

# 基于自定义投影网格的多角度多源遥感数据 空间位置精确配准

李 健<sup>1</sup>, 陈圣波<sup>1</sup>, 王羽飞<sup>2</sup>, 于 岩<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

<sup>2</sup> 吉林省防雷减灾中心, 吉林 长春 130062

**摘要** 提出了一种基于自定义投影网格的多角度、多源遥感数据空间位置精确配准方法。以美国地球观测卫星 (EOS) 上搭载的多角度成像光谱辐射仪 (MISR) L2 级产品与中分辨率成像光谱仪 (MODIS) L3 级产品的空间位置精确配准为例, 分析比较了软件 ENVI、HEG、MRT 及所提方法对两种产品进行投影变换时的数据处理能力。将欧洲空间局环境卫星 ENVISAT 的先进沿轨扫描辐射计 (AATSR) 数据与 MISR L2 级产品及 MODIS L3 级产品数据进行配准, 对所提方法进行验证。所提方法解决了常用遥感软件不能直接将 MISR L2 级产品数据与其他遥感数据进行空间位置精确配准的问题, 且对科学数据仅进行一次重采样, 避免了反复重采样可能造成的信息损失。对于类似多角度遥感数据的空间位置精确配准, 所提方法的基本思路和目标同样有效。

**关键词** 遥感; 图像配准; 自定义投影网格; 多角度遥感数据; 多角度成像光谱辐射仪数据

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0528002

## Accurate Spatial Co-Registration of Multi-Angle Multi-Source Remote Sensing Data Based on Self-Defined Projection Grids

Li Jian<sup>1</sup>, Chen Shengbo<sup>1</sup>, Wang Yufei<sup>2</sup>, Yu Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;

<sup>2</sup> Center for Lightning Protection and Disaster Mitigation of Jilin Province, Changchun, Jilin 130062, China

**Abstract** An accurate spatial co-registration method for multi-angle multi-source remote sensing data based on self-defined projection grids is proposed. Taking the accurate spatial co-registration between the multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) L2 products and moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) L3 products carried on American earth observation satellite (EOS) as an example, the data processing abilities of ENVI, HEG, MRT softwares and the proposed method when the reprojection is performed on two kinds of products are compared and analyzed. In order to verify the proposed method, the advanced along track scanning radiometer (AATSR) data from the environmental satellite ENVISAT of European Space Agency are co-registered with the MISR and MODIS data. The proposed method solves the problem that MISR L2 product data cannot be directly and accurately registered with other remote sensing data by using common remote sensing data processing softwares, which only resamples once and can avoid the possible information loss caused by repeated resamples. The basic ideas and objectives of the proposed method are also applicable to the spatial accurate co-registration of other similar multi-angle remote sensing data.

**Key words** remote sensing; image registration; self-defined projection grid; multi-angle remote sensing data; multi-angle imaging spectroradiometer data

**OCIS codes** 280.4788; 350.2660; 100.4550

收稿日期: 2016-10-10; 收到修改稿日期: 2017-01-12

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0353)

作者简介: 李 健 (1981—), 男, 博士研究生, 主要从事定量遥感方面的研究。E-mail: OriNatureLi@163.com

导师简介: 陈圣波 (1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感、月球遥感探测方面的研究。

E-mail: chensb@jlu.edu.cn

# 1 引 言

不同传感器、不同时相、不同观测角度的遥感数据之间空间位置的精确配准是遥感数据产品交叉验证<sup>[1-3]</sup>、目标双向反射分布函数(BRDF)特征研究<sup>[4-5]</sup>、多源遥感数据综合反演<sup>[6-7]</sup>和长时间序列生物地球物理/化学参数分析<sup>[8-9]</sup>的基础。

美国地球观测卫星(EOS)上搭载的多角度成像光谱仪(MISR)通过在9个角度同时获取多光谱成像数据的方式,直接观测目标的方向谱信息,为研究人员提供了特有的空间基多角度遥感观测信息源。MISR数据与其他传感器数据进行空间配准是开展相关研究和应用的前提。依据配准目标数据源的特征和研究应用的自身需求,包含MISR数据的配准大体分为以下三类:基于离散点位的遥感反演产品验证方法<sup>[10-11]</sup>,MISR与其他较高空间分辨率遥感数据(如增强型专题制图仪)的配准<sup>[6,12]</sup>,以及直接使用MISR L3级产品数据与其他遥感数据配准<sup>[13]</sup>。基于离散点位的遥感反演产品验证方法只关注验证点位的图像配准结果对比,不考虑整景图像上逐个像素的对应关系。MISR与其他较高空间分辨率遥感配准时,两种图像分别进行投影变换,设定允许误差,但并未预定义精确匹配的目标投影格点。还有一些工作直接使用MISR L3级产品,不涉及L2级产品的空间斜轴墨卡托(SOM)投影和分块偏移存储方式这些特殊问题。此外,投影到经纬度格点的变换不考虑相同大小经纬网格覆盖实际地表面积的纬向差异。本文针对这些问题,以及进行MISR与中分辨率成像光谱仪(MODIS)BRDF产品逐像素对比分析时对科学数据空间位置精确配准的实际需求,提出了一种基于自定义投影格点的多角度多源遥感数据空间位置精确配准的方法,以EOS MISR L2级产品与MODIS L3级产品的空间位置精确配准为例,分析比较了软件HEG、MRT、ENVI及所提方法对产品MIL2ASLS和MCD43A1进行投影变换时的数据处理能力。将欧洲空间局环境卫星ENVISAT的先进沿轨扫描辐射计(AATSR)数据与MISR L2级产品及MODIS L3级产品数据配准,以验证所提方法的基本思路。

# 2 数 据

## 2.1 MISR L2 级产品数据

MISR L2级产品数据所采用的SOM投影是基于斜轴墨卡托投影的空间基地图投影,其参考经线沿星下点轨迹变化,实现了把地理经纬度映射到与MISR观测区域基本一致的坐标系统上<sup>[14]</sup>。SOM投影很好地模拟了卫星动态成像的物理过程,从理论上讲,该投影能消除卫星飞行、轨道进动、地球自转、地球曲率等因素造成的图像几何变形<sup>[15-16]</sup>。MISR L2级产品数据按条带存储,地理区域跨度巨大,不能直接用地球观测系统卫星专用层级式数据格式(HDF-EOS)网格(grid)的概念进行处理。为简化数据处理和存储过程,各轨(path)数据沿星下点轨迹方向被划分为一系列自定义大小相同的矩形SOM块(block),各个块都设置有一个偏移量,形成特有的堆栈式数据块(stacked block)结构,如图1(a)、(b)所示<sup>[17]</sup>。一个完整path由180个block组成。图1(c)由MISR中编号An的相机第116轨部分成像数据构建。本文使用的MISR数据为L2级产品MIL2ASLS数据。

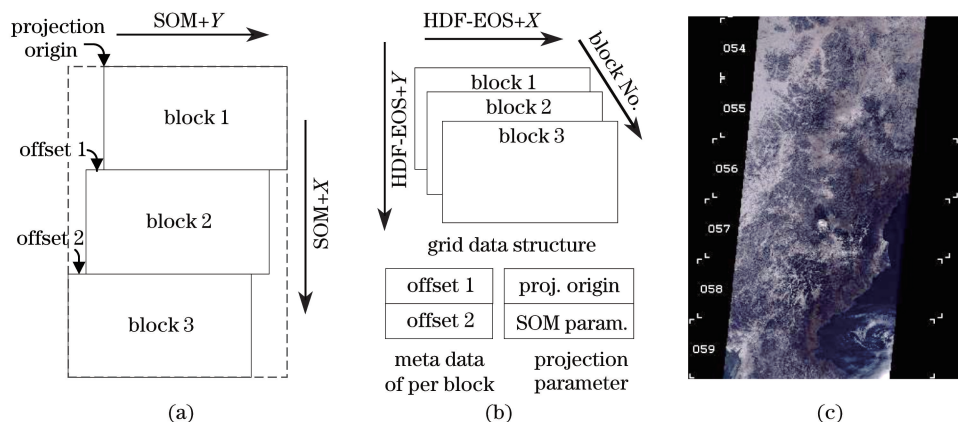


图1 MISR L2级产品数据格式。(a) SOM投影分块数据;(b)在HDF-EOS中的实现;(c)图像示例

Fig. 1 Data format of MISR L2 products. (a) SOM projection block data; (b) implementation in HDF-EOS; (c) sample image

## 2.2 MODIS 陆地产品数据

MODIS 陆地产品数据采用正弦投影格式进行存储,如图 2(a)所示,通用地图投影转换包(GCTP)参数<sup>[18]</sup>中参考球体半径为  $6.371007181 \times 10^6$  m。正弦投影是一种相对简单的投影方式,用一组投影参数实现全球数据的投影。但其投影变形分布十分不均匀,距离中央经线和赤道越远变形越大,如东北亚地区经线向西北方向倾斜超过  $45^\circ$ ,如图 2(b)所示。本文使用的 MODIS 数据为 L3 级产品 BRDF/反照率数据 MCD43A1。

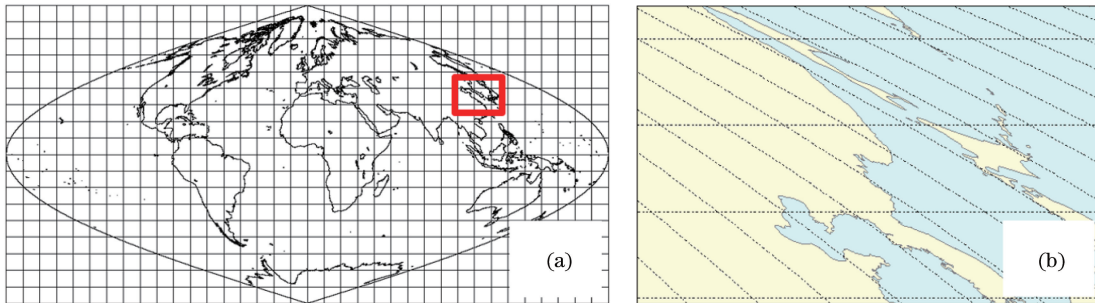


图 2 MODIS 陆地产品数据投影方式。(a) 正弦投影全球网格;(b) 东北亚地区投影畸变  
Fig. 2 Data projection ways of MODIS land products. (a) Sinusoidal projection global grids;  
(b) projection distortion in Northeast-Asia region

## 2.3 AATSR L1B 数据

欧洲空间局 ENVISAT 卫星 AATSR 传感器通过前向  $55^\circ$  天顶角和星下点两个圆锥面的扫描实现了对地球表面的多角度观测,如图 3 所示<sup>[19]</sup>。AATSR L1B 和 AATSR L2 级数据采用一种自定义的地图投影方式,其  $y_a$  轴方向与星下点轨迹相切,对每个  $y_a$  坐标设定一条与  $y_a$  轴正交的曲线,将此曲线上的点与星下点间的曲线长度定义为这个点的  $x_a$  坐标。此投影方式虽然不属于标准的地图学投影,但能使图像与 AATSR 成像几何相一致,并保证前向观测与星下点观测像素之间的配准。本文使用 AATSR L1B 产品亮度温度/反射率格点数据(ATS\_TOA\_1P)。

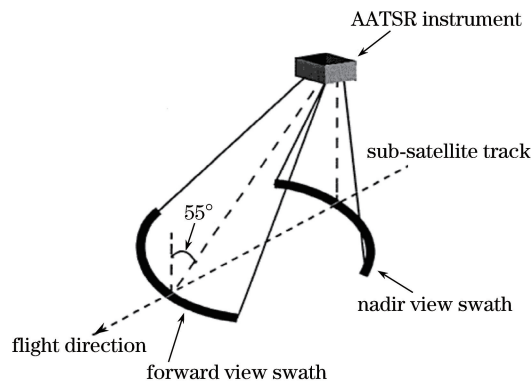


图 3 AATSR 传感器观测几何示意图  
Fig. 3 Geometric diagram of AATSR sensor observation

## 3 自定义投影网格精确配准方法

MISR L2 级产品数据与 MODIS L3 级产品数据精确配准的基本思路是基于预先定义的规则投影网格,充分利用两种数据自身带有的投影信息及地理位置参考数据,在统一的编程环境中,只对每种科学数据进行一次重采样,实现两种数据精确配准。这里的精确配准指的是数学意义上的配准,即假设两种数据自身带有的投影信息及地理位置数据是准确的。本文的目标在于把两种数据投影到自定义的投影网格上,实现两种数据的精确配准。当前常用遥感处理软件一般不支持将 MISR L2 级产品 SOM 投影分块偏移数据直接变换到自定义的投影格点上,本文方法解决了这一问题,方法框架如图 4 所示。

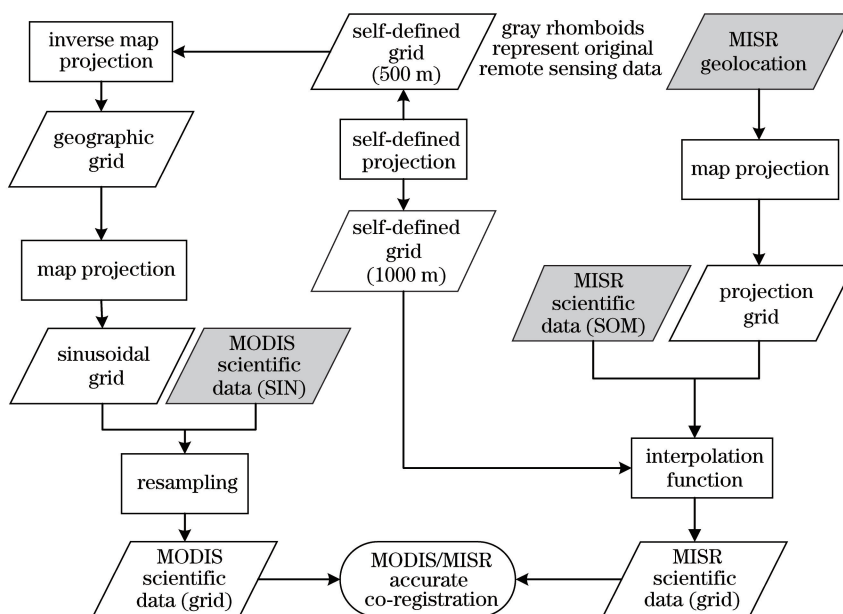


图 4 MISR L2 级产品数据与 MODIS L3 级产品数据的精确配准方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of accurate co-registration method for data of MISR L2 and MODIS L3 products

### 3.1 自定义投影

自定义规则网格采用 Albers 等面积圆锥投影,此投影方式可以覆盖一个较大地区而不需要进行分带。等面积的特性使得不同纬度相同大小像素基本对应相同面积地面,便于分析和对比具有不同分辨率的遥感数据。设置 Albers 投影参数如表 1 所示,参数覆盖整个中国东北地区。

表 1 中国东北地区 Albers 等面积投影参数

Table 1 Albers equal area projection parameters of Northeast China

No.	Parameter	Content
1	Longitude of central meridian	125°E
2	First standard latitude	42°N
3	Second standard latitude	51°N
4	Longitude of origin	125°E
5	Latitude of origin	46.5°N
6	False easting	$1 \times 10^6$ m
7	False northing	$1 \times 10^6$ m

### 3.2 采样网格的设置

对于 MISR L2 级产品 SOM 投影分块偏移数据,常用遥感软件一般不能明确定义投影变换网格,相反会在程序内部产生一个“优化”后的网格,此网格通常不能用于与其他来源图像进行逐像素的精确配准。针对这一问题,直接把投影空间的网格作为输入参数,从而依据多源遥感数据的空间分辨率和实际分析要求,实现自定义投影空间的网格。

以 EOS Terra 和 Aqua 双星 MODIS 合成 L3 级产品 MCD43A1<sup>[20]</sup> 和 MISR L2 级产品 MIL2ASLS<sup>[21]</sup> 的 BRDF 参数和归一化差分植被指数 (NDVI) 为例,前者空间分辨率约为 500 m、采用正弦投影,后者约为 1000 m、采用 SOM 投影。在逐像素对比分析两种产品时,需要将两种数据变换到同一种投影,此处选取 Albers 等面积投影。投影空间中 MCD43A1 的 4 个像素需要与 MIL2ASLS 的 1 个像素准确匹配,为了实现这一目标,定义 MCD43A1 的投影网格并在此基础上定义 MIL2ASLS 的投影网格,两个网格定义如下:

$$[X_{MCD}, Y_{MCD}] = \{(x, y) \mid x = x_0 + mr, y = y_0 + nr\}, \quad (1)$$

$$[X_{MISR}, Y_{MISR}] = \left\{ (x, y) \mid x = x_0 + \frac{r}{2} + 2mr, y = y_0 + \frac{r}{2} + 2nr \right\}, \quad (2)$$



式中 $(x, y)$ 为 Albers 投影空间中各个格点的坐标,  $(x_0, y_0)$ 为投影坐标原点,  $r$ 为投影变换后 Albers 投影空间中 MCD43A1 的空间分辨率,  $m=0, 1, 2, \dots, n=0, 1, 2, \dots$ , (1)式中  $m \leq M, n \leq N$ , (2)式中  $m \leq M/2, n \leq N/2$ 。

### 3.3 投影变换方法

#### 3.3.1 MCD43A1 正弦投影的转换

通过投影逆变换, 将依据表 1 建立的自定义投影格点坐标  $(x, y) \in [X_{MCD}, Y_{MCD}]$  转换为经纬度  $(\lambda, \phi)$ 。记中央经线为  $\lambda_0$ , 参考纬线为  $\phi_0$ , 双标准纬线分别为  $\phi_1$  和  $\phi_2$ , 对于单位球体表面, 有投影逆变换公式<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \phi = \arcsin \frac{C - n^2[x^2 + (\rho_0 - y)^2]}{2n} \\ \lambda = \lambda_0 + \frac{1}{n} \arctan \frac{x}{\rho_0 - y} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $n = (\sin \phi_1 + \sin \phi_2)/2$ ,  $C = \cos^2 \phi_1 + 2n \sin \phi_1$ ,  $\rho_0 = n^{-1} \sqrt{C - 2n \sin \phi_0}$ 。得到经纬度后, 通过使用 HDF-EOS 工具包的经纬度到格点转换函数, 得到自定义投影格点坐标对应的 MCD43A1 像素行列号。通过投影格点与行列号之间的一一对应关系, 获得投影到自定义网格  $[X_{MCD}, Y_{MCD}]$  的图像  $D_{MCD}$ , 如图 5 所示, 其中符号“×”对应 MCD43A1 的投影网格, 符号“+”对应 MIL2ASLS 的投影网格。

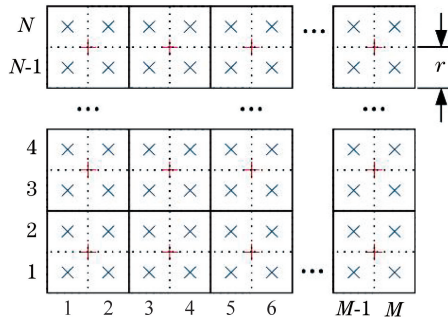


图 5 针对 MCD43A1 和 MIL2ASLS 建立的自定义投影网格  
Fig. 5 Self-defined projection grids for MCD43A1 and MIL2ASLS

#### 3.3.2 MIL2ASLS SOM 投影的转换

通过投影变换, 将 MIL2ASLS 数据中的地理位置经纬度数据  $(\lambda, \phi)$  转换为自定义投影下的格点坐标  $(x, y) \in [X, Y]$ 。对于单位球体表面, 有如下投影变换公式<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} x = \rho \sin \theta \\ y = \rho_0 - \rho \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\theta = n(\lambda - \lambda_0)$ ,  $\rho = \sqrt{C - 2n \sin \phi} / n$ 。而后依据  $[X, Y]$  及 MIL2ASLS 数据中的原始科学数据, 建立离散点插值函数。当重采样对像为反演模型参数或地表分类数据等离散数据时, 使用最邻近重采样法比较合理; 若重采样数据为其他连续数据, 如反射率、植被指数, 可以采用其他高阶的采样方法。将自定义投影网格  $[X_{MISR}, Y_{MISR}]$  代入插值函数生成变换后的图像  $D_{MISR}$ 。

由于变换后的  $D_{MCD}$  和  $D_{MISR}$  分别基于自定义的投影网格  $[X_{MCD}, Y_{MCD}]$  及  $[X_{MISR}, Y_{MISR}]$ , 因此在数学意义上实现了两种图像的精确配准。另外, 两种数据投影变换中间过程不涉及遥感科学数据重采样, 仅在最后一步对科学数据重采样一次。

## 4 结果及分析

本文所提方法可以处理两种数据包含的全部科学数据集, 并能将它们变换到具有明确定义、相互匹配的投影网格, 实现两种数据的精确配准。HEG、MRT 和 ENVI 三种软件处理 MCD43A1 数据的能力都比较强, MRT 和 ENVI 能与本文方法达到同样效果, 但 HEG 不能将数据变换到自定义投影网格, 它采用软件内部定义变换网格。三种软件对 MISR L2 级产品 MIL2ASLS 数据的处理能力都不强。只有 HEG

能处理全部数据集,但不接受用户指定投影区域,并且其输出地理参考基准固定为 1927 北美大地基准 (NAD-27); ENVI 能处理部分数据集,但进行再次重采样后会造成信息的损失; MRT 不能处理 MIL2ASLS 数据。对比 4 种方法,只有本文方法仅需对科学数据进行一次重采样就能实现两种数据空间位置的按自定义网格的精确配准。

#### 4.1 MCD43A1 数据配准分析

对于 MCD43A1 数据,以其中的 BRDF 产品近红外波段各向同性系数  $f_{iso}$  参数为例,如图 6(a)所示,采用表 1 定义的投影参数,取  $r=500$  m,  $(x_0, y_0)=(1181750$  m,  $443750$  m),  $M=250$ ,  $N=384$ ,用(1)式设置各投影网格中心点坐标;对应在 MRT 中,设置图像边缘左上角坐标  $C_{UL}=(1181500$  m,  $635500$  m)、右下角坐标  $C_{LR}=(1306500$  m,  $443500$  m),可以得到完全一致的投影网格和图像,如图 6(b)所示,这说明本文投影参数及投影变换流程是合理的。

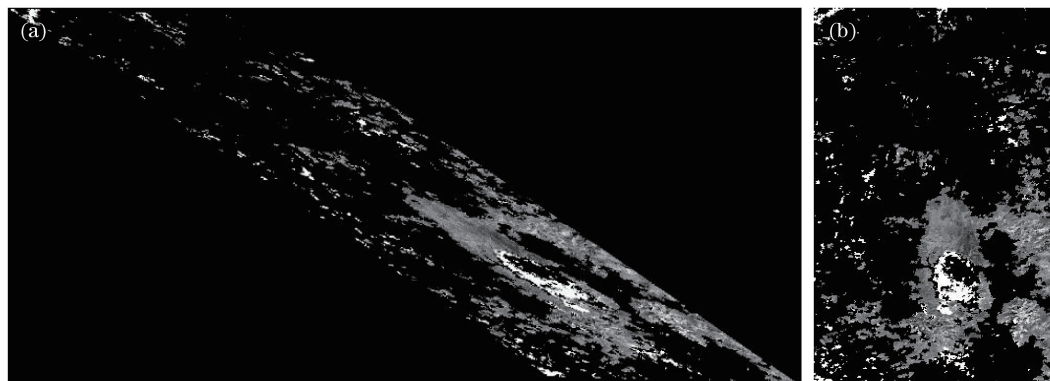


图 6 基于  $f_{iso}$  参数的(a)原始图像及(b)投影结果

Fig. 6 (a) Original image and (b) projection result based on  $f_{iso}$  parameter

#### 4.2 MIL2ASLS 数据配准分析

分别使用 ENVI、HEG 和本文所提方法对图 6(b)定义区域的 MISR L2 级产品 SOM 数据进行投影变换。图 7 上层半透明彩色图像为 MIL2ASLS NDVI,下层灰度图像为图 6(b) MCD43A1 Band2 的  $f_{iso}$  参数,红色正方形区域为局部放大显示区域。

使用本文所提方法处理 MIL2ASLS 数据时,采用自定义投影网格,并且根据目标投影区域的实际范围选择 MIL2ASLS 数据块。具体参数设置如下: $r=500$  m,  $(x_0, y_0)=(1181750$  m,  $443750$  m),  $M=250$ ,  $N=384$ ,用(2)式设置各投影网格中心点坐标;数据块选取 block 56 和 block 57。投影变换后实现了 MIL2ASLS 与 MCD43A1 目标投影网格及投影范围在几何意义上的完全重合,如图 7(a)、(b)所示,其中“+”表示 MIL2ASLS 像素中心点,“⊙”表示  $2 \times 2$  个 MCD43A1 像素对应的中心点,“⊕”表示两者的重合。

ENVI 对 MIL2ASLS 的直接处理方法为通过输入几何参数进行地理定位,一次只支持一个 block,这里取 block 57。选择表 1 中定义的投影参数,输出图像分辨率设置为 1000 m。投影变换实际图像分辨率为 1000 m,图像左上角像素中心点坐标为  $(9.776623910 \times 10^5$  m,  $5.870124792 \times 10^5$  m),因此 MIL2ASLS 投影网格中心点(如图 7 中“+”所示)与 4 个 MCD43A1 投影网格中心点(如图 7 中“⊙”所示)的坐标差异为  $(162.391$  m,  $12.4792$  m),如图 7(c)所示。

使用 HEG 处理 MIL2ASLS 时,同样选择表 1 中定义的投影参数,输出图像分辨率设置为 1000 m。HEG 虽然有设置自定义投影网格的接口,但实际上不支持用户指定区域,因此设置 block 57,并保留默认区域。实际投影结果输出了 block 56、block 57、block 58 三个数据块,实际图像分辨率在 X 和 Y 方向上分别变为了 1000.314583 m 和 1001.737719 m,地理参考基准也由 1984 世界大地坐标系 (WGS-84) 变为 NAD-27,左上边缘为  $(9.882849449 \times 10^5$  m,  $7.498762206 \times 10^5$  m)。为了方便进行比较,将 NAD-27 转换为 WGS 84,左上边缘变为  $(9.882852475 \times 10^5$  m,  $7.498743788 \times 10^5$  m)。由于投影变换后分辨率与预设的不相同,其坐标与目标投影网格坐标差异是一个范围:X 方向上最大为 153.8807 m、最小为 114.8723 m,Y 方向上最大为 175.4100 m、最小为 0.0996 m,如图 7(d)所示。

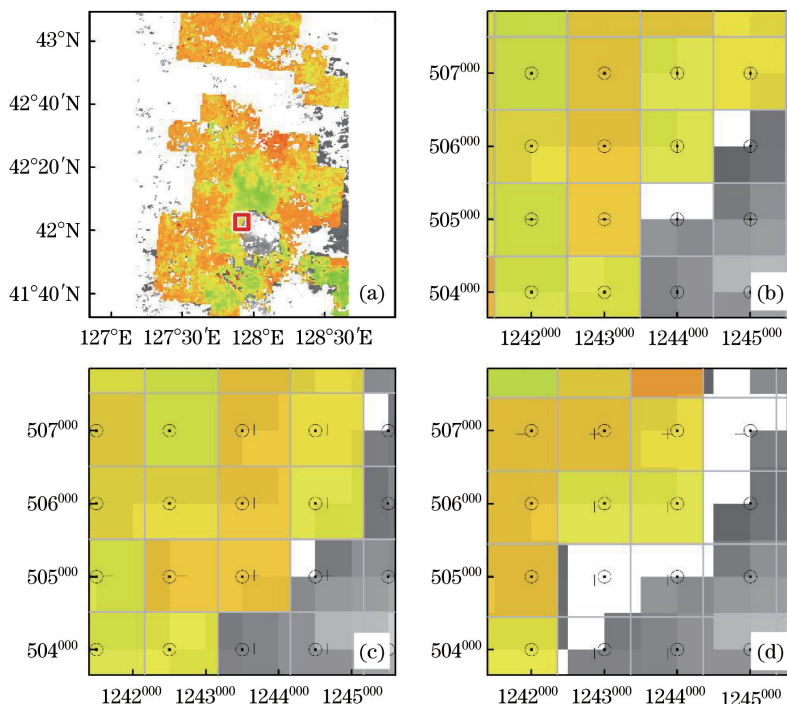


图 7 MCD43A1(灰度图像)与 MIL2ASLS(彩色图像)数据的投影变换结果及局部放大。(a) 变换结果全图;

(b) 本文方法结果局部放大;(c) ENVI 结果局部放大;(d) HEG 结果局部放大

Fig. 7 Projection transformation results of MCD43A1 (grey image) and MIL2ASLS (color image) data and partial magnification.

(a) Full image of transformation results; (b) partial magnification of result from proposed method;

(c) partial magnification of result from ENVI; (d) partial magnification of result from HEG

### 4.3 AATSR 数据配准分析

以 AATSR L1B 产品 ATS\_TOA\_1P 中的  $0.865 \mu\text{m}$  波段大气顶部反射率前向观测数据为例,进一步测试本文所提方法的效果。ATS\_TOA\_1P 反射率数据星下点空间分辨率约为 1000 m,采用与 MIL2ASLS 相同的网格设置及投影变换过程,将其变换到自定义投影网格,结果如图 8 背景彩色图像所示。图 8 上层半透明灰度图像为 MCD43A1 Band2 的  $f_{\text{iso}}$  参数。图 8(b)对应图 8(a)中红色方框区域,可以看出 ATS\_TOA\_1P 像素中心点“+”标记与  $2 \times 2$  个 MCD43A1 像素中心点“⊙”标记重合(“⊕”标记),即投影变换后两者像素达到精确匹配。结合 4.2 节的分析可知,ATS\_TOA\_1P、MIL2ASLS 及 MCD43A1 这三种数据实现了精确配准。

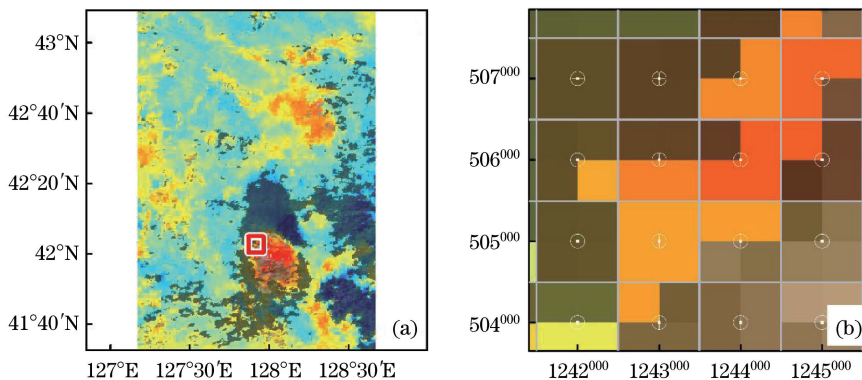


图 8 ATS\_TOA\_1P 与 MCD43A1 数据的精确配准。(a) 全图;(b) 局部放大

Fig. 8 Accurate co-registration between ATS\_TOA\_1P and MCD43A1 data.

(a) Full image; (b) partial magnification

## 5 结 论

以 EOS/MISR L2 级产品数据为例,分析了空间基多角度遥感数据特点及其与其他遥感数据空间配准时存在的问题,提出了一种基于自定义投影网格的多角度多源遥感数据空间位置精确配准的方法。通过比较分析 ENVI、HEG、MRT 及本文所提方法对 EOS MISR L2 与 MODIS L3 级产品进行投影变换时的数据处理能力,及采用本文所提方法对 ENVISAT AATSR 数据与前两种数据进行精确配准,得出如下结论:本文所提方法实现了遥感数据空间位置的精确配准,且只进行一次重采样,避免了反复重采样可能造成的信息损失。该方法同样适用于其他类似多角度遥感数据的空间位置精确配准。

## 参 考 文 献

- [1] Arsenault K R, Houser P R, DeLannoy G J M. Evaluation of the MODIS snow cover fraction product[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 980-998.
- [2] Crawford C J. MODIS Terra Collection 6 fractional snow cover validation in mountainous terrain during spring snowmelt using Landsat TM and ETM+[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(1): 128-138.
- [3] Campagnolo M L, Sun Q, Liu Y, *et al.* Estimating the effective spatial resolution of the operational BRDF, albedo, and nadir reflectance products from MODIS and VIIRS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 52-64.
- [4] Diner D J, Martonchik J V, Borel C, *et al.* Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) level 2 surface retrieval algorithm theoretical basis[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008.
- [5] Strahler A H, Muller J P, MODIS Science Team Members. MODIS BRDF/albedo product: Algorithm theoretical basis document (Version 5.0)[R]. Boston: Boston University, 1999.
- [6] Wan Huawei, Wang Jindi, Liang Shunlin, *et al.* Estimating leaf area index by fusing MODIS and MISR data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(11): 3106-3111.  
万华伟, 王锦地, 梁顺林, 等. 联合 MODIS 与 MISR 遥感数据估算叶面积指数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(11): 3106-3111.
- [7] Trishchenko A P, Khlopenkov K, Luo Y. Retrieval of BRDF for pure landcover types from MODIS and MISR using an angular unmixing approach[C]. *Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics*, 2004: 167-175.
- [8] Abelleira D, Verón S R. Comparison of different BRDF correction methods to generate daily normalized MODIS 250 m time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 46-59.
- [9] Zuo L Y, Wang X, Liu F, *et al.* Spatial exploration of multiple cropping efficiency in China based on time series remote sensing data and econometric model[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(5): 903-913.
- [10] Yang Xuefeng, Wang Xuemei, Mao Donglei. Mapping land use and land cover through MISR multi-angle imagery in the lower Tarim River[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(2): 617-626.  
杨雪峰, 王雪梅, 毛东雷. 塔里木河下游土地利用覆被 MISR 多角度遥感制图[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(2): 617-626.
- [11] Chen Yongmei, Wang Jindi, Liang Shunlin, *et al.* Comparison of MISR and MODIS bidirectional reflectance products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 808-815.  
陈永梅, 王锦地, 梁顺林, 等. MISR 和 MODIS 二向性反射数据产品的对比分析[J]. *遥感学报*, 2009, 13(5): 808-815.
- [12] Wen Yibo, Chang Ying, Fan Wenyi. Algorithm for leaf area index inversion in the Great Xing'an Mountains using MISR data and spatial scaling for the validation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(5): 1-10.  
温一博, 常颖, 范文义. 基于 MISR 数据大兴安岭地区叶面积指数反演及尺度转换验证研究[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5): 1-10.
- [13] Liao Yao, Lü Daren, He Qing. Intercomparison of albedo product retrieved from MODIS, MISR and POLDER[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(6): 1008-1019.  
廖瑶, 吕达仁, 何晴. MODIS、MISR 与 POLDER 3 种全球地表反照率卫星反演产品的比较与分析[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(6): 1008-1019.
- [14] Jovanovic V M, Lewicki S A, Smyth M M, *et al.* Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR): Level 1 georectification and registration algorithm theoretical basis[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of



- Technology, 1999.
- [15] Zhao Qi, Duan Miyi, Zhao Yue, *et al.* The SOM projection and its application in the georectification of remote sensing image[C]. Proceedings of the Ninth National Symposium on Remote Sensing, Telemetry and Remote Control, 2004. 赵 琪, 段米毅, 赵 跃, 等. SOM 投影及在遥感影像几何校正中的应用[C]. 第九届全国遥感遥测遥控学术研讨会论文集, 2004.
- [16] Snyder J. Map projections——A working manual[R]. Washington: United States Geological Survey, 1987.
- [17] Jovanovic V M, Miller K, Rheingans B, *et al.* Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) science data product guide[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2012.
- [18] NASA Goddard Space Flight Center. MODLAND sinusoidal grid[EB/OL]. (2016-12-02)[2016-09-06]. <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/GCTP.html>.
- [19] European Space Agency. EnviSat AATSR product handbook[R]. Paris: European Space Agency, 2007.
- [20] Schaaf C. MCD43A1 BRDF/albedo model parameters product[EB/OL]. (2016-09-06)[2017-03-30]. [https://www.umb.edu/spectralmass/terra\\_aqua\\_modis/v006/mcd43a1\\_brdif\\_albedo\\_model\\_parameters\\_product](https://www.umb.edu/spectralmass/terra_aqua_modis/v006/mcd43a1_brdif_albedo_model_parameters_product).
- [21] Bull M, Matthews J, McDonald D, *et al.* Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) data products specifications[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2011.