

# 一种改进的遥感影像地形校正物理模型

张志明<sup>1,2,3</sup>, 何国金<sup>1</sup>, 刘定生<sup>1</sup>, 汪小钦<sup>4</sup>, 江洪<sup>4</sup>

1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100190
2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049
4. 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350002

**摘要** 遥感影像地形校正是提高光谱反射率反演精度的一个重要的预处理步骤。目前已经出现了多种遥感影像地形校正模型, 这些模型各有优缺点。针对现有地形校正模型存在的问题和不足, 在 Shepherd 地形校正模型的基础上, 利用更高精度的天空散射辐射计算方法对其加以改进。将改进的地形校正模型和 6S 大气辐射传输模型相结合以 2006 年 7 月 12 日北京北部山区的 Landsat 5 TM 影像为数据源进行了地表光谱反射率反演试验。从三个方面对遥感影像地形校正效果进行了检验, 结果表明该改进模型能够取得较好的地形校正效果, 校正效果优于 Shepherd 和 C 校正模型。该改进模型是一种物理模型, 可以应用于各种光学遥感影像。

**关键词** 遥感影像; 光谱反射率; 山区; 地形辐射校正; 物理模型

中图分类号: P237 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)07-1839-04

## 引言

在崎岖的山地, 地形对卫星传感器所接收信号的影响表现在两个方面: 一是地形影响地面目标所接收到的入射辐射照度; 二是地形改变了太阳、地表和卫星传感器三者所构成的几何结构, 进而影响到地面目标在卫星传感器方向上的反射率。相应的地形校正也应包括两部分, 首先将水平面像元所接收的总辐射转换为坡面像元所接收的总辐射, 称为入射辐射照度校正。然后将坡面反射率转换为水平面反射率, 称为反射率校正。消除或减少山区遥感图像中地形因素的影响是提高光谱反射率反演精度的必然要求, 提高遥感图像光谱反射率反演的精度对提高遥感植被指数和地表参数计算的精度具有重要意义。

从 20 世纪 70 年代开始, 国内外学者就针对遥感影像的地形效应问题展开研究, 提出了不少遥感影像地形校正方法。比较常用的有余弦校正<sup>[1]</sup>、C 校正<sup>[1]</sup>、Minnaert 校正<sup>[2]</sup>等。其中余弦校正和 C 校正基于朗伯体假设, 仅考虑了地形起伏对像元接收入射辐射照度的影响, 余弦校正仅考虑了太阳直射辐射, 忽略了天空散射辐射和周围地形的反射辐射。Minnaert 校正是一种非朗伯体地形校正模型。研究表明余弦

校正存在严重的过校正现象<sup>[3,4]</sup>, C 校正和 Minnaert 校正虽然能够取得比较好的地形校正效果<sup>[5]</sup>, 但是它们是一种经验模型, 带有主观性, 对于不同的遥感影像得到的校正模型各不相同, 这就对其广泛应用造成了困难。本文在前人工作的基础上, 基于 Shepherd<sup>[6]</sup>地形校正模型, 借鉴 Noorian 等<sup>[7]</sup>的最新研究成果, 提出了一种改进的遥感影像地形校正物理模型。为进一步提高地表光谱反射率反演的精度, 本文还对遥感影像进行了大气校正, 在各种大气校正方法 (MODTRAN<sup>[8]</sup>, 6S<sup>[9]</sup>, FLAASH<sup>[10]</sup>等) 中, 本文选择常用的 6S 模型。

## 1 方法介绍

### 1.1 入射辐射校正

设坡面像元接收的总辐射为  $E$ , 它可分解为太阳直射辐射 ( $E_d$ )、天空散射辐射 ( $E_r$ ) 和周围地形的反射辐射 ( $E_a$ ) 三部分 (可参考 2008 年闻建光的博士学位论文——中国科学院研究生院)。

#### (1) 太阳直射辐射

坡面像元所接收的太阳直射辐射可由其对应的水平面像元所接收的直射辐射经余弦校正转换得到, 具体转换公式参

收稿日期: 2009-07-06, 修订日期: 2009-10-08

基金项目: 科技部中英国际合作项目 (2005DFA20420) 和国家 (863 计划) 项目 (2006AA12Z118) 资助

作者简介: 张志明, 1980 年生, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心助理研究员 zhangzhm@ceode.ac.cn, zming\_1980@163.com

见文献[11]。

### (2) 天空散射辐射

定量计算倾斜坡面所接收的天空散射辐射和周围地形的反射辐射往往比较困难,在很多地形校正模型中,都没有考虑这两个因素的影响。文献[5]对不同地形校正方法的校正效果进行了比较分析,结果发现考虑到天空散射辐射和周围地形的反射辐射的,地形校正效果就较好;未考虑的,效果则较差。因此为了提高地形校正模型的校正精度,需要考虑天空散射辐射和周围地形的反射辐射的影响。

倾斜坡面所接收的天空散射辐射可以由水平面所接收的天空散射辐射按一定的转换模型转换得到, Noorian 等<sup>[7]</sup>比较了 12 种转换模型,认为 Perez 模型<sup>[2]</sup>的转换效果最优,本文即利用 Perez 模型将水平面像元所接收的天空散射辐射转换为坡面像元所接收的天空散射辐射,详细的计算过程参见文献[12]。

### (3) 周围地形的反射辐射

精确计算周围地形的反射辐射( $E_a$ )很困难,本文采用文献[11]中的近似计算方法。

## 1.2 反射率校正

基于地表反射是各向异性的假定,地形起伏会引起太阳地表传感器几何关系的变化,从而改变了太阳光线的入射角和出射角,使得像元的反射率发生显著变化。而对于水平面,不同像元的入射角和出射角相同,从而同类地物的水平面反射率相同。因此,为了消除地形起伏对像元反射率的影响,需要将坡面反射率转换为水平面反射率。Dymond 等<sup>[13]</sup>提出了以下公式来计算水平面对直射辐射的反射率

$$\rho_i^h = \frac{\cos(i) + \cos(e)}{\cos(i_h) + \cos(e_h)} \times \rho_i \quad (1)$$

$\rho_i$  为坡面反射率,  $\rho_i^h$  为相应的水平面反射率,  $i$  和  $e$  分别为直射辐射在坡面上的入射角和出射角,  $i_h$  和  $e_h$  分别为直射辐射在水平面上的入射角和出射角。

## 1.3 地形校正

根据 Shepherd, 地形校正可以如下进行<sup>[6]</sup>

$$L = \frac{\rho_d E_d + \rho_s (E_r + E_a)}{\pi} \quad (2)$$

其中,  $E_d$ ,  $E_r$  和  $E_a$  分别代表上文的太阳直射辐射、天空散射辐射和周围地形的反射辐射。 $\rho_d$  为坡面对直射辐射的反射率,  $\rho_s$  为坡面对散射辐射的反射率,  $L$  为大气底部的辐射亮度,由下式得到

$$L = \frac{L_{sat} - L_p - L_{env}}{\tau} \quad (3)$$

$L_{sat}$  为星上辐射亮度,可以由传感器辐射定标得到,  $L_p$  为程辐射,  $L_{env}$  为环境辐射,  $\tau$  为大气光学厚度,后三者可以从 6S 模型获得。

由于卫星传感器所接收的信息大部分来源于地表对太阳直射辐射的反射,为了简化计算,假设  $\rho_s = \rho_s^h$  (即散射辐射具有朗伯反射性质),其中  $\rho_s^h$  为水平面对散射辐射的反射率,于是

$$L = \frac{\rho_d E_d / \gamma + \rho_s^h (E_r + E_a)}{\pi} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\cos(i) + \cos(e)}{\cos(i_h) + \cos(e_h)} \quad (5)$$

可令  $\rho_s^h = \rho_s^h$ , 对于中等太阳高度角 ( $50^\circ \sim 70^\circ$ ) 的影像,  $\beta$  可近似取值为 1。

最终地表反射率的计算公式为

$$\rho_d^h = \frac{\pi L}{E_d / \gamma + E_r + E_a} \quad (6)$$

## 2 地形校正试验

本文地形校正模型的主要特点在于对 Shepherd 模型中天空散射辐射  $E_r$  计算方法的改进。在 Shepherd 地形校正模型中,对  $E_r$  的计算采用一种简化的近似计算方法 (Liu 模型),这必然会影响到最终地形校正结果的精度。Noorian 等对 12 种  $E_r$  计算方法进行了对比试验 (12 种  $E_r$  计算方法参见文献[7]),并用实测数据进行了验证,结果表明 Perez 模型的计算精度最高,优于 Shepherd 模型中所用的 Liu 模型。因此为了提高天空散射辐射  $E_r$  的计算精度,并提高最终地形校正结果的精度。本文借鉴 Noorian 的最新研究成果,利用 Perez 模型来计算  $E_r$ ,对 Shepherd 地形校正模型进行了改进。另外与常用的 C 地形校正模型相比,本文中的改进模型是一种物理模型,具有普适性,能够适用于各种光学遥感影像。在下文的地形校正试验中,将本文方法与 Shepherd 地形校正模型和 C 地形校正模型进行了对比分析。

试验数据利用 2006 年 7 月 12 日北京北部山区的 Landsat 5 TM 影像,空间分辨率为 30 m。在地形校正中,DEM 数据的精度和质量对校正结果有很大的影响,为了保证影像校正质量,DEM 的分辨率不得低于影像的分辨率<sup>[14]</sup>,本次试验所用 DEM 的分辨率为 30 m。

## 3 地形校正效果验证

对地形校正效果的验证,本文借鉴文献中常用的方法,将目视比较和定量指标比较相结合。在定量指标比较中,选择了两种常用的指标,即“地表反射率和对对应太阳入射角余弦的相关性”和“标准差”<sup>[15,16]</sup>。

### 3.1 目视比较

由图 1 可以看出,未进行地形校正影像[图 1(a)]上有明显的阴阳坡之分,地形效应明显。经过地形校正后[图 1(b)]图像的地形效应得到很好地抑制,图像显得更加平坦。只进行反射率校正(即直接将水平面所接收的太阳直射辐射照度看作坡面所接收的入射辐射照度)后的图像仍然显示出明显的地形效应,地形校正不足。只进行入射辐射照度校正(即将坡面反射当成朗伯反射)后的图像则带有明显的过校正现象。本文方法、Shepherd 模型和 C 校正模型都能够在视觉上明显地抑制地形效应,三者结果在目视效果上差别不大。

### 3.2 地表反射率与 $\cos i$ 的相关性

地表反射率和对对应太阳入射角余弦  $\cos i$  的相关性是评价地形校正效果的一个重要指标,校正前,像素的地表反射率与太阳入射角余弦的相关性明显,校正后两者的相关性减

弱<sup>[15]</sup>。为了计算两者的相关性,将地形校正前后的地表反射率图像和  $\cos i$  图像叠加,然后随机选取 30 个采样点,则这些采样点线性回归方程的斜率和相关系数表示地表反射率和  $\cos i$  的相关性。斜率越大,相关性越强(指地表反射率受  $\cos i$

变化的影响较大);相关系数越大,相关性越强。地形校正前后各地表反射率与太阳入射角余弦  $\cos i$  的相关性如表 1 所示(以 TM 第四波段为例)。

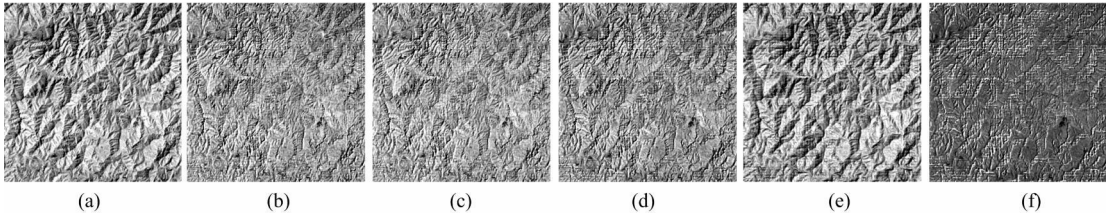


Fig 1 Comparison of topographic correction results (TM band 4 (a-f indicating original image, image corrected with the improved Shepherd model, image corrected with the Shepherd model, image corrected with C model, image corrected for reflectance only and image corrected for illumination only, respectively

Table 1 Correlation between surface spectral reflectance and  $\cos i$  before and after topographic correction

	线性方程的斜率	相关系数
地形校正前	0.1415	0.610
本文方法校正后	-0.0008	0.004
Shepherd 模型校正后	0.0122	0.065
C 校正模型校正后	-0.0511	0.232
只进行反射率校正后	0.3508	0.916
只进行入射辐照度校正后	-0.3042	0.753

Table 2 Comparison of standard deviation before and after topographic correction (%)

	标准差
地形校正前	6.99
本文方法	4.38
Shepherd 模型	4.52
C 校正模型	5.01
只进行反射率校正后	9.99
只进行入射辐照度校正后	7.47

由表 1 可以看出,利用本文方法进行地形校正后,地表反射率与  $\cos i$  之间的相关性(斜率和相关系数)明显减弱,表明了本文方法的有效性。利用 Shepherd 和 C 校正模型校正后,地表反射率与  $\cos i$  之间的相关性也明显减弱,但斜率和相关系数略大于本文方法。只进行反射率或入射辐照度校正后,反射率与  $\cos i$  之间的相关性依然很强,甚至强于未校正时的相关性,这表明进行地形校正时必须同时对入射辐照度

和反射率两方面进行校正,否则不能取得好的地形校正效果,校正后图像的质量甚至不如未校正时的图像。另外从表 1 也可以看出,只进行入射辐照度校正后,地表反射率与  $\cos i$  间呈现负的相关性,出现过校正现象。

### 3.3 标准差比较

为了进一步验证地形校正模型的校正效果,在 TM 影像上选取森林训练区(共 1500 个像素),然后分别统计地形校正前后 TM 第四波段反射率的标准差(表 2)。一个好的地形校正模型使得地形校正后同类地物的标准差减小<sup>[16]</sup>,本文方法所得结果正好验证了这一点,经过地形校正后,标准差明显减小,表明同类地物的内部变动变小,更能反映地表的实际状况。本文方法对应的标准差小于 Shepherd 模型和 C 校正模型,表明本文方法的校正效果优于 Shepherd 模型和 C 校正模型,只进行反射率或入射辐照度校正后,标准差反而显著增大。

## 4 结论与展望

山区遥感影像的地形校正是定量遥感研究中的一个重要问题,本文利用 TM 卫星影像和 DEM 数据探讨山区遥感影像的地形校正方法,提出了一个改进的遥感影像地形校正物理模型,试验结果表明了本文方法的有效性,而只进行入射辐照度或坡面反射率校正都不能够取得理想的地形校正效果。同时该方法完全基于物理原理,避免了经验模型的不足,具有较好的推广性,可以应用于各种光学遥感影像。

## 参 考 文 献

- [1] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G. Canadian Journal of Remote Sensing, 1982, 8(2): 84.
- [2] Smith J A, Lin T L, Ranson K J. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46(9): 1183.
- [3] Duguay C R, LeDrew E F. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(5): 551.
- [4] Holben B N, Justice C O. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46(9): 1191.
- [5] GAO Yong-nian, ZHANG Wan-chang(高永年,张万昌). Geographical Research(地理研究), 2008, 27(2): 467.
- [6] Shepherd J D, Dymond J R. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(17): 3503.
- [7] Noorian A M, Moradi I, Kamali G A. Renewable Energy, 2008, 33: 1406.
- [8] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 367.

- [ 9 ] Vermote E, Tanré D, Deuzé J L, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35: 675.
- [ 10 ] YUAN Jir guo, NIU Zheng, WANG Xi ping(袁金国, 牛 铮, 王锡平). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(5): 1181.
- [ 11 ] Sandmeier S, Itten K I. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 708.
- [ 12 ] Perez R, Ineichen P, Seals R, et al. Solar Energy, 1990, 44(5): 271.
- [ 13 ] Dymond J R, Shepherd J D. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2618.
- [ 14 ] Itten K I, Meyer P. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(4): 764.
- [ 15 ] Riano D, Chuvieco E, Salas J, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1056.
- [ 16 ] HUANG Wei, ZHANG Liang pei, LI Ping xiang(黄 微, 张良培, 李平湘). Acta Geodaetica et Cartographica Sinica(测绘学报), 2006, 35(3): 285.

## An Improved Physical Model to Correct Topographic Effects in Remotely Sensed Imagery

ZHANG Zhao ming<sup>1, 2, 3</sup>, HE Guo jin<sup>1</sup>, LIU Ding sheng<sup>1</sup>, WANG Xiao qin<sup>4</sup>, JIANG Hong<sup>4</sup>

1. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Spatial Information Research Centre, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

**Abstract** Topographic correction for remotely sensed imagery is an important preprocessing step in order to improve the retrieval accuracy of land surface spectral reflectance in mountainous area. Various kinds of topographic correction models have been proposed in the literature. Each model has its advantages and limitations. In consideration of the limitations of the topographic correction models in the literature, an improved Shepherd topographic correction model is proposed in this paper. Diffuse irradiance is an essential factor in the physically based topographic correction model. While in the Shepherd model (originally proposed by Shepherd et al. in 2003), accuracy of the method to compute the diffuse irradiance is relatively low; therefore, the accuracy of the land surface spectral reflectance retrieved with the Shepherd model is impacted. In order to improve the accuracy of diffuse irradiance, hence the accuracy of land surface spectral reflectance, a different method (named the Perez model), is used to obtain the diffuse irradiance with higher accuracy in the improved Shepherd model. Landsat 5 Thematic Mapper (TM) imagery acquired on July 12th 2006, over the mountainous areas in the north of Beijing city, was employed to retrieve land surface spectral reflectance with the improved Shepherd topographic correction model and 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) atmospheric radiative transfer model. Correction results were tested with three different methods. Testing result shows that the improved Shepherd topographic correction model can achieve a good correction result and is better than Shepherd and C topographic correction model. What is more, this improved model is physically based and can be applied to all kinds of optical satellite imagery.

**Keywords** Remotely sensed imagery; Spectral reflectance; Mountainous area; Topographically radiometric correction; Physically based model

(Received Jul. 6, 2009; accepted Oct. 8, 2009)