

资源三号国产星敏感器事后定姿方案 设计与系统实现

谢俊峰^{1,2} 唐新明¹ 莫 凡¹ 刘志龙³

1 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心,北京,101300
2 辽宁工程技术大学测绘与地理信息学院,辽宁 阜新,123000
3 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450000

摘 要:作为绝对姿态测量精度最高的仪器,星敏感器已广泛应用在当前大多遥感卫星上,其定姿精度直接影响光学测绘遥感卫星的几何定位能力。针对资源三号卫星首次下传的国产 APS 原始星图数据,设计并实现了一套基于国产星图的地面事后定姿方案。该方案充分利用地面事后定姿时间充足、计算资源丰富的特点,重点对星图预处理、星表重构、星图识别、恒星相机在轨检校等关键技术进行优化和改进,实现了一套资源三号国产星敏感器事后定姿系统,并将其应用于基于国产星图的绝对姿态确定中。利用资源三号卫星下传原始星图对该系统进行全面试验验证,结果分析表明,事后定姿系统不仅可靠性高,而且定姿精度达到 1.82 角秒(1σ ,光轴指向精度),优于星上处理 2.18 角秒(1σ),为资源三号卫星原始星图业务化处理提供了技术保障。

关键词:资源三号卫星;事后定姿方案;星图预处理;星表重构;星图识别;在轨检校;定姿精度

中图法分类号:P231 **文献标志码:**A

2012 年 1 月 9 日,我国首颗民用自主高分辨率立体测绘卫星资源三号在太原卫星发射基地成功升空。卫星轨道高度 505 km,装载有三线阵(前、正、后视)全色和多光谱(红、绿、蓝、近红外共 4 个波段)相机,主要用于生产全国基础地理信息 1:5 万测绘产品,开展 1:2.5 万或更大比例尺地图的修测和更新,以及其他国土资源调查和监测等^[1-3]。

卫星姿态是影响测绘遥感卫星几何定位精度的重要参数之一^[4,5]。如果不考虑其他误差因素,对于 500 km 轨道高度的卫星,1 角秒姿态误差会引起地面大约 2.5 m 平面几何精度损失。为确保满足卫星 1:5 万立体测图精度的工程要求,资源三号卫星除了携带两个德国 ASTRO-10 星敏感器外,还加载了一个国产 APS 星敏感器。一方面,该星敏感器可以与 ASTRO-10 互为备份,提高姿控系统的稳健性;另一方面,首次下传 2 Hz 输出的原始星图,通过在轨运行,分析和验证国产星敏感器的性能和精度,为后续实际在轨应用奠定基础。

为了进一步提高国产星敏感器的姿态测量精度,并将其应用于资源三号卫星应用系统中,本文

在卫星发射前基于地面模拟数据突破的星表重构、星图识别、相机在轨检校等关键技术的基础上,设计并实现了一套从星图预处理到精度评估的事后定姿系统,该系统结合国产星敏感器在轨工作特点,新增“死像元检测”、“均匀性校正”等预处理方法。最后利用资源三号下传国产星敏原始星图数据进行试验验证。

1 基于星图的事后定姿

1.1 基于星图事后定姿方案设计

星敏感器定姿利用星相机对太空中的恒星进行拍摄并提取影像上星像点坐标,通过与星上预存的已知导航星表进行对比,利用识别的恒星位置来计算星敏的姿态信息^[6]。其主要步骤包括质心提取、星图识别、姿态解算等。卫星在轨期间,为了确保平台飞行安全,要求星上实时定姿方法实时可靠。特别是星上实时定姿处理器性能受到限制的情况下,往往选择较为简单的模型算法作为处理方法,以确保星上定姿的可靠性。而基于

下传星图进行地面事后处理的过程中,硬件计算资源充足,且没有实时性要求,因此可以充分利用所有获取的观测数据,实现更为精细复杂的算法,进一步提高星图后处理精度。本文设计的事后定姿处理方案如图 1 所示。

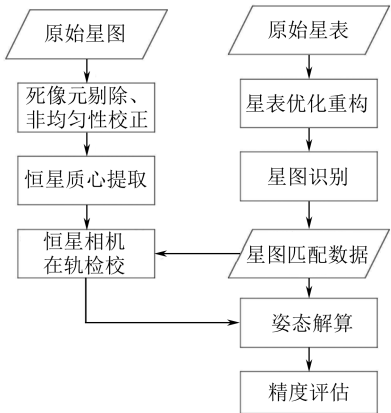


图 1 星图事后定姿方案

Fig.1 Project Design of Post-processing Attitude Determination Based on Stellar Image

在分析影响星敏传感器定姿精度误差源的基础上^[7],本文主要从三个方面来提高星敏传感器姿态测量精度:① 提高单星质心定位精度;② 增加参与姿态确定的恒星数量;③ 高精度检校星敏传感器恒星相机参数。其中,提高单星定位精度主要通过对星图的预处理来实现,包括星图死像元剔除、非均匀亮度校正等消除系统噪声对质心提取精度的影响。增加参与姿态确定的恒星数量主要包括对事后导航星表优化、事后星图识别算法改进等方法。更为重要的是,事后处理方案中采用星敏传感器在轨检校方法,精确获取星敏传感器相机在轨参数,提升定姿精度。最后采用相关评价方法对星敏传感器定姿精度进行验证和分析。

1.2 关键技术优化

1.2.1 星图预处理

在星图成像过程中,成像器件由于在轨环境变化,星图成像质量受到系统噪声影响甚至出现“死像元”和“亮度非均匀性”。

由于“死像元”曝光过度,为一孤立“亮点”,且在 CCD 面阵上的位置不变。而恒星像点随卫星运动在星敏传感器视场内不断移动变化。本文基于这一规律,采用连续多帧星图,提取每一帧亮度较高的像元,并记录其在 CCD 面阵上相应的位置。通过多帧位置对比发现,若该“亮点”像元在恒星相机焦平面的位置没有变化,则认为该像元为“死像元”。该 CCD 像元灰度值记为无效,避免被误认为“星点”,引起星图误匹配。

针对受背景噪声影响出现的影像亮度非均匀性,先统计分析星图亮度信息,确定星图背景阈值。在消除背景后,统计行列亮度变化情况,利用多项式拟合变化规律,计算行列校正系数,减少固化背景噪声对信号的干扰,提高恒星质心提取精度。

在预处理的基础上,对于分离出的恒星信号,采用背景自适应预测的质心提取方法进行像点定位^[8],流程如图 2 所示。

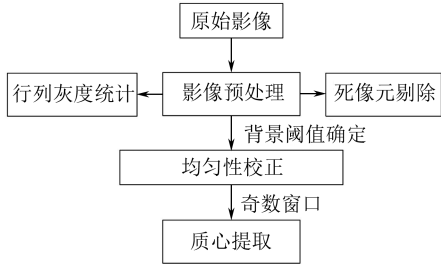


图 2 质心提取流程

Fig.2 Flowchart of Star Centroiding

1.2.2 星表重构

星敏传感器定姿基础星表有很多^[9],如依巴谷(HIP)星表、第谷(Tycho)星表等。在星上定姿中,为了减少星图识别搜索时间,往往预先存储较少导航星数量,并采用简单可靠的星图识别方法如三角形识别算法^[10,11]。这些方法会导致星图识别成功的有效恒星较少,影响星敏传感器姿态解算精度。本文将已取得突破的一种基于格网的星表重构方法集成在系统中^[12],建立符合星敏传感器灵敏度的完备星表。该方法首先选取恒星观测精度最高的 HIP 星表作为基本星表,根据星敏传感器极限探测能力,选取星敏传感器能探测到的恒星构成子星表;然后将选取的导航星投影到天球上,将全天球按照球心角等分为均匀格网,按照天球的赤经赤纬分别落在不同格网中,格网的疏密可以根据需求调整,优先选取格网中较亮恒星,从而获得优化完善后的导航星表。

1.2.3 星图识别

针对资源三号卫星国产 APS 星敏传感器视场大、探测恒星多的特点,为确保尽可能地将视场内的恒星识别出来,本文将已提出的一种基于匹配概率的匹配方法用于星图识别^[13],并用于在轨星图事后处理中。该方法首先在当前视场内选取最亮的恒星作为基准星,并以基准星为出发点,与相邻星构建辐射状星图,先基于匹配概率获取候选的基准星与相邻星的候选匹配组,然后基于有向环状模型对候选匹配组进行匹配,最后取匹配链最长的匹配组作为最后的匹配结果。该方法构建匹配模型较星上复杂,但可靠性高,在事后处理中

较为适宜。具体流程如图 3 所示。

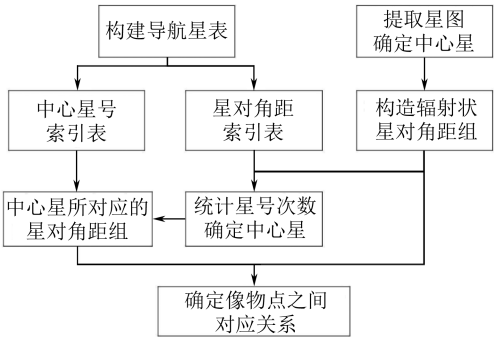


图 3 星图识别流程

Fig.3 Flowchart of Star Identification

1.2.4 恒星相机在轨检校

在卫星上天前,星敏感器相机参数经由实验室标定精确获知。然而,星敏感器受卫星发射过程震动或太空环境变化等因素影响,相机内部参数会发生变化。目前星上实时定姿一般直接采用实验室参数或者多项式校正系数,不能很好地反映参数变化情况。本文将卫星发射前突破的一种基于星对角距的在轨恒星相机标定方法^[14]集成到事后定姿系统中。如图 4 所示,该方法将导航星计算的星光矢量作为参考,与基于相机参数计算的星对角距进行对比,基于最小二乘法解算相机参数。该方法充分分析了镜头畸变规律,进一步提高了标定精度。

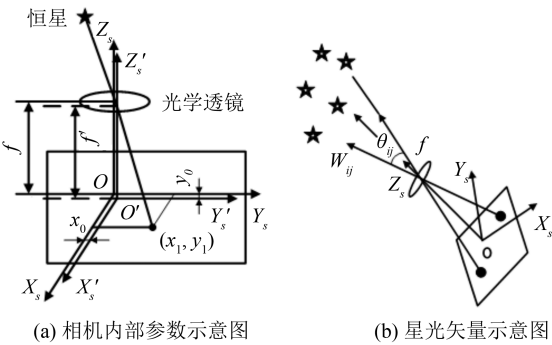


图 4 恒星在 APS 上成像的几何关系

Fig.4 Image Geometric Relationship of Star in APS Star Tracker

1.3 精度验证

本文采用两种精度分析方法对事后定姿结果进行分析验证。第一种是与星上星敏定姿结果进行对比,主要分析量化两者差异,验证该定姿方案的有效性。第二种采用多项式拟合方法消除光轴指向精度中存在的系统误差部分,利用光轴指向精度来比较星上与事后方法的定姿精度。

1) 与星上结果对比

资源三号卫星下传国产 APS 星敏感器定姿

结果为 4 Hz,与下传星图频率 2 Hz 不一致,采样时间也不相同,本文以星上某一时刻为基准,对事后定姿结果(四元数)进行球面内插,计算相同时刻星上与地面事后处理的姿态差值^[15]。

2) 基于多项式拟合的光轴指向精度评估

星敏感器光轴指向精度反映了星敏感器的测量精度。由于星敏感器测量存在一定的系统误差,在将姿态转换到光轴指向后^[16],用多项式拟合消除光轴指向系统误差,统计随机误差部分表示指向精度。每一采样时刻的光轴指向(惯性系下)作为一多元函数,列出其最小值点应满足的方程,解方程求得未知系数,从而得到拟合曲线。拟合后随机残差表示光轴指向精度。

2 试验分析与验证

2.1 试验数据

试验数据包括恒星星表、国产 APS 星敏感器和星图数据。

1) 恒星星表。本文实验原始星表为 HIP (J2000)星表,所用信息包括星号、视星等,赤经(时分秒)、赤纬(角分秒)等,星等阈值范围为 0~7,去掉双星变星后,共 9 744 颗恒星。

2) 国产 APS 星敏感器。视场为 20°×20°,采用 1 024 像素×1 024 像素,像素大小为 15 μm×15 μm 的 APS 面阵。相机主距为 43.3 mm,主点为 (512,512),单位为像素。相机曝光时间一般为 250 ms(可调)。

3) 星图数据。卫星过境时开机拍摄大约持续 9 min,同时国产 APS 星敏以 2 Hz 频率存储该时间段的二进制打包数据,并下传到地面接收站。本文任意抽取卫星入轨稳定运行后下传的第 381 轨星图数据(2012 年 2 月 3 日),数据解包正常,解包后共计 1 090 帧星图。该轨第一帧星图显示如图 5 所示。

2.2 试验结果与分析

按照事后定姿方案进行试验,下面以第一帧(图 5)为例,给出相应的过程结果,并采用三种评估方法对全轨姿态结果进行精度分析。

1) 星图预处理结果

通过多帧数据统计,在发现并消除“死像元”的基础上,统计行列灰度值均值变化。图 6 为第一帧星图行列灰度均值变化情况。从图 6 中可以很明显看出,统计列方向灰度均值呈现两边亮、中间暗的变化趋势,列方向变化较小,整体呈现图像下部亮度增强趋势,与校正前图 5 直观相符,因

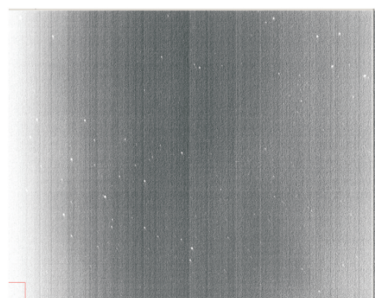


图 5 原始星图(2012.2.3 拍摄)(UTC)
Fig.5 Raw Stellar Image Acquired by
2012-2-3-11-7-51.264513

此,在质心提取前,需要进行灰度均匀性校正,消除背景噪声的影响,校正后如图 7 所示。

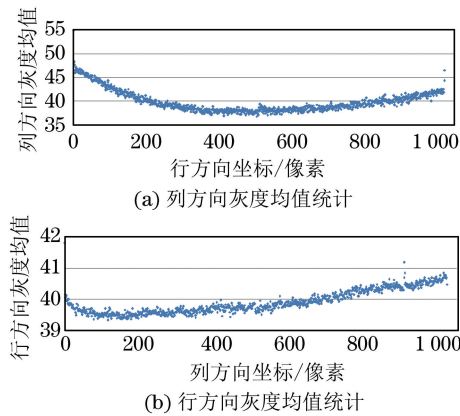


图 6 原始星图行列灰度均值统计
Fig.6 Statistic of Gray Mean in Row and Col Direction
of Raw Stella Image

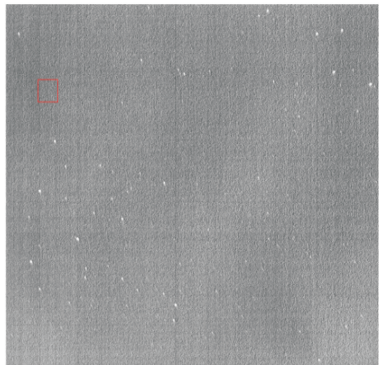


图 7 均匀性校正后星图
Fig.7 Non-uniformity Corrected Stellar Image

2) 星点质心坐标提取

在星图预处理的基础上,对恒星分布区域进行提取,窗口大小选取为 5×5 ,利用背景自适应预测的质心提取方法进行星像点质心提取,第一帧星图上恒星的质心定位结果见表 1。

3) 星表重构

根据星敏探测能力,选取星等范围在 0~7 星等的恒星 9 744 颗,采用基于格网的星表重构方

法进行优选,最终由 4 971 颗恒星构成基本星表。选取前后的恒星分布如图 8 所示。

表 1 第一帧星图星象点质心坐标

Tab.1 Star Centroiding of First Stellar Image			
序号	灰度均值	X 坐标/像素	Y 坐标/像素
0	102	397.13	-4.990 63
1	76	11.143 1	238.996
2	54	156.985	-4.971 57
3	59	369.927	41.953 1
4	54	-490.953	-234.932
5	49	438.953	-36.042 6

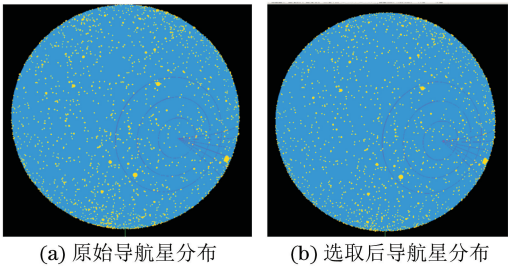


图 8 星表重构前后恒星分布对比(HIP,VMT=7.0)
Fig.8 Comparison of Star Distribution Before and
After Guide Star Selection(HIP,VMT=7.0)

4) 星图识别结果

采用基于匹配概率的匹配方法,本轨 1 090 帧星图识别成功率为 100%。对应的第一帧星图识别结果见表 2。

表 2 第一帧星图识别结果

Tab.2 Star Identification Result of First Stellar Image				
星号	赤经	赤纬	星象点坐标/像素	
			X 轴	Y 轴
297	390.786°	0.101 654°	397.13	-4.990 63
298	236.610 99°	7.353 23°	369.927	41.953 1
788	233.701°	10.538 9°	156.985	-4.971 57
789	234.123°	10.010 5°	438.953	-36.042 6
1 278	222.847°	19.100 599°	-490.953	-234.932
1 295	236.547°	15.421 9°	11.143 1	238.996

5) 星图识别结果

采用改进的基于星对角距标定方法,利用第 381 轨星图数据进行标定。以实验室参数为初值,迭代求解。当残差的中误差大于前一次时,迭代终止。试验迭代 5 次结束,得到各参数的标定结果见表 3。

表 3 相机标定结果

Tab.3 Stellar Camera Calibration Result				
主距 f /像素	主点/像素		相机畸变系数	
	x_0	y_0	k_1 /像素 ⁻²	k_2 /像素 ⁻⁴
2 885.037	513.640	507.42	1.24×10^{-8}	2.61×10^{-14}

6) 定姿结果

利用星图识别的结果以及星敏感器在轨标定

参数,计算摄影时刻星敏感器在 J2000 坐标系下的姿态^[17,18]。基于第一帧星图计算姿态四元数,结果见表 4。第 381 轨下传全部星图处理结果如图 9 所示,横轴以 2009 年 1 月 1 日为起始的累计秒。纵轴为四元数 Q 值, q_0 为标量, $q_1 \sim q_3$ 为矢量,无单位。

表 4 第一帧星图定姿结果

Tab.4 Attitude Result of First Stellar Image			
q_0	q_1	q_2	q_3
0.518 330 82	0.609 301 04	0.117 357 27	-0.588 483 3

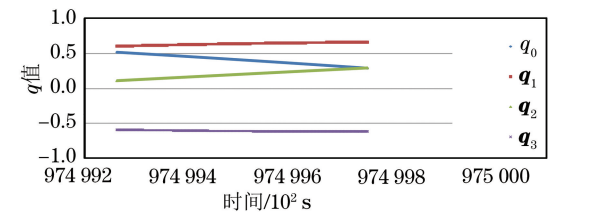


图 9 星敏后处理定姿结果(1 090 帧)
Fig.9 Post-processed Attitude (1 090 Frames)

7) 定姿精度评估结果

(1) 与星上 q 值对比

比较事后处理的四元数和星上下传的四元数,得到误差四元数,并转换为三轴欧拉角,姿态角定义见文献[19]。试验结果如图 10 所示,其中 x 轴是以 2009 年 1 月 1 日为起始的累计秒。

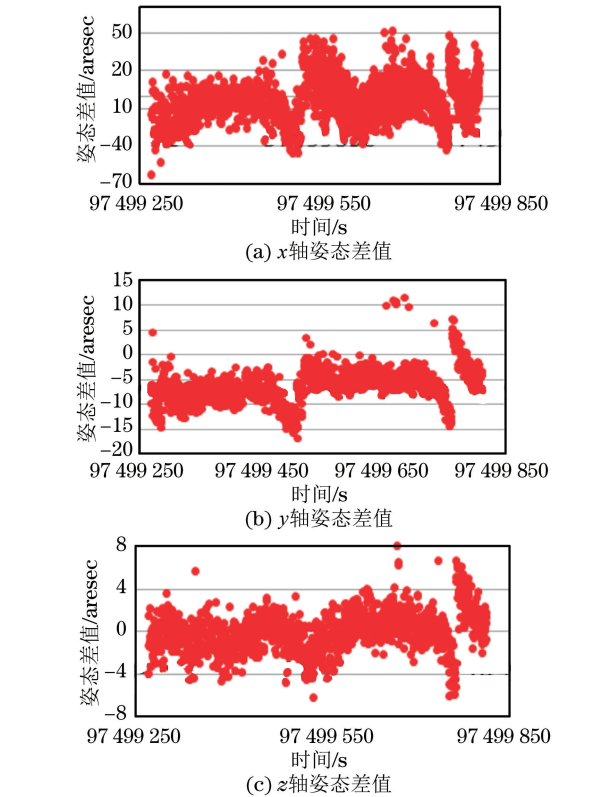


图 10 第 381 轨三轴姿态差值

Fig.10 Three Axis Attitude Difference of 381th Track

从图 10 中可以看出, x 轴差值相对较大, y 轴和 z 轴相对较小,三轴中误差统计结果分别为 15.64,7.22,1.926 角秒,主要反映了两者的星敏测量精度水平。 x 轴方向表明偏航方向精度较低, y 轴和 z 轴分别表示俯仰和横滚角精度较高。

(2) 基于多项式拟合精度评价

将星上和事后姿态四元数转换光轴指向,选定 5 次多项式对的光轴指向进行拟合。拟合后随机残差表示指向精度,纵轴为姿态差值,单位为角秒,横轴为采样点,星上和事后光轴指向误差分别如图 11(a)、11(b)所示。

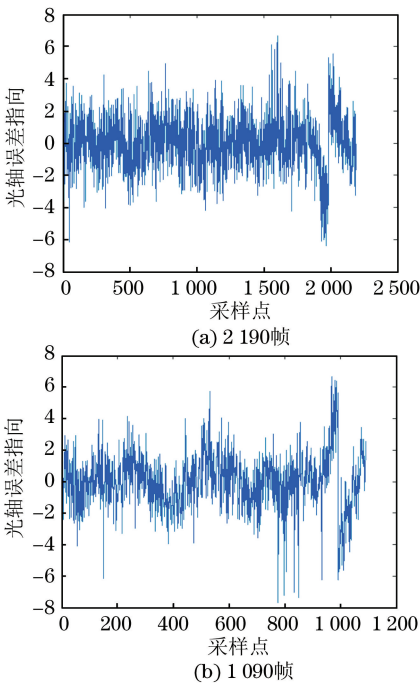


图 11 星上事后光轴指向精度对比

Fig.11 Comparison of the On-board and Post-processed Pointing Accuracy

尽管星上姿态(4 Hz)与事后基于星图计算的姿态(2 Hz)频率不同,但是起始时间一致。从图 11 可看出,二者总体趋势相同。经统计,星上和事后光轴指向中误差分别为 2.18 角秒(1σ),1.82 角秒(1σ),说明事后定姿精度较星上有进一步提高。

3 结 语

本文针对我国资源三号国产星敏下传原始星图,提出了一套从星图预处理到精度评估的完整地面处理方案,并系统集成了方案提出的导航星提取、星图识别、恒星在轨检校等关键技术。针对国产星敏在轨运行的特点,提出并实现了“死像元剔除”、“均匀性校正”等星图预处理优化方法。利

用卫星在轨期间星图数据进行试验验证,结果表明,基于设计方案实现的事后处理系统不仅可靠性高,而且定姿精度优于星上处理结果。目前该处理系统经过大量数据验证后,已经应用于资源三号卫星星图业务化处理中,有效地支持了资源三号应用系统整体建设。

本文设计仅针对国产星敏下传的星图进行处理。对于星图处理后输出的姿态数据,由于星敏自身测量特性,还存在一定不同频段的周期性误差,未来将进一步研究相关探测方法,根据变化规律构建相关数学拟合模型,提高卫星影像几何处理中星敏姿态输出的拟合精度。

参 考 文 献

- [1] Li Deren. China's First Civilian Three-line-array Stereo Mapping Satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322 (李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星—资源三号卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 317-322)
- [2] Huang X, Zhang L. An SVM Ensemble Approach Combining Spectral, Structural, and Semantic Features for the Classification of High-Resolution Remotely Sensed Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 51(1): 257-272
- [3] Tang Xinming, Xie Junfeng. On-orbit Test and Application Analysis of ZY-3 Satellite[J]. *Geomatics World*, 2013, 20(2): 37-40(唐新明, 谢俊峰. 资源三号卫星在轨测试与应用分析[J]. 地理信息世界, 2013, 20(2): 37-40)
- [4] Tang Xinming, Xie Junfeng. Overview of the Key Technologies for High-resolution Satellite Mapping [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5(3): 1-13
- [5] Wang Renxiang, Wang Jianrong, Hu Xin. Photogrammetry of In-flight Satellite Without Ground Control Point[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(1): 1 261-1 264 (王任享, 王建荣, 胡莘. 在轨卫星无地面控制点摄影测量探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(11): 1 261-1 264)
- [6] Gong Jianya. Earth Observation Data Processing and Analysis [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007(龚健雅, 对地观测数据处理与分析研究进展[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007)
- [7] Eisenman A R, Liebe C C, Joergensen J L. New Generation of Autonomous Star Trackers[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1997, 3 221: 524-535
- [8] Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided Locating Method of Star Image for Star Sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 29(19): 812-815(魏新国, 张广军, 江洁. 星敏传感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812-815)
- [9] Xu Tongqi, Li Jing. Star Catalogue[OL]. http://samuel.lamost.org/basic/dict/baike/tw_dbk28524.html, 2014(须同祺, 李竞, 星表[OL]. http://samuel.lamost.org/basic/dict/baike/tw_dbk28524.html, 2014)
- [10] Scholl M S. Star Field Identification Algorithm: Performance Verification Using Simulated Star Fields[J]. *Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 1993, 2019: 275-290
- [11] Padgett C, Kreutzdelgado K, Udomkesmalee S. Evaluation of Star Identification Techniques [J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2012, 20(2): 259-267
- [12] Xie J, Gong J, Jiang W. A Guide Star Selection Algorithm Based on Angular Grids[C]. International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis, Wuhan, China, 2008
- [13] Jiang Wanshou, Xie Junfeng, Gong Jianya, et al. New Star Identification Algorithm Based on Starlike Mappings Pattern[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1): 12-16 (江万寿, 谢俊峰, 龚健雅, 等. 一种基于星形的星图识别算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(1): 12-16)
- [14] Xie Junfeng, Gong Jianya, Jiang Wanshou. An Improved on-orbit Calibration Method for Stellar Camera[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(2): 121-123(谢俊峰, 龚健雅, 江万寿. 一种改进的恒星相机在轨检校方法[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 121-123)
- [15] Markley F L, Cheng Y, Crassidis J L. Averaging Quaternions[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2007, 30(4): 1 193-1 197
- [16] Sun Caihong. Developing Technologies and Methods of Light Weight High Accuracy Star Sensor[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2002(孙才红. 轻小型星敏传感器研制方法和研制技术[D]. 北京: 中国科学院, 2002)
- [17] Shuster M D, Oh S D. Three axis Attitude Determination from Vector Observation[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 1981, 4(1): 70-77
- [18] Shuster M D. In Quest of Better Attitudes [C].

11th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Santa Barbara, USA, 2001

[19] Wang Zhizhuo. Principle of Photogrammetry[M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping,1979(王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1979)

Domestic Stellar Image Post-processing Project Design and System Implementation for ZY-3 Satellite

XIE Junfeng^{1,2} TANG Xinming¹ MO Fan¹ LIU Zhilong³

1 Satellite Surveying and Mapping Application Center, SBSM, Beijing 101300, China

2 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000,China

3 Department of Geo-informatics, Information Engineering University, Zhengzhou 450000,China

Abstract: As the attitude sensor with the highest absolute accuracy, the star tracker was widely applied in the most remote sensing satellites recently, and its performance is an important element to influence geometric loacation accuracy of the remote sensing satellite image. A raw stellar image processing project is firstly designed for the domestic APS star tracker loaded on the first civilian high-resolution stereo mapping satellite-ZY-3. The raw stellar images captured by the domestic APS star tracker were downlinked to the ground for post-processing. This attitude post-processing project has taken full advantage of all observed data in a period of time and sufficient computing resource on the ground, compared to the on-orbit real-time processing. And the key technologies such as the stellar image pre-processing, guide stars selection, star identification, and on-orbit calibration of the stellar camera et.al had been improved and optimized. On this basis, the post-processing system for the APS star tracker of ZY-3 satellite was implemented and applied for the absolute attitude determination based on the raw stellar images. The real-time stellar images from the APS star tracker were downloaded for test verification. The experiment result indicates that the post-processing system based on the stellar images has the characteristics of high automation and reliability. The random pointing error of optical axis was regarded as the attitude accuracy of the APS star tracker. The post-processed attitude accuracy achieves 1.82 arc seconds(1σ), which is better than that of real-time processed 2.18 arc second(1σ). This attitude post-processing system will provide technical support for the daily operational running for the raw stellar images of ZY-3 satellite.

Key words: ZY-3 satellite; post-processing attitude determination project; stellar image preprocess; guide stars selection; star identification ;on-orbit calibration; attitude accuracy

First author: XIE Junfeng, PhD, associate researcher, specializes in satellite attitude determination based on star tracker and gyro ,satellite image geometric processing, and space laser altimeter calibration .E-mail: xiejf@sasmac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41301525, 41571440; the Surveying and Mapping Public Welfare Project of China, No. 201512012; Youth Science and Technology Projects of Basic Survey-mapping, No.1461501900202; the Foundation of the Youth Academic Leader of NASG, No.201607.