

非均匀地物的双向反射与反照率*

董国权 李正直

(杭州大学物理系, 杭州 310028)

关键词 非均匀地物、双向反射模型、地物反照率、遥感模型

地物的双向反射特性与反照率是遥感技术应用中极其重要的参数。近年来对地物双向反射的研究主要集中在均匀地物上^[1,2], 对非均匀地物双向反射模型研究与数据测量则少得多^[3,4]。然而不管对何种尺度, 绝大部分自然地物常由各种不同类型的地物组成。

一、非均匀地物双向反射模型

本文考察由两种不同类型按不同比例混合的非均匀地物。假定其中一种地物为平坦的下垫面, 称为S组份, 另一种地物在竖直方向上相对于前一种地物有一定的高度, 并与前一种随机地混合, 称为P组份。如裸地与植冠、建筑物与草地等非均匀地物。

定义结构参数 $U = H^2/F$, 其中 H 为P组份单元的高度, F 为其横截面面积; 覆盖率 $C = \Sigma F_i/T$, 其中 Σ 是对像元内所有突出物所占面积的求和, T 为像元总面积。因 U 与 C 均为无量纲量, 我们即可应用 U 与 C , 简便地定量描述所考察非均匀地物的结构特性。

把所考察像元中地物在二维空间中划分成 30×30 单元, 每一单元具有单位面积, 并设P组份的覆盖率为 C 。那么在一个像元中, P组份单元个数为 $900C$ 。在模型中假设P组份随机地与S组份混合, 由于突出地物单元高度可以随意选取, 根据单元的互相组合及取不同的 U 和 C , 模型便可以模拟不同的地物结构。

根据上述非均匀地物的模拟模型, 把反射方向的半球空间上天顶角每隔 10° 划分成9个区, 方位角每隔 45° 划分成8个区, 共分出72个区。每一区的中心位置的法线矢量即为反射辐射的传播方向。忽略天空的漫射辐射与单元间的多次散射, 假定各单元的反射均为朗伯反射, 并用双向反射率分布函数^[5]来表示双向反射特性。对所研究的非均匀地物, 其双向反射率分布函数可表示为

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = V(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)R_p/\pi + H(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)R_s/\pi, \quad (1)$$

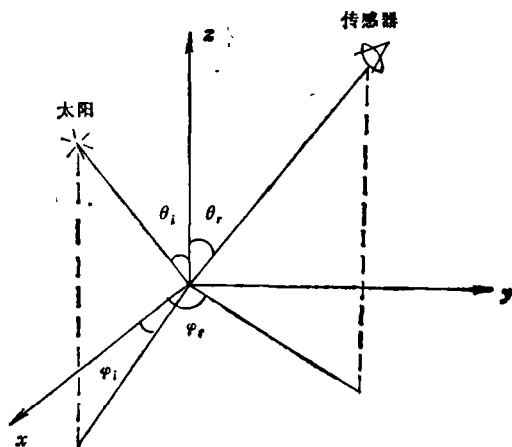


图1 太阳、传感器在球坐标系中的位置关系

1991-10-07 收稿, 1992-01-28 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

式中 R_p , R_s 分别为 P 组份与 S 组份的反射率, V , H 分别为突出物与下垫面在入射方向为 (θ_i, ϕ_i) , 观察方向为 (θ_r, ϕ_r) 时的水平等效分量(图 1)。

当太阳直射光从 (θ_i, ϕ_i) 入射, 观察者从 (θ_r, ϕ_r) 方向观察, 像元中地物某一单元可能处于下述四种情况之一: (1) 单元被入射光照到又被观察到, (2) 单元被入射光照到但不能被观察到, (3) 单元处于阴影中但能观察到, (4) 单元处于阴影中未能观察到。把处于阴影中单元的反射辐射取为 0, 那么上述四种情况中, 只有(1)才对 (θ_r, ϕ_r) 反射方向的反射辐射亮度有贡献, 其他三种情况均为 0。显而易见, H , V 的物理意义即为被 (θ_i, ϕ_i) 方向的人射光照到, 又被 (θ_r, ϕ_r) 方向的观察者看到的下垫面与突出物单元的等效水平分量。(1) 式中 R_p 与 R_s 表示了地物的光谱反射特性, 而 H 与 V 表示了地物的结构及入射辐射方向, 观察方向的几何位置特性。

由(1)式可得非均匀地物的反照率 ω 为

$$\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} (VR_p + HR_s) \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (2)$$

一般计算非均匀地物的反照率均采用面积加权方法^[4]。由于面积加权方法忽略了突出地物由入射光投下的阴影的影响, 因而计算时将产生误差, 尤其是对突出物较高, 入射光天顶角较大时的情况^[5]。为了消除上述误差, 我们在面积加权方法计算两组份非均匀地物反照率公式的基础上, 引进了两个修正系数, 改进后的公式为

$$\omega = A \cdot C \cdot R_p + B \cdot (1 - C) \cdot R_s \quad (3)$$

系数 A , B 分别为

$$A = \frac{1}{\pi C} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} V \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{\pi(1 - C)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} H \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (5)$$

当 $A = B = 1$ 时, (3) 式即为常用的面积加权公式。

由模型计算得到 H 与 V , 再由(4), (5) 两式可计算出系数 A 与 B , 从而可以方便而又精确地计算出由两种不同类型地物组成的非均匀地物的反照率, 消除了用面积加权方法因忽略突出物的阴影而带来的偏差。

二、数据处理与结果分析

图 2 为计算得到的双向反射率分布函数 f_r 在极坐标系中的表示。计算时取 $R_s = 0.2$, $R_p = 0.25$, $U = 1.0$, $C = 0.2$, $\theta_i = 45^\circ$ 。坐标中的 φ'_r 角表示观察方向相对于入射光方向的相对方位角, ρ 为以百分比表示的 f_r 。曲线族表示在不同 θ_r 时 f_r 相对于 φ'_r 的变化。当 φ'_r 较小时, 入射光方向与观察方向几乎处在同一平面上, 突出物投在下垫面上的阴影对该方向上的反射辐射亮度贡献最小, 因而在这些方向上, 总的反射辐射亮度为最大, 从而 f_r 到达极大。当 φ'_r 增加, 阴影对反射辐射亮度贡献增加, f_r 也就随之变小, 当 $\varphi'_r = 180^\circ$ 时, f_r 到达极小。在相同的 φ'_r 时, 随 θ_r 的增加, 下垫面单元对反射辐射亮度贡献减小, f_r 也就随 θ_r 的增加而减小。

图 3 表示 $C = 0.6$ 时, 系数 A 与 B 随 U 与 θ_i 的变化。对系数 A 与 B 随 θ_i , U 和 C 的变化分析可知, A 总是大于或等于 1.0, 而 B 总是小于或等于 1.0。随着 θ_i 的减小, 系数 A 与 B

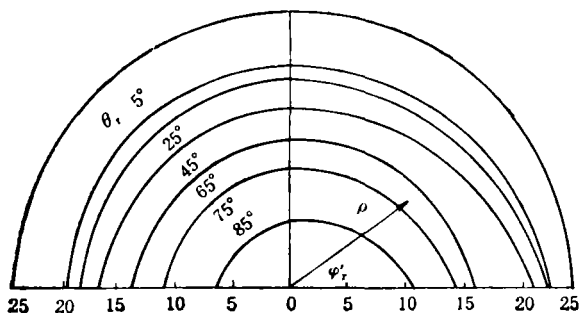


图2 非均匀地物的双向反射率分布函数
 $C = 0.2, U = 1.0, \theta_i = 45^\circ$

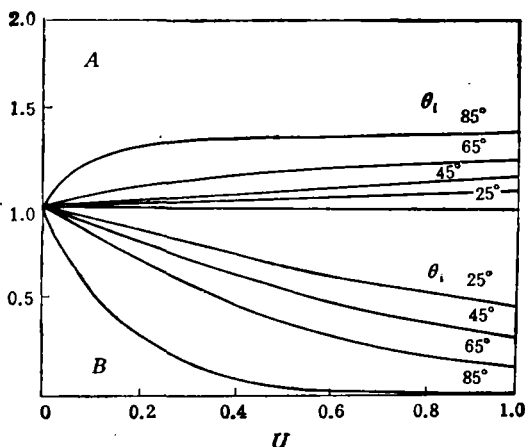


图3 A, B 随 θ_i, U 的变化
 $C = 0.6$

均趋向于 1.0。这是因为 A 表示对 P 组份的修正，在 30×30 单位的像元上，P 组份共占有 $900C$ 个单元，因而不管 U, θ_i 的数值大小，P 组份的最小水平等效反射面积 V 为 $900C$ ，即为 P 组份立方体单元顶面的面积之和。随着 θ_i 增加，由于 P 组份立方体单元侧面面积对 V 的贡献， V 将大于 $900C$ ，因而 A 的最小值为 1.0。而对系数 B ，它表示对 S 组份的修正，由于 P 组份的阴影，S 组份的最大等效水平反射面积 H 为 $900(1 - C)$ 。随 θ_i, U 的增加，P 组份投射到 S 组份的阴影增加， H 也就减小，因而系数 B 将随 θ_i, U 的增加而减小。当 θ_i 和 C 较大时， A 与 B 均不再随 U 的增加而变化，均趋向于常数值。这是由于对较大的 θ_i 和 C ，随 U 的增加，S 组份迅速地被 P 组份的阴影填满，因而 H 趋向于 0， B 随之也就趋向于 0，对于 P 组份，随 U 的增加，由于互相的遮阴，P 组份的水平等效面积 V 也就随 U 的增加而趋于一常数，因而 A 也就趋于一常数。

比较用(3)式计算得到的非均匀地物的反照率随 θ_i, U 和 C 的变化与文献[5]得到的反照率随 θ_i, U 和 C 的变化，不难发现，两者是一致的。本文引进的系数 A 和 B 为面积加权公式中的两个修正系数，因而用(3)式可直接精确地算出非均匀地物的反照率。

取不同的 U, C 与 θ_i ，分别计算系数 A 和 B 。首先分析 A 与 B 随 U 的变化，发现 A 随 U 的变化可以用一双曲函数表示，而 B 随 U 的变化可用一指数函数表示，即

$$A = 1 + U / (m_1 U + m_2), \quad (6)$$

$$B = 1.01 \exp(-n_1 U). \quad (7)$$

得到各种不同 U 时，(6)，(7)两式中的回归系数 m_1, m_2 和 n_1 后，继而分析 m_1, m_2 和 n_1 随 θ_i 和 C 的变化，可以得到

$$m_1 = -1.201 - 2.443C + 72.905e^{2.397C}/\theta_i,$$

$$m_2 = 0.302e^{2.938C} + (56.397 + 12.185C)/\theta_i,$$

$$n_1 = \frac{C}{0.862C + 0.684} + \frac{(-4.177 \times 10^{-3} + 7.682 \times 10^{-3}C)(\theta_i - 5)}{1 - (0.0118 + 1.939 \times 10^{-3}C)(\theta_i - 5)}.$$

用(6)，(7)两式算得的系数 A 与 B 与模型计算得到的数据间相关系数均在 0.91 以上。

系数 A 与 B 只依赖于突出地物的结构参数 U 、覆盖率 C 及入射光天顶角 θ_i 。在实际应用

中,这些参数均可方便地得到。

本文建立的模型可以用来计算各种非均匀地物的双向反射率分布函数与反照率。虽然在模型中我们仅仅考虑了最普遍的两组份非均匀地物,对多组份的情况,只要在模型程序中稍加修改,本方法仍适用。由模型结果拟合得出的计算非均匀地物反照率的修正公式,消除了常用的面积加权方法由于不考虑阴影作用而带来的偏差。

参 考 文 献

- [1] Verhoef, W., *Remote Sens. Environ.*, 16(1984), 125—141.
- [2] Pinty, B. et al., *Remote Sens. Environ.*, 27(1989), 273—288.
- [3] Meerkotter, R., *Appl. Opt.*, 29(1990), 28: 4192—4198.
- [4] Kriebel, K. T. et al., *J. Climate Appl. Meteorol.*, 26(1987), 396—409.
- [5] Nicodemus, F. E., *Appl. Opt.*, 9(1970), 6: 1474—1476.