

doi: 10.3788/gzxb20124111.1359

基于分时积分亚像元融合的地 球静止轨道 平台消颤振技术

陶小平, 薛栋林, 黎发志, 闫锋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:相较于低轨卫星线阵扫描成像模式, 地球静止轨道面阵成像的曝光时间相对更长, 更容易受到平台颤振的影响而造成图像模糊. 为了消除由平台颤振引起的像质退化, 本文提出了基于分时积分亚像元融合的方法. 由于地球静止轨道的凝视成像特性, 相机观察区域在长时间内保持不变, 因此分时短曝光可以获得多帧目标内容相同, 但模糊尺度更低的短曝光图像. 然后对多帧短曝光图像采用基于能量区域质心法的相位相关算法进行亚像元图像配准, 计算相对偏移量并进行补偿, 位移探测准确度可达 0.1 像元以内, 满足卫星平台应用需求. 再按亚像元偏移量对多帧图像进行融合, 融合的过程可以提升由于曝光时间缩短而降低的单帧图像信噪比, 最终可以获得图像清晰度更高、信噪比与原长曝光图像相当、信息辨识度更好的遥感图像.

关键词:遥感图像处理; 地球静止轨道; 振动探测; 图像配准; 图像融合

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)11-1359-6

0 引言

自 20 世纪中期以来, 基于卫星平台的对地观测技术研究逐步展开, 高分辨率、大幅宽的连续对地观测在气象、自然灾害监测、农、林、海洋、矿产资源监测, 以及军事国防应用方面都有重要的战略意义. 目前的对地观测卫星平台大多采用太阳同步轨道, 而地球静止轨道由于其轨道高度较高(36 000 km), 难以获得高的地面采样分辨率(Ground Sample Distance, GSD), 因此更多地用于气象观测和通讯应用方面^[1]. 然而随着卫星平台各项载荷性能的不 断提高, 拥有大幅宽、能够对同一区域进行连续观测优点的静止轨道卫星平台也有望逐步克服地面分辨率较低的缺点, 在对地观测技术方面发挥更重要的作用^[2-3]. 要获得高分辨率的遥感图像, 除了光学载荷本身的设计之外, 载荷平台本身的姿态稳定度也是非常重要的, 在相机曝光周期内的平台振动势必会引起图像的模糊. 而且与中低太阳同步轨道常用的线阵推扫成像模式相比, 地球静止轨道面阵凝视成像模式所需的积分时间相对更长, 曝光时间内的振动控制更为重要^[4-8].

目前的研究认为, 卫星平台的振动主要源自于太阳帆板的振动, 调姿发动机及动量轮的姿态调整

和振动. 其中, 太阳帆板引起的振动主要在低频 1~2 Hz 附近, 调姿发动机和动量轮引起的振动一般在 10~30 Hz 范围内, 还有部分 100 Hz 以上微小振幅的高频振动^[5-6,9]. 为了保证由振动引起的相机调制传递影响因子 (Modulation Transfer Function, MTF) 在 0.95 以上, 要求在线性运动时, 目标像在成像传感器上的相对位移不超过 0.3 像元; 随机振动时, 相对位移不超过 0.1 像元^[4,9]. 要在如此宽频带范围内对卫星平台进行高准确度的振动探测, 传统的基于惯性陀螺、角加速度计的探测方式已很难满足需求. 日本 ALOS 卫星采用了磁流体动力学传感器 (Magneto Hydro Dynamic, MHD), 在 1~1 000 Hz 频带范围内, 其探测准确度可达 0.01 arc sec^[10]. 而欧空局 Janschek 所在研究小组则尝试利用光学联合相关器进行振动探测, 实验室环境下的探测速率高于 500 Hz, 像移探测均方误差小于 0.05 像素^[11-12]. 然而国内尚无法获取相关器件和设备.

为了解决长曝光时间内平台振动引起的图像模糊问题, 基于地球静止轨道平台在不进行姿态调整的情况下长时段凝视成像特性, 本文提出了通过缩短曝光时间分时获取多帧短曝光图像, 然后使用基于能量区域质心法的相位相关算法探测图像帧间位移并结合亚像元图像融合的方法来提升像质. 通过

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61036015)重点项目资助

第一作者: 陶小平(1984-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为遥感成像链路仿真及遥感图像处理. Email: TaoXP99@gmail.com

收稿日期: 2012-02-17; **修回日期:** 2012-04-24

对各帧短曝光图像进行亚像元的配准,图像帧间偏移量的探测准确度可达 0.1 像元以内^[13-15],即多次积分引起的模糊量可控制在 0.1 像元以内,能够满足卫星平台应用需求.对亚像元的偏移量进行补偿和融合,图像清晰度较之长曝光时间图像更好,符合人眼观察与判读的要求.

1 亚像元振动探测

卫星平台颤振引起的物像映射关系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.一般假设像面和相机为刚体连接,沿光轴方向的振动相当于物距的变化,而相机焦距对于轨道高度 36 000 km 的物距来说很小,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,即像面相对于地面标的物的平移或者旋转,在实际应用当中,像面的旋转量很小,因此一般认为卫星平台颤振主要会引起像面的平移振动,低频多表现为线性运动,高频多表现为正弦运动.本文主要针对像面的微平移运动进行讨论.

如前所述,要在 1~200 Hz 的宽频带范围内对卫星平台进行亚像元的振动探测,国内尚无法获取 MHD 流体动力学传感器,光学联合相关器等高精度硬件探测设备.本文拟采用基于图像配准的软件方法来探测平台振动.目前基于图像来计算相对偏移量的算法主要包括基于图像块信息、图像特征信息、像素灰度信息和相位信息的图像配准四类.其中基于图像相位信息的方法^[15]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,这种方法对场景光照变化不敏感,对噪音、遮挡等干扰也有明显抑制作用,可达到亚像元级估计准确度.由于图像曝光时间缩短势必带来信噪比降低的问题,综合考虑算法对低信噪比图像的计算准确度和速度,本文选用了基于图像相位信息的方法来进行亚像元的振动探测.

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,即

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

因此两平移图像的归一化互相关功率谱可表达为

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

从式(3)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 $\exp(-i(ux_0 + vy_0))$ 的傅里叶逆变换是平移的 Dirichlet 脉冲函数,脉冲峰值位置即为平移量 x_0, y_0 .

$$F(\exp(-i(ux_0 + vy_0))) = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (4)$$

以城市遥感图像图 1(a) 和 (b) 为例,两者存在一定偏移,对两幅图像计算归一化互相关谱,再进行傅里叶逆变换,如图 2 所示,脉冲峰值远高于曲面其他起伏,搜索出该最大值位置即可获得图像的相对偏移量.

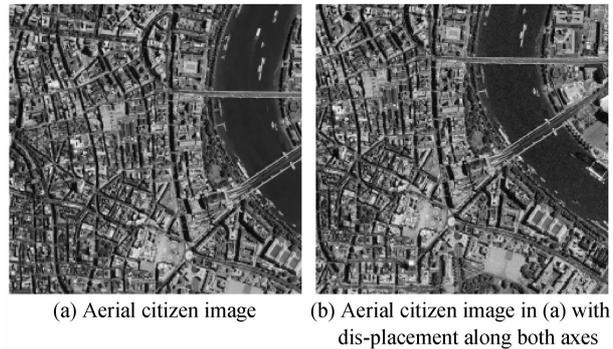


图 1 位置发生偏移的两幅遥感图像

Fig. 1 Aerial citizen image with displacement along both axes

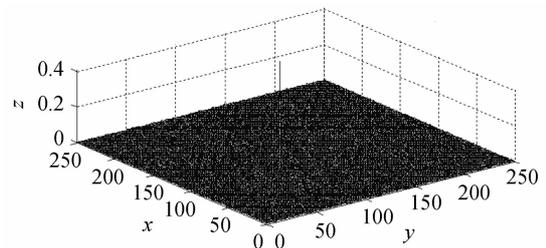


图 2 图 1 中两幅遥感图像的相关峰

Fig. 2 Phase correlation of the two images in Fig. 1

若平移量 x_0, y_0 是整数值,那么离散的脉冲函数极大值所处的位置 x_δ 和 y_δ ,即为 x_0 和 y_0 .然而平台振动的实际应用中亚像元的偏移量是极为常见的,整数的偏移量估计值不足以满足应用需求.本文提出用种子生长法寻找峰值附近最外围像素能量衰减为主峰的 0.1% 的区域,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.

利用种子生长法搜索的峰值能量区域,较之直接使用峰值位置 4 连通域或 8 连通域,可以更好地适应脉冲峰值邻域不对称的情形,提高偏移量计算准确度.对城市、林地、海滨和沙漠等四类典型遥感图像进行仿真实验测试,基于能量区域质心法的相

位相关算法所探测出的像移偏差均值都小于 0.1 像元,满足平台振动探测需求.

以图 1 (a)中的城市图像为例,首先生成 20 组随机整数偏移量,对 1 000×1 000 像素的大尺度图像进行偏移,模拟 20 个时刻所获得的大尺度像面图像;然后对 20 幅图像进行 k 倍(实验中取 $k=4$)的积分,模拟成像传感器的离散采样,如此获得的 $1/k$ 小尺度图像(250×250 像素)即包含 $1/k$ 倍的亚像元偏移.

$$I_{CCD}(m,n) = \sum_{i=mk}^{(m+1)k-1} \sum_{j=nk}^{(n+1)k-1} I(i,j) \quad (6)$$

使用基于能量区域质心法的相位相关法进行图像帧间偏移量探测,与给定的偏移量对比,即可描绘出算法的估计偏差曲线.由于曝光时间的缩短将引起像面照度降低,相应的,图像信噪比也将降低.为验证算法对短曝光图像的适应性,实验中采用降低图像平均灰度,加入相同大小噪音的方法来仿真短曝光图像.

图 3 给出了 20 组随机平移城市图像在信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)分别为 55 dB 和 15 dB 时算法的计算误差:图像 SNR 为 55 dB 时, X 方向估计偏差均值为 0.067 0, Y 方向为 0.058 1;图像 SNR 降低至 15 dB 时, X 方向估计偏差均值为 0.049 6, Y 方向为 0.057 9.可以看到信噪比的降低并不影响算法计算准确度,探测出的偏移量估计偏差均值都优于 0.1 像元.更多的实验结果与分析可参见本文第 3 节.

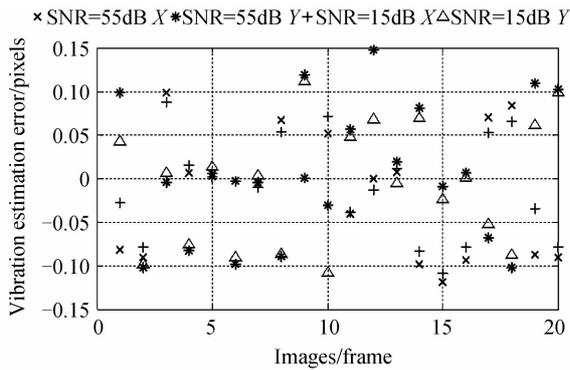


图 3 20 组随机平移城市图像时振动探测估计偏差分布(SNR=55 dB 和 15 dB 时)

Fig. 3 Vibration estimation error of 20 citizen images with different displacements(when SNR of the image is equal to 55 dB or 15 dB)

2 亚像元振动模糊图像像质提升

探测出各帧短曝光图像的相对偏移之后,有两种方法可以提升获取图像像质.一是利用图像帧间偏移量描绘出平台振动轨迹,构造长曝光图像的退化函数,对其进行图像复原;二是对图像帧间偏移量进行补偿,经过偏移补偿融合后的图像其模糊尺度

将小于相同振动条件下的长曝光图像,即图像清晰度提升.方法一需要长曝光图像和短曝光图像同时采集,保证振动条件的一致性,但多帧短曝光图像连续采集引起的数据量倍增将给成像电路的读取、传输、存储和热控带来巨大压力;而考虑到地球静止轨道凝视成像特性,在卫星平台不调整姿态的情况下观察对象恒定,方法二允许各帧短曝光图像之间存在一定的采集时间间隔,能够缓解硬件设备压力.另外,由于缺乏各偏移点的准确驻留时间及图像帧间运动两点之间的运动矢量信息,方法一获得的图像退化函数准确度不易保证,这可能引起图像复原出现伪信息而影响目标信息的识别,具有一定的应用风险性,因此本文选用第二种方法完成亚像元振动模糊图像的像质提升.

由于图像的相对偏移是亚像元的,需要对亚像元级的偏移量按预定的准确度进行归整化处理(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.

图 4(a)是单帧短曝光图像,由于曝光时间太短,像面照度低,无法分辨细节信息;若对其进行对比度拉伸处理,如图 4(b)所示,图像亮度提升了,但噪音也相应的放大了,不利于信息的识别;将多帧短曝光图像进行融合,得到图像 4(c),可发现信噪比

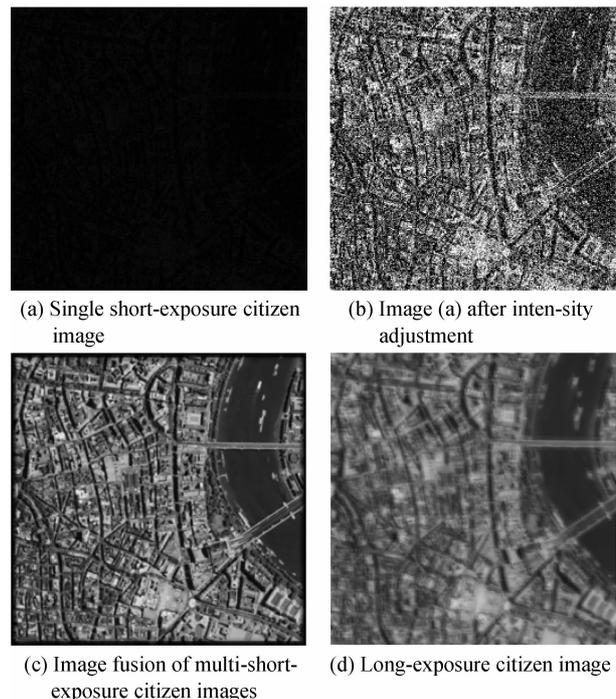


图 4 短曝光图像和长曝光图像对比

Fig. 4 Comparison of short-exposure citizen image and long-exposure citizen image

有明显的改善,而且相较于长曝光图像 4(d),多帧短曝光融合图像 4(c)的清晰度也有很大提升.

多帧融合图像的最终像质取决于图像配准的准确度、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.值得注意的是,每幅短曝光图像假设没有振动引起的模糊(即对可接受的颤振幅度采样频率已足够),若仍存在抖动模糊,融合图像不能消除该模糊,需借助图像复原、图像增强技术进一步进行处理以提升像质.

3 实验结果与分析

对更多类型的遥感图像,如林地、沙漠和海滨等进行仿真实验测试,如图 5.使用改进的相位相关法对 20 组随机偏移的图像进行振动探测,探测结果的估计偏差分布如图 6,估计偏差均值如表 1.可以看到林地湖泊遥感图像及含建筑物的沙漠边缘区域遥感图像,与城市遥感图像的探测准确度相仿,峰谷值(Peak-Valley,PV)值均小于 0.12 像元,均方根值(Root Mean Square,RMS)值优于 0.1 像元;而仅包含少量海港堤坝,大面积均为海面的海滨图像准确度稍低,PV 值达到了 0.3 像元,RMS 值略高于 0.1 像元.对于 55 dB 和 15 dB 不同信噪比图像进行测试,所得结论相同.这意味着成像系统曝光时间的缩短带来的图像信噪比降低并不会影响图像配准算法的准确度,但对于包含细节信息较少的图像,算法的准确度稳定性会有所降低.因此进行图像配准的计算,一般应尽可能选取细节丰富的区域进行.

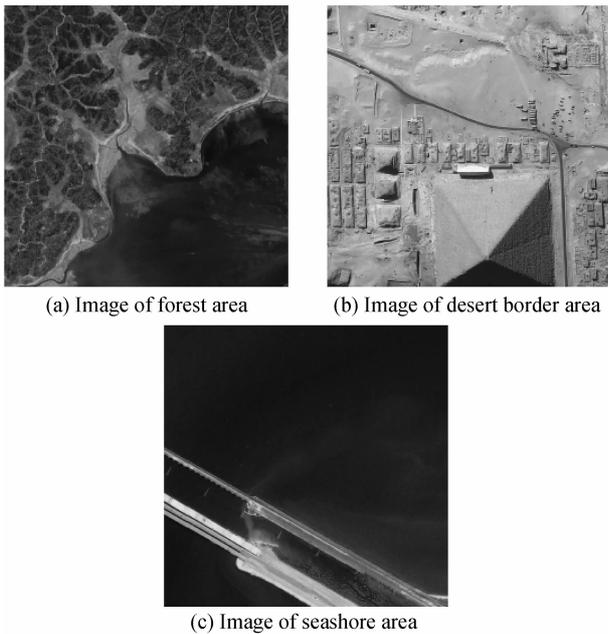


图 5 林地湖泊遥感图像、含建筑物的沙漠边缘区域遥感图像以及海滨遥感图像

Fig. 5 Image of forest area, desert border area and seashore area

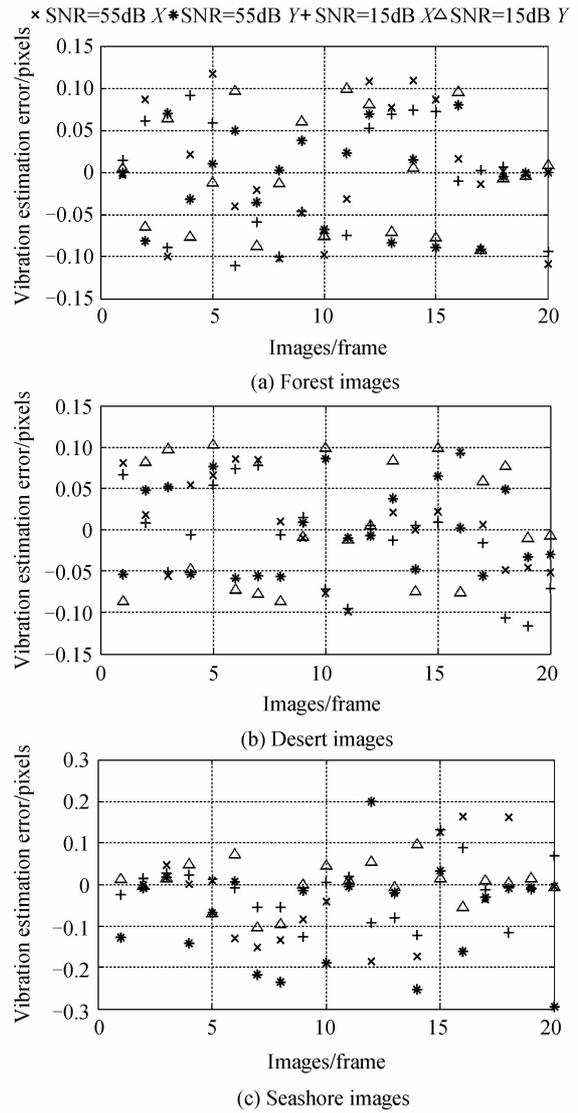


图 6 20 组随机平移林地、沙漠和海滨图像振动探测估计偏差分布(图像 SNR=55 dB 和 15 dB 时)

Fig. 6 Vibration estimation error of 20 forest, desert and seashore images with different displacements(when SNR of the image is equal to 55 dB or 15 dB)

表 1 多种遥感图像二维方向估计偏差均值

Table 1 2-Dimensional vibration estimation mean errors of different images with different SNR

	SNR=55 dB		SNR=15 dB	
	X	Y	X	Y
Forest area	0.059 6	0.042 2	0.058 0	0.054 8
Desert border area	0.046 9	0.044 4	0.048 0	0.0632
Seashore area	0.089 6	0.102 5	0.054 7	0.036 9

计算出 20 组图像间的随机相对偏移量后,同样地,按预定准确度对对亚像元级的偏移量进行归整化处理,在插值获得的大尺度图像上完成整像元偏移量的配准补偿,然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.如图 7 所示,多帧短曝光融合图 7(d)~(f)相较于长曝光图像 7(a)~(c)清晰度有明显提高,更符合人眼观察

与判读的要求。

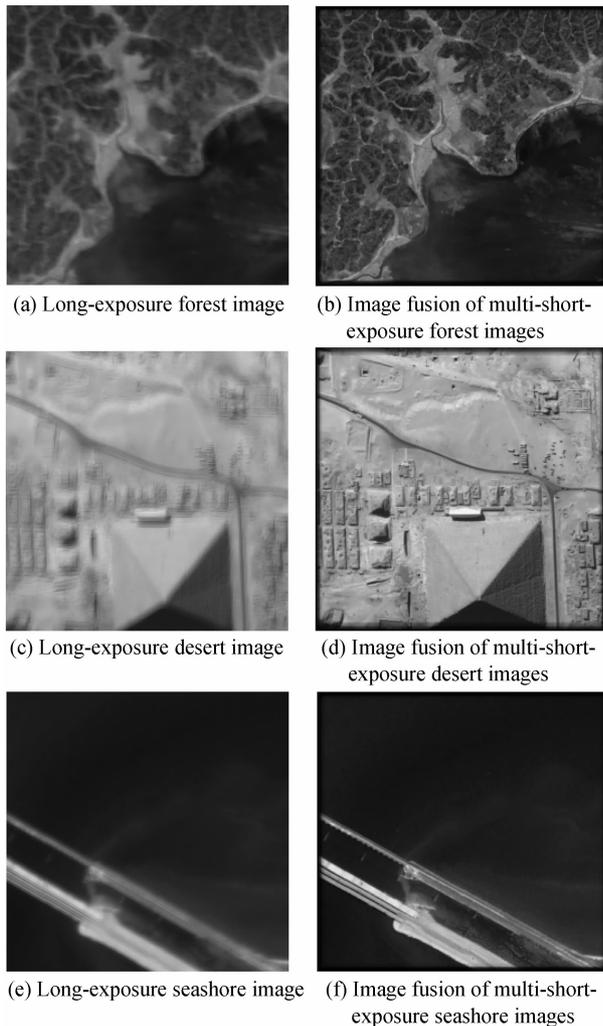


图7 多种遥感图像长曝光模糊图像与多帧短曝光融合图像对比

Fig.7 Comparison of several kinds of long-exposure images and multi-short-exposure fusion images

需要指出的是,多帧短曝光图像融合的方法若在地球静止轨道卫星平台上应用,多帧图像引起的数据量倍增仍是需要加以关注的问题,对传感器本身的工作模式和性能,数据存储和传输,以及大功率面热控技术等均提出了挑战.成像载荷画幅越大,这一问题将越严峻,需要综合任务需求和硬件资源来确定各帧短曝光图像的曝光时间和曝光间隙。

一般来说,单帧图像曝光时间越短,由振动引起的图像模糊量越小,但信噪比会越低,为保证最终融合图像达到预定的信噪比所需的总采集帧数越多,数据量越大,对成像读出电路,星上存储设备和星地数据传输的压力也就越大.图像配准、融合处理可在星上或星下完成,若在星上完成,图像处理过程中需要一定量的计算资源,虽然图像配准无需使用成像传感器全像面数据,只需利用算法自动搜索出一个或几个细节丰富的区域进行计算即可,但图像插值

融合将使用全画幅数据,图像越大帧数越多所需资源也越多,融合后的图像与单帧长曝光采集数据量相同;若在星下完成,主要瓶颈则在于存储和数传,考虑到是地球静止轨道平台应用,地面接收站和中继星可全天候协同工作,并不要求成像数据实时传输,可分时处理成像工作时间内的数据流,但大量的数据滞留则要求存储设备容量足够大,因此需根据实际情况予以权衡。

4 结论

对于地球静止轨道卫星平台成像系统,为保证足够信噪比,其成像所需曝光时间一般相对较长,积分时间内的平台稳定性对遥感图像清晰度有较大影响.本文基于静止轨道长时段凝视成像特性,提出了使用多帧短曝光图像分时积分的方式来削弱平台振动对像质的影响.多帧图像之间采用基于能量区域质心法的相位相关亚像元图像配准算法计算相对偏移量并进行补偿,因曝光时间缩短引起的信噪比降低由多帧融合来提升,最终可以得到信噪比与原长曝光图像相当,清晰度提高的遥感图像.分析表明,通过图像配准获取帧间相对偏移量的方式进行振动探测,准确度可达0.1像元,满足卫星平台对颤振抑制的要求,该方法在地球静止轨道平台有效目标辨识,区域动态监测等方面可广泛应用。

参考文献

- [1] GUO Ling-hua, DENG Zheng, TAO Jia-sheng, *et al.* Preliminary research on development of foreign GEO remote sensing satellites [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 6(31): 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*,2010,6(31):23-30.
- [2] VAILLON L, SCHULL U, KNIGGE T, *et al.* GEO-OCULUS: high resolution multi-spectral earth imaging mission from geostationary orbit[C]. International Conference on Space Optics, Rhodes, Greece, 4-8 October 2010.
- [3] MESRINE M, THOMAS E, GARIN S, *et al.* High resolution earth observation from geostationary orbit by optical aperture synthesis[C]. Proc '6th Internat. Conf. on Space Optics', ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006.
- [4] BLANC P, MONROIG G. Numerical line of sight stabilization for high resolution earth observation from high orbits[C]. Proc. '6th Internat. Conf. on Space Optics', ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006.
- [5] DRESNER T, FREIER L, CHIEN T T, *et al.* Design of a space telescope for vibration control[C]. *SPIE*, 1994, 2264: 82-92.
- [6] TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, KUNIMORI H. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8): 1-10.
- [7] 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.
- [8] MOSIER G, FEMIAMO M, HA K, *et al.* Fine pointing control for a next generation space telescope [C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 1070-1077.
- [9] WANG Shao-you. 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.
- [10] IWATA T. Precision attitude and position determination for the advanced land observing satellite (ALOS) [C]. *SPIE*, 2005, **5659**: 34-50.
- [11] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(3): 333-347.
- [12] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S, *et al.* Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop [C]. *SPIE*, 2004, **5570**: 280-288.
- [13] GUIZAR-SICAIROS M, THURMAN S Y, FIENUP J R. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(2): 156-158.
- [14] PAN Bing, XIE Hui-min, XU Bo-qin, *et al.* Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(6): 1615-1621.
- [15] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(3): 188-200.

Vibration Suppression Based on Multiple Integration and Sub-pixel Image Fusion for Imaging System in Geostationary Orbit

TAO Xiao-ping, XUE Dong-lin, LI Fa-zhi, YAN Feng

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

Abstract: Comparing to the linear scanning space camera in low satellite orbit, images captured by the area array staring imaging system in geostationary orbit usually emerges more blur because of the satellite vibration in the relative longer exposure time. To eliminate the motion blur degradation, the paper proposed to capture multiple short-exposure images and fused them on sub-pixel scale instead. The imaging system in geostationary orbit includes the feature of staring at the same area for a long time. Therefore the task mode of time-sharing short-exposure could get multiple less blurred images of the same area. Next, the sub-pixel displacements between the different frames are estimated by image registration algorithm with 0.1 pixel accuracy. And then, the images are fused to improve the low signal-to-noise ratio because of the short-exposure. Excellent results have been obtained by the sub-pixel image registration and image fusion in the paper.

Key words: Remote sensing; Geostationary orbit; Vibration estimation; Image registration; Image fusion