

## 天绘一号卫星高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角 在轨标定方法研究

刘姜伟, 黄海乐, 李 五

(中国天绘卫星中心, 北京 102102)

**摘 要:** 通过对天绘一号卫星摄影原理的分析, 建立了在轨标定高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角的几何模型, 并利用天绘卫星影像数据进行了相关试验。试验结果表明: 该方法可行, 精度较高, 与可供参考的地面实验室定标结果较为接近, 高分辨相机与三线阵正视相机夹角标定的两种结果相差 1' 左右, 多光谱相机与三线阵正视相机夹角标定的两种结果相差 5' 左右。同时, 计算分析了卫星定轨误差和地面控制点精度对夹角的影响。该方法模型简单, 易于理解, 解决了目前天绘一号卫星高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角仅有地面实验室标定结果, 缺乏有效在轨标定方法的问题, 对于影像的融合、纠正及高级产品的生产具有重要意义。

**关键词:** 天绘一号卫星; 高分辨; 多光谱相机; 相机夹角; 几何模型

**中图分类号:** V445.8    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0662-06

## Research on method for the in-flight calibration of mapping satellite-1 high-resolution camera, multispectral camera and three- line-array nadir camera's intersection angle

Liu Jiangwei, Huang Haile, Li Wu

(Center of TH-Satellite of China, Beijing 102102, China)

**Abstract:** Through the analysis of Mapping Satellite -1's photographic principle, geometric model was established to calibrate the intersection angle of the high-resolution, multispectral camera and three-line-array nadir camera in flight. And the correlative experiments using the image data of Mapping Satellite-1 were carried out. Result proves the method's feasibility and high precision, and is close to the referenced result calibrated in laboratory on ground. Results' difference of the intersection angle of high-resolution and three-line-array nadir camera is about 1', multispectral and three-line-array nadir camera is about 5'. Meanwhile, the effect of the orbit determination error and the ground control points' precision on the camera's intersection angle is calculated and analyzed. The method is easily understood, and solves the problem that at present the intersection angle of Mapping Satellite -1's high-resolution, multispectral camera and three-line-array nadir camera is only calibrated in laboratory on ground, cannot be accurately calibrated in-flight. It plays an important role in image fusion, rectification and advanced products'

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(611108066)

作者简介: 刘姜伟(1987-), 男, 硕士, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。Email: 459845964@qq.com

producing.

Key words: Mapping Satellite-1; high-resolution; multispectral camera; camera's intersection angle; geometric model

## 0 引言

天绘一号卫星是我国首颗传输型立体测绘卫星,一体化集成了三线阵、高分辨率和多光谱等 3 类 5 个相机载荷,可获取三线阵全色影像、高分辨率影像和多光谱影像<sup>[1-3]</sup>。其中,高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角的在轨标定,对于影像的融合、纠正以及高级产品的生产,具有重要意义,但一直没有得到较好解决。由于卫星在发射过程中的振动、以及在轨飞行期间失重、温度变化等空间环境的改变,地面实验室标定结果已不适用,需要重新获取在轨标定结果<sup>[4-5]</sup>。

目前,国内外未见相关研究报道。韩旭、马军等人通过计算机仿真计算了在两种极端温况下三线阵正视相机和后视相机在轨交会角的变化<sup>[6]</sup>;吕勇、冯其波等人综合三线阵前视和正视相机的所有自由度参量建立了相机交会角模型,通过计算仿真,指出只需监测 5 个自由度就可以构建完整的三线阵 CCD 测绘相机交会角在轨检测系统<sup>[7]</sup>。他们虽然没有进行高分辨、多光谱与三线阵正视相机夹角的研究,但方法值得借鉴。

文中在研究分析天绘一号卫星的摄影原理的基础上,建立了解算高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角的几何模型,并利用天绘一号卫星影像数据进行了试验验证,证明了该方法的可行性。

## 1 方案设计

### 1.1 高分辨相机、多光谱相机与三线阵正视相机夹角几何模型

在理论计算中,假定三线阵相机、高分辨相机和多光谱相机的摄站中心重合在 O 点,在某一摄影时刻 T,三线阵正视相机摄影平面为  $A_1OB_1$ ,高分辨相机摄影平面为  $A_2OB_2$ ,多光谱相机摄影平面为  $A_3OB_3$ ,则平面  $A_1OB_1$  与平面  $A_2OB_2$  夹角  $\alpha$  即为高分辨相机与三线阵正视相机夹角,平面  $A_2OB_2$  与平面  $A_3OB_3$  夹角  $\beta$  为多光谱相机与三线阵正视相机夹

角,如图 1 所示。

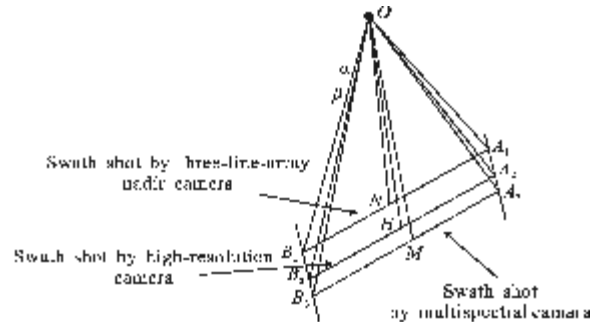


图 1 高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角几何模型  
Fig.1 Geometric model of intersection angle of high-resolution, multispectral camera and three-line-array nadir camera

### 1.2 求解思路

要求解夹角  $\alpha$  和  $\beta$ , 只需拟合出三个摄影平面即可。某时刻的摄站中心 O 的坐标可以由精密定轨获得,然后根据精密定轨和各相机载荷对应的行时文件,可以确定这一时刻高分辨、多光谱和三线阵正视相机对应的影像行,之后通过与航片的匹配、空三加密,得到各影像行对应的地面控制点坐标。最后,根据摄站坐标和地面控制点坐标,采用带约束条件的最小二乘原理,即可拟合出各摄影平面。

天绘一号卫星高分辨 CCD 采用全透射的品字形机械安装方式<sup>[8]</sup>,像面由两排、8 片 CCD 构成,可分别标定 1、3、5、7 片和 2、4、6、8 片 CCD 摄影平面与三线阵正视相机摄影平面的夹角。多光谱相机像面由 4 片 CCD 构成,分别对应多光谱影像的蓝、绿、红、近红外四个通道<sup>[9]</sup>。文中采用蓝波段 CCD 对应的影像进行计算,结果为蓝波段 CCD 摄影平面与三线阵正视摄影平面夹角。

## 2 试验及结果分析

天绘一号卫星载荷中,前视、正视、后视三台全色线阵 CCD 相机,可提供地面像元分辨率优于 5 m、幅宽 60 km 的全色立体影像,多光谱相机可提供地面像元分辨率优于 10 m、幅宽 60 km 的蓝、绿、红和近红外 4 波段多光谱地物影像,高分辨率相机可提

供地面像元分辨率优于 2 m、幅宽 60 km 的全色地物影像。天绘一号卫星影像局部截图如图 2 所示。

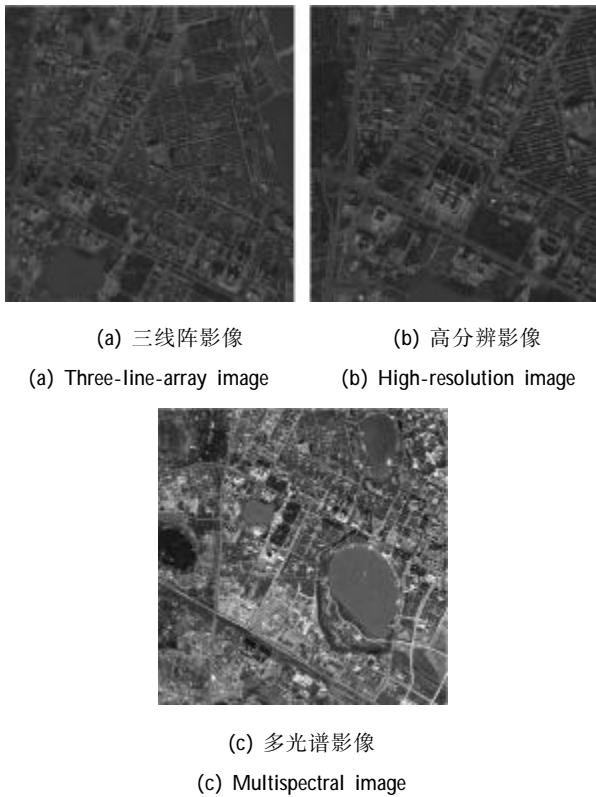


图 2 天绘一号卫星影像

Fig.2 Image of Mapping Satellite-1

此次试验中选取影像质量良好的天绘一号卫星影像数据进行试验。

### 2.1 试验流程

试验流程如下:(1) 进行精密定轨,获取卫星轨道信息,提取特定摄影时刻  $T$  时的摄站中心坐标;(2) 分别用卫星的高分辨、多光谱和三线阵正视影像与相应位置的航片进行匹配,进行空三加密得到特定摄影时刻  $T$  对应的地面条带离散点坐标;(3) 利用前两步获取的摄站中心坐标和地面条带离散点坐标,采用带约束条件的最小二乘法,分别拟合出高分辨、多光谱和三线阵正视相机的摄影平面;(4) 计算各摄影平面夹角。

### 2.2 试验结果

试验结果如表 1 所示。表 1 中地面实验室标定的高分辨相机与三线阵正视相机夹角只有一个值,可以理解为两排 CCD 夹角的平均值。 $\alpha_0$  和  $\beta_0$  分别为地面实验室标定结果,只能作为参考,与卫星在轨飞行状态存在一定差距。试验结果中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分

别为高分辨相机第 1、3、5、7 片 CCD 和第 2、4、6、8 片 CCD 对应夹角, $\beta$  为多光谱相机蓝波段 CCD 对应夹角。

表 1 试验结果

Table.1 Results of experiments

	Intersection angle of high-resolution camera and three-line-array nadir camera $\alpha_1$	Intersection angle of high-resolution camera and three-line-array nadir camera $\alpha_2$	Intersection angle of multispectral camera and three-line-array nadir camera $\beta$
Calibrated in laboratory on ground		$\alpha_0$	$\beta_0$
Calibrated by geometric mode in-flight	$\alpha_0 - 13'17.94''$	$\alpha_0 + 15'24.69''$	$\beta_0 - 5'2.37''$

从试验结果可以看出,在轨几何模型求解结果与地面实验室定标结果较为接近。 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  取平均为  $\alpha_0 + 1'3.37''$ ,与  $\alpha_0$  相差 1'左右, $\beta$  与  $\beta_0$  相差 5'左右。

### 2.3 误差分析

摄站中心坐标和地面控制点坐标的精度直接影响高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角的精度。摄站中心坐标由精密定轨得到,精密定轨本身存在定轨误差;地面控制点首先由卫星影像数据与航片数据进行匹配,存在匹配误差,其次空三加密出来的控制点本身也存在误差,这两点可以综合考虑为地面控制点精度。下面就定轨误差和地面控制点精度对结果的影响进行计算分析。

#### 2.3.1 高分辨相机与三线阵正视相机夹角 $\alpha$ 的误差分析

##### (1) 定轨误差对 $\alpha$ 的影响分析

考虑到天绘卫星定轨误差精度指标为 6 m,通过编程计算分析了摄站坐标在  $x$  方向, $y$  方向和  $z$  方向分别增大 0~10 m 时,对夹角  $\alpha$  的影响,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出:

(1)  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的走势相同,都随着摄站坐标在  $x$  方向的增大而增大,随着摄站坐标在  $y$  和  $z$  方向的增大而减小; $z$  方向摄站坐标的变化对夹角  $\alpha$  影响最大, $y$  方向其次, $x$  方向影响最小;(2) 随着定轨误差的增大,曲线斜率增大,这说明定轨误差越大,其

变化对夹角  $\alpha$  的影响越大;(3) 总体来看,10 m 的定轨误差,对夹角  $\alpha$  的影响大概为 0.5~1.7''。

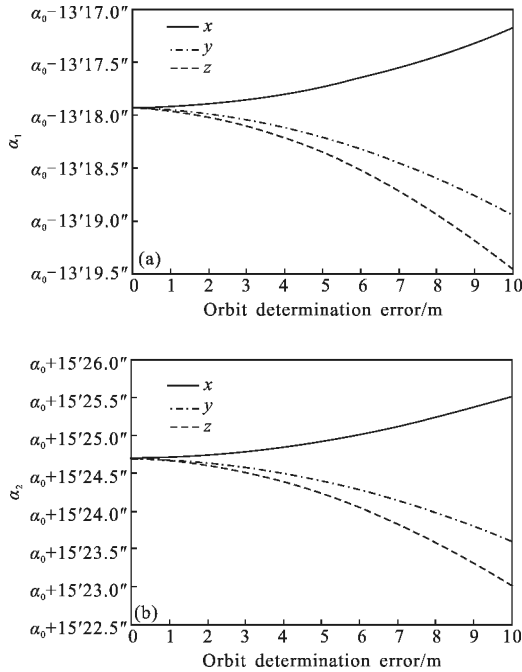


图 3 定轨误差对高分辨与三线阵正视相机夹角  $\alpha$  的影响  
Fig.3 Effect of orbit determination error on intersection angle of high-resolution camera and three-line-array nadir camera  $\alpha$

(2) 地面控制点精度对  $\alpha$  的影响分析

一方面,拟合摄影平面采取最小二乘法,个别控制点坐标的改变对结果影响有限,另一方面,通过航片空三加密出来的地面控制点精度在 1~2 m 左右,天绘卫星高分辨影像数据的分辨率为 2 m,考虑到影像与航片的匹配误差,这里在分析地面控制点精度对夹角  $\alpha$  的影响时,采取分别在各个摄影平面对应地面控制点坐标的 x 方向,y 方向和 z 方向增大 0~10 m 时,计算分析夹角  $\alpha$  的变化。

三线阵正视对应地面控制点精度对夹角  $\alpha$  的影响如图 4 所示。

从图 4 中可以看出:(1)  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的走势相同,都随着地面控制点坐标在 x 方向、z 方向的增大而增大,随着地面控制点坐标在 y 方向的增大而减小;y 和 z 方向的地面控制点坐标的变化对夹角  $\alpha$  影响较大,x 方向影响较小;(2) 地面控制点精度在 10 m 范围以内时,夹角  $\alpha$  随地面控制点坐标的变化基本呈线性关系;(3) 总体来看,10 m 的地面控制点坐标精度,对夹角  $\alpha$  的影响大概为 1~3''。

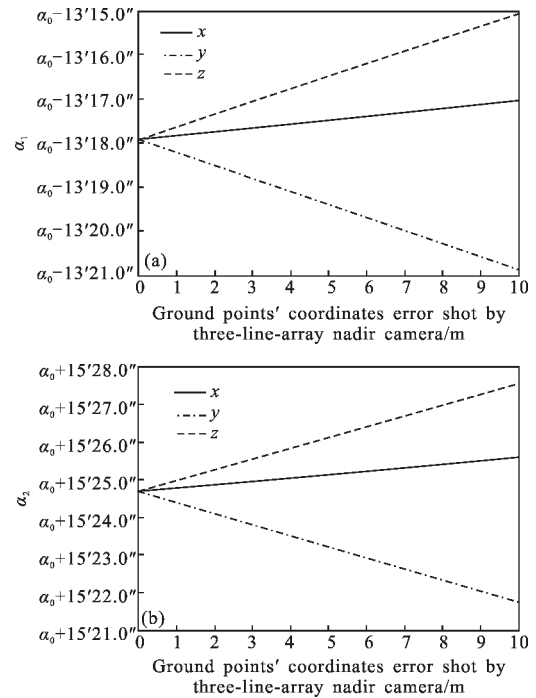


图 4 三线阵正视相机对应地面控制点精度对夹角  $\alpha$  的影响  
Fig.4 Effect of ground points' coordinates error shot by three-line-array nadir camera on intersection angle  $\alpha$

高分辨相机对应地面控制点精度对夹角  $\alpha$  影响如图 5 所示。

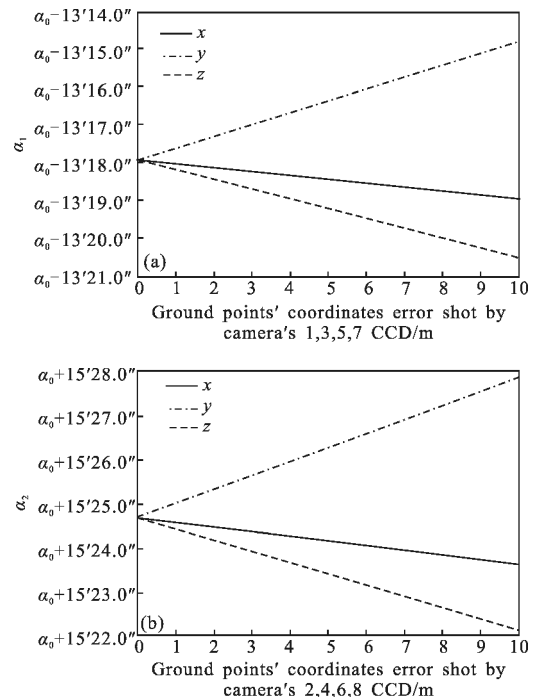


图 5 高分辨相机对应地面控制点精度对夹角  $\alpha$  的影响  
Fig.5 Effect of ground points' coordinates error shot by high-resolution camera on intersection angle  $\alpha$



从图 5 中可以看出:(1)  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的走势相同,都随着地面控制点坐标在  $x$  方向、 $z$  方向的增大而减小,随着地面控制点坐标在  $y$  方向的增大而增大; $y$  方向的地面控制点坐标的变化对夹角  $\alpha$  影响最大, $z$  方向次之, $x$  方向影响较小;(2) 地面控制点精度在 10 m 范围以内时,夹角  $\alpha$  随地面控制点坐标的变化基本呈线性关系;(3) 总体来看,10 m 的地面控制点坐标精度,对夹角  $\alpha$  的影响大概为 1~3.5"。

### 2.3.2 多光谱相机与三线阵正视相机夹角 $\beta$ 的误差分析

#### (1) 定轨误差对 $\beta$ 的影响分析

考虑到天绘卫星定轨误差精度指标为 6 m,通过编程计算分析了摄站坐标在  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向分别增大 0~10 m 时,对夹角  $\beta$  的影响,如图 6 所示。

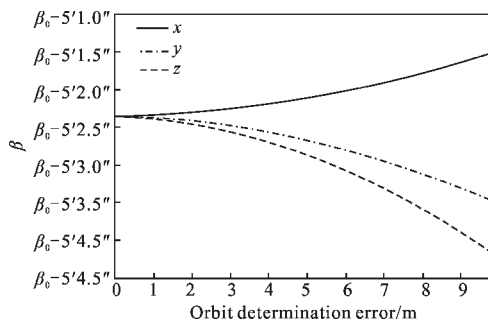


图 6 定轨误差对夹角  $\beta$  的影响

Fig.6 Effect of orbit determination error on intersection angle  $\beta$

从图 6 中可以看出:(1)  $\beta$  随着摄站坐标在  $x$  方向的增大而增大,随着摄站坐标在  $y$  和  $z$  方向的增大而减小; $z$  方向摄站坐标的变化对夹角  $\beta$  影响最大, $y$  方向其次, $x$  方向影响最小;(2) 随着定轨误差的增大,曲线斜率增大,这说明定轨误差越大,其变化对夹角  $\beta$  的影响越大;(3) 总体来看,10 m 的定轨误差,对夹角  $\beta$  的影响大概为 0.8~1.8"。

#### (2) 地面控制点精度对 $\beta$ 的影响分析

考虑到多光谱相机的地面像元分辨率为 10 m,在计算分析地面控制点精度对夹角  $\beta$  的影响时,采取分别各个摄影平面对应地面控制点坐标的  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向增大 0~30 m 时,计算分析夹角  $\beta$  的变化。

三线阵正视相机对应地面控制点精度对  $\beta$  的影响如图 7 所示。

从图 7 中可以看出:(1)  $\beta$  随着地面控制点坐标

在  $x$  方向、 $z$  方向的增大而增大,随着地面控制点坐标在  $y$  方向的增大而减小; $y$  和  $z$  方向的地面控制点坐标的变化对夹角  $\beta$  影响较大, $x$  方向影响较小;(2) 地面控制点精度在 30 m 范围以内时,夹角  $\beta$  随地面控制点坐标的变化基本呈线性关系;(3) 总体来看,30 m 的地面控制点坐标精度,对夹角  $\beta$  的影响大概为 2.8~8.9"。

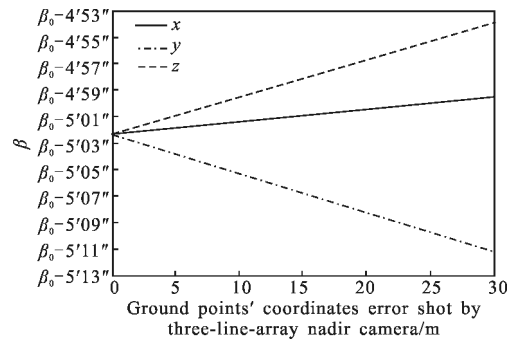


图 7 三线阵正视相机对应地面控制点精度对夹角  $\beta$  的影响

Fig.7 Effect of ground points' coordinates error shot by three-line-array nadir camera on intersection angle  $\beta$

多光谱相机对应地面控制点精度对  $\beta$  的影响如图 8 所示。

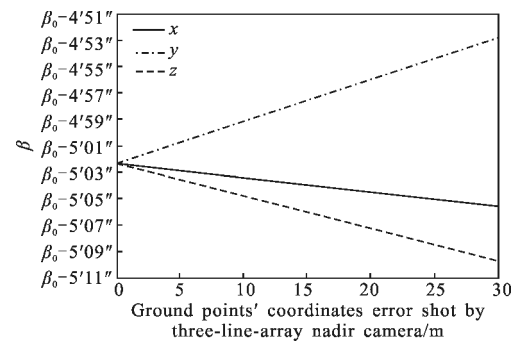


图 8 多光谱相机对应地面控制点精度对夹角  $\beta$  的影响

Fig.8 Effect of ground points' coordinates error shot by multispectral camera on intersection angle  $\beta$

从图 8 中可以看出:

(1)  $\beta$  随着地面控制点坐标在  $x$  方向、 $z$  方向的增大而减小,随着地面控制点坐标在  $y$  方向的增大而增大; $y$  方向的地面控制点坐标的变化对夹角  $\beta$  影响最大, $z$  方向次之, $x$  方向影响较小;(2) 地面控制点精度在 30 m 范围以内时,夹角  $\beta$  随地面控制点坐标的变化基本呈线性关系;(3) 总体来看,30 m 的地面控制点坐标精度,对夹角  $\beta$  的影响大概为 3.2~10"。

### 3 结论

文中提出的在轨标定高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角的方法,模型简单,易于理解,并利用天绘卫星影像进行了试验,进行了误差分析,结果表明,该方法计算结果精度较高。定轨误差和地面控制点精度都会对夹角结果造成一定影响,减小定轨误差和提高地面控制点精度,均可以提高计算结果的精度。试验结果表明:该方法可行,对影像融合、纠正和高级产品生产具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Dewen, Liu Baocheng, Wang Yue. Analysis of inquiry strategy based on 1A level image of Mapping Satellite -1 [C]//18th China Symposium on Remote Sensing, 2012: 42-46. (in Chinese)  
张德文, 刘保成, 王悦. 基于天绘一号卫星 1A 级影像的查询策略分析 [C]//第十八届中国遥感大会论文集, 2012: 42-46.
- [2] Yang Junfeng, Zhang Xianrui. Tian Hui -1 satellite data products and application [C]//Proceedings of the First Symposium on High Resolution Remote Sensing Data Processing and Applications, 2011: 306-309. (in Chinese)  
杨俊峰, 张献瑞. 天绘一号卫星数据产品及应用[C]//第一届全国高分辨遥感数据处理与应用研讨会论文集, 2011: 306-309.
- [3] Wang Renxiang, Hu Xin, Wang Xinyi, et al. The construction and application of Mapping Satellite -1 engineering [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(S): 2-5. (in Chinese)  
王任享, 胡莘, 王新义, 等. “天绘一号”卫星工程建设与应用[J]. 遥感学报, 2012, 16(S): 2-5.
- [4] Takashi Hamazaki, Yuji Osawa, Key technology development for the advanced land observing satellite [C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, XXXIII(Part B1): 136-140.
- [5] Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Super resolution reconstruction of Chang'e -1 satellite CCD stereo camera images [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 404-408. (in Chinese)  
张磊, 杨建峰, 薛彬, 等. 嫦娥一号卫星立体相机影像超分辨率重建算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 404-408.
- [6] Han Xu, Ma Jun, Wang Zhongsu, et al. Calculation of change of space intersection angle for mapping camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 12, 19(12): 2862-2869. (in Chinese)  
韩旭, 马军, 王忠素, 等. 测绘相机在轨空间交会角变化的计算[J]. 光学精密工程, 2011, 12, 19(12): 2862-2869.
- [7] Lv Yong, Feng Qibo, Sun Shijun, et al. Feasibility analysis of on-orbit intersection angle monitoring for three-line-array mapping camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3390-3395. (in Chinese)  
吕勇, 冯其波, 孙世军, 等. 三线阵测绘相机交会角在轨监测可行性分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 12(41): 3390-3395. (in Chinese)
- [8] Wang Yu, Hu Guojun, Long Hui, et al. CCD image seamless mosaic on characteristic and dislocation fitting [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(S): 98-101. (in Chinese)  
王昱, 胡国军, 龙辉, 等. 特征与错位拟合的 CCD 图像无缝拼接[J]. 遥感学报, 2012, 16(S): 98-101.
- [9] Li Songming, Li Yan, Li Jindong. Mapping Satellite -1 transmission photogrammetric and remote sensing satellite [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(S): 10-15. (in Chinese)  
李松明, 李岩, 李劲东. “天绘一号”传输型摄影测量与遥感卫星[J]. 遥感学报, 2012, 16(S): 10-15.