

植被散射的蒙特卡罗模拟及其在低掠角散射中应用

张 民, 吴振森, 宋月霞

(西安电子科技大学理学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出利用蒙特卡罗算法研究植被散射及其低掠角散射特性. 根据双层植被的散射模型, 考虑到植被层内各散射体场的相干和多径效应, 利用蒙特卡罗算法模拟随机分布和簇规则分布植被的低掠角散射系数, 适当解释植被散射的后向增强和掠射特性.

关键词: 植被; 蒙特卡罗算法; 低掠角; 散射系数

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 020143-04

Monte Carlo Simulation of the Vegetation Scattering and Its Applications to Grazing Incidence

ZHANG Min, WU Zhen2sen, SONG Yue2xia

(School of Science, Xidian University, Xi. an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The Monte Carlo method is applied to study the vegetation scattering and its low grazing characteristic. Based on the two layer model, taking into account of the coherent and multipath effects from different scatterers, Monte Carlo method is applied to simulate the low grazing scattering coefficient from the vegetation which is distributed randomly or clustered respectively. The results are appropriately used to explain the backscattering enhancement and the low grazing scattering of the vegetation.

Key words: vegetation; Monte Carlo method; low grazing; scattering coefficient

1 引言

植被背景的散射和传播特征一直是微波遥感中十分感兴趣的课题之一, 它在无线通信、电波传播、以及雷达探测中具有重要的作用. 近年来, 许多学者在这方面开展了大量的研究, 随着研究的深入, 目前, 人们更感兴趣的是低掠角情况下地物背景的散射特性, 但是, 由于低掠角实验测量限制性和研究的进展, 这方面还很少有公开发表的文章^[1, 2], 十分迫切需要进行相应的电磁理论建模和特征分析. 众所周知, 矢量辐射传输理论(VRT)是研究植被散射中的一个有效和广泛使用的方法, VRT方程的零阶及一阶迭代解, 形式简单, 实现起来很容易, 但是, 由于VRT方法是从能量的角度出发, 采用的是辐射强度的叠加, 因此不能揭示出随机介质中电磁波的相干散射效应, 对低掠角散射不能很好解释测量结果. 随着计算机技术的发展, 大量的计算已不成问题, 使得蒙特卡罗计算机模拟技术成为解决复杂问题的有效方法之一, 这种方法作为处理辐射问题的一种数值方法把电磁波与离散散射体的相互作用的多体问题看作是光子与散射体的连续碰撞的链式问题, 通过控制统计条件可对离散体的几何形状、空间分布作较真实的描述, 可以考虑多次散射并获得相干散射场, 适合于低掠角散射特性的研究. 本文针对双层植被的散射模型, 利用蒙特卡

罗算法模拟随机分布和簇分布植被的单、双站散射系数, 模拟中直接对各散射体及体面相互作用的散射场进行相位叠加, 进而可以研究相干散射效应和多径效应, 通过与矢量辐射传输理论和实测结果对比, 说明算法的有效性, 并适当解释植被散射的后向增强效应和低掠角散射特性.

2 植被散射的蒙特卡罗模拟

2.1 散射模型

双层植被散射模型结构示意图如图1所示, 根据蒙特卡罗方法, 散射模型可描述为: 一束平面波(光子)照射到一定体积的散射体上, 这束波在一个自由程的距离上碰到一个具有随

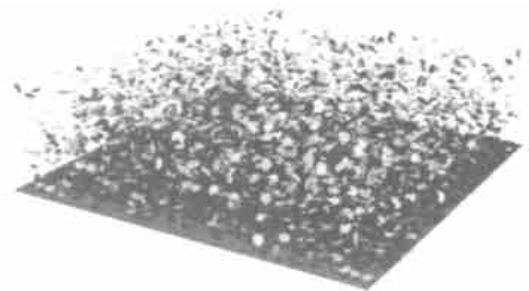


图1 植被双层散射模型示意

机取向和分布的植被散射体,被按一定概率散射到一个随机的方向上,并在沿这个方向的自由程上进行下一次碰撞直到能量消耗殆尽或被散射出散射体,统计所有散射体在指定方向的散射场分量即可.植被层可模拟为高度为 d 的离散随机介质,包括尺寸和取向随机分布或成簇分布的茎、叶、果实等散射体,用相对介电常数为 ϵ_r 的椭球模拟,其一个轴压扁可以表示阔叶,拉长可以表示针叶,单个散射体的散射场可以采用广义瑞利2金斯近似求得,可以参考文献^[3-5].植被层下面的地面模拟为相对介电常数为 ϵ_g 的半空间随机粗糙面.

2.1.2 计算模拟方法

入射波照射在植被层上,设照射面积 A 内的散射体个数为 M ,则在单次散射近似下,远区散射场可用每个散射体的散射场之和表示为,

$$E_p^s(r) = \sum_{m=1}^M \hat{p}_s \cdot E_m^s(r, r_m) \quad (1)$$

其中, $r_m = x_m \hat{x} + y_m \hat{y} - z_m \hat{z}$ 为第 m 个散射体的位置, $\hat{p}_s = \hat{\phi}_s$ 或 $\hat{h}_s$ 为散射波单位极化矢量, $\hat{h}_s = \hat{y} \cos U_s - \hat{x} \sin U_s$, $\hat{\phi}_s = \cos H_s$ ($\hat{x} \cos U_s + \hat{y} \sin U_s - \hat{z} \sin H_s$), $E_m^s(r, r_m)$ 为第 m 个散射体的散射场.每个散射体的散射场可以表示为四部分之和,

$$\hat{p}_s \cdot E_m^s(r, r_m) = \frac{\exp(jkr)}{r} \hat{p}_s \cdot [E_1 + E_2 + E_3 + E_4] \quad (2)$$

其中, E_1, E_2, E_3, E_4 分别表示直接来自叶片的散射场、先由叶片散射再经地面反射的场、先由地面反射再由叶片散射的场以及先由地面反射后经叶片散射再由地面反射的场.它们的表达式为,

$$E_1 = F_m(H_s, <_s; H_i, <_i) \hat{q}_i \exp(j5_1) \quad (3a)$$

$$E_2 = F_m(H_s, <_s; P-H_i, <_i) \hat{R}_q(H) \hat{q}_i \exp(j5_2) \quad (3b)$$

$$E_3 = R_p(H_s) F_m(P-H_s, <_s; H_i, <_i) \hat{q}_i \exp(j5_3) \quad (3c)$$

$$E_4 = R_p(H_s) F_m(P-H_s, <_s; P-H_i, <_i) \hat{R}_q(H) \hat{q}_i \exp(j5_4) \quad (3d)$$

其中, $F_m(\#)$ 为椭球散射体的散射振幅矩阵^[4-6]. $5_1, 5_2, 5_3, 5_4$ 为散射体散射场的相位,表达式如下:

$$5_1 = [k^i(H_i, <_i) - k^s(H_s, <_s)] \# r_m + j \left[\frac{k_{eq}}{\cos H_i} z_m + \frac{k_{qp}}{\cos H_s} z_m \right] \quad (4a)$$

$$5_2 = [k^i(P-H_i, <_i) - k^s(H_s, <_s)] \# r_m + 2k_0 d \cos H_i + j \left[\frac{k_{eq}}{\cos H_i} (2d - z_m) + \frac{k_{qp}}{\cos H_s} z_m \right] \quad (4b)$$

$$5_3 = [k^i(H_s, <_i) - k^s(P-H_s, <_s)] \# r_m + 2k_0 d \cos H_s + j \left[\frac{k_{eq}}{\cos H_s} z_m + \frac{k_{qp}}{\cos H_i} (2d - z_m) \right] \quad (4c)$$

$$5_4 = [k^i(P-H_i, <_i) - k^s(P-H_s, <_s)] \# r_m + 2k_0 d (\cos H_i + \cos H_s) + j \left[\frac{k_{eq}}{\cos H_i} (2d - z_m) + \frac{k_{qp}}{\cos H_s} (2d - z_m) \right] \quad (4d)$$

其中, k^i, k^s 分别表示自由空间中的入射波和散射波传播矢量. k_{qp} 为消光系数,由前向散射定理得到^[6],

$$k_{qp} = 4\pi \text{Im} [F_{pp}(\hat{r}, \hat{r})] \backslash k_0 \quad (5)$$

另外, $R_{p,q}(H), p, q = v, h$ 为地面的 Fresnel 反射系数,其表达式为

$$R_v(H) = \frac{E_g \cos H - \sqrt{E_g - \sin^2 H}}{E_g \cos H + \sqrt{E_g - \sin^2 H}}, R_h(H) = \frac{\cos H - \sqrt{E_g - \sin^2 H}}{\cos H + \sqrt{E_g - \sin^2 H}} \quad (6)$$

相应地,植被层的双站散射系数定义为

$$R_{pq}(H_i, <_i; H_s, <_s) = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{4\pi r^3 |E_p^s|^2}{\text{AccosH} |E_i^i|^2} \quad (7)$$

其中,散射系数可表示为两部分之和,分别对应于平均场的相干散射系数和对应起伏场的非相干散射系数.非相干散射系数的定义只要把式(7)中 $|E_p^s|^2$ 替换为 $\beta |E_p^s - 3E_p^s/4|^2$, 另外,定义不相关散射系数为由式(3)中各场对应强度的直接叠加.

另外,对于植被簇分布的散射模型,将叶子位置不同引起的相移考虑在内,则每一簇的散射场可由所含叶片的散射场表示为,

$$E_n = \sum_{m=1}^N E_m \exp[j(k_i - k_s) \cdot r_m] \quad (8)$$

其中, N 为每一簇中所含叶片的个数, E_m 表示第 m 个叶片的散射场,可由式(2)计算的到.由许多个这样的簇按照一定的规律排列起来,可以描述实际簇分布植被.设波在照射范围内共有 N_s 簇,则整个植被模型的散射场可用每一簇的散射场表示为

$$E_s = \sum_{n=1}^{N_s} E_n \exp(2jk \cdot Q_n) \quad (9)$$

其中, Q_n 为第 n 簇所在的位置, $Q_n = x_n \hat{x} + y_n \hat{y}$, $k = k_x \hat{x} + k_y \hat{y}$.

根据前述的植被散射模型和计算方法,可以应用蒙特卡罗算法进行模拟,具体计算中应注意以下模拟过程:

(1) 空间取向过程: 首先将取向角 A, B, C 的分布范围分成 N_A, N_B, N_C 等份,则假设散射体共有 $N_A @ N_B @ N_C$ 种可能的空间取向,假设取向满足均匀随机分布.这里应该使用一个三维数组变量表示每一种取向角,以便方便准确获得每种取向的散射体的散射场,方便后边抽样计算使用.

(2) 一个样本的抽样过程: 应该同时由随机数生成在体积 V 内位置均匀随机分布的 M 个散射体组成的一个样本,并对样本的每一个散射体的取向按照均匀分布随机选取一种取向和其对应的散射场,利用数组保存,以便计算应用.

(3) 散射场及散射系数的统计平均: 首先应对每一个样本的散射场由式(1)和式(8)叠加得到,然后再对所有样本的散射场统计平均得到散射系数.

为了和有关文献和实测数据对比,在计算中采用以下约定:

设模拟面积为 $A = 4 @ 4 \text{ m}^2$, 叶子长宽厚尺寸取平均值,分别为 $a = 0.12 \text{ m}$, $b = 0.102 \text{ m}$, $c = 0.0004 \text{ m}$. 对随机分布植被,空间取向角 A, B, C 各向独立,分别在 $0 \sim 360^\circ$, $0 \sim 90^\circ$, $0 \sim 90^\circ$ 内均匀分布.散射体的数密度 $3400/\text{m}^3$. 地面及叶子的介电常数分别为 $\epsilon_g = 15.17 + j11.0$, $\epsilon_r = 28 + j11.5$. 对成簇分布植被, A, B, C 分别在 $0 \sim 360^\circ$, $30 \sim 90^\circ$, $0 \sim 30^\circ$ 内均匀分布.每一簇所含叶片的个数在 $60 \sim 80$ 片之间随机取值.

3 数值结果与分析

图2分别给出了随机分布植被在L波段(频率为11.5GHz)和C波段(频率为4.75GHz)掠入射时双站散射系数的蒙特卡罗模拟结果.其中,入射角 $H_i = 75^\circ$, 植被厚度 $d = 0.12 \text{ m}$.可以看出,镜像方向附近散射系数起伏较大,而在其它

地方变化较平缓,这是由于总散射系数中相干散射分量的影响造成的。所有散射体的体2面相互作用项在地面的反射方向上均同相,叠加产生很高的尖峰。我们比较L波段植被层高度不同时的蒙特卡罗模拟非相干散射和不相关散射结果发现,后向增强的角宽度与植被层的高度和频率均有关,植被层的高度越高,频率越高,增强的角宽度越窄,即由体面相互作用散射引起的增强的角宽度较宽。能确定出后向增强的角宽度对实际应用很有意义,如在主动遥感中用具有一定波瓣宽度的接受天线测量散射系数时,必须知道增强的角宽度才可以确定天线是否检测到了后向散射增强效应。

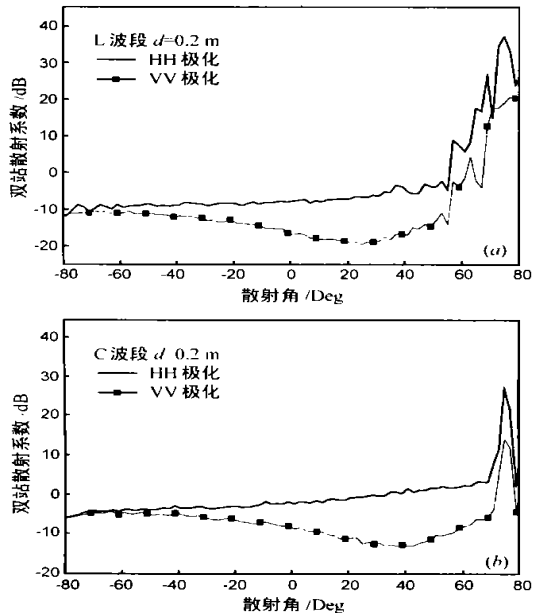


图 2 不同波段不同极化双站散射系数

通过采用本文算法和文献[7, 8]的实验结果以及矢量辐射理论结果对比发现,本文的算法结果要比文献中的算法更接近实际测量结果。对低掠角情况,本文结果与实验吻合也很好,表明本文计算对低掠角的有效性。图3计算了低掠角时植被的双站非相干散射和不相关散射系数,其中 $H=75b$ 。从图中可以看到,在低掠角时,利用蒙特卡罗算法,可以很好的解释后向散射增强效应和增强角宽度特性(在 $-75b$ 处)。对于VV极化,后向增强效应不明显,因为一方面地面对VV极化波的反射较HH极化波弱,另一方面本节所选植被为阔叶类植被,植被层对VV极化波的衰减较HH极化波大所致,散射系数的起伏与布儒斯特效应有关。

图4分别给出了L波段和C波段下,簇位置随机分布和规则分布时的后向散射系数随入射角的变化曲线。可以看出,两种分布下,在零度的地方均存在很高的峰值,这是零度入射时的地面的镜向分量引起的。还可以看出,规则分布时,总散射系数中某些角度上存在较高的峰值,这是散射体散射场同相叠加产生的结果,说明此时植被的平均散射场较强,簇位置随机分布时散射系数主要由非相干散射分量组成,没有这种现象。而且,随着频率的升高后向散射系数中的峰值数目也随之增加。特别要指出的是,当规则分布时,在低掠角处会有较

强的后向增强效应,这可以很好地解释低掠角实际测量时出现的散射系数增强效应。

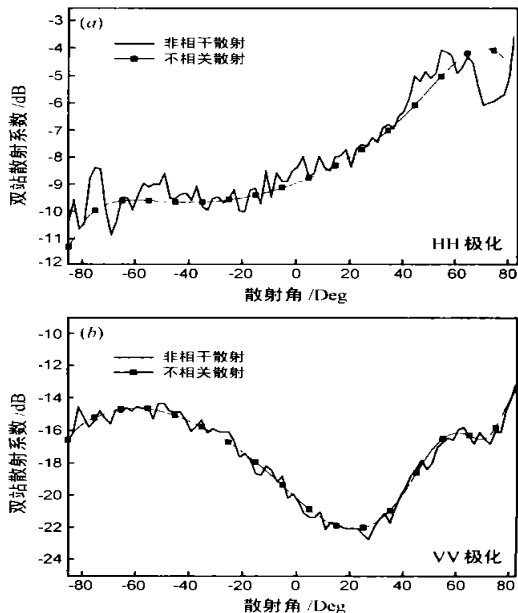


图 3 低掠角时植被非相干散射和不相关散射系数

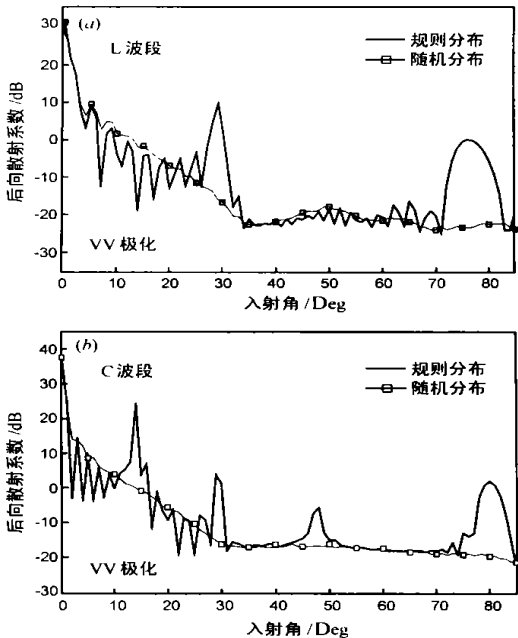


图 4 簇分布植被不同波段不同分布时的后向散射系数

4 结论

正因为蒙特卡罗算法把电磁波与离散体的相互作用的多体问题看作是光子与散射体的连续碰撞的链式问题,从而可以考虑多次散射并获得相干散射场。通过计算及实验对比表明:(1)植被层模型的选取对计算结果会有很大的影响,包括植被层厚度,离散体的尺寸、地面和植被的介电常数以及植被的分布特性;(2)蒙特卡罗算法可以较好的解释植被散射的后

向增强效应和掠射特性, 后向散射增强的角宽度与入射波频率、植被层特性有较大关系. 本文的方法特别适合于低掠角散射特性的研究.

参考文献:

- [1] L Tang, J A Kong. Scattering of Electromagnetic Waves [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] V I Tatarskii, M I Charnotskii. On the universal behavior of scattering from a rough surface for small grazing angles [J]. IEEE Trans AP, 1998, 46(1): 67- 72.
- [3] L Tang, J A Kong, R T Shin. Theory of Microwave Remote Sensing [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [4] M A Karam, A K Fung. Leaf shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation [J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 1989, 27(6): 687- 697.
- [5] F T Ulaby, K Sarabandi, K McDonald, M Whitt, M C Kobson. Michigan microwave canopy scattering model (MIMICS) [J]. Int J Remote Sensing, 1990, 11(7): 1223- 1253.
- [6] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications [M]. Boston, London: Artech House, 1994.
- [7] 李淑青. 植被电磁散射的建模及分析 [D]. 西安: 西安交通大

学, 1998.

- [8] A Toure, K P B Thomson, G Edwards, R J Brown, B G Brisco. Adaptation of MIMICS backscattering model to the agricultural context of wheat and canola at L and C Bands [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(1): 47- 61.
- [9] N N Lebedev. Special Functions and Their Applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 1972. 124- 126.

作者简介:



张民男, 1968年5月生于山东省莱州市, 西安电子科技大学理学院副教授, 博士后, 主要从事目标及随机介质中的波传播和散射特性的理论应用研究.

吴振森男, 1946年11月生于湖北省沙市, 西安电子科技大学理学院教授, 博士生导师, 近年来主要从事随机介质、非均匀介质中电磁(光)波的传播与散射、目标激光散射特性的研究, 在国内外发表论文200余篇.