

文章编号: 1671-8860(2003)05-0505-05

文献标识码: A

缺少控制点的卫星遥感对地目标定位

袁修孝¹ 张 过¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:从单线阵推扫式传感器的成像机理出发, 利用 6 个卫星轨道开普勒参数和 3 个传感器姿态角建立了推扫式卫星遥感影像坐标与其地面点在地心坐标系下的坐标关系式, 即构像方程。按照所建立的构像方程, 对某地区一景 SPOT-5 影像进行对地目标定位, 获得了实地上 83.392m 的平面精度; 利用单个地面控制点对卫星轨道开普勒参数和传感器姿态实施调整后, 目标定位精度提高到 14.217m。试验证实, 所建立的构像方程是正确的, 在卫星遥感对地目标定位中有较好的应用前景。

关键词:推扫式遥感影像; 构像方程; 目标定位; 精度
中图法分类号: P231.2; P237

利用推扫式传感器获取的遥感影像越来越多, 如国外的 SPOT、IKONOS 和国内的资源 2 号等。长期以来, 对推扫式卫星遥感影像的几何纠正主要是根据地面控制点采用多项式拟合方法, 对目标的定位主要采用类共线条件方程, 对高分辨率卫星遥感影像的处理大多运用有理多项式。这些方法虽然比较简单, 但都未充分顾及推扫式成像的几何实质。为了进行卫星遥感影像的精确对地目标定位, 需要对推扫式成像建立严格的构像方程和有效的定位算法。

在推扫式影像构像方程方面, Kratky 提出了基于轨道约束的数学模型^[1], Fritsch、Poli、Gruen、张祖勋和江万寿等对该模型进行了较为深入的研究, 将其应用于推扫式影像模拟、推扫式立体像对提取 DEM 及 DOM 等方面, 并对推扫式立体模型构像方程进行了简化^[2~7]。然而, 该模型仅仅是在框幅式成像的共线方程基础上加入卫星轨道约束条件, 并非本质上的推扫式严格构像方程。Westin 对 SPOT 成像几何作了有益的探讨^[8], 给出了 SPOT 影像的构像方程。Rantakokko 等利用该构像方程研究了 SAR 图像的成像几何^[9]; Bang 利用该构像方程进行了推扫式影像的几何纠正^[10]; Gonçalves 等将该构像方程与 SAR 定位模型相结合以减少解求定位参数所需的地面控制点^[11], 均取得了较好的结果。Westin 构像方程是在假设

SPOT 卫星运行轨道为圆形轨道的前提下建立起来的, 对地球摄动力的考虑不全面, 并且忽略了大气折射对信号传播的影响, 其优点在于仅用一个地面控制点就可以调整卫星轨道参数。

本文参照 Westin 的基本思想, 首先从单线阵推扫式传感器的成像机理出发建立了影像构像方程, 然后利用一景 SPOT-5 影像在无地面控制情况下进行对地目标定位以及通过利用少量控制点对卫星开普勒轨道参数进行调整后实施单景影像几何纠正, 以验证所建立构像方程的正确性和所能达到的对地目标定位精度。

1 推扫式影像构像方程

单线阵推扫式成像传感器是以时序方式逐行获取二维图像的。先在像面上形成一条线影像, 然后卫星沿着预先定义好的轨道向前推进, 逐条扫描后形成一幅二维影像, 成像方式如图 1 所示。影像上每一行像元在同一时刻成像且为中心投影, 而整个影像则为多中心投影。

图 1 中, c 为传感器主距; p_k 为影像上任一像点; x_k 为扫描线 k 上影像点的 x 坐标轴; O_k 为扫描线 k 的投影中心; o_k 为扫描线 k 的主点; l_k 为扫描线 k 从投影中心发出的光线。

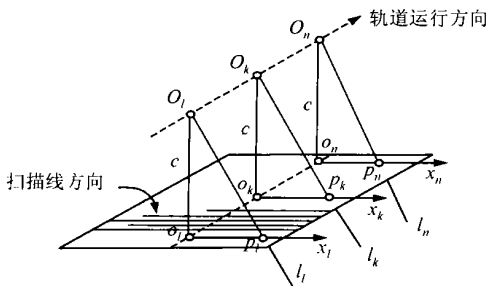


图1 推扫式成像几何

Fig. 1 Imaging Principle of Push-Broom Sensor

遥感卫星大多是近极地、太阳同步轨道卫星。一般说来,可以用6个参数描述卫星轨道。目前通用的是用开普勒轨道参数来表示卫星轨道的各个特性。轨道长半轴 a 和轨道偏心率 e 用于描述卫星轨道的大小和形状;轨道倾角 i 和升交点赤经 Ω 用于描述卫星轨道面在空间的位置;轨道近地点角距 ω_p 用于描述卫星轨道在其轨道面内的旋转方位;轨道真近点角 f 用于描述卫星某时刻的在轨位置。图2示意了卫星开普勒轨道各参数。

图2中, $O-X_C Y_C Z_C$ 为空间固定惯性参考系 CIS (the conventional inertial coordinate system), $O-X_{CT} Y_{CT} Z_{CT}$ 为地球固定地面参考系 CTS (the conventional terrestrial coordinate system)。

所谓影像构像方程就是建立地面点的影像坐

$$R_{GA} = \begin{bmatrix} \cos T & \sin T & 0 \\ -\sin T & \cos T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_{BS} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_y & 0 & \sin \Psi_y \\ \sin \Psi_x \sin \Psi_y & \cos \Psi_x & -\sin \Psi_x \cos \Psi_y \\ -\cos \Psi_x \sin \Psi_y & \sin \Psi_x & \cos \Psi_x \cos \Psi_y \end{bmatrix}$$

$$R_{GF} = \begin{bmatrix} -\sin \Omega \sin i & \cos \Omega \sin u - \sin \Omega \cos i \cos u & -\cos \Omega \cos u - \sin \Omega \cos i \sin u \\ -\cos \Omega \sin i & -\sin \Omega \sin u - \cos \Omega \cos i \cos u & \sin \Omega \cos u - \cos \Omega \cos i \sin u \\ \cos i & \sin i \cos u & \sin i \sin u \end{bmatrix}$$

$$R_{FB} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \sin \omega \cos \varphi \\ \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa - \sin \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \sin \kappa - \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}$$

这里, $T = 99.089\ 927\ 4 + 0.985\ 612\ 286d + 360.895\ 612t / 864\ 00$ 为春分点的格林尼治恒星时。其中, d 为从1950年1月1日零时到成像时刻之间的整数日, t 为当前时刻; Ψ_x 、 Ψ_y 为传感器在扫描线方向和卫星运行方向的侧视角; $u = \omega_p + f$ 为近地点角距。

对于一些难以用精确数学模型表达的大气传播影响等所引起的成像系统误差若采用附加参数模型进行补偿,则可得到更严格的构像方程。

就构像方程(1)而言,卫星开普勒轨道参数可参照文献[12]利用卫星星历计算得到,卫星瞬时位置可根据开普勒轨道参数计算出来,像点坐标

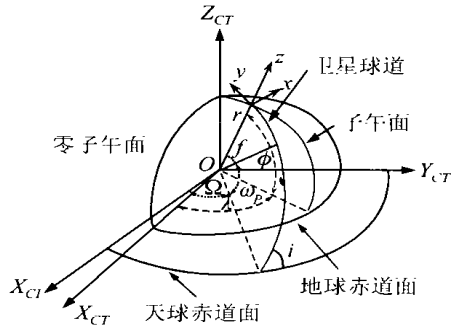


图2 卫星开普勒轨道参数

Fig. 2 Kepler Parameters of Satellite Orbit

标 (x, y) 与其地面坐标 (X, Y, Z) 之间的严密数学关系式。按照图2所示,对于单线阵扫描影像,经过一系列坐标变换以后可得到利用6个卫星开普勒轨道参数和传感器姿态角 φ 、 ω 、 κ 所表达的影像坐标与其地面点在 CTS 系统下的坐标关系式——瞬时构像方程:

$$\begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} = m R_{GA} R_{GF} R_{FB} R_{BS} \begin{bmatrix} x_k \\ 0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, m 为尺度因子; c 为传感器主距; $(x_k, 0)$ 为像点 k 在传感器坐标系下的坐标; (X, Y, Z) 为地面点 k 在 CTS 系的坐标; (X_s, Y_s, Z_s) 为地面点 k 成像时卫星在 CTS 下的坐标;

可通过影像量测获得,传感器姿态和侧视角是已知的,那么,公式(1)中所包含的未知量仅为目标点地面坐标 (X, Y, Z) 和尺度因子 m 。因此,在得到影像成像时刻卫星星历的情况下,根据式(1)就可以由影像坐标解求其对应点的地面坐标,即实现对地目标定位。

2 无控制点的 SPOT 影像目标定位

利用遥感影像确定地面目标的平面位置可以通过影像几何纠正实现。遥感影像几何纠正是指在辐射校正的基础上改正原始图像的几何变形以

产生一幅符合某种地图投影或图形表达要求的新影像,其实质是探讨将影像上量测的像点坐标经何种变换后得到规定投影面上的平面坐标。对于一景推扫式遥感影像,所量测像点的 y 坐标是一个与成像时刻密切相关的量。任一扫描行上的像元所对应的摄影时刻 t 为:

$$t = t_c + (y - y_c) t_{sp} \quad (2)$$

式中, t_c 为中央扫描行的成像时刻, y_c 为中央扫描行的 y 坐标, t_{sp} 为每行的扫描时间。

根据某一扫描行的成像时刻,利用拉格朗日内插法可由卫星星历内插出卫星在该成像时刻的位置和速度,由相邻两个时刻的传感器姿态采用线性内插法可得到该成像时刻的传感器姿态,将其代入式(1)并顾及 WGS84 椭球模型,便可求得每一个像点的尺度因子及其地面点之平面坐标。

本节根据上述基本思想仅仅利用卫星星历数据对某地区一景 SPOT-5 影像实施了几何纠正。该景影像标称地面分辨率为 10m,用 3 个多光谱波段和 1 个红外波段对 60km×60km 的城区扫描形成,地势较为平坦。在 1:50 000 地形图上选取了 39 个分布均匀的明显地物点(图 3 所示),并从地形图上读取了它们的三维地面坐标(精度估计在 10m 左右),以作检查点用于评定目标定位的精度。经过对 39 个检查点残差(残差大小示于图 3(a)中)的统计得到表 1 所列的数值。

表 1 无控制点 SPOT 影像目标定位精度/m

Tab. 1 Accuracy of Object Location by Using Satellite Orbit Data/m

| | X | Y | 平面 | Z |
|------|--------|--------|---------|--------|
| 最大残差 | 90.308 | 56.481 | 106.506 | 87.730 |
| 最小残差 | 10.724 | 15.935 | 19.208 | 68.971 |
| 中误差 | 69.271 | 46.430 | 83.392 | 76.993 |

注:平面= $\sqrt{X^2+Y^2}$ 。

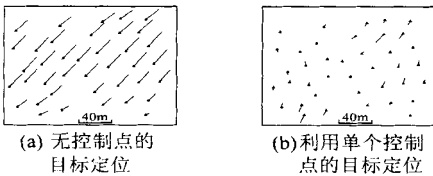


图 3 地面控制点分布及其残差图

Fig. 3 Distribution of the Ground Control Points (GCPs) and Their Residuals

3 单个控制点的 SPOT 影像目标定位

在一景 SPOT 影像中,每条扫描线的卫星轨道开普勒参数是不相同的,并且真近点角 f 与近

点角距 u 存在强相关, a 与其 e 也满足一定关系。研究表明,任一扫描线的卫星轨道开普勒参数及传感器姿态总体上可以表示成影像 y 坐标的三次多项式:

$$\begin{aligned} r &= r_c + ry + \dot{r}y^2 + \ddot{r}y^3 \\ \Omega &= \Omega_c + \Omega_y + \dot{\Omega}_y^2 + \ddot{\Omega}_y^3 \\ i &= i_c + iy + \dot{i}y^2 + \ddot{i}y^3 \\ u &= u_c + uy + \dot{u}y^2 + \ddot{u}y^3 \\ \varphi &= \varphi_c + \varphi_y + \dot{\varphi}_y^2 + \ddot{\varphi}_y^3 \\ \omega &= \omega_c + \omega_y + \dot{\omega}_y^2 + \ddot{\omega}_y^3 \\ \kappa &= \kappa_c + \kappa_y + \dot{\kappa}_y^2 + \ddot{\kappa}_y^3 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, r 为卫星到地球中心的距离; $r_c, \Omega_c, i_c, u_c, \varphi_c, \omega_c, \kappa_c$ 为中央扫描线所对应的卫星轨道参数及传感器姿态; \dot{p}, \ddot{p} 表示 p 参数的一阶、二阶和三阶变化率,可由卫星星历计算得到。

为了利用地面控制点对卫星轨道开普勒参数和传感器姿态进行调整,需将式(3)代入式(1)并将其线性化。此时,式(1)可写成:

$$\begin{aligned} F_1 &= a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + \\ & \quad c_2(Z - Z_s) = 0 \\ F_2 &= xa_3(X - X_s) + xb_3(Y - Y_s) + \\ & \quad xc_3(Z - Z_s) + ca_1(X - X_s) + \\ & \quad cb_1(Y - Y_s) + cc_1(Z - Z_s) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{BS}^T \mathbf{R}_{BF}^T \mathbf{R}_{GF}^T \mathbf{R}_{GA}^T$ 。因此, $a_k, b_k, c_k (k=1, 2, 3)$ 为 $\Omega, i, u, \varphi, \omega, \kappa$ 的函数。

若将像点 x, y 坐标及其所对应的地面点 X, Y, Z 坐标当作观测值,将待调整参数 $r, \Omega, i, u, \varphi, \omega, \kappa$ 视为未知数,可将式(4)线性化。按泰勒级数将其在未知数近似值的邻域内展开至一次项并对未知数建立虚拟观测方程,则有:

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ v_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ -E \end{bmatrix} \Delta - \begin{bmatrix} l \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

式中, E 为单位矩阵; v, v_p 为观测值和虚拟观测值改正数向量;

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial X} & \frac{\partial F_1}{\partial Y} & \frac{\partial F_1}{\partial Z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial X} & \frac{\partial F_2}{\partial Y} & \frac{\partial F_2}{\partial Z} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial r} & \frac{\partial F_1}{\partial \Omega} & \frac{\partial F_1}{\partial i} & \frac{\partial F_1}{\partial u} & \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_1}{\partial \omega} & \frac{\partial F_1}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_2}{\partial r} & \frac{\partial F_2}{\partial \Omega} & \frac{\partial F_2}{\partial i} & \frac{\partial F_2}{\partial u} & \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_2}{\partial \omega} & \frac{\partial F_2}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$l=[-F_1 \quad -F_2]^T$ 为将观测值及未知数近似值代入(4)式的计算值; $\Delta=[\Delta r \quad \Delta\Omega \quad \Delta i \quad \Delta u \quad \Delta\varphi \quad \Delta\omega \quad \Delta\kappa]^T$ 为待调整参数的改正数向量。

若有多个控制点,则可对式(5)进行最小二乘平差,以解求待调整参数的改正数:

$$\Delta = -(B^T(AQA^T)^{-1}B + W_p)^{-1}B^T(AQA^T)^{-1}l \tag{6}$$

式中, Q 为观测值的权倒数矩阵; W_p 为未知数虚拟观测的权矩阵。

在一景 SPOT 影像中,对于中央扫描线可以利用地面控制点按式(6)求得 r_c 、 Ω_c 、 i_c 、 u_c 、 φ_c 、 ω_c 、 κ_c 各参数的改正数,以实现对它们的修正;对于其他扫描线,则以调整后的 r_c 、 Ω_c 、 i_c 、 u_c 、 φ_c 、 ω_c 、 κ_c 为基础,根据卫星星历所计算出的各阶变化率依次利用式(3)对其相应的卫星轨道开普勒参数和传感器姿态进行调整。

本节首先根据上述轨道参数调整的基本思想,依次取用图 3(a)所示的 1~39 个地面控制点,分别对一景影像的卫星开普勒轨道参数和传感器姿态进行了调整,然后利用调整过的参数按照上一节相同的影像几何纠正方法实施对地目标定位。当地面控制点较少时,式(6)的解求是一个秩亏网平差问题,合理给定观测值的权矩阵对保证解的稳定性和精度十分重要。图 3(b)显示了利用位于区域中央的单个地面控制点调整卫星系统参数而实施影像几何纠正后各检查点上的地面坐标残差,表 2 统计了 39 个地面控制点的最大、最小坐标残差和总体精度。图 4 示意了分别利用 1~38 个地面控制点调整卫星系统参数后对地目标定位精度的变化趋势。

表 2 单个控制点 SPOT 影像目标定位精度/m

Tab. 2 Accuracy of Object Location by Using Satellite Data with One Single GCP/m

| | X | Y | 平面 | Z |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 最大残差 | 42.601 | 23.530 | 61.417 | 17.479 |
| 最小残差 | 0.255 | 0.048 | 0.069 | 0.001 |
| 中误差 | 12.700 | 6.391 | 14.217 | 6.965 |

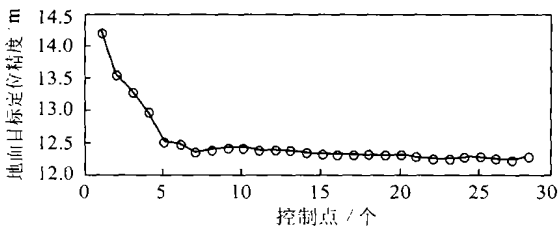


图 4 控制点对地面目标定位精度的影响

Fig. 4 Accuracy Cure of Object Location by Using Satellite Data with GCPs

4 结 语

1) 本文所建立的单线阵推扫式遥感影像构像方程能较好地表达实际卫星遥感影像的成像几何,可用于卫星遥感影像的对地目标定位。

2) 在缺少地面控制点地区,利用严格的遥感影像构像方程和卫星星历以及传感器姿态进行遥感影像对地目标定位具有较高的精度潜力,就 SPOT-5 影像而言已达到实地上 83.392m 的定位精度。然而,从图 3(a)可以看出,系统误差十分明显。如果扣除地面控制点坐标自身的误差,目标定位精度应有所提高。当然,这是以在卫星影像获取的同时精确测定传感器的姿态为前提的。

3) 利用控制点对卫星轨道参数和传感器姿态实施调整可以明显提高遥感影像对地目标定位精度,究其原因主要是消除了卫星星历中的平移系统误差,图 3(b)说明了这一点。试验还表明,利用单个控制点能很好地补偿这一系统误差,只是地面控制点不要位于影像的太边缘,此时目标定位精度可达 14.217m。控制点数的增加对目标定位精度的改善十分有限。图 4 进一步证明,当地面控制点由 1 个增加到 28 个时,目标定位精度的变化不超过 2m;当控制点超过 5 个时,目标定位精度几乎不变。就实际应用而言,提供 1 个地面控制点是必要的而且足够了。这一结果对于我国卫星影像的应用具有非常重要的参考意义。

总之,本文通过试验证实了所建立的单线阵推扫式卫星遥感影像构像方程以及用其进行影像几何纠正算法程序实现的正确性,揭示了基于卫星星历和传感器姿态进行航天遥感对地目标定位的可行性及精度潜力。由于试验数据所限,本文结论还只是初步的,大量的试验验证和构像方程的进一步精化仍在深入研究之中。

参 考 文 献

- 1 Kratky V. Rigorous Photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989, 44 (2): 53~71
- 2 Fritsch D, Stallmann D. Rigorous Photogrammetric Processing of High Resolution Satellite Imagery. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, 2000
- 3 Poli D. General Model for Multi-Line CCD Array Sensors: Application for Cloud-Top Height Estimation. The 3rd International Image Sensing Seminar on New Development in Digital Photogrammetry, Gifu, 2001

- 4 Gruen A. Potential and Limitations of High Resolution Satellite Imagery. The 21st Asian Conference on Remote Sensing, Taipei, 2000
- 5 Zhang J Q, Zhang Z X. Strict Geometric Model Based on Affine Transformation for Remote Sensing Image with High Resolution. <http://www.isprs.org/commission3/proceedings/papers/paper168.pdf>, 2003
- 6 Vassilopoulou S, Hurni L, Dietrich V, et al. Orthophoto Generation Using IKONOS Imagery and High-Resolution DEM: A Case Study on Volcanic Hazard Monitoring of Nisyros Island (Greece). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 57: 24 ~ 38
- 7 江万寿, 张剑清, 张祖勋. 三线阵 CCD 卫星影像的模拟研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 414 ~ 419
- 8 Westin T. Precision Rectification of SPOT Imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(2): 247 ~ 253
- 9 Rantakokko H, Rosenholm D. Rectification of Slant Range Imagery Through a Direct Image to Ground Relationship. Photogrammetric Record, 1999, 16(94): 685 ~ 694
- 10 Bang W. Kompsat-Eoc Sensor Model Analysis. <http://www.dll.org/figtree/pub/proceedings/korea/full-papers/session4/bang-cho.htm>, 2003
- 11 Gon 9 alves J A, Dowman I. Precise Orientation of SPOT Panchromatic Images with Tie Points to a SAR Image. <http://www.isprs.org/commission3/proceedings/papers/paper108.pdf>, 2003
- 12 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1992

第一作者简介: 袁修孝, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事遥感、全球定位系统及其集成、高分辨率卫星遥感影像几何处理等科研与教学工作。代表成果: GPS 辅助空中三角测量等。已出版专著 2 部, 发表论文 40 余篇。
E-mail: yxxqxhyw@public.wh.hb.cn

Object Location of Satellite Imagery Under Lacking Ground Control Points

YUAN Xiuxiao¹ ZHANG Guo¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: Sensor models are of particular importance to stereo measurements and image rectification. There have been so many researches on satellite camera models. In general, sensor models for satellite imagery can be categorized into two groups: physical and mathematical models. In this paper, according to the physical imaging process, we developed the geometric collinearity equation of pushbroom sensor with the Kepler parameters of the satellite orbit and the attitudes of sensor.

By testing the sensor models on a SPOT-5 imagery, the accuracy of object location is 83.392 m. Then the authors adjust the Kepler parameters and attitudes by using one single GCP, the planimetric precision reaches 14.217m on the ground. Thus, the validity of the geometric model has been verified.

Key words: satellite imagery of pushbroom; collinearity equation; object location; accuracy

About the first author: YUAN Xiuxiao, professor, Ph.D supervisor. He is concentrated on the research and education in remote sensing (RS), global positioning system (GPS) and their integration. He has made unique and original contribution to the areas of theories and methods for high precision photogrammetric positioning, GPS-supported aerotriangulation, analytical processing of SPOT imagery and digital image compression, etc. He published two monographs and more than 40 papers.

E-mail: yxxqxhyw@public.wh.hb.cn

(责任编辑: 涓涓)