

# 资源三号测绘卫星长条带产品区域网平差

张 过<sup>1,2</sup> 潘红播<sup>1</sup> 唐新明<sup>2</sup> 李德仁<sup>1</sup> 许妙忠<sup>1</sup> 周 平<sup>2</sup> 祝小勇<sup>2</sup>

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心,北京,100830

**摘 要:**资源三号测绘卫星除了提供无畸变的标准景产品以外,还提供将近 600 km 的长条带产品。该产品与标准景产品类似,生产过程中引入的投影差误差和交会误差可以忽略不计,有理多项式模型作为长条带产品的成像几何模型发布给用户。基于像方的仿射变换平差模型可以消除长条带影像中的轨道、姿态误差,达到子像素级定向精度。在周边布设控制点,资源三号测绘卫星三线阵长条带产品的平差平面精度约为 2.5 m,高程精度约为 1.6 m,达到单个标准景的平差精度。

**关键词:**资源三号测绘卫星;长条带产品;区域网平差;控制点

**中图法分类号:**P237.3; TP751 **文献标志码:**A

资源三号卫星是我国第一颗高分辨率民用立体测绘卫星,用于 1:50 000 立体测图及更大比例尺基础地理信息产品的生产和更新<sup>[1]</sup>。由于卫星影像成像范围较大,单个控制点获取成本比航空摄影测量高,且控制点获取周期更长,减少控制点数目是提高生产效率的关键因素。针对不同的卫星影像和成像几何模型,其平差方案不同,对控制点的数目以及分布要求也不一样<sup>[2-3]</sup>。

对于推扫式高分辨率卫星长条带影像数据来说,平差方案主要包含两种:基于严密成像几何模型和基于有理多项式模型(rational function model,RFM)。基于严密成像几何模型的平差方案,一般对其姿态、轨道模型进行改正<sup>[4-6]</sup>,而由于 RFM 参数不再带有物理意义,因此其平差方案通常为基于像方的多项式模型<sup>[2,7]</sup>。

本文对影响资源三号长条带产品平差精度的各个方面分别进行了阐述,分析了资源三号长条带产品的特性和生产过程中所引入的误差,介绍了长条带影像产品的平差模型。

## 1 超长景影像产品

资源三号测绘卫星为了方便用户使用,主要发布产品为无畸变的传感器校正产品。该产品是

利用虚拟电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)重成像技术完成多 CCD 拼接,生成视觉无缝和几何无缝的理想线中心投影影像。在高精度检校的基础上<sup>[8]</sup>,该产品利用虚拟 CCD 重成像技术<sup>[9-10]</sup>消除了 CCD 间的错位以及 CCD 间不平行等内畸变<sup>[11]</sup>,对积分时间、轨道和姿态进行改化,消除了外畸变,生成了无畸变传感器校正产品<sup>[10]</sup>。

虚拟重成像过程中,由于光线方向的改变和高程的不准确,将会引入投影差误差。若是利用重成像影像恢复地面高程,基高比会发生变化,这种变化将会引入交会误差。误差的大小受原始成像光线与重成像光线的夹角和高程误差的影响。在重成像制作传感器校正产品的过程中,改变成像光线的过程主要有两个:① 虚拟 CCD 替代各片 CCD 时,造成相对较为固定的角度改变;② 滤除姿态数据中的高频部分时造成姿态的改变。其中第一项由原始各片 CCD 的位置决定,第二项由卫星平台稳定度决定。

经过几何检校后,资源三号测绘卫星前、正、后视 CCD 各个探元在焦面上的分布如图 1(a)~1(c)所示,其中, $x$  轴为垂轨向, $y$  轴为沿轨向,拟合后的残差如图 1(d)~1(f)所示。从残差图可以看出,前视相机虚拟 CCD 与各片 CCD 之间最

收稿日期:2014-04-20

项目来源:测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201412007);国家科技支撑计划资助项目(2012BAH28B04);国家自然科学基金资助项目(41201361)。

第一作者:张过,博士,教授,博士生导师,从事航天摄影测量理论及应用研究。E-mail:guozhang@whu.edu.cn

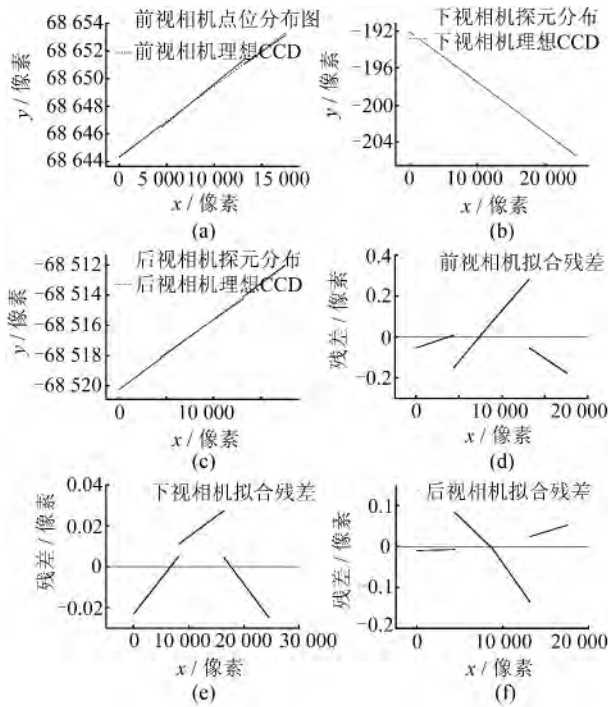


图 1 三线阵列相机虚拟 CCD 及其残差分布图

Fig. 1 Diagram of Virtual CCD of ZY3 Triplet Camera and Residual

大距离为 0.3 个像元,下视相机最大距离为 0.03 个像元,后视相机最大距离为 0.2 个像元。由于同一相机的各片 CCD 几乎同时成像,因此,姿态和位置差异所引入的投影差  $d$  可以忽略。由虚拟 CCD 替代原始 CCD 时引入的投影差与高程误差  $\delta h$  和像方残差  $\Delta y$  成正比,与主距  $f$  成反比<sup>[12]</sup>,如式(1)所示:

$$d = \frac{\delta h \cdot \Delta y}{f} \tag{1}$$

对于资源三号测绘卫星三线阵相机而言,当高程误差为  $1 \times 10^6$  m 时,引起的偏移为子像素级,因此,理想 CCD 替代原始 CCD 造成的重成像误差可以忽略。

资源三号提供地面扫描范围 100~600 km 的长条带数据。长条带产品的交会误差包括虚拟 CCD 替代各片 CCD 时引入的和姿态滤波时引入的两部分。虚拟 CCD 替代各片 CCD 时引入的交会误差较为固定,1 000 m 的高程误差引入交会误差 0.4 cm;而姿态滤波时引入的交会角误差受姿态稳定度影响。影响同轨立体模型高程精度的主要是俯仰角的变化,当俯仰角变化量小于  $10^{-5}$  rad 时,1 000 m 的高程误差引入交会误差 1.9 cm。因此,当选取合适的姿态模型时,引入的高程误差也是可以忽略的。

资源三号测绘卫星提供的长条带影像产品在生产过程中引入的投影差误差和交会误差可以忽

略。由于在生产过程中消除了内外畸变,资源三号测绘卫星长条带影像产品有理多项式模型替代严密成像几何模型精度较高。因此,资源三号测绘卫星发布的长条带产品提供 RFM 作为其成像几何模型。

## 2 长条带影像平差模型

对 RFM 来说,最为常用的是基于像方的多项式平差模型——仿射变换模型<sup>[2]</sup>,其包含 6 个未知数,最少需要三个控制点进行参数求解,其形式为:

$$\begin{aligned} \text{line} &= e_0 + e_1 \cdot x + e_2 \cdot y + y \\ \text{sample} &= f_0 + f_1 \cdot x + f_2 \cdot y + x \end{aligned} \tag{2}$$

式中, line、sample 为由 RFM 计算得到的影像坐标; $e_0、e_1、e_2、f_0、f_1、f_2$  为仿射变换系数; $(x, y)$  为像方测量值。对于控制点来说,地面坐标已知,故未知数仅仅是仿射变换系数;而对于检查点和连接点来说,则需要同时求解仿射变换系数和对应的地面点坐标。当有控制点参与平差时,通过计算得到检查点地面坐标值与实际地面坐标的中误差作为精度指标,评价平差结果的好坏。当没有控制点参与平差时,为自由网平差,可为每景影像求解出满足最优条件的仿射变换系数,并同时求解出检查点的地面坐标,从而评价影像的无控定位精度。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 实验数据

本文采用张家口地区相邻两轨影像作为实验数据,验证资源三号测绘卫星长条带影像区域网平差精度。两轨影像分别为 305 轨和 381 轨,其覆盖地面区域纵跨太行山脉,分布于内蒙古、山西省、河北省境内,测区宽 82 km,长 560 km,高程范围为 64~2 705 m。其中,305 轨覆盖 7 个标准景影像范围,381 轨覆盖 12 个标准景影像范围。每轨影像包含前、后、下视三视影像,其中,前、后视地面采样间隔为  $3.5 \text{ m} \times 3.7 \text{ m}$  (沿轨 3.7 m,垂轨 3.5 m),下视地面采样间隔为  $2.1 \text{ m} \times 2.1 \text{ m}$ 。影像获取时间分别为 2012-01-29 和 2012-02-08,时间跨度为 10 d。受时间、天气的限制,两轨影像的第一景均有少量雪覆盖,305 轨最后一景部分被云遮挡。

为了验证区域网平差的精度,在测区范围内均匀布设大量控制点,控制点均匀分布在影像范

围内,控制点与控制点之间间隔约 10 km。控制点大部分选取为道路交叉口,少量为地物转角处。在困难山区,部分锐角相交处选作了控制点。由于测区区域较大,大部分控制点利用 TOPCON NET-G3A 单点静态观测,部分控制点利用 MAGELLAN ProFlex500 进行网络 RTK 观测,经地面数据处理后定位精度在 0.1 m 之内。剔除部分无法识别点位及小角度道路交会处之后,余下的 392 个控制点在平面和高程上均匀分布。影像上控制点通过人工量测获取。

### 3.2 实验结果与讨论

资源三号测绘卫星采用无畸变传感器校正产品生产方案,因此影像内畸变较小,其 RFM 替代精度较高。但对于长条带数据来说,由于影像范围较大,RFM 不能和标准景一样完全拟合影像范围内成像几何。对于 7 景和 12 景的长条带影像数据来说,其 RFM 拟合平面中误差为 0.03 个像素之内,最大误差优于 0.09 个像素。根据 § 2 节中的平差模型,计算得到了地面点在 WGS-84 坐标系下的坐标值,为了较好地表示其精度水平,将坐标转换到了 WGS84 UTM 投影系下。

分析资源三号长条带产品在 3 种不同控制点分布方案下的精度水平:① 无控制点,即所有控制点用作检查点,以评价无控平差精度;② 4 角点布控,仅在影像覆盖范围的 4 个角点处布设控制点,以评价少量控制点分布下的平差精度;③ 大量控制点,保证每个标准景范围内至少包含 4 个控制点,以便于和标准景的区域网平差进行对比验证。各种平差方案的结果对比如表 1 所示。

表 1 各平差结果对比表

Tab. 1 Comparison of Bundle Adjustment of Different Schemes

平差方案	控制点 点数	检查 点数	平面中误 差/m	高程中误 差/m
两轨长条带	0	392	6.24	5.46
两轨长条带	7	385	2.46	1.49
两轨长条带	18	374	2.40	1.65
381 轨长条带	0	275	2.69	8.52
381 轨长条带	4	271	2.37	1.61
381 轨长条带	34	241	2.29	1.65
305 轨长条带	0	192	11.21	3.82
305 轨长条带	4	188	2.77	1.58
305 轨长条带	16	176	2.41	1.53
381 轨标准景	34	241	2.86	1.88
305 轨标准景	16	176	2.54	1.56

当将 § 3.1 节所有控制点作为检查点对两轨区域长条带影像进行无控平差时,影像定向中误差为 0.357 个像素,其中,垂轨向为 0.274 个像

素,沿轨向为 0.230 个像素,即定向精度为子像素级,检查点中误差平面为 6.24 m,高程为 5.46 m。误差分布如图 2 所示,381 轨单独进行无控平差时,其平面定位精度为 2.69 m,高程定位精度为 8.52 m。305 轨无控平差时,其平面中误差为 11.21 m,高程中误差为 3.82 m,误差分布呈现明显的系统性偏移。由此可以说明,长条带数据的姿轨误差是系统性的。

当利用 7 个控制点对两个条带进行周边布控,至少保证每景 4 个控制点平差时,其定向中误差为 0.46 个像素,其垂轨向误差为 0.34 个像素,沿轨向误差为 0.31 个像素,检查点平面中误差 2.46 m,高程中误差 1.49 m,误差分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出,误差呈现随机性,且此种情况下,利用少量控制点平差的精度与标准景所能达到的精度相仿。这表明可以利用稀少控制点实现大区域测图且不损失精度。而 381 轨单独利用 4 个控制点进行平差时,其平面中误差为 2.37 m,高程中误差为 1.61 m,误差分布见图 4;305 轨平面中误差为 2.77 m,高程中误差为 1.58 m。

两轨条带数据增加到 18 个控制点时,检查点平面中误差 2.40 m,高程中误差 1.65 m。与 7 个控制点相比,精度并无明显提升,且高程精度有所降低,主要是控制点选点精度的差异造成的。

为对比标准景模式与长条带模式传感器校正产品的平差精度,将长条带影像产品与标准景影像产品分别进行平差验证。对标准景进行平差时,没有顾及条带内标准景之间轨道和姿态之间的相关性,即分别为每景标准景影像求出其相应的改正模型。为了避免长条带产品与标准景影像产品之间选点精度的差异,将长条带影像上的像点坐标反算回原始影像,再计算出相应标准景上的像点坐标。

将 381 轨长条带影像将拆分为 12 景,305 轨长条带影像拆分为 7 景。在每景影像上至少分布 4 个控制点,并尽量位于 4 角点处。其中,381 轨上布设 34 个控制点、241 个检查点进行平差,检查点中误差为 2.86 m,高程中误差为 1.88 m,如图 5 所示。将这些控制点应用于长条带产品平差时,检查点平面中误差为 2.29 m,高程中误差为 1.65 m。305 轨布设 16 个控制点、176 个检查点进行平差,其平面中误差为 2.54 m,高程中误差为 1.56 m;而 305 轨长条带产品平差时,平面中误差为 2.41 m,高程中误差为 1.53 m。

从上述精度对比可以看出,305 轨长条带产品与标准景产品在有大量控制点的情况下,平差

精度相近。而 381 轨的标准景精度较长条带产品精度要差得多,主要原因是控制点的分布、控制点的精度以及求解参数数目的问题。长条带影像产品只用求解 18 个参数,而标准景影像产品需要求解 216 个参数,此时,控制点的误差将会造成部分解的不稳定。如图 4 所示,在利用 4 个控制点进行平差后,检查点中误差呈现随机分布特点,有少

量检查点误差较大。但当对标准景进行平差处理时,可以看出检查点误差增大了,其主要原因是该区域为山区,控制点特征不明显,引起标准景内模型精度下降,从而导致该区域检查点误差较大。如图 5 所示,第三景与第四景之间出现了明显的平面误差,而这一现象在长条带产品中并没有出现。

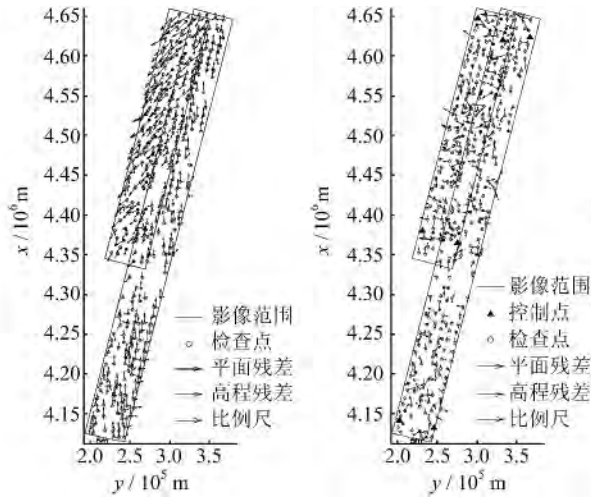


图 2 两轨长条带数据无控平差误差分布图

图 3 两轨条带数据周边布控平差误差分布图

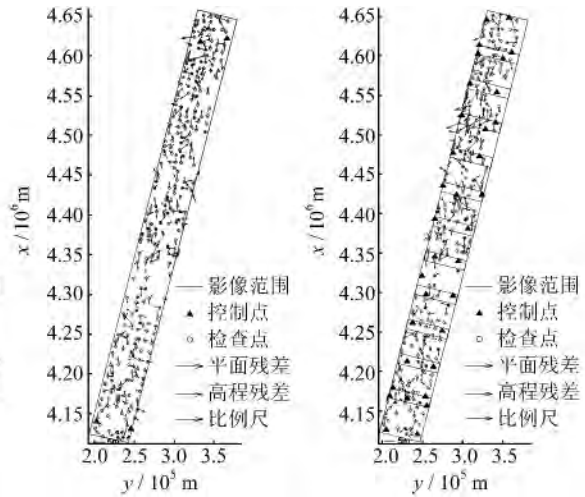


图 4 381 轨长条带数据角点布控平差误差分布图

图 5 381 轨标准景带控平差残余误差分布图

Fig. 2 Residual Errors of 0 GCPs, Derived Using Bundle Adjustment

Fig. 3 Residual Errors of 7 GCPs, Derived Using Bundle Adjustment

Fig. 4 Residual Errors of Long Strip Scenes of Orbit 381, Derived Using Bundle Adjustment

Fig. 5 Residual Errors of Standard Scenes, Derived Using Bundle Adjustment

利用长条带数据进行带控平差的精度要优于标准景平差的精度,其主要原因在于控制点质量和求解参数的数目。长条带数据对控制点数目要求较少,在 4 个控制点的条件下即可改正相应的轨道、姿态误差,因此选取质量高的控制点即可;标准景在为每景单独求解平差模型时,由于控制点分布不一定能恰好位于影像角点,或者角点处控制点精度不高,将直接影响该标准景内检查点精度,从而造成景内精度降低。

换模型作为长条带影像产品的平差模型,进行无控、稀少控制点的平差,其定向精度可以达到子像素级。

长条带影像产品在条带的两端分别布设少量控制点即可消除整个条带内的误差,达到与单个标准景相近的定位精度,这将大大减少大规模区域测图对控制点数目的需求,且便于控制点的布设与量测。对于同一区域的标准景产品,其对控制点数目要求较多,且受控制点精度影响较大。在周边布设控制点,且点位精度较好时,资源三号测绘卫星三线阵标准景产品和长条带产品的平差平面精度约为 2.5 m,高程精度约为 1.6 m。

### 4 结 语

资源三号测绘卫星除了提供标准景产品以外,还提供长条带影像产品。该产品在生产过程中引入的投影差误差和交会误差可以忽略不计。由于该产品消除了内外畸变,因此,其 RFM 替代中误差优于 0.03 个像素,故 RFM 被作为该产品的成像几何模型发布给用户。

由于长条带影像产品的姿态轨道误差在一轨之内相对稳定,因此,可以使用基于像方的仿射变

### 参 考 文 献

[1] Tang X, Zhang G, Zhu X, et al. Triple Linear-Array Imaging Geometry Model of Ziyuan-3 Surveying Satellite and Its Validation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 191-198(唐新明,张过,祝小勇,等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报,

- 2012, 41(2): 191-198)
- [2] Grodecki J, Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 59-68
- [3] Jacobsen K. Orientation of High Resolution Optical Space Images[C]. The ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida, 2007
- [4] Kim T, Kim H, Rhee S. Investigation of Physical Sensor Models for Modelling SPOT 3 Orbits[J]. *The Photogrammetric Record*, 2007, 22(119): 257-273
- [5] Fraser C S, Ravanbakhsh M. Precise Georeferencing of Long Strips of ALOS Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(1): 87-93
- [6] Gupta A, Naina J S, Singh S K, et al. Long Strip Modelling for CARTOSAT-1 with Minimum Control[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, 2008
- [7] Zhang L, Zhang J, Chen X, et al. Block-Adjustment with SPOT-5 Imagery and Sparse GCPs Based on RFM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(4): 302-310(张力,张继贤,陈向阳,等.基于有理多项式模型 RFM 的稀少控制 SPOT-5 卫星影像区域网平差[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 302-310)
- [8] Jiang Y, Zhang G, Tang X, et al. High Accuracy Geometric Calibration of ZY-3 Three-Line Image[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 523-529(蒋永华,张过,唐新明,等.资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 523-529)
- [9] Zhang G, Liu B, Jiang W. Inner FOV Stitching Algorithm of Spaceborne Optical Sensor Based on the Virtual CCD Line [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(06): 696-701(张过,刘斌,江万寿.虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接[J]. 中国图像图形学报, 2012, 17(6): 696-701)
- [10] Pan H, Zhang G, Tang X, et al. Basic Products of the ZiYuan-3 Satellite and Accuracy Evaluation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 516-522(潘红播,张过,唐新明,等.资源三号测绘卫星传感器校正产品几何模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 516-522)
- [11] Poli D. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2005

## Block Adjustment of ZY-3 Long Strip Scenes

ZHANG Guo<sup>1,2</sup> PAN Hongbo<sup>1</sup> TANG Xinming<sup>2</sup> LI Deren<sup>1</sup>  
XU Miao zhong<sup>1</sup> ZHOU Ping<sup>2</sup> ZHU Xiaoyong<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Satellite Surveying and Mapping Application Center, State Bureau of Surveying and Mapping, Beijing 100083, China.

**Abstract:** ZiYuan-3 not only provides distortionless standard scenes for sensor corrected products but also long strip scenes, whose length could extend almost 600 km. The long strip scenes are similar to standard scenes, whose mismatch and elevation errors, introduced by production procedures are ignorable. A rational function model (RFM) for long strip scenes is provided. The image space affine transformation is used to eliminate attitude and ephemeris errors in long strip scenes, and sub-pixel orientation accuracy is made available. When ground control points (GCPs) are deployed around the corners of the survey area, the RMS (root mean square) of the plane and elevation of long strip scenes was 2.5 m and 1.6 m respectively. The accuracy is similar to the single standard scenes.

**Key words:** ZY3 Satellite; long strip product; block adjustment; ground control points

**First author:** ZHANG Guo, PhD, professor, specializes in space photogrammetry, geometry processing of spaceborne optical/SAR/InSAR imagery, altimetry and high accuracy image matching. E-mail: guozhang@whu.edu.cn

**Foundation support:** Public Science Research Program of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 201412007; the National Key Technology R&D Program of China, No. 2012BAH28B04; the National Natural Science Foundation of China, No. 41201361.