

# “天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像自检校区域网平差

张艳<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 冯伍法<sup>1</sup>, 元朝鹏<sup>2</sup>, 王淑香<sup>1</sup>

1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450052;

2. 中国天绘卫星中心, 北京 102102

**摘要:** 遥感卫星在空间环境运转过程中, 星敏感器的姿态角、成像相机的镜头和 CCD 等几何参数会发生不可预估的变化, 从而对卫星影像的定位精度产生影响。因此, 对卫星影像进行自检校区域网平差处理是实现卫星影像精确定位的一项关键技术。本文以“天绘一号”卫星为研究对象, 首先分析了“天绘一号”卫星三线阵立体测绘相机的镜头和 CCD 几何形变, 并提出了适用于“天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像的自检校模型; 然后建立“天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像的自检校区域网平差模型, 对外方位元素和自检校参数进行整体平差, 消除存在于外方位元素观测值和自检校标定值中的系统误差, 以提高卫星图像定位精度。最后利用嵩山实验场对“天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像进行了自检校区域网平差处理, 验证了自检校模型和自检校区域网平差模型的正确性和有效性, 并分析研究了不同数目的控制点条件对自检校区域网平差的影响。实验结果证实采用自检校区域网平差技术可以有效地消除系统定位误差, 显著提高定位精度。

**关键词:** “天绘一号”卫星, 三线阵 CCD 影像, 实验场, 自检校模型, 区域网平差, 几何变形

中图分类号: P235

文献标志码: A

**引用格式:** 张艳, 王涛, 冯伍法, 元朝鹏, 王淑香. 2015. “天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像自检校区域网平差. 遥感学报, 19(2): 219–227

Zhang Y, Wang T, Feng W F, Yuan Z P and Wang S X. 2015. Self-calibration block adjustment for Mapping Satellite-1 three linear CCD image. Journal of Remote Sensing, 19(2): 219–227 [DOI: 10.11834/jrs.20153334]

## 1 引言

遥感影像的高精度定位是影像几何处理的基础、信息量化的依据以及数据复合分析的关键, 而精确获知成像时刻的外方位元素和传感器的各项成像参数是遥感影像高精度定位的关键。目前, 高分辨率遥感卫星均载有高性能定轨测姿系统, 如 SPOT 5( [2013-05-10] <http://www.spotimage.fr> )、ALOS 卫星( Iwata, 2005 ) 等。但定轨测姿系统获取的外方位元素通常含有不同程度的系统误差, 其中定轨技术测定的外方位线元素总体精度较高, 而姿态角测定难度大, 误差源多, 是影响定位精度的主要误差源。SPOT 官方报告中指出, 姿态角误差是引起定位误差的主要原因( SPOT Satellite Geometry Handbook, 2007 )。除了定轨测姿数据中的系统误

差, 传感器几何参数的变化是另外一个主要误差源。卫星运行环境的变化和长期使用造成的器件损耗和老化都会导致传感器成像参数发生改变, 引入系统性误差, 降低影像定位精度。中国返回式摄影测量卫星的经验证实, 相机在空间运转过程中, 焦距变化量最大达到 20  $\mu\text{m}$  左右, 星地相机主光轴夹角的空间定标值与地面实验室定标值之间相差最多达 2' 多( 王建荣等, 2002 )。

因此, 如何有效消除卫星定轨测姿系统获取的外方位元素( 主要是姿态角 ) 和传感器成像参数含有的系统误差, 对提高卫星影像定位精度具有重要的意义。2010 年发射的“天绘一号”卫星( TH-1 ) 是中国第一颗立体测绘卫星, 有效载荷包括三线阵立体测绘相机、多光谱相机、高分辨率相机 3 类相机, 以及 1 台高精度的 GPS 接收机和 3 台中等精度星

收稿日期: 2013-12-16; 修订日期: 2014-04-01; 优先数字出版日期: 2014-04-08

基金项目: 国家自然科学基金( 编号: 41101396, 41001262 )、国家高技术研究发展计划( 863 计划 ) ( 编号: 2012AA12A302-5 )、地理信息工程国家重点实验室开放基金资助项目( 编号: SKLGIE2013-M-3-4 )

第一作者简介: 张艳( 1978— ), 女, 博士, 讲师。主要从事摄影测量定位、遥感图像数据处理等方面的研究工作。E-mail: zhangyanxz7806@163.com

敏感器设备。王任享(2013)、王任享等(2012, 2013)从 TH-1 的总体系统设计到后期数据处理进行了大量卓越有效的工作,按照 LMCCD( Line-Matrix CCD 线面结合 CCD)的思路,正视相机焦平面上设计集成了 5 片独立的 CCD 器件(1 个线阵和 4 个面阵),利用等效框幅像片 EFP(Equivalent FramePhoto)光束法空中三角测量法对 TH-1 三线阵 CCD 影像进行平差处理,提高定位精度。

本文对 TH-1 三线阵 CCD 影像的自检校区域网平差进行了深入研究,文中首先分析了 TH-1 卫星立体测绘相机的几何变形误差来源,提出了适用于三线阵 CCD 相机的自检校模型;然后建立了 TH-1 卫星三线阵 CCD 相机的外方位元素模型和分析了姿态角误差的影响,并将自检校模型引入光束法区域网平差中,建立了自检校区域网平差模型;最后利用嵩山地面试验场,对 TH-1 卫星三线阵 CCD 影像进行了定位处理,分析比较了基于定轨测姿数据的直接定位、常规平差定位和自检校区域网平差定位的精度差异。

## 2 “天绘一号”卫星立体测绘相机的自检校模型

TH-1 三线阵 CCD 传感器前视、下视和后视的焦平面上均安置有 1 条线阵 CCD。传感器的误差来源主要包括:摄影物镜光学畸变误差和线阵 CCD 变形、移位误差。

TH-1 三线阵立体测绘相机的镜头光学畸变误差可分为径向畸变、偏心畸变和像平面畸变等。

(1) 由镜头形状引起的使像点沿径向产生的偏差称为径向畸变。径向畸变分解到像平面坐标系的  $x$  轴和  $y$  上,则有(Poli 2005; 王涛 2012):

$$\begin{cases} \Delta x_r = k_1 \bar{x} r^2 + k_2 \bar{x} r^4 + k_3 \bar{x} r^6 + \dots \\ \Delta y_r = k_1 \bar{y} r^2 + k_2 \bar{y} r^4 + k_3 \bar{y} r^6 + \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\bar{x} = (x - x_p)$ ,  $\bar{y} = (y - y_p)$ ,  $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$ ,  $(x_p, y_p)$  为像主点坐标,  $k_1, k_2, k_3$  为径向畸变系数,  $\bar{x}, \bar{y}$  是考虑主点偏移后的像点坐标,  $r$  为考虑主点偏移的辐射距。

(2) 偏心畸变主要是由镜头光学系统的光心与几何中心不一致造成的( $p_1, p_2$  为偏心畸变系数)(Poli 2005; 王涛 2012):

$$\begin{cases} \Delta x_d = p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y} \\ \Delta y_d = 2p_1\bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) \end{cases} \quad (2)$$

(3) 像平面畸变可分为像平面不平引起的畸变

和像平面内的平面畸变。像平面内的平面畸变可表示为仿射变形和正交变形。研究认为正交变形部分是由主光轴与 CCD 阵列不正交引起的,而仿射变形是由 CCD 阵列不均匀造成的,二者都包含了透镜误差,其表达式如下,式中  $b_1, b_2$  为像平面内畸变系数。

$$\begin{cases} \Delta x_m = b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y_m = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(4) 传感器镜头主点坐标  $(x_p, y_p)$  的偏移  $\Delta x_p, \Delta y_p$  和焦距误差  $\Delta f$  引起的偏移  $-\frac{\Delta f}{f}x$  和  $-\frac{\Delta f}{f}y$ 。

TH-1 三线阵立体测绘相机的 CCD 变形和移位误差主要包括:像元尺寸的变化、CCD 在焦平面内的平移、CCD 在焦平面内的旋转。

(1) 像元尺寸的变化主要对成像比例尺造成影响。如图 1 所示,建立线阵 CCD 扫描线坐标系,飞行方向为  $x$  轴,扫描方向为  $y$  轴。设线阵 CCD 像元数为  $N_p$ ,单个像元原始尺寸为  $(p_x, p_y)$ ,尺寸变化率为  $(dx_p, dy_p)$ ,沿  $x$  和  $y$  轴方向总变化  $(dp_x, dp_y)$  为:

$$\begin{cases} dp_x = dx_p \approx 0 \\ dp_y = N_p \cdot dy_p \end{cases} \quad (4)$$

实际应用中可以只考虑沿  $y$  轴,即 CCD 扫描方向的像元尺寸变形影响。

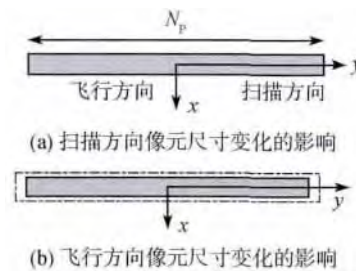


图 1 线阵 CCD 像元尺寸变化的影响

Fig. 1 Influence of linear CCD unit size change

(2) CCD 在焦平面内的平移: 前视、下视、后视 3 个相机的主点位置定义为过投影中心的直线与 CCD 线阵的垂直交点(李晶等 2012)。CCD 线阵的整体平移将使得实验室标定的像主点偏离原定位置,沿  $x$  和  $y$  轴方向的移动影响可用常量  $dx_c$  和  $dy_c$  表示。

(3) CCD 在焦平面内的旋转: 如图 2 所示,设 CCD 线阵在焦平面内旋转了角度  $\theta$ ,  $dx_\theta$  和  $dy_\theta$  分别为由于 CCD 旋转而造成的在飞行方向和扫描方向的像坐标误差,则有:

$$\begin{cases} dx_\theta = \bar{y} \sin \theta \\ dy_\theta = \bar{y} - \bar{y} \cos \theta = \bar{y}(1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (5)$$

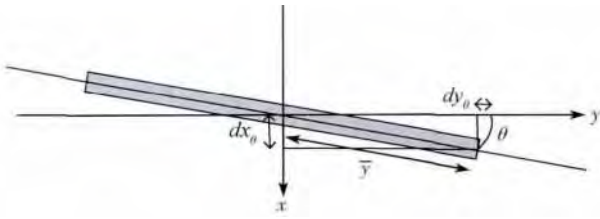


图2 线阵 CCD 在焦平面内的旋转图

Fig.2 Rotation of linear CCD in focal plane

(4) 从图3可知, CCD线阵列弯曲主要对像点 $x$ 坐标产生影响, 改正项 $\Delta x_b$ 可用下式计算( $b$ 为 CCD 线阵弯曲系数 $r$ 为像点辐射距):

$$\Delta x_b = \bar{y} r^2 b \quad (6)$$

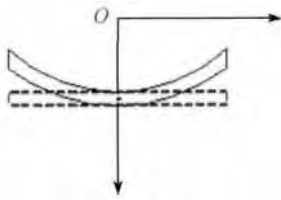


图3 线阵 CCD 的弯曲示意图

Fig.3 Curve illustration of linear CCD

综合分析镜头和 CCD 的形变特点, CCD 在焦平面内的平移和传感器镜头主点坐标 $(x_p, y_p)$ 的偏移可以合并到主点偏移参数 $\Delta x_p, \Delta y_p$ 中; 式(3)表示的像平面畸变与像元尺寸变化、CCD 在焦平面内的旋转和 CCD 线阵列弯曲在 $x$ 轴方向的综合影响可用几何参数 $b_1$ 和 $b_2$ 建模, 像元尺寸变化、CCD 在焦平面内的旋转和 CCD 线阵列弯曲在 $y$ 方向的综合影响用几何参数 $b_3$ 建模。径向畸变可以只考虑到第二项, 基于以上分析, 建立“天绘一号”卫星三线阵影像的自检校模型如下:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 r^2 + k_2 r^4) x + \\ p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \cdot \bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y = \Delta y_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 r^2 + k_2 r^4) y + \\ 2p_1 \bar{x} \cdot \bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + b_3 \bar{y} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $x_p, y_p$ 为主点偏移,  $\Delta f$ 为焦距变化,  $k_1, k_2$ 为径向畸变参数,  $p_1, p_2$ 为偏心畸变参数,  $b_1, b_2, b_3$ 为比例尺缩放、旋转和弯曲的综合影响参数。“天绘一号”卫星每个 CCD 相机设置 10 个附加参数, 总共设置 30 个参数。

### 3 “天绘一号”卫星立体测绘相机的自检校区域网平差几何定标

引入自检校参数模型, 基于附加参数的三线阵 CCD 影像的共线条件方程如式(8)所示:

$$\begin{cases} x + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y + \Delta y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $(X, Y, Z)$ 为地面点坐标,  $(x, y)$ 为相应的像点坐标,  $(\Delta x, \Delta y)$ 为式(7)描述的因摄影物镜光学畸变和 CCD 变形等因素引起的像点坐标系系统误差,  $(X_s, Y_s, Z_s)$ 为影像外方位线元素,  $(a_i, b_i, c_i) \quad i = 1, 2, 3$ 为外方位角元素 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 所构旋转矩阵的系数。

三线阵 CCD 影像属于行中心投影影像, 三线阵 CCD 传感器在成像时, 不同扫描线对应的摄影中心位置和姿态都不一样, 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外方位元素, 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(Poli 2005; 王涛 2012; 张永军等 2012)。通过研究分析, 对于长条带的三线阵 CCD 影像, 分段多项式模型和定向片模型最为合适。如果条带长度适中, 分段多项式模型可以满足需求。本文采用嵩山实验场附近 1 根轨道上的 3 景影像进行实验, 每景影像长度为 12000 行, 采用分段多项式模型足以描述外方位元素的变化, 因此采用分段多项式模型对外方位元素建模, 每景影像建立一组外方位元素模型。

$$\begin{cases} X_{st} = X_{s0} + \Delta X_s + \Delta X_s \bar{t} + \Delta X_s'' t^2 + \cdots + \Delta X_s^{k-1} \bar{t}^{k-1} \\ Y_{st} = Y_{s0} + \Delta Y_s + \Delta Y_s \bar{t} + \Delta Y_s'' t^2 + \cdots + \Delta Y_s^{k-1} \bar{t}^{k-1} \\ Z_{st} = Z_{s0} + \Delta Z_s + \Delta Z_s \bar{t} + \Delta Z_s'' t^2 + \cdots + \Delta Z_s^{k-1} \bar{t}^{k-1} \\ \varphi_t = \varphi_0 + \Delta \varphi + \Delta \varphi \bar{t} + \Delta \varphi'' t^2 + \cdots + \Delta \varphi^{k-1} \bar{t}^{k-1} \\ \omega_t = \omega_0 + \Delta \omega + \Delta \omega \bar{t} + \Delta \omega'' t^2 + \cdots + \Delta \omega^{k-1} \bar{t}^{k-1} \\ \kappa_t = \kappa_0 + \Delta \kappa + \Delta \kappa \bar{t} + \Delta \kappa'' t^2 + \cdots + \Delta \kappa^{k-1} \bar{t}^{k-1} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $t_0$ 为影像中心扫描行成像时刻,  $\bar{t} = t - t_0$ ;  $(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0)$ 为 $t$ 时刻外方位元素初始观测值,  $(X_{st}, Y_{st}, Z_{st}, \varphi_t, \omega_t, \kappa_t)$ 为 $t$ 时刻的外方位

元素精确值;  $(\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa)$  为外方位元素的误差常量,  $(\Delta X_s', \Delta Y_s', \Delta Z_s', \Delta \varphi', \Delta \omega', \Delta \kappa')$  为外方位元素随参考时间  $t$  的 1 阶变化率,  $(\Delta X_s'', \Delta Y_s'', \Delta Z_s'', \Delta \varphi'', \Delta \omega'', \Delta \kappa'')$  为 2 阶变化率,  $(\Delta X_s^k, \Delta Y_s^k, \Delta Z_s^k, \Delta \varphi^k, \Delta \omega^k, \Delta \kappa^k)$  为  $k$  阶变化率。

把式(8)线性化后,就可得到自检校区域网平差的误差方程。在自检校区域网平差中,将附加参数处理成自由未知数是不合适的,因为其实际值总是很小的,所以通常总是把它处理成带权的观测值(Kocaman 等, 2006)。如果将外业控制点也处理成带权观测值,则自检校区域网平差模型可表示为:

$$\begin{aligned} V_x &= AX + BX_g + CX_s - L_x P_x \\ V_g &= E_g X_g - L_g P_g \\ V_s &= E_s X_s - L_s P_s \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $X$  为外方位元素改正数矢量;  $A$  为相应的误差方程式系数矩阵;  $B$  为相应的误差方程式系数矩阵;  $L_x$  为像点坐标的观测值矢量;  $P_x$  为像点坐标的权矩阵;  $E_g$  为控制点改正数的系数矩阵,其形式为单位矩阵;  $X_g$  为控制点坐标的改正数矢量;  $L_g$  为控制点坐标改正数的观测值矢量;  $P_g$  为控制点坐标的权矩阵;  $E_s$  为自检校附加参数矢量的单位系数矩阵;  $X_s$  为自检校附加参数矢量;  $C$  为相应的误差方程式系数矩阵;  $L_s$  为附加参数的观测值矢量;  $P_s$  为附加参数的权矩阵。

对于 TH-1 卫星王任享(2013)和王任享等(2012, 2013)曾指出 TH-1 搭载的是高精度 GPS 定位系统和中等精度定姿系统,因此外方位元素改正数  $X$  主要考虑姿态角误差常量  $(\Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa)$  和其高阶变率。

## 4 实验数据介绍

实验采用 2010-12-20 成像的河南登封嵩山遥感综合实验场区域的 3 景 TH-1 01A 级三线阵影像及定轨测姿数据,每景影像具备前下后三视。选定该组影像,因为该区域具备嵩山遥感综合实验场的数据支持,外业控制数据精度高,可以进行高精度和高可靠性的自检校定标实验,而且地貌类型丰富,地形特征明显。

嵩山遥感综合实验场选址在河南登封嵩山地区,该地区主要地貌类别齐全,涵盖有平原、丘陵地、山地等,地形起伏较大,海拔高度约在 100—1500 m。实验场包括航空定标实验场,摄影测量与

遥感综合实验场和航天定标实验场 3 个部分。航空定标实验场主要用于各种航空相机或传感器的检定,摄影测量与遥感综合实验场主要是用于摄影测量与遥感技术综合试验,而航天定标实验场主要是用于各种航天传感器的检校与测试。航空定标实验场内采用控制点埋石方式分级布设了 214 个永久性高精度控制点,航天定标实验场目前面积约 8000 km<sup>2</sup>,实验场内布设 69 个高精度控制点,以自然、人工地物为标志,平面精度为 0.1 m,高程精度为 0.2 m。图 4 所示为实验影像覆盖测区及控制点分布图,其中红色框表示影像 TH-1A,影像覆盖区域内分布 14 个控制点,白色框表示影像 TH-1B,分布 38 个控制点,黄色框表示影像 TH-1C,分布 19 个控制点。GCP 全部采用野外控制测量,平面精度优于 0.1 m,高程精度优于 0.2 m,像点坐标采用人工量测,精度约在 0.5—1 个像元左右;同时采用影像匹配的方法获取连接点 25 个。

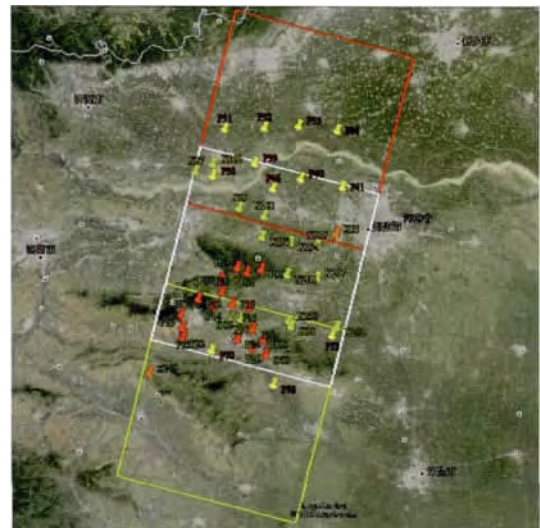


图 4 登封区域 TH-1 图像几何关系及控制点分布

Fig. 4 Geometric relationship of TH-1 imagery over Dengfeng area and GCP distribution

## 5 实验结果和分析

为便于进行精度比较和分析,在同等条件下分别进行常规区域网平差和自检校平差实验,为研究控制点数量对平差精度的影响,每景分别设置了多种不同数量的控制点配置方案,其余控制点作为独立检查点(CKP)用以评定平差精度,连接点也参与了平差解算。TH-1A 的实验结果如表 1 所示。表 1 中第 2 列表示采用定轨测姿数据计算得到的外方位



元素值进行直接空间前交定位,得到的直接定位精度值。第3列代表在不考虑自检校参数的条件下,仅利用控制点对测姿参数的误差进行区域网平差处理后得到的定位精度。第4列是采用自检校区域网平差模型(式(10))进行自检校区域网平差处理后得到的定位精度。

从表1可以看出:(1)在相同条件下,自检校平差的精度要优于常规平差,在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三轴方向上精度都有很大的改善;(2)无论是常规平差还是自检校平差,适量增加控制点有助于提高平差精度。

TH-1B的实验结果如表2所示,对表2中TH-1B的实验结果绘图分析,得到图5。

表1 TH-1A 常规平差和自检校区域网平差结果

Table 1 Normal block adjustment and self-calibration block adjustment results of TH-1A

GCP/CKP	直接定位( RMS/m)			常规平差( RMS/m)			自检校区域网平差( RMS/m)		
	$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$
1/13	41.720	139.622	39.433	26.673	35.496	25.913	10.201	9.825	8.762
3/11	41.201	139.129	39.001	23.905	32.795	22.729	8.118	7.679	6.787
5/9	40.163	138.967	39.120	21.887	29.880	20.289	7.026	6.363	6.062
7/7	40.660	138.223	38.153	20.296	29.784	20.122	6.451	6.293	5.117
9/5	40.345	138.621	39.015	20.392	29.802	20.200	6.450	6.303	5.132

表2 TH-1B 常规平差和自检校区域网平差结果

Table 2 Normal block adjustment and self-calibration block adjustment results of TH-1B

GCP/CKP	直接定位( RMS/m)			常规平差( RMS/m)			自检校区域网平差( RMS/m)		
	$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$
1/37	35.294	124.702	42.174	21.899	24.527	20.213	8.301	7.996	5.985
3/35	34.257	123.872	41.825	20.766	24.811	19.829	7.306	6.377	5.115
5/33	34.576	122.431	41.532	20.612	22.429	19.212	6.217	6.152	5.021
7/31	34.716	122.253	41.085	19.225	20.382	17.122	5.901	5.558	4.421
9/29	34.501	122.141	41.487	19.112	20.329	17.212	5.892	5.586	4.435
11/27	34.812	122.097	41.587	19.221	20.382	17.324	5.912	5.671	4.441
13/25	34.890	122.141	41.487	19.112	20.329	18.212	5.997	5.586	4.356

从表2和图5可以看出:(1)直接定位的精度在 $Y$ 轴方向系统误差最大,常规平差和自检校平差都能明显改善直接定位的精度,自检校平差的效果最为显著;(2)随着控制点数目的增多,常规平差和自检校区域网平差的精度都逐渐提高,但当控制点数目增加到7个以上时,常规平差和自检校区域网平差的精度都趋于稳定;(3)自检校区域网平差精度稳定后,平面最佳精度为 $X$ 方向6.0 m, $Y$ 方向5.5 m, $Z$ 方向4.3 m,可以满足测制1:5万比例尺地形图精度要求。

图6是TH-1B影像在13/25条件下常规平差与自检校平差后检查点残差示意图。表2和图5说

明常规平差可以显著提高直接定位的精度,这证实经过常规平差后,姿态角误差引起的误差已经得到有效地消除。但是从图6(a)和图6(b)可以发现,常规平差后,平面定位精度和高程定位还存在较为明显的系统误差,这又说明除了姿态角误差的影响,焦距变化、镜头和CCD形变等几何参数造成的误差影响还存在,而且由于一定时期内,这些几何参数的变化比较稳定,所以常规平差后,点位的残余误差成系统性。从图6(c)和6(d)可以看出,自检校平差后平面和高程的系统误差都得到了比较有效的补偿,在平面和高程方向剩余的点位残差都未见明显的系统误差。

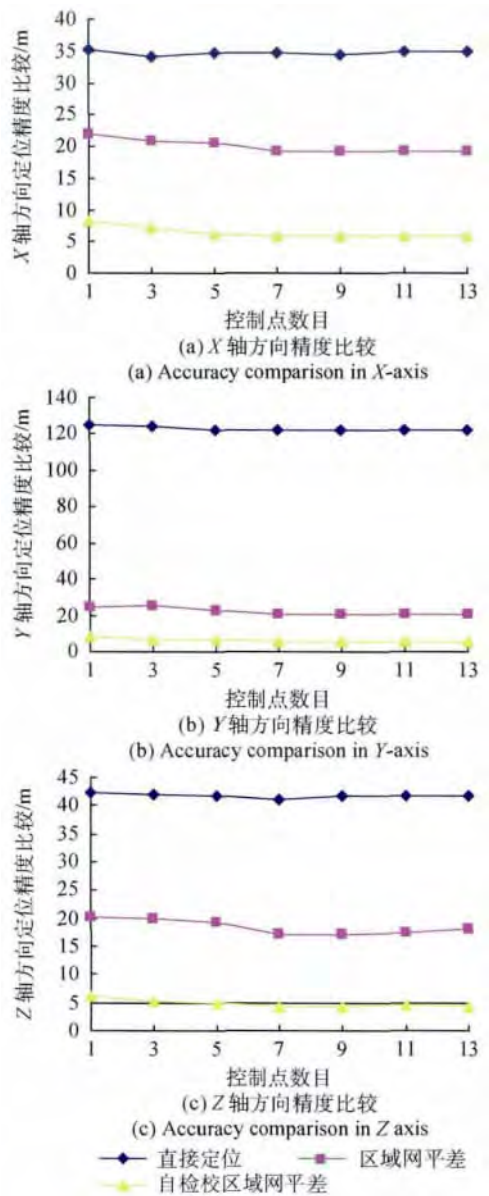


图5 TH-1B影像直接定位、常规平差和自检校区域网平差精度比较示意图

Fig. 5 Accuracy comparison among direct geopositioning, normal block adjustment and self-calibration bundle adjustment for TH-1B image

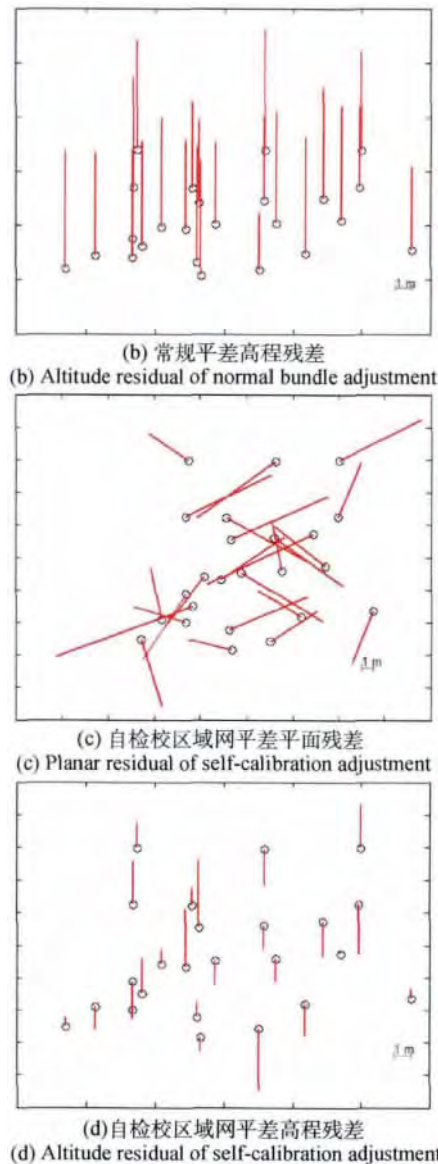
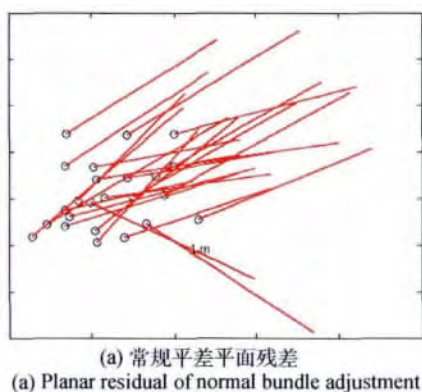


图6 常规与自检校平差检查点残差示意图

Fig. 6 Check points residual plots of normal and self-calibration block adjustment

TH-1C 的实验结果如表 3 所示, 经过常规平差后, 定位精度比利用定轨测姿数据的直接定位精度得到很大提高, 但是平面方面和高程方向仍然存在没有完全消除掉的系统误差。利用考虑自检校模型的自检校区域网平差技术进行平差, 则不仅消除了姿态角误差引起的系统误差, 还有效消除了镜头和 CCD 变形等因素造成的系统误差。而且控制点数目达到 7 个时, 平差精度趋于稳定。

分析表 1—表 3, TH-1 三线阵影像的空间分辨率为 5 m, 经过常规平差后, 最佳平面精度 X 方向和 Y 方向在 20 m 左右, 高程精度也在 20 m 左右, 也就是常规平差后, 平面精度在 4 个像素左右。经过自检

表3 TH-1C 常规平差和自检校区域网平差结果

Table 3 Normal block adjustment and self-calibration block adjustment results of TH-1C

GCP/CKP	直接定位( RMS/m)			常规平差( RMS/m)			自检校区域网平差( RMS/m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1/21	37.268	131.259	43.815	24.987	27.511	25.719	9.810	8.279	8.115
3/19	37.914	130.170	43.117	22.187	26.247	22.145	7.569	7.129	6.105
5/17	37.425	130.337	43.138	21.622	24.119	20.129	7.306	6.377	5.815
7/15	37.410	130.637	43.232	20.992	22.325	20.003	6.848	6.367	5.116
9/13	37.357	130.231	43.351	20.837	21.225	19.837	6.837	6.251	5.002
11/11	37.223	130.123	43.213	20.128	21.192	19.112	6.313	6.237	5.015
13/9	37.213	130.113	43.117	20.837	21.225	19.107	6.337	6.251	5.020

校区域网平差后,平面最佳精度提高到5—6.5 m,约在1.3个像素以内,高程精度提高到5 m。

TH-1A、TH-1B、TH-1C 自检校平差后,得到姿态角的平差值见表4,自检校参数的最佳值见表5—表7。三视影像共用一组姿态角元素( $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$ ),但是各自对应一组自检校参数( $x_p$ ,  $y_p$ ,  $\Delta f$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ )。

表4 姿态角元素平差结果

Table 4 Self-calibration results for attitude angles

影像	$\varphi/(^{\circ})$	$\omega/(^{\circ})$	$\kappa/(^{\circ})$
TH-1A	-22.90	-68.21	-25.63
TH-1B	-23.42	-67.97	-26.52
TH-1C	-21.98	-66.74	-24.01
平均值	-22.76	-67.64	-25.38

表5 TH-1A 前视、下视和后视的自检校参数平差值

Table 5 Self-calibration values for forward, nadir and backward images of TH-1A

影像	$\Delta f/\mu\text{m}$	$x_p$	$y_p$	$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
前视	2	0.0162	-0.00889	3.04E-06	4.32E-14	3.08E-04	-5.86E-04	-5.11E-14	7.06E-15	6.02E-09
下视	-1	0.0112	-0.00623	5.01E-06	5.12E-15	-9.68E-04	-3.24E-04	3.22E-14	2.33E-14	4.70E-09
后视	2	0.0155	-0.00602	7.82E-06	3.98E-13	1.77E-04	1.06E-04	6.02E-14	-3.22E-15	8.14E-09

表6 TH-1B 前视、下视和后视的自检校参数平差值

Table 6 Self-calibration values for forward, nadir and backward images of TH-1B

影像	$\Delta f/\mu\text{m}$	$x_p$	$y_p$	$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
前视	2	0.0181	-0.00683	4.13E-06	5.12E-14	3.39E-04	-4.42E-04	-6.02E-14	6.77E-15	5.99E-09
下视	-2	0.0127	-0.00614	3.99E-06	4.99E-15	-8.40E-04	-2.65E-04	2.79E-14	3.02E-14	3.78E-09
后视	1	0.0174	-0.00603	6.98E-06	4.03E-13	1.21E-04	1.01E-04	5.73E-14	-2.99E-15	7.62E-09

表7 TH-1C 前视、下视和后视的自检校参数平差值

Table 7 Self-calibration values for forward, nadir and backward images of TH-1C

影像	$\Delta f/\mu\text{m}$	$x_p$	$y_p$	$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
前视	1	0.0195	-0.00693	4.05E-06	6.13E-14	3.25E-04	-6.17E-04	-7.01E-14	8.21E-15	7.11E-09
下视	-1	0.0133	-0.00721	6.02E-06	6.02E-15	-8.99E-04	-3.70E-04	4.13E-14	3.99E-14	5.12E-09
后视	0	0.0194	-0.00704	8.02E-06	2.99E-13	1.78E-04	1.19E-04	7.02E-14	-4.25E-15	9.12E-09

从表4可以看出,3景影像自检校平差得到的姿态角元素改正值是趋于一致的,这说明在短期内,姿态角元素的变化是线性平稳的,消除姿态角

误差常量,可以有效提高定位精度,消除平面和高程的系统误差。从表5—表7可以看出,主点平移 $x_p$ 、 $y_p$ ,以及偏心畸变参数 $p_1$ 、 $p_2$ 是影像定位精度的

主要参数,焦距的变化也是不可忽视的。而且在一定时间内,前视、下视和后视的自检校参数变化基本也是趋于平稳的。

对于 TH-1A, TH-1B, TH-1C 影像,随着控制点的增多,自检校平差的精度趋于稳定,自检校参数的估计值变化也趋于一致。

## 6 结 论

本文在只具备三线阵 CCD 卫星影像的条件下,研究和探索了如何不利用 4 个小面阵 CCD 的支持,采用自检校区域网平差技术对 TH-1 三线阵卫星影像进行定位处理。研究结果证实,即使不利用 4 个小面阵 CCD 影像,采用文中建立的自检校区域网平差模型仅对 TH-1 三线阵影像进行平差处理,也可以显著提高定位精度,并且随着控制点的增多,自检校区域网平差的精度趋于稳定。本文的另一创新点在于对 TH-1 三线阵相机的成像误差进行详细分析,提出和建立了 TH-1 三线阵相机的自检校参数模型。

通过系列实验研究和分析,得出以下几点结论:(1)“天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像附属的定轨测姿文件带有系统误差,并且相机镜头和 CCD 元件存在一定程度的几何变形,利用定轨测姿参数进行直接空间前方交会定位存在非常明显的系统误差,必须采用平差技术对系统误差进行校正;(2)参考式(10)进行分析,式(10)中如果不考虑自检校参数误差  $X_s$  和  $X_g$  观测值方程,则式(10)就是常规区域网平差模型。常规区域网平差只考虑控制点误差  $X_g$  和外方位元素误差  $X$ ,没有考虑  $X_s$ ,因此常规区域网平差只改正了姿态角误差。经过常规平差后虽然可以有效消除姿态角误差引起的定位误差,显著提高平面和高程定位精度,但是镜头和 CCD 元件变形等几何参数的影响仍然存在,而且由于在一定时期内,这些几何参数的变化量非常微小,所以平面和高程方向的残余误差仍呈系统性;(3)利用文中提出的自检校平差模型对 TH-1 三线阵 CCD 影像进行自检校区域网平差,可以有效消除姿态角误差、焦距变化、镜头和 CCD 变形等几何参数的综合影响,显著提高平面和高程定位精度,检查点的残余系统误差得到有效消除,这证实文中提出的自检校模型和自检校区域网平差模型是正确有效的;(4)适当增加控制点数目可以有效提高自检校区域网平差的精度,但是当控制点数目增加到一定

数量时,平差精度趋于稳定。

同时应该指出,本文采用的是 TH-1 2010 年 12 月在嵩山实验场附近的三组影像数据,要进行更为全面客观的精度评价,还需要采用更多区域的 TH-1 影像数据进行更为全面的研究和更为持续的跟踪实验,而且对于自检校参数的显著性还可以进行深入研究。

## 参考文献(References)

- Iwata T. 2005. Precision attitude and position determination for the advanced land observing satellite (ALOS). Proceedings of SPIE: Enabling Sensor and Platform Technologies for Space-Borne Remote Sensing. Bellingham, WA: SPIE: 34 - 50 [DOI: 10.1117/12.579051]
- Kocaman S, Zhang L and Gruen A. 2006. Self-calibrating triangulation of airborne linear array CCD cameras. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW Workshop. Castelldefels-Spain, 2006, 25 - 27 January.
- Li J, Wang R, Zhu L M and Huang H L. 2012. In-flight geometric calibration for mapping satellite-1 surveying and mapping camera. Journal of Remote Sensing, 16( S1): 35 - 39 (李晶, 王蓉, 朱雷鸣, 黄海乐. 2012. “天绘一号”卫星测绘相机在轨几何定标. 遥感学报, 16(增刊): 35 - 39)
- Poli D. 2005. Modelling of spaceborne linear array sensors. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich: 88 - 91
- Wang J R, Yang J F, Hu X and Li J. 2002. The application of three-dimensional intersection for calibrating the spatial camera. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 19( 2): 119 - 121 (王建荣, 杨俊峰, 胡莘, 李晶. 2002. 空间后方交会在航天相机检定中的应用. 测绘学院学报, 19( 2): 119 - 121)
- Wang R X, Hu X, Wang X Y and Yang J F. 2012. The construction and application of mapping satellite-1 engineering. Journal of Remote Sensing, 16( S1): 2 - 5 (王任享, 胡莘, 王新义, 杨俊峰. 2012. “天绘一号”卫星工程建设与应用. 遥感学报, 16(增刊): 2 - 5)
- Wang R X. 2013. Key photogrammetric progress of TH-1 satellite without ground control point. Science of Surveying and Mapping, 38( 1): 5 - 7 (王任享. 2013. 天绘一号卫星无地面控制点摄影测量关键技术及其发展历程. 测绘科学, 38( 1): 5 - 7)
- Wang R X, Hu X and Wang J R. 2013. Photogrammetry of mapping satellite-1 without ground control points. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 42( 1): 1 - 5 (王任享, 胡莘, 王建荣. 2013. 天绘一号无地面控制点摄影测量. 测绘学报, 42( 1): 1 - 5)
- Wang T. 2012. Study on theories and methods of linear CCD sensor geometric calibration based on field. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University (王涛. 2012. 线阵 CCD 传感器实验场几何定标的理论与方法研究. 郑州: 解放军信息工程大学)
- 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( S1): 84 - 89 (张永军, 郑茂腾, 王新义, 黄心惠. 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)



## Self-calibration block adjustment for Mapping Satellite-1 three linear CCD image

ZHANG Yan<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, FENG Wufa<sup>1</sup>, YUAN Zhaopeng<sup>2</sup>, WANG Shuxiang<sup>1</sup>

1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;

2. China Mapping Satellite-1 Center, Beijing 102102, China

**Abstract:** Launched in 2010, “Mapping Satellite-1” (TH-1) is the first stereo surveying and mapping satellite from China. During thereal operation of TH-1 in the space environment, the attitude angles of the star sensor, lens geometric parameters, and CCD undergo unpredictable changes that affect the positioning accuracy of satellite images. This study conducts self-calibration block adjustment research on TH-1 satellite images to achieve high image positioning accuracy. The following investigation method is used in this study: First, the lens and CCD geometric distortions of the three linear stereo surveying and mapping cameras of TH-1 are analyzed, and a self-calibration model suitable for the satellite’s three linear CCD images is proposed. The self-calibration block adjustment model is built for the satellite’s three linear CCD images. Overall adjustment is then applied on exterior orientation elements and self-calibration parameters to eliminate systematic errors present in the above observations and to improve the positioning accuracy. Finally, the Songshan testfield is utilized to support the self-calibration block adjustment processing for the three linear images of TH-1 and to verify the correctness and validity of the self-calibration and self-calibration block adjustment models. The influence of the number of control points on self-calibration is also analyzed. Experimental results demonstrate that using the self-calibration block adjustment technique can effectively eliminate systematic positioning errors and significantly improve positioning accuracy. The spatial resolution of the three linear array images of TH-1 is 5 m. After normal block adjustment, the optimal plane accuracy along the X- and Y-directions are approximately 20 m, with a height accuracy of approximately 20 m and plane accuracy of 4 pixels. After self-calibration block adjustment, the optimal plane accuracy increased from 5 m to 6.5 m (i.e., less than 1.3 pixels), and the height accuracy increased to 5 m. Through a series of experimental research and analysis, the following conclusions can be drawn: (1) The auxiliary orbit and attitude determination files of the three linear CCD images of TH-1 contain clear systematic errors. A certain degree of geometric deformation also exists in the camera lens and CCD component. For direct space intersection using orbit and attitude determination files, a prominent systematic positioning error must be eliminated through the block adjustment approach. (2) If the self-calibration parameter  $X_s$  and its observation equation are not considered, Eq. (10) becomes the normal block adjustment model. Normal block adjustment considers only the control point error  $X_g$  and exterior orientation element error  $X$ ; thus, it corrects only the attitude errors. Although normal block adjustment can effectively eliminate the positioning error caused by the attitude angle error, the impact of the lens and CCD component geometric deformation parameters still exists. The variation of the latter parameters is minor in a medium period, and the residual errors in the plane and elevation direction are still systemic. (3) Applying self-calibration block adjustment to the three-line array images of TH-1 with the self-calibration model presented in this paper can effectively eliminate the attitude errors and the combined effects of the focal length change, lens, and CCD geometric deformation and significantly improve positioning accuracy. The residual systematic errors of the check-points are effectively eliminated after self-calibration adjustment, which confirms the correctness and effectiveness of the self-calibration parameter and self-calibration block adjustment models presented in this paper. (4) Increasing the control points can efficiently improve the accuracy of self-calibration block adjustment in an appropriate range, but when the number of control points reaches a certain degree, the adjustment accuracy stabilizes.

**Key words:** Mapping Satellite-1 (TH-1), three linear CCD image, testfield, self-calibration model, block adjustment, geometric distortion