

# 不同类型卫星遥感影像的联合区域网平差方法

邢 帅, 徐 青

(信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:**根据区域网平差的基本原理,提出了不同类型卫星遥感影像联合区域网平差的方法,建立了光束法联合区域网平差模型,对误差方程式的建立、权矩阵的计算、多片前方交会模型的建立以及平差计算过程的设计等关键问题进行了研究,并通过两组实验验证了平差模型的有效性,分析了影像组合形式以及控制点的分布、数量、精度对平差结果的影响,最后总结了多源遥感影像联合区域网平差的特点以及应用前景。

**关键词:**光束法区域网平差;权矩阵;光学卫星遥感影像;SAR 卫星遥感影像

**中图分类号:**P231 **文献标识码:**A

## COMBINED BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT OF VARIANT SATELLITE REMOTE SENSING IMAGES

XING Shuai, XU Qing

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The idea of the combined block adjustment of variant satellite remote sensing images was proposed and the combined bundle block adjustment model was constructed. Some key issues were studied, such as construction of observation equation, computation of weight matrix, space intersection with multi-image and the frame of computation process. The validity of the model was confirmed by two experiments. The influences of the image combined form, and distribution, amount and precision of ground control points on the adjustment result were analyzed. At last, the characteristics and prospect of the combined block adjustment were summarized.

**Key words:** bundle block adjustment; weight matrix; optical satellite remote sensing image; SAR satellite remote sensing image

### 引言

区域网平差,又称区域网空中三角测量,就是使用计算的方法,根据像片上所量测的像点坐标以及极少量的地面控制点,求出地面上加密点的大地位置<sup>[1]</sup>。传统区域网平差的研究对象主要是同一种传感器获取的影像,而对于不同类型卫星遥感影像联合区域网平差的研究则很少得到关注。文献[2]采用改进的共线条件方程,对 Landsat-7、KOMPSAT-1、SPOT-1、IKONOS 等光学卫星影像进行了联合区域网平差试验,获得了平面 2.76m,高程 3.1m 的精度。加拿大遥感中心的 Toutin<sup>[3]</sup>尝试了将多种光学和 SAR 卫星遥感影像联立进行光束法区域网平差,其使用了 Landsat-7 ETM+、SPOT-4 HRV、ASTER、RADARSAT-1、ERS-1 五颗卫星共 49 幅影像进行了

实验,在交会角较小的情况下,取得了 25~30m 的定位精度。2006 年 Toutin<sup>[3]</sup>又对 SPOT-5 HRS、SPOT-5 HRG、IKONOS、Quick Bird 等影像进行了多星多传感器遥感影像的联合区域网平差试验,获得了平面 2.54m、高程 2.1m 的精度。这些研究成果表明,将光学影像、SAR 影像等不同类型的卫星遥感影像进行联合区域网平差是可以实现的。

按照这一思路,对一组同一地区不同时相的线阵 CCD 光学影像和 SAR 影像建立光束法区域网平差模型,并通过整体解算获得所有影像的外方位元素及加密点大地坐标。

### 1 两种卫星遥感影像构像模型

#### 1.1 线阵 CCD 光学影像的平差模型

线阵 CCD 影像是由线性阵列传感器沿飞行方

收稿日期:2008-12-21,修回日期:2009-06-18

Received date: 2008-12-21, revised date: 2009-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40901247);国家西部 1:50000 地形图空白区测图工程项目“合成孔径雷达影像制图技术”;信息工程大学测绘学院课题(Y0801)

作者简介:邢帅(1979-),男,河南信阳人,博士,讲师,研究方向为遥感图像处理、数字摄影测量, E-mail: xing972403@163.com.

向推扫而成的,每一扫描行图像与被摄物体之间具有严格的中心投影关系,每一扫描行都具有各自的外方位元素.在垂直成像的情况下, $i$ 行上的中心投影关系式<sup>[5]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -f \frac{a_1(X - X_{si}) + b_1(Y - Y_{si}) + c_1(Z - Z_{si})}{a_3(X - X_{si}) + b_3(Y - Y_{si}) + c_3(Z - Z_{si})} \\ 0 &= -f \frac{a_2(X - X_{si}) + b_2(Y - Y_{si}) + c_2(Z - Z_{si})}{a_3(X - X_{si}) + b_3(Y - Y_{si}) + c_3(Z - Z_{si})} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中, $a_i, b_i, c_i (i=1,2,3)$ 是由第 $i$ 扫描行的外方位扫描角元素 $\varphi_i, \omega_i, \kappa_i$ 所确定的旋转矩阵.

将式(1)进行线性化后得到

$$\mathbf{A}^L \cdot \Delta^L + \mathbf{B}^L \cdot \mathbf{X}^L - \mathbf{L}^L = \mathbf{V}^L, \quad (2)$$

其中, $\Delta^L$ 为外方位元素的改正数矩阵, $\mathbf{X}^L$ 为地面点坐标改正数矩阵, $\mathbf{A}^L$ 为外方位元素改正数的系数矩阵, $\mathbf{B}^L$ 为各地面点坐标改正数的系数矩阵, $\mathbf{L}^L$ 为常数项矩阵, $\mathbf{V}^L$ 为像坐标改正数矩阵.

## 1.2 SAR 影像的平差模型

F. Leberl 模型是根据雷达图像像点的距离公式和多普勒公式来表达雷达图像瞬间构像的数学模型<sup>[6]</sup>.其距离表达式为(斜距图像)

$$(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 = (y_s M_y + D_{s0})^2, \quad (3a)$$

多普勒表达式为

$$X_v(X - X_s) + Y_v(Y - Y_s) + Z_v(Z - Z_s) = -\frac{\lambda R_s}{2} f_{DC}, \quad (3b)$$

其中, $D_{s0}$ 为扫描延迟, $Y_s$ 为地面点 P 在斜距显示图像上的距离向像坐标, $M_y$ 为斜距图像的距离向像比例尺, $(X, Y, Z)$ 为地面点 P 的物方空间坐标, $(X_s, Y_s, Z_s)$ 为天线中心瞬时位置 S 的物方空间坐标, $(X_v, Y_v, Z_v)$ 为天线中心瞬时位置 S 的速度, $R_s$ 为地面点 P 的斜距, $\lambda$ 为雷达波长, $f_{DC}$ 为多普勒频率(通常为 0).

将式(3)进行线性化后得到

$$\mathbf{A}^S \cdot \Delta^S + \mathbf{B}^S \cdot \mathbf{X}^S - \mathbf{L}^S = \mathbf{C} \cdot \mathbf{V}_s^S = \mathbf{V}^S, \quad (4)$$

式中各项与式(2)中意义相同.

## 2 光束法联合区域网平差模型

### 2.1 误差方程式

根据式(2)和式(4),对重叠范围内的加密点可列出下面一组误差方程

$$\left( \begin{array}{ccc} \mathbf{A}_p^L & 0 & \mathbf{B}_p^L \\ 0 & \mathbf{A}_p^S & \mathbf{B}_p^S \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \Delta^L \\ \Delta^S \\ \mathbf{X}_p \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \mathbf{L}_p^L \\ \mathbf{L}_p^S \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \mathbf{V}_p^L \\ \mathbf{V}_p^S \end{array} \right) \text{权阵} \left( \begin{array}{cc} \mathbf{P}_p^L & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_p^S \end{array} \right). \quad (5)$$

对地面控制点也可得到形如式(8)的误差方程

$$\left( \begin{array}{ccc} \mathbf{A}_G^L & 0 & \mathbf{B}_G^L \\ 0 & \mathbf{A}_G^S & \mathbf{B}_G^S \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \Delta^L \\ \Delta^S \\ \mathbf{X}_G \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \mathbf{L}_G^L \\ \mathbf{L}_G^S \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \mathbf{V}_G^L \\ \mathbf{V}_G^S \end{array} \right) \text{权阵} \left( \begin{array}{cc} \mathbf{P}_G^L & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_G^S \end{array} \right). \quad (6)$$

式(6)中,如果认为控制点坐标准确,则 $\mathbf{X}_G$ 为零;若考虑到控制点有误差时,则 $\mathbf{X}_G$ 为非零矩阵,且要增加一组控制点观测误差方程

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{X}_G - \mathbf{L}_G^X = \mathbf{V}_G^X \text{权阵} \mathbf{P}_G^X. \quad (7)$$

此外,对于线阵 CCD 影像,为保证在定向参数高度相关的情况下解的稳定性,对定向参数有必要引进如下“伪观测值”误差方程<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{E} \cdot \Delta^L - \mathbf{L}_\Delta^L = \mathbf{V}_\Delta^L \text{权阵} \mathbf{P}_\Delta^L, \quad (8)$$

其中, $\mathbf{L}_\Delta^L$ 通常为零.

将式(5)~式(8)联立可构成如式(9)的误差方程组.

$$\left( \begin{array}{ccc} \mathbf{A}_p^L & \mathbf{B}_p^L & \\ & \mathbf{A}_p^S & \mathbf{B}_p^S \\ \mathbf{A}_G^L & \mathbf{B}_G^L & \\ & \mathbf{A}_G^S & \mathbf{B}_G^S \\ \mathbf{E} & & \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \Delta^L \\ \Delta^S \\ \mathbf{X}_p \\ \mathbf{X}_G \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \mathbf{L}_p^L \\ \mathbf{L}_p^S \\ \mathbf{L}_G^L \\ \mathbf{L}_G^S \\ \mathbf{L}_G^X \\ \mathbf{L}_\Delta^L \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \mathbf{V}_p^L \\ \mathbf{V}_p^S \\ \mathbf{V}_G^L \\ \mathbf{V}_G^S \\ \mathbf{V}_G^X \\ \mathbf{V}_\Delta^L \end{array} \right) \text{权阵} \left( \begin{array}{ccc} \mathbf{P}_p^L & & \\ & \mathbf{P}_p^S & \\ & & \mathbf{P}_G^L \\ & & & \mathbf{P}_G^S \\ & & & & \mathbf{P}_G^X \\ & & & & & \mathbf{P}_\Delta^L \end{array} \right). \quad (9)$$

误差方程可总体表示为

$$\mathbf{A} \cdot \Delta - \mathbf{L} = \mathbf{V} \text{权} \mathbf{P}. \quad (10)$$

经法化后可得法方程组为

$$\mathbf{N} \cdot \Delta = \bar{\mathbf{L}}, \quad (11)$$

其中,

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} = \left( \begin{array}{cc} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{array} \right),$$

$$\bar{\mathbf{L}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = \left( \begin{array}{c} (\mathbf{A}_p^L)^T \mathbf{P}_p^L \mathbf{L}_p^L + (\mathbf{A}_G^L)^T \mathbf{P}_G^L \mathbf{L}_G^L + \mathbf{P}_\Delta^L \mathbf{L}_\Delta^L \\ (\mathbf{A}_p^S)^T \mathbf{P}_p^S \mathbf{L}_p^S + (\mathbf{A}_G^S)^T \mathbf{P}_G^S \mathbf{L}_G^S \\ (\mathbf{B}_p^L)^T \mathbf{P}_p^L + (\mathbf{B}_p^S)^T \mathbf{P}_p^S \\ (\mathbf{B}_G^L)^T \mathbf{P}_G^L \mathbf{L}_G^L + (\mathbf{B}_G^S)^T \mathbf{P}_G^S \mathbf{L}_G^S + \mathbf{P}_G^X \mathbf{L}_G^X \end{array} \right).$$

解答式(11)可得

$$\Delta = \mathbf{N}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{L}}.$$

### 2.2 确定权矩阵

由式(9)可知,误差方程组中包含六类方程,其

对应的权分别按照如下方法确定。

(1) 线阵 CCD 影像上加密点的权  $\mathbf{P}_p^l$

$\mathbf{P}_p^l$  主要由线阵 CCD 影像的地面分辨率来决定。影像  $j$  的权值  $P_j$  可按式(12)确定

$$P_j = \left( \frac{r_{\max x}}{r_{jx}} \cdot \frac{r_{\max y}}{r_{jy}} \right) \cdot P_{\max} \quad (12)$$

其中  $P_{\max}$ 、 $r_{\max x}$ 、 $r_{\max y}$  分别为区域网中所有线阵 CCD 影像中分辨率最高的影像的权值(设为 1)及其  $x$  方向和  $y$  方向分辨率,  $r_{jx}$ 、 $r_{jy}$  分别为影像  $j$  的  $x$  方向和  $y$  方向分辨率。

(2) 线阵 CCD 影像上控制点的权  $\mathbf{P}_c^l$

$$\mathbf{P}_c^l = k^l \cdot \mathbf{P}_p^l \quad (13)$$

其中,  $k^l$  为放大系数, 通常大于 1, 以保证控制点发挥控制作用。

(3) SAR 影像上加密点的权  $\mathbf{P}_p^s$

由式(4)可知,  $\mathbf{V}^s$  并非像点观测值的直接改正数, 而是间接改正数, 因此其权值  $\mathbf{P}_p^s$  必须由像点观测值的权值计算得到。按照文献 [7] 中定义的权与协方差的关系, 可以得到

$$\mathbf{P}_p^s = (\mathbf{Q}_p^s)^{-1} = \left( \frac{1}{\sigma_0^2} \sum \mathbf{V}^s \right)^{-1} \quad (14)$$

根据  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{V}^s = \mathbf{V}^s$  以及协方差的传播规律<sup>[11]</sup> 可得

$$\sum \mathbf{V}^s = \mathbf{C} \cdot \sum \mathbf{V}^s \cdot \mathbf{C}^T = \mathbf{C} \cdot (\sigma_0^2 \mathbf{E}) \cdot \mathbf{C}^T = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{C} \mathbf{C}^T \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)得

$$\mathbf{P}_p^s = (\mathbf{C} \mathbf{C}^T)^{-1} \quad (16)$$

(4) SAR 影像上控制点的权  $\mathbf{P}_c^s$

$$\mathbf{P}_c^s = k^s \cdot \mathbf{P}_p^s \quad (17)$$

其中,  $k^s$  为放大系数, 作用与  $k^l$  相同。

(5) 控制点观测值的权  $\mathbf{P}_c^x$

该值可根据控制点的测量精度与像点量测精度的比例来确定, 通常在  $[0, 1]$  区间内取值。

(6) 线阵 CCD 影像“伪观测值”的权  $\mathbf{P}_\Delta^l$

$\mathbf{P}_\Delta^l$  中 6 个外方位元素改正数的权值可取接近于 0 的小值或直接设为 0, 外方位元素变化率改正数的权值则取接近于 1 的值。

### 2.3 平差计算过程

#### 1. 区域网概算

区域网概算的工作是设置未知数的初值。

#### 2. 区域网平差

(1) 计算各个像片的外方位元素和加密点地面坐标的初始值;

(2) 按式(5)~式(8)分别建立各加密点和控

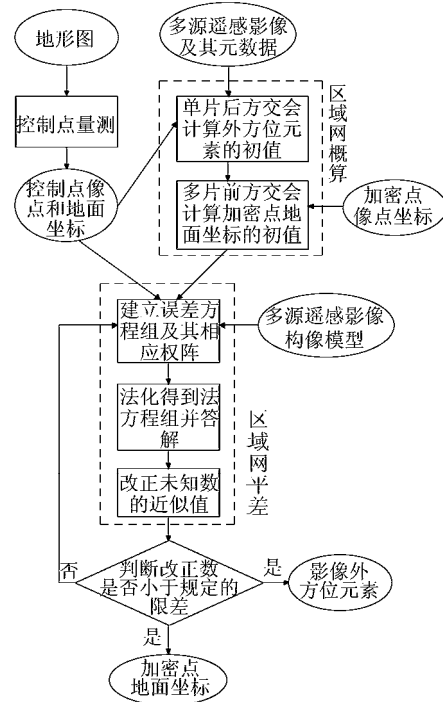


图 1 不同类型卫星遥感影像联合区域网平差的流程图

Fig. 1 Flow chart of combined bundle block adjustment with variant satellite remote sensing images

制点的误差方程式以及线阵 CCD 光学影像的“伪观测值”误差方程式;

(3) 根据式(12)~式(17)建立权矩阵;

(4) 对误差方程组进行法化求解, 求出所有未知数, 并改正前一次的近似值;

(5) 重复(1)~(4)步, 直到改正数小于规定的限差为止;

(6) 计算未参加区域网平差各点的地面坐标。

图 1 为不同类型卫星遥感影像联合区域网平差的流程图。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验数据

选择四颗卫星在不同时间获取的北京地区的遥感影像, 具体参数见表 1。图 2 显示了四幅影像的覆

表 1 实验影像的参数统计

Table 1 Statistics of four test images

卫星	获取时间	入射角(°)	分辨率(m)
SPOT-5	Feb. 10 2002	2.76	5
SPOT-4	Apr. 27 2005	15	10
ERS-2	Sep. 2 1998	22.9	Along track 12.5 Across track 12.5
Radarsat-1	Nov. 6 2002	44.3	Along track 8.82 Across track 5.56

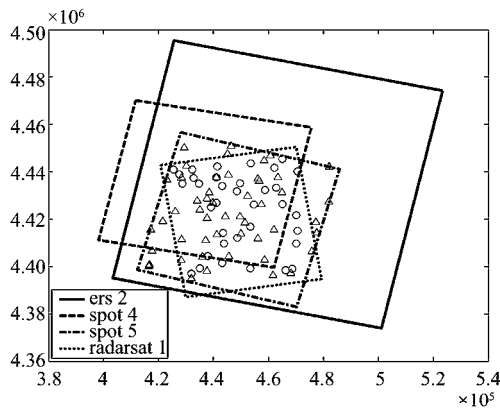


图2 四幅实验影像对应区域及控制点、加密点分布示意图  
Fig.2 Distribution of four test images, ground control points (GCPs) and pass points (PPs)

盖区域,给出了实验所选地面控制点和加密点的分布情况,其中三角形表示的是控制点,共 50 个,蓝色三角形表示的是光学影像上的控制点,共 27 个,红色三角形表示的是 SAR 影像上的控制点,共 23 个,绿色圆形表示的是加密点,共 35 个,均是从比例尺 1: 25000 的地形图上选取的. 所有控制点均为平高控制点,且保证在重叠区域的周边有一定的分布. 加密点为三度或两度重叠且地面坐标已知,这里也作为检查点使用.

### 3.2 实验方案

设计了两组实验,以分析不同类型卫星遥感影像联合区域网平差的性能及特点.

实验一:

对四幅影像进行不同的组合可以产生 11 种平差方案,包括两幅影像构成的 6 种平差方案、三幅影像构成的 4 种平差方案以及四幅影像构成的 1 种平差方案. 每幅影像使用其各自的控制点,且外方位元素初值由各片的空间后方交会计算,平差中加密点地面坐标的初值由多片前方交会确定.

实验二:

根据实验一的平差结果,选择其中平差结果较好的四个方案((2)、(5)、(6)、(8))进行第二组实验. 在实验中,分别采用不同的控制点布设方案进行平差,以分析控制点的分布、数量对平差结果的影响. 这里采用六种控制点布设方案,即周边稀疏布点、周边稀疏布点+一个中间点、周边稀疏布点+四个中间点、周边密集布点、周边密集布点+一个中间点以及周边密集布点+四个中间点,影像、控制点及加密点的分布情况见图 3. 稀疏布点时周边控制点

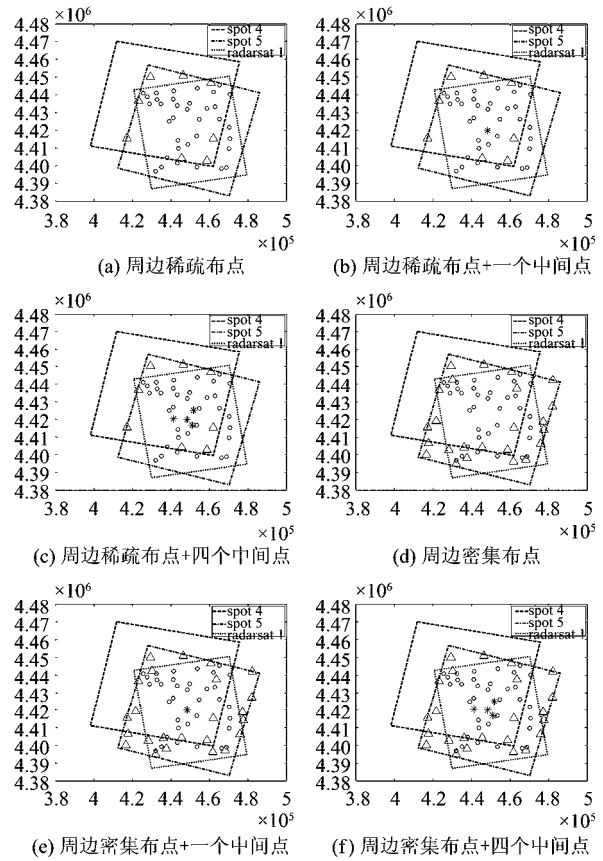


图3 实验二中控点、加密点的分布示意图(图中‘△’表示周边控制点,‘\*’表示中间控制点,‘o’表示加密点)(a) 周边稀疏布点 (b)周边稀疏布点 + 一个中间点 (c)周边稀疏布点 + 四个中间点 (d)周边密集布点 (e)周边密集布点 + 一个中间点 (f)周边密集布点 + 四个中间点

Fig.3 Distributions of three test images, GCPs and PP in second experiment. (‘△’ represents surrounding GCP, ‘\*’ represents middle GCP, ‘o’ represents PP.) (a) sparse surrounding GCPs (b) sparse surrounding GCPs and one middle GCP (c) sparse surrounding GCPs and four middle GCPs (d) dense surrounding GCPs (e) dense surrounding GCPs and one middle GCP (f) dense surrounding GCPs and four middle GCPs

数目为 8 个,密集布点时周边控制点数目为 24 个,各个方案中的加密点数目保持不变.

### 3.3 实验结果

实验一:

在实验中,我们对 11 个平差方案分别进行了计算,结果列于表 2.

从表 2 来看,(2)、(5)、(6)、(8) 四个方案的平差结果较好,其中影像外方位元素的精度与初值很接近,加密点地面坐标的平面精度为 20 ~ 30m,高程精度为 25 ~ 33m. 这四个方案是由 SPOT-5、SPOT-4、Radarsat-1 三幅影像构成的,结合图 2 可以发现,良好的控制点分布条件是它们取得较好精度的关键因素. 特别是 Radarsat-1 影像,由于其控制条件最好,

因此它在不同的平差方案中计算得到的定向参数基本是一致的。

但其它 7 个方案的平差结果精度较差。通过分析发现,这 7 个方案有一个共同点,即参与平差的影像都包括了 ERS-2 影像。显然,在这 7 个方案中,由于 ERS-2 影像范围最大,因此其成为了平差的主体,但此时 ERS-2 影像上的控制点过于集中在西南角,使得平差区域范围中的北部和东部大部分区域没有控制,违背了“区域周边密集控制”的平差要求,造成了平差结果精度的下降。

#### 实验二:

对表 2 中的(2)、(5)、(6)、(8)四个方案在图 3 所示的 6 种控制点分布情况下的平差结果进行分析,可以得到以下一些结论。

在仅有 8 个控制点的周边稀疏布点情况下,平差依然可以进行,但平差结果的精度要明显低于周边密集布点时的情况,特别是平差结果中加密点平面坐标的精度。但是,增加周边控制点的数量并不一

定能提高影像的定向精度,这取决于控制点本身的精度和量测精度。

在区域网中间增加一定数量的控制点,可以改善加密点地面坐标的高程精度,特别是在周边稀疏布点的情况下,增加一个中间点时,加密点的高程精度有明显改善,而增加四个中间点时,加密点的高程精度仍有改善,但变化幅度减小。对于周边密集布点的情况,增加一个中间点,即可使加密点的高程精度有很大提高,但增至四个中间点时,加密点的高程精度却有部分下降,说明增加的中间点中可能含有粗差点。

由此可见,不同类型卫星遥感影像联合区域网平差对控制点分布的要求与传统的区域网平差一致,只需在区域周边布设密集且均匀分布的控制点,区域中间布设少量的控制点,即可达到满意的精度。此外,控制点的量测精度应严格保证,否则会影响影像的定向精度。

综上所述,对于不同类型卫星遥感影像联合区

表 2 实验一中所有平差方案的结果

Table 2 Statistics of the results of all block adjustment schemes in first experiment

平差方案	影像	外方位元素精度(像素)			加密点地面坐标精度(m)			
		RMS_x	RMS_y	RMS_xy	RMS_X	RMS_Y	RMS_XY	RMS_Z
(1)	Radarsat1	2.954	2.005	3.571	98.182	30.332	102.761	102.423
	ERS2	16.159	952.714	952.851				
(2)	<b>Radarsat1</b>	<b>2.954</b>	<b>2.005</b>	<b>3.571</b>	<b>14.640</b>	<b>16.718</b>	<b>22.222</b>	<b>21.953</b>
	<b>SPOT4</b>	<b>0.520</b>	<b>0.795</b>	<b>0.950</b>				
(3)	SPOT4	0.751	1.536	1.710	14.693	48.906	51.066	18.520
	ERS2	3.332	1.207	3.544				
(4)	SPOT5	1216.186	316.861	1256.786	22.605	41.898	47.607	20.014
	ERS2	3.332	1.207	3.544				
(5)	<b>SPOT5</b>	<b>0.994</b>	<b>1.059</b>	<b>1.452</b>	<b>10.722</b>	<b>18.683</b>	<b>21.541</b>	<b>21.663</b>
	<b>Radarsat1</b>	<b>2.954</b>	<b>2.005</b>	<b>3.571</b>				
(6)	<b>SPOT5</b>	<b>0.874</b>	<b>0.881</b>	<b>1.241</b>	<b>10.987</b>	<b>12.929</b>	<b>16.967</b>	<b>27.005</b>
	<b>SPOT4</b>	<b>0.528</b>	<b>0.784</b>	<b>0.945</b>				
(7)	SPOT5	2.218	6.397	6.771	20.713	42.443	47.228	19.545
	SPOT4	5.884	1.672	6.117				
(8)	ERS2	3.332	1.207	3.544	<b>10.225</b>	<b>18.580</b>	<b>21.208</b>	<b>21.653</b>
	<b>SPOT5</b>	<b>0.992</b>	<b>1.062</b>	<b>1.454</b>				
(9)	<b>SPOT4</b>	<b>0.522</b>	<b>0.792</b>	<b>0.948</b>	<b>10.225</b>	<b>18.580</b>	<b>21.208</b>	<b>21.653</b>
	<b>Radarsat1</b>	<b>2.954</b>	<b>2.005</b>	<b>3.571</b>				
(10)	SPOT4	0.662	0.868	1.091	98.180	30.332	102.759	102.423
	Radarsat1	2.954	2.005	3.571				
(11)	ERS2	16.159	58.955	61.130	98.162	30.332	102.742	102.416
	SPOT5	6.934	2.428	7.347				
(12)	Radarsat1	2.954	2.005	3.571	98.160	30.332	102.740	102.416
	ERS2	16.159	839.882	840.037				
(13)	SPOT5	6.934	2.428	7.347	98.160	30.332	102.740	102.416
	SPOT4	0.662	0.868	1.091				
(14)	Radarsat1	2.954	2.005	3.571	98.160	30.332	102.740	102.416
	ERS2	16.159	41.206	44.261				

域网平差,一种合理的平差方案是,在区域四周选择光学影像并布设密集且均匀分布的控制点,而在区域内部则可以任意选择 SAR 影像或者光学影像,并布设少量的控制点,另外保证在区域内部有足够数量的加密点.该方案可以保证平差的顺利进行,并得到足够精度的平差结果,并可以有效避免 SAR 影像上量测控制点的困难,并使利用不同类型卫星遥感影像进行大区域测图成为可能.

#### 4 结论

根据区域网平差的基本原理,提出了不同类型卫星遥感影像联合区域网平差的思想,建立了光束法联合区域网平差模型,并通过两组实验验证了平差模型的有效性,分析了影像组合形式以及控制点的分布、数量、精度对平差结果的影响,最后得到了以下结论:

- 利用本文建立的光束法联合区域网平差模型对不同类型卫星遥感影像进行区域网整体平差是完全可行的;
- 区域网平差是否能够成功求解,与区域网中影像的类型、数量以及组合方式无关,但与控制点的布设方案有关;
- 在区域网内影像大小不一的情况下,在范围较大的影像周围布设控制点,可以有效改善平差结果;

- 在具备良好的控制条件时,联合区域网平差可以达到较好的精度;
- 区域周边控制点的分布、数量及精度对平差结果有较大影响;
- 利用本文建立的模型可以尝试进行大面积的不同类型卫星遥感影像联合区域网平差.

#### REFERENCES

- [1] WANG Zhi-Zhuo. *Principles of photogrammetry* [M]. Surveying and Mapping Press, (王之卓. 摄影测量原理. 武汉: 测绘出版社), 1979. 530—538.
- [2] Lee Y R. A study on aerial triangulation from multi-sensor imagery [J]. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2003, **19** (3): 255—261. [http://ieg.or.kr/abstract/E\\_190309.PDF](http://ieg.or.kr/abstract/E_190309.PDF), 2006-02.
- [3] Toutin T. Spatiotriangulation with multisensor VIR/SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 2004, **42** (10): 2096—2103.
- [4] Toutin T. Spatiotriangulation with multisensor HR stereo-images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44** (2): 456—462.
- [5] QIAN Zeng-Bo, LIU Jing-Yu, XIAO Guo-Chao. *Space photogrammetry* [M]. Bei Jing. PLA Press (钱曾波, 刘静宇, 肖国超. 航天摄影测量. 北京: 解放军出版社), 1992: 63—66.
- [6] XIAO Guo-Chao, ZHU Cai-Ying. *Radargrammetry* [M]. Earthquake Press (肖国超, 朱彩英. 雷达摄影测量. 北京: 地震出版社), 2001: 54—56.
- [7] HUANG Wei-Bin. *Theory and applications of modern adjustment* [M]. Beijing. PLA Press (黄维彬. 近代平差理论及其应用. 北京: 解放军出版社), 1992: 23—29.

(上接 250 页)

- [7] GUO Dong-Yun, WANG Yun-Bo, YU Jun, *et al.* Study of the C-V characteristics of the In/Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>/p-Si structure [J]. *J. Funct. Mater.* (郭冬云, 王耘波, 于军, 等. MFS 结构钛酸铋薄膜的 C-V 特性研究. *功能材料*), 2004, **35**: 180—182.
- [8] Tang M H, Sun Z H, Zhou Y C, *et al.* Capacitance-voltage and retention characteristics of Pt/SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub>/HfO<sub>2</sub>/Si structures with various buffer layer thickness [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**: 212907—3.
- [9] MA Jian-Hua, SUN Jing-Lan, MENG Xiang-Jian, *et al.*

Dielectric and interface characteristics of SrTiO<sub>3</sub> with a MIS structure [J]. *Acta Phys. Sin.* (马建华, 孙璟兰, 孟祥建, 等. SrTiO<sub>3</sub> 金属绝缘层半导体结构的介电和界面特性. *物理学报*), 2005, **54** (3): 1390—1395.

- [10] ZHAO Min, ZHANG Rong-Jun, GU Hao-Shuang, *et al.* (Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>)TiO<sub>3</sub> thin film's preparation and it's electric characteristics [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵敏, 张荣君, 顾豪爽, 等. (Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>)TiO<sub>3</sub> 铁电薄膜的制备工艺及电学性质研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22** (1): 71—74.