

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

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 16 卷 增刊 2012 年

目 次

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)
星敏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, 谢守榘, 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”卫星星敏感器精度分析	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)

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

西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

摘要: 无地面控制点条件下, 卫星摄影测量研究与工程实践是世界各国在该领域中所面临的研究难点之一。本文介绍了在无地面控制条件下光学卫星摄影测量的研究发展和工程实践历程, 并对中国“天绘一号”卫星获取的影像实测结果进行分析, 结果表明, 中国在无地面控制条件下的卫星摄影测量研究与工程实践已居于国际领先地位。

关键词: 无地面控制点, 卫星, 摄影测量, LMCCD

中图分类号: P231

文献标志码: A

引用格式: 尹明, 李晓燕. 2012. 无地面控制点条件下卫星摄影测量的发展与现状. 遥感学报, 16(增刊): 6-9

Yin M and Li X Y. 2012. Development and present situation of satellite photogrammetry without control points. Journal of Remote Sensing, 16(增刊): 6-9

1 引言

当今世界上不发达地区约有90%属于无图区, 中国有30%的困难地区属于无图区。解决这些地区测图问题最有效的方法就是采用无地面控制条件下的摄影测量方法。美国SRTM、GeoEye以及日本ALOS均拥有此项技术, 中国经过数十年的技术积累和工程实践, 也已具备了无地面控制条件下的卫星摄影测量的能力。

从目前国际上同类技术的发展来看, 实现无地面控制点条件下的光学卫星摄影测量先后采用过两种技术途径(姜景山, 2001): 一是采用返回式卫星, 搭载大幅面胶片测绘相机的方式。这种方式处理技术较为成熟、对卫星平台的技术要求适中。但其主要问题是返回式卫星运行时间短, 地理信息获取的时效性差, 难以满足长期、稳定、快速提供地理信息保障和目标精确定位的要求。二是采用传输型卫星, 搭载数字式CCD测绘相机。其优点是可长期稳定运行、信息获取的时效性强。但这种方式如果采用目前常规的处理技术, 则要求卫星平台必须具备极高的姿态稳定性和获取卫星摄影时刻精确外方位元素(摄影站坐标和摄影时刻相机的姿态)的能力, 常规处理技术对卫星平

台及有效载荷精度要求极为苛刻, 关键技术是相当长的时间内无法突破, 工程难以实现。也有一些学者研究通过摄影测量光束法平差方法来实现无地面控制点的摄影测量, 降低卫星工程难度, 并取得了较好的效果。

2 国际传输型卫星无地面控制点条件下的摄影测量发展历程

表1显示了美国航天影像成图标准(王任享, 2006)。

表1 成图比例尺要求

比例尺分母	地面像元/m	等高线间距 CI/m	高程误差/m	平面误差/m
5万	5	20	6	15
2.5万	2.5	10	3	7.5

要实现1:5万比例尺地形图测制, 平面误差为15 m, 高程为6 m, 在GPS作为精密轨道测量后, 无地面控制点条件下测制1:5万地形图最大难点是高程精度为6 m要求。为实现这一目标, 除传感器外, 需要完善的系统技术条件有以下3个:

收稿日期: 2012-08-10; 修订日期: 2012-11-20

第一作者简介: 尹明(1962—), 女, 高级工程师, 主要从事天绘卫星研制与应用管理工作。E-mail: yinming224@163.com。

(1)卫星姿态高稳定途径: 要求卫星姿态稳定度达到 10^{-6} ($^{\circ}/s$);

(2)高精度测姿途径: 要求星敏感器测定姿态精度为 $1''$ (三轴)(1σ);

(3)光束法平差途径: 加GPS及相当精度的星敏感器辅助光束法平差。

围绕这3个条件, 国际上研究和发展无地面控制点条件下的卫星摄影测量大致可分为3个阶段。

2.1 第一阶段(1980年—2000年)

这一阶段的典型代表是美国提出的MAPSAT和OIS卫星系统, 这两种卫星均采用常规卫星摄影测量方法。因此, 对姿态稳定度和姿态测量精度要求极高, 当时的卫星技术无法满足其要求, 因而工程未立项, 未能实现无地面控制条件下的卫星摄影测量; 在增加辅助设备后, 研究仍持续较长时间, 直到2006年以后才有成功的结果, 如ALOS加入移动传感器, 也有卫星加入高精度陀螺等; 始于1980年代初期的MOMS工程, 德国摄影测量学者(Ebner 等, 1991)对三线阵CCD影像光束法平差做了开创性研究, 发明了“定向片”法光束法平差。初期估计可以大大降低对卫星姿态变化率的要求(MOMS在美国航天飞机上作了实验), 摄影测量处理中, 可以不要地面控制点。但在与俄罗斯的和平号空间站合作的MOMS-2P工程1996年实践得出不尽人意的结果, 利用三线阵CCD影像及星载测姿数据, “定向片”法计算的航线模型有系统变形, 要求数排地面控制点或50 m精度的数字高程模型(DEM)参与才能获得5 m精度DEM的工程目标, 并明确反对提倡无地面控制点, 结论是摄影测量必须要求地面控制点。之后MOMS工程并没有发展, 国际上卫星影像无地面控制点光束法平差研究也没有取得进展。

这期间只有干涉雷达测量(SRTM)利用GPS加星敏感器实现了无地面控制点目标定位, 相对精度(中误差)为12 m/6 m(平面/高程), 符合美国1: 5万制图要求, 目前在世界上大量应用的SRTM成果均为其降低精度后提供的, 这是当时报道的卫星数字摄影测量中无地面控制点时目标定位达到1: 5万比例尺地形图的唯一系统。

2.2 第二阶段(2000年—2006年)

SRTM之后美国转向研究更高精度的无地面控制

点摄影测量卫星, 着重改善测姿系统性能。研发的多个型号高分辨率(1 m或优于1 m)卫星, 无地面控制点定位多在12 m/8 m(平面/高程), 虽然卫星影像分辨率很高, 但测姿精度无明显改善, 以1: 5万比例尺要求衡量其定位精度, 只有平面精度满足, 高程精度均不满足, 无地面控制点定位研究进展不大。2000年后, 只有日本的ALOS卫星继续探讨无地面控制点定位的问题。此外, 法国公开报道的SPOT-5卫星在无地面控制点条件下定位精度为50 m, 印度的P5卫星在无地面控制点条件下定位精度为100 m, 制图应用需要地面控制点。

2.3 第三阶段(2006年—2010年)

测姿系统研制有了新的成果。利用星敏感器与激光陀螺联合应用处理, 取得外方位角元素达到子秒级, GeoEye和WorldView卫星在无地面控制点条件下定位精度达到3 m/2 m; 日本ALOS卫星在2006年发射, 其姿态测量精度达到了 $0.7''$, 按工程目标在无地面控制点条件下目标定位平面为3—6 m, 高程为3—5 m, 但工程最终结果并不理想。

3 中国光学卫星无地面控制点条件下摄影测量的发展历程

中国学者从20世纪70年代开始了返回式卫星无地面控制点条件下的摄影测量研建工作, 80年代开始研究传输型卫星摄影测量, 先后提出等效框幅像片(简称EFP)光束法平差方法、LMCCD相机的设计理念(王任享, 2006), 研制了三线阵CCD原型相机, 进行了航空校飞试验, 并成功完成了中国首颗传输型卫星“试验卫星一号”的研制和演示研制任务。2010年成功发射“天绘一号”卫星, 实现了无地面控制点摄影测量工程目标。我们采用性能相对低的星敏感器, 依靠自主研究的多功能EFP光束法平差软件, 实现了与SRTM相当的无地面控制点条件下目标定位精度。

3.1 EFP光束法平差

推扫式三线阵CCD数字影像每一个取样周期均有6个独立的外方位元素, 摄影测量的处理比每张像片只有6个外方位元素的框幅式影像处理复杂, 因而不可能作经典的空中三角光束法平差。摄影测量工作

者期望动态摄影影像与相当参数的框幅式像片在空中三角测量方面有相同的性能,以降低卫星工程技术难度,实现线阵影像无地面控制点条件下光束法平差,但始终未解决空中三角测量航线模型的变形。中国学者根据卫星摄影中平台比较平稳、姿态变化平稳等特点,提出EFP光束法平差思路,即将待求的三线阵CCD影像段各取样周期的外方位元素规划为求解适当等间隔分布的EFP时刻的外方位元素,相邻基点时刻间的外方位元素可以按二次或三次多项式内插获得,并将相邻外方位元素二阶差分为零条件参与光束法平差,提高解的稳定性。

3.2 三线阵相机关键技术及航空校飞

为了进行传输型测绘卫星的研究,1993年开始与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对三线阵CCD相机的各种参数进行了详尽的论证和分析计算。1996年开始进行三线阵CCD相机关键技术研究,目的是通过三线阵CCD相机的样机研制,突破硬件和软件的关键技术,并通过航空校飞试验评价其性能及应用效果。通过国家高技术研究发展计划(863计划)的研究,完成了3次航空校飞试验,对三线阵CCD相机数字摄影、利用三线阵影像进行外方位元素重建及DEM自动采集等方面理论进行初步验证,验证了三线阵CCD影像摄影测量理论的正确性,同时也验证了三线阵CCD相机在空间应用的可行性。

3.3 试验卫星一号演示验证卫星工程

试验卫星一号是中国第一颗航天新技术演示验证卫星和第一颗传输型测绘卫星。其地面应用系统项目集成了国家高技术研究发展计划(863计划)“传输型三线阵摄影测量相机关键技术攻关”项目和“小卫星关键技术研究”项目的研究成果。地面应用系统作为该卫星工程的重要组成部分,主要目的是验证航天三线阵摄影测量技术用于测绘的正确性和可行性,为实现中国测绘卫星从返回式到传输型的跨越,提高全球快速测绘保障能力奠定了技术基础。卫星于2004年4月18日成功发射。地面应用系统不仅保障了卫星其他演示验证任务的完成,同时也圆满完成了三线阵影像航天摄影测量技术的演示验证试验任务,获取了数字地形图、数字高程图和正射影像图等测绘产品。

3.4 中国第一代传输型摄影测量卫星“天绘一号”

在试验卫星一号成功进行三线阵摄影测量技术演示验证的基础上,中国摄影测量工作者开始进行第一代传输型摄影测量卫星“天绘一号”的设计和论证工作。在论证过程中,结合相机设计,完成了对三线阵摄影测量理论的创新和发展,提出了基于LMCCD的航天三线阵摄影测量相机设计思想。

进一步的研究和试验表明,虽然定向片法和EFP法数学模型不同,但模拟计算表明航线模型同样有呈波浪变化的系统误差。经过长期大量的模拟试验,发现模拟计算中用真正的框幅影像坐标取代等效框幅像坐标,可以消除模型系统变形,于是构思了三线阵CCD加4个小面阵CCD混合配置的称之为LMCCD(line-matrix)相机。LMCCD影像EFP光束法平差可以得到无系统误差的航线模型,为三线阵CCD影像进行无地面控制点卫星摄影测量带来希望。凭借这一条件,2006年“天绘一号”卫星顺利立项研制。

2010年8月24日“天绘一号”01星成功发射,实现了中国传输型立体测绘卫星零的突破;2012年5月6日“天绘一号”02星再次发射成功,首次实现中国测绘卫星的组网运行,双星影像经无缝拼接后,测绘覆盖宽达110 km,可极大地提高测绘效能和几何控制能力,加快测绘区域影像获取速度,提高信息时效性。这是中国航天领域的重大突破,对促进中国测绘事业发展具有里程碑意义,标志着中国已全面掌握传输型立体测绘卫星的关键技术。

4 总 结

自1997年MOMS/2P实验得出光束法平差需要地面控制点之后,鲜有学者从事卫星影像光束法平差解决无地面控制点条件下目标定位的研究。但是,以王任亨为代表的中国科研人员坚持了自己的学术思想与软件研究工作,丰富了光束法平差技术,在等级相对低的星敏感器测姿条件下,实现了工程目标。经5个区的实测检验(测区宽度为60 km、长度为240—480 km,最大高差近2 km),综合中误差为10.2 m/5.8 m(平面/高程 1σ),满足工程目标,与美国的SRTM相对精度(1σ)12 m/6 m(平面/高程)相当;试验证明,中国在无地面控制条件下的卫星摄影测量研

究与工程实践已处于国际领先地位。

参考文献(References)

Ebner H, Kornus W, Strunz G, Hofmann O, Mueller F. 1991. Simula-

tion Study on Point Determination Using MOMS_O2/D2 Imagery. PRES, 57(10): 1315-1320

姜景山. 2001. 空间科学与应用. 北京: 科学出版社

王任享. 2006. 三线阵CCD影像卫星摄影测量原理. 北京: 测绘出版社

Development and present situation of satellite photogrammetry without control points

YIN Ming, LI Xiaoyan

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

Abstract: The study on the satellite photogrammetry and engineering practice without ground control points are the difficulties to all researchers in this field. This paper introduces domestic and international research activity in optics satellite photogrammetry without ground control points, and analyzes the images from Mapping Satellite-1. The result shows that China plays an international leading role in the study on satellite photogrammetry and engineering practice without ground control points.

Key words: without ground control points, satellite, photogrammetry, LMCCD



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，又能进行地物判读、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



9 771007 461125