

文章编号: 1671-8860(2006)05-0377-05

文献标志码: A

缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差

李德仁¹ 张 过¹ 江万寿¹ 袁修孝²

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 从卫星遥感影像区域网平差的模型出发, 利用 SPOT-5 影像附带的参数拟合 RPC 模型参数, 根据 RPC 模型和像面的仿射变换模型建立了卫星遥感影像区域网平差的数学模型。按照所构建的数学模型, 对两个地区 SPOT-5 HRS 影像进行直接空间前方交会和缺少控制点的区域网平差处理。试验证明了本文模型的可行性。

关键词: 像面仿射变换模型; RPC 模型; 区域网平差; 精度

中图法分类号: P231.5

我国实施西部大开发战略, 西部基础设施建设工程将陆续规划建设, 但是西部地区地形复杂, 无法进行传统的航空摄影测量处理, 近 200 多万 km^2 无 1:50 000 及 1:10 000 实测地形图, 给西部地区的基础设施建设带来很大困难。

利用高分辨率卫星遥感影像进行西部基础地理测绘的过程中还面临许多问题, 其中核心问题是无控制点的影像几何处理技术。长期以来, 卫星遥感影像的精确定位一直依赖于地面控制点, 控制点的数量与分布直接影响遥感影像对地目标定位的精度。然而, 在西部困难地区的基础测绘中, 由于地表特征不明显或者人员无法到达, 获取足够数量的地面控制点通常非常困难, 甚至是不可能的, 因此研究无控制点条件下的卫星遥感影像的几何处理就成为一项紧迫的任务。

目前, 基于高分辨率卫星遥感影像和控制点的遥感影像平差技术已经得到了初步的发展和应用^[1-5], 但是现有研究都是基于一定的假设条件, 没有充分利用卫星遥感影像附带的辅助信息, 将构建的经验模型作为单传感器遥感影像平差处理的基础方程进行平差处理, 因此模型参数的初值需要用近似的方法求解, 平差结果残余的模型误差较大。

RPC (rational polynomial coefficients 或 rapid positioning capability) 模型独立于传感器和平台, 具有优良的内插特性, 若给定适当数量的控制信息, RPC 模型可以获得很高的拟合精度^[6]。利用 RPC 参数对推扫式光学遥感影像进行平差也已获得了一定的进展^[7, 8]。

国内外的学者在针对 SPOT-5、CBERS-2 等光学卫星遥感影像利用严格成像几何模型拟合 RPC 参数进行了研究^[9, 10], 但是没有进一步的平差报道。

传统的基于卫星遥感影像的平差的试验基本都是针对有控制点的遥感影像的几何处理, 对缺少控制点的卫星遥感影像平差的研究是遥感领域新的课题, 也是现实的迫切需求。本文研究 SPOT-5 HRS 影像在缺少地面控制点情况下的区域网平差方法和流程, 利用传感器严格成像几何模型拟合 RPC 模型, 进行缺少控制点的 SPOT-5 HRS 遥感影像平差处理。

1 卫星遥感影像区域网平差数学模型

卫星影像的 RPC 模型存在较大的系统误差^[10]。因此, 可以通过影像之间的约束关系补偿

收稿日期: 2006-04-03。

项目来源: 国家 973 计划资助项目(2006CB701302); 国家自然科学基金资助项目(40523005); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(JRT0438)。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

有理函数模型的系统误差来提高定位精度, 这就是基于有理函数模型的缺少控制点的卫星遥感影像的区域网平差。

分析卫星系统参数对影像几何精度的影响, 需要纠正行方向和列方向的误差。可以采用定义在影像面的仿射变换来校正此类误差^[7, 8, 10]。因此可以在影像上定义变换:

$$\begin{aligned} v_x &= \left(\frac{\partial F_x}{\partial p_{x_0}} \cdot \Delta p_{x_0} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_1}} \cdot \Delta p_{x_1} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_2}} \cdot \Delta p_{x_2} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_0}} \cdot \Delta p_{y_0} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_1}} \cdot \Delta p_{y_1} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_2}} \cdot \Delta p_{y_2} + \frac{\partial F_x}{\partial L_a} \cdot \Delta L_a + \frac{\partial F_x}{\partial L_o} \cdot \Delta L_o + \frac{\partial F_x}{\partial h} \cdot \Delta h \right) + F_{x_0} \\ v_y &= \left(\frac{\partial F_y}{\partial p_{x_0}} \cdot \Delta p_{x_0} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_1}} \cdot \Delta p_{x_1} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_2}} \cdot \Delta p_{x_2} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_0}} \cdot \Delta p_{y_0} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_1}} \cdot \Delta p_{y_1} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_2}} \cdot \Delta p_{y_2} + \frac{\partial F_y}{\partial L_a} \cdot \Delta L_a + \frac{\partial F_y}{\partial L_o} \cdot \Delta L_o + \frac{\partial F_y}{\partial h} \cdot \Delta h \right) + F_{y_0} \end{aligned} \quad (2)$$

记为:

$$V = At + BX - l$$

由式(1)同样可得每个控制点的线性方程:

$$\begin{aligned} v_x &= \left(\frac{\partial F_x}{\partial p_{x_0}} \cdot \Delta p_{x_0} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_1}} \cdot \Delta p_{x_1} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_2}} \cdot \Delta p_{x_2} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_0}} \cdot \Delta p_{y_0} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_1}} \cdot \Delta p_{y_1} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_2}} \cdot \Delta p_{y_2} \right) + F_{x_0} \\ v_y &= \left(\frac{\partial F_y}{\partial p_{x_0}} \cdot \Delta p_{x_0} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_1}} \cdot \Delta p_{x_1} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_2}} \cdot \Delta p_{x_2} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_0}} \cdot \Delta p_{y_0} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_1}} \cdot \Delta p_{y_1} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_2}} \cdot \Delta p_{y_2} \right) + F_{y_0} \end{aligned} \quad (3)$$

记为:

$$V = At - l$$

其中,

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_0}} & \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_1}} \\ \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_0}} & \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_1}} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial L_a} & \frac{\partial F_x}{\partial L_o} & \frac{\partial F_x}{\partial h} \\ \frac{\partial F_y}{\partial L_a} & \frac{\partial F_y}{\partial L_o} & \frac{\partial F_y}{\partial h} \end{pmatrix}$$

$$t = [\Delta p_{x_0} \quad \Delta p_{x_1} \quad \Delta p_{x_2} \quad \Delta p_{y_0} \quad \Delta p_{y_1} \quad \Delta p_{y_2}]^T$$

$$X = [\Delta L_a \quad \Delta L_o \quad \Delta h]^T,$$

$$l = \begin{bmatrix} -F_{x_0} \\ -F_{y_0} \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

本文采用直接列化法方程的策略, 消除一类连接点地面坐标未知数, 仅仅保留像面的仿射变换系数, 然后采用与传统光束法平差一样的模式进行平差^[11]。

2 试验以及分析

本文对汉中测区和宝鸡测区的 SPOT-5 HRS 影像实施缺少控制点的区域网平差试验。宝鸡测区数据为 SPOT-5 的同一轨道形成的 3 个 HRS 立体像对, 每景影像覆盖地面 $120 \text{ km} \times 60 \text{ km}$, 地面

$$F_x = p_{x_0} + p_{x_L} X_s + p_{x_2} X_L + X_s - x = 0$$

$$F_y = p_{y_0} + p_{y_L} X_s + p_{y_2} X_L + X_L - y = 0 \quad (1)$$

式中, (x, y) 是控制点在影像上的量测坐标; (X_s, X_L) 为地面控制点利用 RPC 投影到影像面的投影值, 该变换参数和 RPC 模型参数一起等同卫星遥感影像严格成像模型的卫星系统参数。

由式(1)可得每个连接点的线性方程:

由式(1)同样可得每个控制点的线性方程:

$$\begin{aligned} F_{x_0} &= \left(\frac{\partial F_x}{\partial p_{x_0}} \cdot \Delta p_{x_0} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_1}} \cdot \Delta p_{x_1} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{x_2}} \cdot \Delta p_{x_2} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_0}} \cdot \Delta p_{y_0} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_1}} \cdot \Delta p_{y_1} + \frac{\partial F_x}{\partial p_{y_2}} \cdot \Delta p_{y_2} \right) + F_{x_0} \\ F_{y_0} &= \left(\frac{\partial F_y}{\partial p_{x_0}} \cdot \Delta p_{x_0} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_1}} \cdot \Delta p_{x_1} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{x_2}} \cdot \Delta p_{x_2} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_0}} \cdot \Delta p_{y_0} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_1}} \cdot \Delta p_{y_1} + \frac{\partial F_y}{\partial p_{y_2}} \cdot \Delta p_{y_2} \right) + F_{y_0} \end{aligned} \quad (3)$$

分辨率为 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 测区为纯粹高山地。从地形图上量测了 12 个地面控制点, 控制点的分布如图 1 所示, 估计精度在 5 m 左右。

汉中测区数据为 SPOT-5 的两个轨道构成的两个 HRS 立体像对, 每景影像覆盖地面 $120 \text{ km} \times 600 \text{ km}$, 地面分辨率为 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 基本为丘陵和高山地。从地形图上量测了 72 个地面控制点, 控制点分布如图 2 所示, 估计精度在 10 m 左右。

首先根据 SPOT-5 的严格成像几何模型^[10]和 SRTM DEM 求解每景 SPOT-5 影像的 RPC 模型参数^[10], 参数的检查点中误差均在 0.1 个像素以内。采用本文基于 RPC 模型的区域网平差方法, 无控制点条件下的平差结果如表 1 所示, 平面和高程的残差如图 1(b)、1(d) 和图 2(b)、2(d) 所示。为了对比精度, 本文还计算了无控制点条件下直接利用 RPC 参数进行前方交会计算检查点的精度, 如表 1 所示, 检查点平面和高程残差如图 1(a)、1(c) 和图 2(a)、2(c) 所示。

由于宝鸡测区单个轨道的无控制点平差的精度比较差, 对宝鸡数据进行了带控制点的平差试验, 1 个控制点和 3 个控制点的基于 RPC 模型的平差结果如表 2 所示, 检查点平面和高程残差如图 2(e)~2(h) 所示。

表1 宝鸡测区和汉中测区无控制点平差和无控制点空间前方交会精度/m

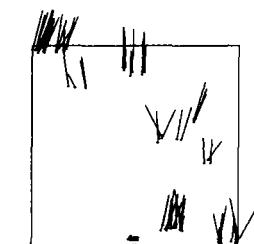
T ab. 1 Adjustment of Surveyed Areas Without GCPS and Space Intersection Without GCPS

	无控制点平差				无控制点空间前方交会			
	X	Y	平面	Z	X	Y	平面	Z
宝鸡测区	最大残差	27.733	-72.174	75.760	-87.575	29.329	-75.226	79.086
	最小残差	12.773	-55.533	57.577	-59.467	14.120	-64.924	66.442
	中误差	20.797	63.432	66.754	70.983	22.818	69.777	73.413
汉中测区	最大残差	33.519	27.964	35.340	20.077	32.376	-67.827	67.827
	最小残差	0.002	0.148	0.476	-0.193	0.018	-14.934	16.200
	中误差	8.295	10.239	13.177	7.332	12.678	49.980	51.563

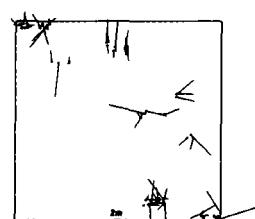
表2 宝鸡测区带控制点平差精度/m

T ab. 2 Adjustment Accuracy with GCPS in Baoji

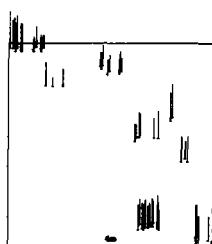
	1个控制点平差				3个控制点平差			
	X	Y	平面	Z	X	Y	平面	Z
最大残差	8.020	-11.442	12.747	-17.232	5.618	-11.442	12.747	-14.026
最小残差	-0.633	-0.605	1.684	0.363	-0.633	-0.605	1.684	0.363
中误差	3.521	6.806	7.663	8.572	2.667	6.774	7.281	9.010



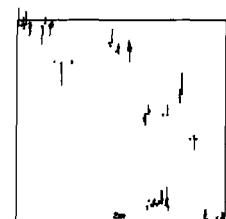
(a) 空间前方交会平面残差



(b) 平差平面残差



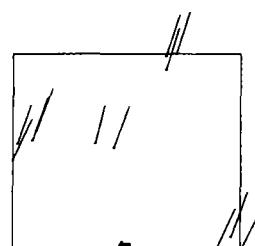
(c) 空间前方交会高程残差



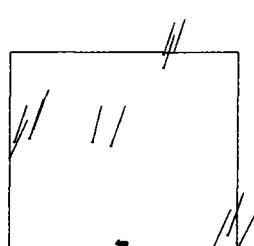
(d) 平差高程残差

图1 汉中测区无控制点误差图

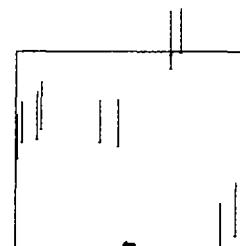
Fig. 1 Error Maps of Hanzhong Without GCPS



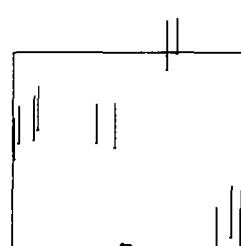
(a) 无控制点空间前方交会平面残差



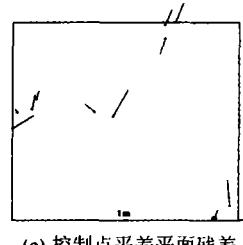
(b) 无控制点平差平面残差



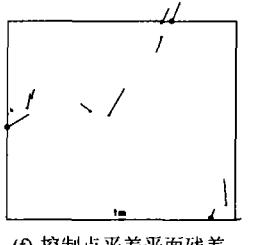
(c) 无控制点空间前方交会高程残差



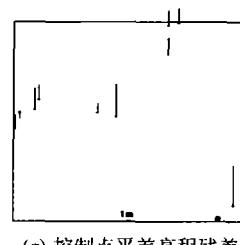
(d) 无控制点平差高程残差



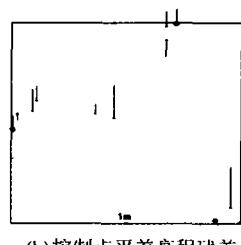
(e) 控制点平差平面残差



(f) 控制点平差平面残差



(g) 控制点平差高程残差



(h) 控制点平差高程残差

图2 宝鸡测区误差图

Fig. 2 Error Maps of Baoji

少控制点区域网平差方法和流程可用于卫星遥感影像的精确对地目标定位。

2) 在无地面控制点情况下, 利用严格的遥感

1) 本文所建立的针对SPOT-5 HRS影像缺

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

3 结论

像目标的直接前方交会,就SPOT-5 HRS影像而言,达到实地平面73.413 m和高程77.601 m的定位精度,但存在明显的系统误差,不能用于1:50 000测图,需消除其系统误差。

3) 在无地面控制点条件下,利用多轨道的SPOT-5 HRS影像之间的约束关系补偿RPC模型的系统误差来提高对地目标定位精度,对于两个轨道、两个立体像对构成的汉中测区,平面已经达到13.177 m,高程达到7.332 m,这一结果对于我国西部无图区测图具有非常重要的参考意义。但是对于仅仅一个轨道形成的3个立体像对,精度提高并不明显,仅为平面66.754 m和高程70.983 m。分析可知,多个轨道影像联合平差能补偿轨道、姿态等方面的系统误差的影响,而单个条带仅仅能补偿部分姿态系统误差,因此对于无控制点地区的影像,建议不同轨道的影像在一起进行区域网平差,尽可能地补偿轨道和姿态等误差,提高对地目标定位精度。

4) 利用少量地面控制点区域网平差可以明显提高单个轨道的卫星遥感影像对地目标定位的精度,主要是因为利用地面控制点消除了卫星系统参数中的系统误差。试验表明,利用单个地面控制点能很好地补偿这一系统误差,此时目标定位精度平面达到了7.663 m,高程达到8.572 m。控制点数的增加对目标定位精度的改善十分有限,就实际应用而言,提供1个地面控制点就足够了。这一结论对于西部困难地区测图的应用也具有非常重要的参考意义。

总之,本文通过试验证实了利用像面仿射变换模型加RPC模型可以进行卫星遥感影像的区域网平差,揭示了利用RPC模型航天遥感对地目标定位的可行性及精度潜力。由于试验数据所限,本文结论还只是初步的,大量的试验验证仍在深入研究之中。

致谢:感谢北京视宝卫星图像有限公司提供SPOT-5 HRS影像和数据。

参考文献

[1] Chen L C, Lee L H. Least Squares Prediction

Using on Board Data in Bundle Adjustment for Spot Imagery Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. IGARSS 89, Canadian, 1989

[2] Zhang Jianqing, Zhang Yong, Cheng Ying. Block Adjustment Based on New strict Geometric Model of Satellite Images with High Resolution [C]. The 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004

[3] Hanley H B, Yamakawa T, Fraser C S. Sensor Orientation for High Resolution Satellite Imagery [OL]. <http://www.isprs.org/commission1/proceedings/paper/00090.pdf>, 2005

[4] Azevedo de L. Radar in the Amazon [C]. The 7th Int Symp on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, MI, 1971

[5] Toutin T. Spatiotriangulation with Multisensor VIR/SAR Images [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2004, 42(10): 2 096 2 103

[6] Madani M. Real Time Sensor Independent Positioning by Rational Functions [C]. ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation, Barcelona, 1999

[7] Grodecki J, Dial G. Block Adjustment of High Resolution Satellite Images Described by Rational Functions [J]. PE & RS, 2003, 69(1): 59 68

[8] 张永生, 刘军. 高分辨率遥感卫星立体影像RPC模型定位的算法及其优化 [J]. 测绘工程, 2004, 13(1): 1-4

[9] Tao C V, Hu Y. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. PE & RS, 2001, 67(12): 1 347 1 357

[10] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005

[11] 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学 [M]. 北京: 测绘出版社, 1992

[12] 国家技术监督局. 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000地形图航空摄影测量内业规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1991

第一作者简介:李德仁,中国科学院院士,中国工程院院士,欧亚科学院院士,博士生导师,教授,主要从事摄影测量与遥感和空间信息系统理论与方法的研究,发表论文450余篇,出版专著9部。
E-mail: pw67@yahoo.com

SPOT-5 HRS Satellite Imagery Block Adjustment Without GCPS or with Single GCP

LI Deren¹ ZHANG Guo¹ JIANG Wanshou¹ YUAN Xiuxiao²

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,

Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The paper developed the satellite imagery block adjustment. Testing the satellite imagery block adjustment on SPOT-5 HRS imagery in two areas without any GCP, on condition of one strip, the mapping accuracy matches the criteria of 1: 500 000. on condition of two stripes, the accuracy matches the criteria of 1: 50 000; Then testing the satellite imagery block adjustment on SPOT-5 HRS one strip imagery without single GCP, the mapping accuracy matches the criteria of 1: 50 000. Thus, the validity of the transformation in image plane plus RPC model has been verified. The results show the potential of using this model for mapping terrain with satellite imagery.

Key words: affine transformation in image plane; RPC model; block adjustment; accuracy

About the first author: LI Deren, professor, Ph. D supervisor, academician of Chinese Academy of Sciences, academician of Chinese Academy of Engineering, academician of Euro-Asia International Academy of Sciences. His current scientific interests are in the fields of photogrammetry and remote sensing, spatial information science and technology. He has published technical papers more than 450, and 8 books. E-mail: pw67@yahoo.com

数字制图与国土信息应用工程国家测绘局重点实验室成立

近日,“数字制图与国土信息应用工程”国家测绘局重点实验室建设计划评估论证会及揭牌仪式在武汉大学进行。为了进一步推动数字制图和国土信息领域的发展,全面提高该领域的研究能力和学术水平,实现强强联合,优势互补,武汉大学与四川测绘局联合建立了“数字制图与国土信息应用工程”国家测绘局重点实验室。该实验室将瞄准当前国际数字制图和国土信息领域先进水平和科学的研究的前沿课题,力争取得一批先进的科技成果和培养一大批高层次的研究人才,同时也使实验室成为国家测绘科技创新体系的重要组成部分,为我国测绘科学的发展作出贡献。