

ASTER 影像基于卫星轨道和姿态的绝对定位模型

李柏鹏^①, 关鸿亮^②, 陈亮^③

(^① 安华农业保险有限公司, 北京 100195; ^② 北京天下图数据技术有限公司, 北京 100000;

^③ 中国酒泉卫星发射中心, 酒泉 732750)

摘要: ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)影像具有较高的地面分辨率,能在可见光、近红外、短波红外、热红外的光谱范围内的 14 个通道内成像,并且具有立体观测能力,因此 ASTER 影像具有广泛的用途,能用于陆地、海洋、冰川、大气等方面的研究。影像定位技术是摄影测量学的核心理论基础之一,是实现从影像坐标到地面坐标转化的关键环节。对遥感图像的应用而言,确定目标位置是非常重要的。本文建立了 ASTER 影像的定位模型,并以此模型为基础进行 ASTER 影像定位误差的定量分析,实现在没有控制点和稀少(小于 4 个)控制点的情况下对 ASTER L-1A 级影像进行定位。

关键词: ASTER; 定位模型; 精度评价

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.007

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)120-0036-05

The Geo-location Model for ASTER Image Based on Satellite Orbit and Attitude

LI Bai-peng^①, GUAN Hong-liang^②, CHEN Liang^③

(^① AnHua Agricultural Insurance Co Ltd, Beijing 100195; ^② Beijing Peacemap Co., Ltd, Beijing 100000;

^③ Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750)

Abstract: ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) has a high ground resolution of 14 channels in the Visible and Near-infrared (VNIR), the Shortwave Infrared (SWIR) and the Thermal Infrared (TIR), and it has stereo viewing ability, so ASTER image can be applied in many domains such as land, sea, glacier, atmosphere and so on. Image geo-location technology is the core methodology of photogrammetry, and is the key step of coordinate transformation from image coordinate system to earth coordinate system. The geo-location is very important for the application of remote sensing image, because the positional parameters are basic information in the applications of remote sensing such as mapping and surveying, disaster monitoring, resource exploring, changing detection. The Geo-location model of ASTER image was established in this paper, and the geo-location error analysis was implemented based on the geo-location model. The geo-location of ASTER L-1A was implemented with no control or scars(less than 4) points.

Key words: ASTER; geo-location; accuracy assessment

卫星轨道姿态模型是由 Toutin 博士提出的严格数学模型,它能补偿传感器几何畸变、卫星轨道姿态变化、地球曲率及旋转、地形起伏等造成的影像畸变。此模型可以应用在 ASTER、IKONOS、LANDSAT、SPOT、IRS、QUICKBIRD 等卫星影像上。由

于该严格数学模型是以共线方程为基础的,在像方和物方坐标间建立了严格的几何关系,它的解算必须已知成像过程中传感器的位置、速度和姿态等参数。本文在该模型的基础上,针对 ASTER 传感器的特点,参考国内外相关研究资料,给出了用于 AS-

收稿日期:2011-03-02 修订日期:2011-04-01

作者简介:李柏鹏,男,土家族,湖北利川人,硕士,研究方向:无人机影像数据快速获取及定位处理,影像自动识别等。

E-mail: libaipeng@gmail.com

TER 定位的卫星轨道姿态模型。

卫星轨道姿态模型应用了摄影测量学、大地测量学等原理知识。这个模型不仅体现了严格成像几何的物理过程,同时也能反映出成像过程中所有的几何畸变,如平台(位置、速度和姿态)、传感器(定标、原子钟误差、视场)、地球(大地体、椭球体、地形)等引起的影响畸变。

1 模型建立过程

ASTER 影像的卫星轨道姿态定位模型的建立主要由以下几步构成:视线方向矢量指向校正(The Pointing Correction);从卫星导航基准坐标系到轨道坐标系的转换;从轨道坐标系到地球惯性系的坐标转换;从地球惯性系到地球固定系的坐标转换;确定视线方向矢量延长线和地球表面的交点;进行影像定位。

1.1 视线方向矢量指向校正

视线方向矢量指向轴旋转 β 角,从 S_0 转换为 S :

$$\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} S_{0X} \\ S_{0Y} \\ S_{0Z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$M \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta_{yaw} & \sin\theta_{yaw} & 0 \\ -\sin\theta_{yaw} & \cos\theta_{yaw} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{pitch} & 0 & -\sin\theta_{pitch} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_{pitch} & 0 & \cos\theta_{pitch} \end{bmatrix}$$

式中, S_{0X}, S_{0Y}, S_{0Z} 为指向校正前的视线方向矢量; S_x, S_y, S_z 为指向校正后的视线方向矢量; $\Delta\theta_{yaw}$ 和 $\Delta\theta_{pitch}$ 是导航基准坐标系中的 X 轴(X_{NBR})和指向轴之间在航偏(yaw)方向和倾斜(pitch)方向的夹角。

图 1 显示了指向轴和导航基准坐标系(NBR)的关系,通过将指向轴旋转 $\Delta\theta_{yaw}$ 和 $\Delta\theta_{pitch}$ 角,使得指向轴方向与 X_{NBR} 方向一致。

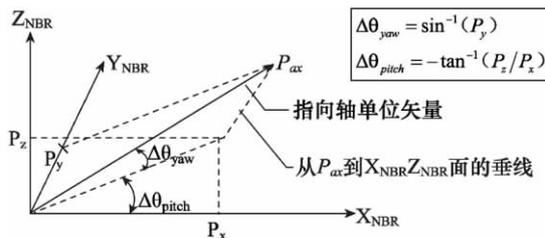


图 1 指向轴校正

1.2 卫星导航参考坐标系到轨道坐标系的转换

从卫星导航参考坐标系到轨道坐标系的转换通过以下公式实现:

$$S_{OR} = F_{SO \cdot yaw} F_{SO \cdot pitch} F_{SO \cdot roll} S \quad (2)$$

式中, S 为导航坐标系统中的视线方向矢量,

S_{OR} 为轨道坐标系统中的视线方向矢量。

$$F_{SO \cdot roll} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\alpha_{roll}) & \sin(-\alpha_{roll}) \\ 0 & -\sin(-\alpha_{roll}) & \cos(-\alpha_{roll}) \end{bmatrix},$$

$$F_{SO \cdot pitch} \equiv \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_{pitch}) & 0 & -\sin(-\alpha_{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\alpha_{pitch}) & 0 & \cos(-\alpha_{pitch}) \end{bmatrix},$$

$$F_{SO \cdot yaw} \equiv \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_{yaw}) & \sin(-\alpha_{yaw}) & 0 \\ -\sin(-\alpha_{yaw}) & \cos(-\alpha_{yaw}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中 $\alpha_{roll}, \alpha_{pitch}, \alpha_{yaw}$, 分别为卫星辅助数据中姿态数据的侧滚、俯仰、航偏分量。

1.3 轨道参考系统到地球惯性系统的坐标转换

通过以下公式将视线方向矢量从轨道参考系统转化到地球惯性系统中:

$$S_{EI} = F_{OI} S_{OR} \quad (3)$$

式中 S_{OR} 为轨道参考系统中的视线方向矢量; S_{EI} 为地球惯性系统中的视线方向矢量。

$$F_{OI} \equiv (T_x \ T_y \ T_z)$$

T_x, T_y, T_z 为轨道参考系统到地球惯性系统的转换矩阵,其中:

$$T_x \equiv T_y \times T_z$$

$$T_y \equiv \text{unit}(-R \times V)$$

$$T_z \equiv \text{unit}(-R)$$

R, V 为地球惯性系统中的卫星位置和速度矢量, unit 是将矢量转化成单位矢量的操作。

在进行视线方向矢量 S_{EI} 坐标系统转化的运算时,更精确的计算需要考虑到地球的岁差矩阵 P 和章动矩阵 N 。

1.4 地球惯性系到地球固定系的坐标转换

地球惯性系统到地球固定系统用以下公式转换:

$$S_{EF} = F_{IF} S_{EI} \quad (4)$$

式中 S_{EI} 为地球惯性系统中的视线方向矢量; S_{EF} 为地球固定系统中的视线方向矢量。

$$F_{IF} \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta_g & \sin\theta_g & 0 \\ -\sin\theta_g & \cos\theta_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

θ_g 为格林威治真恒星时角。

1.5 确定视线方向矢量和地球椭球的交点

视线方向矢量可以由下面的方程表示:

$$x = X + S_{EF \cdot x} r$$

$$y = Y + S_{EF \cdot y} r$$

$$z = Z + S_{EF \cdot z} r \quad (5)$$

式中 $S_{EF \cdot x}, S_{EF \cdot y}, S_{EF \cdot z}$ 为地球固定系中视线方向矢量在 x, y, z 方向的分量, X, Y, Z 为地球固定坐标系中卫星位置矢量在 x, y, z 方向的分量; r 为系数。

同时,地球椭球面可以由下式表示:

$$\frac{(x^2 + y^2)}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

式中, a 为椭球的长半轴, b 为椭球短半轴, 对 WGS84 坐标系, $a = 6378137m, b = a(1 - f), f = 1/298.2572$ 。

联立方程(5)和(6), 即可求得视线方向是矢量和椭球面的交点。

2 本文实现过程

由于校正前的视线方向矢量需要从几何数据库中获取, 但是, ASTER 数据中并没有给出相应的几何数据库, 目前也无法获取相应的几何数据库, 因此不能从校正前的视线方向矢量着手进行处理。

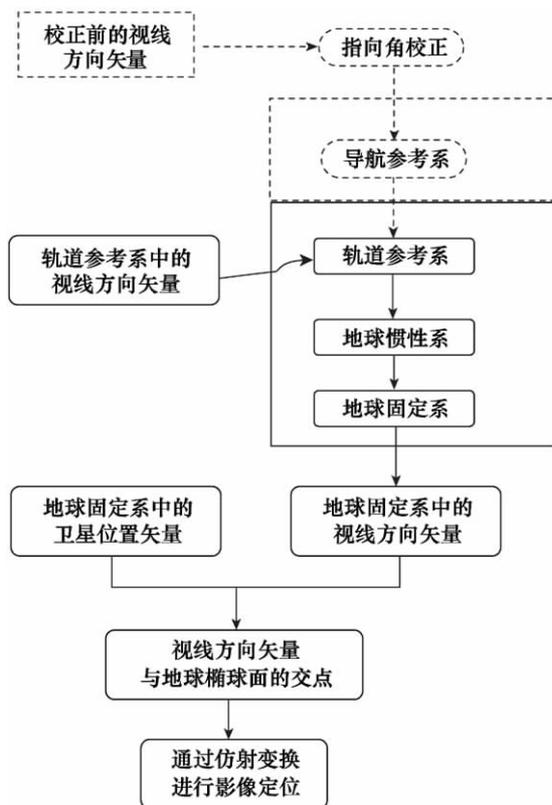


图 2 卫星轨道姿态模型的定位流程

ASTER 数据中给出了轨道参考系中的视线方向矢量, 同时也给出了地球惯性系中的卫星位置和速度, 于是可以从轨道参考系中的视线方向矢量出发, 将其转换到地球惯性系中, 并进一步转换到地球固定系中, 从而在地球固定系中计算视线方向矢量与椭球面的交点, 实现影像定位。定位流程见图 2。

在校正前的视线方向矢量能够获取的情况下, 可以沿虚线所示的流程进行影像的定位处理。由于 ASTER 数据中并没有给出校正前的视线方向矢量, 而是给出了轨道参考系中的视线方向矢量, 因此实际的处理过程从轨道参考系中的视线方向矢量开始。

2.1 轨道参考系到地球惯性系的坐标转换

轨道参考系中的视线方向矢量从 ASTER 数据的 VNIR Group 中读取, 同时, 转换矩阵需要的地球惯性系统中的卫星位置和速度矢量从 ASTER 数据的 Ancillary 数据中读取。现在, 只要能够获取同一时刻下的卫星位置、速度矢量和视线方向矢量, 就可以做相应的坐标转换。

由于数据传输的原因, 导致辅助数据中的 Time stamp 和卫星与设备通信时的时钟时间 (clock time) 之间有大约 616ms 的时间延迟。

每行像素的成像时间为 0.002199s, 首先对 Ancillary 的 Time Tag 和 VNIR 的 Observation Time 进行时间间隔为 0.002199s 的内插, 然后查找两者时间一致的数组坐标; 对 Time Tag 减去滞后的时间, 由于 Time Tag 与地球惯性系中的位置和速度相关, 而 Observation Time 与视线方向矢量相关; 对位置和速度矢量和视线方向矢量做相应的内插处理, 得到内插后的数组, 然后查找相同时刻处的视线方向矢量和卫星位置与速度数组的下标; 最后进行坐标转换。

2.2 地球惯性系到地球固定系的坐标转换

(1) 近似坐标转换

现已知协调世界时, 要求出相应的 GAST, 首先计算格林威治恒星时角 (GMST):

$$GMST = 6.697374558 + 0.06570982441908D_0 + 1.00273790935H + 0.000026T^2 \quad (7)$$

$$D = JD_{UT1} - 2451545.0$$

$$D_0 = JD_{0UT1} - 2451545.0$$

JD_{UT1} 为给定时间的儒略日 (Julian date), JD_{0UT1} 为给定时间当天零时起算的儒略日, H 为从给定时间零时起所经历的小时数, $JD_{UT1} = JD_{0UT1} + \frac{H}{24}$ 。

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC)$$

其中, $(UT1 - UTC)$ 可以从 IERS 给出的 `utcpole_dat` 中读取。然后由 GMST 计算 GAST:

$$GAST = GMST + \Delta\Psi \cos \epsilon$$

$\Delta\Psi$ 为黄经章动, ϵ 为历元平黄赤交角:

$$\epsilon = 23.4393 - 0.0000004D$$

$$\Delta\Psi \approx -0.000319 \sin \Omega - 0.000024 \sin 2L$$

Ω 为地球升交点经度, L 为太阳平经度:

$$\Omega = 125.04 - 0.052954D$$

$$L = 280.47 + 0.98565D.$$

得到格林威治真恒星时角后,就可以根据式(4)进行坐标转换。

(2) 严格坐标变换

该两个坐标系统的严格变换关系如下:

$$S_{EF} = WSNPS_{EI} \quad (8)$$

式中 P 为从 J2000.0 系下的平赤道和平春分点到观测时刻的平赤道和平春分点的岁差改正; N 为从观测时刻的平赤道和平春分点到真赤道和观测时刻的平春分点的章动旋转; S 为 X 轴绕真极点的旋转角,经过旋转后, X 轴的指向与格林威治本初子午线的指向一致; W 为极移旋转角,经过极移旋转后,固定系的 Z 轴指向与协议地极一致。

定义:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P = R_z(-z_A)R_y(\theta_A)R_x(-\zeta_A)$$

式中:

$$\zeta_A = 2306.''2181t + 0.''30188t^2 + 0.''017998t^3$$

$$\theta_A = 2004.''3109t - 0.''42665t^2 - 0.''041833t^3$$

$$z_A = 2306.''2181t + 1.''09468t^2 + 0.''018203t^3$$

$$t = \left[\frac{TT - J2000.0}{36525} \right], t \text{ 为从 J2000.0 (January}$$

1.5, 2000 (2000 年 1 月 1 日中午 12 点)) 起到给定时间的儒略世纪数。

$$N = R_x(-\epsilon_t)R_z(-\Delta\Psi)R_x(\epsilon_m)$$

$$\epsilon_m = 84381.''448 - 46.''8150t - 0.''00059t^2 + 0.''001813t^3$$

$$S = \begin{bmatrix} \cos\alpha_G & \sin\alpha_G & 0 \\ -\sin\alpha_G & \cos\alpha_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_G = GMST + \Delta\Psi \cos\epsilon_m + 0.''00264 \sin \Omega + 0.''000063 \sin 2 \Omega$$

$$\Omega = 450160.00398036 - 6962890.002665t +$$

$$7.004722t^2 + 0.00007702t^3 - 0.0000005939t^4$$

$$GMST(UT1) = 4.894961212823058751375704430 +$$

$$\Delta T(6.300388098984893552276513720 +$$

$$\Delta T(5.075209994113591478053805523 * 10^5$$

$$-9.253097568194335640067190688 * 10^{21} \Delta T))$$

其中:

$$\Delta T = UT1 - J2000.0$$

$$W = R_y(-x_p)R_x(-y_p) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos x_p & \sin x_p \sin y_p & \sin x_p \cos y_p \\ 0 & \cos y_p & -\sin y_p \\ -\sin x_p & \cos x_p \sin y_p & \cos x_p \cos y_p \end{bmatrix}$$

由于极移通常很小,因此 W 用下式简化:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{bmatrix}$$

极移数据可以从 IERS 获取。

2.3 确定视线方向向量和地球椭球的交点

得到地球固定坐标系中的视线方向向量后,就可以求视线方向向量和地球椭球的交点,解算后得到影像格网点处地球固定系下的地心直角坐标 $(X_{ECR}, Y_{ECR}, Z_{ECR})$ 。

下面进行坐标转换,首先将地心直角坐标转换为地心经纬度坐标 (Ψ, λ) :

$$\Psi = \tan^{-1}(Z_{ECR} / (X_{ECR} + Y_{ECR}))$$

$$\lambda = \tan^{-1}(Y_{ECR} / X_{ECR}) \quad (9)$$

然后将地心经纬度坐标转换为 WGS-84 坐标系下的大地经纬度 (B, L) , 大地纬度 B 与地心纬度 Ψ 之间有如下关系: $\tan \Psi = (1 - e^2) \tan B$, 即 $B = \arctan(\tan \Psi / (1 - e^2))$, e 为椭球第一偏心率,对 WGS-84 坐标系, $e^2 = 0.00669438$ 。

接下来进行高斯投影转换,将大地经纬度坐标转换为高斯平面坐标 (X, Y) 。

2.4 通过仿射变换进行影像定位

得到影像格网点处的地面坐标后,即可以根据影像坐标与其对应的地面坐标之间的关系(图 3)建立变换函数进行影像定位。

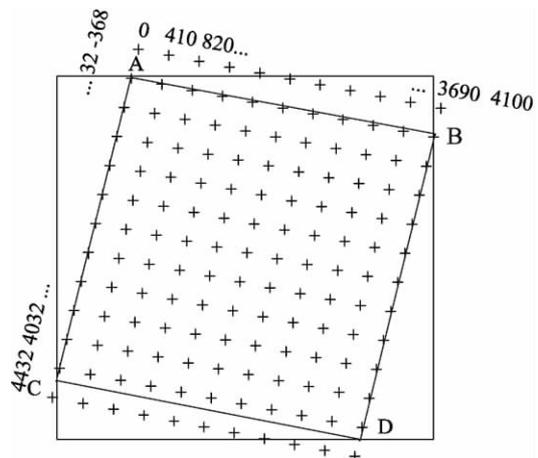


图 3 格网点处经纬度坐标与影像坐标的对应关系

根据仿射变换公式建立仿射变换模型,进行影像定位。

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + a_1 X + a_2 Y \\ y &= b_0 + b_1 X + b_2 Y \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:

x, y 为一像素的图像坐标

X, Y 为同名像素的地面坐标,采用最小二乘的方法求解多相式的系数。

3 定位精度

利用本文提出的定位模型,对北京地区一景 ASTER 影像进行了定位试验。北京位于华北平原的北部,其海拔从东北到西南呈递减的趋势,山脉环绕在市区的北面,东北及西边。市区的南面为平原,地势缓慢递减至渤海海岸。该地区山地面积为 10417.5km²,大约占该地区总面积的 62%,其余部分为平地。

图像的几何精度评价方法为:首先在影像上选择特征点,然后利用 GPS 等测量特征点的地面坐标,接着比较图像上特征点的坐标和用 GPS 等测量得到的地面坐标从而得出影像的定位精度。

定位后影像几何精度如图 4(A)所示,为不引入控制点情况下的定位精度。从图像上可以看出,在山区,由于地形的影响,影像的定位精度较差,检测点处的定位误差几乎都超过两个像素(30m),平坦地区的定位精度较高,但也有一些点的定位误差超过了 30m。同时,从图上可以看出,影像的位移大都指向东北方向,说明该影像存在一定的系统误差,而系统误差可以通过影像平移等方法消除。考虑在图像中部选取一个控制点,通过一个控制点平移后其

定位误差如图 4(B)所示。可以看出,经过平移后,系统误差得到较好的消除,定位精度有了明显提高,精度结果如表 1。

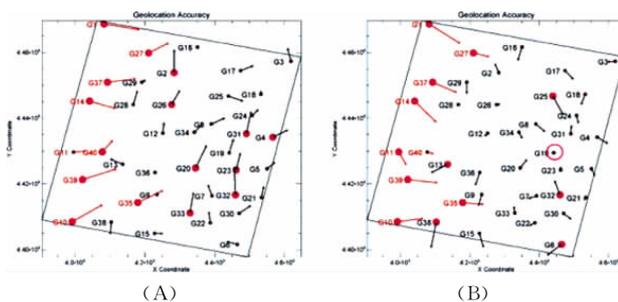


图 4 影像定位精度

表 1 影像定位精度

| | A | | B | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| Mean | 16.53 | 16.32 | 6.62 | -7.04 |
| Stdev. | 21.71 | 17.66 | 19.97 | 15.65 |
| max | 67.99 | 55.86 | 57.43 | 24.71 |
| min | -22.99 | -26.22 | -33.55 | -51.32 |
| RMSE _{x/y} | 27.42 | 24.19 | 21.07 | 17.19 |
| RMSE | 36.57 | | 28.58 | |

4 结束语

本文建立了 ASTER 影像的基于卫星轨道和姿态的绝对定位模型,并用此模型进行了影像定位试验,定位结果显示,该模型的定位误差在两个像元左右,通过一个控制点平移后,影像的定位误差能控制在两个像元以内。

在影像分布区域的 DEM 可以获取的情况下,利用该模型可以进行影像的正射纠正。

参考文献

[1] 张永军,张勇. SPOT5 HRS 立体影像无(稀少)控制绝对定位技术研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(11): 941-944.

[2] 宋伟东. 稀少控制点下遥感影像纠正模型研究[D]. 辽宁工程技术大学,2004,12.

[3] 韩颜顺. 高分辨率卫星影像几何纠正模型研究及正射纠正试验[D]. 辽宁工程技术大学,2006,1.

[4] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星影像几何纠正[D]. 武汉大学,2005,4.

[5] 张剑清,张祖勋. 高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2002,27(6):555-559.

[6] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001.

[7] Dennis D. McCarthy, Gerard Petit. International Earth Rotation and Reference Systems Service Central Bureau [C]//2004.

[8] David W Fanning. IDL Programming Techniques[M]. Fort Collins,CO;Fanning Software Consulting,2000.

[9] ERSDAC(Earth Remote Sensing Data Analysis Center)[Z]. ASTER User's Guide Part-II (Ver. 5.0).

[10] ERSDAC. Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Level-1 Data Processing.

[11] ERSDAC. ASTER LEVEL 1 DATA PRODUCTS SPECIALIFICATION(GDS Version) Version[Z].