

基于有理多项式模型区域网平差的 GF-1 影像几何校正

刘 佳, 王利民, 杨玲波, 邵 杰, 滕 飞, 杨福刚, 富长虹

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 2013 年 4 月成功发射的 GF-1 卫星是中国高分系列卫星的首发星, 影像在中国农情遥感监测业务中得到了广泛应用, 已成为大宗农作物种植面积遥感监测的主要数据源之一。高精度几何位置的配准是卫星农情量化应用的基础与前提, 该文提出了一种基于区域网平差方法修正 GF-1 卫星 WFV (wide field view, WFV) 影像 RPC (rational polynomial coefficients, RPC) 参数, 获取更高几何定位精度的校正方法, 形成了模式化的业务处理流程, 为该影像在农情遥感监测中的应用奠定了基础。算法流程包括 2 个部分, 首先是基于像面间仿射变换关系及有理多项式 RFM (rational function model, RFM) 模型构建轨道间的区域网平差数学模型, 其次是根据影像连接点及少量控制点输入求解所有参与平差的卫星影像定向参数, 获取亚像元级的校正结果。平差参数的解算是通过两步求解完成的, 初始平差参数是根据连接点及对应的 DEM 高程值进行平差迭代至收敛, 结果平差参数是将初始平差参数作为初始值代入区域网平差模型, 并以逐点消元方式约化法方程, 解算出各影像的仿射变换参数。该文在求解平差参数过程中, 直接使用 DEM (digital elevation model) 上获取的高程值作为约束条件, 消除了平面坐标与高程的相关性, 保证了区域网平差模型能够解算。混合地形、平原、山区 3 种情况下区域网平差结果表明, 全连接点平差结果具有较高的相对定位精度, 其行方向的中误差分别为 0.3046、0.4674、0.3365 像元, 列方向的中误差分别为 0.3677、0.2849、0.2889 像元; 而结合少量控制点的区域网平差则同时具有很高的绝对定位精度, 其行方向的中误差分别为 0.3648、0.5041、0.3605 像元, 列方向的中误差分别为 0.4954、0.4039、0.6323 像元, 整体达到了亚像素级。最后, 在农业应用基础控制底图的支持下, 分别对原始影像、RPC 校正影像、区域网平差后的影像进行几何配准, 分析不同输入影像条件下的几何校正精度, 仅有区域网平差后的影像达到了亚像元的校正精度, 混合地形、平原、山区 3 种情况下行方向的中误差分别为 0.6857、0.6664、1.0646 像元, 列方向的均方差分别为 0.4342、0.4696、0.5609 像元, 但与几何校正前精度相比没有明显改善, 说明本文提出的研究方法可以实现少量控制点条件下的几何精校正。不同 DEM 校正结果表明, 对于山区, 更高分辨率的 DEM 可以获得更好的定位精度。上述研究充分表明, 该方法对 GF-1/WFV 数据的处理有效且可行, 并在农业部中国农情遥感业务工作中得到了初步应用。

关键词: 卫星; 遥感; 影像处理; 高分一号卫星; 有理函数模型; 区域网平差; 逐点消元法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.020

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-22-0146-09

刘 佳, 王利民, 杨玲波, 邵 杰, 滕 飞, 杨福刚, 富长虹. 基于有理多项式模型区域网平差的 GF-1 影像几何校正[J].

农业工程学报, 2015, 31(22): 146-154. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.020 <http://www.tcsae.org>

Liu Jia, Wang Limin, Yang Lingbo, Shao Jie, Teng Fei, Yang Fugang, Fu Changhong. Geometric correction of GF-1 satellite images based on block adjustment of rational polynomial model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 146 - 154. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.020 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

遥感技术具有时效性、客观性和可视性特点, 逐步与传统的统计调查相融合, 在中国农情监测业务中发挥着越来越重要的作用。随着国内外卫星遥感影像资源越来越丰富, 农情监测对遥感数据的自动、量化处理乃至对遥感数据信息的理解能力与对遥感数据的有效利用的需求也日益增强, 定量遥感逐渐成为遥感发展的主要方向^[1-2]。GF-1 号卫星是中国高分系列卫星第 1 颗卫星, 自 2013 年 4 月成功发射以来, 具有高空间和高时间分辨

率的特点, 特别是 16 m 宽视场数据, 观测幅宽达 800 km, 观测能力大幅度提升, 对区域农情遥感监测具有独特优势^[3-6]。遥感影像的精确集合定位是农业遥感应用基础, GF-1/WFV 卫星数据精确的几何定位方法还没有明确系统的研究报告, 在以往研究基础上提出较为完整的、适合于业务化运行的几何精校正方法是高分卫星数据应用的前提。

根据传感器成像几何模型所反映的数学关系, 通常将几何校正模型分为严格成像模型和通用校正模型两大类。通用几何校正模型不考虑传感器成像物理意义, 直接采用数学函数的形式描述地物点和相应像点间的几何关系, 多项式、直接线性变换、仿射变换和有理函数模型等都属于此类模型。严格几何模型则是以共线条件为基础, 通过严密的成像关系建立的模型^[7]。目前, 出于国际政治原因和技术保密因素, 在进行高分辨率卫星的处理时, 该模型已被一种通用几何模型——有理多项式模

收稿日期: 2015-05-13 修订日期: 2015-10-14

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项“高分农业遥感监测与评价示范系统(一期)”

作者简介: 刘 佳, 女, 汉族, 湖南人, 副研究员, 主要从事农业遥感监测业务运行研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。

Email: liujia06@caas.cn

型 (rational function mode, RFM) 替代。RFM 模型是将地面点大地坐标与其对应的像点坐标用比值多项式关联起来^[8-12], 以 RPC (rational polynomial coefficients) 参数的形式提供给用户, 方便用户使用较少的控制点进行精校正, 近年来得到普遍的应用^[13-19], 研究也证明 RFM 模型比严格几何模型更加稳定, 且可达到相一致的精度水平^[20]。然而, 在近些年的研究和应用过程中发现, 由于星载 GPS、恒星相机和陀螺等设备获取的传感器位置和姿态参数精度有限, 造成 RPC 模型存在较大的系统误差^[21], 且遥感影像对地目标定位的精度一直依赖于地面控制点的数量和分布, 无法保障各影像在正射纠正后的拼接精度。为了消除 RPC 模型系统误差带来的影响, 常从物方和像方 2 个方面对其误差进行补偿, 研究表明, 基于像方的补偿能够很好地消除影像的系统误差^[22], 也就是通过影像之间的约束关系补偿有理函数模型的系统误差来提高定位精度, 即基于有理函数模型的卫星影像区域网平差^[23-24]。RPC 模型区域网平差的原理是将地面点物方坐标与其像点之间的关系转换为像点间的仿射变换关系, 通过这种关系可在缺少地面控制点的情况下, 有效地消除系统误差所带来的影响。

目前, 已有不少研究人员对不同的卫星影像数据进行了区域网平差的研究^[25-27], 也取得了一定的成果。在农业部农情遥感业务化运行中, GF-1 卫星每月形成近千幅云量低于 10% 的 WFV 数据, 主要使用传统的影像间配准, 或者使用 RPC 参数结合 DEM 的方法进行几何校正。在实际的应用中发现, 对于平原地区其精度尚可, 在山区等地形复杂地区, 精度出现下降的情况, 无法满足农情遥感监测所需要的亚像素级精度的要求。本文使用基于 RPC 模型的区域网平差方法, 只需少量控制点, 或使用全连接点, 即可实现业务运行的精度要求, 并在农业部遥感监测业务中进行了初步应用。

1 算法原理

1.1 RPC 模型结构

RPC 模型的实质是有理函数纠正模型^[26], 是一种能获得与严格成像模型近似一致精度的、形式简单的概括模型, 它将像点坐标 (c, r) 表示为以相应地面点空间坐标 (u, v, w) 为自变量的多项式的比值^[22]。其形式如下:

$$\begin{cases} c = \frac{Num_c(u, v, w)}{Den_c(u, v, w)} \\ r = \frac{Num_r(u, v, w)}{Den_r(u, v, w)} \end{cases} \quad (1)$$

作为一种广义模型, 当 RFM 分母为 1 时, 其退化为一般的多项式模型^[28]。高阶的多项式模型常常被用于拟合曲线的内插模型^[29]。式(1)中的 $Num_c(u, v, w)$, $Den_c(u, v, w)$, $Num_r(u, v, w)$, $Den_r(u, v, w)$, 形式如下:

$$p(u, v, w) = a_1 + a_2 \cdot v + a_3 \cdot u + a_4 \cdot w + a_5 \cdot v \cdot u + a_6 \cdot v \cdot w + a_7 \cdot u \cdot w + a_8 \cdot v^2 + a_9 \cdot u^2 + a_{10} \cdot w^2 + a_{11} \cdot u \cdot v \cdot w + a_{12} \cdot v^3 + a_{13} \cdot v \cdot u^2 + a_{14} \cdot v \cdot w^2 + a_{15} \cdot v^2 \cdot u + a_{16} \cdot u^3 + a_{17} \cdot u \cdot w^2 + a_{18} \cdot v^2 \cdot w + a_{19} \cdot u^2 \cdot w + a_{20} \cdot w^3$$

式中, (u, v, w) 和 (c, r) 分别为正则化的物方和像方坐标;

a_1, a_2, \dots, a_{20} 为 RPC 模型参数。

用 (φ, λ, h) 表示地面点的原始坐标, 其中 φ 为大地纬度, ($^\circ$), λ 为大地经度, ($^\circ$), h 为大地高, m, 用 (C, R) 表示原始像点坐标, 则正则化计算可表示为

$$\begin{cases} u = (\varphi - \varphi_0) / \varphi_s \\ v = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_s \\ w = (h - h_0) / h_s \\ c = (C - C_0) / C_s \\ r = (R - R_0) / R_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, $(\varphi_0, \lambda_0, h_0, C_0, R_0)$ 为正则化平移参数, $(\varphi_s, \lambda_s, h_s, C_s, R_s)$ 为正则化尺度参数。

1.2 区域网平差原理

由于星载 GPS、恒星相机和陀螺等设备获取的传感器位置和姿态参数精度有限, 会造成 RPC 模型存在较大的系统误差, 反应到像方坐标上, 可表示为

$$\begin{cases} \Delta C = \theta_0 + \theta_C \cdot C + \theta_R \cdot R + \theta_{CR} \cdot C \cdot R + \theta_{C^2} \cdot C^2 + \theta_{R^2} \cdot R^2 + \dots \\ \Delta R = f_0 + f_C \cdot C + f_R \cdot R + f_{CR} \cdot C \cdot R + f_{C^2} \cdot C^2 + f_{R^2} \cdot R^2 + \dots \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta C, \Delta R$ 为 C, R 的改正量; $\theta_0, \theta_C, \theta_R, \dots$ 和 f_0, f_C, f_R, \dots 为像点坐标的改正系数。

用 (S, L) 表示经系统误差改正后的像点坐标, 当改正量 $\Delta C, \Delta R$ 的表达式取至一次项时, (S, L) 与 (C, R) 之间的关系为

$$\begin{cases} S = C + \Delta C = \theta_0 + \theta_1 \cdot C + \theta_2 \cdot R \\ L = R + \Delta R = f_0 + f_1 \cdot C + f_2 \cdot R \end{cases} \quad (4)$$

即存在着仿射变换关系, 其中 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots$ 和 f_0, f_1, f_2, \dots 为各影像的仿射变换参数。式(4)即为 RPC 模型区域网平差的数学模型。

2 算法描述

2.1 算法思路

算法的核心是 RPC 模型的区域网平差, 目的是补偿高分 WFV (wide field view) 影像 RPC 参数的系统误差, 在缺少地面控制点的条件下, 进行 GF-1/WFV 影像的正射纠正和几何配准, 满足农业遥感监测业务不同时相间影像高精度匹配的要求。算法流程包括平差模型构建、平差参数求解 2 个部分。首先, 基于 RPC 参数像点与地面点关系, 构建影像间的仿射变换关系, 也就是区域网平差模型; 其次, 确定连接点的初始值, 结合少量地面控制点, 解算各影像的仿射变换系数, 进行影像区域网平差, 获取能够满足农情遥感监测需要的 GF-1 卫星 WFV 影像。

具体平差参数的解算是通过两步求解完成的, 一是连接点初始值的确定, 利用 RPC 模型的一次项对连接点的平面坐标进行迭代更新, 直至收敛到稳定的状态, 高程值利用 DEM 进行内插获得。二是仿射变换参数的最终确定, 即将更新后的连接点连同少量的地面控制点, 输入区域网平差模型建立误差方程, 并以逐点消元的方式约化法方程解算出最后的未知量。其中, 区域网平差过

程中不求解连接点地面坐标的高程值, 仅计算卫星影像的仿射变换系数和连接点物方平面坐标, 这样可以保证平差解算的稳定性以及平差后物方点平面坐标的精度。

选择混合地形区、平原区、山区 3 类影像校正业务场景, 进行算法校正效果分析。以平差前后像元连接点残差比较, 说明区域网平差的校正效果; 以平差前后控制点地面坐标残差比较, 说明区域网平差算法结果与绝对坐标的差异; ; 在农业应用基础控制底图的支持下, 分别对原始影像、RPC 校正影像、区域网平差后的影像进行几何配准, 比较不同输入影像条件下的校正精度, 分析经区域网平差结果的几何校正效果, 以进一步说明算法的可行性。本文进行区域网平差的具体流程如图 1 所示。

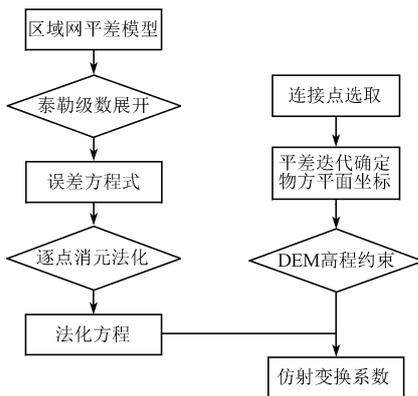


图 1 GF-1 卫星 WFV 影像的区域网平差流程
Fig.1 Process of GF-1/WFV block adjustment

2.2 误差方程式

对式 (4) 进行泰勒一级展开, 即可建立区域网平差模型的误差方程式。

$$V = [A \ B] \begin{bmatrix} t \\ X \end{bmatrix} - L \quad (5)$$

式中, $A = [A_1 \ \dots \ A_i \ \dots]^T$, $B = [B_1 \ \dots \ B_i \ \dots]^T$ ($i=0,1,2,\dots$) 分别为仿射变换参数和连接点物方坐标系数转置矩阵; $t = [d\theta_0, d\theta_1, d\theta_2, df_0, df_1, df_2]^T$ 为影像仿射变换参数的改正值, $X = [d\varphi_1, d\lambda_1, dh_1, \dots, d\varphi_n, d\lambda_n, dh_n, \dots]^T$ ($n=0,1,2,\dots$) 为连接点地面坐标的改正值; L 为像点坐标的残差向量。

若设参与平差的影像个数为 n , 连接点个数为 m , 控制点的个数为 p , 第 k 个地面点 (控制点或连接点) 在第 j 幅影像上的像点号为 i , 则有:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \frac{\partial F_{Si}}{\partial \theta_0^j} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial \theta_1^j} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial \theta_2^j} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial f_0^j} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial f_1^j} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial f_2^j} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial L_{Si}}{\partial \theta_0^j} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial \theta_1^j} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial \theta_2^j} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial f_0^j} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial f_1^j} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial f_2^j} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \frac{\partial F_{Si}}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial \lambda_k} & \frac{\partial F_{Si}}{\partial h_k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial L_{Si}}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial \lambda_k} & \frac{\partial L_{Si}}{\partial h_k} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_i = \begin{bmatrix} S_i^j - \theta_0^j - \theta_1^j \cdot C_i^j - \theta_2^j \cdot R_i^j \\ L_i^j - f_0^j - f_1^j \cdot C_i^j - f_2^j \cdot R_i^j \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} t_n = [d\theta_0, d\theta_1, d\theta_2, df_0, df_1, df_2, \dots, d\theta_0^n, d\theta_1^n, d\theta_2^n, df_0^n, df_1^n, df_2^n]^T \\ X_m = [d\varphi_1, d\lambda_1, dh_1, \dots, d\varphi_m, d\lambda_m, dh_m]^T \end{cases}$$

2.3 法方程式

对于每个连接点 (或控制点) 可以列出一组如式 (5) 的误差方程式, 其中含有两类未知数 t 和 X , t 对应于所有影像仿射变换参数的总和, X 对应于所有地面点的坐标。相应的法方程式为

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P L \\ B^T P L \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, P 为连接点、控制点及附加参数的权矩阵。对于卫星影像的区域网平差而言, 由于所涉及的轨道、每条轨道上的影像数和每幅影像的连接点数有时会很多, 此时误差方程式的总数是十分可观的。在解算过程中可先消去其中一类未知数而求另一类未知数^[30]。一般情况下地面点坐标未知数 X 的个数要远远大于定向未知数 t 的个数, 消去 X 后可得 t 的解为

$$t = [A^T P A - A^T P B (B^T P B)^{-1} (B^T P A)]^{-1} \cdot [A^T P L - A^T P B (B^T P B)^{-1} (B^T P L)] \quad (7)$$

2.4 逐点消元法

按照式 (7) 整体消元解算未知数时, 系数矩阵、误差向量以及权矩阵的阶数不变, 导致实际的计算量并没有明显减少。因此, 本研究采用逐点消元法对每个连接点 (或控制点) 进行法化、消元建立约化法方程式, 最后统一解算各点的约化法方程组, 求出各影像的仿射变换参数的改正数^[31]。其实现形式如下:

$$\sum_{i=1}^m \left([A^T P A - A^T P B (B^T P B)^{-1} (B^T P A)] \right)_i \cdot t = \sum_{i=1}^m \left(A^T P L - A^T P B (B^T P B)^{-1} (B^T P L) \right)_i \quad (8)$$

3 试验与结果

3.1 试验

本文选取了 3 种不同地形区域的 GF-1/WFV 数据作为测试数据, 共 6 幅影像。区域 1 包括北京地区的 2 幅测试数据, 地貌类型包括了平原和山区, 平原区海拔高度 20~60 m, 山区 1 000~1 500 m, 主要是验证平原与山区混合地形条件下算法精度; 区域 2 为覆盖河北省中南部和山东省北部的 2 幅影像, 地貌类型以黄淮海平原为主, 平均高程 46 m, 最小高程 13 m, 最大高程 532 m, 主要是检验平原区域的算法精度; 区域 3 为覆盖陕西省、甘肃东北部的 2 幅影像, 地貌类型主要为秦岭山脉和黄土高原沟壑区等, 平均高程 1 288 m, 最小高程 183 m, 最大高程 3 629 m, 主要是检验山区地形条件下的算法精度。表 1 给出了 6 幅影像的传感器、轨道号、获取时间和侧摆角度等信息。

在平差计算过程中使用了连接点和少量控制点，连接点采用商业软件自动选取并经人工目视检查，控制点和检查点是在 Google Earth 影像上通过目视的方式选取。所有连接点均为明显地物点，如路口交叉点和拐角点等，尽量选取地势变化平缓地区的地物点，应避免选取高程变化大的地物（如房屋点等）对区域网平差精度造成影

响；少量控制点则可提高平差结果的平面坐标精度。区域 1 共选取了 14 个连接点、2 个控制点和 8 检查点，区域 2 共选取了 27 个连接点、10 个控制点和 8 检查点，区域 3 共选取了 28 个连接点、7 个控制点和 7 个检查点。图 2 则给出了平差过程中连接点、控制点和检查点的分布情况。

表 1 试验区 GF-1 卫星 WFV 影像
Table 1 GF-1/WFV images of test area

区域 Region	影像序号 Image ID	影像传感器与轨道号 Image sensor and track number	获取时间 Acquisition time	侧摆角 Roll/(°)	控制点数量 Number of ground control points	连接点数量 Number of tie points
混合区域 Mixed region	1	GF1_WFV4_E116.4_N40.2_20141102_L1A0000427926	2014-11-02	6.99	4	12
平原地区 Plain region	2	GF1_WFV4_E117.0_N40.1_20150119_L1A0000599016	2015-01-19	0.01	4	12
山区 Mountainous region	3	GF1_WFV2_E116.6_N37.6_20140517_L1A0000227348	2014-05-17	15.57	10	27
	4	GF1_WFV3_E114.7_N37.3_20140526_L1A0000235688	2014-05-26	8.79	10	27
	5	GF1_WFV1_E106.7_N34.7_20140326_L1A0000190300	2014-03-26	26.63	7	28
	6	GF1_WFV1_E108.2_N34.7_20140314_L1A0000183018	2014-03-14	2.00	7	28

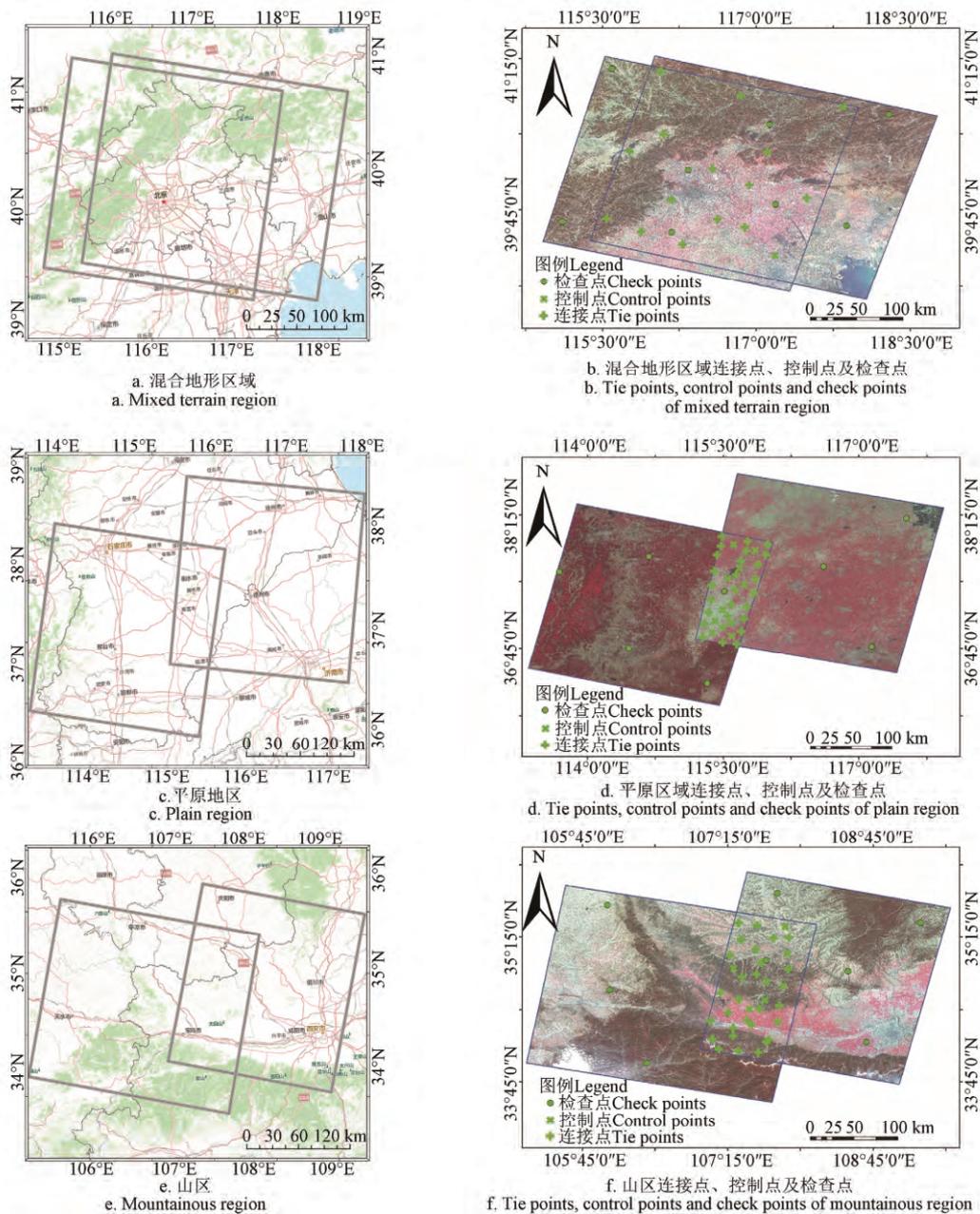


图 2 GF-1 卫星 WFV 影像覆盖范围及连接点、控制点和检查点空间分布

Fig.2 Coverage area of GF-1/WFV images and spatial distribution of tie points control points and check points

在几何精校正分析的过程中使用了农业部“国家农业遥感监测业务运行系统”中基础控制底图,该底图基于 15 m 空间分辨率的 LandSat-8/OLI 数据并经过 Google Earth 影像的系统校准形成的。以该底图为控制底图,分别对原始 GF-1/WFV 影像、RPC 校正的 WFV 影像、有控区域网平差的 WFV 影像,采用小面元微分纠正的方法进行几何配准,校正过程采用美国 ERDAS 公司 Erdas Imagine 软件中的 AutoSync 模块进行,混合区域、平原、山区的控制点分别在底图上均匀设置 25 个检查点进行配准精度检查,控制点与检查点基本上是均匀分布的,符合一般的几何精校正方法的选点规则。

3.2 区域网平差结果分析

根据区域网平差结果对连接点残差进行统计,包括使用全连接点和加入少量控制点的平差方法,与直接依据原始 RPC 参数计算的连接点残差进行比较,可以检验基于连接点的区域网平差的效果与稳定性,同时其残差也能在一定程度上反映影像之间的相对位置精度。3 种方式下残差统计结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,区域 1、2、3 原始 RPC 结果行方向的残差为 0.3130、1.5058 和 1.1869 像素,列方向的残差为 1.3681、1.4189 和 0.4195 像素,表明采用原始 RPC 参数计算获取的影像间定位结果存在较大的差异,需要进一步进行校正;而在全连接点的条件下,通过区域网平差,区域 1、2、3 测试结果行方向的残差为 0.3046、0.4674 和 0.3365 像素,列方向的残差为 0.3677、0.2849 和 0.2889 像素,与原始 RPC 结果相比较,有了较大的改善,表明在全连接点的情况下,通

过本文算法可以有效提高影像的相对定位精度;而为了验证在连接点基础上添加一定数量控制点对平差结果的影响,对 3 个试验区分辨添加一定数量控制点,3 个区域行方向残差分别为 0.3648、0.5041、0.3605 像素,列方向残差分别为 0.4760、0.2231、0.2738 像素,结果表明,增加的控制点对于连接点残差的减少并未有显著作用,这是因为通过全连接点可以较大程度上提高影像之间的相对位置精度,而控制点的作用主要在于提高影像的绝对定位精度。

为评价本文算法的绝对定位精度,在 3 个试验区域选择一定数量的检查点,统计检查点的误差,统计结果见表 3。由表 3 可以看出,区域 1、2、3 原始 RPC 结果行方向的中误差为 3.9052、11.3084 和 6.5864 像素,列方向的中误差为 4.8539、2.7709 和 2.4960 像素,其绝对定位精度需要进一步提高;而通过全连接点的区域网平差,区域 1、2、3 校正结果行方向的中误差为 2.7765、3.0772 和 1.7908 像素,列方向的中误差为 0.7715、10.7516 和 8.5147 像素,与原始 RPC 结果相比较,表明全连接点校正正在提高相对位置精度的同时,其绝对定位精度并未有明显提高,然而从各区域检查点的最大、最小误差可以明显看出,相比原始 RPC 计算结果,全连接点区域网平差的剩余误差呈现了很强的系统性;而通过加入少量控制点参与区域网平差后,区域 1、2、3 的行方向中误差减小为 0.4806、0.4717、0.6704 像素,列方向的中误差减小为 0.4954、0.4039、0.6323 像素,这表明加入少量控制点的区域网平差可以有效剔除系统性误差,提高影像的绝对定位精度。

表 2 不同地形条件测试区连接点残差分析表

Table 2 Residual of connection points and GCPs in different terrain

区域 Region	连接点 Number of tie points	控制点数 Number of ground control points	残差 Residual error	原始 RPC 平差 Adjustment of original RPC		无控区域网平差 Bundle block adjustment with no control points		有控区域网平差 Bundle block adjustment with control points	
				行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel
				混合区域 Mixed region	14	2	最大值 Max. 最小值 Min. 中误差 RMSE	0.6458 0.0002 0.3130	2.1013 0.8378 1.3681
平原地区 Plain region	27	10	最大值 Max. 最小值 Min. 中误差 RMSE	2.1270 0.0256 1.5080	1.9829 0.8010 1.4139	1.3446 0.0000 0.4674	0.6481 0.0197 0.2849	1.3926 0.0097 0.5041	0.5532 0.0008 0.2231
山区 Mountainous region	28	7	最大值 Max. 最小值 Min. 中误差 RMSE	2.6004 0.5421 1.1869	1.1737 0.0058 0.4195	1.2996 0.0072 0.3365	0.8268 0.0142 0.2889	1.1431 0.0120 0.3605	0.6941 0.0053 0.2738

表 3 不同地形条件测试区检查点误差分析表

Table 3 Residual error analysis for check points in different terrain

地形 Region	检查点数 Number of check points	残差 Residual error	原始 RPC 计算 RPC		无控区域网平差 Bundle block adjustment with no control points		有控区域网平差 Bundle block adjustment with control points	
			行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel
			混合区域 Mixed region	8	最大值 Max. 最小值 Min. 中误差 RMSE	6.1908 2.4500 3.9052	5.8153 3.7708 4.8539	3.2673 2.0792 2.7765
平原地区 Plain region	8	最大值 Max. 最小值 Min. 中误差 RMSE	12.0231 10.7585 11.3084	3.4992 2.2214 2.7709	3.8308 2.5538 3.0772	11.7706 9.7238 10.7516	0.9443 0.2289 0.4717	0.7473 0.0899 0.4039
山区 Mountainous region	7	最大值 Max. 最小值 Min. 中误差 RMSE	7.0592 5.4592 6.5864	3.2451 1.9595 2.4960	2.5387 0.9530 1.7908	8.9895 7.39234 8.5147	1.2949 0.0122 0.6704	1.0222 0.1245 0.6323

3.3 区域网平差后几何精校正结果比较

在农业遥感监测业务中，作物季节变化是获取农作物面积、长势、产量的重要依据，在绝对定位精度限制条件下，不同时期和时相影像间几何相对位置要严格一致，以利于长时序农情信息的提取与分析。在农作物遥感监测业务用，普遍采用 Landsat-8/OLI 传感器 15m 空间分辨率的影响作为基础控制底图。控制影像的位置与绝对几何位置并不一定严格吻合，这就需要在业务化运行前，先将卫星影像通过配准的方式，达到与控制影像一致的几何精度。本文对直接使用原始高分影像、RPC 参数结合 DEM 计算、区域网平差解算出来的影像为待校正影像，控制影像为基准，统一使用小面元微分配准方法进行几何精校正，以比较 3 种方式的精校正精度，如表 4

所示。结果表明，原始高分影像直接配准精度整体很低，其结果中平原地区精度稍高，行、列方向误差分别为 1.5899 和 0.5307 像素，混合地形区为 5.8177、1.1786 像素，山区则非常低，为 9.2345、1.3376 像素；原始 RPC 计算后在配准精度有一定提升，但是仍然未达到亚像素级别，平原地区行、列方向中误差分别为 1.2274、0.6301 像素，混合地形区域为 1.2274、0.6301 像素，山区最低为 2.4339、0.9113 像素；而对于不同的区域，区域网平差后精校正的精度都较高，平原区行、列方向误差分别为 0.6664、0.4696 像素，山区为 1.0646、0.5609 像素，混合地形区域为 0.6857、0.4342 像素，基本上都达到了亚像素级别，满足应用的需求，这也表明，使用区域网平差方式对于卫星遥感影像几何精校正可行的。

表 4 原始 RPC 定位结果与区域网平差后几何精校正结果比较
Table 4 Contrast of calibration results based on RPC and space intersection and block adjustment

地形 Region	残差 Residual error	原始高分影像 Origin GF image		原始 RPC 计算 RPC		区域网平差计算 Bundle block adjustment	
		行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel
		混合区域 Mixed region	最大值 Max.	15.4082	4.1656	2.7473	1.9751
	最小值 Min.	0.0555	0	0.1387	0	0	0.0053
	中误差 RMSE	5.8177	1.1786	1.2274	0.6301	0.6857	0.4342
平原地区 Plain region	最大值 Max.	8.4221	1.5505	3.7116	1.7950	2.2546	1.1121
	最小值 Min.	0	0.0109	0.0555	0.0112	0	0.0167
	中误差 RMSE	1.5899	0.5307	1.1257	0.7537	0.6664	0.4696
山区 Mountainous region	最大值 Max.	28.8877	4.4574	7.2774	2.0626	3.1357	1.4295
	最小值 Min.	0.0346	0	0.3746	0	0	0.0115
	中误差 RMSE	9.2345	1.3376	2.4339	0.9113	1.0646	0.5609

3.4 不同分辨率 DEM 对平差的影响

由于试验中连接点的平面坐标通过原始校正影像直接获取，而高程则是通过 DEM 内插得到，为了验证 DEM 分辨率对最后区域网平差正射校正影像精度的影响，试验选取区域 1（混合地形），并对 30 m 的 DEM 进行重采样得到 300 m 分辨率的 DEM 数据，然后分别用 30 和 300 m 的 DEM 数据作为高程约束进行试验，并分别选取位于山区和位于平原地区的检查点各 10 个，检查不同分辨率 DEM 最后校正的精度，结果如表 5 所示。

表 5 结果显示，选择 30 或 300 m 分辨率的 DEM 进行平差校正的影像定位精度在平原地区较为一致，而山区则低分辨率 DEM 校正精度相对较低。从本文算法的角度分析，主要原因有以下两个方面：1) 不同分辨率 DEM 将造成控制点 DEM 输入值的误差不同，分辨率低 DEM 高程误差大，但是由于高程差对平差的影响因子较小，因此造成的最终定位误差并不大；2) 在制作正射影像过程中，不同分辨率的 DEM 对正射影像校正精度将产生一定影响，这一点在山区尤其明显，高程的差异将造成一定的投影差，而对于平原地区，由于高程基本一致，这类误差就基本不会产生。

表 5 不同分辨率 DEM 高程约束下的平差精度

Table 5 Adjustment accuracy in elevation constraints of different resolution DEM

区域 Region	残差 Residual error	300 m DEM		30 m DEM	
		行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel	行方向 Line/pixel	列方向 Sample/pixel
平原地区 Plain region	最大值 Max.	0.9451	0.6466	0.9383	0.6462
	最小值 Min.	0.0127	0.0116	0.0100	0.0090
	中误差 RMSE	0.5764	0.3925	0.5735	0.3901
山区 Mountainous region	最大值 Max.	2.0385	1.3378	1.3397	1.0486
	最小值 Min.	0.0421	0.0521	0.0289	0.0347
	中误差 RMSE	0.8583	0.6085	0.6803	0.4951

3.5 正射影像效果对比

为了验证本文方法在制作高分几何校正正射影像上的效果，试验中分别利用本文使用的区域网平差方法和直接 RPC 参数校正的结果对所有试验区域的高分影像进行了正射纠正，局部正射影像拼接效果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，使用原始 RPC 参数直接进行正射校正的影像，拼接效果较差，尤其是在山区的偏差更大；而使用本文方法将 2 景影像联合平差，在进行正射纠正后，无论山区还是平原，都可以获得较好的拼接效果，可实现相邻地区正射影像间更好的拼接。

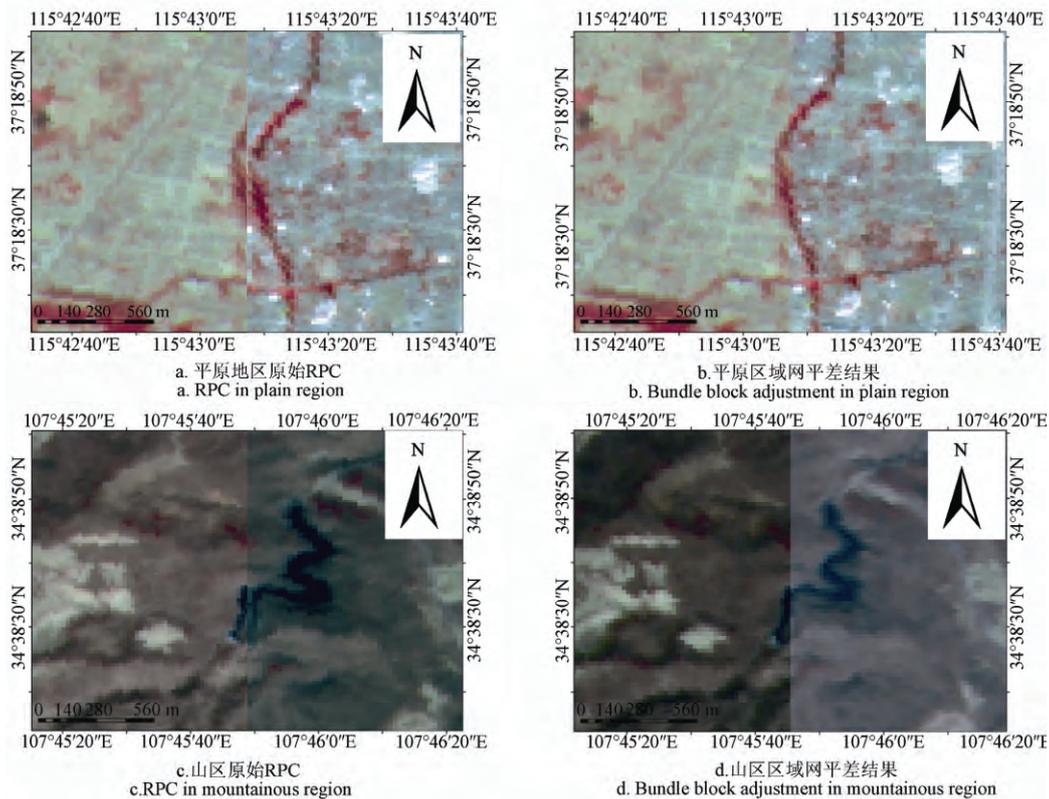


图3 平原地区与山区校正效果对比

Fig.3 Contrast of calibration in plain and mountainous region

4 结论与讨论

本文利用卫星的多轨道以及影像之间的约束关系,以RPC模型为基础,通过建立像面仿射变换关系,对GF-1卫星轨道和姿态等方面对WFV数据的系统误差进行了补偿。试验中选取了混合地形、平原、山区的GF-1/WFV影像作为研究对象,依据各影像之间的交会进行连接点选取,并以数字高程模型DEM作为高程约束,解算各影像仿射变换参数,并依此进行卫星影像的校正和正射纠正。

通过与基准影像配准的方法实现几何精校正,分析了直接原始影像直接配准、使用RPC参数、区域网平差校正的几何精校正结果精度。试验结果表明:本文利用影像间约束关系构建的区域网平差模型能很好的补偿RPC模型的系统误差,且少数地面控制点的加入,也有助于卫星系统参数中系统误差的消除;在不同地形条件下,本文的区域网平差方法相对于直接RPC的前方交会具有更高的定位精度,对于混合地形、平原、山区,行方向的中误差分别为0.3648、0.5041、0.3605像元,列方向的中误差分别为0.4954、0.4039、0.6323像元,整体上能达到亚像素级别;不同分辨率DEM下亦能获取相对较一致的校正精度,其中山区在DEM分辨率越高的情况下,校正精度越高;在与控制影像配准进行精校正后,原始RPC和一般校正方法在起伏山区存在较大误差,而区域网平差在不同地形条件下都能得到较高的定位精度,混合地形、平原、山区3种情况下行方向的中误差分别为0.6857、0.6664、1.0646像元,列方向的均方差分

别为0.4342、0.4696、0.5609像元,这可为高分数据业务化应用提供高精度的数据源;在影像正射纠正时,统一模型的区域网平差有效地消除了单模型间的误差影响,在平原和山区能实现很好的接边,而直接RPC参数或全控制点的平差对于高程差异明显的地区,容易造成正射影像拼接精度不够理想。

试验结果显示本文方法具备一定的可靠性和正确性,在处理农业遥感方面的卫星影像也已取得良好的效果,且影像校正精度可达亚像素级别,这也从侧面反映出该方法对GF-1/WFV数据几何校正的有效性。由于本研究的基础是RPC模型,对于其他携有原始RPC参数且相邻影像具备一定重叠度的卫星,理论上,本研究提出的利用影像间约束关系及以RPC模型为基础的区域网平差亦具有一定的参考意义。

[参考文献]

- [1] 李小文, 王祎婷. 定量遥感尺度效应当议[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1163-1169.
Li Xiaowen, Wang Yiting. Prospects on future developments of quantitative remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1163-1169. (in Chinese with English abstract)
- [2] 黄祎琳. 基于遥感图像大气校正的意义与发展[J]. 科技创新与应用, 2013, 36: 44.
Huang Weilin. Meaning and developing of atmospheric correction of remote sensing images[J]. Technological Innovation and Application, 2013, 36: 44. (in Chinese with English abstract)

- [3] 王利民, 刘佳, 杨福刚, 等. 基于 GF-1 卫星遥感的冬小麦面积早期识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 194—201.
Wang Limin, Liu Jia, Yang Fugang, et al. Early recognition of winter wheat area based on GF-1 satellite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(11): 194—201. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘兆军. “高分一号”遥感相机填补国内高分辨对地观测空白[J]. 航天返回遥感, 2013(2): 1—2.
Liu Zhaojun. GF-1 remote sensing camera fill the blank of domestic high resolution earth observation[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013(2): 1—2. (in Chinese with English abstract)
- [5] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5—9.
Bai Zhaoguang. Technical characteristics of GF-1 satellite[J]. Aerospace China, 2013(8): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [6] 东红. 高分一号卫星投入实际应用[J]. 中国航天, 2013(11): 13.
Dong Hong. GF-1 satellite put into practical application[J]. Aerospace China, 2013(11): 13. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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—35.
Liu Jun, Zhang Yongsheng, Wang Donghong. Precise positioning of high spatial resolution satellite images based on RPC models[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(1): 30—35. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张过, 李德仁, 秦绪文, 等. 基于 RPC 模型的高分辨率 SAR 影像正射纠正[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 943—948.
Zhang Guo, Li Deren, Qin Xuwen, et al. Geometric rectification of high resolution spaceborne SAR image based on RPC model[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 943—948. (in Chinese with English abstract)
- [9] Madani M. Real-Time sensor-independent positioning by rational functions[C]. ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation, Barcelona: 1999.
- [10] Yang X. Accuracy of rational function approximation in photogrammetry[C]. ASPRS Annual Conference, 2000.
- [11] Dowman I, Dolloff J. An evaluation of rational functions for photogrammetric restitution[C]. ISPRS, 2000: 254—266.
- [12] Yong Hu, C Vincent Tao. Updating solutions of the rational function model using additional control information[J]. PE&RS, 2002, 68(7): 715—724.
- [13] Tao C V, Hu Y. 3D reconstruction methods based on the rational function model[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2002, 68(7): 705—714.
- [14] Fraser C S, Hanley H B, Yamakawa T. 3D positioning accuracy of IKONOS imagery[J]. Photogrammetry Record, 2002, 17(99): 465—479.
- [15] Fraser C S, Hanley H B. Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(1): 53—57.
- [16] Baltasvaidis E, Pateraki M, Zhang L. Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo-images and their use for 3D building modeling[C]. Proceedings of Joint ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space, Hannover: 2001.
- [17] 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]. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1989 International: 450—453.
- [18] Zhang Jianqing, Zhang Yong, Chen Ying. Block adjustment based on new strict geometric model of satellite images with high resolution[C]. The 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004.
- [19] Toutin T. Spatiotriangulation with multisensor VIR/SAR images[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2004, 42(10): 2096—2103.
- [20] Grodecki J, Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational functions[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(1): 59—68.
- [21] 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.
Zhang Guo. Rectification for High Resolution Remote Sensing Image under Lack of Ground Control Points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [22] 汪韬阳, 张过, 李德仁, 等. 资源三号测绘卫星影像平面和立体区域网平差比较[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 389—395.
Wang Taoyang, Zhang Guo, Li Deren, et al. Comparison between plane and stereo block adjustment for ZY-3 satellite images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(4): 389—395. (in Chinese with English abstract)
- [23] Tao C Vincent, Yong Hu. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetry processing[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(12): 1347—1357.
- [24] 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—380.
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—380. (in Chinese with English abstract)
- [25] Poli D. General model for airborne and spaceborne linear array sensors[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34(B1): 177—182.
- [26] 程春泉, 邓喀中, 孙玉山, 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.
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. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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.
- 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. (in Chinese with English abstract)
- [28] Jacek G. IKONOS stereo feature extraction RPC approach[C]. *ASPRS 2001 Annual Conference Proceedings*. Saint Louis: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001.
- [29] 张永生, 刘军, 巩丹超. 高分辨率遥感卫星应用: 成像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 张剑清, 潘励. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [31] 黄桂平. 消元法在光束法平差中的应用[C]//现代工程测量技术发展与应用研讨交流会议论文集. 宁波: 中国测绘学会, 2005, 5(1): 236—240.
- Huang Guiping. The Application of Elimination in Bundle Adjustment[C]// *The Seminar Proceedings of Modern Engineering Measurement Technology Development and Application*. Ningbo: Chinese Society of Geodesy Photogrammetry and Cartography, 2005, 5(1): 236—240. (in Chinese with English abstract)

Geometric correction of GF-1 satellite images based on block adjustment of rational polynomial model

Liu Jia, Wang Limin, Yang Lingbo, Shao Jie, Teng Fei, Yang Fugang, Fu Changhong

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: GF-1 satellite was launched successfully in April 2013, and its wide field view (WV) images have been widely applied in agricultural remote sensing monitoring practice in China. To obtain high precision of image positioning, the paper proposes a correction method for acquiring higher geometric positioning precision based on block adjustment method to correct rational polynomial coefficients (RPC) of high resolution WV. A business process including adjustment model construction, adjustment parameter calculation and geometric registration based on reference images has been formed. Firstly, affine transformation relation among images, namely, a block adjustment model, has been built based on the relationship between the RPC parameter image points and ground points; secondly, initial value of connection points is identified, and combined with a few ground control points, the affine transformation coefficients of various images are calculated so as to conduct the image block adjustment. Meanwhile, orthoimage is produced based on adjustment results and DEM (digital elevation model), and the correction result with sub-pixel accuracy is achieved. The calculation of adjustment parameters is achieved through 2 steps. The first step is to identify the initial value of the connection point. By utilizing one degree term of RPC model, the plane coordinates of the connection points are iterated and updated, till they converge to a stable state. The elevation values are extracted from DEM; the second is to identify affine transformation parameters. The updated connection points with a few ground control points are entered into block adjustment model to establish error equation. The elevation values acquired from DEM are taken as a constraint condition, and the relevance between plane coordinates and elevations is eliminated to ensure that the block adjustment model works. Meanwhile, the unknown variable is calculated by using the point-by-point elimination method. The block adjustment results under 3 different conditions of mixed terrain, plain area and mountainous area show that, the adjustment results of whole connection points have a relative higher positioning precision, with the errors of 0.3046, 0.4674 and 0.3365 pixels respectively at the row direction, and with the errors of 0.3677, 0.2849 and 0.2889 pixels respectively at the column direction; block adjustments with a few control points have very high absolute positioning precision, with the errors of 0.3648, 0.5041 and 0.3605 pixels respectively at the row direction, and with the errors of 0.4954, 0.4039 and 0.6323 pixels respectively at the column direction. Finally, under the support of base control map of agriculture application, the geometric registration of raw images, RPC correction images, and images after block adjustment is conducted, and the geometric correction precision under different input image conditions is analyzed. Only images after block adjustment have reached correction precision of sub-pixel. The errors at the row direction under 3 conditions of mixed terrain, plain area and mountainous area are 0.6857, 0.6664 and 1.0646 pixels respectively, and those at the column direction are 0.4342, 0.4696 and 0.5609 pixels respectively, indicating that the research method proposed by this paper can achieve accurate geometric correction under the condition of a few control points, though there is no significant improvement compared with the precision before geometric correction. After comparing the DEM with different resolutions in the model, we find that the precision of DEM affects the correction result. Applying higher resolution in mountainous areas can achieve better positioning precision. The above results show that this method can effectively improve the geometric correction precision of WV images of GF-1 satellite, and it has been preliminarily applied in the operation of agriculture remote sensing monitoring.

Key words: satellites; remote sensing; image processing; GF-1 satellite; rational function model (RFM); block adjustment; point-by-point elimination method