

# Landsat7 图象系统级几何校正算法研究

唐海蓉 向茂生 朱敏慧

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** Landsat7 的双向扫描模式、姿态波动和增强型专题制图仪 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper+) 传感器本身的特点等必然导致遥感图象的几何畸变, 同时复杂的成像几何模型也增加了几何校正的难度。为此, 在研究了其成像几何模型, 分析了影响畸变的因素后, 给出了完整的系统级几何校正算法, 包括视线产生和投影、姿态合成和重采样等, 并对重采样中的间隙插值和延迟进行了深入分析, 采用了简化方法。实验结果表明, 校正后图象的定位精度、变形度和行间相关度达到了系统级几何校正的要求, 验证了算法在保证速度的前提下, 具有较高的正确性。

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 陆地卫星-7(Landsat7) 增强型专题制图仪 系统级几何校正 视线间隙 延迟 重采样

**中图法分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)09-1008-07

## Study on Systematically Geometric Algorithm of Landsat7 Image

TANG Hai-rong, XIANG Mao-sheng, ZHU Min-hui

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

**Abstract** The bi-directional cross track scanning, attitude fluctuation and the ETM+ sensor itself of Landsat7 result in the geometrical distortions including underscan, overscan and misalignment, which make geometric calibration more difficult than other kinds of model. The complicated imaging model increase the difficulty of geometric calibration as well. After the geometric model of imaging is studied, and the factors influencing imaging are analyzed, the systematically geometric calibration algorithms are derived, including generation and projection of line of sight, combination of attitude, generation of correction grid, finding corresponding input grid cell for a given output space, resampling, and so on. The model of line of sight are built in detail. Especially, the gap interpolation and detector delay are considered, and simplified methods are introduced to settle them. Finally, three parameters are introduced to evaluate the result of geometric calibration, including location precision, distortion and correlation between two lines. Experimental results show that the algorithms lead to good location precision, small distortion and good correlation between lines which all reach the requirement of the systematically geometric calibration, so validate the algorithms.

**Keywords** Landsat7, Enhanced Thematic Mapper+(ETM+), The systematically geometric calibration, Line of sight, Gap, Delay, Resample

## 0 引言

Landsat7 是美国于 1999 年发射的一颗地球资源卫星, 与以前的 Landsat 系列卫星相比, Landsat7 采用了更为完善的遥感仪器, 称为增强型专题制图仪 (ETM+), 其优点不仅表现在空间分辨率的增加、光谱响应范围的扩大等方面, 并且性能更为优越。

ETM+ 仪器包含 8 个波段的探测器, 分别是 3 个可见光波段、2 个近红外波段、1 个短波红外波段、1 个热红外波段和 1 个全色波段。其中全色波段的分辨率为 15m, 波段 6 的分辨率为 60m, 其余波段的分辨率均为 30m。

Landsat7 运行在一种双向扫描的模式下, 探测器视场除了随着卫星由北向南运动而变化外, 还有垂直于卫星轨迹方向的正扫和回扫。在扫描过程中,

鉴于卫星姿态波动及双向扫描和 ETM+ 自身的特点,致使图象存在较严重的漏扫、重叠扫、错位等现象(如图 1)。由于这些现象的影响,因而使得几何校正过程更为复杂。

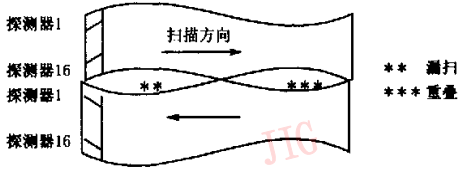


图 1 Landsat7 的双向扫描模型

光学遥感图象的系统级几何校正是图象地面处理系统中必不可少的组成部分,其完成的校正有:传感器偏置、扫描非线性、传感器不对齐、姿态变化、轨道变化、全景扭曲、地球表面弯曲、地球自转等。所有这些校正过程采用的图象均来自于系统级辐射校正后的图象,校正所需参数来源于校正参数文件、卫星内部定标数据和地面定标数据。

几何校正的步骤是先根据扫描镜和姿态模型计算卫星像元视线及视点(视线在地球表面的投影),同时计算对应地图上的点,在找到适量的对应点后,再通过建立投影方程来解出投影因子;然后即可利用重采样和插值来得到地图上各个点的图象数据值。

## 1 原理及算法

### 1.1 视线产生和投影

对焦平面成像空间(输入空间)的一个点,可首先计算其地心惯性坐标系中的视线,然后计算其投影到地图空间(输出空间)中点的坐标,这一过程称为视线产生和投影。由于 Landsat7 的视线是随着扫描镜来回扫描和卫星扫描而不断变化的,因此计算视线投影时,应首先根据扫描时间来计算视角,再找到对应的星历和姿态,然后才能由此计算出该时刻的输出投影。

该算法的输入是行、采样号和波段号,输出结果是与该波段输入图象的行、采样号对应的地图上的点。步骤如下:

#### 1.1.1 计算采样时间

当前采样对应的时刻等于当前扫描开始时的时间加上当前采样在当前次扫描中所用的时间。当前扫描开始时间可从镜校正参数文件中获取,而当前采样在当前扫描中所用的时间  $t$  则按下式计算:

$$\text{前扫时 } t = (s - 1 + b) \times t_D \quad (1)$$

$$\text{回扫时 } t = (n - s + b) \times t_D \quad (2)$$

其中,  $s$  是当前扫描行中的采样序列号;  $n$  是当前扫描行的采样总数;  $b$  是为了使各波段的图象对齐,在图象左端填充的像素数;  $t_D$  是每个采样的驻留时间。

由于得到的卫星时间存在漂移和偏置,因此应根据地面控制时钟校正量,将其校正到协调世界时。

#### 1.1.2 计算传感器坐标系中的视角

在得到当前采样的时间后,再计算传感器坐标系中的当前采样的沿着镜扫描方向的视角  $A_{\text{along}}$  和垂直镜扫描方向的视角  $A_{\text{across}}$ 。

在沿着镜扫描的方向,扫描镜速度的随机变化和高频侧滚导致初始提供的 5 阶多项式不能正确反映镜运动,因此必须使用扫描镜校正数据文件中的前一半扫描误差和后一半扫描误差参数、载荷校正数据文件中的高频侧滚参数来重新计算扫描镜运动在沿着正反扫描方向的 5 阶多项式模型<sup>[1-3]</sup>。得到模型后,对于正扫,可使用当前次扫描中所用的时间代入模型来计算校正角度;对于回扫,则通过将总的时间减去当前次扫描中所用的时间代入模型来得到校正角度。

一般可利用扫描镜模型和焦平面几何学相结合的方法来得到传感器坐标系中的沿着镜扫描方向的视角。这里定义正扫描角为正扫方向,波段  $B$  的沿着镜扫描方向的视角  $A_{\text{along}}$  被写成时间  $t$  的函数:

$$\text{正扫 } A_{\text{along}} = 2.0 \times (\alpha_{s\_m} - \alpha_{s\_e} \times t/T + f_{\text{along}}(t)) + \omega_{\text{along}}[B] - \gamma_{\text{off}}[B] \quad (3)$$

$$\text{回扫 } A_{\text{along}} = 2.0 \times (-\beta_{s\_m} + \beta_{s\_e} \times t/T + r_{\text{along}}(t)) + \omega_{\text{along}}[B] - \gamma_{\text{off}}[B] \quad (4)$$

其中,  $\alpha_{s\_m}$  为正向镜扫描开始到中间的扫描角;  $\alpha_{s\_e}$  为正向镜扫描开始到结束的扫描角;  $\beta_{s\_m}$  为反向镜扫描开始到中间的扫描角;  $\beta_{s\_e}$  为反向镜扫描开始到结束的扫描角;  $f_{\text{along}}(t)$  是校准正向扫描时,镜扫描方向的扫描镜 5 阶多项式模型;  $r_{\text{along}}(t)$  是校准反向扫描时,镜扫描方向的扫描镜 5 阶多项式模型;  $T$  为扫描一行时间;  $\omega_{\text{along}}[B]$  是波段  $B$  的中心位置和传感器光学轴之间的夹角;  $\gamma_{\text{off}}[B]$  是波段  $B$  的奇数探测器和波段中心位置之间的夹角。

根据当前次扫描中所用时间,波段的垂直镜扫描方向的视角可采用 SLC(scan line corrector,扫描行校正器)的位置的线性插值、垂直扫描时间 5 阶多项式、探测器垂直方向位置角、垂直扫描探测器偏置来计算<sup>[1-3]</sup>。

波段  $B$  的探测器  $K$  的垂直镜扫描方向的位置角  $\theta_{det}$  的计算公式为

$$\theta_{det} = ((n[B] + 1)/2 - K) \times I[B] \quad (5)$$

其中,  $n[B]$  是波段  $B$  的总探测器数,  $I[B]$  是波段  $B$  的探测器瞬时视场。

SLC 角为当前次扫描中所用时间的函数, 飞行方向角为正, 每次扫描从正角旋到负角

$$\theta_{slc} = \theta_{slc\_start}[d] - \theta_{slc\_max}[d] \times t/T \quad (6)$$

其中,  $\theta_{slc}$  为垂直 SLC 角(飞行方向为正),  $\theta_{slc\_start}$  为扫描开始 SLC 角,  $\theta_{slc\_max}$  为总 SLC 角,  $d$  为扫描方向, 正扫时称为  $d_+$ , 反扫时称为  $d_-$ 。

对于波段  $B$  的第  $K$  个探测器的总的垂直镜扫描方向的视角  $A_{across}$  为

$$\begin{aligned} \text{正扫 } A_{across} = & \theta_{slc\_start}[d_+] - \theta_{slc\_max}[d_+] \times \\ & t/T + 2 \times f_{across}(t) + \varphi_{across}[B] + \\ & ((n[B] + 1)/2 - K) \times I[B] \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{回扫 } A_{across} = & \theta_{slc\_start}[d_-] - \theta_{slc\_max}[d_-] \times \\ & t/T + 2 \times r_{across}(t) + \varphi_{across}[B] + \\ & ((n[B] + 1)/2 - K) \times I[B] \quad (8) \end{aligned}$$

其中,  $f_{across}(t)$  是正向扫描时, 垂直镜扫描方向的 5 阶多项式模型;  $r_{across}(t)$  是反向扫描时, 垂直镜扫描方向的 5 阶多项式模型;  $\varphi_{across}[B]$  是波段  $B$  的中心位置和传感器光学轴之间的角。

### 1.1.3 计算地球固定坐标系中的视线矢量

使用采样点时间来计算得到当前姿态、位置和卫星速度后, 随之就可以计算得到传感器坐标系、导航坐标系、轨道坐标系、地心惯性坐标系、地心固定坐标系等之间的相互转换关系。然后, 就可利用沿着镜扫描方向的视角和垂直镜扫描方向的视角来建立一个 Sensor(传感器)空间的理想的视线矢量。这样, 利用坐标转换关系, 最终可将视线矢量转换到 ECEF (Earth Center Earth Fixed, 地心地固) 坐标系中<sup>[1]</sup>。具体步骤如下:

(1) 使用成像点时间, 在组合姿态表中寻找相应的组合姿态, 首先得到卫星 roll(侧滚)、pitch(俯仰)、yaw(偏航)角, 并建立对应的姿态矩阵  $R$ 、 $P$ 、 $Y$ 。

(2) 使用参考星历点到成像点的时间和插值多项式来得到成像点的卫星位置和速度。

(3) 使用沿着扫描方向的视角和垂直扫描方向的视角来建立传感器坐标系统的视线  $L_s = (l_x, l_y, l_z)$ 。

$$\begin{aligned} l_x &= \sin(A_{across}) \times \cos(A_{along}) \\ l_y &= \sin(A_{along}) \\ l_z &= \cos(A_{across}) \times \cos(A_{along}) \end{aligned} \quad (9)$$

(4) 将 Sensor 坐标系视线  $L_{sensor}$  转换到 NBR 坐标系视线  $L_{NBR}$ , 再转换到 Orbit 坐标系视线  $L_{Orbit}$ , 再转换到 ECEF 坐标系视线  $L_{ECEF}$ , 其中第 2 步转换涉及姿态, 表达如下:

$$L_{Orbit} = Y^{-1}P^{-1}R^{-1}L_{NBR} \quad (10)$$

### 1.1.4 视线投影输出及光速校正

得到地球固定坐标系中的视线矢量后, 首先采用 WGS84 (World Geodetic System 1984) 地球模型, 再依照图 2 来建立模型, 并通过计算视线与地球表面的交点来得到该点的经纬度; 然后采用高斯-克吕格投影法来计算该点在高斯投影平面上的投影坐标, 并将其作为输出。

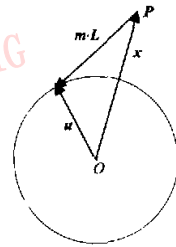


图 2 视线模型

各矢量间有如下关系:

$$u = x + m \cdot L \quad (11)$$

另外, 由于光速并非无限, 因而地球表面的点速、卫星速度将引起像素定位误差。由于地球自转引起的光速校正低于米数量级, 故不考虑。在沿着卫星运动轨迹的方向, 由卫星速度引起的光速校正对 Landsat7 来说大约是常数, 其大小大约是 15m。

### 1.2 姿态合成

在视线产生时, 从导航坐标系到轨道坐标系的转换将涉及姿态的(roll)、(pitch)、(yaw)角。下面将给出 3 个姿态角的获取过程。

Landsat7 的姿态测量分为高频和低频两个部分, 其中高频部分指的是 ADS (Angular Displacement Sensor, 角位移传感器) 测量值; 低频部分包括 euler(欧拉)参数、gyro(陀螺仪)测量值、gyro drift(陀螺漂移值), 其中, euler 参数表示卫星姿态, gyro 测量值表示姿态变化率, gyro drift 表示姿态变化率的偏置量。角位移传感器的采样时间间隔是 2ms, 陀螺仪采样时间间隔是 64ms, 欧拉参数表示的姿态测量时间间隔是 4.096s, 陀螺漂移的测量时间间隔是 16.384s。

低频部分首先要利用卡尔曼滤波器来滤波、平滑,同时,由于高低频系统之间转换区的不连续,以及传感器相移等属性,使得高低频不能简单相加,因而需要经过相应的滤波和融合方可用<sup>[1]</sup>。

如图 3 所示的处理流程为首先利用 G 滤波器对旋转到 ADS 系统的陀螺仪数据进行低通滤波,同时也用作陀螺数据的预滤波器;然后用 F 高通滤波器来去除融合前的滤波影响;最后通过将 gyro 和 ADS 的组合数据旋转到 ACS (Attitude Control System, 姿态控制系统) 坐标系,即可得到 roll、pitch、yaw 角。

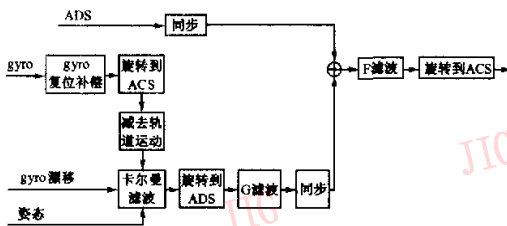


图 3 姿态处理流程

由 Landsat7 相邻 gyro 采样的姿态差异而导致的地面变化往往在 1m 以下,由于一个扫描行的扫描时间约为 71ms 多一点,可见相邻扫描行之间的对齐是比较好的。

### 1.3 建立输出空间像素在输入空间的对应像素位置

如何寻找输出空间像素在输入空间的对应像素位置,方法如下:

#### 1.3.1 划分输入空间网格和确定输出空间采样间距

扫描镜运动的非线性和其他各种因素将导致输入平面上网格的细密划分。在沿着镜扫描(采样)方向,每 96pixels 为 1 格,一行图象的前 6240pixels 共计 65 格,多余 pixels 再构成第 66 格。网格间隔和角位移传感器采样率也保持一致(采样方向的网格密度大于角位移传感器采样率的两倍)<sup>[1]</sup>,而垂直镜扫描方向,则按照扫描行划分(如图 4 所示)。

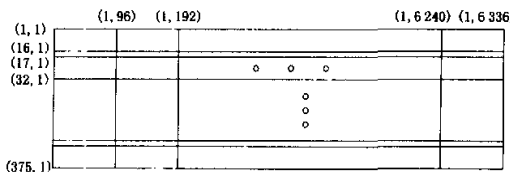


图 4 输入平面上的网格划分

在输出空间上,由于波段 1~5、7 的分辨率是 30m,故而确定其在行列方向每隔 30m 进行一次输

出采样;由于波段 6 的分辨率是 60m,故而确定其在行列方向每隔 60m 进行一次输出采样;由于全色波段的分辨率是 15m,故而确定其在行列方向每隔 15m 进行一次输出采样。按照这样的对应关系,视线产生、投影中得到的输出值就被转换为输出空间上的采样值。

#### 1.3.2 建立输入到输出的正向投影因子和输出到输入的逆向投影因子

按照视线产生、投影步骤来计算与输入平面网格内点对应的输出坐标,而根据这些值建立的投影方程如下:

正向投影(输入到输出)方程

$$S_{out} = a_0 + a_1 \times S_{in} + a_2 \times L_{in} + a_3 \times S_{in} \times L_{in} \quad (12)$$

$$L_{out} = b_0 + b_1 \times S_{in} + b_2 \times L_{in} + b_3 \times S_{in} \times L_{in}$$

反向投影(输出到输入)方程

$$S_{in} = c_0 + c_1 \times S_{out} + c_2 \times L_{out} + c_3 \times S_{out} \times L_{out} \quad (13)$$

$$L_{in} = d_0 + d_1 \times S_{out} + d_2 \times L_{out} + d_3 \times S_{out} \times L_{out}$$

其中  $S_{in}$ 、 $L_{in}$  是输入列、行号,  $S_{out}$ 、 $L_{out}$  是输出列、行号,其余为线性投影因子。

如果采用网格内的 4 个点来建立方程组,则正反投影方程组各含 4 个方程,通过解方程组,可以得到该网格的正反投影因子;如果采用网格内多于 4 个点来建立方程组,则正反投影方程组各含 4 个以上方程,这时候可采用最小二乘法来解得各个正反投影因子。

#### 1.3.3 寻找输出空间像素在输入空间中的对应位置

要找到该对应位置,必须先找到输出像素位于输入空间哪个网格中,然后才能根据这个网格的逆向投影因子来计算与输出像素对应的输入像素。详细步骤如下:

(1) 寻找一个大约的多项式,作为该输出像素投影到输入空间的第 1 个多项式,通常可以任选一个网格的逆向投影因子来组成多项式;也可以适当选择另一批输入输出对应数据和使用最小二乘法来建立另一组投影因子。

(2) 使用大约的多项式将输出像素投影到输入空间,首先得到一个给定输出像素在输入空间的位置估计值。

(3) 计算该值落入输入空间中的哪个网格中。

(4) 使用该网格的反向投影模型来将输出像素再投影到输入空间,即得到另一个位置。

(5) 计算这个位置落入输入空间中哪个网格中。

(6) 比较第(3)步和第(5)步得到的两个网格是

否相同,如果是,表明正确的输入网格已经找到;如果否,则以第(5)步得到的网格为新的网格,继续第(4)步,直到找到正确的网格为止。

(7) 得到确切的输入网格后,按照该网格的逆向投影因子,计算实际的输入坐标。

(8) 如果迭代过程中,输入网格在上下两个扫描行中来回振荡,那么说明输出像素落入了扫描间隙中了,这时计算实际像素的方法则另当别论,详见重采样部分。

#### 1.4 重采样过程

重采样步骤如下:

(1) 遍历输出空间的每个像素,重复第(2)~(5)步。

(2) 使用大约的多项式,把输出像素投影到输入空间。

(3) 迭代决定输出像素实际应该在哪个输入网格单元中。

(4) 得到与输出像素对应的输入像素位置。

(5) 执行重采样,并去掉探测器延迟的影响,即可最终得到输出值。

假若输入坐标位于网格内,那么按照该输入坐标,使用双线性插值法、三次卷积法、三次样条法、最近邻域法等方法之一,即可得到像素值。

假若输入坐标位于网格间隙中,由于其不再落入一个矩形中,因此需要按以下步骤处理<sup>[1,4]</sup>:

(1) 将上下两个扫描网格对齐,包括延迟造成的影响。

(2) 按照上面那个网格的投影因子计算输出落在什么具体位置上。

(3) 按照这个位置的横坐标寻找上面那个网格的最后一行的横坐标和下面那个网格的第1行的横坐标以及对应位置的扫描间隙。

(4) 使用单线性插值,按照上下两个横坐标计算各自位置的像素值。

(5) 根据上下两个像素值和扫描间隙及纵坐标,使用单线性插值得到输出值。

在重采样和插值时,需要去除由每个波段的每个探测器的延迟所造成的影响,大家知道,在决定沿着镜扫描方向角时,使用的是理想的探测器位置,事实上由于探测器位置与理想位置有微小的偏差,即小于0.2探测器瞬时视场,因此通过寻找输出空间像素在输入空间中的对应位置这一步来找到位置,其实际上是相对于理想探测器位置的,可有如下

两种方法解决这个问题:一种方法是先插值得到理想探测器位置的像素值,因为探测器实际位置和理想位置的偏差不是探测器瞬时视场的整数倍,所以如果对齐,则需要重采样,并插值输出平面,这种方法在处理一景图象时,由于将涉及大量临时数据的读写存储,同时由于两次插值取四舍五入,精度将受到影响,故而效果不是很好;另一种方法是参照这些非理想位置和理想位置的距离来修正双线性插值的距离或三次卷积插值的权。

如图5所示, $v_{0,0}$ 、 $v_{0,1}$ 、 $v_{1,0}$ 、 $v_{1,1}$ 分别为4个角的像素值,虚线表示由理想探测器构成的矩形,实线表示由实际探测器构成的平行四边形,探测器延迟量为 $m$ 和 $n$ ,如图5表示的 $m$ 和 $n$ 为正; $PA$ 长 $x$ , $PB$ 长 $y$ ,分别表示插值点离开理想位置的距离; $PM$ 长 $l_x$ , $PN$ 长 $l_y$ , $PN$ 平行于斜边, $M$ 为 $PA$ 和斜边的交点。

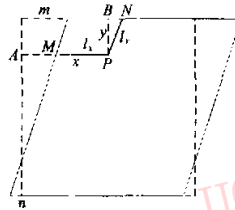


图5 修正双线性插值

可用下式计算得到 $l_x$ 和 $l_y$

$$\begin{aligned} l_x &= x - m + (m+n)y \\ l_y &= y \sqrt{1 + (m+n)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

当 $l_x < 0$ 时,取左边的平行四边形,当 $l_x > 1$ 时,取右边的平行四边形,而利用双线性插值法计算的重采样输出值 $v$ 为

$$v = (1-l_x) \times (1-l_y) \times v_{0,0} + l_x(1-l_y) \times v_{0,1} + (1-l_x) \times l_y \times v_{1,0} + l_x \times l_y \times v_{1,1} \quad (15)$$

## 2 实验结果

运用以上方法来对2001年5月19日获取的全球参考系统坐标为123/032的0级数据,进行系统级几何校正,并选用波段1作为实验数据。为了综合考虑节约计算时间和计算精度,计算投影因子时,采用4个点组成方程组,重采样时采用修正线性插值法。

图6(a)为未校正图象,图6(b)为用本文给出算法得到的校正结果。由该两图可知,校正前图右侧的山脊有一处出现不连续,大约错位了1pixel,而校正后图中则消除了这个错位现象。

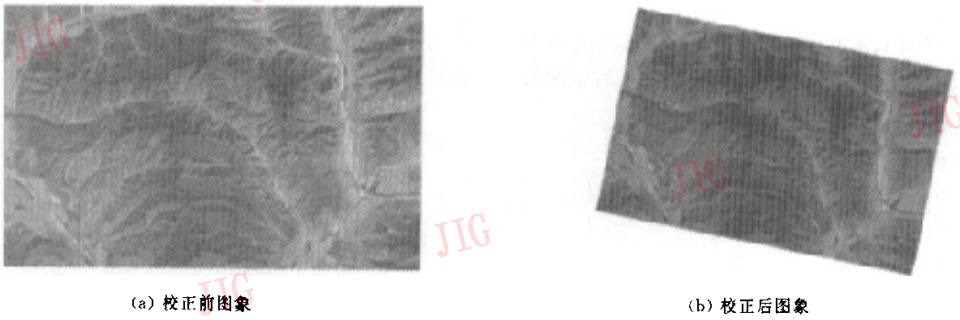


图 6 北京某地区卫星图象

### 3 几何校正算法评估

#### 3.1 定位精度

定位精度指的是几何校正后得到的图象点的地理坐标和真实的地理坐标之间的差异。

所采用实验数据中,真实的地理坐标为:

左上角经纬度:115.773°,41.305°;

右上角经纬度:118.012°,40.980°;

左下角经纬度:115.286°,39.686°;

右下角经纬度:117.473°,39.369°

实验计算得到的地理坐标为:

左上角经纬度:115.770°,41.309°;

右上角经纬度:118.008°,40.984°;

左下角经纬度:115.283°,39.690°;

右下角经纬度:117.470°,39.373°

根据计算得到的经纬度和实际经纬度之间的差,可得到这 4 个角的定位误差分别为 495.518m、571.377m、548.317m、518.047m。

分析产生误差的原因,主要来自于系统测量误差,包括星历数据测量误差、时间系统误差、地极漂移、姿态测量误差、扫描镜测量误差;另外,地球模型、姿态滤波和融合模型误差、扫描镜模型误差也是重要一部分,计算过程中的浮点数累积误差也不能被忽略。

改进措施有,采用地面定标数据,寻找更好的姿态模型和扫描镜模型等方法,均将留待今后进一步深入研究。

#### 3.2 变形度

如果图象上两个点的坐标分别为  $(i_1, j_1)$  和  $(i_2, j_2)$ , 图象分辨率为  $p$ , 那么图象上该两点之间的距离为

$$s_1 = p \sqrt{(j_2 - j_1)^2 + (i_2 - i_1)^2} \quad (15)$$

如果按照两点的真实地理坐标计算得到的实际距离应为  $s_2$ , 那么变形度定义为

$$M = \frac{s_1 - s_2}{s_2} \quad (16)$$

由实验数据计算得到的变形度分别为:

从左上角到右上角的变形度为 0.0006;

从左下角到右上角的变形度为 0.0029;

从左下角到右下角的变形度为 0.0005;

从左上角到左下角的变形度为 0.0006。

由于几何校正过程采用了理想的地球椭球模型,因此当存在山坡或低谷时,必然会造成变形。实验采用的地图,其左上角和右上角山较多,左下角有少量山,右下角是地势较低的平地。由于各种误差和地形的综合作用,因而使从左下角到右上角的变形度相对较大。

#### 3.3 行间相关度

取上下两行图象数据,上行数据以  $U$  表示,下行数据以  $V$  表示。在  $V, U$  中心各取一段 512pixels 长的数据(坐标  $i=256 \sim 767$ ),  $U$  段可在中心左右稍做移动,然后计算  $V, U$  两个数据段的相关函数。

$$R(N) = \frac{\sum_{i=256}^{767} (V_i - \bar{V}) \cdot (U_{i+N} - \bar{U}_N)}{\left\{ \sum_{i=256}^{767} (V_i - \bar{V})^2 \cdot (U_{i+N} - \bar{U}_N)^2 \right\}^{1/2}} \quad (17)$$

其中,  $\bar{V}, \bar{U}_N$  分别为两个数据段的均值。

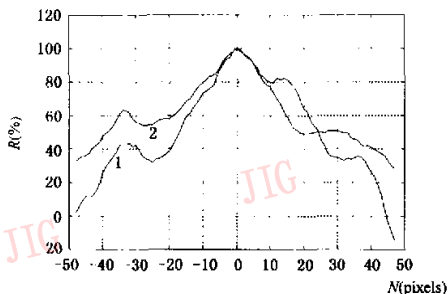
当相关函数为最大时(图 7), 则认为相匹配,这时的  $U$  段移动的距离  $N$  即为误配值<sup>[5]</sup>。

实验时,分别抽取了一幅图象开始、末尾的各两行进行实验。

—景图象开始时,取 16、17 行,正好为两个扫描行,其校正前两行间误配为 0,而校正后误配为 0。图 7(a)为该景图象校正前后两行的相关函数曲线图,曲线 1 为校正前的相关函数曲线,曲线 2 为校正后

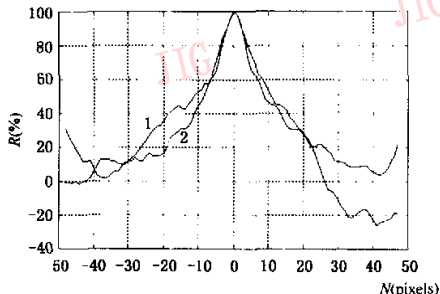
的相关函数曲线。

—景图象末尾时,取 598 4、598 5 行,正好是两行扫描行。校正前两行间误配为 1,而校正后误配为



(a) —景图象开始时,校正前后两行相关函数曲线

0。图 7(b)为该景图象校正前后两行的相关函数曲线图,曲线 1 为校正前的相关函数曲线,曲线 2 为校正后的相关函数曲线。



(b) —景图象末尾时,校正前后两行相关函数曲线

图 7 校正前后两行相关函数曲线

从实验结果可以看出,校正后误配现象有所改善,达到了系统级几何校正的要求。如果要测量小于 0.5 个瞬时视场的配准精度,则可以将原始图象数据进行过采样。由于文章研究的是系统级校正,精度只要求达到像素级精度。

## 4 结论

Landsat7 系统级几何校正算法由于把焦平面成像投影到了地图坐标系统中,不仅解决了双向扫描和姿态波动,以及 ETM+ 自身特点所带来的定位和校正的问题,并初步解决了扫描非线性、卫星运动、姿态波动等造成的几何失真问题,即达到了系统级校正所需的精度要求,从而为进一步的精校正打下了良好的基础。

如果不考虑计算效率,重采样可使用更为复杂的算法(如三次卷积法、三次样条法),星历数据可采用三阶多项式拟合,而计算投影因子时可采用更多的点,以构造更为高阶的投影方程。通过实验验证,采用拟合和插值的星历数据计算,其地面误差小于 300m,而拟合曲线在两端则具有较大的误差,一般在数据有限时采用插值方法优于拟合方法;同时,由于采用复杂的重采样算法带来的精度提高部分往往被量化噪声掩盖。因此,为了同时保证精度和计算速度,采用简化方法也不无可取之处。

## 参考文献

- 1 USGS EROS Data Center. Landsat7 image assessment system (IAS) geometric algorithm theoretical basis document[R]. Ver

3. 2, Sioux Falls, South Dakota, USA, 1997.

- 2 Martin Marietta Astro Space. Landsat7 system data format control book (DFCB) volume IV-wideband data[R]. Ver H, 23007702-IVH, Princeton, New Jersey, USA, 1998.
- 3 NASA Goddard Space Flight Center. Landsat7 system calibration parameter file definition[R]. Ver 1, 430-15-01-002-0, Greenbelt, Maryland, USA, 1998.
- 4 Fischel D. Validation of the thematic mapper radiometric and geometric correction algorithms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1984, GE-22(3). :237~242.
- 5 Jacky Desachy. Investigation of Landsat-4 thematic mapper line-to-line and band-to-band registration and relative detector calibration [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1985, 51(9):1291~1298.



**唐海军** 1975 年生,1996 年获北京理工大学光电工程学士学位,1999 年获北京理工大学光电工程工学硕士学位,现为中国科学院电子学研究所现代信息技术研究室博士研究生。1999 年始从事遥感卫星地面处理研究。



**向茂生** 1964 年生,1996 年获中国科学院遥感应用研究所博士学位,研究员。从事遥感卫星地面处理研究、雷达信号处理技术。



**朱敏军** 1943 年生,研究员,博士生导师。从事微波成像理论研究、雷达信号处理技术。