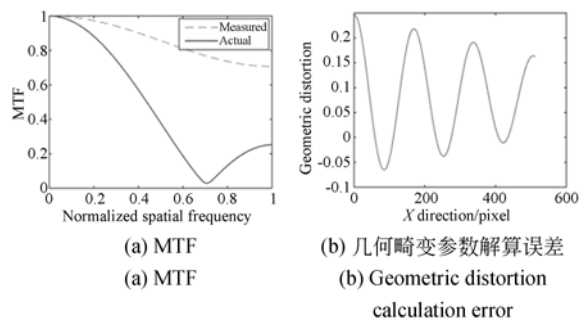


图 6 基于真实参数与测量参数的参数解算结果

Fig. 6 Comparison of calculation results based on actual parameters and measured ones with measurement error of 0.5 pixel

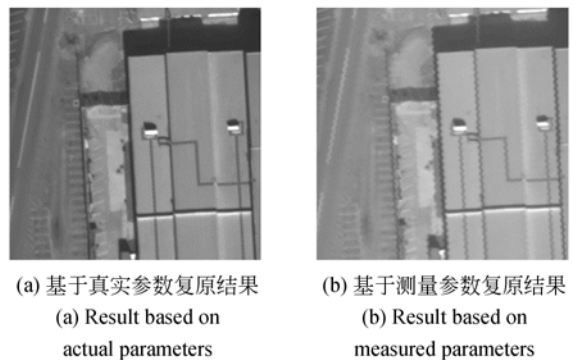


图 7 基于真实参数与测量参数的图像复原结果对比  
Fig. 7 Image restoration results based on actual parameters and measured ones with measurement error of 0.5 pixel

率的提高,振动周期内可测量的点数将减少。此时,在单个测量点的测量误差较小时仍可能会造成振动像移信息的误解算。因此,振动频率同样

是制约图像复原性能的关键因素。假定振动测量传感器的测振速度为 1 测量点/ms、单级积分时间为 0.05 ms。图 8 给出了 A 为 1 像元、TDI 级数为 4 情况下,测量误差为 0.05 pixel 情况下,  $f$  为 1 kHz 的 MTF 和几何畸变参数解算结果。从图中可见,频率增大时,同样的 0.05 pixel 的测量误差将导致很大的 MTF 和几何畸变参数的解算误差。从图 9 中基于真实参数和测量解算参数的振动降质图像复原结果可见:此时的测量误差将对复原质量造成很大的影响,复原后的图像仍存在较严重的几何畸变,显然无法满足实际应用需求。

综上所述,可得出以下结论:

(1) 振动像移测量误差会直接影响振动光学传递函数和几何畸变参数解算的准确性,进而影响到图像复原性能。在相同的振幅、频率和 TDI 级数下,几何畸变的参数解算误差与振动测量误差的影响量级基本相同;

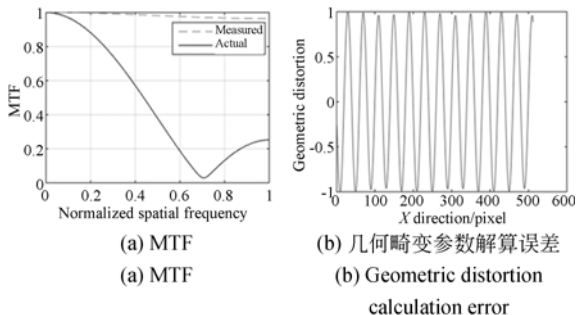


图 8 基于真实参数与测量参数的参数解算结果  
Fig. 8 Calculation results based on actual parameters and measured ones with  $f$  of 1 kHz

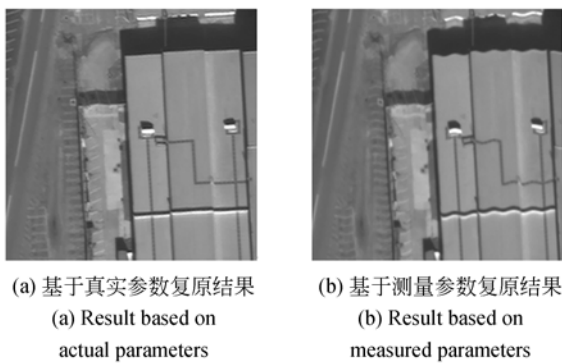


图 9 基于真实参数与测量参数的图像复原结果  
Fig. 9 Image restoration results based on actual parameters and measured ones with  $f$  of 1 kHz

(2) 当振动频率较高时,由于振动测量速度有限,在单点测量误差较小的情况下仍会造成图像复原质量的显著下降。因此在实际应用中应将振动测量误差以及振动频率控制在一定范围以内。

### 5 振动测量误差与降质复原量化关系

本章通过开展大量不同振动参数下的振动降质图像复原及图像质量评价实验,进一步研究上述因素与复原处理性能之间的定量关系,并以此为依据提出对振动指标的优化建议。

#### 5.1 实验方案设计

实验方案设计如图 10 所示。

1) 利用经过几何校正后的高分辨率卫星影像模拟真实景物,仿真生成不同振动振幅、频率和 TDI 级数情况下的振动降质图像;

2) 在振动像移中加入服从均匀分布的随机误差,模拟振动测量误差的影响;

3) 解算图像 PSF、OTF 和几何畸变参数,并选择一种高性能的振动降质复原算法进行复原处理;

4) 对处理前后图像进行比较评价,根据像质评价结果和像质提升需求分析得出振动指标要求。

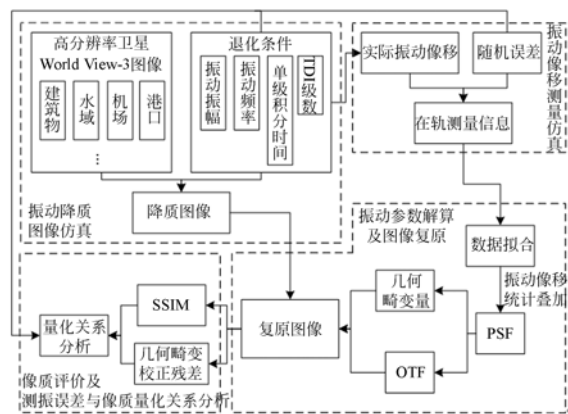


图 10 实验方案设计  
Fig. 10 Scheme of experiments scheme

#### 5.2 振动降质复原评价指标

结构相似度<sup>[17-18]</sup> (Structural Similarity, SSIM)是一种融合图像结构与人眼视觉特性的全参考图像质量评价方法,目前国际公认并广泛使用。相较于传统的峰值信噪比、均方误差等评价

指标,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来比较,能够全面反映复原算法的处理性能,且与人眼的主观视觉效果相符,从而使其评价结果更符合人眼的感知。SSIM 指数的取值范围为  $[-1, 1]$ ,当  $SSIM=1$  时,说明输入的两幅图像完全相同。而 SIFT 算法是一种常用的图像局部特征检测算法,其能够通过图像特征点的匹配得到不同图像间像点的相对位移变化。当输入的图像为标准场景图像、振动降质图像和复原图像时,可通过统计各同名像点坐标差的平均值得出降质图像和复原图像相对于标准图像的几何畸变量。

在图像复原实验中,为了定量评价振动降质图像复原质量和几何畸变校正残差,本文采用 SSIM 值和基于 SIFT 特征匹配得出的几何畸变量作为评价依据,对比分析复原处理性能,复原后的图像与标准场景图像的 SSIM 值越大、几何畸变量越小,说明图像复原的处理性能越好。

### 5.3 图像复原实验

在复原实验中,成像场景选择 50 幅高分辨率 WorldView-3 卫星图像,分辨率为 0.31 m,大小为 512 pixel $\times$ 512 pixel。图像中包含建筑物、水

域、机场、港口等地面典型景物结构(如图 11 所示)。每幅模拟振幅为 1~3 pixel、频率为 20~1000 Hz、TDI 级数 4~64 振动情况下的降质图像,同时假定振动像移测量误差为 0.05~0.1 pixel。为了克服复原算法本身的影响,选择了一种自身具备较强噪声和伪像抑制能力的复原算法<sup>[3]</sup>进行处理,该算法能在提高图像 MTF 和 SNR 的同时,有效抑制噪声放大及锯齿、寄生波纹等伪像。

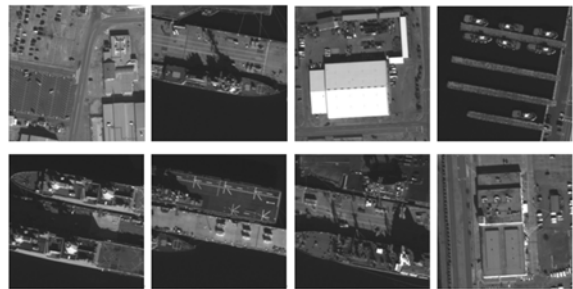


图 11 标准场景图样样本集

Fig. 11 Image samples of standard scenes

限于篇幅,下面仅列出一组典型场景图像的复原实验结果,如表 1 所示。

表 1 实验结果

Tab. 1 Results of experiment

测量误差/pixel	频率/Hz	TDI 级数	退化图像质量评价		复原图像评价指标	
			SSIM	几何畸变	SSIM	几何畸变
0.05	100	4	0.880 1	0.113 3	0.937 8	0.072 3
0.05	100	32	0.898 6	0.092 3	0.951 2	0.066 8
0.05	100	64	0.928 8	0.075 7	0.980 3	0.053 4
0.05	150	4	0.865 0	0.121 2	0.925 7	0.083 9
0.05	150	32	0.892 3	0.104 9	0.947 3	0.073 4
0.05	150	64	0.916 7	0.089 8	0.979 8	0.067 5
0.05	200	4	0.852 8	0.159 1	0.907 8	0.137 5
0.05	200	32	0.869 2	0.139 1	0.920 5	0.127 7
0.05	200	64	0.895 6	0.122 1	0.956 9	0.109 7
0.1	100	4	0.810 1	0.198 8	0.851 4	0.173 2
0.1	100	32	0.850 4	0.176 6	0.875 6	0.153 2
0.1	100	64	0.879 2	0.121 6	0.899 9	0.117 2
0.1	150	4	0.804 1	0.218 9	0.839 8	0.194 6
0.1	150	32	0.832 0	0.186 4	0.863 4	0.160 2
0.1	150	64	0.863 3	0.143 1	0.884 5	0.138 5
0.1	200	4	0.777 6	0.249 9	0.793 2	0.228 4
0.1	200	32	0.803 4	0.195 8	0.829 7	0.173 8
0.1	200	64	0.846 5	0.159 9	0.860 1	0.128 6

实验结果表明:

(1)随着振动频率的增加,几何畸变参数的测量误差变大。以复原图像的几何畸变值小于 0.1 像元为应用需求,为保证图像复原质量,需要将振动频率控制在 150 Hz 以内,因此建议在实际应用中超过 150 Hz 的振动进行隔振;

(2)TDI 级数越大,相同振动频率引起的几何畸变数值越小。因此在实际应用中可以通过增加 TDI 级数的方式来减小几何畸变参数测量误差的影响,从而提高图像复原质量;

(3)当振动频率控制在一定范围以内,测量误差小于 0.05 像元时,复原后的图像能够满足 SSIM 优于 0.9,几何畸变小于 0.1 像元的实际应用需求。

#### 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]. *JOSA. 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. (in Chinese)
- [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] 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, 96262:1-14.

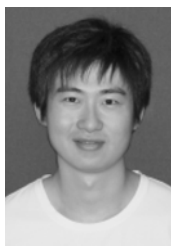
## 6 结 论

本文从 TDICCD 相机平台振动对图像质量的影响机理出发,分析得出了振动降质图像退化规律以及基于振动测量信息的图像复原方法。并针对基于振动信息图像复原的实际在轨应用问题,研究了振动像移测量误差对图像复原质量的影响,同时通过开展振动复原实验,得出:为了保证图像复原质量,需要将振动频率控制在一定范围以内。以复原后图像与理想图像的 SSIM 优于 0.9,几何畸变小于 0.1 像元为应用需求,分析出振动测量误差应小于 0.05 像元的要求。同时建议在实际应用中超过 150 Hz 的振动进行隔振。

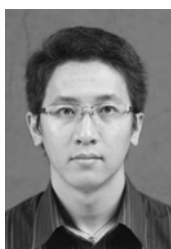
- [6] GRÖCHENIG K, STROHMER T. *Numerical and Theoretical Aspects of Nonuniform Sampling of Band-limited Images*[M]. Springer US: Nonuniform Sampling, 2001: 283-324.
- [7] VAZQUEZ C, DUBOIS E, KONRAD J. Reconstruction of nonuniformly sampled images in spline spaces[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(6): 713-725.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] CHAMBOLLE A. An algorithm for total variation minimization and applications[J]. *Math. Imaging Vision*, 2004, 20(1-2): 89-97.
- [11] SUDEY J, SCULMAN J R. In orbit measurements of Landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances[C]. *35th Congress of the International Astronautical Federation*, 1985, 12: 485-503.

- [12] WITTING M, VAN L H. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite OLYMPUS[J]. *SPIE*, 1990, 1218: 205-214.
- [13] TOYOSHIMA M, ARAKI K. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5): 827-832.
- [14] TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, KUNIMORI H. In-orbit measurements of space-craft microvibrations for satellite laser communication links[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8): 1-10.
- [15] STERN A, KOPEIKA N S. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion and vibrations using moments [J]. *JOSA. A*, 1997, 14(2): 388-396.
- [16] TAN L, WANG Q, YU S, *et al.*. Spectrum characteristics of optical misalignment induced by satellite platform vibration and angle of arrival fluctuation[C]. *Laser Physics and Laser Technologies (RCSLPLT) and 2010 Academic Symposium on Optoelectronics Technology (ASOT)*, 2010 10th Russian-Chinese Symposium on. *IEEE*, 2010: 249-252.
- [17] 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.
- [18] 范媛媛, 沈湘衡, 桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2485.
- FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485. (in Chinese)

#### 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年于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

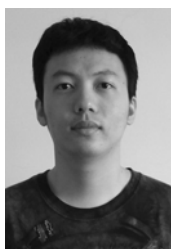


孔祥龙(1986—),男,黑龙江青冈人,高级工程师,2011年于上海航天技术研究院获得硕士学位,主要从事卫星规划与体系论证、卫星总体设计、新技术研发等工作, E-mail: kxl.longxiao@163.com

#### 通讯作者:



胡建明(1994—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事光电信息获取与处理方面的研究。E-mail: hjm1007491571@163.com



孙 暄(1990—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2015年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事遥感图像获取与处理等研究, email: sunxuanmailbox@163.com



李文峰(1980—),男,山东济宁人,高级工程师,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学遥感技术、卫星总体设计等工作, E-mail: hangtianbayuan@sohu.com