

# 资源三号全国无控制整体区域网平差关键技术及应用

王 密<sup>1,2</sup> 杨 博<sup>2,3</sup> 李德仁<sup>1,2</sup> 龚健雅<sup>1,2,4</sup> 皮英冬<sup>4</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 地球空间信息协同创新中心,湖北 武汉,430079  
3 武汉大学计算机学院,湖北 武汉,430072  
4 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430072

**摘 要:**介绍了资源三号卫星三线阵立体像对全国无控制整体区域网平差的关键技术及应用,主要包括高精度稳态重成像处理技术、基于虚拟控制点的平差模型构建技术、粗差(包括几何精度异常影像、误匹配点)的探测与剔除技术以及超大规模平差方程的高效解算方法。在此基础上,对覆盖全国的 8 802 个资源三号三线阵立体像对(共 26 406 景影像)在无控制条件下整体一张网的平差结果及精度验证情况进行分析。实验结果表明,该方法不但可以保证区域网整体的绝对无偏估计,还可以有效控制区域网内部几何误差的传递与累积,从而避免网的变形,以保证网内几何精度的一致性与均匀性。此外,还列出了本技术在全球测图工程中德国试验区的示范应用情况。

**关键词:**资源三号;有理函数模型;无控制区域网平差;稳态重成像;虚拟控制点;粗差探测与剔除  
**中图法分类号:**P231 **文献标志码:**A

从王之卓先生提出利用人造卫星进行测图的设想,到我国首颗民用三线阵立体测绘卫星资源三号的成功发射,我国的航天测绘事业走过了飞速发展的 50 年。资源三号卫星自 2012 年 1 月 9 日成功发射以来,填补了我国民用立体测绘卫星的空白,摆脱了长期以来对国外卫星影像数据的依赖。利用资源三号卫星获取的影像数据进行测图,可以获取地表高精度的数字正射影像(digital orthographic map,DOM)和数字表面模型(digital surface model,DSM),从而为测绘、国土、国防等领域提供高精度的空间参考数据<sup>[1]</sup>。

区域网平差是利用光学影像进行测图时的一项关键步骤,其平差结果的质量直接决定了最终产品的几何精度,一直备受摄影测量工作者的关注。实际测图工程中,进行区域网平差时需要在测区范围内均匀布设一定数量的地面控制点以保障平差结果的几何精度<sup>[2]</sup>。此外,在进行超大规模区域(例如区域级、国家级)的光学卫星影像测图作业时,目前普遍采用的仍是先分区平差、再区

域接边的方式,且在每个分区内仍需布设一定数量的控制点以保障精度。然而,我国地域广阔,境内有大量的森林、高原、沙漠等无人区,这些区域难以人工布设高精度的地面控制点,导致分区作业方式存在先天的局限性。同时,整个测区内存在不同分区产品几何精度不均匀的问题,产品质量难以有效控制。

在全球测图国家重大工程的背景下,为了探索利用资源三号卫星三线阵影像进行无控制超大规模区域网平差的应用潜力,本文从传统的分区方法存在的问题出发,重点研究了高精度稳态成像、基于虚拟控制点的平差模型构建以及粗差的探测与剔除等关键技术,克服了无控制条件下由区域网整体自由度过高造成的平差精度不稳定,以及由误匹配和区域网内部几何误差的传递与累积造成的网的变形的问题。最后利用全国范围均匀布设的约 8 000 个高精度控制点对资源三号全国无控制平差后自动生产的 DOM 和 DSM 产品的几何精度进行了验证,其平面和高程中误

差分别达到 3.6 m 和 4.2 m,区域网内部几何精度均匀,相邻模型之间的几何拼接精度优于 1 像素,满足无缝拼接的要求,实现了资源三号卫星影像全国无控制测图精度优于 5 m 的目标。

## 1 无控制区域网平差处理流程

在本文提出的无地面控制条件下实现大区域海量遥感影像数据的联合平差时,将经过在轨几何定标等技术方法修正的有理多项式系数(rational polynomial coefficient, RPC)参数、构建的虚拟控制点以及连接点数据作为输入引入数据到平差模型中,使用合理的定权策略,采用最小二乘法构建法方程,并基于共轭梯度的方法实现高阶法方程的快速解算。本方法的重点在于解决大规模区域网平差中的两个关键的瓶颈问题,即精度和效率问题,具体流程如图 1 所示。

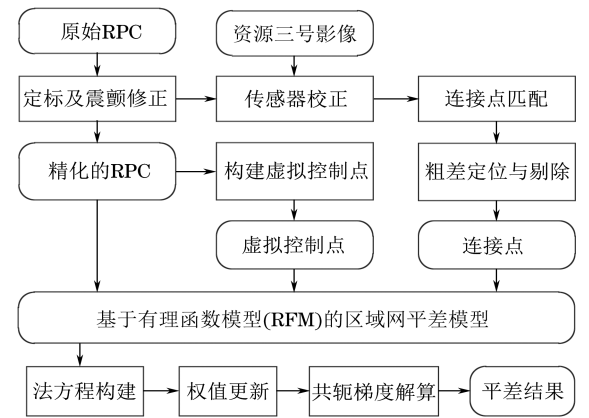


图 1 大规模区域网平差流程

Fig.1 Flowchart of Large-scale Block Adjustment

## 2 区域网平差模型及平差基准

几何成像模型是构建光学卫星影像区域网平差模型的基础。当前,光学卫星影像的几何成像模型主要包括严格物理模型和有理函数模型<sup>[2]</sup>。其中,严格物理模型<sup>[3-6]</sup>需要传感器成像时详细的内外方位元素等参数信息,在实际使用中较为不便。为此,摄影测量学者们研究了一种基于有理多项式的光学卫星影像通用几何成像模型,称为有理函数模型(rational function model, RFM)<sup>[7-9]</sup>。RFM 通过比值多项式  $F_s$  与  $F_l$  建立像点坐标  $(s, l)$  与对应的物方点坐标  $(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Height})$  之间的关系,其本质是对严格物理模型的高精度数学拟合,可以达到与严格模型几乎一致的几何精度<sup>[10]</sup>,其具体形式如式(1)所示。由于

RPC 模型具有拟合精度高、形式简单统一等优点,且光学卫星影像 RPC 模型的坐标基准是全球统一的 WGS84 地心直角坐标系,无需进行地球曲率改正,特别适用于大范围影像平差处理。因此,本文的大区域平差方法中,同样选择 RPC 模型作为光学卫星影像区域网平差的基本几何模型。

$$\begin{cases} s = F_s(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Height}) \\ l = F_l(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Height}) \end{cases} \quad (1)$$

光学卫星影像成像视场角较小,各像元光线接近于平行成像,加上成像时间较短,几何成像参数变化较小,经过严格的在轨几何定标及传感器校正处理后,其单景影像产品中的几何误差在像方主要表现为低阶线性误差<sup>[11-13]</sup>。因此,在 RFM 的像方,附加基于仿射变换的修正模型  $\Delta l$  和  $\Delta s$  即可有效补偿影像的几何误差,具体见式(2):

$$\begin{cases} \Delta l = a_0 + a_1 l + a_2 s \\ \Delta s = b_0 + b_1 s + b_2 s \end{cases} \quad (2)$$

最后,将误差补偿模型式(2)引入到 RFM 式(1)中即可得到用于区域网平差的基本数学模型:

$$\begin{cases} l + \Delta l = F_l(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Height}) \\ s + \Delta s = F_s(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Height}) \end{cases} \quad (3)$$

## 3 大区域无控制区域网平差的关键技术

### 3.1 高精度稳态重成像处理技术

在进行大区域的无控制区域网平差时,由于缺少地面控制,整个区域网在水平方向是自由的,因此,待平差影像初始 RFM 中存在的时间系统性误差会严重影响平差结果的绝对几何精度。另外,当待平差的单景影像内部存在明显的系统误差时,会导致区域网内部发生误差的传递与累积效应,不仅会使平差后区域网的绝对几何精度无法保证,还会破坏区域网内部整体的刚性结构而发生严重的扭曲变形,并且变形会随着区域网规模的增大而增强,最终导致区域网几何精度的严重下降。因此,在无控制条件下,为了确保区域网平差的精度,需要消除待平差影像初始 RPC 中存在的时间系统性误差以及单景影像的内部几何畸变。

本方法采用基于探元指向角的在轨几何定标技术<sup>[14]</sup>补偿单景影像的相机内部的静态系统误差以及相机安装误差,采用抗平台震颤技术<sup>[15]</sup>消除由于卫星平台震颤造成的时变系统误差。经过在轨几何定标及抗平台震颤的高精度稳态重成像处理后,资源三号卫星三线阵相机的影像产品的像方几何误差表现为随机误差,不存在明显的系

统性,单景影像的内部几何精度可达到子像素,具有良好的刚性几何结构,为保证无控制区域网的内部几何精度奠定了基础。

3.2 基于虚拟控制点的平差模型构建技术

在有控制点条件下,可直接将待平差参数作为自由未知数进行平差求解。然而,在无控制点条件下,整个区域网在水平方向是自由的,平差模型的自由度较高,直接将待平差参数作为自由未知数求解会导致法方程的病态,进而造成平差精度不稳定。传统方法通过将待平差参数根据先验信息处理成带权观测值引入到平差模型中来改善平差模型的状态<sup>[16]</sup>。但该方法需要对多类不同物理意义的参数构建误差方程并定权,且参数之间一般存在一定的相关性,给系数矩阵的规范形式造成了一定的破坏;同时,引入过多的参数,在大规模区域网平差中并不适用。针对传统方法的不足,本方法通过构建基于虚拟控制点的平差模型来约束区域网的自由度,从而达到改善平差模型的状态的目的。

虚拟控制点的生成方法如下。在像平面上按一定间距均匀划分一定的规则格网,对每个格网中心像点  $p$  (samp,line),利用该影像 RPC 模型,通过前方交会在物方局部任一高程基准面(一般为平均高程  $H\_OFF$ )上交会得到一物方点  $P$  (Lat,Lon,Hei),则  $p$  与  $P$  构成一对虚拟控制点。将上述方法生成的所有虚拟控制点作为真实控制点引入平差模型中构建误差方程,并对其赋予较低的权值,能够不影响相邻影像之间相对定向精度的前提下,使平差后区域网在空间中的绝对几何方位受到约束。根据平差理论,当所有虚拟控制点的误差方程权重相等时,平差后区域网在空间中的绝对几何偏差等于所有虚拟控制点的绝对几何偏差的平均。理想情况下,当所有虚拟控制点的几何误差服从标准正态分布而无明显系统性偏差时,平差后区域网的绝对几何精度理论上是无偏的<sup>[17]</sup>。

3.3 粗差的探测与剔除技术

大区域平差涉及海量影像之间的连接点匹配,在未进行筛选的情况下,自动匹配获得的连接点的数量数以亿计,大量的连接点存在粗差。而在大区域的无控制平差中,存在粗差的连接点将直接导致区域网的扭曲与变形,影响平差结果的可靠性。因此,一个稳健的粗差检测与剔除方法是必不可少的。针对该问题,本文采用了一个新颖的多级粗差探测方法,有效地降低了粗差对于平差结果的影响。

1) 粗差检测

平差后同一张影像上的连接点的残差向量在大小及方向上均应具有较好的一致性<sup>[18]</sup>。基于此,第一级粗差探测用于探测在单景影像上可能是粗差的连接点。采用所有像点残差的三倍中误差作为评判标准阈值,当连接点的残差与残差均值之间的差值大于阈值时,认为该点可能为粗差点。中误差  $\sigma$  的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (\Delta d_i - \overline{\Delta d})^2 \right] / n}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \tag{4}$$

式中,  $\Delta d_i$  是第  $i$  个连接点的像方残差;  $\overline{\Delta d}$  是该影像上所有连接点的残差的均值;  $n$  是影像上连接点的数量。

2) 粗差剔除

第二级为第一级探测的延伸。由于第一级探测到的可疑粗差点可能存在于多张影像上,在整体平差后,其残差值实际是同名点对在不同影像的残差综合作用的结果。为了精确定位到具体哪张影像的点存在粗差,本文提出一个剔除的策略。如果第一级检测的点只在两张影像上,则直接剔除;若在多于两张影像上,则剔除同名点对中具有最大残差的点。

每次迭代解算中都按本方法进行粗差的探测与剔除,结合权值的作用,可以有效抑制粗差对平差结果的影响。

3.4 大规模平差方程的组织与快速解算方法

传统的平差方法中,采用消元法消掉法方程中连接点物方坐标这类参数后,得到的改化法方程中未知参数仅包含各景待平差影像 RPC 模型的像方误差补偿模型参数。然而,在大规模区域网平差中,由于待平差影像数量较多,改化法方程中待解算的参数数量仍然巨大(若待平差影像数量为  $n$ ,则待解算未知参数数量为  $6n$ ,本文中影像数量为 26 406,则待解算的未知参数数量多达 158 436),超高阶数的方程组对于系数矩阵的存储以及未知参数的求解仍然是极大的挑战。考虑到区域网平差中改化法方程的系数矩阵通常具有稀疏性,其中非零元素在该矩阵的分布结构与待平差影像之间的连接关系有关。传统航空摄影测量中通过按照规则航带构建区域网以保证法方程中非零元素分布具有最小带宽<sup>[19]</sup>。然而,对于光学卫星影像超大规模区域网平差,影像之间的连接关系极为复杂且不具备规则航带的条件,传统航空摄影测量中的最小带宽法并不适用。针对该问题,本文提出一种基于稀疏矩阵的数据存储结构。该



数据存储结构对矩阵中的每一行采用一种三元数据结构记录 and 存储该行中的非零元素。该数据结构的每一行包含该行中非零元素个数、各非零元素所在列坐标及其相应的数值三项内容。利用该数据结构,不论区域网是否具有规则航带结构,影像均可自由编号,可以仅对矩阵中的非零元素进行存储与计算,完全避免对零元素的任意操作。

在实现对矩阵中非零元素的存储后,高阶改化方程中未知数向量的高效求解是另一个需解决的关键问题。由于方程组中的系数矩阵为一个正定对称矩阵,共轭梯度法<sup>[20]</sup>是目前解决系数矩阵为大型正定对称矩阵的线性方程组最有效的方法之一。因此,本方法采用共轭梯度法进行迭代求解。其基本思想是把共轭性与最速下降方法相结合,利用已知点处的梯度构造一组共轭方向,并沿这组方向进行搜索,得到方程组的解。由于其在每一步迭代过程中利用各项未知参数的梯度信息作为引导,属于一种启发式搜索算法,具有收敛速度快、稳定度高等优点。

## 4 试验验证及工程应用

### 4.1 资源三号全国平差试验

#### 4.1.1 试验数据简介

对资源三号卫星获取的覆盖中国整个大陆的 26 406 景三线阵立体影像进行了无控制区域网平差试验。测区覆盖面积约 900 万 km<sup>2</sup>,约占中国国土面积 93% 以上,测区内包含高原、山地、丘陵、平原以及沙漠等多类地形,最大最小高程起伏达 8 000 m 以上。采用成熟的影像匹配算法<sup>[21]</sup>自动获取了约 300 万个均匀分布且可靠性较高的连接点,并对各景影像在像方均匀划分 3×3 格网,对每个格网的中心点生成虚拟控制点。

#### 4.1.2 结果与分析

基于本文方法进行全国的无控制区域网平差,在平差完成后,利用精化了定位模型的 26 406 景三线阵影像自动生产了覆盖全国方位的 5 m 分辨率的 DSM 产品以及 2 m 分辨率的 DOM 产品,DOM 和 DSM 产品的数据量共约 20 TB。

作为测图作业中的一项关键指标,DOM 拼接精度表征了相邻 DOM 同名地物之间几何定位精度的一致性。为此,随机选取了 80 对相邻 DOM 产品进行验证。在每对相邻 DOM 产品的重叠区域内,通过影像匹配自动获取一定数量、均匀分布的同名像点,统计这些同名像点几何坐标差值的中误差,以此对其几何拼接精度进行定量

化评价,如图 2 所示。图 2 中纵坐标为各对相邻 DOM 同名像点几何坐标差值的中误差,横坐标代表各对相邻 DOM 的编号。

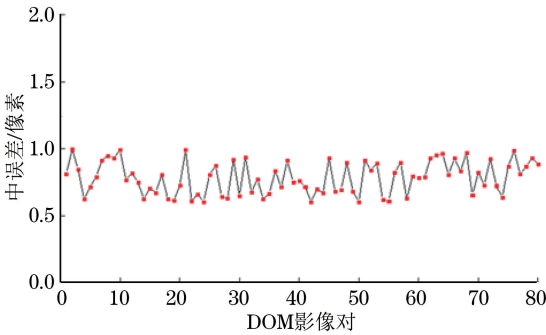


图 2 DOM 几何拼接误差

Fig.2 Error of DOM Geometric Mosaic

此外,对相邻 DOM 产品采用人工目视检查的方式对其几何拼接精度进行直观评价。图 3 为在原始 2 m 分辨率的基础上放大 2 倍后人工目视检查的情况。

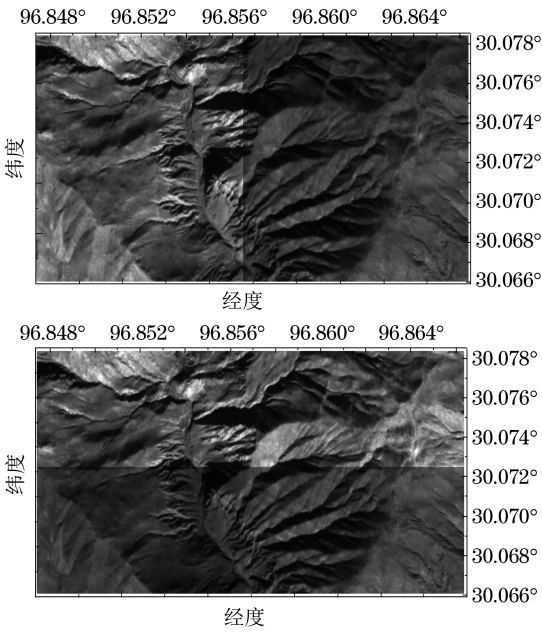


图 3 DOM 拼接精度示意图

Fig.3 The Mosaic of DOM

从图 2、图 3 可以看出,基于本文方法平差后,相邻 DOM 产品之间的几何拼接精度优于 1 个像素,相邻 DOM 接边的目视效果良好,无需任何处理即可达到目视上无缝拼接的要求。

除了对相对几何精度进行验证外,试验中还利用在全国范围内通过 GPS 外业测量,共获取了约 8 000 余个高精度控制点(平面和高程精度均优于 0.1 m)分别对 DOM 和 DSM 产品的平面和高程几何精度进行了验证。通过统计全国 5 个子区域内的所有检查点几何误差的均值、中误差和

最大值等精度指标对整体平差的绝对几何定位精度进行评价,具体见表 1。

从表 1 中可以看出,各子区域检查点误差的均值和中误差基本相当,无明显差异,且各子区域平面和高程的误差均值均接近于 0,区域网整体

在空间中无明显的偏移性系统误差。以上结论验证了本文方法的有效性和鲁棒性,说明虚拟控制点的引入能够有效改善平差模型的状态,保证了区域网内部几何精度的一致性以及区域网整体的无偏估计。

表 1 绝对几何定位精度统计表  
Tab.1 Absolute Geo-positioning Accuracy

区域	最大误差/m				中误差/m				均值/m		
	X	Y	XY	Z	X	Y	XY	Z	X	Y	Z
西部	4.84	5.17	7.08	7.67	2.76	3.12	4.16	4.41	0.62	0.71	0.23
南部	6.12	5.86	8.47	9.03	3.08	3.12	4.38	2.67	−0.64	−0.57	−0.87
中部	5.65	4.98	7.53	6.86	2.03	1.98	2.83	2.45	0.12	0.43	0.56
东北	7.21	5.56	9.10	9.64	3.13	3.07	3.68	3.95	−0.87	−0.03	0.08
东部	4.21	3.79	5.66	6.75	2.16	2.23	3.10	2.73	0.13	0.26	−0.17

4.2 德国示范试验

为了验证本方法对于无控制全球测图的适用性,本文进行了国外区域的示范试验。试验区位于德国境内,地面覆盖面积约 12 万 km<sup>2</sup>,测区内以平原地形为主,共包含 2 个条带的 6 景资源三号三线阵影像数据,具体信息见表 2。

表 2 待平差影像信息表  
Tab.2 Information of Images

影像号	成像时间	侧摆角	中心经纬度
415	2012-09-18	0.001 2°	8.5°E
691			48.4°N
415			8.6°E
690	2012-09-18	0.001 2°	48.8°N
415			8.8°E
689			49.2°N
415	2012-09-18	0.001 2°	8.9°E
688			49.6°N
429	2012-09-28	1.210 1°	9.1°E
378			48.4°N
429			9.2°E
377	2012-09-28	1.210 1°	48.8°N

对这些影像先进行无控制区域网平差处理,利用平差后精化定向参数文件进行了 DOM 产品生产。为了验证产品几何精度,工作组利用海德堡大学的 RTK 基站,在该基站周围 10 km 范围内通过外业 GPS 测量手段获取了 20 个高精度控制点。卫星影像数据、GPS 控制点的分布情况如图 4 所示。

同样采用本文方法对平差后生产的 DOM 的拼接精度进行评价,拼接精度的中误差为 0.67 像素;外业采集的控制点作为检查点评价 DOM 的绝对几何定位精度,其平面精度为 2.8 m,高程精

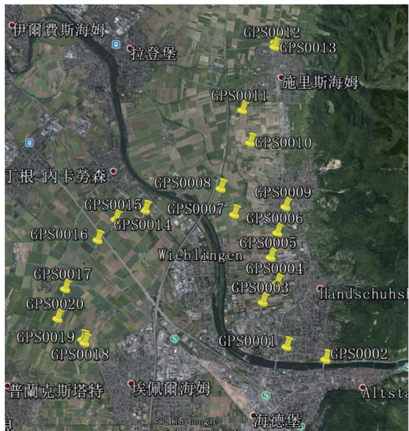
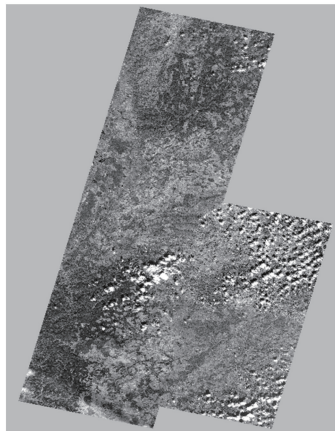


图 4 影像及控制点分布情况  
Fig.4 Distribution of Images and Control Points

度为 2.6 m,完全满足 1:50 000 测图精度要求。

5 结 语

本文对大区域无控制联合平差的关键技术进行了具体的介绍,并对使用本技术进行的全国范围的资源三号无控制测图的可行性及精度进行了

分析,试验表明,本文技术为无控制点条件下达到有控制点的测图精度提供了一种切实可行的方法。此外,试验验证了本方法在境外区域处理的几何精度,并取得了令人满意的结果,为以本文技术为核心的后期全球测图工程的顺利开展奠定了基础。随着我国激光卫星的发射,进行激光测高数据辅助的大区域联合平差,以提高大区域测图的高程精度是未来研究的重点方向。

#### 致谢:

试验用到的覆盖全国范围的资源三号三线阵影像数据及处理环境均由中国资源卫星中心提供,深表谢意。同时感谢为本文技术方法的研发及应用阶段做出的工作和努力的项目组成员,本文技术方法获得了2016年的国家测绘科技进步特等奖,是对本文项目组多年专注学术科研的高度肯定。

#### 参考文献

- [1] Li Deren. China's First Civilian Three-line-array Stereo Mapping Satellite:ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3):317-322(李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3):317-322)
- [2] Zhang Li, Zhang Jixian, Chen Xiangyang, 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)
- [3] Wang Renxiang. EFP Aerial Triangulation of Satellite Borne Three-Line Array CCD Image[J]. *Science of Surviving and Mapping*, 2001, 26(4):1-5(王任享. 卫星摄影三线阵 CCD 影像的 EFP 法空中三角测量(一)[J]. 测绘科学, 2001, 26(4):1-5)
- [4] Cheng Chunquan, Deng Kazhong, Sun Yushan, et al. Study of Block Adjustment for Long-strip Satellite CCD Images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 162-168.(程春泉, 邓喀中, 孙钰珊, 等. 长条带卫星线阵影像区域网平差研究[J]. 测绘学报, 2010, 39(2):162-168.)
- [5] Rottensteiner F, Weser T, Lewis A, et al. A Strip Adjustment Approach for Precise Georeferencing of ALOS Optical Imagery [J]. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2009, 47(12): 4 083-4 091
- [6] Shao Juliang, Wang Shugen. Determination of Satellite Sensor Orientation[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(4):329-333(邵巨良, 王树根. 线阵列卫星传感器定向方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4):329-333)
- [7] 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
- [8] Li Deren, Zhang Guo, Jiang Wanshou, et al. SPOT-5 HRS Satellite Imagery Block Adjustment Without GCPs or with Single GCP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5):377-381(李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(5):377-381)
- [9] Liu Jun, Zhang Yongsheng, Wang Donghong. Precise Positioning of High Spatial Resolution Satellite Based on RPC Models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(1):30-34.(刘军, 张永生, 王冬红. 基于 RPC 模型的高分辨率卫星影像精确定位[J]. 测绘学报, 2006, 35(1):30-34)
- [10] Tao C V, Eng P, Hu Y, et al. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(12):1 347-1 357
- [11] Tang Xinming, Zhang Guo, Zhu Xiaoyong, et al. Triple Linear-array Imaging Geometry Model of Ziyuan-3 Surveying Satellite and Its Validation[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2012, 4(1):33-51(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, 4(1):33-51)
- [12] Wang M, Yang B, Hu F, et al. On-orbit Geometric Calibration Model and Its Applications for High-Resolution Optical Satellite Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6: 4 391-4 408
- [13] Zhang Y, Zheng M, Xiong J, et al. On-orbit Geometric Calibration of ZY-3 Three-Line Array Imagery With Multistrip Data Sets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1): 224-234
- [14] Wang M, Yang B, Hu F, et al. On-orbit Geometric Calibration Model and Its Applications for High-Resolution Optical Satellite Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5):4 391-4 408
- [15] Wang M, Zhu Y, Jin S, et al. Correction of ZY-3 Image Distortion Caused by Satellite Jitter via Virtual Steady Reimaging Using Attitude Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*

ing, 2016, 119:108-123

[16] Li D R. On the Signal-to-noise Ratio in Self-calibrating Block Adjustment[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 1982,11(3): 170-184

[17] Li Deren. Error Handling and Reliability Theory [M]. Beijing:Surveying Press, 1988(李德仁. 误差处理和可靠性理论[M]. 北京:测绘出版社, 1988)

[18] Zhang G, Wang T Y, Li D, et al. Block Adjustment for Satellite Imagery Based on the Strip Constraint[J].*IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(2):933-941

[19] Wang Tao, Zhang Yan, Rui Jie, et al. Three-line Array CCD Imagery Self-calibration Block Adjustment Based on Equivalent Error Equation[J]. *Science of Surveying & Mapping*, 2013, 38(4):107-110(王涛, 张艳, 芮杰, 等. 基于等效误差方程的三线阵 CCD 影像自检校区域网平差[J]. 测绘科学, 2013, 38(4):107-110)

[20] Byröd M, Åström K. Conjugate Gradient Bundle Adjustment[J].*ECCV*, 2010, 6 312:114-127

[21] Zhang Li, Zhang Jixian. Multi-image Matching for DEM Generation from Satellite Imagery[J]. *Science of Surveying & Mapping*, 2008(S2):35-39(张力, 张继贤. 基于多基线影像匹配的高分辨率遥感影像 DEM 自动生成[J]. 测绘科学, 2008(S2):35-39)

# Technologies and Applications of Block Adjustment Without Control for ZY-3 Images Covering China

WANG Mi<sup>1,2</sup> YANG Bo<sup>2,3</sup> LI Deren<sup>1,2</sup> GONG Jianya<sup>1,2,4</sup> PI Yingdong<sup>4</sup>

- 1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China
- 2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China
- 3 School of Computer, Wuhan University, Wuhan University, Wuhan 430072, China
- 4 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** The key technologies and applications of the large-scale block adjustment for the ZY-3 three linear array stereo imagery pairs under the condition without using ground control points (GCPs) are introduced, in which the three-linear-array stereo imagery pairs covering whole mainland China are modified together. A series of key techniques including the high-precision steady re-imaging, establishment of the adjustment model based on the virtual control points, errors detecting and eliminating technology (including the images with anomaly geometric accuracy and the gross tie points), and the organization and fast calculation of the large-scale adjustment normal equation are provided. Based on these technologies, 8802 three-linear-array stereo imagery pairs (26406 images) cover whole mainland China were processed together under the condition without using GCPs. The availability and the accuracy of the presented method is verified according to the processed data. The satisfactory experimental results indicate that the presented method could not only ensure the unbiased estimation of the whole block, but also restrain the transfer and accumulation of the internal distortion, thereby ensure the consistency of the geometric accuracy. In addition, the demonstration of the method applied in Germany is also provided in the paper, which further indicates the presented method is available and feasible.

**Key words:** ZY-3; RFM; block adjustment without control; steady re-imaging; virtual control points; errors detecting and eliminating

**First author:** WANG Mi, PhD, professor, his research interests include the measurable seamless stereo ortho-image databases, GIS, and high precision remote sensing image processing. E-mail: wangmi@whu.edu.cn

**Corresponding author:** YANG Bo, PhD, assistant professor. E-mail: 93341186@qq.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41601492, 91638201; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0501402.