

引用格式:刘旭,任新成,王玉清,等.实际地形表面电磁散射特性的FDTD研究[J].延安大学学报(自然科学版),2026,45(1):133-140. [LIU X, REN X C, WANG Y Q, et al. FDTD study of electromagnetic scattering characteristics from actual terrain surface[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition), 2026, 45(1): 133-140.] DOI:10.13876/J.cnki.ydse.250096

实际地形表面电磁散射特性的FDTD研究

刘旭¹,任新成^{1,2*},王玉清^{1,2},朱小敏¹

(1. 延安大学物理与电子信息学院,陕西延安716000;
2. 陕西省能源大数据智能处理省市共建重点实验室,陕西延安716000)

摘要:为获取真实地形表面环境电磁散射特性数据,基于Peplinski土壤介电常数模型对土壤介电特性进行建模,通过数字高程模型(DEM)构建实际地形表面的起伏情况,应用时域有限差分(FDTD)方法分析了实际地形表面的电磁散射行为。通过数值仿真获得了散射系数的角分布曲线,并探讨了散射系数随土壤含水量、粘土含量、土壤容重、砂粒分数、入射角、入射频率的变化规律。数据分析发现,散射系数随散射角振荡地变化,散射系数随土壤含水量、入射角的增加而减小,随粘土含量、土壤容重、砂粒分数、入射波频率的变化而没有明显的变化。研究结果对于理解实际地形表面的电磁散射行为提供了理论依据和实践指导。

关键词:电磁散射;实际地形表面;时域有限差分方法;Peplinski模型

中图分类号:TN011 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-602X(2026)01-0133-08

近年来,地、海粗糙面电磁散射特性研究在军用和民用领域均得到广泛应用,尤其在雷达成像、遥感探测和地下探测等方面具有重要意义。不同地形(如山脉、城市、森林和沙漠)对电磁波传播与散射的影响各不相同,这既为技术优化提供了依据,也对探测系统性能提出了挑战^[1]。在军用领域,该特性对雷达隐身、目标识别、战场监测以及卫星雷达成像与遥感系统具有关键作用^[2-3];在民用领域,则为地表资源监测、环境变化分析和灾害评估提供了重要理论支撑。此外,电磁波传播特性在人工智能相关研究中也逐渐受到关注^[4]。因此,开展实际地形表面电磁散射研究,不仅有助于深入理解电磁波散射机理,还能有效提升地面探测与地形数据分析能力,提高卫星遥感成像精度,并为城市安全监控和通信网络性能优化提供重要支撑。

近年来,国内外学者对地物粗糙面电磁散射

特性开展了大量研究。国外,PENG等^[5]利用DP-Tomo SAR模型提高了森林覆盖区域地表地形信息的获取精度。WU等^[6]基于AIEM模型研究了GNSS-R极化散射特性。IODICE等^[7]提出了一种计算粗糙电介质表面电磁散射的简洁扰动方法。LI等^[8]采用FDTD方法研究了粗糙表面上目标的电磁散射特征,并与矩量法结果进行了对比验证。HE等^[9]开发的域分解Laguerre-FDTD技术在保证精度的前提下大幅提升了运算速度。国内,朱小敏等^[10]采用FDTD分析了雪覆盖粗糙土壤表面的电磁散射行为。董子宇等^[11]利用蒙特卡洛方法研究了横向沙丘地形的电磁散射问题。贺文涛^[12]研究了复杂地面背景下目标的电磁散射特性。张茜玉^[13]通过集成VRT、TSM与SBR方法,研究了复杂地物背景与目标的复合电磁散射特性。彭关弘焯等^[14]基于Wang-Schmugge模型和DEM,运用FDTD分析了真

收稿日期:2025-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(61861043,62061048,62261054)

作者简介:刘旭(2001—),男,硕士研究生,主要从事目标与环境电磁散射特性方面的研究。

*通信作者 E-mail:xchren@yau.edu.cn

实地形与运动导弹间的复合电磁散射行为。

上述研究中,地物粗糙面的生成多采用蒙特卡洛方法,土壤介电常数通常基于四成分模型、GRMDM模型和Topp模型等。蒙特卡洛方法通过概率分布生成随机样本以模拟粗糙表面,具有一定的不确定性,且结果属于理论模型而非实际物理测量数据^[15]。相比之下,数字高程模型(DEM)基于实地观测数据构建,能够准确反映真实地表的高程起伏特征,因其精度和可靠性较高,更适用于精细地形分析和大规模GIS处理等高精度应用^[16]。在土壤介电常数建模方面,四成分模型、GRMDM模型和Topp模型均存在一定局限,而Peplinski土壤模型依托丰富的介电数据库,覆盖多种土壤类型、宽湿度条件及0.3~18 GHz的宽频范围,因而具有更广泛的适用性。

本文基于Peplinski土壤介电常数模型对土壤介电特性进行建模,通过数字高程模型(DEM)构建实际地形表面的几何形态,应用时域有限差分方法(FDTD)分析了实际地形表面的电磁散射行为。本研究不仅在理论层面上充实了背景与目标电磁散射数值计算的理论基础,同时也在应用层面为实际工程问题提供了有效的技术途径,尤其是背景为地物表面的复合散射问题。

1 建模

1.1 实际地形表面电磁散射 FDTD 计算模型

图1为实际地形表面电磁散射的FDTD计算模型,如图所示,实际地形表面上方为自由空间,实际地形表面下方为均匀介质,且无限大。计算域采用分层设计,以平面边界AB作为分界线向吸收层延伸。该分界线将仿真空间划分为两个功能区域:下层区域设为总场计算区,上层区域设为散射场分析区。入射电磁波通过边界AB上配置的等效电流源导入总场区域。散射场区内设置观测边界CD,此边界平行于分界线AB并同样延伸至吸收层。为消除边界反射影响,在整个FDTD仿真区域外围部署10层网格厚度的UPML完美匹配层^[17]。

1.2 实际地形表面高度起伏模型建立

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是用于表示地表高程信息的数字化数据集。它以网格或点的形式对地表的高程进行量化描述,每个点或网格单元都包含一个对应的地理坐标和高度值^[18],能够精确表征地形起伏特征,在电磁散射研究中具有重要作用。

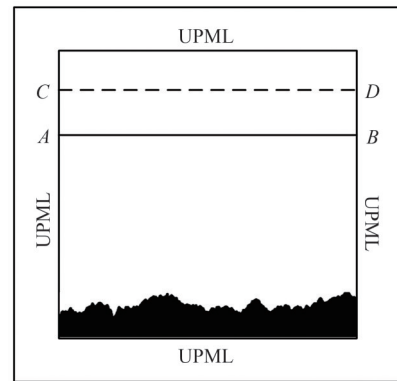


图1 实际地形表面电磁散射的FDTD计算模型

本研究采用的DEM数据来源于欧洲航天局(ESA)发布的Copernicus DEM GLO-30数据集^[18],原始分辨率为30 m,垂直精度优于4 m。为满足FDTD数值模拟的网格精度要求,对原始数据进行了重采样处理,最终采用的水平分辨率为5 m。在0.3 GHz下,主导电磁波散射响应的地形特征尺度通常为波长量级及以上,采用5 m分辨率的DEM数据已能够较好地刻画研究区内山坡、沟谷等中大尺度地貌起伏特征,而这些特征正是主导低频电磁波散射响应的主要因素。在数值模拟中,FDTD计算采用非均匀网格划分策略,在地形表面附近进行显著网格细化,最小网格尺寸控制在 $\lambda/15$,以保证算法的数值精度与稳定性。原始30 m分辨率DEM经双线性插值重采样至5 m,并辅以适当平滑处理,以有效缓解阶梯近似所引入的数值伪像。需要指出的是,重采样后的5 m DEM主要反映中大尺度地形结构,对于小于原始分辨率尺度的微观粗糙度信息难以通过插值真实再现。然而,在0.3 GHz低频段,电磁波波长较长,小尺度粗糙度对总散射场的贡献相对有限,故上述处理在当前研究背景下是合理且适用的。因此,采用Copernicus DEM 30 m分辨率数据既保证了地形建模的精度与真实性,又兼顾了FDTD数值模拟的稳定性和计算可行性。

DEM虽为三维,但本文从DEM数据集中提取特定地形剖面(一维表面形态),作为二维粗糙面模型输入FDTD计算(数值计算中选取某一地形处的DEM数据集,粗糙面仿真统计个数为20个)。这简化了计算复杂度,同时保留了实际地形的起伏特征。图2为上述某一地形处的数字高程模型(DEM),显示出该地形处的地形起伏特征,从图中可以看到地表的沟谷结构及坡面变化,是地形剖面提取和粗糙面FDTD建模的原始依据。

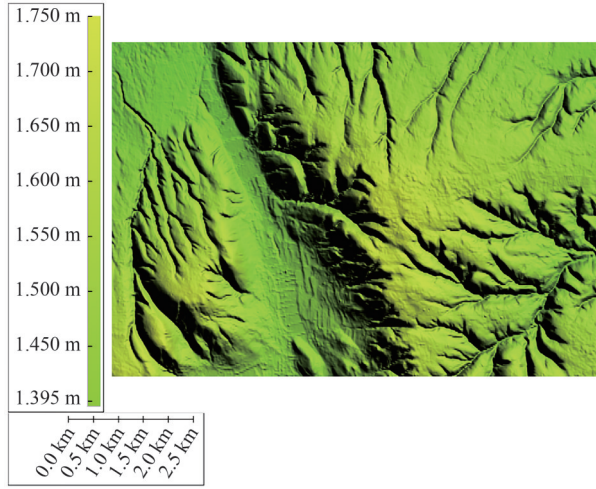


图2 实际地形建模图

1.3 实际地形表面下方土壤介电常数模型的建立

研究表明,土壤含水量是影响介电常数的关键因素^[19]。目前常用的介电常数模型包括WANG和SCHMUGGE模型^[20-21]、GRMDM模型^[22-23]和TOPP模型^[24-25]等,其中,Peplinski模型^[26]考虑了土壤的多相特性,能够根据土壤质地和含水率等因素对土壤电磁特性进行有效表征。

Peplinski土壤模型使用广泛的介电数据库,涵盖5种土壤类型、广泛的湿度条件以及在1.4~18 GHz之间延伸的宽频率范围,Peplinski开发了一个具有以下形式的半经验介电混合模型^[26]:

$$\varepsilon_m = \varepsilon'_m - j\varepsilon''_m, \quad (1)$$

$$\varepsilon'_m = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^\alpha) + m_v^{\beta'} \varepsilon'_{fw} - m_v \right]^{1/\alpha}, \quad (2)$$

$$\varepsilon''_m = [m_v^{\beta''} \varepsilon''_{fw}]^{1/\alpha}, \quad (3)$$

其中, ε_m 是土壤-水混合物的相对复介电常数, m_v 是水的体积分, ρ_b 是以 g/cm^3 为单位的堆积密度, $\rho_s = 2.66 \text{ g/cm}^3$ 是固体土壤颗粒的比重, $\alpha = 0.65$ 是经验确定的常数, β' 和 β'' 是根据经验确定的土壤类型相关常数,由下式给出:

$$\beta' = 1.2748 - 0.519S - 0.152C, \quad (4)$$

$$\beta'' = 1.33797 - 0.603S - 0.166C, \quad (5)$$

其中, S 和 C 分别代表了砂粒分数和粘土含量。 ε'_{fw} 和 ε''_{fw} 是自由水相对介电常数的真实的部分和虚部,由德拜色散方程给出,对该方程进行了修正,在后者中加入了一项,考虑了土壤混合物的有效电导率。

$$\varepsilon'_{fw} = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f\tau_w)^2}, \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{fw} = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f\tau_w)^2}, \quad (7)$$

$$\varepsilon''_{fw} = \frac{2\pi f\tau_w (\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty})}{1 + (2\pi f\tau_w)^2} + \frac{\sigma_{\text{eff}} (\rho_s - \rho_b)}{2\pi \varepsilon_0 f \rho_s m_v}, \quad (8)$$

其中, ε_0 是自由空间的介电常数, τ_w 是水的弛豫时间, f 是以赫兹为单位的频率, ε_{w0} 是水的静态介电常数, $\varepsilon_{w\infty} = 4.9$ 是 ε'_{fw} 的高频极限值。ULABY等^[25]给出了 τ_w 和 ε_{w0} 作为温度函数的表达式。在室温为 20°C 下, $2\pi\tau_w = 0.58 \times 10^{-10}\text{s}$, $\varepsilon_{w0} = 80.1$ 。

文献[26]中使用的数据库由1.4 GHz下的介电测量数据,以及在4~18 GHz频段内多个频率下的额外测量数据组成。由于 ε''_w 的电导率项与 $1/f$ 有关,研究发现该项在4 GHz及更高频率下的相对贡献并不显著。因此,仅使用1.4 GHz频率下的数据来推导以下关于有效电导率 σ_{eff} 的经验表达式,该表达式是基于土壤的质地属性得出的:

$$\sigma_{\text{eff}} = -1.645 + 1.939\rho_b - 2.2562S + 1.594C, \quad (9)$$

该表达式在低于1.4 GHz的频率下不会导致 ε'' 的计算值和测量值之间出现较大误差。

PEPLINSKI等^[26]基于1.4~18 GHz频段数据建立的土壤介电半经验模型,为适应P波段雷达应用需求,通过实测数据验证和修正,成功扩展至0.3~1.3 GHz频段。

在0.3~1.3 GHz频段修正:

$$\varepsilon' = 1.15\varepsilon'_m - 0.68, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = 0.0467 + 0.2204\rho_b - 0.4111S + 0.6614C. \quad (11)$$

该修正模型为0.3~1.3 GHz频段的土壤湿度微波遥感、地下探测和电磁波传播预测提供了准确的理论基础。

2 时域有限差分方法

基于时域有限差分(FDTD)方法理论,二维TM波差分方程^[27-28]可表示为

$$H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = CP(m)H_x^{n-1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - CQ(m) \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y}, \quad (12)$$

$$H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) = CP(m)H_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) + CQ(m) \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x}, \quad (13)$$

$$E_z^{n+1}(i,j) = CA(m)E_z^n(i,j) + CB(m) \times \left[\frac{H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - H_y^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j\right)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j - \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right], \quad (14)$$

其中, m 为方程左边场分量 FDTD 网格节点位置。 Δx 、 Δy 分别为 FDTD 区域方向的离散网格宽度。吸收边界采用各向异性介质完全匹配层 (UPML) 实现。以 TM 波为例, 各向异性介质 Maxwell 旋度方程 (无源) 为

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu_1 \frac{s_y}{s_x} H_x, \quad (15)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu_1 \frac{s_x}{s_y} H_y, \quad (16)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = (j\omega\varepsilon_1 + \sigma_1)_{s_x s_y} E_z, \quad (17)$$

其中, ε_1 、 μ_1 、 σ_1 表示计算域内部介质介电参数。 S_x 和 S_y 分别为 x 和 y 方向的单轴参数, 可分别表示为

$$s_x = k_x - \sigma_x / j\omega\varepsilon_0, \quad s_y = k_y - \sigma_y / j\omega\varepsilon_0, \quad (18)$$

其中, σ_x 、 k_x 分别为

$$\sigma_x(x) = \sigma_{\max} (|x - x_0|^n) / d^n, \quad (19)$$

$$k_x(x) = 1 + (k_{\max} - 1) (|x - x_0|^n) / d^n, \quad (20)$$

其中, d 为 UPML 层厚度, 根据文献 [28] 取 $n = 4$, $\sigma_{\max} = (n + 1) / \sqrt{\varepsilon_r} 150\pi\delta$, $k_{\max} = 5 \sim 11$, 吸收效果最佳。FDTD 计算达到稳定后, 记录输出边界上近场计算结果, 基于等效原理, 采用时谐场外推技术可以得到远区散射场。复合散射系数 (单位为 db) 可以表示为

$$\sigma_s = 101g(S_{\text{NRCS}}). \quad (21)$$

式 (21) 中的归一化雷达散射截面 S_{NRCS} 为

$$S_{\text{NRCS}} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi r}{L} \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (22)$$

其中, r 、 E_s 、 E_i 分别表示观察点到坐标原点的距离、远区散射场、入射波电场, L 为粗糙土壤表面取样长度 [28]。

3 数值计算与结果分析

在以下实验仿真计算中, 除非另有说明, 入射电磁波波长为 1 m, 频率均为 0.3 GHz, 入射角为 $\theta_i = 30^\circ$, 选取某一地形处的 DEM 数据集 [16, 18], 土壤砂粒分数 $K = 50\%$, 粘土含量 $n = 20\%$, 容重 $x = 1.5 \text{ g/cm}^3$, 粗糙面仿真统计个数为 20 个进行计算。

3.1 散射系数随土壤含水量的变化规律

计算散射系数随土壤含水量的变化规律时, 分别取土壤含水量为 $m_1 = 20\%$, $m_2 = 30\%$, $m_3 = 40\%$, 对应的介电常数分别为 $\varepsilon_1 = 11.4777 - j19.8490$, $\varepsilon_2 = 18.2746 - j20.6642$, $\varepsilon_3 = 26.0634 - j21.4803$, 图 3 展示了散射系数随土壤含水量的变化规律。

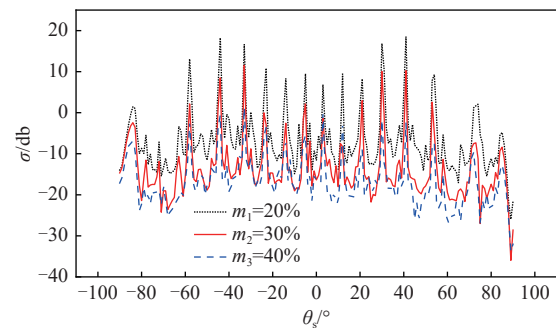


图 3 散射系数随土壤含水量的变化规律

从图 3 可以看出, Peplinski 土壤模型显示散射系数具有振荡变化和随含水量增大而减小的特征。

振荡现象源于表面散射和体散射在不同散射角下产生的干涉效应, 类似于光栅衍射的角度依赖性。含水量对散射系数的影响主要通过以下机制实现: 水的高介电常数 (约 80) 使土壤整体介电常数显著增大, 改变了土壤—空气界面的反射特性; 同时含水量增加提高了土壤的损耗正切, 减少了电磁波的穿透深度, 使散射机制从以体散射为主逐渐转向以表面散射为主。需要指出的是, 上述散射系数随含水量增大而减小的规律, 与部分文献中报道的后向散射系数随含水量增大而增大的结论存在差异。这一差异主要源于本研究采用的低频工作条件 (0.3 GHz)。在该频段下, 电磁波波长较长 (1 m), 干燥土壤的穿透深度可达数十厘米, 体散射贡献显著。当含水量增加时, 虽然土壤—空气界面的菲涅耳反射系数有所增大, 但穿透深度大幅减小导致体散射贡献的衰减效应超过了表面反射增强效应, 从而表现为总散射系数的下降。这一现象在高频微波遥感中通常不明显, 因为高频条件下穿透深度本身较浅, 表面散射占主导地位。

3.2 散射系数随粘土含量的变化规律

计算散射系数随粘土含量的变化规律时, 分别取粘土含量为 $n_1 = 30\%$, $n_2 = 50\%$, $n_3 = 80\%$, 对应的介电常数分别为 $\varepsilon_1 = 43.2699 - j0.0902$, $\varepsilon_2 = 43.728 - j0.092$, $\varepsilon_3 = 44.1913 - j0.093$, 图 4 展示了散射系数随粘土含量的变化规律。

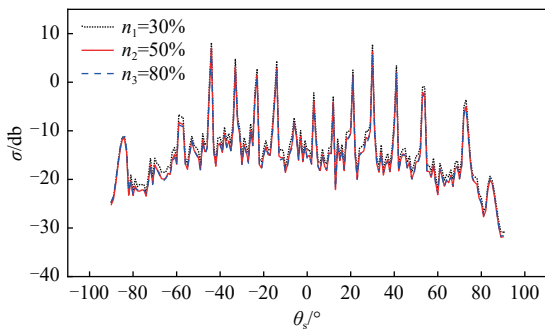


图4 散射系数随粘土含量的变化规律

从图4可以看出,散射系数随散射角振荡地变化(这一规律是一直存在的,下文不再赘述),随粘土含量的变化不明显。

散射系数主要取决于土壤介电常数,而介电常数在微波频段主要受体积含水量控制。水分子因其高偶极矩而表现出强烈的介电响应,显著主导了土壤的介电特性。在含水量不变的条件下,不同粘土含量(如50%与80%)的土壤样品其介电常数(实部与虚部)差异甚微。这是因为粘土颗粒表面的束缚水层对整体介电贡献有限,且吸附水的极化响应远低于自由水,使得基于Fresnel反射系数计算的功率反射系数基本保持一致。粘土颗粒的典型粒径($<2\ \mu\text{m}$)相对于本研究使用的波长显著偏小,散射过程主要遵循Rayleigh散射机制。该机制下,散射强度正比于颗粒半径的六次方,对微小颗粒尺寸变化极不敏感。因此,粘土含量增加对散射的贡献微弱,散射特性仍主要受较大颗粒组分(如砂粒或粉砂)及表面粗糙度控制。在高粘土含量土壤中,Mie散射(颗粒尺寸与波长可比时发生)几乎不发生,进一步抑制了散射系数的变化。

3.3 散射系数随容重的变化规律

计算散射系数随容重的变化规律时,容重分别设置为 $x_1 = 1.2, x_2 = 1.5, x_3 = 1.8$,介电常数分别为 $\varepsilon_1 = 42.6059 - j0.092, \varepsilon_2 = 43.7280 - j0.092, \varepsilon_3 = 44.8602 - j0.092$,图5展示了散射系数随容重的变化规律。

观察图5可得到,散射系数随容重的变化不明显。

土壤容重直接影响土壤的孔隙率,进而改变土壤中水的存在形式。容重增大时,孔隙率减小,直接影响了水分在土壤中的分布形态。低容重时(高孔隙率):水分主要以薄膜形式吸附在颗粒表面,形成束缚水。高容重时(低孔隙率):孔隙总量减少,水分更多以自由水形式充填孔隙,但同时土粒表面积

增大,束缚水比例也增加。高容重土壤中束缚水比例增加,对介电常数产生两个影响:实部下降,束缚水介电常数低于自由水;虚部上升,束缚水损耗较高。不同容重($1.2\sim 1.8\ \text{g}/\text{cm}^3$)的散射曲线几乎重合,主要原因首先包括了介电常数变化有限,容重变化引起的介电常数改变很小,因为固体含量增加和束缚水效应相互抵消。其次是响应饱和现象,在中高含水量条件下,雷达散射对介电常数变化的敏感性下降,呈现饱和效应。最后是模型灵敏度下降:当土壤已较湿时,介电常数进一步变化对散射的增益非常有限,类似于“后向散射湿度饱和”现象。

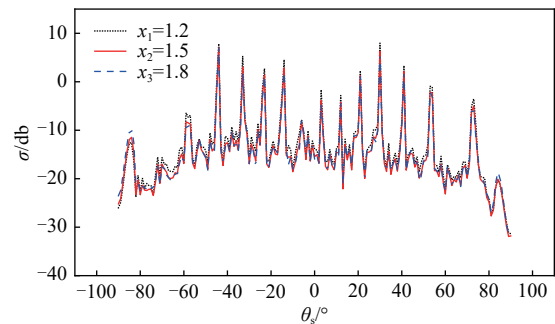


图5 散射系数随容重的变化规律

3.4 散射系数随砂粒分数的变化规律

计算散射系数随砂粒分数的变化规律时,分别取砂粒分数为 $K_1 = 0.1, K_2 = 0.2, K_3 = 0.3$,对应的介电常数分别为 $\varepsilon_1 = 39.7047 - j0.0688, \varepsilon_2 = 42.5484 - j0.0796, \varepsilon_3 = 45.6207 - j0.0921$,图6展示了散射系数随砂粒分数的变化规律。

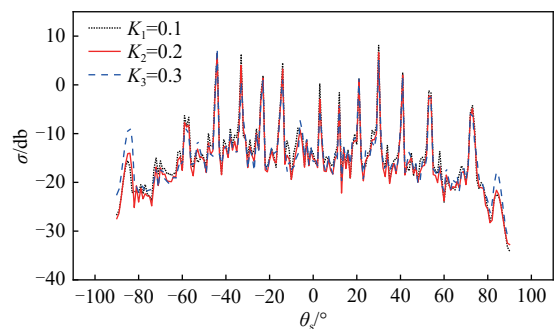


图6 散射系数随砂粒分数的变化规律

从图6可以看出,散射系数没有随着砂粒分数的增加发生显著上升或下降。

砂粒分数对土壤散射系数影响极小的物理机理可归结为以下几个方面。首先,砂粒分数主要通过影响介电混合指数 β 以及调节束缚水与自由水的比例,对复介电常数产生间接影响。但由于砂粒本身的非极性特征和低介电常数,其变化所引起的 ε'

和 ε'' 调节幅度非常有限。其次,砂粒在混合介质中表现出相对的电磁惰性,既不具备显著的极化响应能力,也不易形成强散射源,更多地起到“填充体”作用。第三,在散射模型中,当介电常数处于中等水平时,散射系数对其微小变化表现出非线性饱和特性,即微小的介电常数差异在多角度后向散射的复杂干涉过程中被有效平滑或抵消。最后,相比于含水量、粘土含量和表面粗糙度等对散射系数具有显著影响的因素,砂粒分数的贡献在电磁波的平均响应效应中被进一步弱化。因此,砂粒分数变化无法在散射系数的角度分布中产生可识别的差异,这合理解释了不同砂粒含量条件下散射系数曲线高度重合的现象。

3.5 散射系数随入射角的变化规律

计算散射系数随入射角的变化规律时,分别取入射角 $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_3 = 60^\circ$ 进行计算。对应的介电常数分别为 $\varepsilon_1 = 12.9273 - j0.006$, $\varepsilon_2 = 26.8295 - j0.035$, $\varepsilon_3 = 43.7279 - j0.092$,图 7 展示了散射系数随入射角的变化规律。

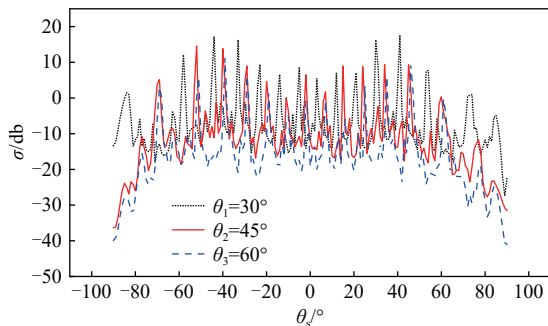


图 7 散射系数随入射角的变化规律

根据图 7 的结果,散射系数在随着入射角增大而表现出下降的变化规律。

散射系数随入射角增大而减小的现象主要由几何光学效应决定,而非介电常数变化所致。该现象的物理机制可归纳为以下 4 个方面:首先,菲涅耳反射系数随入射角变化是散射强度下降的主要因素,当入射角较小时反射系数达到最大值,随着入射角增大,反射系数下降导致散射减弱;其次,大入射角条件下存在显著的能量密度效应,投射到地表的电磁波能量因几何投影而被稀释,单位面积所接收的能量密度减少,形成余弦衰减效应,进而降低散射能力;第三,路径损耗随入射角增大而增加,电磁波在土壤介质中的传播路径延长,特别是在高损耗土壤条件下以及存在多次散射时,路径损耗效应更

为显著;最后,镜面反射方向偏移也是重要因素,小入射角时主反射方向接近雷达接收方向,而当入射角增大时镜面反射方向偏离雷达,导致后向散射信号减弱。因此,散射系数的角度依赖性本质上反映了电磁波与粗糙表面相互作用的几何光学特性。

3.6 散射系数随入射波频率的变化规律

计算散射系数随入射波频率的变化规律时,分别取入射波频率 $f_1 = 0.5 \text{ GHz}$, $f_2 = 0.8 \text{ GHz}$, $f_3 = 1.0 \text{ GHz}$ 进行计算。对应的介电常数分别为 $\varepsilon_1 = 14.353 - j2.170$, $\varepsilon_2 = 14.340 - j1.534$, $\varepsilon_3 = 14.329 - j1.358$,图 8 展现了散射系数随入射波频率的变化规律。

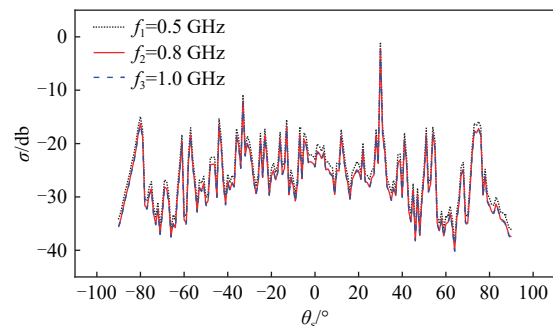


图 8 散射系数随入射波频率的变化规律

观察图 8 发现,3 个频率下的散射系数曲线高度重合,表明在 0.5~1.0 GHz 频率范围内,散射系数对频率变化不敏感。

在 Peplinski 模型框架下,散射系数随入射波频率变化不显著的现象可从土壤介电常数的频率响应特性加以解释。该模型采用 Debye 弛豫方程描述土壤中自由水的介电行为,水分子的弛豫频率约为 18~20 GHz,而本研究所采用的 0.5~1.0 GHz 工作频段远低于该弛豫频率,使得介电常数实部处于色散曲线的平台区域,其数值接近静态介电常数而几乎不随频率改变。数值计算表明,在上述频段内介电常数实部的变化率很小,这一微小变化不足以引起土壤-空气界面菲涅耳反射系数的显著改变。介电常数虚部虽受电导率项影响随频率有所变化,但其作用主要限于穿透深度调制,对界面散射的影响较为有限。此外,频率增加所引起的相对粗糙度参数增大与穿透深度减小等效应在多角度散射的干涉过程中相互抵消,进一步削弱了散射系数的频率敏感性。综上所述,3 个频率下散射曲线的高度重合本质上反映了 Peplinski 模型在低频段的平坦频率响应特性,这一结果与原始文献中的实验观测相吻

合,验证了本研究数值仿真方法的有效性。

4 结束语

本文未采用传统的蒙特卡洛方法生成统计随机粗糙面,而是将高精度DEM实测地形数据与Peplinski半经验土壤介电常数模型相结合,构建了基于FDTD的实际地形电磁散射数值仿真方法。该方法在保证地形几何起伏真实性的同时,实现了土壤介电参数的精确表征,获得了散射系数的角分布特征,为理解粗糙地物表面的电磁散射行为提供了新的研究视角。在此基础上,本文通过对土壤含水量、粘土含量、容重、砂粒分数、入射角及入射波频率6个关键参数的系统敏感性分析,定量分析了各参数对散射系数的影响程度及其物理成因。结果表明,土壤含水量和入射角是影响实际地形电磁散射的主导因素,而土壤质地参数的作用相对有限。这一结论对于简化工程实践中的参数测量需求具有一定的指导意义。与传统数值方法相比,FDTD算法在保证计算精度的前提下,具有计算效率高、内存需求低等优势。本文提出的方法不仅拓展了地物表面电磁散射的数值计算框架,也为低频微波遥感相关工程应用提供了可行的技术途径。需要指出的是,本研究采用的一维地形模型及地下各向同性均质介质假设,在一定程度上限制了对复杂实际场景的描述能力;仿真结果仍有待后续实验数据进一步验证与完善。针对二维或三维复杂地形、多层异质地物地下介质结构以及目标与背景耦合散射等问题,仍需开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] KERKER M, WANG D S, GILES C L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(6): 765-767.
- [2] KUO C, MOGHADDAM M. Electromagnetic scattering from multilayer rough surfaces with arbitrary dielectric profiles for remote sensing of subsurface soil moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 349-366.
- [3] 邢孟道, 谢意远, 高悦欣, 等. 电磁散射特征提取与成像识别算法综述[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 921-942.
- [4] 郭立新, 魏仪文, 柴水荣. 目标与复杂地海面复合电磁散射研究现状综述[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(1): 69-84.
- [5] PENG X, LONG S, WANG Y, et al. Underlying topography inversion using dual polarimetric TomoSAR [J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4117.
- [6] WU X, MA W, XIA J, et al. Spaceborne GNSS-R soil moisture retrieval: Status, development opportunities, and challenges[J]. *Remote Sensing*, 2020, 13(1): 45.
- [7] IODICE A, IMPERATORE P. A simple path to the small perturbation method for scattering from slightly rough dielectric surfaces [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(16): 3035-3035.
- [8] LI J, GUO L, ZENG H. FDTD investigation on the electromagnetic scattering from a target above a randomly rough sea surface [J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2008, 18(4): 641-650.
- [9] HE G Q, SHAO W, WANG X H, et al. An efficient domain decomposition Laguerre-FDTD method for two-dimensional scattering problems [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(5): 2639-2645.
- [10] 朱小敏, 任新成. 覆盖雪层的粗糙土壤表面电磁散射的FDTD研究[J]. *电子测量技术*, 2011, 34(1): 5-11.
- [11] 董子宇, 任新成, 赵晔, 等. 横向沙丘表面电磁散射的时域有限差分法研究[J]. *微波学报*, 2022, 38(1): 90-95.
- [12] 贺文涛. 复杂地面背景下目标电磁散射特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [13] 张茜玉. 基于TSM-VRT-SBR的复杂地物背景与目标复合电磁散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [14] 彭关弘焯, 任新成, 朱小敏, 等. 实际地形与某型导弹复合电磁散射特性研究[J]. *微波学报*, 2024(7): 1-12.
- [15] LI J, GUO L X, ZENG H. FDTD method investigation on the polarimetric scattering from 2-D rough surface [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, 101: 173-188.
- [16] EUROPEAN SPACE AGENCY. Copernicus DEM product handbook [DB/OL]. (2022-11-29) [2025-11-25]. <https://spacedata.copernicus.eu/en/web/guest/collections/copernicus-digital-elevation-model>.
- [17] 彭关弘焯, 任新成, 朱小敏, 等. 实际地形表面与多目标复合电磁散射特性研究[J]. *空间电子技术*, 2025, 22(1): 94-102.
- [18] EUROPEAN SPACE AGENCY. Copernicus DEM validation report [DB/OL]. (2020-05-11) [2025-11-25]. <https://spacedata.copernicus.eu/web/guest/collections>.
- [19] 徐兴倩, 王海军, 屈新, 等. 土壤介电常数模型研究综述[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(3): 61-70.
- [20] WANG J R, SCHMUGGE T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, 4(1): 288-295.
- [21] WANG J R, ENGMAN E T, MO T. The effects of soil moisture, surface roughness, and vegetation on L-band

- emission and backscatter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1987, 1 (6):825–833.
- [22] MIRONOV V L, BOBROV P P, FOMIN S V. Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3):603–606.
- [23] MIRONOV V L, DE ROO R D, SAVIN I V. Temperature-dependable microwave dielectric model for an Arctic soil [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6):2544–2556.
- [24] RAWAT K S, SEHGAL V K, PRADHAN S, et al. Semi-empirical model for retrieval of soil moisture using RISAT-1 C-Band SAR data over a sub-tropical semi-arid area of Rewari district, Haryana (India) [J]. Journal of Earth System Science, 2018, 127(2):1–11.
- [25] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3):574–582.
- [26] PEPLINSKI N R, ULABY F T, DOBSON M C. Dielectric properties of soils in the 0.3–1.3-GHz range [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(3):803–807.
- [27] LIU S, ZOU B, ZHANG L. An FDTD-based method for difference scattering from a target above a randomly rough surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(4):2427–2432.
- [28] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.

[责任编辑 毕 伟]

FDTD study of electromagnetic scattering characteristics from actual terrain surface

LIU Xu¹, REN Xincheng^{1,2*}, WANG Yuqing^{1,2}, ZHU Xiaomin¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University;

2. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Processing for Big Energy Data, Yan'an 716000, China)

Abstract: To acquire electromagnetic scattering data from realistic terrain environments, this study employed the Peplinski soil dielectric constant model to characterize soil dielectric properties. Digital Elevation Models (DEMs) were used to reconstruct terrain surface topography, and the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method was applied to analyze electromagnetic scattering behavior from these surfaces. Numerical simulations generated angular distribution curves of scattering coefficients, and the change rule between scattering coefficients and various parameters—including soil moisture content, clay content, soil bulk density, sand fraction, incident angle, and incident frequency were investigated. Data analysis revealed that the scattering coefficient exhibits oscillatory variations with respect to the scattering angle and decreases with increasing soil moisture content and incident angle, while showing no significant variation with changes in clay content, soil bulk density, sand fraction, or incident frequency. This research provides theoretical foundation and practical guidance for understanding electromagnetic scattering behavior from real terrain surfaces.

Key words: electromagnetic scattering; actual terrain surface; Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method; Peplinski model