

文章编号: 1007 4619(2006) 04 0537-05

植被的微波散射与吸收特征

张钟军^{1 2}, 施建成^{2 3}, 栾金哲¹

(1 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875 2 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875
3 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 被动微波遥感中大尺度像元内植被种类多种多样并且分布不均匀, 较低频率下像元尺度内的植被影响可以根据单个散射体的散射与衰减特性获得。本文讨论了任意朝向的各类植被散射体的计算问题。其中叶片和针叶的散射采用了一般化 Rayleigh Gans 计算; 杆的散射采用了无限长近似理论。关于各类散射体的衰减, 本文比较了散射系数和吸收系数之和, 与前向散射定理的结果, 并对前向定理的适用性进行了讨论。

关键词: 双站散射; 吸收系数; 前向散射定理; 单散射反照率

中图分类号: TP722 6 /TP79 文献标识码: A

The Microwave Scattering and Absorption Characteristics of Vegetation

ZHANG Zhong-jun^{1 2}, SHI Jian-cheng^{2 3}, LUAN Jin-zhe¹

(1. College of Information Science and Technology Beijing Normal University, Beijing 100875 China;
2. State key Laboratory of Remote Sensing Science Beijing 100875 China;
3. Institute of Remote Sensing Applications CAS, Beijing 100101 China)

Abstract In passive microwave remote sensing, the vegetation layer within a footprint is of great diversities and anisotropy. Under lower frequencies the vegetation effect could be obtained by statistical average of the scattering and extinction characteristics of single scatter. In this paper the scattering calculation methods of an arbitrary scatter are discussed, where Raleigh Gans theory is used for disc and needles, and infinite length approximation theory is employed for cylinder. Regarding the extinction of every kind of scatter, the results of the sum of scattering and absorption coefficient and that from forward scattering theory are compared and discussed.

Key words bistatic scattering; absorption coefficient; forward scattering theory; single scattering albedo

1 引 言

在被动微波遥感中, 下垫面如地表的上行微波辐射要被所覆盖的植被层衰减, 植被层自身也具有微波辐射。为考虑这类复合介质的微波辐射, 通常采用半经验的 $\omega - \tau$ 模型。在该模型中植被被看作一层同类均匀介质。然而在理论和应用中这种模型也有要认真考虑之处: D. M. Le Vine 等人用离散的植被模型研究后指出, 植被散射体小于波长时, $\omega - \tau$ 模型中光学厚度 τ 等于 hW 是

很勉强的^[1]。实际应用中被动微波的像元通常为几十公里, 在大像元里有植被的区域中, 植被种类是单一的情况很少见, 因此难以确定 $\omega - \tau$ 模型中按照植被种类描述其散射作用的参数——单散射反照率 ω^* 的数值, 况且大尺度像元内的植被疏密程度也不均一。此外, 近年来提出的土壤水分参数化反演算法中, 对植被的影响采用了不同频率(极化)下的比值进行消除^[2]。因此把植被层看作各类离散散射体的集合更合理。

无论如何, 要评估植被层对下垫面的影响, 首先要获得植被散射个体的散射和衰减作用。本文研究

了单个植被散射体,如圆片、针叶、杆,在任意朝向的散射和衰减特性,分析了用前向散射定理(光学定理)计算衰减的适用性范围。本文对圆片和针叶散射的计算采用一般化的 Rayleigh Gans (GRG)理论;植被的树枝和杆采用了无限长近似理论。由于前向散射定理的低频下局限性,把单个散射体的衰减作用看作是吸收系数和散射系数之和。为考虑任意朝向的各类散射体,首先要把入射角度和不同的极化分量从参考坐标系中变换到本地坐标系,然后再把本地坐标系计算的结果转换到参考坐标系中。本文对各类随机分布的散射体随频率、含水量等参数变化时的微波散射和衰减特性进行了模拟,并对模拟结果进行了讨论。

2 散射与衰减特性

2.1 坐标系统

本文使用的欧拉坐标系如图 1 所示,其中入射

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \cos \beta \sin \alpha & -\sin \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

求入射波 k_i 在本地坐标系的入射天顶角 θ_i' 可以用矢量点积的方法。在确定相对于 x 轴正向的方位角时,由于相对于 x 轴正负相同角度的余弦一样,本文的方法是,首先确定出本地坐标系入射面的法线向量 m , 然后根据 m 在 x y 轴上投影的方向,判断出正确的入射方位角。比如如果 m 在 x 轴的投影是负值,在 y 轴上的投影是正值,可以判断本地方位角 φ_i' 是一个正的锐角。散射天顶角、方位角的判断也如此。

入射波 k_i 在参考坐标系中的两个极化分量 v_i 或者 h_i 对本地坐标系中入射波 k_i' 的垂直极化分量 v_i' , 水平极化分量 h_i' 都有贡献。如果把 z 轴按照以 k_i , v_i 和 h_i 构成的坐标系进行分解:

$$\hat{z} = t_{ki} \hat{k}_i + t_{vi} \hat{v}_i + t_{hi} \hat{h}_i \quad (2)$$

式中: $t_{vi} = \hat{z} \cdot \hat{v}_i$, $t_{hi} = \hat{z} \cdot \hat{h}_i$, 那么入射波在本地系和参考系中的极化关系可以表示为:

$$\hat{h}_i' = (t_{hi} \hat{v}_i - t_{vi} \hat{h}_i) / \sqrt{t_{hi}^2 + t_{vi}^2} \quad (3a)$$

$$\hat{v}_i' = (-t_{vi} \hat{v}_i - t_{hi} \hat{h}_i) / \sqrt{t_{hi}^2 + t_{vi}^2} \quad (3b)$$

散射波也可以推导出类似的关系。公式 (1) 至 (3) 为本地系和参考系的结果的相互转换提供了依据。

2.2 圆片和针叶

介电常数为 ϵ_r 的散射体应用 GRG 方法的条件

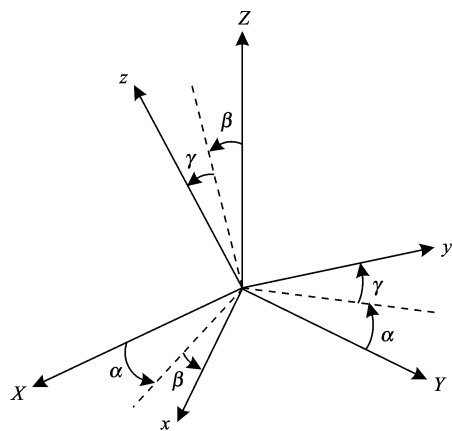


图 1 参考坐标系跟本地坐标系统的变换
Fig 1 The reference and local coordinate systems

角的定义跟文献 [3] 不同,按习惯定义为入射方向跟 Z 轴正向之间的夹角。本地坐标系 xyz 的获得是通过依次旋转参考坐标系 Z , Y , X 轴 α , β , γ 角度得到的,坐标变换公式见 (1)。

是:厚度为 d 的圆片满足 $kd |\sqrt{\epsilon_r}| \ll 1$; 或者半径为 a 的针叶满足 $2ka |\sqrt{\epsilon_r}| \ll 1$, 其中 k 为波数。

在本地坐标系中,双站散射 (bistatic scattering) 矩阵的计算见文献 [3]。对于叶片半径为 5cm, 厚度 0.2mm, 介电常数 $\epsilon_r = 28.04 - j13.34$ 的叶片,当频率为 9.6GHz,入射角度 $\theta_i = 50^\circ$, $\varphi_i = 0^\circ$, 参考系中初始水平放置的圆片按照 $\alpha = 0^\circ$, $\beta = -50^\circ$, γ 从 -90° 旋转至 90° 时,后向散射系数的变化如图 2 所示。图中 γ 从 0° 变到 90° 的过程,就相当于参考系中水平放置的叶片,入射方向(方位角为 0°)从天顶角 0° 变到 90° 的过程。

散射体的散射和吸收特性分别用散射系数 k_s^p 和吸收系数 k_a^p 描述。在 GRG 理论中这两种系数的计算可参阅文献 [4]。计算植被衰减的一种常用方法是前向散射定理。该定理是基于能量守恒原理推导出来的。需要指出的是,只有在前向散射振幅函数 $f_{pq}(\theta_r, \theta_i)$ 实部和虚部的计算足够准确,能量守恒才能得到保证^[5]。但是由于散射公式推导过程中运用了近似的手段,使得前向散射振幅函数 $f_{pq}(\theta_r, \theta_i)$ 的虚部准确性变差。在满足 GRG 近似的条件下,散射体最小维的尺寸远小于入射波长,用前向散射定理计算结果得到的是吸收系数^[6-9]:

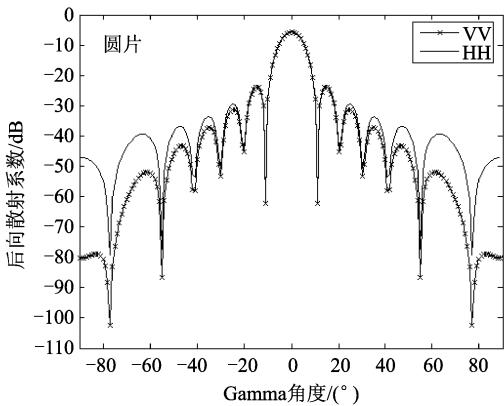


图 2 γ 从 -90° 至 90° 后向散射系数的变化
Fig 2 The backscattering coefficient when γ change from -90° to 90°

$$k_a^p = \frac{4\pi}{k} \ln[f_{pp}(\theta_s, \theta_i)] \tag{4}$$

图 3 是半径 2mm，长 10mm 跟 Z 轴重合的针叶，当频率为 9.6GHz $\theta_i = 50^{\circ}$ ， $\varphi_i = 0^{\circ}$ ，介电常数 $\epsilon_r = 9.6 - j0.04$ 时，分别根据文献 [3] 用前向散射定理计算的结果 (用 fwdV 表示)，跟用文献 [4] 计算的吸收系数 (用 absV 表示) 随入射角度变化的对比。尽管计算吸收系数的方法不同，最后得到的该散射体的单散射反照率几乎没有差别。

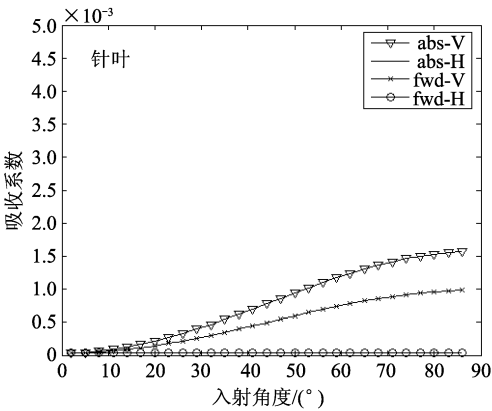


图 3 不同方法计算的针叶吸收系数随入射角度变化
Fig 3 The absorption coefficient of a needle on Z-axis by different calculating method with different incidence

通过旋转叶片的法线或者针叶的主轴，可以得到散射体不同朝向的散射和吸收特性。图 4 (a) 是模拟的频率为 1.41GHz 55° 观察角下随机分布的针叶，单散射反照率 ω 跟含水量的关系，针叶尺寸同图 3 就单个散射体来说， ω 等于散射系数与散射系数跟吸收系数之和的比值。但这里的 $\omega - \tau$ 模型中的单散射反照率 ω^* 不是一个概念，后者是对整个植被层而言的，带星号表

示有效值。C 波段以下两者接近一致。图 4 (b) 是含水量 80%，半径 4.3mm，厚度 0.24mm 随机分布的叶片吸收系数跟频率的关系。由于是随机分布，因此 H 和 V 极化的结果相同。从模拟结果可以看出，随着含水量或者频率的增加，散射体的散射和吸收特性也增强。

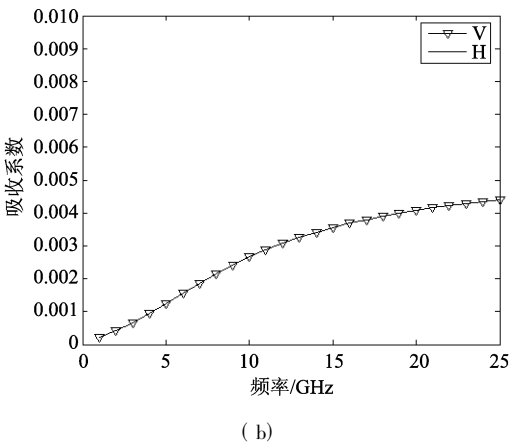
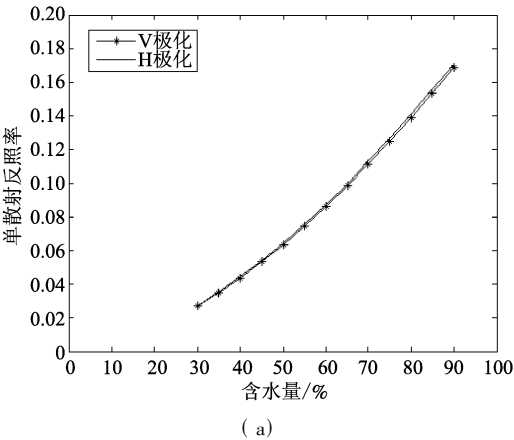


图 4 (a) 随机分布的针叶单散射反照率 ω 跟含水量的关系；
(b) 随机分布的叶片 55° 观察角时吸收系数跟频率的关系
Fig 4 (a) The single scattering albedo for random needle when water content change
(b) The absorption coefficient of random disc varies with frequency at 55° viewing angle

2 3 杆

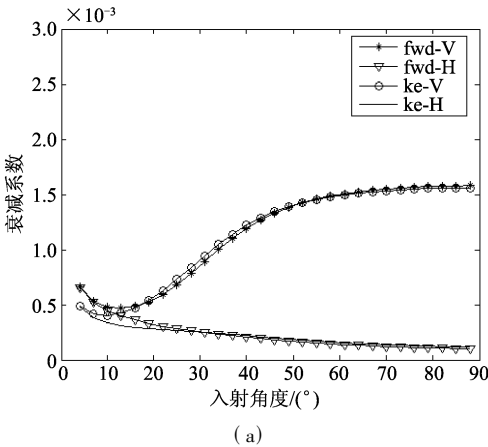
作物的杆或者森林的树枝，可以看作不同尺寸和朝向的介电圆柱体。半径为 a 长度为 $2l$ 的杆当满足 $k \gg 1$ 时，有限长杆的内部电场可以用无限长杆中的电场近似。在本地坐标系中用无限长近似理论计算散射振幅函数 f_{pq} 的具体形式可参阅文献 [3]。在计算杆的衰减作用时，考虑到对于单个散射体，前向定理计算的结果有误差，因此单个杆的衰减系数是利用吸收系数得到的，其中 q 极化杆的吸

收系数 k_a^p 的公式为:

$$k_a^g = n_0 4\pi k \epsilon_r'' \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} |e_n^g|^2 Y_n + 2 |d_n^g|^2 Y_{n+1} + 2 |d_n^g|^2 Y_{n-1} \right] \quad (5)$$

$$Y_n = \frac{a}{\lambda_i^2 - \lambda_i^{*2}} [\lambda_i J_n(\lambda_i^* a) J_{n+1}(\lambda_i a) - \lambda_i^* J_n(\lambda_i a) J_{n+1}(\lambda_i^* a)] \quad (6)$$

式 (5) 中 n_0 是单位体积内杆的数目; 式 (6) 中 J_n 是第一类 Bessel 函数, λ_i^* 是 λ_i 共轭; e_n^g , d_n^g 和 λ_i 的表达式较复杂, 详见文献 [5]。



对于半径 2mm, 长度 10cm 跟 Z 轴重合的细杆, 衰减特性模拟结果如图 5 所示。图 5 (a) 是 9.6GHz 时用无限长近似理论按公式 (4) 计算杆的衰减结果, 跟用散射系数与公式 (5) 计算的吸收系数之和得到的衰减结果的对比。假设杆的含水量为 70%, 把公式 (4) 得到的衰减, 跟散射系数与吸收系数之和相比随频率的变化曲线显示在图 5 (b) 中。由图可见, 在较低的频率如 X 波段以下, 单个散射体两者存在一定的误差。因此本文中杆衰减的计算采用吸收系数和散射系数之和的方法。

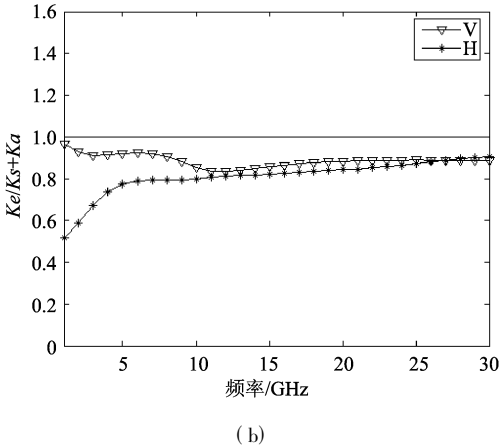


图 5 (a) 前向散射计算的结果, 跟吸收系数 Ka 与散射系数 Ks 之和的对比;
(b) 前向定理的结果, 跟吸收系数 Ka 与散射系数 Ks 之和之比, 随频率的变化

Fig 5 (a) The contrast between the result of forward scattering theory and that of the sum of Ks and Ka ;
(b) The result of forward scattering theory divided by the sum of Ks and Ka when frequency change

类似于叶片的计算, 对于任意朝向的杆, 把本地坐标系中计算的散射矩阵, 按公式 (3) 可以极化成到参考系中。图 6 为模拟的半径 2mm 长度 50cm 含水量 70% 随机分布的杆, 55° 观察角垂直极化时散射和吸收系数随频率的变化。

2 4 像元尺度内的处理

被动微波遥感中的像元较大, 比如 AMSR-E 的 C 波段为 60km 左右, 像元内的植被层, 可以看作各类散射体如随机分布的圆片、针叶、细杆以及垂直杆构成。对于垂直的杆, 研究表明, 前向散射的能量主要集中在以杆为轴的锥面上, 大尺度的杆只有吸收作用, 因此树林的杆只考虑对地表的衰减作用就可以了^[10]。如果知道了像元内某类植被散射体的密度 ρ_n , 那么较低频率下像元内有植被覆盖地区且厚度为 d 的植被层, 对地表的衰减因子可以表示为:

$$L_q = \exp \left[- \frac{4\pi d}{k} \operatorname{Im} \left[\sum \rho_n f_{qq}(\theta_s, \theta_i)_n \right] \right] \quad (7)$$

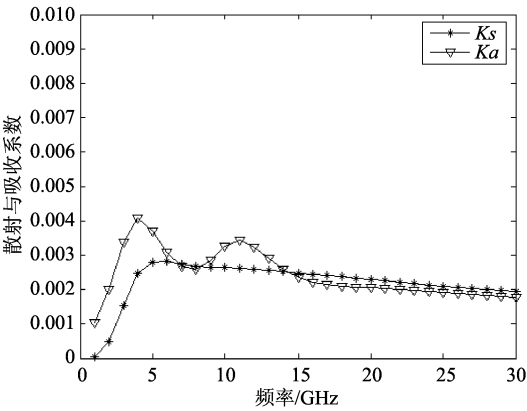


图 6 随机分布的杆 V 极化散射和吸收系数随频率的变化

Fig 6 The scattering and absorption coefficient at V polarization varies with frequency for random cylinder

如果频率在 C 波段以上, 那么植被内部以及植被和地表之间的多次散射效果需要考虑。通过前面

所述方法计算出单个散射体的散射和衰减, 借助于复杂的模型如 Matrix Doubling 可以得到像元尺度内整个植被层的影响^[10-11]。

3 结 论

在被动微波遥感中评估大尺度像元内植被的影响, 如果是较低的频率或者稀疏分布的植被, 植被层可以看作垂直的杆和随机分布的各种类型散射体的集合。在对各类散射体的朝向进行统计平均后, 用前向散射定理得到的植被层吸收特性, 可以用来描述植被层对下垫面的衰减作用。而植被层散射特性可以由散射个体之和得到^[8]。

相对于半经验的方法而言, 用离散的植被模型不仅更准确, 而且也为分析多角度、多极化、多频率下植被散射和衰减参数之间的关系提供了手段。

参 考 文 献 (References)

[1] LeVine D M, Karam M A. Dependence of Attenuation in a Vegetation Canopy on Frequency and Plant Water Content [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1996 34(5): 1090—1096

[2] Shi J, Jiang L M, Zhang L X et al. A Parameterized Multi Frequency Polarization Surface Emission Model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2005 43(12): 2831—2841.

[3] Karam M A, Fung A K. Electromagnetic Wave Scattering from Some Vegetation Samples [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1988 26(6): 799—808.

[4] Em H J, Fung A K. A Scatter Model for Vegetation up to Ku-band [J]. *Remote Sensing of Environment* 1984 15: 185—200.

[5] Ferrazzoli R, Guerriero L. Emissivity of Vegetation: Theory and Computational Aspects [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 1996 10(5): 609—628

[6] Tsang L, Kong J A, Shin R T. Theory of Microwave Remote Sensing. New York: Wiley Interscience, 1985.

[7] Jin Y Q. Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering and Thermal Emission [M]. Beijing: Science Press, 1998 [金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.]

[8] Wigneron J P, Calvet J C. A Composite Discrete-continuous Approach to Model the Microwave Emission of Vegetation [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1995 33(1): 201—211

[9] Karam M A, Fung A K. Leaf Shape Effects in Electromagnetic Wave Scattering from Vegetation [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1989 27(6): 687—697.

[10] Ferrazzoli R, Guerriero L. Passive Microwave Remote Sensing of Forests: a Model Investigation [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1996 34: 433—443

[11] Zhang Z J, Sun G Q. An Estimation of Brightness Temperature for Vegetated Surface by Matrix Doubling Method and IEM [J]. *Journal of Remote Sensing* 2005 9(5): 531—536 [张钟军, 孙国清. 用双矩阵法和积分方程模型估算地表的亮度温度 [J]. 遥感学报, 2005 9(5): 531—536]