

文章编号: 0253-2239(2010)11-3342-07

基于 SHDOM 经验方程和基于同步实测光谱数据的遥感影像邻近效应校正算法对比研究

王倩¹ 陈雪² 马建文³ 陈建平¹

(¹ 中国地质大学国土资源与高新技术研究中心, 北京 100083; ² 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

³ 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100101

摘要 从背景反射率计算和真实反射率获取两个方面,以 Landsat-5 TM 影像、ASTER 影像以及与两幅影像分别对应的沙地、草地同步实测光谱数据作为数据源,对基于三维辐射传输模型 SHDOM 经验方程的垂直观测光学遥感影像邻近效应校正方法和基于与影像同步实测光谱数据的遥感影像邻近效应校正方法进行了对比研究。结果表明,从辐射传输机理上,基于 SHDOM 经验方程的邻近效应校正算法的理论基础更为完善;而从校正后影像的目视效果上,基于同步实测光谱数据的邻近效应校正算法则更为有效。

关键词 遥感;邻近效应;SHDOM;同步实测光谱数据;大气点扩展函数

中图分类号 TP75 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3342

A Comparative Study of Two Remote Sensing Image Adjacency Effect Correction Algorithms Based on SHDOM Empirical Equation and Synchronized Measured Spectral Data

Wang Qian¹ Chen Xue² Ma Jianwen³ Chen Jianping¹

(¹ Institute of Land Resources and High Techniques, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
² Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
³ Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract In terms of background reflectance computation and true reflectance acquisition, the two adjacency effect correction algorithms are studied comparatively. One is based on three-dimensional radiative transfer model SHDOM (Spectral Harmonics Discrete Ordinary Method) empirical equation for the nadir-viewing optical remote sensing image and the other is based on the synchronically measured spectral data. The data sources are Landsat-5 TM image with synchronized measured spectral data of sand, and ASTER image with synchronized measured spectral data of grass. The results demonstrate that the adjacency effect correction algorithm based on SHDOM empirical equation has more profound theoretical foundation according to the radiative transfer theory, and the image corrected by the adjacency effect correction algorithm based on the synchronized measured spectral data looks better.

Key words remote sensing; adjacency effect; SHDOM; synchronized measured spectral data; atmospheric point spread function

1 引言

遥感邻近效应是指由于大气的多次散射,传感

器瞬时视场外背景像元的反射能量被散射进入视场内部,从而引起视场内目标像元亮度值改变的现

收稿日期: 2009-12-30; 收到修改稿日期: 2010-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(40901234)、中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目专项项目和中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验资助项目(08501100CX)资助课题。

作者简介: 王倩(1984—),女,硕士研究生,主要从事遥感弱信息提取等方面的研究。E-mail: wangqian12031@163.com

导师简介: 陈建平(1959—),男,教授,主要从事定量地学等方面的研究。E-mail: 3s@cugb.edu.cn

象^[1]。根据辐射传输的基本理论,传感器接收到的电磁波能量 L 由三部分能量组成:瞬时视场内目标像元的反射能量 L_1 ,路径光子的散射能量 L_2 和瞬时视场外背景像元的散射能量 L_3 ^[2]。 L_3 对应的便是邻近效应部分的能量,它并不携带目标信息,是一种干扰成分,在反演地表真实反射率等定量遥感相关研究中应当予以考虑。

邻近像元的影响一般可以看作是地表辐射场和大气点扩展函数(PSF)的卷积(本文暂不考虑由传感器的物理、光学、电子学特性所引起的点扩展函数)。大气点扩展函数的物理意义是它描述了邻近像元对传感器接收的总辐射亮度贡献率的空间分布。对邻近效应研究的核心是对大气点扩展函数的求解。目前对大气点扩展函数问题的研究主要有两个基本思路:求解辐射传输方程方法和计算机模拟试验方法^[3];

1)从辐射传输机理出发,利用辐射传输模型建立近似经验公式。邻近效应是一个典型的三维辐射传输问题^[4,5],理论上讲可以通过解三维辐射传输方程来求邻近效应。但是,该积分-微分方程还没有严格的解析解^[3]。研究者一般针对不同的应用,采用不同的近似解法,提出一系列的经验公式来代替点扩展函数^[5~7]。近似经验公式方法的有效性取决于点扩展函数的近似精度。

2)为了回避求解辐射传输方程的困难,另一种方法就是通过计算机实验来模拟大气点扩展函数。其中蒙特-卡罗方法就以最大的逼真度描述了光子在大气中的传输过程^[3,8]。由于蒙特-卡罗方法无法保证可以得出最优解,Cong^[9]把一种优化算法-人工神经网络引入到点扩展函数的计算中。计算机模拟的算法设计相对复杂;为了得到具有统计意义的解需要很大的计算量,往往需要在由个人电脑和 workstation 组成的并行计算机系统上来实现,以获得最大限度的加速。

作为其中近似经验公式方法的代表,2001年 Liang^[5]等利用 SHDOM(Spectral harmonics discrete ordinary method)辐射传输模型建立了针对垂直观测朗伯体地表的传感器(如 TM、ASTER)的经验方程用于邻近效应的计算;2006年 Ma^[10]等提出利用与遥感影像同步实测光谱数据来进行邻近效应的近似计算。本文主要从背景反射率计算和真实反射率获取两个方面,对这两种方法:基于三维辐射传输模型 SHDOM 经验方程的垂直观测光学遥感影像邻近效应校正方法^[5,11]和基于与影像同步实

测光谱数据的遥感影像邻近效应校正方法^[10,12~14]进行了对比研究。研究所用的影像数据为2005年7月25日北京地区的 Landsat-5 TM 影像和2008年5月23日甘肃张掖地区的 ASTER 影像。其中,针对 Landsat-5 TM 影像的实测地物为沙地,针对 ASTER 影像的实测地物为草地。

2 背景反射率计算

背景反射率是邻近像元辐射中进入传感器视场的部分与邻近像元总辐射的比值,表示如下:

$$r_b = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\rho(x,y)dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x,y)dx dy}, \quad (1)$$

式中 r_b 表示中心像元的背景反射率, x,y 分别表示邻近像元距中心像元的距离, $f(x,y)$ 是大气点扩展函数。由于地物真实反射率 $\rho(x,y)$ 未知,故用基于影像反演的地面综合反射率代替。

要获取地面综合反射率(包含邻近像元影响),首先要经过辐射亮度转换、计算大气顶部反射率 ρ^* 和由遥感图像反演含邻近效应的地面综合反射率 ρ_i 三步计算,相关计算公式可以参考文献[2,10]。

2.1 基于 SHDOM 经验方程算法的背景反射率计算

SHDOM 是基于 Fortran 语言开发的大气辐射传输软件,用来计算太阳或其它热辐射源单色或多光谱波段在一维、二维或三维空间的辐射传输^[15]。Liang^[5]等利用 SHDOM 辐射传输模型建立了针对垂直观测朗伯体地表的传感器(如 TM、ASTER)的经验方程来获取影像的背景反射率:

$$r_b = \frac{\int g(s)\rho(s)ds}{\int g(s)ds}, \quad (2)$$

式中 s 是邻近像元距离中心像元的距离; $\rho(s)$ 理论上为真实反射率,一般用综合反射率代替; $g(s)$ 为经验权重函数,表示如下:

$$g(s) = f_1(\tau)\exp(-1.424s) + f_2(\tau)\exp(-12916s), \quad (3)$$

式中 τ 为气溶胶光学厚度, $f_1(\tau) = 0.003\tau$, $f_2(\tau) = 0.071\tau^3 - 0.061\tau^2 - 0.439\tau + 0.996$

(3)式右边第一项代表背景像元即邻近像元对综合反射率的贡献值,第二项代表中心像元对综合反射率的贡献值。邻近像元贡献很大程度上取决于气溶胶的光学厚度。随着气溶胶光学厚度的增加,邻近像元的贡献相应增大。

在应用于遥感影像时,背景反射率可以用以下离散形式来计算:

$$r_b = \frac{\sum_i^N \sum_j^N \rho_{ij} g_{ij}}{\sum_i^N \sum_j^N g_{ij}}, \quad (4)$$

式中 N 表示邻近像元的范围, g_{ij} 是像元 (i, j) 的相对贡献。

2.2 基于同步实测光谱数据算法的背景反射率计算

Ma 等^[10]提出的基于实测光谱数据的邻近效应校正算法中背景反射率通过下式计算:

$$\rho_b(x, y) = \frac{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \rho_1(i, j) \exp(-s)}{\sum_{j=-N}^N \sum_{i=-N}^N \exp(-s)}, \quad (5)$$

式中 $\rho_b(x, y)$ 为目标像元 (x, y) 的邻近像元背景反射率, $\rho_1(i, j)$ 为像元 (i, j) 的综合反射率, s 为邻近像元和中心像元之间的距离, $s = \sqrt{i^2 + j^2} \times m$, (m 为遥感影像的空间分辨率,单位是 m)。(N, N) 是

像元 PSF 的影响范围,在目标像元周围 $N \times N$ 的区域内计算背景反射率。

2.3 两种算法的背景反射率计算比较

两种算法是都以与距离相关的权重函数来代替点扩展函数表示邻近像元对中心像元的影响,进行背景反射率的计算。但是,基于 SHDOM 辐射传输模型提出的经验权重函数不仅与邻近像元和中心像元之间的距离相关,而且还考虑了大气光学厚度的因素,更具有辐射传输的物理意义。图 1 和图 2 分别是 TM 影像中沙地测量位置和 ASTER 影像中草地测量位置(即图 3 中黑实线和图 7 中白实线位置) TM1 波段和 ASTER1 波段计算得到的背景反射率剖面图。可以看出,相对于由遥感影像反演得到的地面综合反射率,基于 SHDOM 经验方程计算的背景反射率更趋于平缓,即减弱了处于不同背景中的中心像元的背景反射率之间的差别;而用基于同步实测光谱数据算法中的距离权重公式计算的背景反射率则与地面综合反射率的变化更为一致。

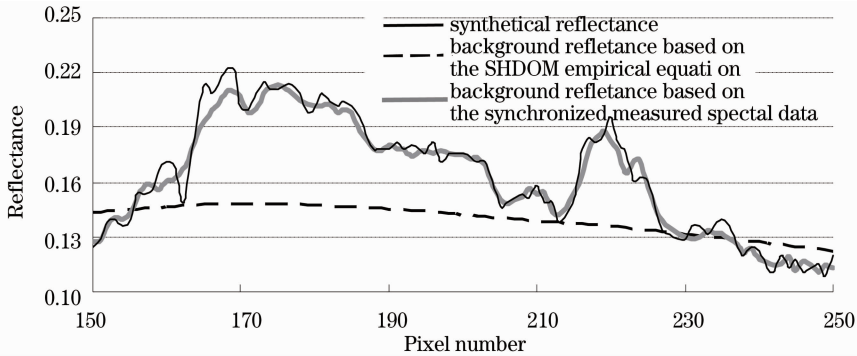


图 1 Landsat-5 TM1 波段影像背景反射率剖面

Fig. 1 Image background reflectance profile of Landsat-5 TM 1 band

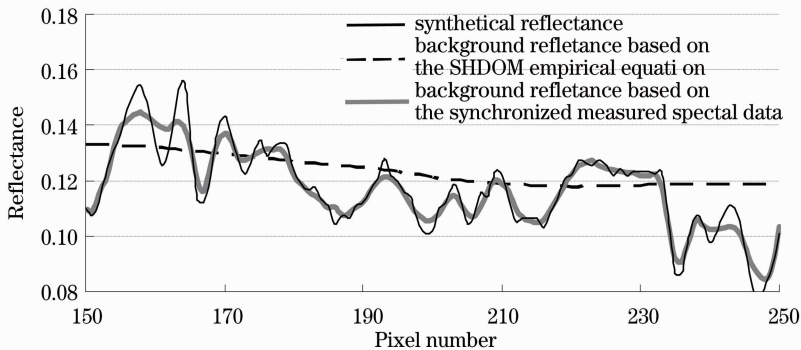


图 2 ASTER 1 波段影像背景反射率剖面

Fig. 2 Image background reflectance profile of ASTER band 1

3 真实反射率获取

基于 SHDOM 经验方程算法和基于同步实测光谱数据算法的在综合反射率和背景反射率的基础上计算真实反射率(不含邻近效应)的公式分别如下两式:

$$\rho_t = \frac{\rho_l T(\theta_v) - \rho_b t_d(\theta_v)}{\exp(-\tau/\cos \theta_v)}, \quad (6)$$

$$\rho_t = \frac{\rho_l - \rho_b(1 - \alpha)}{\alpha}, \quad (7)$$

分别进行变换,得到

$$\rho_t - \rho_b = (\rho_l - \rho_b)[T(\theta_v)/\exp(-\tau/\cos \theta_v)], \quad (8)$$

$$\rho_t - \rho_b = (\rho_l - \rho_b)(1/\alpha), \quad (9)$$

式中 $T(\theta_v)$ 为大气在传感器接收方向上总的向上透射率, $\exp(-\tau/\cos \theta_v)$ 为大气对来自目标像元反射能量的透射率, $t_d(\theta_v)$ 为邻近像元能量经大气散射后进入传感器的透射率, $t_d(\theta_v) = T(\theta_v) - \exp(-\tau/\cos \theta_v)$ 。基于 SHDOM 经验方程算法以 $\exp(-\tau/\cos \theta_v)/T(\theta_v)$ 即来自目标像元的能量到传感器的透射率与地表能量到传感器的透射率之比来表示直接来自目标像元的能量在传感器接收的总能量中所占的比例。但是,这些大气参数往往是基于影像利用已有的辐射传输模型计算得到,与实际值会有一定的差距。

α 也表示传感器接收到的能量中目标像元能量所占的比例,但是更准确地说, α 表示当传感器位于 1.5 m 高度平台(实测光谱数据是将地物放在距地面 1.5 m 高度平台上测量的)上时传感器接收到的能量中目标像元能量所占的比例,因此 α 只代表了一个离地面很小高度范围内大气层的散射所带来的邻近效应影响。它是通过逆向使用最小二乘法,使同步实测数据与影像上对应像元经(9)式反演得到的地面真实反射率之间的偏差最小来确定,因此不涉及复杂大气参数的计算。

邻近效应的影响是使相对较亮的像元变暗,而使相对较暗的像元变亮。因为, $1/\alpha$ 和 $T(\theta_v)/\exp(-\tau/\cos \theta_v)$ 均为大于 1 的数,所以当 $\rho_l < \rho_b$ 时, $\rho_t < \rho_l < \rho_b$; 当 $\rho_l > \rho_b$ 时, $\rho_t > \rho_l > \rho_b$ 。即,当背景像元比中心像元亮时,校正后中心像元的反射率会较综合反射率降低;当背景像元比中心像元暗时,校正后中心像元的反射率会较综合反射率升高。从而需对遥感影像的邻近效应进行去除。

4 两种算法影像校正结果分析

2007 年 7 月 25 日在天漠地区对沙地进行了光谱

测量(此次测量与 2007 年 7 月 25 日北京地区的 Landsat-5 TM 影像同步),如图 3 所示。于 2008 年 6 月 25 日在甘肃张掖对草地进行了光谱测量(此次测量与 2008 年 5 月 23 日甘肃张掖地区 ASTER 影像近似同步),如图 7 所示。基于这些实测光谱数据,分别对两幅影像进行了邻近效应校正,图 5 和图 9 为利用基于同步实测光谱数据算法校正的结果。图 4 和图 8 为利用基于 SHDOM 经验方程算法校正的结果。

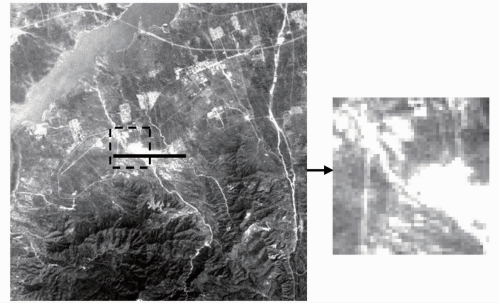


图 3 校正前 Landsat-5 TM1 波段影像及局部放大图
Fig. 3 Original image and partially enlarged image (Landsat-5 TM 1 band)

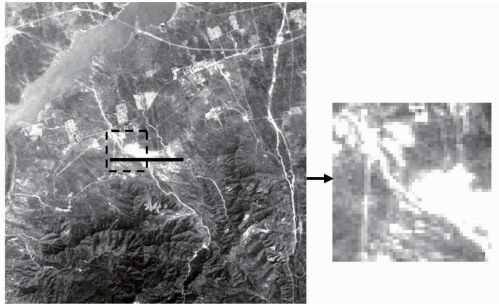


图 4 基于 SHDOM 经验方程邻近效应校正算法校正后 Landsat-5 TM1 波段影像及局部放大图
Fig. 4 Result image and partially enlarged image after adjacency effect correction based on SHDOM empirical equation (Landsat-5 TM 1 band)

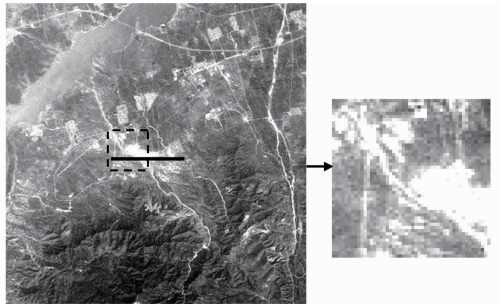


图 5 基于同步实测光谱数据邻近效应校正算法校正后 Landsat-5 TM1 波段影像及局部放大图
Fig. 5 Image and partially enlarged image after adjacency effect correction based on the synchronized measured spectral data (Landsat-5 TM 1 band)

4.1 实测地物为沙地的影像邻近效应校正

通过对比原始影像(图 3)和校正后影像(图 4 和图 5)可以发现,基于实测光谱数据校正后影像的清晰度明显提高,细节信息增多,纹理更加清晰;而基于 SHDOM 经验方程校正后的影像在目视效果上的改进并不是很明显。

图 6 是图 4 和图 5 中黑实线所示位置的 TM1

波段的反射率剖面图。其中,纵坐标表示像元反射率,横坐标表示黑实线位置剖面的像元编号。从校正前后相同位置的反射率剖面曲线可以看到,基于实测光谱数据校正后波峰反射率变得更高,波谷反射率变得更低,即亮的区域变得更亮,暗的区域变得更暗,增强了图像的对比度;而基于 SHDOM 经验方程校正后影像的反射率并没有得到很好的拉伸。

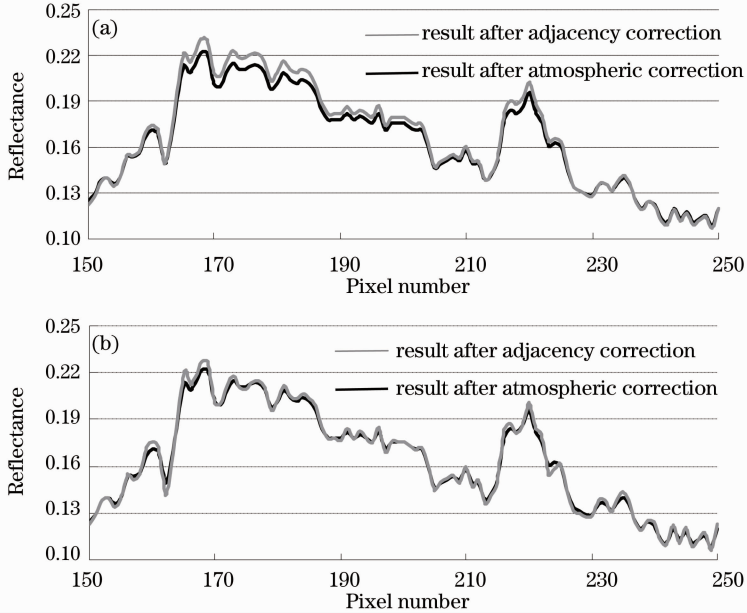


图 6 (a)图 4 与(b)图 5 校正前后影像 Landsat-5 TM1 波段反射率剖面图

Fig. 6 Comparison of the reflectance profile after adjacency effect correction and the original reflectance profile in Landsat-5 TM band 1 for (a) Fig. 4 and (b) Fig. 5

4.2 实测地物为草地的影像邻近效应校正

同样地,在目视效果上,基于实测光谱数据校正后影像的清晰度要比基于 SHDOM 经验方程校正后的影像高。图 7 为原始图像,图 8 和图 9 为校正后影像。

图 10 是对图 8 和图 9 中白实线所示位置的 ASTER1 波段的反射率剖面图。其中,纵坐标表示像

元反射率,横坐标表示白实线位置剖面的像元编号。从校正前后相同位置的反射率曲线也可以看到,基于实测光谱数据校正后影像像元的反射率对比度得到了很好的增强;而基于 SHDOM 经验方程校正后影像的反射率与校正前的综合反射率基本重合。

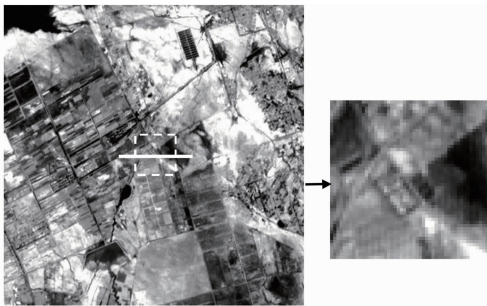


图 7 校正前 ASTER 1 波段影像及局部放大图

Fig. 7 Original image and partially enlarged image (ASTER 1 band)

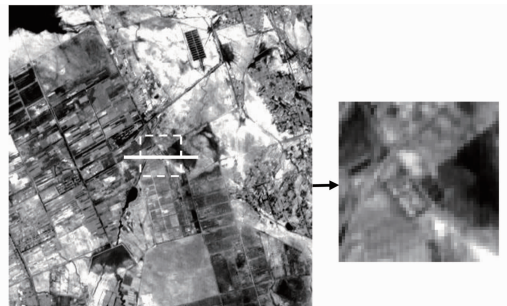


图 8 基于 SHDOM 经验方程邻近效应校正算法校正后 ASTER 1 波段影像及局部放大图

Fig. 8 Image and partially enlarged image after adjacency effect correction based on SHDOM empirical equation (ASTER band1)

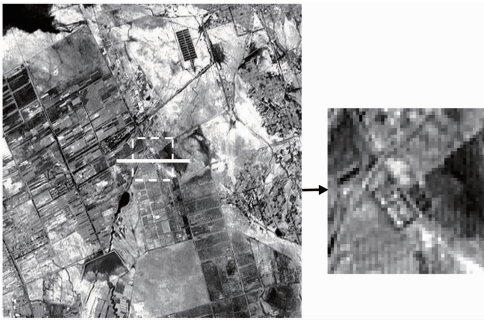


图 9 基于同步实测光谱数据邻近效应校正算法校正后 ASTER 1 波段影像及局部放大图

Fig. 9 Image and partially enlarged image after adjacency effect correction based on the synchronized measured spectral data (ASTER band1)

4.3 两种算法的邻近效应校正结果分析

对比针对两种地物(沙地、草地)的两种垂直观测影像(TM、ASTER)的邻近效应校正结果,基于同步实测光谱数据的校正算法使处于亮背景中的像元变暗,处于暗背景中的像元变亮,提高了各像元反射率之间的对比度,使图像变得更为清晰;基于SHDOM经验方程的校正算法虽然从原理上说可以校正邻近效应,但是实际的校正效果并没有基于同

步实测光谱数据校正算法的校正效果明显。其中的原因,一方面是两种校正算法在计算背景反射率时采用了不同的距离权重函数来代替点扩展函数进行计算。基于同步实测光谱数据的校正算法只考虑了邻近像元和中心像元之间的距离,而基于SHDOM辐射传输模型的权重函数除此之外还加入了大气光学厚度的影响,对大气辐射传输过程的考虑更为全面。另一方面是在反演的地面综合反射率的基础上,确定直接来自目标像元的能量在传感器接收的总能量中所占的比例时,基于同步实测光谱数据的校正算法用 1.5 m 高度上的实测光谱数据来计算,相当于只考虑了离地面一个很小高度范围内大气层的散射所带来的邻近效应影响。基于SHDOM经验方程的校正算法用从地表到传感器高度整个大气层的相关透射率来计算,即用来自目标像元的能量到传感器的透射率与地表能量到传感器的透射率之比来表示直接来自目标像元的能量在传感器接收的总能量中所占的比例,考虑了整个大气层的消光影响。但是计算大气相关透射率时利用的大气辐射传输模型以及向模型中输入的大气参数的精度往往都含有一定的偏差。

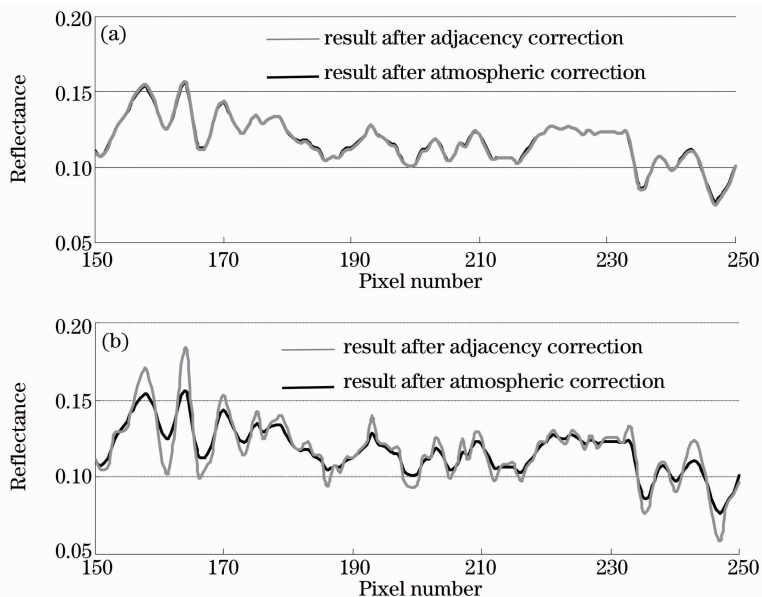


图 10 (a)图 8 与 (b) 图 9 校正前后影像 ASTER 1 波段反射率剖面图

Fig. 10 Comparison of the reflectance profile after adjacency effect correction and the original reflectance profile in ASTER band 1 for (a) Fig. 8 and (b) Fig. 9

另外还必须指出的一点是,在用 ASD 光谱仪测量沙地和草地的光谱数据时,扫描探头均与地物垂直,只对地物的垂向反射率进行了测量。就沙地和草地两种地物而言,沙地比较均一,更接近于朗伯体。而草地结构复杂,反射率具有二向性,因此可以在后

续的试验中测量草地的多组方向反射率用于校正。

5 结 论

对比研究结果表明,从辐射传输机理上,基于SHDOM经验方程的邻近效应校正算法的理论基础

更为完善;从校正后影像的目视效果上,基于同步实测光谱数据的邻近效应校正算法则更为有效。因此,当能够获得准确的大气参数时,可以首选基于SHDOM经验方程的邻近效应校正算法;如果为了使影像获得更好的目视效果并且有同步实测光谱数据的支持,则可以考虑采用基于同步实测光谱数据的邻近效应校正算法。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Kaufman. The Atmospheric Effect on Remote Sensing and its Correction[M]. New York: Wiley, 1989
- 2 Feng Chun. Research on Key Problems of Quantificational Remote Sensing Based on Radiation Transfer Model[D]. Bei Jing: China University of Geosciences, 2005
冯 春. 基于辐射传输模型的遥感量化关键问题研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005
- 3 Xu Xiru, Wang Pingrong. Computing atmospheric point spread function by Monte-Carlo method[J]. *J. Remote Sensing*, 1999, **3**(4): 159~165
徐希孺, 王平荣. 用蒙特-卡罗方法计算大气点扩展函数[J]. 遥感学报, 1999, **3**(4): 268~279
- 4 Jiang Yuesong, Li Xiaolu, Zhao Yiming *et al.*. Effects of atmospheric scattering on thermal infrared remote sensing of the earth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1766~1771
江月松, 李小路, 赵一鸣等. 热红外对地遥感中的大气散射效应[J]. 光学学报, 2006, **26**(12): 1766~1771
- 5 Shunlin Liang, Hongliang Fang, Mingzhen Chen. Atmospheric correction of landsat ETM + land surface imagery-part I: methods [J]. *IEEE T. Geosci. Remote.*, 2001, **39** (11): 2490~2498
- 6 T. Takashima, K. Masuda. Operational procedure of atmospheric correction on satellite visible data allowing for the adjacency effect[C]. *SPIE*, 1996, **2817**: 70~81
- 7 E. F. Vermote, D. Tanne, Jean Luc Deuze *et al.*. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. *IEEE T. Geosci. Remote.*, 1997, **35**(3): 675~686
- 8 P. N. Reinersman, K. L. Carder. Monte Carlo simulation of the atmospheric point-spread function with an application to correction for the adjacency effect [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4453~4471
- 9 B. Cong. Encoding neural networks to compute the atmospheric point spread function [C]. The International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'00), Las Vegas, 2000. 344
- 10 Jianwen Ma, Xiaowen Li, Xue Chen *et al.*. Target adjacency effect estimation using ground spectrum measurement and landsat-5 satellite data[J]. *IEEE T. Geosci. Remote.*, 2006, **44** (3): 729~735
- 11 Song Xiaoyu, Wang Jihua, Liu Liangyun *et al.*. Adjacency effect correction of vertical viewing angle remote sensing imagery[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(4): 537~541
宋晓宇, 王纪华, 刘良云等. 垂直角度光学遥感影像邻近像元影响纠正[J]. 光电子·激光, 2008, **19** (4): 537~541
- 12 Chen Xue, Ma Jianwen, Wen Qi *et al.*. Adjacency effect measurement and data analysis[J]. *J. Remote Sensing*, 2007, **11**(1): 1~8
陈 雪, 马建文, 温 奇等. 遥感邻近效应测量与数据分析[J]. 遥感学报, 2007, **11** (1): 1~8
- 13 Feng Chun, Ma Jianwen, Chen Jianping. PSF correction for satellite imageries[J]. *J. Quantum Electron.*, 2005, **22** (4): 657~663
冯 春, 马建文, 陈建平. 卫星影像“邻近效应”PSF校正方法[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(4): 657~663
- 14 Wen Qi, Ma Jianwen, Chen Xue *et al.*. Correction with ground measurement data for adjacency effect in remote sensing images [J]. *J. Remote Sensing*, 2007, **11**(2): 159~165
温 奇, 马建文, 陈 雪等. 遥感影像邻近效应的实测数据校正(II)[J]. 遥感学报, 2007, **11**(2): 159~165
- 15 K. F. Evavs. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 429~464