

科学出版社
出版
中国地理学会环境遥感分会
中国科学院遥感应用研究所
主办

JOURNAL OF
REMOTE
SENSING

遥感学报

2012年 Vol.16 第16卷 增刊

ISSN 1007-4619 CN11-3841/TP CODEN YXAUAB

“天绘一号” 卫星专刊



多光谱影像



高分辨率影像



融合后的影像

序言	(1)
院士特邀	
“天绘一号”卫星工程建设与应用..... 王任享, 胡莘, 王新义, 杨俊峰	(2)
综述	
无地面控制点条件下卫星摄影测量的发展与现状..... 尹明, 李晓燕	(6)
“天绘一号”传输型摄影测量与遥感卫星..... 李松明, 李岩, 李劲东	(10)
相机技术	
测绘用离轴三反光学系统技术..... 郭疆, 刘金国, 王国良, 朱磊, 龚大鹏, 齐洪宇	(17)
“天绘一号”卫星在轨辐射定标方法..... 黄红莲, 易维宁, 乔延利, 杜丽丽	(22)
多光谱相机基于灰阶靶标的在轨绝对辐射定标..... 陈洪耀, 李胜利, 司孝龙, 李晶, 徐伟伟, 王戟翔, 杨俊峰, 张黎明, 沈政国	(28)
“天绘一号”卫星测绘相机在轨几何定标..... 李晶, 王蓉, 朱雷鸣, 黄海乐	(35)
卫星技术	
“天绘一号”卫星在轨性能评估..... 李岩, 陶志刚, 李松明, 郭志胜, 史简, 高翠东	(40)
测绘卫星的姿态控制技术..... 王新民, 刘洁, 李洽, 张屹峰, 董筠	(48)
GPS高精度校时在卫星控制系统中的应用..... 李洽, 程砾瑜, 曹海宁, 李鹤, 董筠, 李松明	(52)
星传感器在轨测量误差分析..... 霍德聪, 黄琳, 李岩, 陶志刚, 李松明	(57)
“天绘一号”卫星热控设计及飞行验证..... 刘伟, 杨沪宁	(61)
数传通道遥测数据处理方法研究..... 李敬博, 马楠, 任光杰	(66)
“天绘一号”卫星镉镍蓄电池组及其在轨性能介绍..... 李焱, 谢守楹, 乔学荣, 郑智勇, 杨德智	(70)
“天绘一号”卫星星务分系统研究与实现..... 史简, 宋智, 李国军	(74)
地面处理技术	
“天绘一号”卫星地面应用系统设计与实现..... 胡莘, 王新义, 杨俊峰	(78)
“天绘一号”卫星三线阵影像条带式区域网平差..... 张永军, 郑茂腾, 王新义, 黄心蕙	(84)
“天绘一号”卫星星传感器精度分析..... 王兴涛, 李迎春, 李晓燕	(90)
“天绘一号”01星立体影像定位精度检测..... 付勇, 邹松柏, 刘会安	(94)
特征与错位拟合的CCD图像无缝拼接..... 王昱, 胡国军, 龙辉, 张廷涛	(98)
基于GeoSOT网络的“天绘一号”卫星影像数据组织..... 李世忠, 宋树华, 程承旗, 耿忠	(102)
“天绘一号”卫星基于摄影任务的轨道维持策略..... 冯宁, 元朝鹏, 官轶松, 黄显安, 邢坤	(108)
“天绘一号”卫星无地面控制点EFP多功能光束法平差..... 王建荣, 王任享	(112)

JOURNAL OF REMOTE SENSING

(Vol.16 Sup 2012)

CONTENTS

Academician's note

The construction and application of Mapping Satellite-1 engineering
..... *WANG Renxiang, HU Xin, WANG Xinyi, YANG Junfeng* (5)

Review

Development and present situation of satellite photogrammetry without control points *YIN Ming, LI Xiaoyan* (9)

Mapping Satellite-1 transmission type photogrammetric and remote sensing satellite *LI Songming, LI Yan, LI Jindong* (16)

Technology of camera

Technology of off-axis TMA aerospace mapping camera
..... *GUO Jiang, LIU Jinguo, WANG Guoliang, ZHU Lei, GONG Dapeng, QI Hongyu* (21)

On orbit radiometric calibration for Mapping Satellite-1 sensor
..... *HUANG Honglian, YI Weining, QIAO Yanli, DU Lili* (27)

Multispectral imager vicarious radiometric calibration based on gray-scale tarps *CHEN Hongyao,
LI Shengli, SI Xiaolong, LI Jing, XU Weiwei, WANG Jixiang, YANG Junfeng, ZHANG Liming, SHEN Zhengguo* (34)

In-flight geometric calibration for Mapping Satellite-1 surveying and mapping camera
..... *LI Jing, WANG Rong, ZHU Leiming, HUANG Haile* (39)

Technology of satellite

Mapping Satellite-1 in-orbit performance evaluation
..... *LI Yan, TAO Zhigang, LI Songming, GUO Zhisheng, SHI Jian, GAO Cuidong* (47)

Attitude control technology of mapping satellite
..... *WANG Xinmin, LIU Jie, LI Han, ZHANG Yifeng, DONG Jun* (51)

Usage of high accuracy GPS time calibration in satellite onboard control system
..... *LI Han, CHENG Liyu, CAO Haining, LI He, DONG Jun, LI Songming* (56)

An analytical method of star tracker measurement errors
..... *HUO Decong, HUANG Lin, LI Yan, TAO Zhigang, LI Songming* (60)

Mapping Satellite-1 thermal design and flight validation *LIU Wei, YANG Huning* (65)

Processing on telemetry data of data transmission channel *LI Jingbo, MA Nan, REN Guangjie* (69)

The introduction of Ni-Cd battery of Mapping Satellite-1 and its on-orbit performance
..... *LI Yao, XIE Shouyun, QIAO Xuerong, ZHENG Zhiyong, YANG Dezhi* (73)

Implementation of Mapping Satellite-1's house keeping system *SHI Jian, SONG Zhi, LI Guojun* (77)

Ground processing technology

Design and implementation of ground application system for Mapping Satellite-1
..... *HU Xin, WANG Xinyi, Yang Junfeng* (83)

Strip-based bundle adjustment of Mapping Satellite-1 three-line array imagery
..... *ZHANG Yongjun, ZHENG Maoteng, WANG Xinyi, HUANG Xinhui* (89)

Mapping Satellite-1 star sensor accuracy analysis *WANG Xingtao, LI Yingchun, LI Xiaoyan* (93)

Evaluation of the location accuracy of the Mapping Satellite-1 stereo image *FU Yong, ZOU Songbai, LIU Hui'an* (97)

CCD image seamless mosaic on characteristic and dislocation fitting
..... *WANG Yu, HU Guojun, LONG Hui, ZHANG Tingtao* (101)

Mapping Satellite-1 remote sensing data organization based on GeoSOT
..... *LI Shizhong, SONG Shuhua, CHENG Chengqi, GENG Zhong* (107)

Strategy of Mapping Satellite-1 orbit maintenance based on photographic mission
..... *FENG Ning, YUAN Zhaopeng, GONG Yisong, HUANG Xian'an, XING Kun* (111)

EFP multi-functional bundle adjustment of Mapping Satellite-1 without ground control points
..... *WANG Jianrong, WANG Renxiang* (115)

“天绘一号”卫星三线阵影像条带式区域网平差

张永军¹, 郑茂腾¹, 王新义², 黄心蕙¹

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;

2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

摘要: 针对框幅式影像传统的空中三角测量算法不适用于三线阵影像, 因此必须设计相应的数学模型。三线阵推扫式传感器在成像时, 不同扫描线对应的摄影中心和姿态都不一样, 空中三角测量解算时, 外方位元素个数大于观测值个数, 理论上无法解算每一条扫描线的方位元素, 因此需要采用合适的数学模型模拟卫星轨道。目前常用的有3种轨道模型: 线性多项式模型, 分段多项式模型和定向片模型。本文利用“天绘一号”卫星的真实数据, 在WGS-84坐标系下进行3种模型的平差对比试验, 同时采用不同的控制点布设方案, 分析各模型在不同控制点布设方案下所能达到的精度水平。

关键字: 三线阵影像, 区域网平差, 传感器模型, 精度分析

中图分类号: P23 **文献标志码:** A

引用格式: 张永军, 郑茂腾, 王新义, 黄心蕙. 2012. “天绘一号”卫星三线阵影像条带式区域网平差. 遥感学报, 16(增刊): 84-89
Zhang Y J, Zheng M T, Wang X Y and Huang X H. 2012. Strip-based bundle adjustment of Mapping Satellite-1 three-line array imagery. Journal of Remote Sensing, 16(增刊): 84-89

1 引言

三线阵影像技术最早由Hofmann提出(Hofmann等, 1982), 三线阵推扫技术克服了数码影像幅小的缺点, 大大提高了摄影的基高比, 使得平差后高程精度得到改善。这一方案后来被成功应用到德国的MOMS系统, 并取得了较好的结果(Ebner和Konus, 1991)。法国的SPOT5卫星([2012-07-30]http://libra.msra.cn/publication/3785821/spot-satellite-geometry-hardbook), 日本的ALOS卫星(Zhang等, 2008; Rottensteiner等, 2009)也都是采用的三线阵推扫式设计, 印度的IRS-P5卫星上搭载了两个独立的相机, 分别在前后两个方向侧视, 构成同轨立体观测(Zhang等, 2008)。这些卫星在立体测图领域的应用均取得了成功。

2010年发射的“天绘一号”卫星是中国第一颗立体测绘卫星, 搭载了三线阵推扫式传感器, 采用单相机多镜头的立体成像方式。前视, 后视与下视的夹角

分别是 $\pm 25^\circ$, 最大立体交会角为 50° , 地面采样间隔为5 m, 其成像原理如图1所示。但是由于制造工艺的限制, 国产卫星的定轨定姿精度与国外先进水平还有一定差距, 必须采用地面控制点提高定位精度。传统的分景处理办法可能导致相邻分景的正射影像精度不一, 甚至误差的方向相反, 对这些分景的正射影像进行拼接时会产生拼接裂缝, 因此需要对整区域的长条带数据进行空中三角测量。

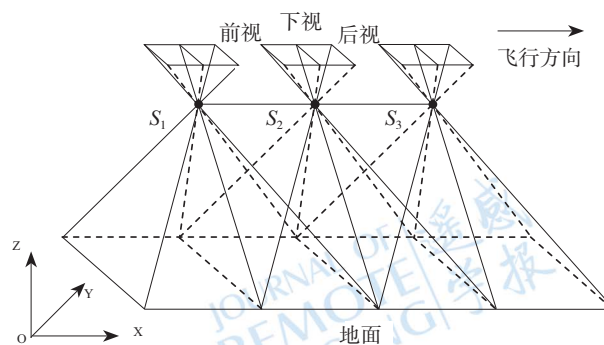


图1 “天绘一号”卫星三线阵传感器成像原理图 (S_1, S_2, S_3 分别表示3个时刻三线阵传感器的投影中心)

收稿日期: 2012-08-20; 修订日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41071233); 国家高技术研究发展计划(863计划)(编号: 2013AA12A401, 2012AA12A301); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: 2012213020205, 2012213020201);

第一作者简介: 张永军(1975—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事数字摄影测量与遥感、计算机视觉, 多源数据融合等方面的研究。E-mail: zhangyj@whu.edu.cn.

摄影测量几何处理的核心内容，就是建立影像空间与物方空间的几何对应关系。对于卫星三线阵影像的像地转换关系模型，大致可以分为两类：严格物理模型和通用模型(McGlone, 1996)。所谓通用模型就是采用有理函数来描述影像空间与物方空间之间的转换关系，即有理函数模型RFM(Tao和Hu, 2001)。而严格物理模型是指用外方位元素来描述传感器的位置和姿态，但这种模型需要采用合适的轨道模型来描述平台的位置和姿态变化。Jung和Bethel(2008)提出了基于一阶高斯马尔科夫算子的随机函数模型，而常用的有二次多项式模型(QPM)、系统误差补偿模型(SECM)、分段多项式模型(PPM)以及定向片模型(OIM)等。很多学者对上述模型进行了大量研究(Hofmann 等, 1982; Ebner和Kouns, 1991; McGlone, 1996; Zhang 等, 2008; 赵双明和李德仁, 2006; 刘军 等, 2009)，但很少有人专门对这些模型进行系统的比较。本文将联合“天绘卫星”的姿轨数据，进行长条带三线阵影像(轨道长度超过1000 km)的联合区域网平差试验。分别采用QPM, SECM, OIM等3种模型对长轨道大区域的测区进行空中三角测量简称：空三处理，比较各模型消除系统误差的能力，并给出精度评价。同时对于每种模型，分别采用不同的控制点布设方案进行试验，验证各模型对控制点数量的敏感程度。前期的试验证明，在长条带区域，周边布设少量控制点，利用定向片模型进行平差处理，可以达到1—2个GSD的精度。

2 区域网平差几何模型

卫星下传的轨道和姿态测量值是相对于卫星本体坐标系的，三线阵传感器的投影中心与卫星本体坐标系原点有一定的偏移，其视轴与卫星本体坐标系3个坐标轴有3个夹角，因此成像几何关系式如下所示：

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{sat} \\ Y_{sat} \\ Z_{sat} \end{bmatrix} + R(l)R(p)R(k) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + R(\varphi)R(\omega)R(\kappa)R(l)R(p)R(k) \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， X_p, Y_p, Z_p 是地面点物方坐标； $X_{sat}, Y_{sat}, Z_{sat}$ 是卫星的轨道测量值； φ, ω, κ 是卫星本体相对于物

方坐标系的姿态测量值； l, p, k 是三线阵传感器相对于卫星本体坐标系的3个旋转角； u, v, w 是三线阵传感器与投影中心的偏移值； x, y 是像平面坐标； f 是相机焦距。

由于卫星轨道的测量精度有限，且影像分辨率较低，三线阵传感器的投影中心与卫星本体坐标系的偏移值测量误差较小，这些偏移值可以合并至外方位元素线元素的系统误差补偿参数中求解。传感器的像空间坐标系与卫星本体坐标系之间的旋转角度与卫星的外方位角元素相关(Kim和Dowman, 2006)，因此可以合并至外方位元素角元素中求解。经过上述变换后平差模型简化为：

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{sat} \\ Y_{sat} \\ Z_{sat} \end{bmatrix} + R(\varphi)R(\omega)R(\kappa) \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1 二次多项式模型(QPM)

外方位角元素和线元素可以分别用一个关于时间的二次多项式来表达：

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (3)$$

式中， $P(t)$ 代表 t 时刻的外方位元素， a_0, a_1, a_2 为二次多项式参数； t 为时间参数。

二次多项式模型区域网平差的误差方程如下式所示：

$$\begin{aligned} V &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{x}_{gcp} - l \quad P \\ V_{gcp} &= \mathbf{x}_{gcp} - l_{gcp} \quad P_{gcp} \end{aligned} \quad (4)$$

式中， V 表示像点观测值改正数， V_{gcp} 表示控制点观测值改正数， \mathbf{x} 是系统误差补偿参数未知数向量； \mathbf{x}_{gcp} 是控制点虚拟观测值向量； l 是像点观测值残差； l_{gcp} 是控制点虚拟观测值残差； \mathbf{A}, \mathbf{D} 分别是对应的未知数的设计矩阵； P, P_{gcp} 分别是像点观测值以及控制点虚拟观测值的权值。

2.2 系统误差补偿模型(SECM)

定轨定姿数据系统误差，用一个关于时间的二次多项式表达：

$$P(t) = P_0(t) + a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (5)$$

式中， $P_0(t)$ 代表 t 时刻定轨定姿数据观测值。 a_0, a_1, a_2 为系统误差补偿模型的二次多项式参数； t 为时间参数。

系统误差补偿模型区域网平差的误差方程如下式所示：

$$\begin{cases} V = A_1 x + D x_{gcp} - l & P \\ V_{sys} = A_1 x & -l_{sys} \quad P_{sys} \\ V_{gcp} = & x_{gcp} - l_{gcp} \quad P_{gcp} \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_{sys} 表示系统误差补偿参数虚拟观测值改正数, x 是系统误差补偿参数未知数向量; x_{gcp} 是控制点虚拟观测值向量; l 是像点观测值残差; l_{sys} 是系统误差补偿参数虚拟观测值残差; l_{gcp} 是控制点虚拟观测值残差; A_1, A_2, C, D 分别是对应的未知数的设计矩阵; P, P_{sys}, P_{gcp} 分别是像点观测值, 系统误差补偿参数虚拟观测值以及控制点虚拟观测值的权值。

2.3 定向片模型(OIM)

选取卫星在若干定向片时刻所对应的外方位元素作为未知数, 其余的每一条扫描线时刻对应的外方位元素由相邻的定向片外方位元素内插得到:

$$P(t_j) = \sum_{i=K-1}^{K+2} \left[P(t_i) \cdot \prod_{\substack{k=K-1 \\ k \neq i}}^{K+2} \frac{t-t_k}{t_i-t_k} \right] \quad (7)$$

式中, $P(t_j)$ 和 $P(t_i)$ 分别是 t_j 和 t_i 对应时刻的外方位元素。

卫星的轨道以及姿态测量值都将作为观测值引入联合区域网平差模型中, 系统误差补偿参数也将作为带权观测值引入其中, 定向片模型联合区域网平差误差方程如下所示:

$$\begin{cases} V = A_1 x_{pos} + B_1 x_{att} + C x_{sys} + D x_{gcp} - l & P \\ V_{pos} = A_2 x_{pos} & -l_{pos} \quad P_{pos} \\ V_{att} = & B_2 x_{att} & -l_{att} \quad P_{att} \\ V_{sys} = & x_{sys} & -l_{sys} \quad P_{sys} \\ V_{gcp} = & x_{gcp} - l_{gcp} & P_{gcp} \end{cases} \quad (8)$$

式中, V_{pos} 表示位置观测值改正数, V_{att} 表示姿态观测值改正数, x_{pos} 是定向片外方位线元素未知数向量; x_{att} 是定向片外方位角元素未知数向量; x_{sys} 是系统误差补偿参数未知数向量; x_{gcp} 是控制点虚拟观测值向量; l 是像点观测值残差; l_{pos} 是位置观测值残差; l_{att} 是姿态观测值残差; l_{sys} 是系统误差补偿参数虚拟观测值残差; l_{gcp} 是控制点虚拟观测值残差; A_1, A_2, B_1, B_2, C, D 分别是对应的未知数的设计矩阵; $P, P_{pos}, P_{att}, P_{sys}, P_{gcp}$ 分别是像点观测值, 位置观测值, 姿态观测值, 系统误差补偿参数虚拟观测值以及控制点虚拟观测值的权值。

3 区域网平差实验与分析

本文利用“天绘一号”的LMCCD相机的三线阵CCD真实影像数据, 分别采用前述的3种平差模型进行对比试验, 系统地比较3种模型在消除系统误差方面的能力; 同时验证长轨道数据至少需要多少个控制点才能获取最佳处理结果。数据包括1个条带, 轨道总长度大于1100 km, 其中三线阵地面重叠覆盖区域500 km。整个测区跨越东北三省, 其中包括各种地形, 如丘陵, 山地, 平原等, 如图2所示。

采用三线阵影像空三匹配程序进行匹配获取均匀分布的加密点(中误差为0.3像元左右), 在已有的1:10000正射影像上量测了58个控制点(理论最大误差: 高程不超过2 m, 平面不超过3 m)。但由于是以前的航空影像, 且有人工判读误差的影响, 不排除这些控制点含有较大的误差。区域网平差时, 定轨定姿观测值采用定权策略, 取像点观测值的权值为1, 其余观测值的权值为其精度与像点观测值精度反比的平方。对于定向片模型, 定向片选取时间间隔为10 s(约合15000条扫描线)。

由于卫星的轨道以及姿态测量值采用的均是WGS-84地心坐标系, 同时为了避免地球曲率的影响, 所有平差试验均在WGS-84坐标系下进行。平差后精度分析时, 检查点的地心坐标将转换至平面投影坐标和大地高度进行统计。

3.1 不同控制点布设方案下二次多项式模型平差结果

采用二次多项式模型以及3种不同的控制点布设方案进行区域网平差试验。检查点残差分布结果如下图3及表1所示:

表1 采用不同的控制点布设方案时二次多项式模型的残差

检查点残差	统计表 /m								
	4控制点54检查点			14控制点44检查点			52控制点6检查点		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
均值	5.2	-24.6	-83.5	-1.0	0.4	-8.0	0.5	0.7	-1.5
标准差	9.9	23.2	40.3	10.9	17.5	34.0	13.5	12.2	18.4
最大值(绝对值)	26.4	56.7	121.5	30.5	33.5	74.3	23.4	22.8	27.1
最小值(绝对值)	0.0	1.3	2.2	0.3	0.5	1.3	3.2	0.3	3.2

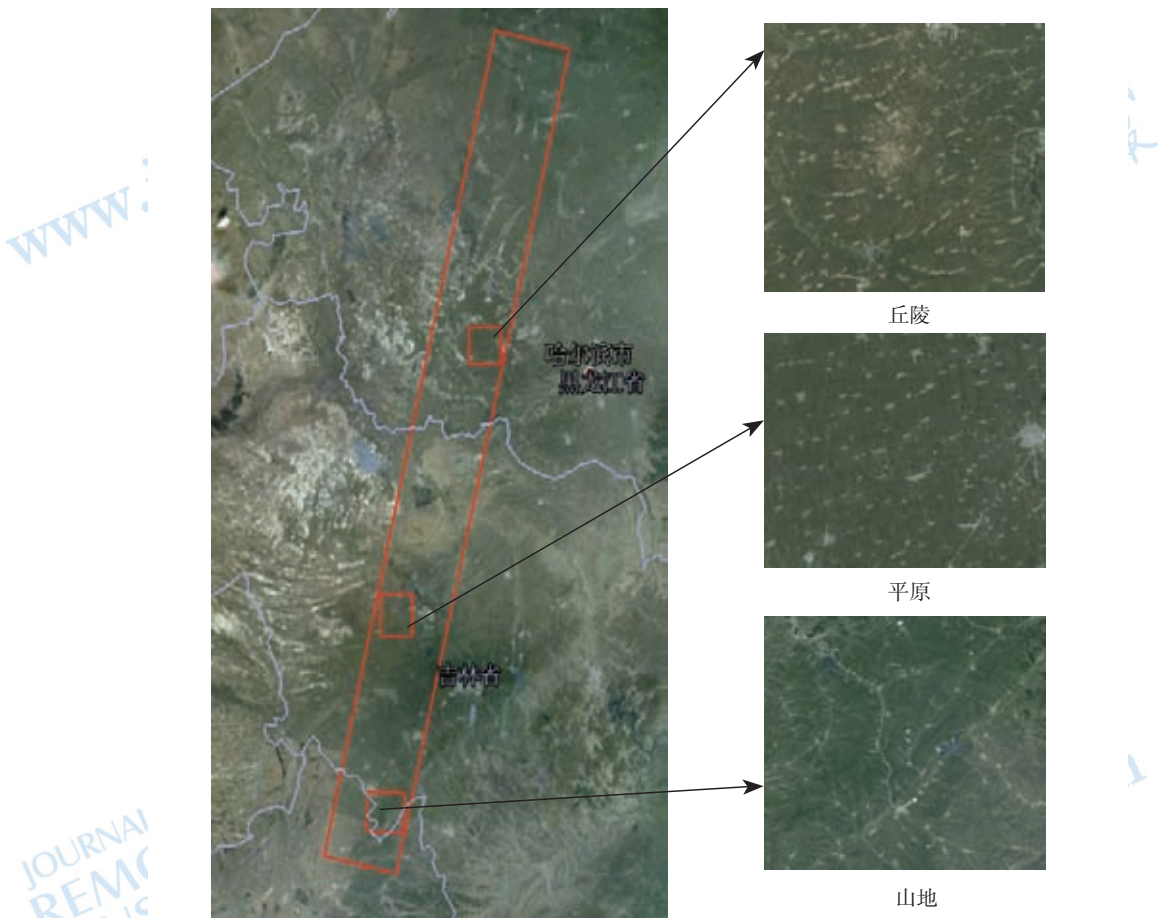
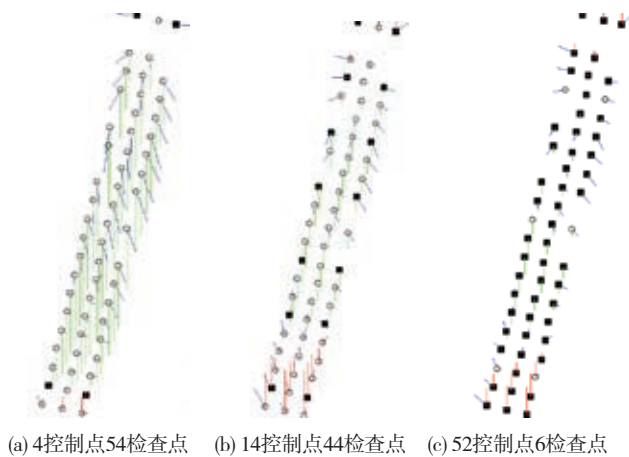


图2 测区地面范围覆盖图



(a) 4控制点54检查点 (b) 14控制点44检查点 (c) 52控制点6检查点

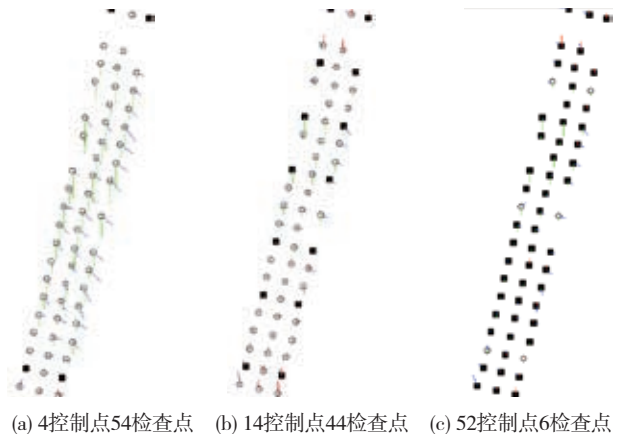
图3 二次多项式模型(实心正方形表示控制点, 空心圆圈代表检查点, 红色直线表示正的高程残差, 绿色直线表示负的高程残差, 蓝色直线代表平面残差方向, 直线的长度代表各残差的大小)

从图3和表1可以看出, 随着控制点的增加, 利用二次多项式模型处理的检查点残差呈现变小的趋势, 但是都存在明显的残余系统误差。从表1可以看出, 即使采用足够多的控制点, 检查点的残差最大仍然达到30 m。这表明用二次多项式拟合长轨道(大于

1000 km)是不合理的, 与理论相符。

3.2 不同控制点布设方案下系统误差补偿模型平差结果

采用系统误差补偿模型以及3种不同的控制点布设方案进行区域网平差试验, 检查点残差分布结果如图4和表2所示:



(a) 4控制点54检查点 (b) 14控制点44检查点 (c) 52控制点6检查点

图4 系统误差补偿模型(采用不同的控制点布设方案的残差分布)

表2 采用不同的控制点布设方案时系统误差补偿

检查点 残差	模型的残差统计表 /m								
	4控制点54检查点			14控制点44检查点			52控制点6检查点		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
均值	9.4	-13.2	-25.3	0.5	1.9	-1.6	2.2	2.0	-7.2
标准差	5.1	9.9	13.2	7.4	8.7	13.7	8.0	7.3	8.2
最大值	22.3	28.8	54.3	12.3	24.5	20.9	13.5	9.4	15.3
最小值	0.4	0.0	0.2	0.2	0.2	0.4	1.0	0.3	5.0

从图4和表2可以看出,系统误差补偿模型随着控制点的增加,检查点残差有变小的趋势,但并不是控制点越多,检查点残差越小,而是有一个临界值,而当控制点数量增加到14个时,检查点残差减小到1 m量级,这是相对合理的范围,说明系统误差已经大部分被消除。随着控制点的进一步增加,到52个控制点时,检查点残差的均值并没有继续变小,说明系统误差已经得到较好的消除,经过大量实验证明此处采用14个控制点是较为合适的。

3.3 不同控制点布设方案下定向片模型平差结果

采用定向片模型以及4种不同的控制点布设方案进行区域网平差试验。检查点残差分布结果如图5及表3所示。

表3 采用不同的控制点布设方案时定向片模型的残差统计表 /m

检查点 残差	4控制点 54检查点			8控制点 54检查点			14控制点 44检查点			22控制点 36检查点		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
均值	3.8	4.5	-34.8	-0.8	0.9	1.3	-0.0	1.6	-1.6	-0.9	-0.0	1.3
标准差	12.6	21.6	32.4	13.1	5.7	12.4	6.0	4.6	3.9	7.3	6.2	5.5
最大值	32.3	46.9	93.8	20.2	14.2	27.3	13.7	15.1	10.3	14.5	11.1	10.3
最小值	0.2	0.0	1.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1

从图5以及表3可以看出,利用定向片模型进行平差,随着控制点的增加,平差后检查点的残差逐渐变

小,但当控制点数量达到一定数量后,继续增加控制点并不能进一步提高其精度。当只有4个控制点的时候,检查点残差呈现出明显的系统误差,特别是高程方向出现波浪状的残差分布,这说明4个控制点不足以控制整个轨道;当控制点点数增加至14个时,检查点残差减小到了合理的范围。从表3中的数值可以看到,利用14个控制点进行平差后检查点残差的均值达到最小,这表明系统误差已经大部分消除。

4 结论

本文分别采用3种平差模型和5种不同的控制点布设方案,对轨道长度超过1000 km的“天绘一号”卫星三线阵数据进行整体区域网平差。通过对实验结果的分析,得到以下结论:

(1)对于长轨道数据(轨道长度超过1000 km),采用合适的同一控制点布设方案(本文采用14个控制点),二次多项式模型的平差结果最差,系统误差补偿模型效果相对较好,定向片模型的平差结果最好。

(2)随着控制点数目的增加,二次多项式模型的定位精度有所提升,但检查点仍然存在明显的残余系统误差,而且呈现二次函数分布,说明卫星轨道并不符合二次多项式,与理论相符。

(3)系统误差补偿模型的平差结果随着控制点数量的增加也逐渐改善,但并不是控制点越多越好,由于系统误差补偿参数较少,整条轨道最多只有18个参数,当控制点达到一定数量且分布均匀时,其平差结果已经达到该平差模型的极限范围。

(4)利用定向片模型进行平差后,检查点残差逐渐变小,如果控制点个数以及分布合理,定向片模型能够取得较好结果,继续增加控制点并不能明显提升平差精

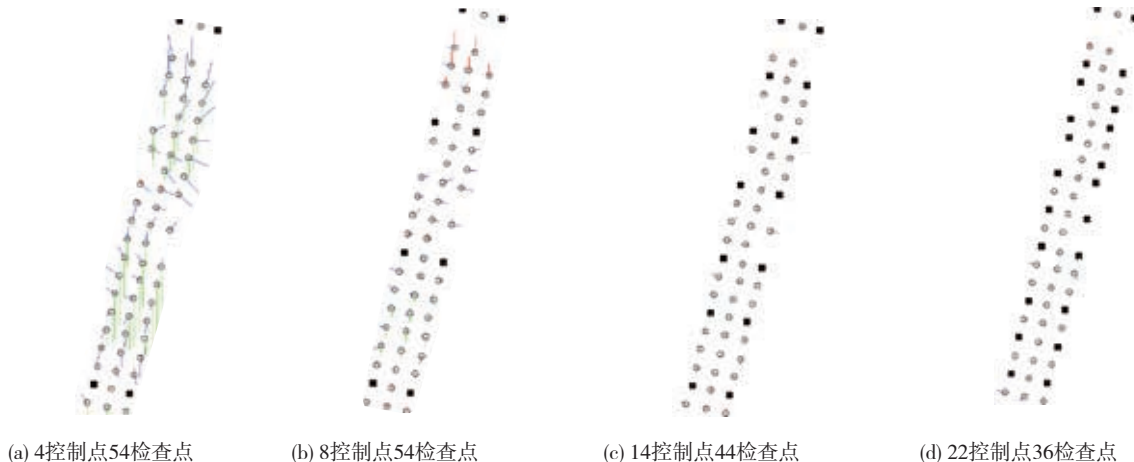


图5 定向片模型

度。相对于其他两种模型，定向片模型定位精度最高，但是卫星的实际轨道变化只是近似的样条曲线，而且拐点位置分布没有规律，这也正是定向片法的局限性所在。另外，卫星的轨道及姿态数据还可能出现不规则抖动，因此理论上无论采用多大的定向片间隔，都无法精确拟合卫星的轨道，平差后的少量残余系统误差仍然不可避免，但已经不影响其对地定位精度水平。

(5)从表3可以看出定向片法只有4个控制点时，高程方向出现波浪状的残差分布，8个控制点时高程误差5.7 m，才达到天绘工程的指标。本文这一实验结果验证了MOMS-2P工程采用定向片法平差的研究结论(Kornus 等, 1998)“光束法平差需要数排控制点，或精度不高的DEM数据参与平差，方能实现工程指标，不提倡不要控制点”。“天绘一号”无地面控制点定位需另寻其他平差方案和途径。

参考文献(References)

- Ebner H and Konus W. 1991. Point Determination Using MOMS-02/D2 Imagery // Conference Proceedings IGARSS. Helsinki, 3, 1743–1746
- Hofmann O, Navé P and Ebner H. 1982. DPS-A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Helsinki, Finland, 24(3): 216–227
- Jung W and Bethel J S. 2008. Stochastic modeling and triangulation for an airborne three line scanner. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B1): 653–656
- Kim T and Dowman I. 2006. Comparison of two physical sensor models for satellite images: position-rotation model and Orbit-Attitude model. The Photogrammetric Record, 21(114): 110–123 [DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00363.x]
- Kornus W, Lehner M, Ebner, Froba H and Ohlhof T. 1998. Photogrammetric point determination using MOMS-2P three-line imagery // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(4): 321–328
- 刘军, 王冬红, 刘敬贤, 张莉. 2009. IMU/ DGPS 系统辅助ADS40 三线阵影像的区域网平差. 测绘学报, 38(1): 55–60
- McGlone C. 1996. Sensor modeling in image registration, Digital Photogrammetry: an Addendum // Greve C W, ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Maryland, 115–123
- Rottensteiner F, Weser T, Lewis A and Fraser C S. 2009. A strip adjustment approach for precise georeferencing of ALOS optical imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(12): 4083–4091 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2014366]
- Tao C V and Hu Y. 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67(12): 1347–1357
- Zhang L, Zhang J X, Chen X Y and An H. 2008. Adjustment with Sparse GCPs and the High-resolution satellite imagery for the project of West China topographic mapping at 1: 50000 Scale // The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B4): 1811–1818
- 赵双明, 李德仁. 2006. ADS40 机载数字传感器平差数学模型及其试验. 测绘学报, 35(4): 342–346

Strip-based bundle adjustment of Mapping Satellite-1 three-line array imagery

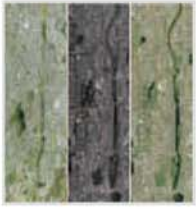
ZHANG Yongjun¹, ZHENG Maoteng¹, WANG Xinyi², HUANG Xinhui¹

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: Space borne linear array sensors have been introduced into photogrammetry since twenty years ago. However, the traditional solution of frame photograph cannot deal with image data obtation by linear array sensors because the position and attitude observations of the spacecraft vary at each scanner line. Thus it is impossible to determinate the exterior orientation parameters of each scanner line. A proper approximation has to be applied to the spacecraft trajectory model to reduce the unknown factors in bundle adjustment. There are three models feasible to represent the satellite trajectory: Quadratic Polynomial Model (QPM), Systematic Error Compensation Model (SECM), and Orientation Image Model (OIM). Revealing the differences of the three sensor models and relationships between different control strategies and the final accuracy of geo-referencing after bundle adjustment is the main purpose of this paper. To fully evaluate the accuracy that the space borne three-line scanner can achieve, experiments with LMP, SECM and OIM triangulation algorithms are performed with a 500 km length data sets of the Mapping Satellite-1 under the WGS-84 coordinate system.

Key words: three-line array imagery, bundle adjustment, sensor model, accuracy analysis



封面说明

About the Cover

“天绘一号”卫星获取的吉林省长春市影像数据

The image acquired by Mapping Satellite-1 for the city of Changchun, Jilin

“天绘一号”卫星是中国第一颗传输型立体测绘卫星。封面图片为“天绘一号”卫星获取的吉林省长春市影像数据，左图为红、绿、蓝、近红外4个波段的10 m分辨率多光谱影像，中间为2 m分辨率全色影像，右图为生成的融合影像。“天绘一号”卫星既能进行高精度地形地貌立体测绘，又能进行地物判绘、资源调查和遥感定量分析，可广泛应用于国土测绘、城市规划、农林普查、土地利用详查、水利电力、交通运输、灾害监测和矿产资源分析等领域。

The Mapping Satellite-1 is the first stereo mapping satellite of China. The cover shows the data captured by this Satellite for the city of Changchun, Jilin province, northern China. The left side is a multispectral image that consists of red, green, blue, and near infrared bands at 10 m resolution. The middle is panchromatic image with 2 m resolution, and the right shows the fusion image. These data are important for three dimensional topography and landform surveying and high precision mapping, object interpretation and editing, resources investigation and remote sensing quantitative analysis. They are also expected to play a significant role in national land surveying and mapping, city planning, agriculture and forests survey, land usage investigation, water reservation and electric power, transportation, disaster forecast and mineral resources analysis.

遥感学报

JOURNAL OF REMOTE SENSING

YAOGAN XUEBAO (双月刊 1997年创刊)

第16卷 增刊 2012年12月26日

(Bimonthly, Started in 1997)

Vol.16 Sup December 26, 2012

主 管 中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办 中国科学院遥感应用研究所 中国地理学会环境遥感分会	Sponsored	by	Institute of Remote Sensing Applications, CAS. The Associate on Environment Remote Sensing of China
主 编 顾行发	Editor-in-Chief		GU Xing-fa
编 辑 《遥感学报》编委会 北京市安外大屯路中国科学院遥感应用研究所 邮编：100101 电话：86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail:jrs@irsa.ac.cn	Edited	by	Editorial Board of Journal of Remote Sensing Add: P.O.Box 9718, Beijing 100101, China Tel: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@irsa.ac.cn
出 版 科 学 出 版 社	Published	by	Science Press
印刷装订 北京科信印刷有限公司	Printed	by	Beijing Kexin Printing Co. Ltd.
总 发 行 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717 电话：86-10-64017032 E-mail:sales_journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com
国外发行 中国国际图书贸易总公司 北京 399 信箱 邮政编码：100044	Overseas distributed	by	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

中国标准连续出版物号：ISSN 1007-4619
CN 11-3841/TP
CODEN YXAUAB

国内邮发代号：82-324

国外发行代号：BM 1002

定价：70.00元

ISSN 1007-4619

国内外公开发行

