

HJ-1B 卫星红外扫描图像的几何定位和精校正方法研究^①

方 莉^② 刘 强 柳钦火 葛 亮

(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

摘 要 根据环境与灾害监测预报小卫星 1B 星(HJ-1B)携带的红外扫描相机的成像几何特性,提出了一种基于成像过程模拟的几何定位和精纠正方法。该方法首先根据共线方程对 HJ-1B 红外相机的图像初定位,再基于一幅更高分辨率的已校正的遥感图像,按照红外相机的成像几何模拟生成若干图像块,与待纠正的红外相机图像匹配,用最小二乘修正偏移量,最后根据修正量去校正有误差的星历参数,从而获得整幅图像的精确定位信息。经过模拟数据和 MODIS 数据的检验,所提出的算法是可行的,定位精度有明显的提高。

关键词 几何定位,几何纠正,HJ-1B,成像模拟

0 引 言

面对日益严峻的灾害和环境形势,传统的监测手段难以满足国家减灾与环境保护事业发展的需求。在这种情况下,环境与灾害监测预报小卫星星座孕育而生。我国计划 2008 年 7 月先发射由两颗光学小卫星和 1 颗合成孔径雷达小卫星组成的“2 + 1”小卫星星座,在随后的 5 年内实现由 4 颗光学小卫星和 4 颗合成孔径雷达小卫星组成小卫星星座。卫星传感器包含宽覆盖 CCD 相机、红外相机、超光谱成像仪、合成孔径雷达 4 种载荷。环境与灾害监测预报小卫星星座的建立将有利于迅速、准确、较低成本地获取灾害和环境信息,提高我国的减灾和环境保护能力。

HJ-1B 卫星是环境与灾害监测预报小卫星星座中的一颗星,将于 2008 年 7 月发射,它携带两台可见光相机和一台红外相机,其中红外相机有 4 个波段,幅宽 720km,其中近红外、短波红外和中红外的分辨率为 150m,热红外分辨率为 300m。红外相机数据可用于反演地表温度、火点识别、地表蒸散、热惯量、缺水指数和干旱指数等,服务于火灾、旱情、地表能量平衡的监测。为了保证地表参数的反演精度和提高变化检测的质量,红外图像的几何定位和精纠正是一个基础而重要的环节。HJ-1B 与美国的 EOS、NOAA 等这样一些中低分辨率的遥感卫星类似,会由于扫描带宽、扫描角度大,再加上轨道参数

和姿态参数的误差、地球自转及地形起伏等因素的影响,图像几何畸变大^[1],初步几何定位的结果一般无法满足高精度分析的要求,需要进行进一步的精校正^[2-4]。高精度的几何定位是后续产品生产的保证,因此,对于所有卫星数据产品,如美国的对地观测卫星(EOS)的中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS),及 NOAA 卫星的主要探测仪器 AVHRR 等,定位算法的研究一直是研制中的一个关键环节。MODIS 的定位算法在技术手册《MODIS Level 1A Earth Location Algorithm Theoretical Basis Document》中就有详细的描述^[5],主要包含三个方面:一是生成对应于空间元素或探测器的物空间观测向量,二是计算观测向量与地球的交点的位置,三是子像元定位。基于上述算法,本文研究了 HJ-1B 红外扫描相机的定位算法,提出了一种基于成像过程模拟的几何定位和精纠正方法。

1 HJ-1B 红外扫描图像几何定位和精纠正方法

1.1 HJ-1B 红外扫描图像几何处理流程设计

结合 HJ-1B 红外相机自身的扫描特性,本文提出了一种基于成像模拟的图像定位和精纠正方法,并对几何处理流程(流程图见图 1)做了如下的设计:

第一步是依据卫星星历参数进行像元初定位。由于共线方程的建立需要实时的卫星内外方位元

① 中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-303, KZCX1-XB2-09-02)和国家重点基础研究发展计划(2007CB714402)资助项目。
② 女,1983 年生,博士生;研究方向:定量遥感,联系人,Email:li_fang113@163.com
(收稿日期:2007-12-27)

素,而实时的卫星位置和姿态参数的获得精度往往不够高,因此这一步只能实现图像的粗定位。根据 MODIS 图像定位的算法文档,获得的初定位误差可能在 0.3~1km 之间。

第二步是基于图像块匹配的局部几何精纠正。我们以一幅分辨率高于 HJ-1B 红外图像并经过精纠正后的遥感图像作为参考图像,并且其光谱波段与 HJ-1B 卫星的波段相近。将参考图像严格依照 HJ-1B 红外相机扫描的过程模拟生成 HJ 卫星的模拟图像块。然后,将模拟图像块与 HJ-1B 图像配准,配准的同时完成对 HJ-1B 局部图像的纠正。

第三步是修正卫星的星历参数,进而纠正整幅图像。通过图像块匹配获得一定数量的控制点,就可以用平差方法修正卫星星历参数。当卫星的内外方位元素更新以后,我们就能轻松地修正整幅 HJ-1B 图像的每一个像元的定位信息。最后,根据更新的经纬度信息来校正整幅图像。我们定义图像坐标系统和单元格分辨率,将每一个像元投影到地图坐标系中,再通过内插和外推可以得到地图上每一个点的投影坐标。

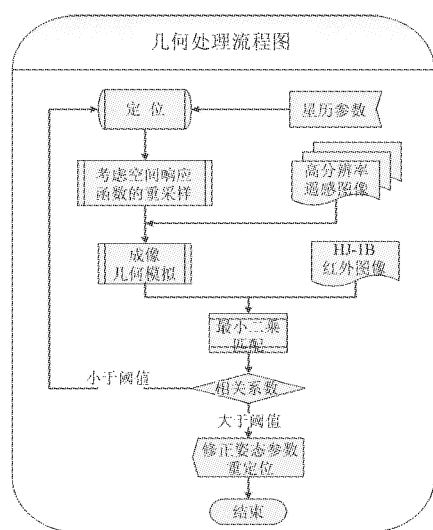


图 1 几何处理流程

1.2 基于星历参数的像元初定位

HJ-1B 红外相机是多元并扫成像,短波红外、中红外和近红外是 20 元并扫,热红外是 10 元并扫,扫描型的传感器伴随着更多的动态误差因素,如棱镜的旋转、地球的旋转、卫星的姿态等。每一个扫描带的每一列像元都有自己的投影中心。为了简化一下问题,我们可以认为投影中心在一次扫描过程中不变。比如说,20 元并扫的波段,一次扫描成像 20 行,这 20 行为一个扫描带,共一个投影中心。这样,

对于每一个条带,根据传感器成像时的位置、姿态和扫描角度,建立单独的共线方程,来实现图像像元坐标与地心坐标的转换。我们的共线方程是建立在地心直角坐标系下,引进地心直角坐标系,这样既能方便地与传感器坐标系直接进行三维空间线性变换,又能结合大地测量知识和地图投影方程,将图像坐标系转换为地理经纬度坐标,进而转换为任意一种地图投影坐标^[6]。共线方程描述如下:

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}_s + \lambda_p \cdot R_D \cdot R_A \cdot R_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $[0 \ 0 \ -f]^T$ 和 $[G_x \ G_y \ G_z]^T$ 分别是地面点在图像坐标系中和地心直角坐标系中的坐标, $[X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ 是摄影中心在地心直角坐标系下的坐标。旋转矩阵 R_θ 是扫描矩阵。图像坐标系与地心直角坐标系的转换中有两个起关键作用的旋转矩阵,传感器姿态矩阵 R_A 和切平面坐标系与地心坐标系转换矩阵 R_D , 其中 $R_A = R(\kappa) \cdot R(\bar{\omega}) \cdot R(\varphi)$, $R_D = R(\lambda) \cdot R(90^\circ - B_s) \cdot R(\alpha)$ 具体表达形式略,可参考文献^[6]。

将共线方程和地球椭球方程

$$\left(\frac{G_x}{R_e + H}\right)^2 + \left(\frac{G_y}{R_e + H}\right)^2 + \left(\frac{G_z}{R_p + H}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

联立求解,即可得到每个像元的在地心直角坐标系中的坐标。其中 H 是地物点的高程值,由于每个像元的地面高程是不一样的,所以精确计算时需要数字高程模型(digital elevation model, DEM)的支持。参考文献^[7]详细介绍了迭代计算法的方法,在此不重复叙述。

1.3 考虑像元空间响应函数的成像模拟

HJ-1B 红外相机的探测器单元沿飞行方向并排设置,扫描棱镜在垂直于飞行方向上扫描,最大扫描角度为 29° 。由于扫描角度较大以及地球曲率的影响,图像存在一定程度的几何畸变,而且沿轨和跨轨方向的空间分辨率随扫描角度的增大而变大。这就导致了相邻扫描行条带之间产生了重叠,并且重叠度随着角度的增加而增大。这种 bow-tie 效应在其他的扫描类传感器中也是存在的,如 AVHRR 和 MODIS^[8,9]。因此,我们在模拟 HJ-1B 红外图像时,这种扫描畸变也是要考虑的,这样能保证模拟的图像更“真实”一些^[10]。

首先我们需要一景具有较高空间分辨率,波段与 HJ-1B 红外扫描波段相近,且经过几何精校正的

图像作为参考图像。按照 1.2 节中多元并扫成像模型进行像元定位, 根据坐标值在高分辨率图像中重采样。由于大倾角扫描图像存在像元瞬时视场的畸变问题, 所以不能只对高分辨率图像进行简单的重采样, 而需考虑每个像元的空间响应函数。我们将二维连续的空间响应函数离散化成 $K \times K$ 的模板, 在本文中 K 取值为 5。模板中的每一个子像素也依据类似的像元定位算法计算地面投影点位置, 从高分辨率图像中对应位置插值出灰度值 (digital number, DN), 然后根据模板的权函数, 加权平均计算出该像元的 DN 值。图 2 给出了像元空间分辨率随扫描角度的变化情况, 图 3 示意了空间响应函数模板的设置。这样, 我们就严格地按照 HJ-1B 传感器的成像过程, 充分考虑了扫描成像的像元形变以及空间响应函数, 从高分辨率的参考图像中模拟得到了 HJ-1B 模拟图像。这些模拟图像具有与 HJ-1B 卫星相似的成像几何, 并具有更高精度的定位信息。

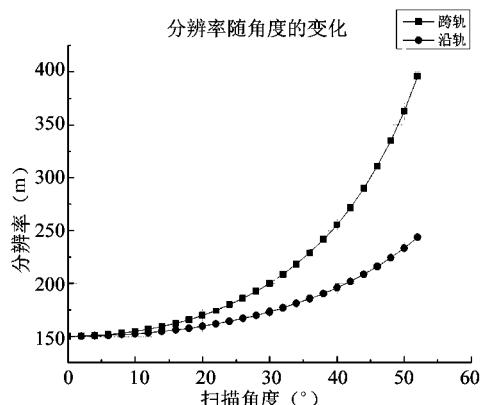


图 2 分辨率随扫描角度的变化

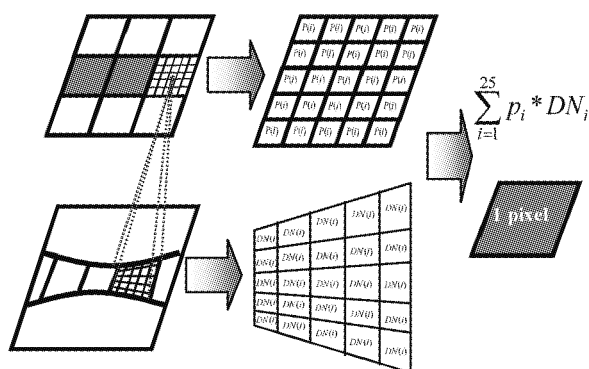


图 3 空间响应函数模板

需要强调的是, 我们不是仿真模拟整幅图像。因为 HJ-1B 红外相机幅宽 720km, 远超过一景高分辨率图像覆盖的地理范围, 所以我们只能从多景高分辨率图像中生成一系列图像块的模拟图像。我们相信, 经过一段时间的积累, 在中国范围内, 找到一

定数量的分布均匀的参考图像块是可行的, 也就是说, 在每一景 HJ-1B 红外扫描图像上, 我们都能期待找到一定数量的参考图像块, 这些参考图像块就类似控制点一样, 用来修正成像时卫星的位置和姿态参数。为了简化问题, 我们模拟的图像块都限制在同一个扫描条带中。

1.4 耦合成像模拟的最小二乘匹配

接下来我们要基于成像模拟, 通过匹配的方法对图像块进行精确定位。为了达到亚像元定位精度, 我们选用最小二乘匹配方法。由于是对模拟图像块的匹配, 其窗口比较小, 而且模拟图像块与待匹配的图像块有相同的成像几何, 所以我们可以简化地把几何误差看作是 x 和 y 方向上的位移, 不考虑复杂的仿射形变, 即我们仅考虑两幅图像之间辐射一次正形变换和零次几何变换的关系, 其表达式为

$$\begin{aligned} G_s(x_1, y_1) &= h_0 + h_1 G_H(x_2, y_2) + e(x, y) \\ &= h_0 + h_1 G_H(a + x_1, b + y_1) + e(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别是模拟图像块和 HJ-1B 红外图像块中像元的坐标, a 和 b 是零次几何形变 x 和 y 方向上的位移量, h_0 和 h_1 是线性辐射畸变参数。 G_s 和 G_H 分别是两个图像块的灰度值, $e(x, y)$ 是误差^[11]。最小二乘匹配算法是将方程(3)泰勒一阶线性展开后, 迭代地求出 4 个未知量: 两个位移参数 a , b 和两个辐射变化因子 h_0 和 h_1 。不断地调整位移量, 直到灰度差的平方和最小。

本算法将成像几何模拟耦合到匹配的过程中。耦合过程如图 1 所示。首先基于星历参数粗定位, 按照有误差的初定位坐标在高分辨率的参考图像上模拟一个 HJ-1B 红外图像块, 将模拟图像块和待匹配图像块进行最小二乘匹配, 然后用最小二乘匹配的改正值来修正的定位信息, 接下来, 重新定位, 重新生成模拟图像块, 重新匹配, 如此循环, 直到匹配后图像的相关系数大于阈值, 则认为纠正结束。最小二乘匹配法虽然有灵活和高精度的优良特性, 但是初值的选取对迭代的次数和匹配精度有一定的影响。事实上, 我们基于共线方程的初定位, 已经为最小二乘匹配提供了很好的初始值。

2 实验和结果

由于 HJ-1B 卫星还在研制阶段, 真实的图像还没法得到, 所以本文先用模拟的图像做了实验。用精校正后的 20m 分辨率的 CBERS-II 图像作为参考图像, 影像覆盖新疆石河子地区 (经度范围 $85.84^\circ \sim$

86.6°, 纬度范围 44.6° ~ 45.1°), 它的第 4 波段与 HJ-1B 的第 1 波段接近。我们按照 1.3 节的模拟方法, 以 CBERS-II 图像作为参考, 模拟生成模拟图像块。图 4 和图 5 分别是 CBERS 图像和生成的模拟图像。

为了定量地检验定位算法, 我们人为地给外方位元素添加噪声, 添加的姿态噪声包括正弦振动噪声和高频随机抖动噪声。外方位元素的误差会导致定位的误差。用有噪声的外方位元素模拟出一个待定位的检验图像, 接下来就按照 1.3 节的成像模拟和 1.4 节的匹配精纠正算法, 对这个待定位的模拟图像进行改正。我们从模拟图像块中挑选了 4 个检验点, 其所在条带添加的姿态噪声量、姿态噪声引起的投影坐标的偏移量及算法对误差的修正量如表 1 所示。从表中可看出, 随着注入的姿态误差值加大, 算法对模拟图像的纠正精度有所下降, 这是由于姿态误差加大后, 扫描成像的几何畸变较大, 图像本身的相似度已经严重降低, 在此基础上进行的基于灰度的最小二乘匹配, 效果不太理想。另外可以看出, 在姿态误差量级适中时, 对定位误差的纠正还是能达到预期目标。

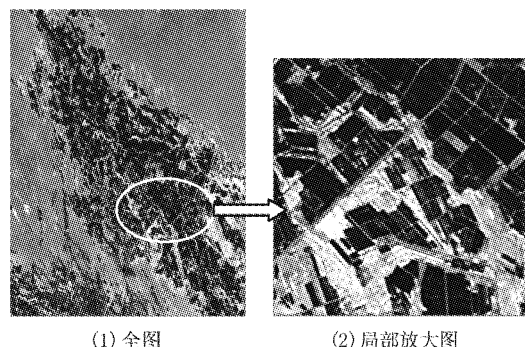


图 4 CBERS 原图像

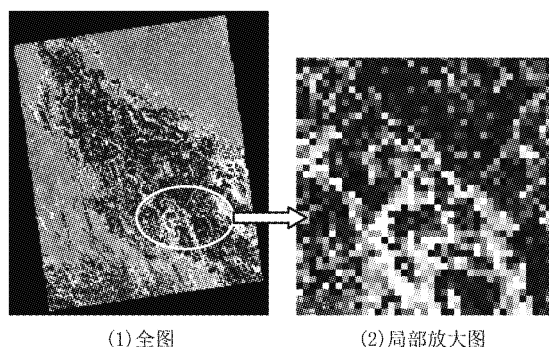


图 5 模拟图像

表 1 对模拟图像的纠正结果

卫星姿态参数误差(°)			像元偏移量(m)		改正量(m)		相关系数	
$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$	$\Delta\kappa$	Δx	Δy	ΔX	ΔY	纠正前	纠正后
0.0327	0.0651	0.0696	1013.9037	-845.2832	994.9920	-837.3790	0.9734	0.9997
0.0655	0.1303	0.1392	-1689.8670	2026.3318	-1498.4310	2228.2270	0.9173	0.9455
0.2376	0.3024	0.3114	-4839.6732	4680.8601	-4191.7670	4419.3041	0.8789	0.8870
0.0057	0.6514	0.6961	-8422.0559	10073.7461	-8126.8000	10438.4220	0.6872	0.7921

由于 MODIS 的成像方式和 HJ-1B 红外相机的成像方式相近, 我们还用 MODIS 图像对算法进行了验证。使用的数据是 2006 年 6 月的 4 景 MODIS-

Terra 影像, 图像块的位置仍然是新疆石河子地区, 对 MODIS 图像块 x 和 y 方向的定位改正量以及校正前后图像的相关系数详列于表 2。MODIS 定位产

表 2 对 MODIS 图像的纠正结果

日期	X 方向纠正量(m)	Y 方向纠正量(m)	相关系数(纠正前)	相关系数(纠正后)
06/04/2006	-3.52761	14.1183	0.876103	0.877318
06/06/2006	13.35	22.2634	0.860323	0.864653
06/11/2006	3.83713	10.4413	0.868121	0.873791
06/22/2006	6.02284	6.99164	0.935841	0.937207

品的精度已经比较高, 误差已经在 1 个像元只内。通过我们的算法可以在亚像元精度上进一步修正 MODIS 定位产品。高精度定位对于定量遥感的一些应用, 比如 MODIS 数据产品与高分辨率卫星数据产品的对比验证, 是非常重要的。

3 结论

几何定位和精纠正是环境与灾害监测预报小卫星数据处理的基本环节, 是各种数据产品生成的基

础。本文针对 HJ-1B 红外相机,提出了几何定位和纠正的构想和处理流程。并用模拟图像和 MODIS 图像进行了初步检验,结果表明此方法是可行的,定位精度的提高是明显的。

在本算法中,传感器成像模拟是重要的一步,模拟图像的“逼真度”影响到后续匹配纠正的精度。但在卫星发射前,传感器在太空中的运作状态还存在很多不确定因素,因此,对传感器特性,尤其是在太空环境中的特性变化研究还需要进一步关注,在建立“真实”的成像几何模型方面还需要深入研究。另外,文中仅对处理流程的前两步做了详尽的描述,最后一步对实时星历参数的修正还未完成,有待卫星发射后,将整个图像定位和纠正流程补充完成。

参考文献

- [1] Wolfe R E, Nihama M, Fleig A J, et al. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83:31-49
- [2] Emery W J, Ikeda M. AVHRR image navigation: summary and review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1989, 10: 45-46
- [3] Moreno J F, Melia J. A method for accuracy geometric correction of NOAA AVHRR HRPT data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 204-226
- [4] Rosborough G W, Baldwin D G, Emery W J. Precise AVHRR image navigation. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 644-657
- [5] MODIS Science Data Support Team, MODIS level 1A Earth Location Algorithm Theoretical Basis Document version 3.0
- [6] 孙家炳,舒宁,关泽群.遥感原理、方法和应用.北京:测绘出版社,1997.198-206
- [7] 李巧技,张吴明,阎广建等.月球卫星三线阵 CCD 影像模拟.北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3): 298-302
- [8] Schowengerdt R A. Remote sensing models and methods for image processing (2nd ed.). *Academic Press*, San Diego, 1997, 100-109
- [9] Wolfe R E, Roy D P, Vermote E. MODIS land data storage gridding and compositing methodology: Level 2 Grid. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36: 1324-1338
- [10] 葛亮. HJ-1-B 红外相机遥感成像模拟研究.[硕士学位论文].北京:中国科学院遥感应用研究所,2007
- [11] 张祖勋,张剑清.数字摄影测量学.武汉:武汉大学出版社,1997.180-191

Research on geometric correction method for infrared scanning camera of HJ-1B small satellite

Fang Li, Liu Qiang, Liu Qinhua, Ge Liang

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

A geo-location algorithm for the infrared scanning camera in the HJ-1B small satellite is proposed in this paper based on pixel navigation and image matching. The algorithm is composed of three steps. The first step is the pixel navigation based on the principles of photogrammetry using the parameters of the satellite ephemeris and attitude information. The second step is to simulate the HJ-1B satellite image with an existing remote sensing image, which is accurately georectified and of higher spatial resolution than the HJ-1B image. The HJ-1B image is then matched to the simulated image using the least-square matching method to find the accurate location of each HJ-1B image pixel. After geo-location, the image can be geo-rectified according to the location of each pixel. In the preliminary test with the simulated image, the geometric correction method is proved feasible in principle as well as in practice.

Key words: geo-location, geometric correction, HJ-1B satellite, image simulation