

文章编号 :1001-1595(2010)03-0251-06

# 基于 MODIS 数据的 Landsat-7 SLC-off 影像修复方法研究

朱长明<sup>1,2</sup>, 沈占锋<sup>1</sup>, 骆剑承<sup>1</sup>, 杨 辽<sup>3</sup>, 胡晓东<sup>1</sup>, 沈金祥<sup>3</sup>

1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011

## Research on Landsat-7 SLC-off Image Restoration Method Based on MODIS09 Data

ZHU Changming<sup>1,2</sup>, SHEN Zhanfeng<sup>1</sup>, LUO Jiancheng<sup>1</sup>, YANG Liao<sup>3</sup>, HU Xiaodong<sup>1</sup>, SHEN Jinxiang<sup>3</sup>

1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduated University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xinjiang Ecology and Geography Institute, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

**Abstract :** Study on how to restore SLC-off data has become a hot topic in the international remote sensing domain. At the basis of summarization of present restoration methods, a new method to restore the SLC-off data using the same time MODIS09 data is proposed. The steps are as follow: Firstly, using the algorithm of a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model (STARFM) to fuse the MODIS09 and TM/ ETM data. After data fusion, we can obtain the fusion data with the same spatial and temporal resolution of SLC-off data. And then, to fill the SLC-off gap data with the MODIS and ETM fusion data using local linear histogram match. Experiment indicates that the method is superior to traditional methods and overcomes some defects in traditional repair methods, which can improve the utilization ratio of ETM+ SLC-off data to some extent.

**Key words :** SLC-off; gap data; restoration; MODIS; ETM+

**摘 要 :** 研究如何修复由于扫描行校正器 SLC 故障而造成的数据坏行, 成为国际遥感研究的热点。文章在总结现有的修复方法基础上提出用相同时相的 MODIS09 数据修复 SLC-off 数据的方法。该方法采用时空自适应反射率融合模型 (STARFM) 算法实现 MODIS09 数据和 TM/ ETM+ 数据的融合, 获得与 SLC-off 数据相同时相和空间分辨率的融合数据, 然后采用局部线性直方图匹配完成对 SLC-off 数据填充。实验证明该方法修复效果明显好于传统方法, 解决了传统修复方法中存在的一些问题, 一定程度上提高了 ETM+ SLC-off 数据的利用率。

**关键词 :** SLC-off; 缝隙数据; 修复; MODIS; ETM+

**中图分类号 :** P237 **文献标识码 :** A

**基金项目 :** 国家 863 计划 (2009AA12Z123, 2009AA12Z148); 国家科技支撑重大项目 (2006BAJ02A01, 2006BAJ03A08)

## 1 引 言

陆地资源卫星 7 号 (Landsat-7) 于 1999 年 4 月 15 日发射, 该星携带了增强型专题成像传感器 (ETM+)。ETM+ 采用双向扫描镜反转设备, 由东到西再由西到东交替性线性扫描, 地面扫描带宽度为 185 km, 每扫描一次大约持续 60.743 ms<sup>[1-2]</sup>。这段时间 Landsat-7 卫星沿着降轨道方向大约行进 417 m。如果没有航天器向前运动补偿的话, 在扫描行的开始产生影像的重叠, 而在扫描行的结束产生缝隙, 在地面将形成“之”字形的扫描模式<sup>[3]</sup>, 见图 1(a)。为了消除卫星向前运动的影响, 采用的设备是扫描行校正器 (scan lines corrector, SLC)。SLC 位于主光学器件后面, 对卫星扫描时的前向运动进行补偿<sup>[4]</sup>, 使得传感器的扫

描方向与卫星的轨道方向近似垂直, 扫描行开始和结束的重叠和缝隙最小。其地面扫描模式, 如图 1(b) 所示<sup>[3]</sup>。

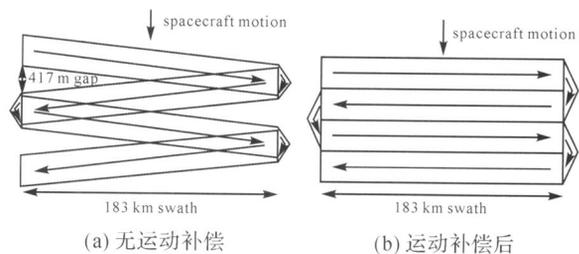


图 1 地面扫描模式对比示意图

Fig. 1 The comparison of ETM+ and ground scan model

2003 年 5 月 31 日, Landsat-7 ETM+ 机载扫描行校正器 (SLC) 突然发生故障, 导致获取的地面图像左右两侧出现数据重叠和丢失现象。数据

丢失大约 22%<sup>[5]</sup>,这大大影响了数据的正常使用。但是,SLC 的故障对影像的噪声、辐射特性以及几何特性都没有产生影响。为了验证这一结果,美国航空航天局(NASA)于 2003 年 9 月 7 日用 ETM+ 仪器中备用电子控制设备代替原主电子控制设备的试验,得到的测试结果与 SLC 出现故障后几乎完全相同。这说明了 SLC 的故障仅在 SLC 的机械部分。从此以后,ETM+ 只能处于 SLC-off 状态(SLC 关闭状态)的工作模式(呈“之”字形地面扫描模式)。

由于 ETM+ 出色的影像质量,数据在世界各地几乎均有发布,被广泛应用于资源调查、环境监测、地质调查、景观生态、测绘和土地利用规划等领域,成为对地观测中应用最为广泛的数据之一。在地表覆被和地表覆被变化检测中 Landsat 数据认为是最为有效的数据<sup>[6-7]</sup>。所以,由于 Landsat-7 上扫描仪校正器(SLC)的故障,从而限制了 ETM+ 数据的正常使用,这无疑是应用领域的一个重大损失。但是 SLC 的故障没有影响影像的辐射精度和几何精度,仍有 70%~80% 的数据是完好的,具有较强的可用性,这些缝隙数据中仍然保留着许多不可替代的价值。通过选择适当的图像处理方法,仍然可以将 SLC 异常数据成功地运用到很多科学应用领域。例如:热带雨林监测、农作物定性评估、大面积土地覆盖类型变化以及全球变化监测,等等<sup>[8-9]</sup>。另外,从性价比、数据获取的连续性上来看,SLC-off 数据仍是一个很好的数据源。鉴于此,NASA 组织了专家组专门研究对这些缝隙数据的再利用。研究如何修复由于 SLC 故障(SLC-off)而造成的数据坏行,成为国际遥感研究的热点。

## 2 修复的基本原理与算法总结

SLC-off 数据(缝隙数据)修复的基本原理是:采用插值的方法将数值填充到 SLC-off 数据对应的坏道位置,使带有坏道图像完整且色调尽可能一致。概括起来,实现这一目标主要有两条途径:一是用直接插值法将缝隙的缺省值给填补起来;二是借助其他影像填充法,将其他相同轨道号(地点)但获取时间不同的图像,填充到缝隙中相应的位置。

直接插值填充法就是利用缝隙周边的有效像元进行最邻近插值,双线性插值或三次卷积插值等。这种插值方法简单容易实现,但是插值修复

的效果很差,存在着明显的填充边界。而且所填充的值是由缺失数据的相邻地区的像元灰度计算出来的,不是地表信息的真实反映,与实际数据没有真正意义上的联系,真实性和可行性均有待于检验。

借助其他影像填充法就是利用相同地点但是获取时间不同的影像将缺失数据的相应位置填充起来。主要是利用没有发生故障(SLC-on)的相同季节的 ETM+ 数据进行填充(简称 SLC-on/SLC-off)或利用多景的 SLC-off 数据进行交叉填充(简称 SLC-off/SLC-off),得到一景完好的 ETM+ SLC-off 数据。因为扫描仪校正器异常,产生的缺失数据是随机的,所以利用两景以上的 ETM+ SLC-off 数据完成一幅影像的填充具有可行性。为了消除影像的填充边界,有利于影像后续处理,USGS/NASA 专家组提出了五种 SLC-off 数据的填充方法,包括:全景直方图匹配(global histogram match)、全景差分直方图匹配(global differential histogram match)、局部差分直方图匹配(local differential histogram match)、自适应局部回归(adaptive local regression)、局部直方图匹配(local histogram match)等<sup>[10]</sup>。

但是,借助其他影像填充法仍然存在着问题:

SLC-on/SLC-off 填充,利用的是没有发生故障之前的季节大致相同的影像,存在着时相不一致的问题,修复后的影像失去了时间信息(时间信息混杂),大大限制了修复后影像的应用领域;

SLC-off/SLC-off 填充,利用的是多景的 SLC-off 数据生成一幅完整的数据,仍然存在着时相不一致的问题,修复后的影像时间信息更为混杂。另外,由于需要多景数据生成一景完整数据,卫星数据覆盖率大大降低,卫星数据的时效性变差,使得那些要求较高数据覆盖率的应用变得不可能。用户不得不寻找其他数据源从而放弃对这些数据的使用。

## 3 本文提出的修复方法

本文使用的 MODIS09 500 m 地表反射率产品数据对 ETM+ SLC-off 数据修复。从表 1 中可以看出:MODIS 传感器与 ETM+ 有着相应的波段带宽设置(表 1)。另外 1999 年 12 月 8 日发射升空 TERRA 星,其轨道参数和 Landsat-7 的轨道参数设置基本相同,穿越赤道的时间大约为地方时 10:30,比 ETM+ 约晚 30 min。扫描宽度

为 2 330 km,一天最多可以获得 4 条过境轨道资料。在对地观测过程中,每秒可同时获得 6.1 GB 的来自大气、海洋和陆地表面信息,时间分辨率高,每 1~2 d 就可获取一次全球观测数据<sup>[1,2]</sup>。所以利用 MODIS 陆地产品数据作为信息源,对 ETM+ SLC-off 数据修复,在理论上是可行的。

表 1 MODIS 与 ETM+ 波段对照表

Tab. 1 The bandwidth comparison between MODIS and ETM+

ETM+ bands	ETM+ bandwidth/nm	MODIS bands	MODIS bandwidth/nm
1	450-520	3	459-479
2	530-610	4	545-565
3	630-690	1	620-670
4	780-900	2	841-876
5	1 550-1 750	6	1 628-1 652
7	2 090-2 350	7	2 105-2 155

图 2 显示了利用 MODIS09 数据对 ETM+ SLC-off 数据修复的基本算法流程。首先是数据的预处理,对 MODIS 数据通过地理坐标纠正和重新采样,使得其与 ETM+ 有着相同的边界、影像大小、像元尺寸和坐标系统。然后实现 MODIS09 数据和 TM/ETM 数据的融合。通过 MODIS 的光谱信息和 TM/ETM 的空间信息的融

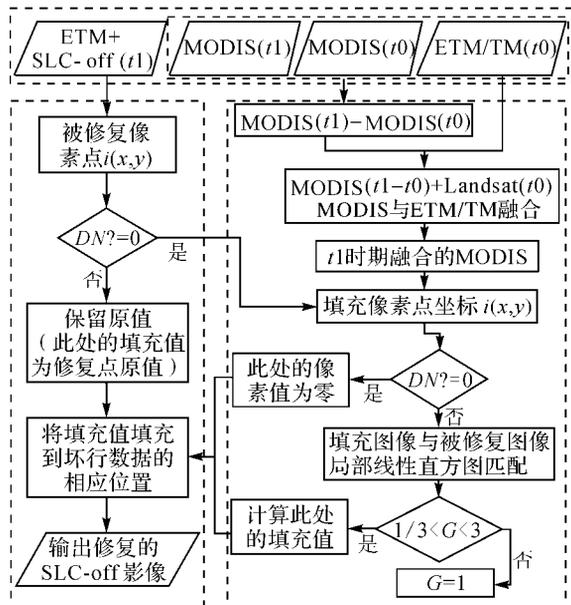


图 2 基于 MODIS 对 ETM+ SLC-off 影像修复算法流程图

Fig. 2 The algorithm flow chart of SLC-off data repair based on MODIS data

合,使得融合后的数据即具有 MODIS 的光谱变化信息又具有 TM/ETM+ 的空间信息。采用的算法为时空自适应反射率融合模型<sup>[11]</sup> (spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, STARFM)。该模型对于 MODIS 同质像元地面反射率通过 Landsat 表述为

$$L(x_i, y_i, t_k) = M(x_i, y_i, t_k) + k \quad (1)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  为给定的 Landsat 和 MODIS 对应像元的位置;  $t_k$  为数据获取的时间;  $k$  为 MODIS 数据和 TM/ETM 数据之间存在的偏差,主要是由不同的带宽、成像时太阳的几何位置和尺度因素等引起的。那么在  $t_0$  d Landsat 和 MODIS 的地表反射率关系可以表示为

$$L(x_i, y_i, t_0) = M(x_i, y_i, t_0) + 0 \quad (2)$$

假设在时间  $t_k$  和  $t_0$  地表  $(x_i, y_i)$  处的覆被类型和系统误差等都没有发生变化,并有  $k = 0$ 。这样由公式 (1)、(2) 可以得到

$$L(x_i, y_i, t_k) = M(x_i, y_i, t_k) - M(x_i, y_i, t_0) + L(x_i, y_i, t_0) \quad (3)$$

公式 (3) 可以理解为在理想的情况下 Landsat 在时间  $t_k$  处的反射率可以表述为:Landsat 在时间  $t_0$  处的反射率加上 MODIS 在时间  $t_k$ 、 $t_0$  处反射率的差值(光谱变换信息)。

但是这种理想的状态是很难满足的,在实际应用中 MODIS 和 TM/ETM 的关系非常的复杂。主要原因有:首先,MODIS 的空间分辨率比较低,像元尺度比较大(本文中用的是 500 m × 500 m 像元尺度),在很多的情况下并不是一个同值的像元,可能包括了多种混合的地物类型;其次,从时间  $t_0$  到时间  $t_k$  地表的植被类型可能发生了变化;最后,地表植被类型的生长状况、太阳光照的几何位置以及 BRDF(双向反射率分布函数)在从  $t_0$  到  $t_k$  同样会发生变化。

为此在计算融合后时间  $t_k$  处的反射率,必须从邻近像元引进其他的辅助信息。用一个权重函数  $w$  对融合后的数据进行卷积运算(公式 (4)),并且在一定大小的窗口内只有光谱相似的临近像元才参与卷积运算。光谱相似像元的确定可以有两种方法:非监督分类和直接通过地表反射率设置阈值。本文中是采用设置阈值的方法判断相似像元:均值误差小于 10,单波段误差小于 15。

$$L(x_{j/2}, y_{j/2}, t_k) = \sum_{i=1} \sum_{j=1} W_{ij} (M(x_i, y_i, t_k) - M(x_i, y_i, t_0) + L(x_i, y_i, t_0)) \quad (4)$$

其中,  $w$  为窗口的大小;  $W_{ij}$  为权重系数;  $(X/2, Y/2)$  为开窗操作滑动窗口的中心像元。考虑到两种影像的分辨率之差, 的初始值设为  $9 \times 9$ 。

权重系数  $W_{ij}$  非常的重要, 它直接决定了每个临近的光谱相似像元到底贡献多少给中心待估测的中心像元。权重系数的确定, 主要取决于以下三个方面:

1. 给定位置时间  $t_k$  处的 MODIS 和 ETM+ 的光谱差异

$$S_{ij} = \text{abs}(L(x_i, y_i, t_k) - M(x_i, y_i, t_k)) \quad (5)$$

2. MODIS  $t_0$  处和 MODIS  $t_k$  处的时间信息差异

$$T_{ij} = \text{abs}(M(x_i, y_i, t_k) - M(x_i, y_i, t_0)) \quad (6)$$

3. 中心像元  $(X/2, Y/2)$  与光谱相似像元  $(x_i, y_i)$  的距离

$$d_{ij} = \sqrt{(x/2 - x_i)^2 + (y/2 - y_i)^2} \quad (7)$$

此公式计算的是空间绝对距离, 根据空间相近相似原理, 距离越近的像元应该赋予越高的权重。在求权重系数时需把绝对距离转换为相对距离, 通过以下公式

$$D_{ij} = 1.0 + d_{ij}/A \quad (8)$$

其中,  $A$  为常数, 决定了空间信息相对于光谱和时间信息的相对重要性。实验中给定的值是 81, 相对距离  $D_{ij}$  在滑动窗口 内的变化范围为  $[1, 1 + (1/\sqrt{2})(/A)]$ 。

权重函数的确定:

令

$$C_{ij} = S_{ij} T_{ij} D_{ij} \quad (9)$$

归一化, 得到  $W_{ij}$

$$W_{ij} = (1/C_{ij}) / \sum_{i=1} \sum_{j=1} (1/C_{ij}) \quad (10)$$

最后是用融合的数据去填充 SLC-off 数据, 采用的填充方法是局部线性直方图匹配<sup>[12]</sup>。因为 SLC-off 的最大宽度可以达到 14 个像元, 所以开窗操作时, 可靠窗口的大小至少要设为  $17 \times 17$ , 这样保证有足够的有效像元参加运算。

对于 MODIS 融合数据中的某一点像元值  $DN_f$  和 SLC-off 数据中同一点的像元值  $DN_s$  的线性变换为

$$DN_f = G DN_s + B \quad (11)$$

其中,  $G = \overline{DN_f} / \overline{DN_s}$ ;  $B = \overline{DN_f} - G \overline{DN_s}$ ;  $DN_f$ 、 $DN_s$  和  $\overline{DN_f}$ 、 $\overline{DN_s}$  分别为所对应图像的像元的标准差和平均值;  $\overline{DN_f}$  为融合影像;  $\overline{DN_s}$  为 ETM+

SLC-off 影像。为了获得更好的视觉效果和填充精度, 在计算局部线性直方图匹配时要排除一些过饱和的异常点。如果计算出来的回归系数  $G$  不在  $[1/3, 3]$  的范围内, 则令  $G = 1$ 。完成对 ETM+ SLC-off 数据的填充。

## 4 实验与结果分析

实验选取美国西部加利福尼亚州南部塞尔顿海(Salton Sea)地区, 2003年9月17日获取的一景 ETM+ SLC-off 影像(缝隙影像)和 2001年6月7日获取的 ETM+ SLC-on(扫描仪校正器发生故障之前)影像。同时分别选取两景与 ETM+ 对应时相和地区的 MODIS09 500 m 地表反射率影像。按照以上介绍的融合和填充方法对 2003年9月17日获取的塞尔顿海周边的一景 SLC-off 影像进行修复。修复前后影像的色调基本保持一致, 没有明显的填充边界(图3), 修复效果达到预期要求。



图3 修复前后的 ETM+ SLC-off 影像对比

Fig. 3 The comparison between the before and after repair about ETM+ SLC-off

采用相同时相(同一天)的 MODIS09 数据, 其光谱信息和 ETM+ 非常相似。在填充之前进行 MODIS 影像和 ETM+ 影像的融合, 目的是在保持空间分辨率的同时, 将 MODIS 所反映的光谱变化信息融合到 TM/ETM+ 数据中, 能够比较准确地反映待修复影像的地表反射率状况。填充图像与被填充图像的光谱特征的相似性, 保证了修复后影像的真实性与可靠性。为了验证这一结果, 文中将融合后的影像进行局部直方图匹配, 计算它与 ETM+ SLC-off 影像中有效数据区的中值、均值、标准差、信息熵、相关系数和通用图像评价指标(UIQI), 见表2。从中可以看出, 它们的中值、均值、标准差、信息熵十分接近, 相关系数基本可以达到 90% 以上。UIQI 是一个综合指标, 反映了融合影像与参考影像的光谱以及空间信息相似性。其指标大小主要由融合结果与参考图像的相关性决定。相关系数和 UIQI 值较大, 说明了填充数据真实可靠。

表 2 ETM+ &MODIS 融合结果与 SLC-off 中有效数据统计对比

Tab. 2 The statistical comparison between ETM+ &MODIS fusion data and valid of SLC-off data

波段	统计值						
	中值	均值	标准差	信息熵	相关系数	通用评价指标 UIQI	
1	SLC-off	79	78.885	10.425	3.755 4	1	1
	融合	79	78.774	10.423	3.729 5	0.888 4	0.888 3
2	SLC-off	76	75.518	13.043	3.977 9	1	1
	融合	76	75.903	13.053	3.915 1	0.896 88	0.896 7
3	SLC-off	91	90.705	17.552	4.269 7	1	1
	融合	91	90.720	17.565	4.129 6	0.931 6	0.931 6
4	SLC-off	71	70.721	12.598	3.945 9	1	1
	融合	71	70.750	12.512	3.819 8	0.944 1	0.944 0
5	SLC-off	89	89.248	18.071	4.298 9	1	1
	融合	89	89.301	18.089 9	4.187 4	0.897 5	0.897 4
7	SLC-off	80	80.777	17.539	4.276 8	1	1
	融合	80	80.887	17.457	4.181 4	0.914 5	0.914 3

选用传统的 SLC-on/ SLC-off 修复方法和本文的修复方法进行比较,见图 4。左边为传统修复方法得到的影像,右边本文的修复方法的结果。从视觉效果上可以看出本文的修复方法要好于传统的方法。SLC-on/ SLC-off 修复方法存在着一些修复痕迹,在图中用红色圈出了两幅影像在细节上存在明显差异的地方。为了便于同传统修复方法的比较,分别从这两幅图像上选取一条灰度剖面进行比较分析,如图 5 所示,(a)为传统修复方法的影像剖面,(b)为本文修复方法的影像剖面。图中的 band1、band2、band3、band4 对应的波段分别为 ETM+ 的蓝、绿、红、近红外。从图中可以看出,传统修复方法得到影像灰度剖面曲线在填充位置变化剧烈,反映出这两幅影像地物的

光谱响应的差异。第 4 波段(近红外波段)灰度值在修复位置明显高于本文修复方法得到的影像,说明这两幅影像的光谱信息在时间上的差异。而从 SLC-off 数据获取的时间上来看,本文的修复方法得到的光谱信息更为真实。



ETM+/ETM+SLC-off MODIS09/ETM+SLC-off

图 4 不同修复方法的影像效果图对比

Fig. 4 The comparison between two image with deferent repair methods

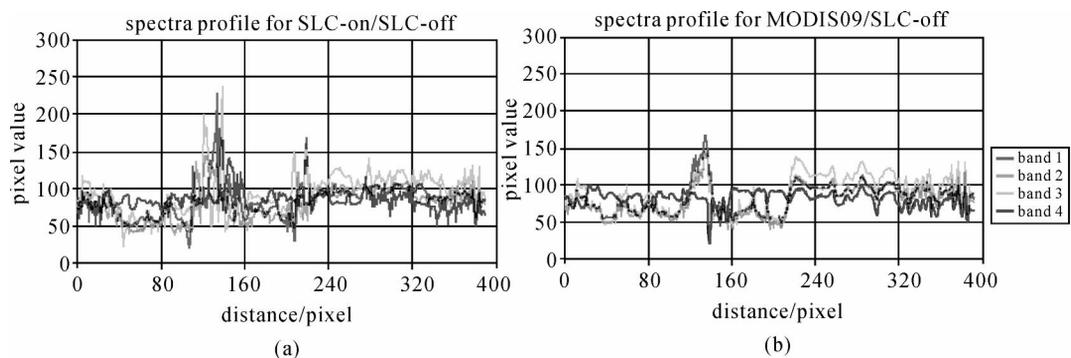


图 5 两种方法修复的影像空间灰度剖面图比较

Fig. 5 The comparison of two image spatial profiles with deferent repair methods

由于 MODIS 和 ETM+ 同一天的影像在成像时间上,MODIS 约晚半个小时,大气的状况和太阳光照的角度略有差异,以及传感器的不同,影

像之间的色调存在着差异,如果直接将对应位置影像的值填充到坏道位置,将会产生填充边界,大大影响了修复影像的视觉效果和影像的后续处

理。因此,采用了局部线性直方图匹配,消除了与 SLC-off 影像的色调差异,实现了无缝填充。

## 5 结 论

从以上修复的结果可以看出,利用 MODIS09 影像对 ETM + SLC-off 数据修复是现实可行的。采用局部线性直方图匹配法填充,修复后的影像色调基本一致,没有产生明显的填充边界,基本达到了应用的要求。

利用 MODIS 数据对 ETM + SLC-off 数据修复,解决了传统方法对 SLC-off 修复存在的一些问题。首先,选用了和 ETM + SLC-off 相同时相的 MODIS09 数据,填充数据和被填充数据获取时间相同,光谱信息相似,地物类型一致,保证了修复后影像的真实性,解决了传统修复方法中时相不一致问题。其次,一定程度上提高了 ETM + SLC-off 数据的利用率。只要有质量比较好的 ETM + SLC-off 影像,基本都可以找到相同时相的 MODIS 数据。最后,由于 MODIS 影像时间分辨率很高,大约 1~2 d 就可以完成全球覆盖,解决了传统修复方法中找不到临近时相数据源的问题,或者由于临近时相数据源质量的不理想,导致修复后影像质量不理想的问题。相同时相的 MODIS 数据和 ETM + 数据成像外界环境基本相同,有利于提高 ETM + SLC-off 数据修复质量。

## 参考文献:

- [1] JENSEN J R. Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective [M]. Translated by CHEN Xiaoling, GONG Wei, LI Pingxiang, et al. Beijing: China Machine Press, 2007. (JENSEN J R. 遥感数字影像处理导论[M]. 陈晓玲, 龚威, 李平湘, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2007.)
- [2] ZHAO Yingshi. The Principle and Method of Remote Sensing Application Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003. (赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.)
- [3] NASA Goddard Space Flight Center Landsat Project Science Office. Enhanced Thematic Mapper Plus Scan Line Corrector Geometric Processing Algorithm Theoretical Basis [EB/OL]. [2007-09-03]. [http://landsat.usgs.gov/products\\_SLC-off\\_Processing\\_A\\_TBDV1.1.pdf](http://landsat.usgs.gov/products_SLC-off_Processing_A_TBDV1.1.pdf).
- [4] LIN Youming, BAO Kai. The Impact of the Scan Line Corrector Malfunction on Landsat-7 Imagery Data and the Processing Methods [J]. Remote Sensing Information, 2005 (2): 33-37. (林有明, 鲍凯. Landsat-7 扫描行校正器异常对图像数据的影响及其处理方法[J]. 遥感信息, 2005 (2):

33-37.)

- [5] TIAN Xiaohong, LIN Youming. Research on Algorithms for Recovering Landsat-7 Gap Data[J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 59-61. (田晓红, 林有明. Landsat-7 缝隙数据恢复的算法研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 59-61.)
- [6] VOGELMANN J E, HOWARD S M, YANG L, et al. Completion of the 1990's National Land Cover Data Set for the Conterminous United States from Landsat Thematic Mapper Data and Ancillary Data Sources[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(6): 650-662.
- [7] TOWNSHEND J, JUSTICE C, LI W, et al. Global Land Cover Classification by Remote Sensing: Present Capabilities and Future Possibilities[J]. Remote Sensing of Environment, 1991(35): 243-255.
- [8] USGS, NASA, Landsat-7 Science Team, et al. Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7 ETM+ Data Following Scan Line Corrector Malfunction [EB/OL]. [2008-07-16]. [http://landsat.usgs.gov/products\\_slcoff\\_usability\\_assess.php](http://landsat.usgs.gov/products_slcoff_usability_assess.php).
- [9] TAPPAN G, CUSHING M. Use of SLC-off Landsat Image Data for Monitoring Land Use/Land Cover Trends in West Africa [EB/OL]. [2008-07-16]. [http://landsat.usgs.gov/products\\_slcoffusabilityassess.php](http://landsat.usgs.gov/products_slcoffusabilityassess.php).
- [10] SHOU Jingwen, CHEN Xue, MA Jianwen, et al. Application and Research on the Recovery of Landsat-7 SLC-off Images Based on ARL [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(3): 368-371. (寿敬文, 陈雪, 马建文, 等. 采用 ALR 算法对 Landsat-7 图像缺陷修复的应用研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(3): 368-371.)
- [11] FENG G, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the Blending of the Landsat and MODIS Surface Reflectance: Predicting Daily Landsat Surface Reflectance [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2207 - 2218.
- [12] SCARAMUZZA P, MICEVIC E, CHANDER G. SLC Gap-filled Products Phase one Methodology [EB/OL]. [2008-07-18]. [http://landsat.usgs.gov/products\\_SLC-Gap\\_Fill\\_Methodology.pdf](http://landsat.usgs.gov/products_SLC-Gap_Fill_Methodology.pdf).

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2009-08-05

修回日期: 2010-02-26

第一作者简介: 朱长明(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为遥感数据处理与遥感信息提取。

First author: ZHU Changming (1983—), male, PhD candidate, majors in remote sensing image processing and information extraction.

E-mail: a blezhu @163.com