

基于五谱段合一多光谱相机影像的卫星 颤振检测和补偿

孙 韬¹ 龙 辉¹ 赵 冬² 李 莹³

¹ 中国科学院电子学研究所空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190
² 中国科学院遥感与数字地球研究所国家遥感应用工程技术研究中心, 北京 100101
³ 北京航天宏图信息技术有限责任公司, 北京 100195

摘要 提出了一种利用光学卫星五谱段合一多光谱相机影像定量检测卫星颤振, 并采用点扩展函数(PSF)空间移变降质模型对影像进行恢复的方法。从时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)的工作原理出发介绍了卫星颤振对TDICCD影像的影响, 提出了利用五谱段合一多光谱相机影像进行卫星颤振定量检测的方法, 在颤振检测技术中, 利用了稳定的相位辐角相关匹配算法进行波段间配准, 算法的匹配精度可达到1/50 pixel。提出了利用PSF空间移变降质模型对影像进行恢复的方法。对资源三号(ZY-3)北京区域的影像进行了实验, 用清晰度、细节能量、边缘能量和图像对比度作为客观评价标准。结果表明, 恢复后的影像客观指标提高约2倍。同时, 用SPOT5同区域正射影像进行了客观指标的横向对比, 对比的结果也初步表明能较好地恢复卫星颤振降质。

关键词 遥感; 颤振检测和补偿; 五谱段合一多光谱相机; 空间移变降质模型; 辐角相关匹配

中图分类号 V445.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0728005

Detection and Compensation of Satellite flutter Based on Image from Multispectral Camera with Five Spectral Combinations

Sun Tao¹ Long Hui¹ Zhao Dong² Li Ying³

¹ Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing and Application System,
Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² National Engineering Research Center for Geoinformatics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100101, China

³ Beijing AeroImgInfo Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China

Abstract A method which uses optical satellite multispectral camera with five spectra combinations (MCFS) image in quantitative detection of satellite flutter and point spread function (PSF) space variant blurring model method for flutter compensation are proposed. The working principles of time delay integration (TDI) charge coupled device (CCD) and the influence of satellite flutter on the TDICCD image are introduced. The method of using MCFS image in satellite flutter quantitative detection is proposed. In the flutter detection technology, the robust phase correlation scan angular correlation matching algorithm, which can achieve 1/50 pixel registration precision, is used for registration between bands. The PSF space variant blurring model method is used for image restoration. Beijing regional image from ZY-3 is used in experiments and carried out with definition, details energy, edge energy, and contrast as objective evaluation index. Results show that the objective evaluation index of restoration image is improved about 2 times. At the same time, the same regional orthophoto from SPOT5 is used for compared experiment in objective evaluation index. Comparative results also preliminarily show the evidence of better restoration of satellite flutter reduction.

收稿日期: 2013-12-27; **收到修改稿日期**: 2014-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41001214)、重大专项行业应用项目(05Y30B02900113/1503)、国家科技支撑项目(2012BAH31B00)

作者简介: 孙 韬(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事遥感光学传感器的研制和数字相机检校方面的研究。

E-mail: ts-1@live.cn

导师简介: 童庆禧(1935—), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事遥感技术及应用方面的研究。

E-mail: tqxi@263.net

Key words remote sensing; detection and compensation of flutter; unification camera of five spectral; space variant blurring model; angular correlation matching algorithm

OCIS codes 280.4788; 120.7280; 110.3000

1 引 言

卫星在轨摄像期间,卫星上活动部件的各种运动均会引起卫星的振动,当振动的频率和幅值超过某一临界值就会变得发散,从而发生颤振。卫星颤振是影响相机成像质量的一个重要因素,而且不能依靠控制系统进行测量和抑制^[1]。对于现今在航天领域被广泛利用的卫星时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD),其正常工作的前提是光生电荷包的转移与焦面上图像的运动保持同步,任何误匹配都将导致图像模糊^[2-4]。TDICCD工作在 N 级积分级数下时, N 级电荷进行累加,相当于延长积分时间,要想获得清晰的图像,必须在较长积分时间内保持同步。而颤振会导致相机在成像过程中产生像移,破坏其与光生电荷包运动的同步,从而影响相机的成像质量^[1,3,5]。因此卫星在轨摄像期间,必须对降质图像进一步处理,以补偿卫星平台的颤振引起的图像模糊。

对于颤振降质图像的恢复,主要面临两个问题,即颤振参数的获取和颤振退化模型的建立。在颤振获取方面,Timoner等^[6]利用图像序列获取颤振参数,但由于TDICCD与面阵凝视相机不同,不能对同一景物进行多次成像,因此这一方法并不适用。石俊霞等^[7]提出了在焦平面空闲空间安装快速面阵CCD,通过一种改进的灰度投影算法计算颤振参数的方法,但是该方法需要在卫星TDICCD焦平面位置加装快速面阵CCD设备,因此不具有广泛的适用性。Hochman等^[8-9]利用CCD交错排列的方式获取振动参数,由于国内遥感相机焦平面很少采用这种结构因而受到了限制。周虎等^[10]是在振动参数已知的前提下进行图像复原。谢冰等^[11]则假设降

质是由匀速直线运动造成的,利用降质图像获取振动参数,对整幅图像采用同一点扩展函数(PSF)进行图像复原。但实际上,卫星振动形式复杂,如果近似认为是匀速直线运动则必然会带来误差。

在颤振模型建立方面,目前大都是根据被模糊的图像来估计运动的PSF^[12],但这些方法受噪声影响大,且只能识别在整幅图像曝光时间内运动形式不变的PSF,而TDICCD图像的每一行都是独立的,因而各行之间的PSF也是独立的,即TDICCD的振动降质过程是空间移变的。对于空间移变降质图像,不能用同一个PSF对整幅图像进行恢复^[13-14]。另一方面,在卫星颤振的描述中,多采用正切函数描述,但对安装于卫星平台的空间相机,由于其振动形式非常复杂,难以用单一函数精确表示^[15]。

由于五谱段合一的多光谱成像相机现今在航天领域被广泛利用,因此本文提出了一种利用多光谱相机影像进行波段间亚像元精密匹配,从而定量获取逐像元卫星颤振的方法。根据逐像元的颤振结果再进行最佳模型分析,建立最优的颤振模型并解算颤振参数。利用PSF空间移变降质模型对TDICCD颤振空间移变降质影像进行恢复。计算了图像复原前后的清晰度、细节能量、边缘能量和对对比度等客观指标,并对影像恢复的结果进行客观评估。

2 颤振定量检测

成像时刻的载荷高频颤振主要是由于大器件微动造成的周期性姿态不稳,由于五谱段合一多光谱相机是每个波段分时成像的,因此这种不稳定性在每个波段的重叠区域会有相应的错位表现,颤振影响下五谱段合一多光谱相机成像示意如图1所示。

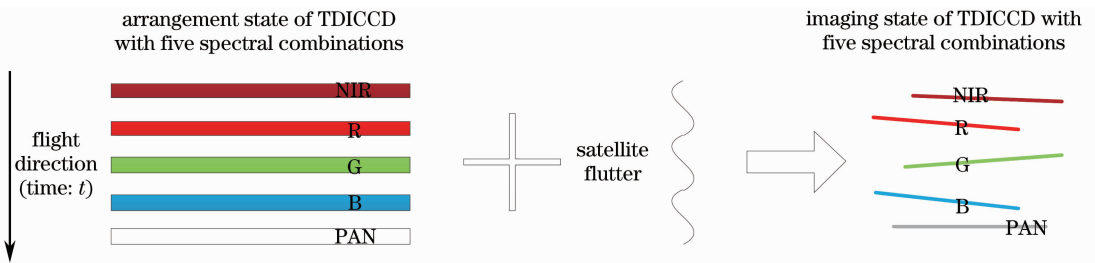


图1 颤振影响下成像示意图,五谱段为红外(NIR)、红(R)、绿(G)、蓝(B)和全色(PAN)波段

Fig.1 Schematic diagram of imaging in the flutter effect, five spectral sections are near infrared (NIR), red (R), green (G), blue (B) and panchromatic (PAN) bands

因此在五谱段合一多光谱设备成像完成后,可以通过逐行逐列的亚像元匹配,从而逐像元地求取不同波段间的 x 、 y 方向的偏移。通过减去波段间的固定偏移量即可定量地反算出每个像元的颤振偏移量。其具体流程为

1) 逐行逐列设定匹配块,如图 2 所示。匹配块不宜过大,过大无法真实地反映出颤振规律;匹配块也不宜过小,过小则匹配算法会存在较多的粗差。经过实验,10 pixel \times 10 pixel 的大小设定最为合适,如图 3 所示;

2) 利用相位辐角相关匹配^[16] (RPCS)算法,对每一个匹配块按 PAN、B 波段、B、G 波段、G、R 波段、R、NIR 波段进行辐角相关匹配,并记录 x 、 y 方向的偏移量(辐角相关匹配精度可达到 1/50 pixel);

3) 三组 x 、 y 方向的偏移量各自减去各自的固定波段偏移值,并取平均值作为颤振带来的 x 、 y 方向的偏移;

4) 利用平滑滤波剔除粗差和飞点;

5) 通过大量散点,进行最佳模型分析,根据分析结果建立颤振模型,并解算模型参数;

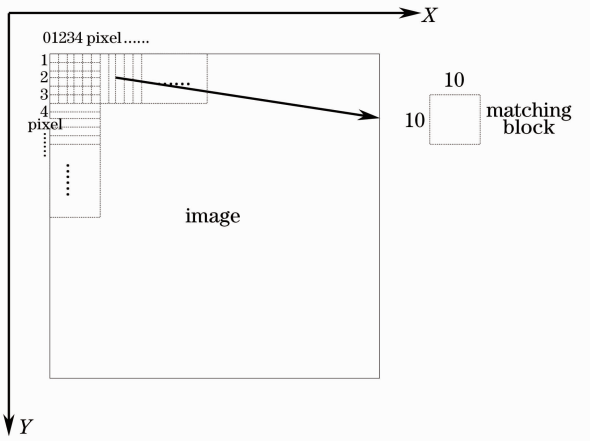


图 2 匹配块设置的示意图

Fig. 2 Diagram of setting of matching block

6) 拟合 x 、 y 方向的颤振曲面。

3 PSF 空间移变降质模型

TDICCD 的空间降质包括积分采样降质和振动降质两个过程,假定图像 $f(m, n)$ 为补偿后的离散数字图像, $g(x, y)$ 为原始图像,则:

$$f(m, n) = \int_0^{M_a} \int_0^{N_a} \delta(x - ma) \delta(y - na) [g(x, y) \cdot P_{SF_{Camera}} \cdot P_{SF_{vibration}}] dx dy, \quad (1)$$

式中 $\delta(x - ma) \delta(y - na)$ 为激冲函数, M, N 分别为

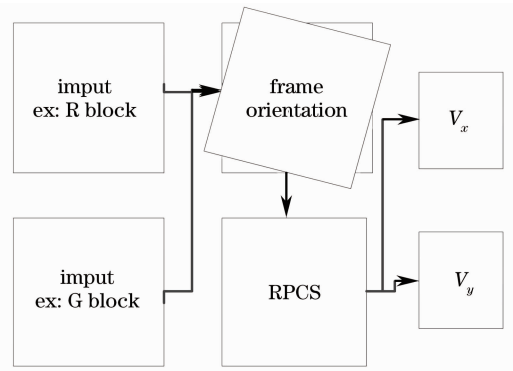


图 3 RPCS 算法流程

Fig. 3 Process of RPCS algorithm

垂直和沿推扫方向的像元数, $P_{SF_{Camera}}$ 、 $P_{SF_{vibration}}$ 分别表示积分采样和颤振导致的降质 PSF。积分采样的降质 PSF 可以表示为^[17]

$$P_{SF_{camera}} = \text{rect}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right), \quad (2)$$

式中 rect 表示矩形函数。

垂直推扫方向的颤振形成的降质 PSF 可以表示为^[18]

$$P_{SF_{vibration}}(x, y) = \begin{cases} 1/L, & x = 0, 1, \dots, L-1 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 L 为垂直推扫方向的颤振量。沿推扫方向的 PSF 形式与垂直推扫方向是相同的。通过以上分析可知,根据获得的颤振模型,就可以逐像元地求取颤振量,进而求得 $P_{SF_{vibration}}$ 。而根据相机参数、积分时间和卫星参数就可以求出 $P_{SF_{camera}}$,进而根据(1)式计算即可进行卫星影像的降质补偿。

4 客观评价指标

为了验证算法对降质补偿的效果,必须对补偿前后的影像求取指标进行客观评价。客观评价的指标有很多种,须选取适合对降质补偿进行评价的指标进行计算。

4.1 清晰度

清晰度也称平均梯度,指影像上各细节的影纹和其边界的清晰程度,是图像细节边缘变化的敏感程度,能反映图像对微小细节反差表达的能力。在图像细节的边缘处,光学密度或亮度随着位置的变化越敏锐(变化快),越剧烈(反差大),则细节的边缘就越清晰,可辨程度越高。图像清晰度 (EAV, f_{EAV}) 的计算方法为

$$f_{EAV} = \sum_a^b (df/dx)^2 / |f(b) - f(a)|, \quad (4)$$

式中 df/dx 为垂直于边缘的灰度变化率, $f(b) - f(a)$ 为该垂直边缘方向的总对比度。清晰度可以很好的反映影像质量的变化, 影像边缘越清楚, 清晰度值越高。

4.2 细节能量和边缘能量

细节能量和边缘能量从图像频率域的高频分量的角度来描述图像的细节与边缘形状特征。细节能量从图像的局部来评价图像的质量。细节能量 (ME, f_{ME}) 的计算方法为

$$f_{ME} = \frac{1}{n} \sum \sigma_f^2(x, y), \quad (5)$$

式中 $\sigma_f^2(x, y)$ 为区域方差, 表达式为

$$\sigma_f^2(x, y) = \frac{1}{(2M+1)^2} \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x+i, y+j) - m_f(x, y)]^2, \quad (6)$$

式中 $m_f(x, y)$ 表示区域平均灰度值,

$$m_f(x, y) = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x+i, y+j). \quad (7)$$

细节能量是对影像中所有的 $(2M+1) \text{ pixel} \times (2M+1) \text{ pixel}$ 区域的方差总和的平均值, 反映了影像中的细节信息的丰富度。值越大说明影像的纹理越细, 提供的信息越丰富, 影像越清晰。

边缘是影像关于形状特征和细节的重要信息, 是图像的高频信息, 但不同于噪声信号, 它有方向性, 可通过各向异性的滤波器来提取。可以利用 45° 、 135° 两个归一化边缘算子 E_1, E_2 分别对影像进行卷积计算消除方块效应, 相加后得到影像的边缘 $e(x, y)$, 即

$$e(x, y) = E_1[f(x, y)] + E_2[f(x, y)], \quad (8)$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 1/6 & -1/6 & -1/6 \\ -1/6 & 4/6 & -1/6 \\ -1/6 & -1/6 & 1/6 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} -1/6 & -1/6 & 1/6 \\ -1/6 & 4/6 & -1/6 \\ 1/6 & -1/6 & -1/6 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

边缘能量定义为

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n e^2(x, y). \quad (11)$$

影像的边缘能量说明了影像中边缘的丰富度和清晰程度, 边缘能量数值越大, 影像质量越高。

4.3 图像对比度

图像对比度反映了图像中的目标与背景相比可辨认的清晰程度, 对比度越大则图像中的目标信息

就越明显, 所以它对于评价遥感器的质量至关重要。图像对比度大, 图像纹理清晰, 反映的地物目标效果好, 图像质量较好。图像对比度的计算方法为

$$f = \sum_{n=0}^{L-1} n^2 \left[\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j) \right], \quad (12)$$

式中 $|i-j|=n, p(i, j)$ 为归一化的灰度共生矩阵元素。

5 实 验

为了验证本文所提出的方法是否合理, 利用资源三号卫星影像进行了实验。资源三号陆地观测卫星是一颗具备高分辨率、四谱段合一的多光谱、三线阵全色传感器的卫星。四谱段合一和五谱段合一的原理一致, 因此可以用来验证本文算法。由于四谱段缺少了全色波段 (PAN), 因此在匹配的时候只对 B、G 波段, G、R 波段, R、NIR 波段进行辐角相关匹配。实验影像为 2013 年拍摄的北京区域影像 (沿轨方向截取 $3000 \text{ pixel} \times 5000 \text{ pixel}$ 区域, 垂轨方向截取 $5000 \text{ pixel} \times 3000 \text{ pixel}$ 区域), 按 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 扫描块在 B、G 波段, G、R 波段, R、NIR 波段逐行、逐列进行 RPCS 辐角相关匹配, 获取沿轨 y 方向, 垂轨 x 方向的偏移值。三组 x, y 方向的偏移量各自减去各自的固定波段偏移值, 并取平均值作为颤振带来的 x, y 方向偏移值。对 x, y 方向偏移值进行粗差剔除, 并进行数学模型拟合, 从而获取卫星颤振规律。

根据逐像元的颤振量, 进行了最佳模型分析, 正弦余弦波组合能够最佳地反映实际的颤振规律, 模型公式为

$$y = a + b \cos(cx) + d \sin(ex), \quad (13)$$

式中 a, b, c, d, e 为待求系数。

5.1 卫星颤振检测的结果

颤振解算的结果如图 4 所示, 由于颤振数量级为亚像元, 相对于整幅影像的行列大小来说, 是一个微小量。因此为了体现颤振的规律, 图 4 中二维图中的纵坐标单位为 0.1 pixel , 横坐标单位为 10 pixel 。三维图中的 Z 轴单位为 0.1 pixel , X, Y 轴单位为 10 pixel 。

5.2 颤振降质补偿结果的主客观评价分析

根据拟合后的颤振曲面, 对实验影像进行了像质补偿。为了更好地说明颤振补偿的效果, 根据影像积分时间、卫星参数计算了积分采样降质补偿的参数。在颤振补偿前先进行了积分采样的降质补偿, 消除了积分采样对影像的降质。补偿前、积分采样降质补偿后、颤振补偿后的结果如图 5 所示。

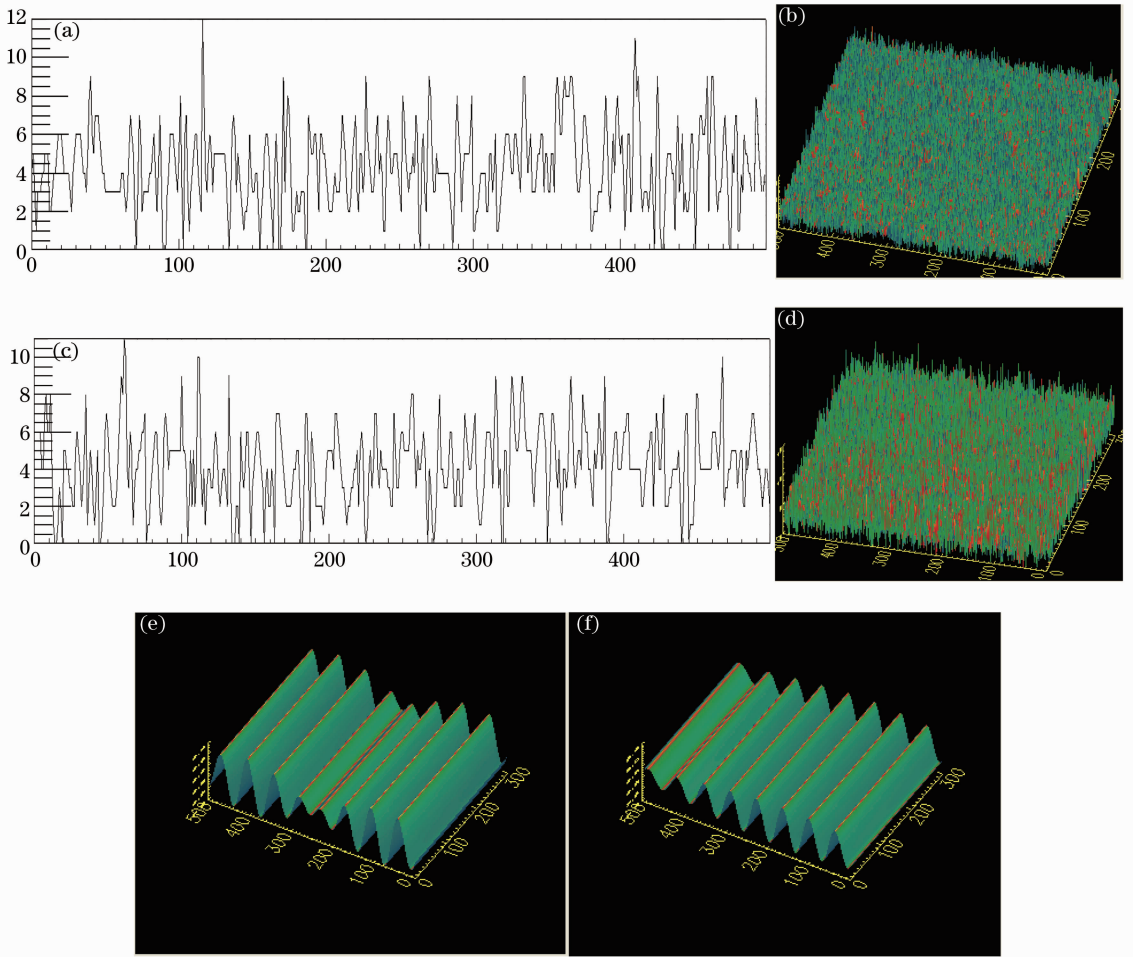


图 4 (a), (b)沿扫描线方向逐像元实测颤振量; (c), (d)垂直扫描线方向逐像元实测颤振量; (e), (f)去除错误点并拟合后的颤振曲面[(e)为沿扫描线方向, (f)为垂直扫描线方向]

Fig. 4 (a), (b) Measured amount flutter along the scanning direction pixel by pixel; [(a) two-dimensional image, (b) three-dimension image]; (c), (d) measured amount flutter along the vertical scanning direction pixel by pixel; [(c) two-dimensional image; (d) three-dimensional image]; (e), (f) flutter curved surface after removal of error and fitting. [(e) along the scanning direction, (f) along the vertical scanning direction]

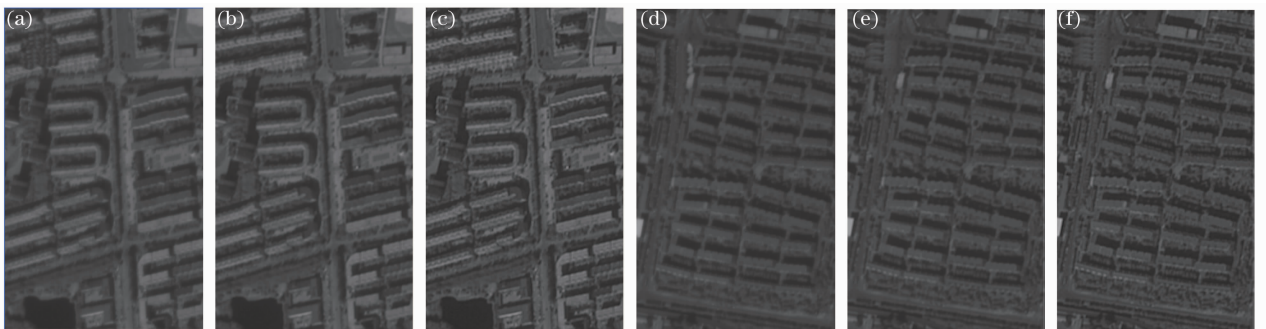


图 5 区域影像(a)、(d)补偿前; (b)、(e)积分采样补偿后; (c)、(f)颤振降质补偿后

Fig. 5 Regional image (a), (d) before restoration; (b), (e) after integral sampling restoration; (c), (f) after flutter reduction restoration

从影像的主观效果来看,补偿后的影像明显比补偿前影像清晰,说明卫星颤振降质得到了较好的补偿。同时,对补偿前的原始影像、积分采样补偿,

颤振降质补偿后影像的清晰度、细节能量、边缘能量、对比度分别进行了计算和客观的评价,如表 1 所示。

表 1 影像客观评价

Table 1 Objective evaluation index of image

Objective index	Origin image	Integral sampling compensation	Flutter compensation
Clarity	16.921	23.203	39.153
Detail energy	24.518	29.635	46.324
Edge energy	7.628	16.874	36.357
Contrast	219.091	439.149	842.165

从上表可以看出补偿后的影像在清晰度、细节能量、边缘能量、对比度上都有大幅度改善。颤振补偿后各项客观指标较补偿前提高约 2 倍,说明本文方法较好地恢复了卫星颤振带来的影像降质。

5.3 补偿结果与 SPOT5 同区域正射影像对比分析

利用 SPOT5 同区域正射影像图进行了横向对比。正射影像图经过了辐射、几何精校正、空三平差等处理,可以认为基本消除了颤振影响。另外在国

外的陆地观测卫星中 SPOT5 的成像方式和资源三号比较接近,可以作为对比的参考。

但是由于资源三号量化等级为 10 Bit, SPOT5 量化等级为 8 bit,量化等级上的不同会导致计算指标的差异,因此在计算时对 SPOT5 影像进行了灰度量化缩放。另外由于条件因素,难以找到同时相的 SPOT5 影像,不同时相的影像在客观指标上会存在差异,因此对比的结果只能作为初步的参考。

表 2 与同区域的 SPOT5 正射影像的客观指标对比

Table 2 Comparison of calculated objective evaluation index from same regional SPOT5 orthophoto

Objective index	Compensation of paper's method	Same regional SPOT5 orthophoto
Clarity	39.153	26.369
Detail energy	46.324	56.231
Edge energy	36.357	19.634
Contrast	842.165	678.368

从上表可以看出,补偿后的影像在对比度、清晰度、边缘能量上好于 SPOT5 北京区域正射影像。虽然资源三号卫星影像本身在地物细节表现上要优于 SPOT5 卫星,但是上表的数据也能侧面反映颤振降质补偿的效果已经达到了预期,后续可以利用同时相的正射影像样本做进一步的横向对比验证。

6 结 论

针对航天卫星颤振引起相机空间移变降质的现象,提出了利用五谱段合一多光谱相机的成像影像来定量检测卫星颤振,并采用 PSF 空间移变降质模型对颤振降质图像进行恢复。针对提出的方法,对资源三号卫星北京区域影像进行了实验。实验结果表明,该方法能有效恢复卫星颤振带来的影像降质。另外,该方法无需在光学卫星上加载任何额外设备,仅利用光学卫星本身的五谱段合一多光谱相机的成像影像即能对卫星的颤振进行检测和恢复。由于五谱段合一的多光谱相机被广泛的应用于航天对地观测领域,因此该方法具有一定的通用性。

参 考 文 献

1 Fan Chao, Li Yingcai, Yi Hongwei. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera [J]. Acta

Photonica Sinica, 2007, 36(9): 1714-1717.

樊超,李英才,易红伟.颤振对 TDICCD 相机像质的影响分析 [J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1714-1717.

2 Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang. An image motion compensation method based on multiphase CCD [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2008, 19(7): 947-951.

刘光林,杨世洪,吴钦章.一种基于 CCD 多电极结构的电子像移补偿方法 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 947-951.

3 Shi Junxia, Xue Xucheng, Guo Yongfei. Effect of satellite vibration on imaging quality of TDICCD camera and compensation method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(12): 11-16.

石俊霞,薛旭成,郭永飞.卫星振动对 TDICCD 相机成像质量的影响及补偿方法 [J]. 光电工程, 2010, 37(12): 11-16.

4 Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, et al.. Image motion velocity field for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0511002.

王 翀,尤 政,邢 飞,等.大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511002.

5 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.

6 Samson J Timoner, Dennis M Freeman. Multi-image gradient based algorithms for motion estimation [J]. Opt Eng, 2001, 40(9): 2003-2016.

7 Shi Junxia, Guo Yongfei, Xue Xucheng, et al.. Motion blurred image restoration of spaceborne TDICCD camera [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2012, 23(3): 572-578.

石俊霞,郭永飞,薛旭成,等.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.
- 8 Gadi Hochman, Yitzhak Yitzhaky, Norman S Kopeika, *et al.*. Restoration of images captured by a staggered time-delay and integration camera in the presence of mechanical vibrations [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(22): 4345—4354.
- 9 Oren Haik, Yitzhak Yitzhaky. Super resolution reconstruction of a video captured by a vibrated time delay and integration camera [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, 15(2): 023006.
- 10 Zhou Hu, Wang Xiaoyong. Restoration of space shift-variant blurred images captured by vibrated spaceborne TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(2): 23—28.
- 周 虎, 王小勇. 航天 TDICCD 相机图像空间移变振动降质的复原 [J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(2): 23—28.
- 11 Xie Bing, Jiao Bingliang. The PSF estimation method and image restoration algorithm based on image motion analysis of space borne TDICCD camera [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 936—940.
- 谢 冰, 焦斌亮. 基于航天 TDICCD 相机像移分析的 PSF 估计及图像复原算法研究 [J]. *宇航学报*, 2010, 31(3): 936—940.
- 12 Wang Biao, Jiang Zhiguo, Zhao Danpei. Research on technologies and quality evaluation for restoring remote sensing motion-blurred image [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 18—25.
- 王 彪, 姜志国, 赵丹培. 遥感图像运动模糊恢复方法及评价标准研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2009, 30(2): 18—25.
- 13 Zhang Fan, Zhu Qidan. Space variant PSF modeling and image restoration for catadioptric/omnidirection vision [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(9): 1396—1401.
- 张 帆, 朱齐丹. 折/反射全方位视觉空间移变点扩散函数建模与图像复原 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(9): 1396—1401.
- 14 Nasreddine Hajlaoui, Caroline Chau, Guillaume Perrin, *et al.*. Satellite image restoration in the context of a spatially varying point spread function [J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(6): 1473—1481.
- 15 Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics image 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.
- 16 Hongshi Yan, Jianguo Liu. Robust phase correlation based feature matching for image co-registration and DEM generation [J]. *Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2008, 3J: 1751—1756.
- 17 Ma Tianbo, Guo Yongfei, Li Yunfei. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2028—2035.
- 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDICCD 的行频精度 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2028—2035.
- 18 B Dhanasekar, B Ramamoorthy. Restoration of blurred images for surface roughness evaluation using machine vision [J]. *Tribology International*, 2010, 43(1-2): 268—276.

栏目编辑：张浩佳