

# 多源航天光学影像的定位模型

程春泉, 张 力, 燕 琴, 李 玲

(中国测绘科学研究院, 北京 100830)

**摘要:** 针对星历和有理多项式系数 (Rational Polynomial Coefficients, RPC) 两种主要类型辅助数据的多源光学卫星影像, 以地固地心直角坐标系 (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF) 作为统一的物方坐标系, 在其中构建了有理函数和共线方程, 对各类常见影像的辅助数据给出了相应的转换方法, 进而以联合平差的方式建立了一种光学卫星影像定位的混合/集成模型, 并对 4 种传感器影像进行了试验验证. 建立的模型考虑了影像定向参数和传感器定标参数的差异, 对不同航天光学影像的独立或联合定位有较广的适应性.

**关键词:** 影像定位; 混合/集成模型; 卫星光学影像; 严密传感器模型; 有理多项式系数模型

中图分类号: P237

文献标志码: A

## An Integrated Geometric Model for Multi-source Spaceborne Optical Imagery

CHENG Chunquan, ZHANG Li, YAN Qin, LI Ling

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

**Abstract:** Rational Polynomial Coefficients (RPC) parameters and ephemeris parameters are two main types of orientation parameters which provide as auxiliary data for satellite images. This paper presents a conversion method for the orientation parameters so the data can be easily used in Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) coordinate system. We rebuild RPC and collinearity equation in ECEF and integrate the two geometric imaging equations to one positioning model by combining adjustment for multi-source spaceborne optical imagery. Several tests for 4 sensor images are given, and the analyses for the model and its application are provided. The proposed model can be widely available for different cases where parameters of imagery orientation or sensor geometric calibration are different.

**Key words:** imagery positioning; integrated geometric model; spaceborne optical imagery; rigorous sensor model;

Rational Polynomial Coefficients (RPC) model

目前, 遥感影像的种类日益增多, 构建适合多源影像定位的模型, 对扩大多源影像联合定位的应用范围、实现多源影像基于物方约束的匹配、提高多源影像配准和融合精度等均有重要的意义. 近年来出现了多种形式和不同应用范围的混合/集成定位模型, 如按传感器类型分有适合异源光学影像、异源 SAR (Synthetic Aperture Radar) 影像以及光学与 SAR 影像的模型<sup>[1]</sup>; 按平台分有适合异源航空遥感影像、异源航天遥感影像以及航空航天遥感影像模型<sup>[2]</sup>; 按定向参数分有适合 POS (Position and Orientation System) 数据影像、RPC (Rational Polynomial Coefficients) 参数影像模型以及 POS 和 RPC 参数影像模型<sup>[3]</sup>等. 尽管多源影像的定位模型受到重视, 但多源遥感影像定位模型的广泛应用, 仍然存在一些基本问题有待深入探讨. 如如何选择—一个便于不同影像和辅助数据统一处理的物方坐标系, 如何在这个统一的物方坐标系中构建不同类型影像的几何构像模型, 实现初始观测数据及其精度信息的转换, 以及如何实现适合不同质量数据的联合处理等.

星历数据或 RPC 参数是高分辨率光学卫星影像的主要辅助数据类型, 适合两类数据的模型能显著扩大多源光学卫星影像的范围. 但 RPC 模型通常以大地坐标系 (经纬高) 作为物方坐标系, 共线方程通常以三维笛卡尔坐标系作为物方坐标系, 物方坐标系的差异使得两种构像模型不便进行数据联合处理. 由于 ECEF 是全球笛卡尔坐标系, 该坐标系下共线方程模型不受地球曲率的影响和影像覆盖范围的限制, RPC 模型克服了南北极点存在应用盲区的缺

点,故适宜作为多源影像联合定位处理的统一框架。

## 1 地固地心直角坐标系(ECEF)中的严密定位模型及初始观测值的转换

虽然绝大多数光学影像的严密定位是基于共线方程进行的,但针对不同平台、传感器及辅助数据内容通常仍需针对性处理来反应影像的构像几何。对地定向的三轴稳定遥感卫星姿态参考基准为惯性地心坐标系(Earth-Centered Inertial reference frame, ECI)中的传感器状态矢量确定的轨道坐标系<sup>[4]</sup>,当 ECI 中卫星的位置和速度  $P_{SI}, V_{SI}$  用向量  $P, V$  表示时,式(1)中的  $X_O, Y_O, Z_O$  即代表了轨道坐标系的三轴在 ECI 中的向量  $X_{OI}, Y_{OI}, Z_{OI}$ 。

$$Z_O = P(t)/\|P(t)\|, Y_O = (Z_O \times V)/\|(Z_O \times V)\|, X_O = Y_O \times Z_O \quad (1)$$

因此,航天光学遥感影像的严密定位模型可表示为

$$P_F - P_{SF} = \lambda R_F^T R_{OI}^T R_b^{OI} u \quad (2)$$

式中:  $P_F = [X, Y, Z]^T$ ;  $P_{SF} = [X_s, Y_s, Z_s]^T$  分别为 ECEF 中的地物和传感器位置矢量;  $u = [x, y, -f]^T$  为传感器坐标系中的像元视线向量,该向量也可根据像元视角  $\Psi_x, \Psi_y$  按式  $x = \tan(\Psi_x)$ ,  $y = \tan(\Psi_y)$ ,  $f = 1.0$  计算;  $\lambda$  为比例系数;  $R_F^T, R_{OI}^T, R_b^{OI}$  分别为 ECI 到 ECEF、轨道坐标系到 ECI、本体坐标系到轨道坐标系的转换矩阵;  $R_b^{OI} = R(\omega, \varphi, \kappa) = R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)$  为姿态角  $(\omega, \varphi, \kappa)$  的矩阵;实际应用中常用协议坐标系 J2000.0 和 WGS-84 分别代表 ECI 和 ECEF,惯性地心坐标系到地固地心坐标系的转换矩阵  $R_F^T$  可通过岁差矩阵  $R_P$ 、章动矩阵  $R_N$ 、影像摄影时刻地球自转引起的格林尼治恒星时角矩阵  $R_S$  以及地极极移矩阵  $R_W$  计算,即

$$R_F^T = R_W R_S R_N R_P$$

式(2)被广泛应用到国内外卫星影像的严密定位中,除涉及到 ECEF 中传感器状态矢量和轨道坐标系中的姿态参数外,还涉及到 ECI 中传感器状态矢量和地球自身运动相关的系列矩阵。随着 GPS 定轨技术的发展,卫星影像的辅助星历数据大都提供了 ECEF(WGS-84)中的卫星状态矢量数据,以及轨道坐标系中的姿态数据,仅以这些参数实现影像的外定向,无疑能方便数据处理。

当 ECEF 中卫星的状态矢量  $P_{SF}, V_{SF}$  用  $P, V$  表示时,公式(1)中建立的矢量  $X_O, Y_O, Z_O$  称为地固轨道坐标系三轴,用  $X_{OF}, Y_{OF}, Z_{OF}$  表示。如果定位模型

中将地固轨道坐标系作为姿态的参考基准,且知道卫星本体坐标系到地固轨道坐标系的转换矩阵  $R_b^{OF}$  时,严密定位模型可表达为

$$P_F - P_{SF} = \lambda R_{OF}^F R_b^{OF} u \quad (3)$$

式中:  $R_{OF}^F$  为地固轨道坐标系到 ECEF 的转换,可由 ECEF 中传感器位置和速度矢量确定。

因此,模型(3)的关键是求  $R_b^{OF}$ 。ECEF 和 ECI 有相同的坐标原点,地球自转、岁差、章动、极移导致的 ECI 与 ECEF 间的转角不影响以轨道坐标系和地固轨道坐标系作为参考的姿态角相等条件,但地球自身运动导致 ECEF 中卫星相对速度的改变会引起地固轨道坐标系基准的变化,进而影响姿态角。岁差、章动、极移的变化率极小,不影响 ECEF 中卫星的相对速度,而地球自转角速度引起的 ECEF 中卫星速度向量的改变必须考虑<sup>[5]</sup>。

假设在摄影期间内地球没有自转,则地固轨道坐标系中的姿态与轨道坐标系中的姿态相同,设为  $(\omega, \varphi, \kappa)$ ,此时 ECEF 中卫星的速度方向设为  $V'_{SF}$ 。当考虑地球自转时,ECEF 中卫星的实际速度  $V_{SF}$  为其本身的速度  $V'_{SF}$  和地球自转引起的卫星相对速度  $V_{SE}$  的合成。相应地,地固轨道坐标系的  $X$  轴方向也从  $X'_{OF}$  偏转到  $X_{OF}, Z_{OF}$  轴(即  $OP_s$ , 图 1)仍不变。偏流角为地球自转引起航迹线偏离航向线的角度,设  $X'_{OF}$  与  $X_{OF}$  矢量间的偏流角为  $\beta$ ,则  $X'_{OF}$  与  $X_{OF}$  可通过轴  $OP_s$  旋转  $\beta$  角实现统一,则轨道坐标系和地固轨道坐标系下的姿态矩阵能通过下式转换:

$$R_b^{OF} = R_Z(-\beta)R_b^{OI} = R_Z(-\beta)R(\omega, \varphi, \kappa) \quad (4)$$

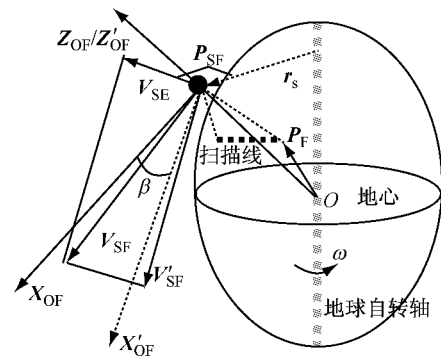


图 1 偏流角成因几何

Fig.1 Drift angle geometry

偏流角虽可以通过轨道参数按公式计算,但较复杂<sup>[6]</sup>。本文根据卫星速度矢量合成的平行四边形法则,利用 ECEF 卫星位置向量  $P_{SF} = [X_s, Y_s, Z_s]^T$ 、速度向量  $V_{SF} = [V_{X_s}, V_{Y_s}, V_{Z_s}]^T$  来推导偏流角  $\beta$  的计算公式。设地球自转角速度矢量为  $\omega_e = [0, 0, 7.292\ 115 \times 10^{-5}]^T$ , 令向量  $r_s = [X_s, Y_s, 0]^T$ , 有

$$\mathbf{V}_{SE} = \mathbf{r}_s \times \boldsymbol{\omega}_e, \quad \mathbf{V}'_{SF} = \mathbf{V}_{SF} - \mathbf{V}_{SE}$$

将公式(1)中的  $\mathbf{P}, \mathbf{V}$  分别取值 ECEF 中的  $\mathbf{P}_{SF}$  和  $\mathbf{V}'_{SF}$ , 得到的  $\mathbf{X}_O$  称为  $\mathbf{X}'_{OF}$ , 则  $\mathbf{X}_{OF}$  和  $\mathbf{X}'_{OF}$  均垂直于  $\mathbf{OP}_{SF}$ ,  $\beta$  可根据下式计算:

$$\beta = \arccos[\mathbf{X}_{OF} \mathbf{X}'_{OF} / (|\mathbf{X}_{OF}| |\mathbf{X}'_{OF}|)] \quad (5)$$

偏流角对成像的影响与姿态偏航角  $\kappa$  类似, 会引起同轨多线阵影像重叠度的降低. 部分多线阵传感器如 SPOT5 卫星<sup>[7]</sup>, 会增加一个偏航角对偏流角进行补偿, 此时卫星本体坐标系到轨道坐标系的转换矩阵变为  $\mathbf{R}_b^O = \mathbf{R}_Z(\beta) \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$ , 故本体坐标系到地固轨道坐标系的转换矩阵  $\mathbf{R}_b^{OF}$  应为

$$\mathbf{R}_b^{OF} = \mathbf{R}_Z(-\beta) [\mathbf{R}_Z(\beta) \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)] = \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) \quad (6)$$

不同的影像姿态角形式有所差异, 但只要根据轨道坐标系中的姿态和上述几何关系, 可方便转换为地固轨道坐标系中的姿态值, 进而使用模型(3)进行定位, 使定位模型避开惯性坐标系与地固坐标系的转换.

## 2 地心直角坐标系 RPC 模型及参数转换

ECEF 中的 RPC 形式与大地坐标系 RPC 相同, 但物方坐标为 ECEF 中的值.

$$R_n = \frac{P_1(Y_n, X_n, Z_n)}{P_2(Y_n, X_n, Z_n)}, \quad C_n = \frac{P_3(Y_n, X_n, Z_n)}{P_4(Y_n, X_n, Z_n)} \quad (7)$$

式中:  $R_n, C_n$  为像点的归一化影像坐标;  $X_n, Y_n, Z_n$  为地面点的归一化 ECEF 地物坐标;  $P_m (m=1, 2, 3, 4)$  为三元三次多项式, 有

$$P_m(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{l_1} \sum_{j=0}^{l_2} \sum_{k=0}^{l_3} a_{m-ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k$$

其中  $0 \leq l_1 \leq 3, 0 \leq l_2 \leq 3, 0 \leq l_3 \leq 3$ ,  $a_{m-ijk}$  为有理多项式系数.

在知道大地坐标系 RPC 参数的情况下, ECEF 坐标系 RPC 参数的转换, 仍采用与地形无关的方法, 通过虚拟控制点来计算. 虚拟控制点的产生采用在影像层和高程层划分格网, 通过计算格网点对应的 ECEF 物方坐标的方法产生足量的虚拟控制点和检查点. 虚拟点利用大地坐标系 RPC 参数, 根据格网点的影像坐标  $(R, C)$  和大地高  $H$ , 可计算其对应的归一化坐标  $(R_n, C_n, H_n)$ . 利用大地坐标系 RPC 模型即可求得归一化的经纬坐标  $(L_n, B_n)$ , 根据  $(L_n, B_n, H_n)$  可获得大地坐标系中的经纬度和高程值  $(L,$

$B, H)$ , 进而将其转换到 ECEF 中, 获得像点坐标  $(R, C)$  对应的 ECEF 坐标  $(X, Y, Z)$ . 利用上述方法获取的这些足量虚拟控制点, 采用岭参数改进的谱修正方法<sup>[8]</sup>, 可稳健地拟合出 ECEF 的 RPC 参数.

## 3 共线方程与 RPC 模型结合的多源光学卫星影像定位

几乎所有的联合平差模型都采用间接平差法<sup>[9]</sup>. 构建像点坐标参数为因变量的显函数形式构像方程, 不仅方便建立像点量测(匹配)值的误差方程, 还可方便多源影像观测值的定权以及多源影像联合定位实现.

### 3.1 像点观测值的误差方程及定权

对于严密模型, 除传感器的内定标参数(提供了像元的像空间坐标)外, 传感器镜头安装偏置角或传感器动态指向角  $(e\omega, e\varphi, e\kappa)$  是光学卫星传感器另一个重要的几何定标参数, 考虑偏置参数的模型还可以方便建立同平台不同传感器间的相对几何关系. 相应的传感器坐标系到 ECEF 的转换矩阵  $\mathbf{R}_c^F$  可通过下式计算:

$$\mathbf{R}_c^F = \mathbf{R}_{OF}^F \mathbf{R}_b^{OF} \mathbf{R}_c^b(e\omega, e\varphi, e\kappa) \quad (8)$$

设  $m_{ij} (i, j=0, 1, 2)$  为  $\mathbf{R}_c^F$  中的元素值, 有

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{m_{11}(X - X_s) + m_{21}(Y - Y_s) + m_{31}(Z - Z_s)}{m_{13}(X - X_s) + m_{23}(Y - Y_s) + m_{33}(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{m_{12}(X - X_s) + m_{22}(Y - Y_s) + m_{32}(Z - Z_s)}{m_{13}(X - X_s) + m_{23}(Y - Y_s) + m_{33}(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (9)$$

式(8), (9)为 ECEF 中航天光学卫星影像的共线方程, 包含了轨姿参数及其严密转换. 传感器位置  $(X_s, Y_s, Z_s)$  和轨道坐标系下传感器的姿态  $(\omega, \varphi, \kappa)$  误差采用低阶多项式进行拟合时, 有基于原始轨姿的精细化模型

$$O_i = O_{i0} + b_{i0} + b_{i1}t + \dots \quad (10)$$

式中:  $O_i$  和  $O_{i0} (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$  分别代表精细化后的和原始的传感器位置姿态  $(X_s, Y_s, Z_s, \omega, \varphi, \kappa)$  参数;  $b_{i0}, b_{i1}$  为一般多项式系数.

对于平台稳定性好的测绘卫星影像, 精细化模型采用线性多项式即可; 对于条带较长的影像或平台稳定性较差的卫星影像, 则需采用 2 阶甚至更高的多项式, 本文试验取 1 阶.

将式(10)代入式(9)中, 以轨姿精细化模型参数  $b_{ij} (i=1, 2, 3, 4, 5, 6; j=0, 1, \dots)$  及地面点坐标增量

( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ) 作为待定未知数, 并将式(8)线性化, 得到以下基于共线方程的航天光学影像像点坐标误差方程:

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{F}_1(b_{ij}, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z) - \mathbf{L}_1 \quad \text{权 } \mathbf{P}_1 \quad (11)$$

对于 RPC 模型, 公式(7)不难转换成像点坐标 ( $R, C$ ) 为因变量的地面点坐标 ( $X, Y, Z$ ) 的函数关系式, 即

$$R = F_{\text{RPC}_R}(X, Y, Z), \quad C = F_{\text{RPC}_C}(X, Y, Z) \quad (12)$$

由于基于共线方程的像点坐标误差以长度为单位, 而基于 RPC 模型的误差以像素为单位, 且两者数值上也存在巨大差异, 为了方便不同影像像点坐标的定权, 将方程(12)的两边同时乘以一个虚拟的像元大小  $u_0$  (如取值为每像素  $6.5 \times 10^{-6}$  m), 等式仍成立, 即

$$\begin{cases} x_R = Ru_0 = u_0 F_{\text{RPC}_R}(X, Y, Z) \\ y_R = Cu_0 = u_0 F_{\text{RPC}_C}(X, Y, Z) \end{cases} \quad (13)$$

基于 RPC 成像模型的影像定向通常在像方空间进行, 设  $m_j, n_j (j=0, 1, 2)$  为像方定向二维仿射变换系数, 则有像点坐标观测值的误差方程为

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{F}_R(m_j, n_j, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z) - \mathbf{L}_R \quad \text{权 } \mathbf{P}_R \quad (14)$$

式(13)将影像坐标系坐标转换为等效传感器像平面坐标系坐标, 同样, 将影像坐标系中像点量测精度乘以  $u_0$  后, 可转换成等效传感器像平面坐标系中的值, 使得式(14)中的权与式(11)中的权的计算方式一致, 直接根据(等效)传感器像方坐标系中像点量测精度计算, 而带权最小二乘结果与  $u_0$  取值无关。

### 3.2 多源光学卫星影像的联合平差与定位

对于 RPC 和共线方程支持下的航天光学影像, 可分别根据像点坐标列出误差方程式(11)或(14). 令像方定向参数向量  $\mathbf{i} = (m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2)$ 、传感器位置和姿态精化模型参数向量  $\mathbf{t} = (b_{ij}) (i=1, 2, 3, 4, 5, 6; j=0, 1)$ 、地面点坐标增量向量  $\mathbf{g} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  为未知数, 构建以下误差方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_R = \mathbf{F}_R \mathbf{i} + \mathbf{F}_{Rg} \mathbf{g} - \mathbf{L}_R & \mathbf{P}_R \\ \mathbf{V}_1 = \mathbf{F}_1 \mathbf{t} + \mathbf{F}_{1g} \mathbf{g} - \mathbf{L}_1 & \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{V}_i = \mathbf{E}_i \mathbf{i} - \mathbf{L}_i & \mathbf{P}_i \\ \mathbf{V}_t = \mathbf{E}_t \mathbf{t} - \mathbf{L}_t & \mathbf{P}_t \\ \mathbf{V}_g = \mathbf{E}_g \mathbf{g} - \mathbf{L}_g & \mathbf{P}_g \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{V}_R, \mathbf{V}_1$  分别为 ECEF 中 RPC 和共线方程的像点坐标观测值误差方程;  $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_t$  分别为两种影像定向参数精化模型参数虚拟观测值误差方程;  $\mathbf{V}_g$  为地面点坐标观测值误差方程;  $\mathbf{L}$  为相应观测值误差方程

的常数项;  $\mathbf{F}, \mathbf{E}$  为相应误差方差系数矩阵;  $\mathbf{P}$  为相应观测值或虚拟观测值的权。

以上是共线方程与 RPC 结合的多源航天光学影像联合平差误差方程组, 根据影像定向参数的类型构建相应的误差方程, 可以实现多源光学卫星影像的定位定向处理。

(1) 带有星历数据的影像定位时, 选取方程组中的  $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_t, \mathbf{V}_g$  组合, 可实现严密定位。

(2) 带有 RPC 数据的影像定位时, 选取方程组中的  $\mathbf{V}_R$  和定向参数  $\mathbf{i}$ , 可实现基于 RPC 模型精确定位。

(3) 选用  $\mathbf{V}_R, \mathbf{V}_i, \mathbf{V}_g$  组合并以  $\mathbf{i}$  和  $\mathbf{g}$  作为未知数, 则为将定向参数和地面点坐标作为带权观测值的 RPC 模型。

(4) 公式(15)为共线方程和 RPC 方程结合的混合/集成模型, 可实现多源航天光学影像的定向与定位。

(5) 立体定位时, 则以原始定向参数或平差精化后的定向参数为基础, 选用  $\mathbf{V}_R, \mathbf{V}_1$  且仅取  $\mathbf{g}$  为未知数时, 为基于共线方程与 RPC 的前方交会(立体定位)模型。

(6) 影像单片对地定位时, 以原始定向参数或平差精化后的定向参数为基础, 选用  $\mathbf{V}_R$  或  $\mathbf{V}_1$  联合带有高程参数  $H$  的地球椭球模型对应的误差方程, 且仅取  $\mathbf{g}$  为未知数, 可实现单景影像目标对地定位。

## 4 试验

本文对所建立的模型分别进行单片独立定位和多源影像联合定位试验。由于 ECEF 中坐标参数的  $Z$  不代表高程, 故将三维加密坐标经过坐标转换和投影变换分解成平面值和高程值用于误差和精度统计。

### 4.1 试验数据

试验数据包括 4 种影像, 分别为 SPOT5-HRG 影像、SPOT5-HRS 前视影像、ZY3 三线阵下视高分影像和 ALOS-PRISM 前视影像。各影像的相关情况如表 1 和图 2 所示, 其中 RPC 参数为大地坐标系中的值, HRG 影像的 RPC 参数由作者预先根据其星历计算得到, 控制检查点均为实地测量获得。

### 4.2 ECEF 中的 RPC 参数转换精度

在联合定位试验前, 对 SPOT5-HRG 和 ZY3 影像 ECEF 中 RPC 参数分别进行了计算。虚拟格网像方大小为 200 像素  $\times$  200 像素, 高程格网在 0~5 000

m 范围内划分 10 层,对应的格网点计算得到的虚拟点作为控制点;像方格网中间的像点、两高程层之间的高程计算得到的虚拟点作为检查点.得到的控制点和检查点精度、最大误差统计于表 2 中.

表 1 试验影像基本信息

Tab.1 Information on image data sets

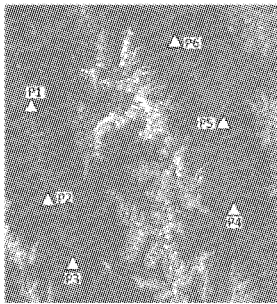
| 影像传感器      | 参数类型 | 大小(宽×高)/<br>(像素×像素) | 分辨率(沿轨×<br>垂轨)/(m×m) | 控制检查点数目 | 地理位置(经纬度)/(°) | 试验区高程范围/m |
|------------|------|---------------------|----------------------|---------|---------------|-----------|
| SPOT5-HRG  | RPC  | 12 000×11 000       | 2.5×2.5              | 6       | 98.6, 28.3    | 1600~4800 |
| SPOT5-HRS  | 星历   | 9 866×11 370        | 5.0×10.0             | 6       |               |           |
| ZY3        | RPC  | 24 515×24 575       | 2.1×2.1              | 20      | 116.1, 40.1   | 30~1 000  |
| ALOS-PRISM | 星历   | 14 496×16 000       | 2.5×2.5              | 14      |               |           |

表 2 ZY-3 和 SPOT5-HRG 影像 ECEF 中 RPC 参数转换精度

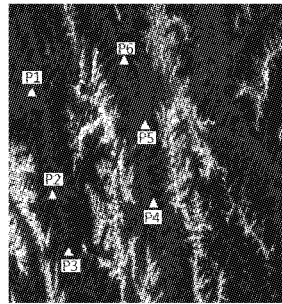
Tab.2 RPC translation accuracy of ZY-3 and SPOT5-HRG in ECEF

10<sup>-4</sup>像素

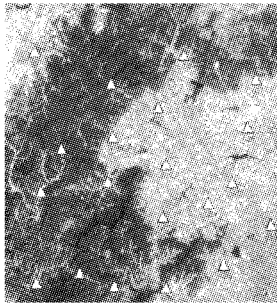
| 影像  | ZY3 下视影像 |      |      |       |      |       | SPOT5-HRG 影像 |      |      |      |      |      |
|-----|----------|------|------|-------|------|-------|--------------|------|------|------|------|------|
|     | 行向       |      | 列向   |       | 平面   |       | 行向           |      | 列向   |      | 平面   |      |
|     | 中误差      | 最大差  | 中误差  | 最大差   | 中误差  | 最大差   | 中误差          | 最大差  | 中误差  | 最大差  | 中误差  | 最大差  |
| 控制点 | 1.11     | 4.77 | 4.37 | 14.47 | 4.51 | 14.66 | 0.79         | 1.37 | 0.56 | 1.07 | 0.97 | 1.49 |
| 检查点 | 1.25     | 4.83 | 4.43 | 14.51 | 4.60 | 14.87 | 0.82         | 1.45 | 0.60 | 1.18 | 1.02 | 1.52 |



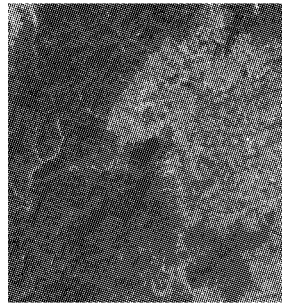
a SPOT5-HRG 影像及已知点分布



b SPOT5-HRS 前视影像



c ZY3 影像及已知点分布



d ALOS-PRISM 影像

图 2 试验区不同传感器影像和地面已知点分布

Fig.2 Images of different sensors and distribution of ground points of the test area

RPC 模型的定位处理方式与坐标系无关,其定位处理与大地坐标系下 RPC 模型一致,本文不再做单独验证.

#### 4.3 ECEF 中基于星历参数的影像定位

试验采用 SPOT5-HRS 影像和 ALOS-PRISM 影像. ALOS-PRISM 影像提供了 ECI 中的四元数姿态以及 ECI 和 ECEF 中的星历数据,因此该影像可以根据转换矩阵  $R_b^0 = R_b^i R_i^0$  计算轨道坐标系中的姿态,SPOT5 卫星提供了轨道坐标系中的姿态(不

包括偏流角补偿值)和 WGS-84 中的星历. 试验分别测试稀少或无控制点条件下影像定位精度,有控制点时 ALOS-PRISM 影像分别选取 1 个(影像中心位置点)、4 个(四角点)、5 个(四角加中心点)、9 个控制点进行定位试验. SPOT5-HRS 影像分别选取 1 个, 2 个, 4 个, 6 个作为控制点. 由于 SPOT5-HRS 影像实测点数目较少,1 个控制点时依次选取所有点作为控制点,其余作为检查点;2 个控制点时依次选用 (P1,P3),(P1,P4),(P2,P5),(P3,P6);4 个点时依次选取 (P1,P3,P4,P6)、(P1,P2,P4,P6)、(P2,P3,P5,P6);6 个点时采用舍一交叉验证法<sup>[10]</sup>. 由于单片只能进行平面定位,3.2 节(6)中的高程  $H$  采用已知点的高程值. 表 3 和表 4 为 SPOT5-HRS 和 ALOS-PRISM 前视影像定位定向精度统计.

表 3 SPOT5-HRS 影像定位定向检查点精度统计

Tab.3 Positioning and orientation accuracy statistics for SPOT5-HRS image

| 控制点个数     | 0     | 1     | 2     | 4     | 6     |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 行向定向误差/像素 | 5.21  | 1.18  | 0.90  | 0.77  | 0.73  |
| 列向定向误差/像素 | 1.37  | 1.12  | 0.86  | 0.75  | 0.72  |
| 平面定位精度/m  | 29.43 | 12.63 | 9.70  | 8.42  | 8.07  |
| 平面最大误差/m  | 40.59 | 21.50 | 16.83 | 15.59 | 15.51 |

表 4 ALOS-PRISM 影像定位定向检查点精度统计

Tab.4 Positioning and orientation accuracy statistics for ALOS-PRISM imagery

| 控制点个数     | 0      | 1    | 4    | 5    | 9    |
|-----------|--------|------|------|------|------|
| 行向定向精度/像素 | 12.39  | 2.01 | 0.84 | 0.78 | 0.72 |
| 列向定向精度/像素 | 46.71  | 1.23 | 0.76 | 0.75 | 0.66 |
| 平面定位精度/m  | 120.85 | 5.92 | 2.83 | 2.71 | 2.43 |
| 平面最大误差/m  | 127.04 | 8.98 | 5.07 | 4.88 | 4.69 |

#### 4.4 不同类型辅助参数影像联合定位

分别采用 SPOT5-HRS 前视影像和 SPOT5-HRG 影像(6 个公共地面已知点)、ALOS-PRISM 前视影像和 ZY3 下视影像(14 个公共地面已知点)进行稀少或无控制点立体定位试验。有控制点时布设方案同 4.3 节,无控制点时分别进行了 3 种情况的定位试验,包括①基于原始定向参数同名点的前方交会试验,按 3.2 节(5)中的方法进行;②有连接点条件下将定向 RPC 精化模型参数  $i$  作为未知数和带权虚拟观测值进行定位试验,按 3.2 节(4)中的方法进行;③有连接点条件下将  $i$  作为未知数但不作为虚拟观测值的试验,即式(15)中去除误差方程  $V_i$ 。各种影像像点量测精度均按 1 像素归算至(等效)传感器像方坐标系,像方定向参数、轨姿精化模型参数常数项虚拟观测值精度与无控制点时该类影像定向、轨姿先验精度一致,一次项虚拟观测值精度则与影像的定向精度、轨姿精度沿影像坐标或摄影时间的线性变化率一致。试验结果为无控制点③试验 RPC 沿轨道方向定向参数求解发散,其余定位试验结果分别统计于表 5、6 中。

表 5 SPOT5-HRG 与 SPOT5-HRS 影像联合定位精度统计

Tab.5 Accuracy of combined positioning with SPOT5-HRG and SPOT5-HRS

| 控制点个数    | 0(无连接点) | 0(有连接点) | 1     | 2    | 4    | 6    |
|----------|---------|---------|-------|------|------|------|
| 平面精度/m   | 26.70   | 25.63   | 5.65  | 4.13 | 3.69 | 3.42 |
| 高程精度/m   | 8.61    | 7.91    | 5.77  | 4.94 | 4.61 | 4.45 |
| 平面最大误差/m | 31.81   | 30.49   | 9.26  | 7.16 | 6.88 | 6.91 |
| 高程最大误差/m | 15.05   | 14.18   | 11.11 | 9.34 | 8.08 | 8.03 |

表 6 ZY3 与 ALOS-PRISM 影像联合定位精度统计

Tab.6 Statistic accuracy of combined positioning with ZY-3 and ALOS-PRISM

| 控制点个数    | 0(无连接点) | 0(有连接点) | 1     | 4    | 5    | 9    |
|----------|---------|---------|-------|------|------|------|
| 平面精度/m   | 55.5    | 23.71   | 6.06  | 2.75 | 2.69 | 2.48 |
| 高程精度/m   | 85.7    | 61.23   | 10.35 | 3.84 | 3.77 | 3.56 |
| 平面最大误差/m | 63.46   | 28.83   | 10.17 | 4.76 | 4.69 | 4.35 |
| 高程最大误差/m | 97.19   | 69.67   | 16.08 | 7.95 | 7.78 | 7.49 |

## 5 分析与结论

(1)从表 2 可以看出,ECEF 中 ZY3 和 SPOT5-HRG 影像 RPC 的转换精度在  $10^{-4}$  像素量级,精度损失可以忽略,表明 RPC 模型的定位可以在 ECEF 中进行,其中 ZY3 影像精度低于 SPOT5-HRG 影

像,经分析与两种影像的幅宽差异有关。

(2)从表 3、4 可以看出,使用星历数据定位时,本文模型不仅实现了无控制点条件下基于像元视线向量的影像对地定位功能,也能方便在有控制点时卫星影像的精确定向,方便光学卫星遥感影像定向与定位的一体化处理。

(3)SPOT5-HRS 和 ALOS-PRISM 均为多镜头线阵传感器,有不同的安置偏置角,4.3 节试验表明本文 ECEF 中构建的共线方程能够适用于不同航天光学传感器参数影像的严密几何处理。

(4)4.4 节多源影像联合定位试验③表明,无控制点条件下仅通过连接点进行 RPC 参数的精化很不稳定,通过将 RPC 定向参数作为虚拟观测值,模型在连接点的支持下仍能提高 RPC 参数影像和星历参数影像的相对定向与联合定位精度。

(5)4.4 节试验表明,稀少或无控制点条件下,SPOT5-HRS 与 SPOT5-HRG 组合定位精度高于 ZY3 和 ALOS-PRISM 组合定位精度,原因在于 SPOT5-HRS 与 SPOT5-HRG 为同平台同轨影像,两者之间有更高的相对定向精度;控制点增多时,ZY3 和 ALOS-PRISM 组合精度较好,它们的分辨率较高优势得到发挥;无控制点时 ALOS-PRISM 和 ZY3 组合定位比 ALOS-PRISM 影像单独定位平面精度有了大幅提升。表明本文模型能够发挥多源影像定位中优势影像的特点。

(6)试验表明,本文模型能够实现 RPC 参数影像和星历参数影像的独立和联合定位,对不同航天光学传感器影像有良好的适应性,定位定向参数的解算对控制点的数目没有要求,但精度与影像及其辅助数据质量密切相关。

通过构建 ECEF 中的共线方程和有理函数,考虑了航天光学传感器定标参数、原始定向参数的转换和利用,建立了适合多源卫星光学影像定位的混合/集成模型,模型本身对影像的地理覆盖范围和所在地点没有限制。从理论上说,对于有传感器定标定向参数或 RPC 参数的光学卫星影像,只要将它们辅助数据进行提取并按照本文数据转换模型对辅助数据进行转换,模型就能够适用于稀少或无控制点条件下大多数光学卫星影像的独立定位及不同影像间的联合定位,满足遥感测绘和遥感信息提取对日益丰富的多源航天光学卫星影像进行一体化几何处理的要求。

(下转第 1146 页)