

地球静止轨道凝视成像系统分时积分稳像技术验证

陶小平

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 针对地球静止轨道卫星平台阵凝视成像系统由于平台振动引起的图像模糊问题,提出了基于分时积分亚像元融合的方法来削弱平台颤振引起的图像模糊,提高景物辨识度;设计并搭建了二维振动平台;利用高速图像采集系统采集不同曝光时间条件下、不同振幅、不同频率振动的序列图像;使用基于能量区域质心法的相位相关法进行亚像元图像配准,计算每帧图像相对偏移量,与二维振动平台中的光栅尺位移传感器数据进行对比,验证了配准算法精度优于 0.1 pixel;选择清晰度满足要求的多帧短曝光时间图像进行亚像元融合。与长曝光时间图像对比,融合图像清晰度更高,而信噪比与长曝光图像相当,验证了分时积分亚像元融合对颤振模糊的抑制作用,具备卫星平台应用的基础。

关键词 成像系统;遥感;地球静止轨道;振动抑制;图像配准;图像融合

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s111002

Technology of Vibration Suppression Based on Multiple Integration for Staring Imaging System in Geostationary Orbit

Tao Xiaoping

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Images captured by the staring imaging system in geostationary orbit usually emerge blur because of the satellite vibration in the exposure time. To eliminate the motion blur degradation, the paper proposes to capture multiple short-exposure images and fuse them on sub-pixel scale instead. Image sequences with different conditions are captured by a high-speed camera, cooperated with a vibration simulation system. The sub-pixel displacements between the different frames estimated by image registration algorithm are compared with the motion data measured by the linear encoder. Experimental results indicate that the algorithm precision is better than 0.1 pixel. Several sharpest short-exposure frames are chose for sub-pixel image fusion. Compared with the long-exposure image, the motion blur in the fusion image is weakened. It proves that the method of multiple integration and sub-pixel image fusion is powerful of vibration suppression for staring imaging system in geostationary orbit.

Key words imaging systems; remote sensing; geostationary orbit; vibration suppression; image registration; image fusion

OCIS codes 100.2000; 110.4153; 110.4155

1 引 言

近年来,基于天基卫星平台的对地遥感观测技术应用日趋广泛,在全球气候与自然灾害监测,海冰与海岸线变更监测,农、林、渔业资源监管、城市规划、国防安全等方面都发挥了举足轻重的作用。更高的地面分辨率(GSD)、更大的幅宽、更快的重访率

是各卫星平台成像系统所共同追求的目标。其中,重访率由卫星轨道所决定;幅宽则由轨道高度、成像系统焦距和视场角共同决定;而遥感图像地面分辨率除了受到轨道高度、成像系统焦距和成像传感器像元尺寸的约束外,还受限于光学系统成像质量,以及图像采集曝光周期内的环境工况,如大气湍流、平

收稿日期: 2013-09-01; **收到修改稿日期**: 2013-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 陶小平(1984—),女,博士,副研究员,主要从事遥感成像系统光学设计和检测等方面的研究。

E-mail: taoxp99@163.com

台漂移与颤振等。

地球静止轨道平台,与低轨太阳同步轨道相比,天然具有大幅宽、可连续观测目标区域的优势,但36000 km的轨道高度也限制了其地面分辨率的提升,因此更多地被用于气象观测和通讯应用等方面^[1]。不过随着卫星平台及各项载荷性能不断提升,静轨平台也有望加入高分辨率对地观测的阵营^[2-3]。例如欧空局正在研发的 Geo-Oculus 卫星,其星下点地面分辨率可达 10.5 m,其主要任务是监视欧洲自然灾害、海岸线变更、海水水质、海藻分布等情况^[2]。而其计划为非洲研制的 Africa-Geosat1 卫星星下点地面分辨率也达到了 25 m。

值得注意的是,由于地球静止轨道卫星与地面保持相对“静止”的特征,其对地观测系统的工作谱段覆盖紫外、可见、近红外、短波红外和远红外区域,多谱段成像特性使得某些能量较弱的谱段需要更长的曝光时间方能获取足够信噪比的图像,意味着曝光周期内卫星的姿态漂移和平台颤振将对成像质量有着更为显著的影响,因此“稳定成像”的需求更为迫切^[4-8]。

为了保证曝光周期内像面与地面目标的相对映射关系稳定,一方面对卫星平台姿态稳定度提出了更高的要求,目前国内卫星平台的姿态稳定度约在 $1 \times 10^{-5}/s$ 量级,而国外卫星平台的姿态稳定度已达到了 $1 \times 10^{-6}/s$ 量级;另一方面需要对平台和成像系统内部的颤振进行控制。另外,使用高精度、宽频带传感器实时探测平台颤振^[9-12],然后利用高速反馈系统对颤振进行补偿,也是近年来平台稳像技术的一个探索方向。不过由于高速实时反馈系统的工程应用可靠性等问题,暂时尚未有在轨成功应用的成果发表。

本文设计了二维振动平台模拟卫星平台不同振型、不同振幅、不同频率的振动,利用高速图像采集系统采集不同曝光时间的图像序列,通过对多帧短曝光图像进行亚像元图像配准^[13-16]计算帧间偏移量,探测精度约 0.1 pixel^[16-17],然后对亚像元的偏移量进行补偿和融合,得到与长曝光图像信噪比相当,但清晰度更高的融合图像,验证了分时积分稳像技术的平台应用可行性。

2 分时积分法原理简介

卫星平台漂移和颤振引起的物像映射发生变化可分为沿光轴方向的变化和垂直光轴方向的变化:一般在分析平台颤振时,都将相机镜头和焦平面视

作刚体连接,那么沿光轴方向的振动相当于物距的变化,而物距的微小变化对于 36000 km 的轨道高度来说是小量,因此沿光轴方向的变化可忽略不计;而垂直光轴方向的变化则表现为像面相对于地面标的物的平移或者旋转。若像面发生平移,则像面每一点的偏移量都是相同的;若像面沿某对称轴旋转,将引起旋转中心和旋转半径不同的区域偏移量均不相同。不过,在实际应用中,像面旋转角度很小,此时可选择局部小区域计算偏移量,在该小区域内仍可视各点偏移量相同,即相当于平移运动。

考虑到缩短曝光时间采集的序列图像所存在的平均亮度降低、信噪比(SNR)降低等问题,在先期的仿真研究中提出了基于能量区域质心法的相位相关法^[16]进行图像帧间偏移量探测。该方法是利用参考图像与被测图像的互相关频谱来找到相关峰之间的距离从而确定图像间相对偏移量,其优点包括对场景光照变化不敏感,对噪声、少量云层遮挡等干扰也有明显抑制作用。文献[16]中的仿真实验结果表明,对于城市、海滨、林地、沙漠等各类典型遥感图像,信噪比从 55 dB 降至 15 dB,配准算法精度并未下降,探测出的偏移量估计偏差均值均优于 0.1 pixel,满足卫星平台振动探测需求。其具体思路如下。

假设振动过程中的当前图像 $I_2(x, y)$ 与参考图像 $I_1(x, y)$ 的相对偏移量为 x_0, y_0 , 则

$$I_2(x, y) = I_1(x - x_0, y - y_0). \quad (1)$$

根据傅里叶变换平移定理,可知图像在空域中的平移在傅里叶变换域上将呈现出相位的变化:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \exp[-i(ux_0 + vy_0)]. \quad (2)$$

因此两平移图像的归一化互相关功率谱可表达为

$$F_{\text{Corr}}(u, v) = \frac{F_2(u, v)F_1^*(u, v)}{|F_2(u, v)F_1^*(u, v)|} = \exp[-i(ux_0 + vy_0)], \quad (3)$$

从(3)式中可以看出归一化互相关谱仅与平移量 x_0, y_0 有关,找到互相关谱的最大值所在位置即可得到偏移量 x_0, y_0 。而且注意到相位 $\exp[-i(ux_0 + vy_0)]$ 的逆傅里叶变换是平移的 Dirichlet 脉冲函数,脉冲偏移位置即为平移量 x_0, y_0 :

$$\mathcal{F}\{\exp[-i(ux_0 + vy_0)]\} = \delta(x - x_0, y - y_0). \quad (4)$$

若平移量 x_0, y_0 是整数,那么离散的脉冲函数极大值所处的位置 x_0 和 y_0 。不过在平台振动的实际应用中亚像元的偏移更为常见,于是,为了在脉冲峰值区域进行更准确的亚像元定位,同

时更好地适应脉冲峰值不对称的情形,提出用种子生长法搜索峰值附近最外围像素能量衰减为主峰的0.1%的区域代替普通的峰值位置4连通域或8连通域,然后在该区域中采用质心法来估计亚像素的偏移量。其中质心算法表达为

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_i I(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j)}, \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_j I(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j)}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 M, N 为质心计算区域的长和宽。

计算出亚像元级的偏移量后,即可按预定的精度进行归整化处理(偏移量与 k 相乘后取整),然后进行 k 倍的插值上采样,在整像元偏移量的大尺度图像上完成平移配准,补偿各帧之间的随机偏移,再进行 k 倍积分下采样回到原图像尺度,多帧融合之后即得到清晰度提高,信噪比亦满足应用需求的图像。

多帧融合图像的像质除了受到图像配准算法的精度、偏移量的规整化处理,以及图像上、下采样插值算法的保真度等方面的影响之外,单帧图像的清晰度也是关键因素之一。曝光时间内运动速度大,位移大则模糊程度大,反之则小。若应用中允许有一定的图像数据冗余,则可以采集比预定帧数更多

的图像,利用均值偏差(MSE),灰度平均梯度(GMG),或最大熵(LE)等算法自动选择其中清晰度最高的几帧图像进行融合以获得更好的最终像质。

3 分时积分法稳像实验平台

面阵凝视成像系统分时积分法稳像实验平台主要包括振动仿真系统和图像采集系统。由于物像共轭关系,卫星平台及成像系统颤振可等效为物面的振动。于是设计了如图1中所示的二维物面振动平台,由信号发生器、功率放大器、模态激振器、振动传递簧片、二维平面导轨、目标图像面板、振动监测光栅尺位移传感器、配重气缸和大理石底座组成。其中,信号发生器可以产生正弦波、三角波、方波、随机波及自定义函数等各种波形,也可输入任意卫星平台功率谱波形,可调节波形频率和振幅,可控制二维波形同相位或随机相位。信号输出后经功率放大送至模态激振器转换为两维振动,经振动簧片传递至固定在二维平面导轨上的目标图像面板,以此来模拟物面不同频率(如0.1~100 Hz)、不同振幅(如0~5 mm)、不同振型的振动。振动位移数据被光栅尺实时采集,可与第2节中图像配准算法计算值相对比,验证算法精度。



图1 分时积分法稳像实验平台

Fig. 1 Experimental platform for vibration suppression based on multiple integration

图像采集系统包括德国 Schneider 公司 XENON-EMERALD 2.2/50 mm 定焦镜头和 Mikrotron 公司 MC1360 高速互补金属氧化物半导体(CMOS)成像传感器,CMOS 探测器分辨率为 1280 pixel×1024 pixel,像元尺寸为 14 μm ×14 μm ,最高采样频率为 110 frame/s。

实验时使用直流 LED 阵列照明光源,二维振动平台图像面板距离图像采集系统约 0.8 m,定焦镜头焦距 50 mm,那么成像系统放大倍率约为 1/16,0.1 pixel 转换到物面即为 22.4 μm 。光栅尺精度高于该数据一个数量级,满足振动数据监测的需要。

4 实验与分析

4.1 成像系统放大倍率标定

按照第3节所述搭建实验光路,开启LED直流光源,调整光源亮度、镜头光圈及相机曝光时间,直至采集到全视场均匀照明、亮度适中的图像。由于实验平台是采用物面振动的方法模拟成像系统颤振,光栅尺探测的亦是物面振动数据,因此还需计算系统放大倍率来确定物面—像面偏移量的转换关系。

理论上,从几何光学成像关系出发,根据物距和像距即可计算成像系统放大倍率,不过由于无法确知所使用的商业镜头的主面位置,因此也无法得到

表1 放大倍率标定数据表

Table 1 Calibration table of magnification ratio

Object distance /mm	A	B	Image distance /pixel	Z_{Beta}
20	(154.99,58.96)	(246.00,58.93)	91.01	1/15.697
30	(133.04,197.02)	(269.01,197.03)	135.97	1/15.759
40	(109.95,333.97)	(291.97,334.01)	182.02	1/15.697
50	(87.95,470.94)	(315.97,471.04)	228.02	1/15.663
60	(65.94,609.02)	(339.99,606.95)	274.06	1/15.638



图2 放大倍率标定点状目标组

Fig. 2 Point-pair test target for magnification calibration

从表中可以看出,10 mm物面距离大约对应像面45 pixel。取各组放大倍率值计算均值,可得系统放大倍率 Z_{Beta} 为 $1/15.691 \approx 0.064$ 。

4.2 不同振动输入,连续图像采集、配准,验证算法精度

开启二维振动台及光栅尺位移传感器,调节信号发生器输出两维振动信号,分别设置两维振动类型及信号频率、振幅,调整功率放大器,目标图像面板将沿水平X方向和竖直Y方向开始运动。以正弦振动为例,图3展示了光栅尺所探测的约5个周期的物面振动情况。其中蓝色实线是X轴振动曲线,红色虚线是Y轴振动曲线,振幅分别为0.75 mm和0.51 mm。按照放大倍率标定实验中的标定系数 Z_{Beta} ,将物面振动振幅换算到像面:

物距、像距的准确估计,不能满足像面微米量级偏移估计精度的要求。于是考虑对已知物理距离的点对成像,再利用质心法计算图像中点对位置和相对距离,从而以物高和像高来确定系统放大倍率,具体方法如下:

在物面放置点状目标图板,如图2所示,自左至右,由上下两点 $A_1-B_1, A_2-B_2, A_3-B_3, A_4-B_4, A_5-B_5$ 组成的五组点对,其物理距离分别为20,30,40,50,60 mm。采集该图板图像,按组搜索各点状目标所在区域,利用质心法精确定位各点位置。各点坐标及相对距离如表1所示,其中图像采集系统所使用CMOS像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 。

$$\frac{(D_{\max} - D_{\min}) \times Z_{\text{Beta}}}{p} = \begin{cases} \frac{748.5 \mu\text{m} \times 0.064}{14 \mu\text{m}} \approx 3.4 \text{ pixel} \\ \frac{506.5 \mu\text{m} \times 0.064}{14 \mu\text{m}} \approx 2.3 \text{ pixel} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 D_{\max} 和 D_{\min} 分别表示振动位移探测值的最大值和最小值, p 是成像传感器像元尺寸。

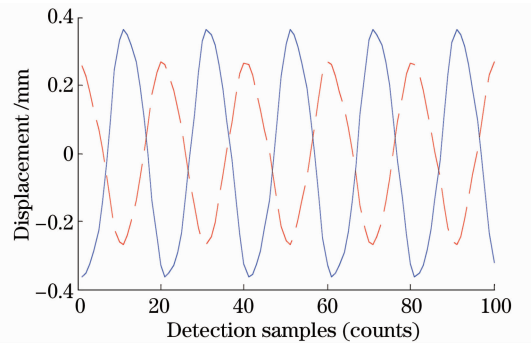
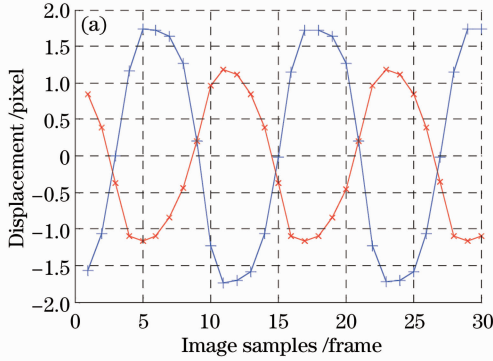


图3 光栅尺探测位移数据

Fig. 3 Vibration detection data of grating scale

以振动频率5 Hz和10 Hz为例,设置成像系统曝光时间为16 ms,以60 frame/s帧速率连续采集30帧图像,对图像序列进行配准,计算各帧相对偏移量,偏移曲线如图4所示。其中蓝色‘—+’曲线表示X方向偏移量,红色‘—×’曲线表示Y方向偏移量。图4(a)为5 Hz振动时图像序列的配准曲线,

两维方向上的振幅分别为 3.4 pixel 和 2.3 pixel,与光栅尺探测数据一致。图 4(b)为 10 Hz 振动时图像序列的配准曲线,其表征的图像两维最大偏移量分别为 3.2 pixel 和 2.3 pixel,其中 X 方向与实际振幅数据存在少量差距。这是由于图像采集初始相位的随机性,



图像序列未能采集到正弦曲线的峰-谷值点,因此其最大最小位移点之间的偏差会略小于振动曲线的实际振幅。根据曲线峰值数据变化趋势,仍可认为图像配准算法精度约为 0.1 pixel。

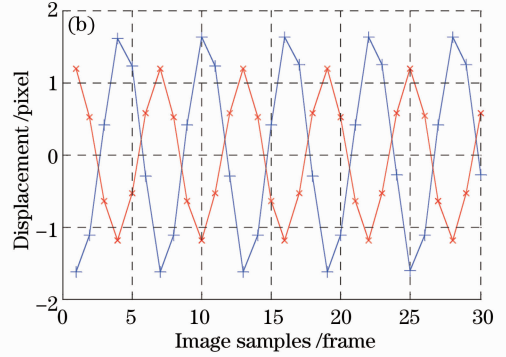


图 4 (a) 振动频率为 5 Hz 时,图像序列配准曲线; (b) 振动频率为 10 Hz 时,图像序列配准曲线

Fig. 4 (a) Image registration plot of 5 Hz vibration image sequence; (b) image registration plot of 10 Hz vibration image sequence

4.3 短曝光序列图像亚像元融合

从图 4 中还能看出,位于曲线中值附近的两点距离相隔较远,而峰值附近两点则相隔较近,这也意味着两个位置运动速度不同,采集图像清晰程度不

同。单帧图像清晰度越高,亚像元融合后图像清晰度自然越高,因此借助灰度平均梯度法(GMG)来选择图像序列中清晰度最高的帧,其定义如下:

$$D_{\text{GMG}} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[I(i+1,j) - I(i,j)]^2 + [I(i,j+1) - I(i,j)]^2}{2}}, \quad (7)$$

式中 M 、 N 分别为图像的长和宽。对于相同平均灰度的同一目标图像,GMG 值越大,图像清晰度越高。算法自动选择 GMG 值最大的图像进行亚像元

融合,然后使用 0.2 pixel 精度对亚像元偏移量进行规整化处理,使用立方插值法进行 5 倍插值,在得到的大尺度图像上完成整像元偏移量的配准补偿,然

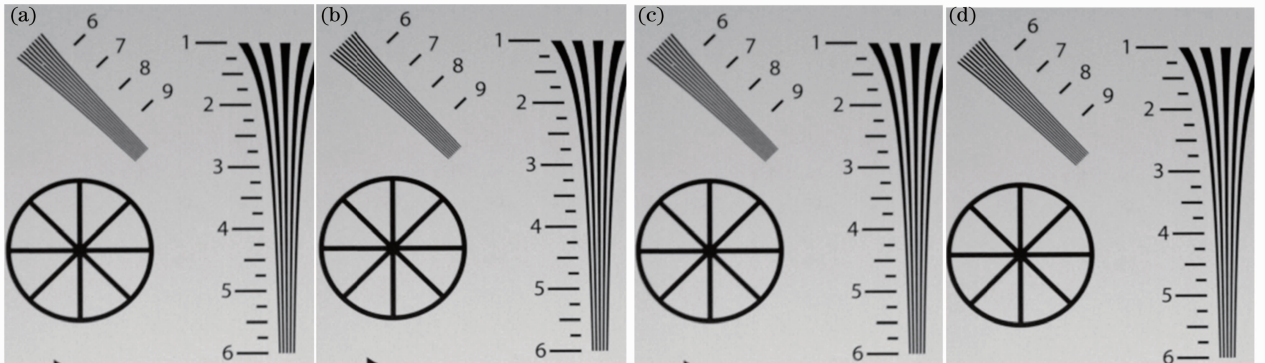


图 5 长曝光图像与短曝光融合图像对比。(a) 振动频率为 5 Hz,长曝光 16 ms 时采集图像;(b) 振动频率为 5 Hz,短曝光 11 ms 时多帧融合图像;(c) 振动频率为 10 Hz,长曝光 16 ms 时采集图像;(d) 振动频率为 10 Hz,短曝光 11 ms 时多帧融合图像

Fig. 5 Comparison of single long-exposure image and fusion of short-exposure image sequence. (a) Single frame of 16 ms long-exposure image with 5 Hz vibration; (b) image fusion of 11 ms short-exposure image sequence with 5 Hz vibration; (c) single frame of 16 ms long-exposure image with 10 Hz vibration; (d) image fusion of 11 ms short-exposure image sequence with 10 Hz vibration

后积分采样回到原图像尺度,多帧融合得到消除长曝光运动模糊的图像。图 5 是短曝光融合图像与长曝光图像的对比,可以看到 5 Hz 和 10 Hz 振动时短曝光融合图像都显示出分时积分法的优势:图 5(a)可分辨至约第 8.5 组线对,图 5(b)的短曝光多帧融合图像可分辨超过第 10 组线对;图 5(c)的振动频率更高,曝光时间内偏移量更大,因此清晰度略小于

表 2 图 5 中长曝光图像与短曝光融合图像清晰度评价

Table 2 Definition assessment of long-exposure image and fusion of short-exposure image in Fig. 5

	Fig. 5(a)	Fig. 5(b)	Fig. 5(c)	Fig. 5(d)
MSE	4.562×10^3	4.729×10^3	4.535×10^3	4.677×10^3
GMG	9.840	10.76	9.698	10.52
LE	1.952	1.944	1.953	1.945

在实验中为方便展示运动曲线,采集图像时采用了 60 frame/s 高速连续采集模式。不过在卫星平台应用时,超大画幅的海量数据读取与存储并不允许这样的高速连续采集,不过由于地球静止轨道的“相对凝视”特性,可以间隔一定时间后再进行下一帧图像的采集。短曝光时间、采集时间间隔和图像帧数可以根据轨道工况,平台姿态,成像系统光能收集与转换效率,成像传感器光谱响应、动态范围与信噪比,星上存储与传输能力,电路瞬时功率与热控等因素进行综合权衡来选择。其中,多帧图像采集所引起的数据量倍增问题,可以通过对任务目标(如火灾、赤潮、石油泄漏等重点监视区域)进行局部区域的图像亚像素配准和融合予以解决。相较于全画幅图像(如 $10 \text{ k} \times 10 \text{ k}$)的数据量,局部区域图像(如 256×256)的数据量只有全局的 $1/1600$,其多帧存储和传输可以为目前的硬件平台所接受。

5 结 论

对于地球静止轨道卫星平台凝视成像系统,为保证各波段图像信噪比,其成像所需曝光时间相较于低轨太阳同步轨道卫星成像系统更长,积分时间内的平台稳定性对遥感图像清晰度有较大影响。基于静止轨道长时段凝视成像特性,提出了分时积分法对多帧短曝光图像进行亚像素配准融合的方式来削弱平台振动引起的像质模糊;设计了振动仿真平台和高速图像采集系统并进行了实验;实验中利用点对目标图板进行成像系统放大倍率标定;采集图像序列进行亚像素配准,所计算出的帧间偏移量与高精度光栅尺位移传感器探测数据对比,验证了图像配准算法精度优于 0.1 pixel;模拟不同振型、不同振幅、不同频率的颤振工况,调节成像系统曝光时

图 5(a),可分辨至约第 8 组线对,而经融合之后的图 5(d)也可分辨超过第 10 组线对。与 16 ms 长曝光图像相比,11 ms 短曝光融合图像清晰度明显提高,更符合人眼观察与判读的要求。表 2 是 4 幅图像的清晰度评价,其中 MSE 和 GMG 算法均是评价价值越大图像越清晰,LE 算法是评价价值越小图像越清晰,与主观判读相符。

间,对比长、短曝光图像清晰度的变化;选择短曝光序列图像中清晰度较高的图像完成亚像素融合;验证了分时积分法多帧短曝光融合图像相对长曝光图像清晰度的提升,为该方法在卫星平台的实施提供了应用基础。

参 考 文 献

- Guo Linghua, Deng Zheng, Tao Jiasheng, *et al.*. Preliminary research on development of foreign GEO remote sensing satellites [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(6): 23-30.
- 郭玲华, 邓 峥, 陶家生, 等. 国外地球同步轨道遥感卫星发展初步研究[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(6): 23-30.
- L Vaillon, U Schull, T Knigge, *et al.*. GEO-OCULUS: High resolution multi-spectral earth imaging mission from geostationary orbit [C]. *International Conference on Space Optics*, 2010.
- M Mesrine, E Thomas, S Garin, *et al.*. High resolution earth observation from geostationary orbit by optical aperture synthesis [C]. *6th International Conference on Space Optics*, 2006.
- P Blanc, G Monroig. Numerical line of sight stabilization for high resolution earth observation from high orbits [C]. *6th International Conference on Space Optics*, 2006.
- Thomas Dresner, Larry Freier, Tze-Thong Chien, *et al.*. Design of a space telescope for vibration control [C]. *SPIE*, 1994, 2264: 82-92.
- Morio Toyoshima, Yoshihisa Takayama, Hiroo Kunimori. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(8): 1-10.
- Morio Toyoshima, Kenichi Araki. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment [J]. *Opt Eng*, 2001, 40(5): 827-832.
- Gray Mosier, Mike Femiano, Kong Ha, *et al.*. Fine pointing control for a next generation space telescope [C]. *SPIE*, 1998, 3356: 1070-1077.
- Wang Shaoyun. The Analyse of Imaging Quality of the Optical System in Geostationary Orbit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- 王少游. 地球静止轨道区域凝视光学系统成像性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- Takanori Iwata. Precision attitude and position determination for the advanced land observing satellite (ALOS) [C]. *SPIE*, 2005, 5659: 34-50.

- 11 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(3): 333–347.
- 12 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko, *et al.*. Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop [C]. *SPIE*, 2004, 5570: 280–288.
- 13 Manuel Guizar-Sicairos, Samuel Y Thurman, James R Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(2): 156–158.
- 14 Pan Bing, Xie Huimin, Xu Boqin, *et al.*. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Meas Sci & Technol*, 2006, 17(6): 1615–1621.
- 15 Hassan Foroosh, Josiane B Zerubia, Marc Berthod. Extension of phase correlation to subpixel registration [C]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(3): 188–200.
- 16 Tao Xiaoping, Xue Donglin, Li Fazhi, *et al.*. Vibration suppression based on multiple integration and sub-pixel image fusion for imaging system in geostationary orbit [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1359–1364.
陶小平, 薛栋林, 黎发志, 等. 基于分时积分亚像素融合的地球静止轨道平台消颤振技术[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1359–1364.
- 17 Tao Xiaoping, Luo Xiao, Xue Donglin, *et al.*. Vibration suppression based on multiple integration for staring imaging system in geostationary orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2169–2179.
陶小平, 罗霄, 薛栋林, 等. 地球静止轨道面阵凝视成像系统分时积分抑振技术[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 2169–2179.

栏目编辑：韩峰