

# 基于模型的山地遥感图象辐射订正方法

闫广建 朱重光 郭军

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

王锦地 李小文

(北京师范大学, 北京 100875)

**摘要** 对太阳直射、天空漫散射和邻近地形的反射辐射进行了较为详细的分析, 提出了崎岖山地真实反射率的恢复模型及相应的快速算法, 从而实现了消除山地卫星影像中地形的影响, 恢复阴影所包含的细节. 利用 TM 影像的实验表明, 此方法可以有效地实现对影像的订正, 为遥感图象的后处理提供更多的信息.

**关键词** 模型 反射率 地形校正 大气参数 反演

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)01-0011-05

## A Model Based Radiative Transfer Algorithm to Correct Remotely Sensed Image in Mountainous Area

YAN Guang-jian, ZHU Chong-guang, GUO Jun

(Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

WANG Jin-di, LI Xiao-wen

(Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract** Topographic effects are the main obstacles to further application of remotely sensed images. Due to the fact of that different slopes and aspects show very different brightness in images even if the ground cover is the same type, the general classification methods may give wrong results. How to remove the topographic effects is a necessary step in quantitative remote sensing. However, topographic effects are very complex and difficult to be removed successfully. Based on detailed analysis of illumination sources that include solar direct irradiance, sky diffuse irradiance and adjacent reflectance, this paper presents a reflectance retrieval model to remove the topographic effects in satellite images and retrieve the information contained in shadow areas. From the corrected TM images, it is found that the topographic effects are removed effectively. This just illustrates that this method can provide more information for post processing of the remotely sensed images.

**Keywords** Model, Reflectance, Topographic correction, Atmospheric parameters, Inversion

## 0 引言

在崎岖的山地, 由于地形的影响, 使得象元所接收的有效光照可能会有很大的差别. 即使对于相同的目标, 不同的坡度将显示不同的亮度值. 另一方面, 不同类型的地物却有可能有相近的亮度. 地形效

应成为遥感数据进一步应用的主要障碍. 去除地形的影响即所谓的地形校正, 但是有几个因素限制了地形校正的发展: ① 地形问题本身的复杂性使得在精度、速度上很难满足实际应用的要求; ② 地形校正中须考虑大气的影响, 但大气参数又是未知的.

利用高程数据建立地形模型, 并结合实际的辐射观测值来反推象元的反射率是一般地形校正的思

路. 这种地形模型可以通过对辐射源的定量物理分析来建立, 也可以是太阳入射角和卫星接收辐射间的经验关系的总结. 经验模型由于缺乏物理分析的基础, 阻碍了其进一步的发展. 由于天空漫散射和环境反射辐射的复杂性, 物理分析方法引入了天空观测因子  $V_d$  和地形观测因子  $V_t$  的概念来简化这两项辐射<sup>[1-3]</sup>. 相应的辐照度可由入射到水平面上的平均辐照度与观测因子相乘而得到. Dozier 采用分析的方法来决定这两个因子<sup>[1]</sup>, 由于地形的复杂性, 他把  $V_t$  近似表达为一个同坡度的无限长斜坡的天空观测因子与其自身  $V_d$  的差. 但与天空辐射相比, 反射辐射要复杂得多, 由于地形的不对称性及随机性, 即使周围环境是朗伯体这一辐射项也是各向异性的. 因此应逐点计算邻近象元的反射. Proy 在象元的尺度上考虑了反射辐照度<sup>[4]</sup>, 但是却由于巨大的计算量, 她只选择了 22 个点进行计算比较. 结果表明, 在阴影区不能忽略反射的影响, 尤其当地表覆盖有雪或近红外波段地表为植被时周围环境的反射占有较大的比重. 我们选择了三峡万县地区的一块研究区域, 在整个区域内对各项辐射量进行了计算, 其中包括对邻近象元反射的计算, 而所用的时间却相应较短.

## 1 反射率恢复模型

山地的辐射传输模型通常是基于数字高程数据及大量的假设, 例如假设地表为朗伯体以及大气散射是各向同性的. 所有的模型都要考虑由于地形的影响导致所接收辐射量的变化. 地面一点所接收的光照可分解为 3 项: ① 直接入射辐射; ② 下行漫散射辐射; ③ 周围地形的反射辐射. 各项辐射的形成机理不同, 需分别进行讨论.

### 1.1 直接入射辐射

直接入射到地表的辐照度与大气层外的太阳通量、太阳方位及大气光学厚度等有关. 光学厚度又是高度的函数, 如果假设大气层由若干水平均匀的薄层构成, 可用总的光学厚度来描述大气的衰减. 入射到坡面的直接辐照度可表示为  $E_d(\text{Wm}^{-2})$ :

$$E_d = \Theta \cos(i) E_s e^{-\tau \cos \theta} \quad (1)$$

其中:  $\Theta$  为投射阴影系数, 若坡面为阴影区,  $\Theta$  为 0, 否则为 1;  
 $i$  为太阳光线与坡面法线的夹角, 也即太阳入射角;

$E_s$  为大气层外太阳辐射通量;  
 $\tau$  为总的垂直大气光学厚度;  
 $\theta$  为太阳天顶角.

### 1.2 天空漫散射

如果忽略大气自身的发射, 天空漫散射来源于大气对太阳辐射的散射效应, 通常要考虑其各向异性. 这种各向异性由两个因素引起: ① 大气散射的各向异性; ② 由于邻近地形的遮挡造成的可见天空范围的差异.

对大气散射的各向异性建模相当困难, 一般都假设为各向同性. 地形的遮挡则可由数字高程数据的计算而得到, 可用一个观测因子  $V_d$  来描述对一点可见的半球天空部分, 称为天空观测因子, 其定义为一点所接收的天空漫散射与未被遮挡的水平表面所接收的漫散射之比. 显然,  $V_d$  的值在 0 和 1 之间. 利用  $V_d$  可把一点的漫散射辐照度  $E_f(\text{Wm}^{-2})$  表示为:

$$E_f = V_d E_f^h \quad (2)$$

其中:  $E_f^h$  为无遮挡水平表面所接收的下行漫散射.

### 1.3 周围地形的反射辐射

周围地形的反射辐射与被研究点与周围各点的几何关系、该点的地面覆盖类型以及周围地表的覆盖类型相关. 反射辐射相当复杂, 不太可能在整幅图象内进行精确的计算, 不可避免地要作一些假设. 仿照天空观测因子, 一些研究人员应用了地形观测因子的概念<sup>[1-3]</sup>, 他们把地形的反射也假设为各向同性, 但由于地形起伏的复杂性, 即使周围环境是朗伯体, 各向同性的假设对这一辐射项也是不现实的.

本次研究中, 我们不再把该项辐射假设为各向同性, 而是逐点去考虑, 只假设在一小块范围内(一个象元), 可认为是朗伯体. 基于 Proy 的分析<sup>[4]</sup>, 周围各点  $P$  对一点  $M$  的反射辐射(见图 1)可表示为  $E_a(\text{Wm}^{-2})$ :

$$E_a = \sum_P \frac{L_P \cos T_M \cos T_P dS_P}{r_{MP}^2} \quad (3)$$

其中: 求和应包括对点  $M$  可见的所有象元;

$L_P$  表示点  $P$  的亮度;

$T_M$  及  $T_P$  分别表示点  $M$  及点  $P$  坡面法线与  $MP$  连线的夹角;

$dS_P$  为象元  $P$  的实际面积;

$r_{MP}^2$  为点  $M$  和  $P$  间的距离.

从(3)式可以发现, 在计算  $M$  点所接收的反射辐射之前, 必须先知道周围对  $M$  点可见的所有点的亮度. 但在模型中都是未知的. 这似乎是自相矛盾

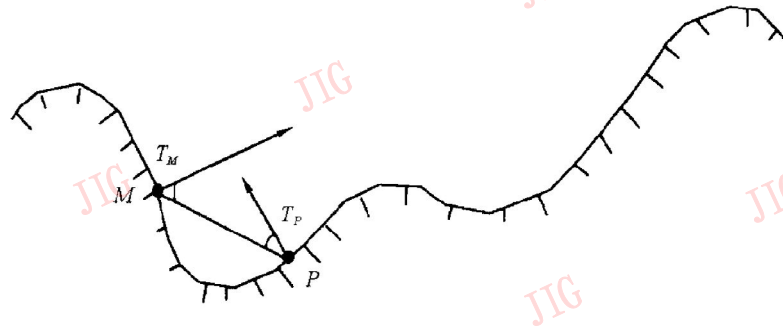


图 1 邻近地形反射的相对位置关系

的问题. 本文假设在象元的级别上地表为朗伯体, 从而得到了该项辐射的具体的表示形式(见第 1.5.1 节).

### 1.4 辐射方程

实际地表的反射特性可用二向性反射率分布函数(BRDF)来描述, 为了简化方程, 假设象元为一等效的朗伯反射表面, 则任一面源所发出的总的辐射可表示为  $L_0(\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1})$ :

$$L_0 = \rho(E_d + E_f + E_a) / \pi \quad (4)$$

其中:  $\rho$  为等效反射率.

$L_0$  经大气衰减后到达传感器, 同时, 背景辐射及大气自身反射也会进入传感器视场, 我们称此项为程辐射. 最后落到传感器上的辐射量为  $L_1(\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1})$ :

$$L_1 = L_0 e^{-\tau \cos \theta_v} + L_{ba} \quad (5)$$

其中:  $\theta_v$  为观察天顶角;  $L_{ba}$  为落到传感器上的程辐射.

### 1.5 反射率恢复模型

#### 1.5.1 地形反射的计算

由 1.3 节的分析可知, 要从(3)式中计算地形反射的辐照度  $E_a$ , 首先需要知道周围各象元点的亮度. 为了解决这种自相矛盾的问题, 我们假设传感器所接收的辐射可被(5)式精确表征, 则点  $P$  的亮度  $L_P$  可用传感器接收的实际辐射亮度  $L_i$  表示为:

$$L_P = (L_i - L_{ba}) e^{\tau \cos \theta_v} \quad (6)$$

反射辐射  $E_a$  可重新写为:

$$\begin{aligned} E_a &= \sum_P \frac{L_P \cos T_M \cos T_P dS_P}{r_{MP}^2} \\ &= e^{\tau \cos \theta_v} \sum_P \frac{L_i \cos T_M \cos T_P dS_P}{r_{MP}^2} - \\ &\quad L_{ba} e^{\tau \cos \theta_v} \sum_P \frac{\cos T_M \cos T_P dS_P}{r_{MP}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

#### 1.5.2 真实反射率提取

从(4)式及(5)式有, 反射率  $\rho$  可表示为:

$$\rho = \frac{\pi(L_1 - L_{ba}) e^{\tau \cos \theta_v}}{E_d + E_f + E_a} \quad (8)$$

同(6)式, 采用经辐射订正后的辐射值  $L_i$  来替代  $L_1$ , 即可得到观测方向的真实等效反射率. 大多数的卫星传感器为垂直观测, 有  $\theta_v = 0$ , 上式可重新写为:

$$\rho = \frac{\pi(L_i - L_{ba}) e^{\tau}}{E_d + E_f + E_a} \quad (9)$$

## 2 数据及算法

### 2.1 源数据

我们所选研究区域位于三峡地区, 所用 TM 图象获取于 1995 年 11 月 24 日, 卫星过顶时的太阳天顶角为  $59^\circ$ , 方位角为  $144^\circ$ . 与 TM 相匹配的数字高程模型(DEM)的高程分辨率为 1 米. 研究区域位于北纬  $30.5^\circ$ , 东经  $108.5^\circ$ , 覆盖面积为  $7.68\text{km} \times 7.68\text{km}$  ( $256 \times 256$  个 TM 象元), 主要为山地, 高程变化范围从 329 米到 1197 米.

从 TM 图象我们能直接得到的是变化范围在 0—255 的灰度值, 传感器实际接收的辐亮度  $L(\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1})$  可由下式得到:

$$L = (DN - O) \times G$$

其中:  $DN$  表示图象的灰度值,  $G$  和  $O$  分别为传感器的增益和偏移量. 本次研究所采用的 TM 2, 3, 4 波段的增益和偏移量如表 1 所示.

表 1 增益及偏移量

	增益 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$ )	偏移量
波段 2	0.095	2.385
波段 3	0.056	1.492
波段 4	0.105	1.846

### 2.2 参数计算

#### 2.2.1 地形因子

在上面的辐射模型中, 我们统称投射阴影系数、天空观测因子、坡度和坡向为地形因子. 投射阴

影系数  $\Theta$  主要影响太阳直接照射的能量, 本文采用了传统的光线追踪法. 对于坡度和坡向, 我们选择了已被广泛采用的基于 4 个点的矢量方法<sup>[5]</sup>. 天空观测因子  $V_d$  决定了一点所接收天空满散射光的多少. 目前较为成功的是 Dozier 提出的快速算法<sup>[2]</sup>. 该方法在若干方向搜索与研究点形成的最大高度角, 再对各方向进行平均便得到了  $V_d$ . 一般 16 个方向对  $V_d$  的计算就足够了. 为了进一步加快计算的速度, 我们采用了非均匀分布的 16 个方向, 使得在被研究点  $5 \times 5$  的领域内所有的象元都涉及到一次, 而且只有一次. 由于采用了这一不对称的方向分布, 减少了在均匀分布时搜索最大高度角所需进行的三角函数计算及内插处理, 大大加快了计算速度. 邻近地形的反射辐射是 3 项辐射源中最复杂的一项, 需要进行大量的计算, 本文把此项计算与求  $V_d$  的搜索过程相结合, 实现了在较短的时间内对研究区域内所有象元的邻近地形反射辐射进行了计算.

### 2.2.2 大气参数反演

地形辐射模型中必不可少地要知道成像时的大气条件, 野外实地测量是最可信的方法, 但同时也是最繁琐和不实际的选择. 于是众多的研究者采用一些商业化的大气校正软件和标准的大气条件. 从卫星影像本身来反演大气参数是较有吸引力的方

法, 通常选择一块单一地物的小区域, 利用辐射模型和多元线性回归算法来回归出一些基本的大气参数<sup>[6]</sup>. 但是回归的方法对区域的选择和数据的噪声较为敏感. 本文采用了 Powell 算法来反演大气参数<sup>[7]</sup>, 同时考虑了先验知识及其不确定性, 抗干扰能力较强.

## 3 结果及讨论

当辐射模型中所需要的所有参数都得到之后, 可以从辐射方程中唯一得到地表的反射率值. 彩色图版 I 中的图 1 给出了校正后的 TM 2, 3, 4 波段的反射率图象, 与原始的 TM 影像相比, 可以看到地形效应基本被去除了. 原图的阴影区所包含的图象细节在校正后的反射率图象中变得较为明显, 图 2 显示了校正前后图象直方图的变化. 从图中可以看出, 第 4 波段的校正效果较为明显. 原始 TM 影像在较低及较高的灰度处形成两个峰值, 说明由于坡度和坡向的影响, 一部分象元接收的光照不足, 而另一部分却呈饱和趋势. 校正后的直方图呈钟形分布, 反映了该地区地物覆盖情况, 去除了地形的影响. 另外两个波段也显示了类似的结果, 说明本文的模型及方法对 TM 影像是行之有效的.

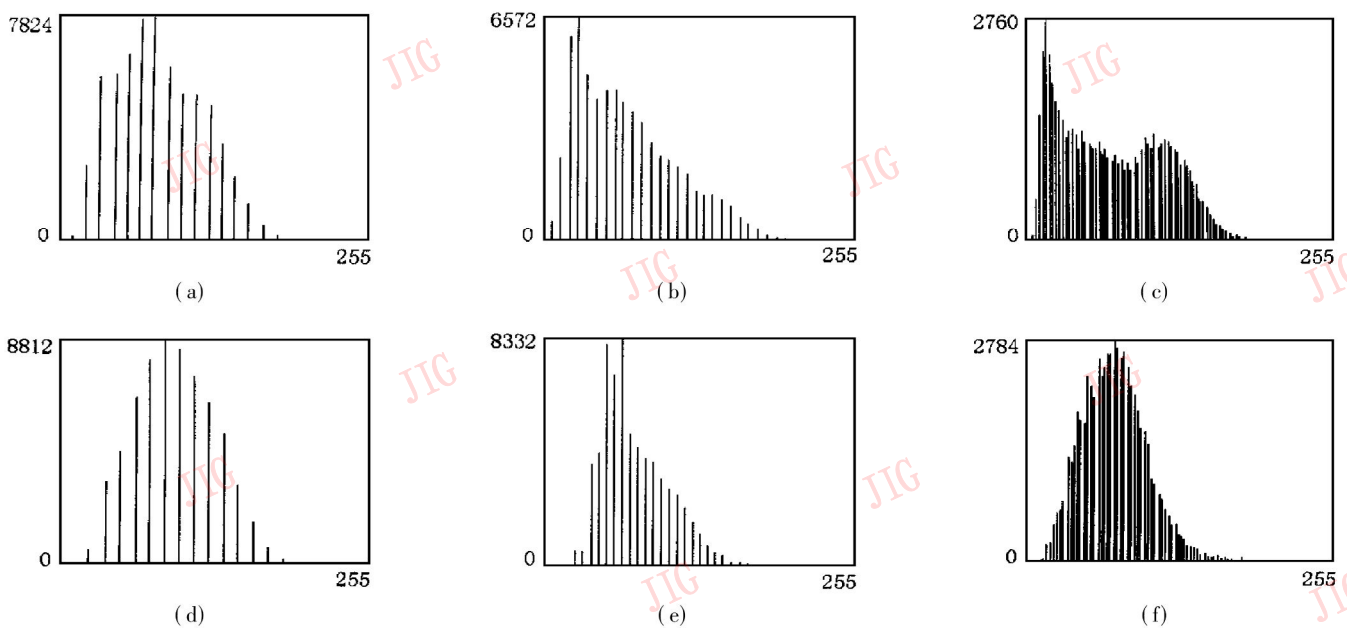


图 2 地形校正前后直方图对比

((a), (b), (c) 对应校正前 TM 2, 3, 4 波段; (d), (e), (f) 为相应校正后结果)

由于此模型不是基于经验的总结, 原则上适用于任意的地区及可见光和近红外波段垂直观测的卫星影像. 从校正后的反射率图象中发现在一些山脊

和山谷的地方会有欠纠正或过纠正的象元. 这可能是由于 DEM 的空间分辨率较低, 计算的坡度和坡向在山脊和山谷有较大的误差. 另外, 图象间的配

准误差和 DEM 本身的误差都会影响校正的精度。在条件允许时, 建议采用较高空间分辨率的 DEM 数据。作为进一步的改进, 可以考虑象元反射的方向性, 也即引入二向性反射分布函数(BRDF)及相应的模型。另外, 在本文的研究区域内, 大气参数可近

似认为是不变的常数, 如果所研究的区域较大, 或大气情况比较复杂时, 可在研究区域内选择若干块有代表性的均匀子区域, 反演出各自对应的大气状况, 然后内插到整个研究范围。

### 参考文献

- 1 Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. IEEE Trans. Geosci Remote Sens, 1990, 28: 963~ 969.
- 2 Dubayah R. Estimating net solar radiation using Landsat thematic mapper and digital elevation data. Water Resources Research, 1992, 28: 2469~ 2484.
- 3 Sandmerier S, Itten K L. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35: 708~ 717.
- 4 Proy C, Tanre D, Deschamps P Y. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. Remote Sens Environ, 1989, 30: 21~ 32.
- 5 Ritter P. A vector-based slope and aspect generation algorithm.

- Photogramm Engng Remote Sensing, 1987, 53(8): 1109~ 1111.
- 6 Yang C, Vidal A. Combination of digital elevation models with SPOT-1 HRV multispectral imagery for reflectance factor mapping. Remote Sens Environ, 1990, 32: 35~ 45.
  - 7 Powell M J D. The fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations Numerical Analysis. Watson G A (ed), Dundee, 1977.



闫广建 中国科学院遥感应用研究所博士研究生。主要研究领域为遥感图象处理、遥感建模及反演等。



朱重光 中国科学院遥感应用研究所研究员, 博士生导师。主要研究领域为遥感图象处理、模式识别、遥感建模及反演等。



郭军 中国科学院遥感应用研究所助教。主要研究领域为遥感图象处理、模式识别等。

王锦地 北京师范大学教授。主要研究领域为植被遥感、遥感建模及反演等。

李小文 北京师范大学教授, 博士生导师。主要研究领域为植被遥感、遥感建模及反演等。