

复杂山区光学遥感反射率计算模型

闻建光^{①③*}, 柳钦火^①, 肖青^{①②}, 刘强^①, 李小文^①

① 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

② 核工业北京地质研究院遥感中心, 北京 100029;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049

* E-mail: horse_wjg@sina.com

收稿日期: 2007-11-28; 接受日期: 2008-05-12

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-313)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB714401)资助

摘要 提出一种复杂山区光学遥感反射率计算模型, 以有效消除地形影响, 计算地表反射率. 通过推导地形影响下的方向反射, 结合辐射传输方程, 考虑地表反射目标接收的太阳直射辐射为方向-方向二向反射, 反射目标接收的大气漫散射和周围地形背景反射辐射为半球-方向二向反射的综合过程, 发展了基于方向反射的地形影响消除和地表反射率计算模型. 利用 GOMS 模型模拟数据及真实光学遥感数据对模型应用能力进行了评价, 结果表明此模型具有有效的地形消除能力以及大气校正能力, 模型的建立为后续山区定量遥感的应用提供技术支持.

关键词

二向反射
地形/大气校正
天空漫散射
周围地形反射辐射
崎岖地形

由于卫星传感器接收的辐射是太阳、大气及地表复杂相互作用的结果, 因此在崎岖山区, 不同的坡度遥感观测的辐射具有显著的差异, 这种辐射差异的变化强烈地受着地形的影响, 从而扭曲反映地表实体特征的信息. 因此, 地形效应成了山区遥感进一步发展的主要障碍, 如何有效消除地形影响以获得准确的地表反射率一直是遥感领域研究的一个难点^[1]. 消除地形影响即所谓的地形校正, 其一般思路是利用数字高程模型(Digital Elevation Model, 简称为 DEM)结合卫星传感器所接收的实际观测辐射值来消除地形影响并计算地表反射率. 目前已有多位学者进行了相关的研究, 发展了多种地形校正的模型: (1) 以校正地形影响太阳直射辐射为主的比值模型^[2,3]、Minnaert模型^[4]、余弦校正模型^[5]、SCS(太阳-冠层-传感器, Sun-Cannopy-Sensor)模型^[6]、John模型^[7]以及多种C校正模型^[8]; (2) 山地辐射传输模型^[9-18], 模型除考虑太阳直射辐射外, 还考虑大气散射辐射和周

围地形反射辐射^[11]. 目前崎岖山区地形校正和反射率计算主要以地表朗伯体特性假设为基础, 但由于实际地表的非朗伯体特性, 往往造成反射率过度校正的弊端. 少数学者做了初步尝试, 引入经验参数来削弱由于地表非朗伯体引起的地表反射率变化^[14,15], 但并未从真正意义上考虑地表的方向反射特性, 如何考虑地表方向反射特性进行地形影响消除一直是山区遥感反射率计算的难点.

二向性反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, 简称为BRDF)具有描述地表目标方向反射特性的能力. 模型的引入需要多个太阳入射角和传感器观测角支持, 而对于较高分辨率卫星遥感影像很难有多角度数据, 平坦地表单景遥感影像很难得到比较准确的BRDF参数^[19]. 但是在山区由于地形的起伏, 像元对应的太阳入射以及传感器的观测角度各异(图 1(a)~(c)), 在同一地表覆盖类型下, 利用他们之间不同地形观测反射率的差异性

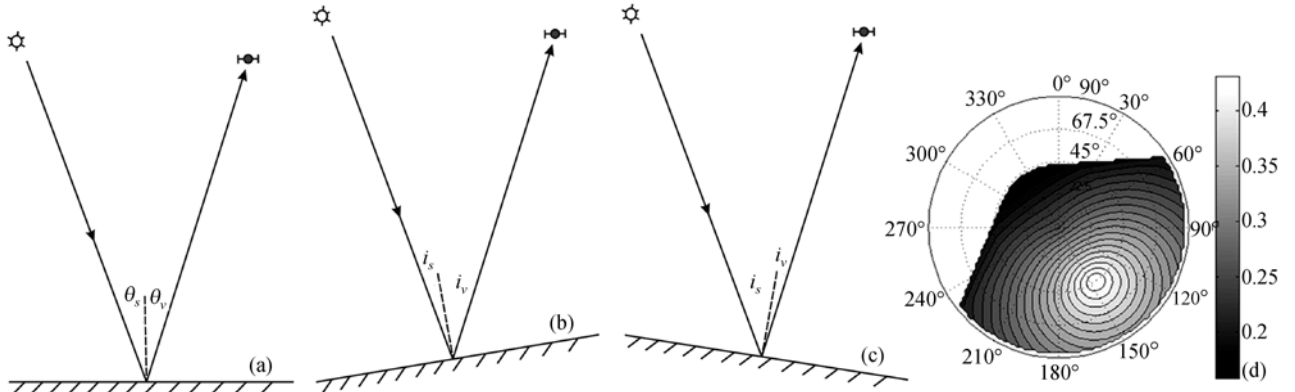


图 1 太阳入射和传感器观测随地形起伏的变化示例(部分情形)及坡面反射率

(a) 平坦地表, 太阳入射角为 θ_s , 传感器观测角为 θ_v ; (b) 面向太阳的地表, 太阳相对入射角为 i_s , $i_s < \theta_s$, 传感器相对观测角为 i_v , $i_v > \theta_v$; (c) 背向太阳地表, 太阳相对入射角为 i_s , $i_s > \theta_s$, 传感器相对观测角为 i_v , $i_v < \theta_v$; (d) 在太阳位置为 $(44.122^\circ, 145.988^\circ)$ 和传感器垂直观测下, 不同坡度和坡向观测的反射率不同(半径坐标轴为坡度, 极角坐标轴为坡向, 无值区为太阳照射不到的阴影区域)

(图 1(d))来计算获得 BRDF 参数, 将他们不同地形对应的不同太阳入射和传感器观测角度归一化到平坦地形所对应的实际太阳入射和传感器观测角度, 这种思路可以在一定程度上解决山区地形起伏条件下遥感反射率计算困难的问题。

本文将引入二向反射分布函数因子(BRDF factor), 推导和建立普适性强的山区光学遥感反射率计算模型, 以改进地表朗伯体假设的不足, 解决地形效应对遥感应用的影响. 以模拟数据和遥感卫星 Landsat/TM 数据(泰和县和江西兴国县)作为研究样本, 分析和验证此模型的应用能力。

1 模型建立

具有一定地形起伏的山区, 地表目标所接收的辐射来源于三部分: 一是未经大气散射的太阳直接辐射 E_s , 其次是大气漫散射辐射 E_a , 以及周围地形的反射辐射 E_a . 三部分辐射综合作用经地表目标的方向反射进入传感器而被观测, 据 Sandmeier 等^[13]在太阳入射方向 (θ_s, φ_s) 和地表目标所处地形坡度 α 和坡向 β 下, 山区地表目标接收的总入射辐射 E_{in_total} 为

$$E_{in_total} = \Theta E_s^h \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} + \Theta E_d^h K \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} + E_d^h (1 - K) V_d + E_a, \quad (1)$$

(1)式右边第一项表示太阳直射辐射照度 E_s . 其中 E_s^h 表示平坦地表接收的太阳直射辐射照度; Θ 为判断目标是

否被太阳直射的二值因子, 当 $\Theta = 1$ 认为目标处于光照面, 反之 $\Theta = 0$ 则处于阴影面为无太阳直射辐射; i_s 为太阳相对坡面的入射角, 其定义是太阳入射光与被照射的像元法向的夹角, 计算公式为

$$\cos(i_s) = \cos(\alpha) \cos(\theta_s) + \sin(\alpha) \sin(\theta_s) \cos(\beta - \varphi_s), \quad (2)$$

(1)式右边第二项和第三项分别表示环日各向异性散射辐射照度与天空各向同性散射辐射照度, 两者综合作用为天空漫射辐射照度 E_a . 其中 E_d^h 为平坦地表接收的天空漫射辐射照度, K 为各向异性指数, 表示环日各向异性散射占天空漫散射的权重, 用地面法线方向接收的太阳直射辐射照度与大气层顶太阳辐射照度之比计算. V_d 为天空可视因子, 描述了对一点可见的半球天空部分, 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 值在 0 和 1 之间. 第四项表示周围地形的反射辐射 E_a . Proy 等^[10]认为, 当地表反射率比较高时(如雪地、红外波段的植被), 此项辐射不可忽略。

本文在构建山区地表遥感反射率模型中, 将以(1)式为基础, 引入两类方向反射, 即方向-方向反射 ρ_{τ} 和半球-方向反射 ρ_{DR} . 其缘由是目标物对太阳直接辐射的二向反射是方向-方向反射 ρ_{τ} 的过程, 而对大气漫散射和周围地形反射辐射的反射可认为是半球-方向反射 ρ_{DR} 的过程. 设 τ 为当时大气光学厚度, 则传感器入瞳辐射 L , 是大气程辐射 L_p 和地表目标反射的辐射之和(图 2), 则(1)式可进一步表示为

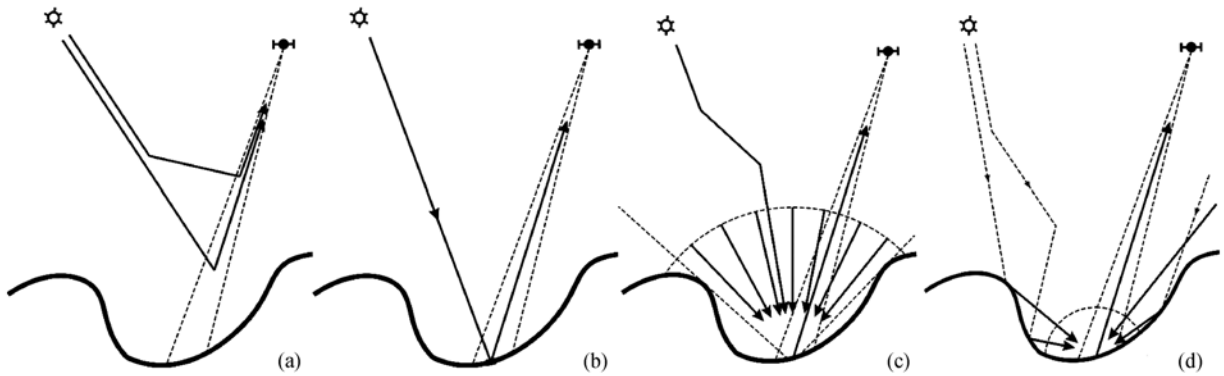


图 2 传感器入瞳辐射分解

(a) 大气程辐射; (b) 太阳直射辐射; (c) 大气漫散射辐射; (d) 邻近地形反射辐射

$$L = L_p + \Theta \frac{(E_s^h + E_d^h K) \cos i_s}{\pi \cos \theta_s} \rho_T e^{-\tau / \cos(\theta_v)} + \left[\frac{E_d^h (1 - K) V_d}{\pi} + \frac{E_a}{\pi} \right] \rho_{DT} e^{-\tau / \cos(\theta_v)}. \quad (3)$$

崎岖的地域, 同一地物类型处于不同地形, 在太阳和传感器几何位置相对不变(夹角和相对方位角不变)的前提下, 对应地表每一像元有不同太阳入射和传感器观测, 形成不同的坡面方向反射 ρ_T . 定义 ρ_H 为消除地形影响地表(或平坦地表)的方向反射, 将坡面对应的方向反射 ρ_T 转换为平坦地表对应的方向反射 ρ_H 是地形影响消除的最终目的. 在下面的分析中, 将以(3)式为基础, 对模型进行有效的计算, 获取无地形影响的方向反射.

1.1 坡面地表方向反射与平坦地表方向反射

具有地形起伏的像元, 不同地形引起不同的太阳入射和传感器观测, 形成单景影像同类地表类型像元太阳相对入射和传感器相对观测多角度的现实, 造成像元接收的太阳辐射以及传感器观测方向的辐射各异. 基于地形起伏为同种地物类型提供多个角度的太阳入射和传感器观测, 利用方向反射分布函数(BRDF)来描述不同地形影响下地表反射率的变化, 实现地形影响消除以及反射率计算的目的. 目前描述地表方向反射分布函数已有多种^[18], 主要以经验半经验模型为主. 如应用最广泛的核驱动模型可以表示为

$$\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi) = K_0 + K_1 f_1(\theta_s, \theta_v, \varphi) + K_2 f_2(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (4)$$

其中, $\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 是方向反射, $f_1(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 和 $f_2(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 是 2 个核, θ_s, θ_v 和 φ 分别表示太阳天顶角、传感器观测天顶角和他们两者之间的相对方位角. K_0, K_1 和 K_2 为模型参数, 利用一详细的地表类型覆盖图, 依据地形起伏下同一地表类型像元提供的多个相对太阳入射和相对传感器观测角度以及对应的像元方向反射率, 建立每类别的BRDF矩阵, 然后通过逐步回归获得. 并且基于上述模型发展的方向反射因子 Ω , 可以获得某一特殊太阳入射和传感器观测角度下的方向反射^[20,21]. 定义 Ω 为

$$\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{K_0} = 1 + \frac{K_1}{K_0} f_1(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{K_2}{K_0} f_2(\theta_s, \theta_v, \varphi). \quad (5)$$

对于太阳直射辐射, 在特定太阳入射方向 (θ_s, φ_s) 和传感器观测方向 (θ_v, φ_v) , 经地形影响消除后的地表目标方向反射 $\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 与坡面对应的反射 $\rho_T(i_s, i_v, \varphi)$ 之间的关系^[22]为

$$\rho_T(i_s, i_v, \varphi) = \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} \rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (6)$$

其中 i_s, i_v 分别为太阳相对坡面目标的入射角和传感器相对坡面目标的观测角.

对于大气漫散射, 目标接收的辐射是半球积分值, 由于大气散射假设各方向均一, 地形除阻挡部分辐射外, 对大气漫散射无方向性影响. 根据Nicodemus等^[23], 目标的半球-方向反射为方向-方向反射的入射角半球积分:

$$\rho_{DT}(i_v, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} \rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi) d\Omega_s, \quad (7)$$

Ω_s 为入射方向上投影微小立体角, 表示为

$$\Omega_s = \cos(i_s) \sin(i_s) di_s d\varphi_s. \quad (8)$$

1.2 光学遥感反射率模型的建立

将(6)和(7)式代入(3)式, 经过适当的整理, 则平坦地表的方向反射 $\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi)$:

$$\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi(L - L_p)e^{\tau/\cos(\theta_s)}}{\phi \frac{(E_s^h + E_d^h K) \cos i_s}{\cos \theta_s} \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} + \frac{[E_d^h(1-K)V_d + E_a]}{\pi \Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega(i_s, i_v, \varphi) d\Omega_s} \quad (9)$$

对于上式隐含在BRDF因子 $\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 中的二向反射模型, 为了计算方便, 本文利用经验模型, 如修改的walthall经验二向反射模型:

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi) = a_0 + a_1 \theta_s + a_2 \theta_v \cos(\varphi), \quad (10)$$

其中 a_0, a_1, a_2 是模型的参数, θ_s, θ_v 和 φ 分别为太阳天顶角, 观测角以及相对方位角. 此模型最早来源于Walthall经验的二向反射模型^[24], 1994年Liang和Strahler^[25]对模型进行了修改, Danaher等^[26,27]对Walthall模型的3个参数变量以及Liang和Strahler的修改模型进行了测试, 并利用模型((10)式)对Landsat TM及ETM+进行了有效的大气校正.

2 GOMS 模拟数据对模型的验证

本文模型中, 最核心的思想是建立反映由地形起伏引起的太阳和传感器相对地表目标角度发生变化, 引起地表反射率变化的分布函数, 然后利用此函数来获得平坦地表实际太阳和传感器角度下的反射率. 由于在模型计算反射率中, 太阳直射辐射是地表目标接收辐射最大的来源, 因此在地形校正研究的初期, 多数学者都只是以校正太阳直射辐射来达到消除地形影响的目的, 这在一定程度上可以消除地形的影响^[2-7]. 为了验证本文的模型是否亦可以对太阳直射辐射进行有效的地形影响校正, 暂且不考虑大气漫散射以及周围地形反射辐射的影响, 利用GOMS模型模拟生成地形影响的冠层反射率(GOMS模型是几何光学互遮蔽模型, 由Li和Strahler^[28]提出. 模型把像元分成光照背景, 光照树冠以及阴影三部

分, 若忽略由于太阳入射角不固定, 三部分特征反射率的变化, 则每一部分面积比例乘以本身的特征反射率然后相加便是整个像元的反射率. 模型像元反射率具有方向反射特性), 然后采用本文模型以及其他地形影响消除模型(余弦校正、C校正, SCS校正、SCS+C校正和Minnaert校正)进行对比研究, 这部分内容作者已有一定的研究基础^[22,29].

图3显示了多种模型方法对GOMS模拟数据进行地形影响校正, 获得的反射率变化均方根误差, 可以看出, 余弦校正和SCS校正模型方法的反射率均方根误差比较大, 分别为0.2168和0.1508, 其主要原因是在太阳相对入射角较大的地方出现反射率过度校正的问题, 致使反射率变化的均方根误差很大. 而其他三种模型方法(C, SCS+C和Minnaert模型)和本文所提的模型方法地形校正结果反射率变化的均方根误差分别为0.0374, 0.0403, 0.0428和0.0389, 均方根误差都较小. C, SCS+C, Minnaert模型中引入了与影像反射率本身有关的经验参数, 无实际物理意义, 本文模型则基于地表目标的二向反射, 引入了反映地表目标方向反射特性的方向反射因子, 基于(6)式将所有相对坡面地表目标的太阳入射和传感器观测角度转换至平坦地表对应的太阳入射和传感器观测角度的反射率, 物理意义明确. 模拟数据实验结果说明, 本文模型具有消除地形影响的能力.

3 山区 Landsat/TM 地形校正及遥感反射率计算

选择江西泰和县和兴国县具有一定地形起伏的地区作为典型样本区域(图4), 中心地带处于115°23.3'E, 26°34.8'N. 在泰和县境内有中国科学院千烟洲生态实验观测站, 可以提供有效的地面观测验证数据. 试验区选择的遥感数据是Landsat/TM5的6个可见光近红外波段, 当地过境时间为2003年10月26日上午10点30分左右, 过境时间的太阳高度角为45.878°, 方位角是145.988°, 通过Gyanesh等^[30]所提的方法将DN值转换为辐射亮度. 1:5万(地面空间分辨率为25m)的数字高程模型(DEM)也被搜集作为大气和地形校正的辅助数据, 利用太阳高度角和方位角, 生成相应的坡度和坡向、太阳相对入射角余弦、地形遮蔽等地形相关因子.

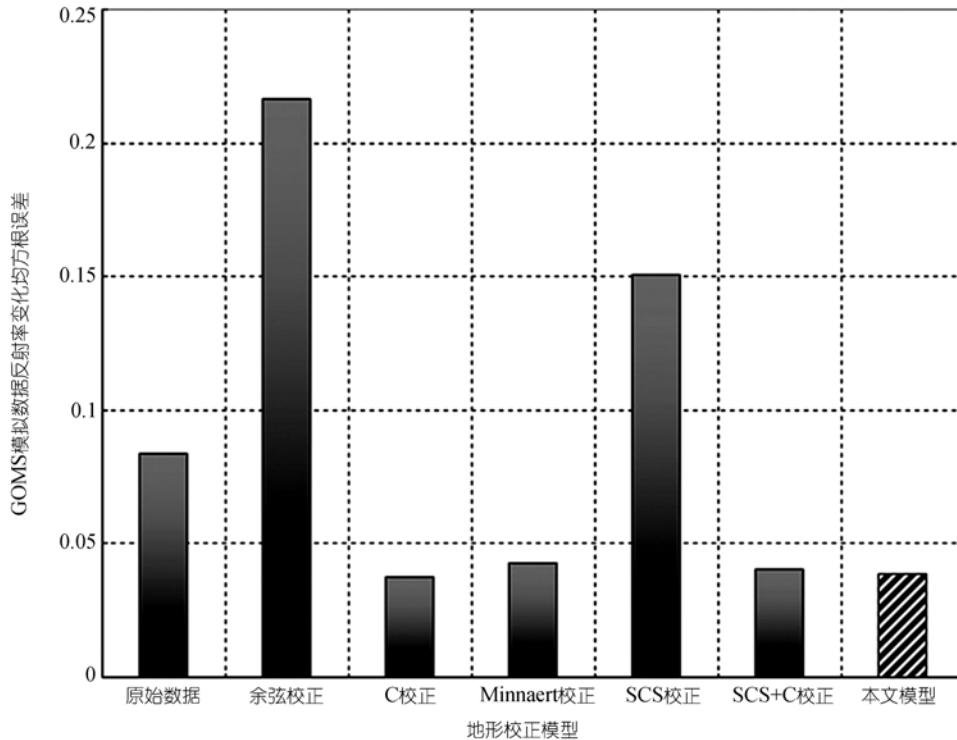


图 3 多种模型地形校正的反射率变化均方根误差对比

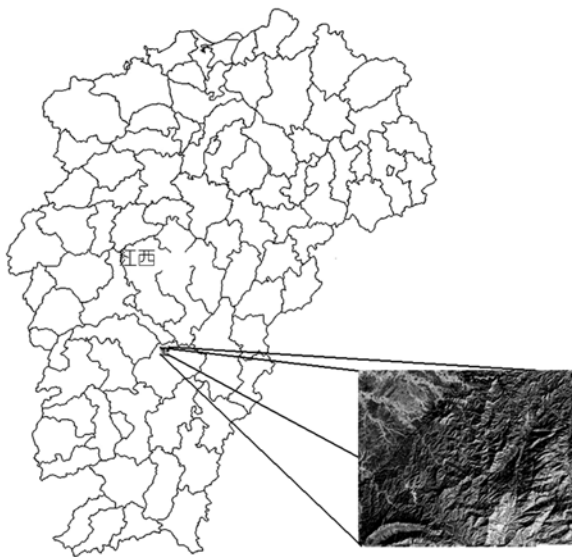


图 4 研究区域

3.1 山区遥感反射率的计算

根据当时Landsat/TM成像时间和几何位置、DEM高程、坡度和坡向, 利用MODTRAN精确计算当时平坦地表下太阳直射辐射和大气漫散射辐射, 并根据Proy等^[10]计算周围地形反射辐射. 依据该地区

相应的地表覆盖类型(本研究区域, 主要有浓密森林、稀疏森林和裸土三类地表类型), 针对每种地表类型求得相应的二向反射模型系数(表 1), 然后利用(9)式进行反射率的计算, 计算结果如图 5(c). 为了能够较好地进行模型的反射率计算精度评价, 本文利用朗伯体地表假设的山地辐射传输模型与本文模型对比. 从图 5 中发现, 常规未考虑地形影响的大气校正方法并没有很好消除地形的影响, 如图 5(a), 光照面和阴影面反射率对比比较大, 面向太阳坡面的光照较强, 反射率较大, 对于同种地表覆盖类型由于背向太阳, 光照不足, 反射率偏低. 图 5(b)是考虑地形影响但地表是朗伯体假设的反射率结果, 地形变化已经消除, 成为以平坦地表为特征的遥感影像, 但是背向太阳方向和阴影处的坡面存在反射率过度校正的不足. 对于基于地表二向反射因子的本文模型方法计算反射率结果(图 5(c))则可以较好地解决此类问题. 经本文模型方法后的反射率影像图 5(c)具有以下几个明显的特征: (1) 从影像色调和饱和度上分析, 图 5(c)影像整体色调和饱和度趋于一致, 光照面山坡亮度得到压制, 阴影面山坡亮度得到增强. (2) 很好地恢复了图 5(a)影像阴影隐藏下的地物类型. 由于阴

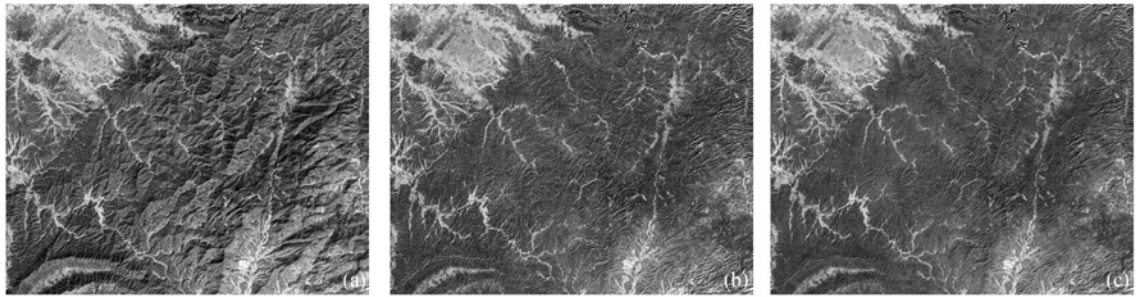


图5 三种方法反射率计算结果对比

图(a)~(c)分别为 TM5, 4, 3 合成的反射率图. (a) 未考虑地形影响计算的反射率影像; (b) 朗伯体地表假设山地辐射传输模型计算的反射率影像; (c) 本文模型方法计算的反射率影像

表1 经验二向反射模型参数

模型参数		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
浓密森林	a_0	0.0385	0.0723	0.0550	0.4114	0.2515	0.0925
	a_1	-0.0099	-0.0223	-0.0210	-0.1889	-0.1192	-0.0459
	a_2	0.01335	0.0073	0.0095	-0.0591	-0.0398	-0.0183
稀疏森林	a_0	0.0621	0.1238	0.1166	0.4864	0.3802	0.1731
	a_1	-0.0223	-0.0439	-0.0482	-0.1960	-0.1734	-0.0831
	a_2	0.0182	0.0310	0.0405	0.0086	0.0466	0.0377
裸土	a_0	0.1075	0.1744	0.2123	0.4400	0.5280	0.3331
	a_1	-0.0460	-0.0702	-0.0837	-0.1780	-0.2070	-0.1323
	a_2	0.0941	0.1068	0.1961	-0.1121	0.2370	0.2640

影处的极低亮度值很难分辨出是何种地物类型, 经本文模型方法后, 阴影遮蔽下的地物得到了重现.

3.2 地表遥感反射率验证分析

由于地形的影响, 未考虑地形影响的大气校正方法获得反射率随地形坡度坡向变化, 表现在随太阳相对入射角余弦变化而变化, 其趋势是随余弦值增大, 地物反射率增大. 根据此种思想, 进行地形校正后像元的反射率将不会随太阳相对入射角余弦的变化而变化.

线性回归拟合方程可以表示山区像元反射率与余弦之间的关系, 其线性方程的斜率代表了地形影响的程度, 斜率绝对值越小, 地形影响消除的结果越好. 因此采用一个斜率系数 R 来对校正效果进行评估.

图6显示了 TM 波段 4 在未考虑地形影响大气校正(图 6(a))、地表朗伯假设的山地辐射传输模型(图 6(b))以及本文模型(图 6(c))方法校正后遥感反射率随太阳相对入射角余弦之间的关系对比, 本文方法及朗伯体假设下进行地形和大气校正后斜率系数 R

大大减小, 表现为反射率受地形影响的程度大大减小. 特别是本文模型方法在余弦值比较小的地方地表反射率恢复的比较好, 未出现地表反射率过度校正的现象. 对于 TM 所有波段而言, 除 TM 波段 2, 3 有非常小的反射率过度校正外其他波段均未出现此类问题, 同时斜率系数 R 非常大的降低(表2), 说明利用本文模型方法进行的反射率计算可更好地消除地形影响.

以上分析可以知, 对于同种地物类型, 本文模型计算的地表反射率受地形的坡度影响非常小, 但还无法说明本文模型方法计算的地表反射率是否可以真正代表地表目标的反射率. 为了能进一步说明问题, 选择了影像中典型地物(浓密森林)作为地表覆盖类型, 从上述三种地表反射率影像中随机选择 1 千多个像元进行分析, 形成阴坡和阳坡各 1 条 TM 全波段样本均值反射率曲线(如图 7 的实线). 另外将 2005 年 11 月千烟洲 40 m 通量塔上利用 ASD 光谱仪在太阳主平面垂直测量得到的森林冠层光谱反射率(像元面积约为 150 m^2 , 无明显地形起伏), 经过 Landsat/TM 波段通道响应函数的转化, 形成 TM 波段反射率(图 7

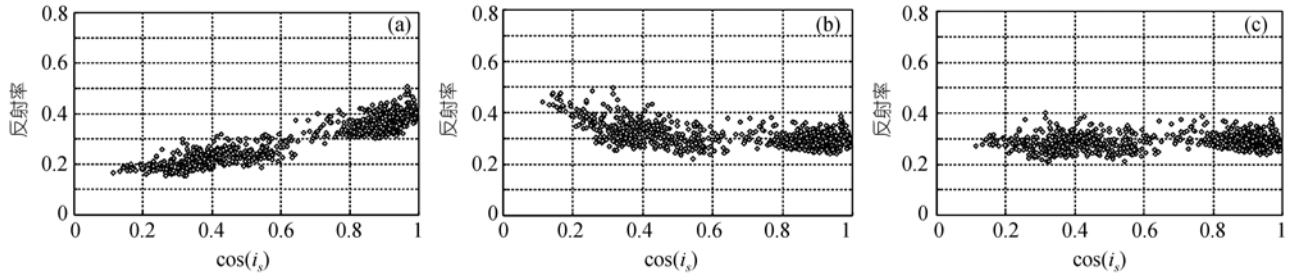


图 6 TM 第 4 波段三种方法处理的反射率与太阳相对入射角余弦之间的关系对比

(a) 未考虑地形影响计算的反射率; (b) 朗伯体地表假设山地辐射传输模型计算的反射率; (c) 本文模型方法计算的反射率

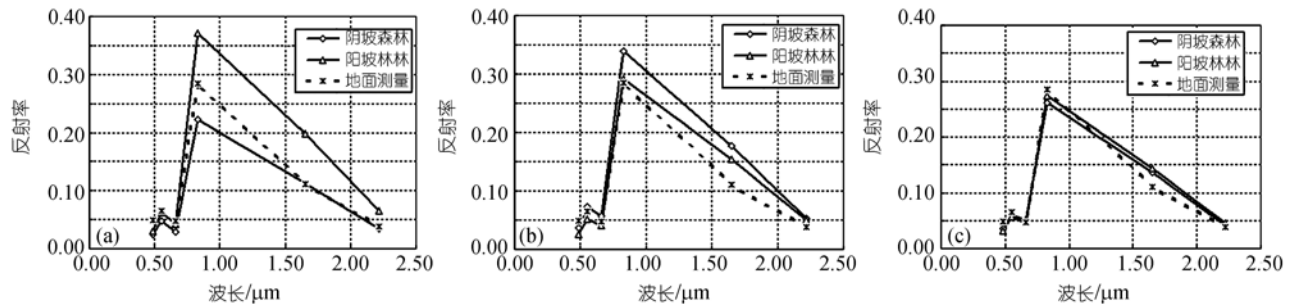


图 7 TM 三种方法处理的森林反射率对比

(a) 未考虑地形影响计算的反射率; (b) 朗伯体地表假设山地辐射传输模型计算的反射率; (c) 本文模型方法计算的反射率

表 2 TM 波段三种方法的反射率与余弦线性关系斜率对比

	未考虑地形影响大气校正方法(R)	朗伯地表假设方法(R)	本文模型方法(R)
TM 波段 1	0.0075	-0.0209	0.0062
TM 波段 2	0.0281	-0.0375	-0.0005
TM 波段 3	0.0236	-0.0265	-0.0046
TM 波段 4	0.2883	-0.0816	0.0234
TM 波段 5	0.1691	-0.0337	0.0155
TM 波段 7	0.0618	-0.0007	0.0081

的虚线), 将此反射率作为可与遥感 Landsat/TM 影像反射率对比的实地反射率. 可知, 在未考虑地形影响大气校正反射率与实地反射率对比图中, 阴阳坡的森林反射率差异较大, 与实际测量的反射率相比, 阳坡反射率偏大, 阴坡反射率偏小(如图 7(a)). 经地形校正模型计算后, 阴影区的地物反射率明显增大, 相反光照区得到了部分抑制, 与实地测量反射率一致性较好, 更好地反映了地物的反射率(如图 7(b)和(c)), 在森林覆盖的阳坡, 地形校正后反射率减小了 15.8% 和 11.8% 左右, 而阴坡的反射率增加了 54.7% 和 26.4% 左右. 但朗伯体地表假设下计算的阴坡森林反射率有明显的过度校正问题, 与实际测量反射率相比有较大偏差, 而本文模型计算的阴坡阳坡的森林

反射率趋于一致且与实测反射率吻合. 从两种消除地形后的反射率均方根误差相比看, 地表为朗伯体假设下对应 TM 各波段计算的阴坡阳坡反射率均方根误差比较大, 应用本文模型方法, 各波段对应的森林反射率均方根误差大大减小(如表 3). 说明利用本文模型计算的反射率不仅消除了地形的影响, 而且与实际测量的反射率也最为一致, 计算的遥感反射率真实可信.

4 结论

在山区进行定量遥感应用的前提条件是地形效应有效消除及大气辐射的精确校正, 以此精确计算遥感反射率. 本文基于地形影响下的方向反射模

表 3 TM 波段三种处理方法的森林反射率均方根误差(RMSE)

	未考虑地形影响大气校正方法	朗伯地表假设方法	本文模型方法
波段 1	0.0223	0.0188	0.0154
波段 2	0.0128	0.0110	0.0065
波段 3	0.0134	0.0081	0.0032
波段 4	0.0752	0.0390	0.0192
波段 5	0.0614	0.0560	0.0288
波段 7	0.0194	0.0138	0.0061

型, 分别考虑地表目标反射太阳直射辐射的方向-方向反射以及反射大气漫散射辐射的半球-方向反射两个过程, 发展了山区光学遥感反射率计算模型, 以求改进原有模型对地表朗伯体假设的不足. 利用 GOMS 模拟数据分析模型校正地形影响的能力, 并以实际 Landsat/TM 数据, 进行地形影响消除以及地表反射率计算, 分析验证了模型计算的反射率精度. 文中的结果说明引入地形二向反射因子结合辐射传输方程的反射率计算模型具有较好的地形影响消除能力及大气校正能力. 模型发展有以下几个特点:

(1) 结合辐射传输模型, 充分考虑目标接收辐射的三部分来源(太阳直射、大气漫散射以及周围地形反射), 并区别对待地表目标反射太阳直射辐射的方向-方向反射以及反射大气漫散射辐射的半球-方向反射两个过程, 模型本身物理意义更加明确.

(2) 模型考虑了实际地表目标的二向反射特性, 引入二向反射分布函数因子将不同地形下地表目标的相对太阳入射和相对传感器观测反射率, 转换至平坦地表下目标的实际太阳入射和实际传感器观测下的反射率, 二向反射分布函数因子在地形影响消除中有重要的作用.

本文的模型方法虽然在江西兴国区域得到了比较好的应用, 但由于其理论方法不是基于经验的总结, 原则上适用于任意地区的可见光和近红外波段光学遥感卫星影像. 但是从本文模型方法计算后的反射率影像中发现一些山脊和山谷区域出现地形消除不完全的像元, 其可能的原因是由于 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, 图像间的配准误差和 DEM 本身的误差都会影响此计算的精度. 在影像的边缘也存在着地形影响消除不完全的缺点(如图 5(b)和(c)), 其主要原因是由于 DEM 边缘真实的地表辐射很难计算精确.

在总结以上几点模型的不足外, 我们以后将在以下几方面开展山区地形和大气的研究: (i) 进一步改进模型, 引入更为合适的二向性反射分布函数及相应的模型. (ii) 考虑结合光谱库和遥感影像信息来参数化 BRDF 模型, 提高模型参数计算精度. (iii) 考虑地表像元接收的临近像元效应, 引入大气点扩散函数, 进一步提高山区遥感影像地形校正和地表反射率计算的精度.

致谢 中国科学院遥感应用研究所陈良富研究员为本文研究提供了宝贵的 DEM 数据, 审稿人提出了修改意见, 在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Chen Y, Hall A, Liou K N. Application of three-dimensional solar radiative transfer to mountains. *J Geophys Res*, 2006, 111: D21111, doi: 10.1029/2006JD007163
- 2 Holben B N, Jusice C O. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1980, 46: 1191—1200
- 3 Holben B N, Jusice C O. An examination of spectral band ratio to reduce the topographic effect on remotely-sensed data. *Int J Remote Sens*, 1981, 2: 115—123 [\[DOI\]](#)
- 4 Smith J A, Lin T L, Ranson K J. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1980, 46: 1183—1189

- 5 Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canada J Remote Sens*, 1982, 8(2): 84—106
- 6 Gu D, Gillespie A. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun-canopy-sensor geometry. *Remote Sens Environ*, 1998, 64: 166—175 [\[DOI\]](#)
- 7 Dymond J R, Shepherd J D. Correction of the topographic effect in remote sensing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37(5): 2618—2620 [\[DOI\]](#)
- 8 Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS+C: a modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43(9): 2148—2159 [\[DOI\]](#)
- 9 Kumar L, Skidmore A K, Knowles E. Modeling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *Int J Geogr Inf Sci*, 1997, 11(5): 475—497 [\[DOI\]](#)
- 10 Proy C, Tanre D, Deschamps P Y. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sens Environ*, 1989, 30: 21—32 [\[DOI\]](#)
- 11 Gratton D J, Howarth P J, Marceau D J. Using landsat-5 thematic mapper and digital elevation data to determine the net Radiation field of a mountain glacier. *Remote Sens Environ*, 1993, 43: 315—331 [\[DOI\]](#)
- 12 Duguay C R, Ledrew E F. Estimating surface reflectance and albedo from Landsat-5 Thematic Mapper over rugged terrain. *Photogramm Remote Sens*, 1992, 58(5): 551—558
- 13 Sandmeier S, Itten K I. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35(3): 708—717 [\[DOI\]](#)
- 14 Richter R. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *Int J Remote Sens*, 1997, 18(5): 1099—1111 [\[DOI\]](#)
- 15 Richter R, Schläpfer D. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2. Atmospheric/topographic correction. *Int J Remote Sens*, 2002, 23(13): 2631—2649 [\[DOI\]](#)
- 16 Wang J, White K, Robinson G J. Estimating surface net solar radiation by use of Landsat-5 TM and digital elevation models. *Int J Remote Sens*, 2000, 21(1): 31—43 [\[DOI\]](#)
- 17 Shepherd J D, Dymond J R. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *Int J Remote Sens*, 2003, 24(17): 3503—3514 [\[DOI\]](#)
- 18 阎广建, 朱重光, 郭军, 等. 基于模型的山地遥感影像辐射订正方法. *中国图形图像学报*, 2000, 1: 11—15
- 19 Beisl U. Correction of bidirectional effects in imaging spectrometer data. *Remote Sensing Series 37*, Department of Geography, University of Zurich, 2001. 24—38
- 20 Gutman G. Normalization of multi-annual global AVHRR reflectance data over land surfaces to common sun-target-sensor geometry. *Adv Space Res*, 1994, 14: 121—124 [\[DOI\]](#)
- 21 Wu A, Li Z, Cihlar J. Effects of land cover type and greenness on advanced very high resolution radiometer bidirectional reflectance: analysis and removal. *J Geophys Res*, 1995, 100: 9179—9192 [\[DOI\]](#)
- 22 Wen J, Liu Q, Xiao Q, et al. A semi-empirical model for topographic/atmospheric correction in Jiangxi rugged area, China. In: Maitre H, Sun H, Liu J B, eds. *Proceedings of SPIE*, 2007, Nov 15-17, Wuhan. Wuhan: SPIE, 2007. 678721-1—678721-9
- 23 Nicodemus F, Richmond J, Hsia J, et al. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. US Department of Commerce, Washington D C, 1977
- 24 Walthall G L, Norman J M, Welles J M, et al. Simple equation to approximate the bi-directional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Appl Optics*, 1985, 24(3): 383—387
- 25 Liang S L, Strahler A H. Retrieval of surface BRDF from multiangle remotely sensed data. *Remote Sens Environ*, 1994, 50: 18—30 [\[DOI\]](#)
- 26 Danaher T, Wu X L, Campbell N. Bidirectional reflectance distribution function approaches to radiometric calibration of landsat ETM+ imagery. *Geosci Remote Sens Symp*, 2001, 6: 2654—2657
- 27 Danaher T. An empirical BRDF correction for Landsat TM and ETM+ imagery. *Proceedings of the 11th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*. Brisbane, Australia, 2002
- 28 Li X, Strahler A H. Geometric-Optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30(2): 276—292 [\[DOI\]](#)
- 29 闻建光, 柳钦火, 肖青. 基于模拟数据分析地形校正模型效果及检验. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(3): 255—263
- 30 Gyanesh C, Brian M. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41(11): 2674—2677 [\[DOI\]](#)