

# 卫星平台震颤影像的去模糊方法

宋晓林, 方忠浩, 潘俊

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 湖北 430079)

**摘 要:** TDI CCD 相机凭借其多级积分的成像特点, 已成为目前高分辨率光学遥感成像系统的主流传感器, 但在其成像过程中, 若存在平台震颤, 会造成图像的模糊, 影响成像质量。首先, 从 TDI CCD 相机的成像原理入手, 分析了平台震颤对成像质量的影响, 并根据震颤检测得到的震颤像移轨迹, 提出一种震颤影像去模糊方法, 以消除震颤引起的图像退化, 最后, 利用资源三号多光谱影像进行了实验。实验结果表明, 经该方法处理后的震颤影像, 图像的各项定量评价指标显著提升, 从而验证了方法的有效性。

**关键词:** TDI CCD 相机; 平台震颤; 像移; 去模糊

中图分类号: P236

文献标识码: A

## Image deblurring method for satellite platform caused by jitter

SONG Xiao-lin, FANG Zhong-hao, PAN Jun

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** TDI CCD camera with its multi-level integral imaging features has become the mainstream sensor of current high-resolution optical remote sensor imaging system, but if there is platform tremor in its imaging process, it will produce images blur, affecting image quality. The influence of platform tremor on imaging quality based on the imaging principle of TDI CCD camera was analyzed. According to the jitter image trajectory obtained by jitter detection, a method was proposed to eliminate image degradation caused by jitter. ZY-3 multi-spectral images were experimented. The experimental results show that the quantitative evaluation index of the image after the jitter image is improved, and the validity of the method is verified.

**Key words:** TDI CCD camera, platform jitter, image shift, deblurring

### 1 引言

卫星平台震颤又称微振动、颤振等, 是指卫星在轨运行期间, 由于卫星平台的姿态调整、星上运动部件的周期性运动等引起的一种幅值较小、频率较高的震颤响应<sup>[1,2]</sup>。卫星平台震颤具有微小性、难控性、敏感性等特点, 当其传递到像面会引起像的振动, 即震颤像移, 震颤像移将直接导致成像质量的下降。

时间延迟积分电荷耦合器件 (TDI CCD) 是一种以时间延迟积分 (TDI) 技术工作的线阵 CCD, 由对同一目标进行多次曝光来增加光能的概念发展而来<sup>[3]</sup>。通

过 TDI 技术来延长积分曝光时间, 在提高光通量的同时, 也提高了相机的灵敏度与信噪比, 已成为目前高分辨率光学遥感成像系统的主流传感器。不同频率的平台震颤均可引起 TDI CCD 的成像模糊, 随着光学遥感卫星分辨率的提高, 这种影响将越发明显。Hochman<sup>[4,5]</sup>从点扩散函数角度出发, 分析了成像过程中震颤对 TDI CCD 相机的成像质量的影响, 且总结出振动对图像造成模糊的 3 种情况, 即阶梯效应, 几何形变以及像点模糊; 浙江大学应用光学与仪器国家重点实验室提出了 TDI CCD 振动图像复原方法, 该方法在已知运动的瞬时速率情况下, 求取每一行影像

收稿日期: 2017-09-12

通信作者: 潘俊, panjun1215@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91438112)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.91438112)

对应的点扩散函数，逐行进行震颤图像的复原<sup>[6]</sup>；文献<sup>[7,8]</sup>从振动函数出发，假设图像每一行成像过程中平台震颤为匀速直线运动来计算运动点扩散函数 (PSF, point spread function)，用匀速运动点扩散函数逐行复原 TDI CCD 图像，简化了运算过程，但降低了复原精度。

随着平台震颤测量技术的发展，已有多种高精度的平台震颤测量方法，如基于姿态传感器的震颤测量、基于影像的平台震颤检测以及通过增加辅助设备对震颤测量的方法等<sup>[9]</sup>。本文主要针对已知震颤像移轨迹的震颤影像展开影像去模糊的工作。首先，从 TDI CCD 相机的成像原理着手，分析平台震颤对成像质量的影响，并根据影像的退化过程，提出一种针对震颤像移轨迹的卫星平台震颤影像去模糊方法，最后，利用资源三号多光谱影像进行实验来验证本文方法的有效性。

## 2 卫星平台震颤对 TDI CCD 成像质量的影响

### 2.1 TDI CCD 成像原理

TDI CCD 是一种采用时间延迟积分 (TDI, time delay integration) 技术的面阵 CCD，而从功能上来讲它是一个线阵 CCD 器件，它是基于对同一目标进行多次曝光来增加光能的概念发展而来<sup>[3]</sup>。相比常规的扫描方式，TDI CCD 由于采用了 TDI 的方法，具有更高的系统灵敏度，在光照度一定的条件下，扫描速度更高，或照度很低的情况下可以以常规的速度来进行扫描，并且其输出图像可通过多级积分叠加来增强光能的吸收，可以有效解决灵敏度及分辨率之间的矛盾<sup>[10]</sup>，同时减小了像元之间响应不均匀性，增强信噪比。

TDI CCD 的结构如图 1 所示。其中， $M$  代表图像中一行的列数， $N$  代表 TDI 的积分级数，从下至上依次为 1, 2, 3, ...,  $N$  级，TDI CCD 实际的积分级数  $N$  是可调整的，可取 1、4、8、16、32、48 等，由实际的成像条件所决定。成像时 TDI CCD 的多行线阵 CCD 依次对目标进行曝光，在每次曝光后，将电荷转移到下一级，最终将电荷累加至第一级作为该目标的成像能量进行线阵输出。理想成像条件下每一级积分都是对应同一区域进行曝光，当存在震颤的影响下，会造成多个不同区域的电荷混淆，从而产生了图像的模糊。

### 2.2 震颤像移分类及其影响分析

根据不同方向像移的成因，可以将 TDI CCD

的图像退化分为空间不变类（正常推扫像移）以及空间变化类<sup>[11]</sup>（震颤像移）。

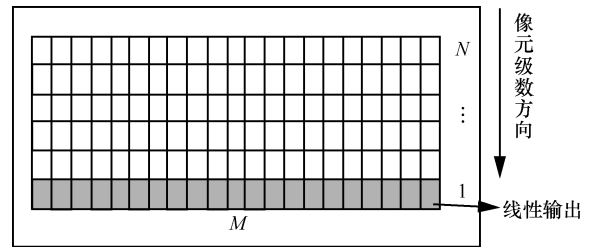


图 1 TDI CCD 面阵结构

#### 1) TDI 方向

该方向的正常像移是由于正常推扫产生的一种线性像移，即使没有震颤运动的影响，TDI 每一级积分过程中也都会匀速扫过一定的距离，假设扫过的距离为  $d$ ，推扫速度为  $v$ ，则  $vT=d$ ，因此，正常像移产生的图像降质是空间不变的，此时，若同时存在非正常像移，则每一级积分时扫过的区域不一致，使电荷的能量发生混淆，轻则导致图像模糊，重则导致 TDI 方向图像的拉伸与压缩。

#### 2) 垂直 TDI 方向

该方向非正常像移的存在会使图像不同行之间存在一定错位，如果震颤运动的频率高且振幅小则不会造成成像中心的偏移，仅会造成图像模糊，如果频率低振幅大，则不同行之间将会产生错位。

## 3 基于震颤像移轨迹的卫星平台震颤影像去模糊

### 3.1 TDI CCD 图像退化模型

假定成像系统的退化过程是一个线性移不变系统， $f(x,y)$  为理想的、没有退化的图像， $g(x,y)$  为退化图像，则可以将退化后图像  $g(x,y)$  表示为<sup>[12]</sup>

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \quad (1)$$

其中， $*$  代表卷积操作， $h(x,y)$  称为点扩散函数，它代表点光源成像之后的亮度分布。根据冲激函数  $\delta$  的性质， $f(x,y)$  可以表示为

$$f(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\alpha,\beta) \delta(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

由狄拉克函数的采样性（或筛选性）可将式(2) 写为

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-\alpha, y-\beta) [f(\alpha,\beta) h(\alpha,\beta)] d\alpha d\beta = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-\alpha, y-\beta) h(\alpha,\beta) d\alpha d\beta \quad (3)$$

在不考虑量化因素的影响下, 对式(3)进行换元可得

$$g(m,n) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-md, y-nd) [f(x,y)h(x,y)] dx dy$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-md, y-nd) h(x,y) dx dy \quad (4)$$

其中,  $m$ 、 $n$  分别代表获取的数字图像  $g(x,y)$  的行号和列号,  $d$  为采样间隔。

由以上的退化模型可知, 在已知退化后图像  $g(x,y)$ 、点扩散函数  $h(x,y)$  的情况下, 可通过图像复原模型进行图像反卷积, 以获取去模糊后图像。因此去模糊过程 2 个关键步骤为 PSF 的准确估计、图像复原模型的选择。

### 3.2 PSF 估计方法

运动降质图像的 PSF 可由成像过程中地面目标的像与探测器的相对位置构成的概率密度函数 (PDF) 进行表示<sup>[13]</sup>。假设 TDI 方向上的震颤像移为  $X_1(t)$ , 推扫像移为  $X_2(t)$ , 垂直 TDI 方向上的震颤像移为  $Y(t)$ , 则震颤模糊影像的 PSF 估计 (以影像第  $L$  行为例) 步骤可分为以下几点。

PSF 尺寸的确定并初始化。根据该行成像过程中 2 个方向的像移最大值动态确定 PSF 的尺寸, 最大限度地减少影像去模糊过程中不必要的运算, 并将离散 PSF 中的每点的值初始化为 0, 以便进行相对位置概率密度函数的计算。

进行各时刻相对位置偏移量的叠加统计。对各时刻震颤像移、推扫像移等共同作用后相对 PSF 中心的偏移量进行叠加统计。

归一化。由于 PSF 的性质可知, PSF 中各点的数值总和应为 1, 因此, 对上述统计得到的 PSF 进行归一化, 就可得到该行图像的退化 PSF。

### 3.3 基于最优窗的维纳滤波复原方法

维纳滤波凭借其其对噪声的抑制作用、对图像细节的恢复能力, 得到了广泛的应用。但是该方法复原过程中存在边缘截断的现象, 会造成图像边缘梯

度的跳变, 使延拓图像在边界处不可微, 产生周期性的边缘误差, 进而产生边缘振铃效应。本文采用一种基于最优窗的维纳滤波复原方法, 该方法保持维纳滤波优点的同时, 可对边缘振铃效应进行有效抑制。

窗函数<sup>[14,15]</sup>的构建是最优窗去振铃算法的关键。假设退化图像为  $f$ , 加窗后的退化图像为  $f'$ , 则  $f'$  及  $f$  之间的关系表示为  $f'(m,n) = f(m,n)w(m,n)$ , 其中,  $w(m,n)$  为窗函数, 其尺寸与退化图像相同, 中心区域值为 1, 窗函数边缘处逐渐接近于 0, 将退化图像与窗函数进行点乘操作后就得到加窗后的退化图像, 因此, 加窗后的退化图像中心区域与未加窗时相同, 边缘区域也同样会逐渐趋于 0。假设退化图像  $f$  的图像高度和宽度分别为  $V$  和  $H$ , 运动模糊的长度在 2 个方向上的分量分别为  $V_{psf}$  和  $H_{psf}$ , 最优窗构建的过程中将图像分为 9 个区域, 如图 2 所示, 各个区域范围如表 1 所示, 各区域对应的取值如式(5)所示。

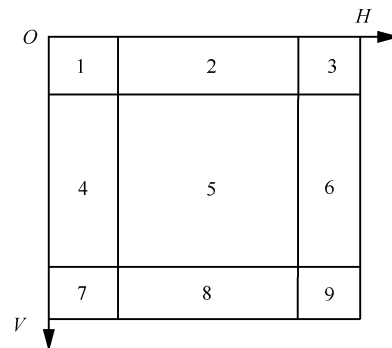


图 2 最优窗区域划分

表 1 最优窗各区域坐标范围

区域代码	V 方向范围	区域代码	H 方向范围
1、2、3	$[0, V_{psf}-1)$	1、4、7	$[0, H_{psf}-1)$
4、5、6	$[V_{psf}-1, V-V_{psf}+1)$	2、5、8	$[H_{psf}-1, H-H_{psf}+1)$
7、8、9	$[V-V_{psf}+1, V)$	3、6、9	$[H-H_{psf}+1, H)$

$$\left[ \begin{array}{ccc} \sum_{m=0}^i \sum_{n=0}^k h(m,n) & \sum_{m=0}^i \sum_{n=0}^{H_{psf}-1} h(m,n) & \sum_{m=0}^i \sum_{n=k+H_{psf}-H}^k h(m,n) \\ \sum_{m=0}^{V_{psf}-1} \sum_{n=0}^k h(m,n) & 1 & \sum_{m=0}^{V_{psf}-1} \sum_{n=k+H_{psf}-H}^{H_{psf}-1} h(m,n) \\ \sum_{m=i+V_{psf}-V}^{V_{psf}-1} \sum_{n=0}^k h(m,n) & \sum_{m=i+V_{psf}-V}^{V_{psf}-1} \sum_{n=0}^{H_{psf}-1} h(m,n) & \sum_{m=i+V_{psf}-V}^{V_{psf}-1} \sum_{n=k+H_{psf}-H}^{H_{psf}-1} h(m,n) \end{array} \right] \quad (5)$$

### 3.4 逐行复原方法

由于 TDI CCD 的每一行图像具有不同程度的退化，不能用单一的 PSF 进行图像非盲复原，因此本文采取对图像每一行单独进行复原的策略。TDI CCD 相邻行积分时间内的震颤像移<sup>[7]</sup>如图 3 所示，从图 3 可以看出，相邻行之间的像移曲线存在绝大部分的重叠，因此会导致图像第  $n$  行、第  $n-1$  行以及第  $n+1$  行具有相似程度的模糊。

由于在复原图像第  $n$  行的过程中，不但会用到图像第  $n$  行的信息，还会用到其上下若干行的图像信息（具体用到上下多少行取决于 PSF 的尺寸）。假设 PSF 尺寸为  $5 \times 5$ ，则在复原第  $n$  行图像时，可选择  $[n-2, n+2]$  作为待复原图像，对待复原图像进行基于最优窗的维纳滤波方法进行复原，选取复原后图像中间行作为第  $n$  行图像去模糊的最终结果。

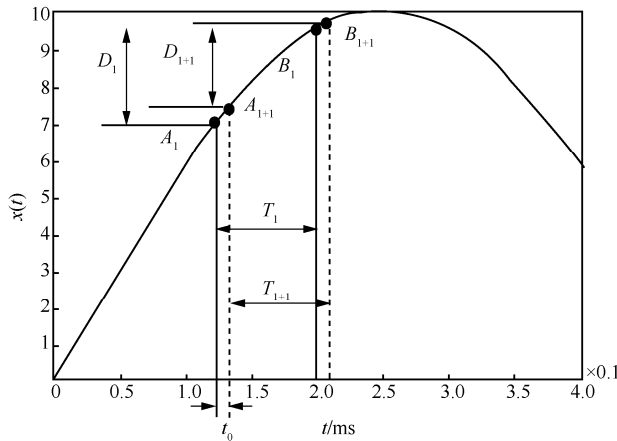


图 3 TDI CCD 相邻行积分时间内震颤像移

### 3.5 图像质量评价指标

为了对去模糊前后的图像质量进行定量的比较分析，本文选取了 5 项图像质量评价指标，通过对各指标的定量分析比较完成图像质量的定量评价，下面对 5 项评价指标进行简单介绍。

#### 3.5.1 对比度

图像对比度反映了图像目标与背景间灰度反差的大小。亮度层级差异越大说明对比越大，色彩表现越丰富，目标辨识度越高，图像细节越清晰，图像对比度的计算式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i, j)^2 P_{\delta}(i, j) \quad (6)$$

其中， $\delta(i, j) = |i - j|$  代表了相邻像素间的灰度差值， $P_{\delta}(i, j)$  代表了相邻像素间灰度差值为  $\delta$  的分布概率。

#### 3.5.2 细节能量

细节能量从图像局部角度出发，反映图像中细节信息的丰富程度，其值越大说明图像中的细节越丰富，影像越清晰，其计算方法为

$$f_{ME} = \frac{1}{n} \sum \sigma_f^2(x, y) \quad (7)$$

其中， $\sigma_f^2(x, y)$  为  $(2M + 1) \times (2M + 1)$  区域内的方差，可表示为

$$\sigma_f^2(x, y) = \frac{1}{(2M + 1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x + i, y + j) - m_f(x, y)]^2 \quad (8)$$

其中， $m_f(x, y)$  为  $(2M + 1) \times (2M + 1)$  区域的灰度均值，可表示为

$$m_f(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x + i, y + j) \quad (9)$$

#### 3.5.3 图像边缘能量

边缘是图像中细节和形状特征的重要表现部分。它是不同于噪声信号的高频信息。由于它是有方向性的，因此，可以通过各向异性的滤波器来进行提取。可通过  $45^\circ$ 、 $135^\circ$  的 2 个归一化边缘算子  $E_1$ 、 $E_2$  分别对图像进行卷积计算来消除方块效应，二者相加之后即可得到图像的边缘

$$e(x, y) = E_1(f(x, y)) + E_2(f(x, y))$$

$$E_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & \frac{4}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$E_2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & \frac{4}{6} & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \end{pmatrix} \quad (11)$$

边缘能量的定义为

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n e^2(x, y) \quad (12)$$

图像的边缘能量代表了图像边缘的清晰程度和丰富程度，边缘能量的值越大，说明图像中的边缘越丰富、越细致，则代表图像的质量越高。

### 3.5.4 信息熵

图像的信息熵表示了图像中灰度分布的聚集特性，描述了图像的平均信息量。信息熵的计算式为

$$H(u) = -\sum_{i=1}^L p(b_i) \lg p(b_i) \tag{13}$$

其中， $i$  代表灰度级数， $b_i$  代表第  $i$  级的灰度值； $p(b_i)$  为  $b_i$  所出现的概率。信息熵的值越大，则说明图像中的纹理越丰富。

### 3.5.5 平均梯度

图像的平均梯度是图像清晰度评价的一个重要指标，该指标可反映出图像对细节对比的表达能力，平均梯度的值越大，微小细节反差的变化速率越快，图像越清晰。其计算式可表示为

$$\bar{g} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(f(i,j) - f(i+1,j))^2 + (f(i,j) - f(i,j+1))^2}{2}} \tag{14}$$

## 4 实验与分析

### 4.1 实验数据

资源三号多光谱相机包含蓝、绿、红、近红外 4 个谱段，影像空间分辨率为 5.8 m。本文选取资源三号 2012 年 2 月 3 日星下点成像、覆盖我国河南省登封市嵩山定标场的多光谱数据作为实验数据。选取其中 1 000×1 000 的区域进行实验，震颤模糊的多光谱影像（前 3 个波段）如图 4(a)所示，各波段积分成像参数如表 2 所示。

根据基于 TDI CCD 分时成像的平台震颤检测结果<sup>[9]</sup>可知，实验影像震颤像移估计结果如表 3 所示。

### 4.2 结果分析

图 4 为资源三号多光谱影像去模糊处理前后全局及局部对比，表 4 为多光谱影像去模糊前后全局影像的质量评价指标值，综合两者可知，去模糊之后的图像各项辐射质量评价指标明显提高，通过影像局部图的对比以及定量评价参数的比较可知，去模糊后的影像整体细节更丰富、边缘更清晰，验证了本文方法对资源三号多光谱震颤影像去模糊的



(a) 原始模糊多光谱影像



(b) 本文去模糊方法处理结果



(c) 原始模糊多光谱影像局部 1



(d) 本文方法去模糊多光谱影像局部 1



(e) 原始模糊多光谱影像局部 2



(f) 本文方法去模糊多光谱影像局部 2

图 4 资源三号多光谱影像去模糊前后对比

**表 2** 资源三号多光谱不同波段积分参数信息

波段	单级积分时间/s	积分级数	总积分时间/s
B1	0.000 803 470 612	16	0.012 856
B2	0.000 803 470 612	8	0.006 428
B3	0.000 803 470 612	8	0.006 428

**表 3** 资源三号多光谱影像不同波段像移估计结果

波段	垂轨			沿轨		
	频率	振幅	相位	频率	振幅	相位
B1	0.656 1	0.904 6	-0.301 6	0.643 6	0.501 0	-0.498 3
B2	0.656 1	0.904 6	0.201 8	0.643 6	0.501 0	-0.004 4
B3	0.656 1	0.904 6	0.625 8	0.643 6	0.501 0	0.411 5

**表 4** 资源三号多光谱影像去模糊前后图像质量评价指标值

影像	对比度	细节能量	边缘能量	信息熵	平均梯度( $\times 10^{-2}$ )
模糊影像	372.474 4	73.156 4	157.083 2	6.854 3	1.175 3
去模糊影像	568.511 2	75.945 2	306.258 1	7.788 0	1.445 6

有效性。

由以上方法原理介绍以及实验结果分析可知，本文方法对于各波段影像震颤去模糊均具有适用性。多波段影像震颤去模糊处理时，需根据各波段的震颤像移进行逐波段的处理。

## 5 结束语

本文基于 TDI CCD 多级积分的成像特点展开了卫星平台震颤影像去模糊方法的研究。首先，对震颤像移的分类及其各自对成像质量的影响进行了分析；然后，对 TDI CCD 的图像退化模型进行了介绍，确定了影像去模糊工作中的 2 个重点：PSF 的估计以及图像复原模型的选择，并针对这 2 个问题提出了本文的处理方法；最后，对资源三号多光谱影像进行了去模糊实验，去模糊后的影像各项定量评价指标显著提升，从而验证了本文方法的有效性。本文方法也适用于具有其他形式震颤像移轨迹的影像去模糊。下一步的工作中，将根据已知的震颤轨迹对震颤影像的几何质量进行补偿，实验本文方法对几何质量补偿的效果。

## 参考文献：

[1] 霍红庆, 马勉军, 李云鹏, 等. 卫星微角颤振高精度测量技术[J]. 传感器与微系统, 2011,(03): 4-6, 9.  
HUO H Q, MA M J, LI Y P, et al. High precision measurement tech-

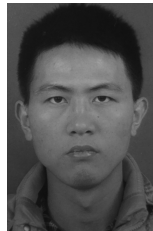
nology of satellite' s angle micro vibration[J]. Transducer and Micro-system Technologies, 2011, (3): 4-6,9.  
[2] 蒋国伟, 周徐斌, 申军烽, 等. 卫星微振动虚拟仿真技术研究及应用[J]. 计算机测量与控制, 2011, (9): 2206-2209.  
JIANG G W, ZHOU X B, SHEN J F, et al. Study and application of micro-vibration virtual simulation of satellite[J]. Computer Measurement & Control, 2011, (9): 2206-2209.  
[3] 杨秉新. 星载遥感器轻型化设计技术途径[J]. 航天返回与遥感, 1997,18(2): 19-22.  
YANG B X. Research for lightened design of spaceborne remote sensor[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1997,18(2): 19-22.  
[4] HOCHMAN G, YITZHAKY Y, KOPEIKA N S, et.al. Restoration of images captured by a staggered TDI camera in the presence of mechanical vibrations [J]. SPIE, 2003,5203: 559-570.  
[5] HOCHMAN G, YITZHAKY Y, KOPEIKA N S, et.al. Restoration of images captured by a staggered time delay and integration camera in the presence of mechanical vibrations [J]. Applied Optics, 2004,43(22): 45-54.  
[6] 周强. 卫星总体参数对遥感图像质量影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.  
ZHOU Q. Study on the influence of satellite overall parameters on remote sensing image quality[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.  
[7] 石俊霞, 郭永飞, 薛旭成. 航天时间延迟积分 CCD 相机振动模糊图像的恢复[J]. 光电子·激光, 2012, 23(3): 572-578.

- SHI J X, GUO Y F, XUE X C. Motion blurred image restoration of spaceborne TDI CCD camera[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(3): 572-578.
- [8] SUN T, et al. 2015. Application of attitude jitter detection based on short-time asynchronous images and compensation methods for Chinese mapping satellite-1 [J]. Optics Express, 23(2): 1395-1410.
- [9] 朱映. 高分辨率光学遥感卫星影像平台震颤处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- ZHU Y. Research on jitter processing methods for high resolution optical satellite imagery[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [10] 佟首峰, 李德志. 高分辨力 TDI CCD 遥感相机的特性分析[J]. 光电工程, 2001, 28(4): 64-67.
- TONG S F, LI D Z. Analysis on the characteristics of TDI-CCD high-resolution camera for remote sensing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(4): 64-67.
- [11] 庄绪霞. 平台运动对星载 TDI CCD 相机成像质量影响分析与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- ZHUANG X X. The effect analysis and simulation of platform motion on image quality of spaceborn TDI CCD camera[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [12] 贾永红. 数字图像处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- JIA Y H. Digital image processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [13] WU J G, ZHENG Z Z. Restoration of TDI camera images with motion distortion and blur[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42: 1198-1203.
- [14] TAN K C, LIM H, et al. Windowing techniques for image restoration[J]. Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(5): 491-500.
- [15] 王靖, 施刚, 张磊, 等. 运动模糊图像边缘振铃效应的抑制方法[J]. 电子测量技术, 2013, 36(5): 62-67.
- WANG J, SHI G, ZHANG L, et al. Algorithm on border ringing effects reduction of motion-blurred image[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(5): 62-67.

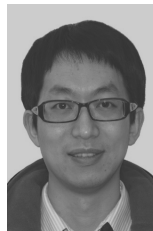
#### 作者简介:



**宋晓林** (1992-), 女, 山东威海人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为高分辨率光学遥感卫星图像处理。



**方忠浩** (1992-), 男, 湖北恩施人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为高分辨率光学遥感卫星图像处理。



**潘俊** (1979-), 男, 湖北丹江口人, 博士, 武汉大学副教授, 主要研究方向为光学卫星影像数据处理、高分辨率遥感影像质量改善、遥感影像匀光镶嵌等。