

王玉清, 刘鹏, 任新成, 等. 带限 Weierstrass-Mandelbrot 分形土壤表面与置于其上组合目标复合电磁散射特性仿真及分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(2): 303-312. DOI: [10.13443/j.cjors.2020031401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020031401)

WANG Y Q, LIU P, REN X C, et al. Characteristics of composite electromagnetic scattering from band limited Weierstrass-Mandelbrot fractal soil surface and combinatorial targets placed on it[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(2): 303-312. (in Chinese) DOI: [10.13443/j.cjors.2020031401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020031401)

带限 Weierstrass-Mandelbrot 分形土壤表面与置于其上组合目标复合电磁散射特性仿真及分析

王玉清¹ 刘鹏² 任新成¹ 朱小敏¹ 赵晔¹ 杨鹏举¹

(1. 延安大学物理与电子信息学院, 延安 716000; 2. 复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要 为了满足置于粗糙面之上组合目标雷达回波特性的数据采集、特征提取的需要, 采用 Topp 模型和电介质复介电常数计算公式模拟土壤介电常数的实部和虚部, 应用带限 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数模拟土壤表面, 运用时域有限差分方法研究了带限 Weierstrass-Mandelbrot 分形土壤表面与置于其上组合目标的复合散射, 并仿真了复合散射系数的角分布曲线. 仿真结果表明, 复合散射系数随散射角振荡地变化, 在镜反射方向处产生散射增强效应; 土壤表面高度起伏均方根越大, 复合散射系数越大; 分维越大, 复合散射系数越大; 湿度对复合散射系数影响虽小, 但有固定的规律可循; 组合目标尺度、介电常数、入射角对复合散射系数影响没有固定的规律可循; 标度区间、空间基频对复合散射系数基本上没有影响.

关键词 复合散射; 时域有限差分法; 带限 Weierstrass-Mandelbrot 分形; 土壤表面; 组合目标; 复合散射系数

中图分类号 TN011

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)02-0303-10

DOI [10.13443/j.cjors.2020031401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020031401)

Characteristics of composite electromagnetic scattering from band limited Weierstrass-Mandelbrot fractal soil surface and combinatorial targets placed on it

WANG Yuxing¹ LIU Peng² REN Xincheng¹ ZHU Xiaomin¹ ZHAO Ye¹ YANG Pengju¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China; 2. Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract In order to meet the needs of data acquisition, feature extraction of radar echo characteristics of combinatorial target placed on the rough surface, Topp model and dielectric complex permittivity calculation formula are used to simulate the real and imaginary parts of the soil dielectric parameter, the soil surface is simulated with the Weierstrass-Mandelbrot fractal function, the electromagnetic scattering from the composite model consisting of soil surface and combinatorial target placed on it is studied by the finite-difference time-domain method, and the angle distribution curve of composite scattering coefficient is simulated. The simulation results show that the composite scattering coefficient oscillates with the scattering angle, and the scattering enhancement effect occurs in the mirror reflection direction; the larger the root mean square of the fluctuation of soil surface, the larger the composite scattering coefficient; the larger the fractal dimension, the larger the composite scattering coefficient; although the influence of the

收稿日期: 2020-03-14

资助项目: 国家自然科学基金(61861043, 61701428, 61801416); 复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室开放基金(EMW201910)

联系人: 王玉清 E-mail: yauyqwang@126.com

soil moisture content on the composite scattering coefficient is small, there are fixed rules to follow; there is no fixed rule for the influence of the scale and dielectric constant of combinatorial target, incident angle on the composite scattering coefficient; scale interval and spatial fundamental frequency have no effect on the composite scattering coefficient.

Keywords composite electromagnetic scattering; finite-difference time-domain method; band limited Weierstrass-Mandelbrot fractal; soil surface; combinatorial target; the composite scattering coefficient

引言

目标与陆地背景的复合电磁散射特性在军、民用领域均有着非常广泛的应用前景,可为军、民用多项技术提供必要的理论依据和实用模型^[1-6].如陆地表面上方邻近静止目标监测、上方邻近低飞目标识别与制导截获技术;置于陆地表面上静止或运动的目标监测;陆地上半埋目标识别;陆地上埋藏目标探测等诸多实际问题均需要对目标与陆地背景的复合散射问题进行研究.

对于目标与环境的复合散射问题,现有的研究主要集中于目标与海洋背景的复合散射^[7-18],陆地背景与目标复合散射特性的研究则少得多^[19-21].实际上,地球表面总面积约5.1亿平方千米,其中陆地面积1.49亿平方千米,占地球表面积的29%,约1/3.因此,研究陆地背景与目标的复合散射仍然具有十分重要的意义.

在目标与陆地表面复合散射研究中,研究陆地表面与上方、半埋、全埋目标的复合散射^[22-23]比较多,而且目标多为球、柱、板等简单目标,未见对陆地表面与置于其上复杂组合目标复合散射特性研究的相关报导.实际上,地物表面上静止陆军装备如坦克、装甲车辆,空军装备如战斗机、轰炸机,航天装备如卫星、火箭,民用火车、汽车、飞机等等,当它们停放在陆地表面时,都属于粗糙地物表面与置于其上目标的复合模型.

特别值得一提的是,鉴于目标与环境电磁散射特性在雷达系统设计、目标识别、目标隐身与反隐身等领域的重要应用价值,2019年《电波科学学报》出版了“目标与环境电磁散射特性技术”专刊,及时总结了我国目标与环境电磁散射特性技术研究与应用方面的最新进展^[24].2020年,西安电子科技大学郭立新教授介绍了目标与复杂地海面复合电磁散射研究现状^[25].武汉大学朱国强团队提出了一种粗糙地面上复杂目标散射中心参数化建模的方法^[26].此前,空军工程大学童创明教授等

利用高斯谱函数模拟不同统计特性的陆地表面,采用混合算法研究了复杂陆地粗糙面及其上方坦克目标复合散射特性^[27].但以上研究均未涉及采用时域有限差分(Finite-difference time-domain, FDTD)法研究分形土壤表面与其上组合目标的复合散射问题.

在地、海粗糙面与目标复合散射研究中,通常情况下都是采用特定的周期函数或随机函数模拟粗糙面,但是,在自然界中粗糙面既不是纯周期的,也不是完全随机的,就统计意义上而言,随机粗糙面都存在着自相似性,具有分形的特点^[28-29].粗糙地面通常用指数型分布模拟^[19-21],实际上,用分形模型模拟兼顾了实际地面大范围有序和小范围无序的特点^[30-33],更为贴切.西安电子科技大学郭立新教授等^[31-32]较早地研究了分形粗糙面、分形粗糙海面的电磁散射特性,但并未对分形粗糙面与目标的复合散射问题进行进一步的研究.

本文采用Topp经验模型^[34-37]和电介质复介电常数计算公式^[38-39]分别模拟土壤介电常数的实部和虚部,应用带限Weierstrass-Mandelbrot分形函数模拟大地土壤表面,运用FDTD法^[40-41]研究了时谐电磁波入射时带限Weierstrass-Mandelbrot分形土壤表面与置于其上组合目标的复合电磁散射特性.

1 复合散射模型建立

图1为土壤表面与置于其上组合目标复合散射的示意图.组合目标截面从上到下依次由一个半圆、一个等腰梯形、两个圆构成,组合目标置于土壤表面上.半圆半径为 λ ,等腰梯形上底长为 4λ 、下底长为 5λ 、高为 1.5λ ,两圆半径均为 0.5λ ,两圆圆心相距 2.5λ ,上方半圆圆心位于等腰梯形上底的中点,下方两圆与等腰梯形下底相切、对称放置.图2为土壤表面与置于其上组合目标复合散射计算的FDTD模型,其中 AB 为连接边界, CD 为输出边界,单轴各向异性完全匹配层(uniaxial anisotropic perfectly matched layer, UPML)为吸收边界,厚度取10个网格.

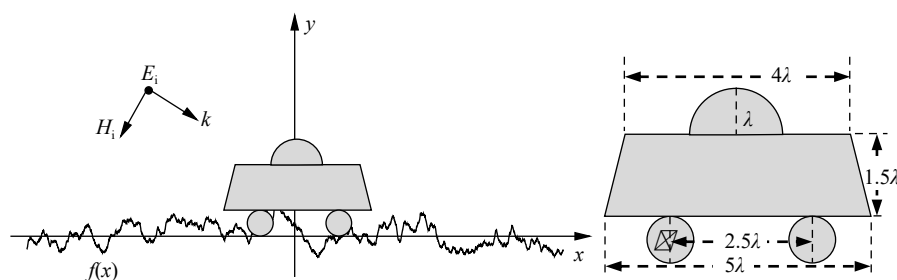


图 1 土壤表面与置于其上组合目标复合散射几何示意图

Fig. 1 Geometry diagram of composite scattering from soil surface with combinatorial target placed on it

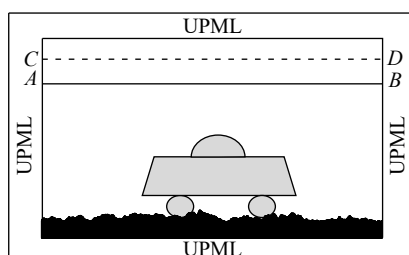


图 2 土壤表面与置于其上组合目标复合散射计算的
FDTD 模型

Fig. 2 The FDTD model of calculation of composite scattering
from soil surface and combinatorial target placed on it

在交变电磁场下,电介质的复介电常数可以表示为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r). \quad (1)$$

式中: j 为虚数单位; ε_r 表示介质相对复介电常数; ε' 和 ε'' 分别表示介电常数的实部和虚部, ε'' 与介质电导率 σ 的关系为

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}, \quad (2)$$

ω 为入射电磁波的角频率。

本文采用式 (2) 表示土壤介电常数的虚部。

土壤介电常数与含水量的关系模型很多,其中的经验模型有 Topp 模型、混合模型、扩散模型等等,相比较而言, Topp 模型公式不仅形式非常简单,而且完全满足实际工程问题的需要^[37]。因此,本文中土壤介电常数的实部选用由 Topp 等人总结的经验公式^[37],表达式为

$$\varepsilon'_r = 3.03 + 9.3w + 146.0w^2 - 76.7w^3. \quad (3)$$

$$w = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon'_r - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon'^2_r + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon'^3_r, \quad (4)$$

式中: ε'_r 为土水混合物相对介电常数实部; w 为土壤含水率,取值应小于 45%。

本文采用 Topp 经验模型式 (3) 表示土壤介电常数的实部。

带限 Weierstrass-Mandelbrot 函数是从 Weierstrass

函数衍生而来的,表达式为^[29-30]

$$f(x) = \frac{\sqrt{2}\delta[1 - b^{(2D-4)}]^{1/2}}{[b^{(2D-4)N_1} - b^{(2D-4)(N_2+1)}]^{1/2}} \sum_{n=N_1}^{N_2} b^{(D-2)n} \cos(2\pi s b^n x + \varphi_n). \quad (5)$$

式中: δ 为均方根; b 为空间基频; D 为分维 ($1 < D < 2$); s 为标度因子 ($s = k/(2\pi)$, k 为空间波数); φ_n 为在 $(0, 2\pi)$ 上均匀分布的随机相位; 标度区间 $N = N_2 - N_1 + 1$, 随着 N 的增加,越来越多的频率分量加到准周期上。图 3 为带限 Weierstrass-Mandelbrot 函数当高度起伏均方根 $\delta = 0.05\lambda$, 分维 $D = 1.1$ 时的图像。

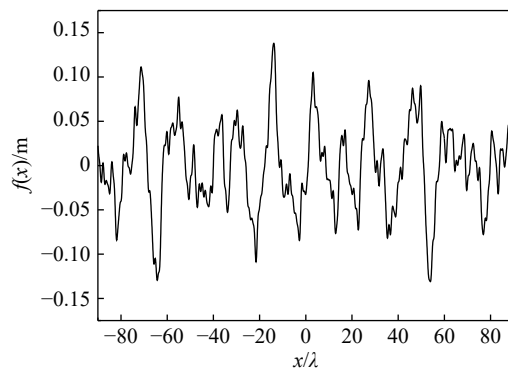


图 3 带限 Weierstrass-Mandelbrot 函数图像 ($\delta=0.05\lambda$, $D=1.1$)

Fig. 3 The functional image of band-limited Weierstrass-Mandelbrot ($\delta=0.05\lambda$, $D=1.1$)

本文用带限 Weierstrass-Mandelbrot 函数模拟土壤表面。

2 FDTD 方法

依据 FDTD 相关理论^[41], 电磁场二维问题的横磁波 (TM 波) 差分方程如下:

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = CP(m) H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - CQ(m) \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y}; \quad (6)$$

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) = CP(m)H_y^{n-1/2}(i+1/2, j) + CQ(m) \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x}; \quad (7)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = CA(m)E_z^n(i, j) + CB(m) \cdot \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta y} \right]. \quad (8)$$

式中: m 表示方程左边场分量 FDTD 网格节点位置; Δx 、 Δy 分别表示 FDTD 区域 x 、 y 方向的离散网格宽度; 系数 CP 、 CQ 、 CA 、 CB 具体表达式见文献 [41].

若吸收边界采用 UPML 实现, 对于 TM 波来说, 麦克斯韦旋度方程为

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu_1 \frac{s_y}{s_x} H_x; \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu_1 \frac{s_x}{s_y} H_y; \quad (10)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = (j\omega\varepsilon_1 + \sigma_1) s_x s_y E_z. \quad (11)$$

式中: ε_1 、 μ_1 、 σ_1 表示计算域内部的介质介电参数; $s_x = \kappa_x - \sigma_x/(j\omega\varepsilon_0)$ 和 $s_y = \kappa_y - \sigma_y/(j\omega\varepsilon_0)$ 分别为 x 和 y 方向的单轴参数, 其中 σ_x 、 κ_x 表达式为

$$\sigma_x(x) = \sigma_{\max}(|x - x_0|^n)/d^n, \quad (12)$$

$$\kappa_x(x) = 1 + (\kappa_{\max} - 1)(|x - x_0|^n)/d^n. \quad (13)$$

式中: d 为 UPML 层厚度; 根据文献 [41], 取 $n = 4$, $\sigma_{\max} = (n+1)/(\sqrt{\varepsilon_r} 150\pi\delta)$; $\kappa_{\max} = 5 \sim 11$, 吸收效果是较好的. σ_y 、 κ_y 表达式与式 (12)、(13) 类似.

当计算达到稳定后, 首先记录输出边界上的近场计算结果, 然后根据等效原理, 并利用时谐场外推法即可得到远区散射场, 复合散射系数(单位为 dB)可以表示为

$$\sigma_s = 10\lg(S_{\text{NRCS}}). \quad (14)$$

式 (14) 中的归一化雷达散射截面 S_{NRCS} 为

$$S_{\text{NRCS}} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi r}{L} \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}. \quad (15)$$

式中: 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.

以上所述 FDTD 方法采用 Yee 元胞对计算域进行划分、按时间步迭代进行计算, 与面问题方法相比, 不需要存储大型矩阵数据, 也不存在矩阵的

分块、求逆等运算, 在内存消耗和 CPU 占用方面所需资源都相对较少; 在加源方式上与传统方式相比有变化, 连接边界中三个边界延伸到吸收边界内, 只保留图 2 中粗糙面与目标上方的一个连接边界, 通过编程验证结果来看, 该处理是可行和有效的; 吸收边界采用 UPML 吸收边界, 传统方法中 UPML 相邻计算域内介质分有耗或无耗两种情况, 而粗糙面与目标复合散射问题中, 与吸收层相邻的介质既有土壤、目标这样的有耗介质, 又有自由空间等无耗介质情况, 计算中针对这些复杂情况均作了相应的处理及验证.

3 算法验证及误差分析

为了验证 FDTD 算法的有效性, 用 FDTD 算法计算了指数型粗糙面与置于其上导体圆柱的复合散射, 并与 MoM 算法的结果进行了比较, 如图 4 所示. 计算中, 入射波频率取为 $f = 0.3 \text{ GHz}$, 入射角取为 $\theta_i = 60^\circ$, 粗糙面高度起伏均方根取为 $\delta = 0.2\lambda$, 相关长度取为 $l = 1.5\lambda$, 下方介质的相对复介电常数取为 $\varepsilon_r = 2.5 - j0.18$, 导体圆柱横截面半径取为 $r = \lambda$. 由图 4 可以看出, 这两种算法得到的结果吻合得相当好, 验证了本文算法的有效性.

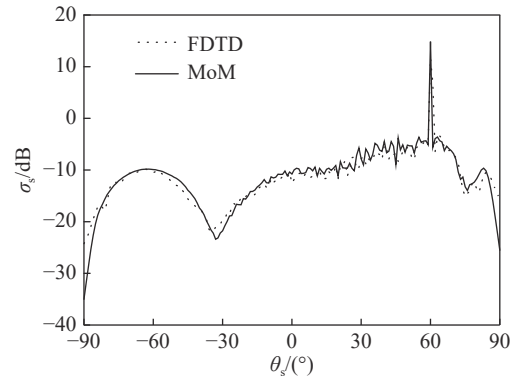


图4 两种方法计算的粗糙面与置于其上导体圆柱的复合散射结果比较

Fig. 4 Comparison of numerical simulation results by FDTD and MoM for composite scattering from rough surface and target

这里, 还可以通过求解其相对误差做更好的对比, FDTD 算法和 MoM 复合散射系数的相对误差公式为

$$\Delta = \sum |\sigma^{\text{FDTD}} - \sigma^{\text{MoM}}| / \sum |\sigma^{\text{MoM}}| \times 100\%. \quad (16)$$

根据图 4 数据及式 (16), 可以计算出 FDTD 算法相对误差约为 4.872 6%, 这进一步说明了 FDTD 算法分析土壤表面与置于其上目标复合散射问题的有效性.

4 数值仿真与分析

当土壤介电常数的实部采用 Topp 模型时,它随土壤湿度变化关系如图 5 所示。

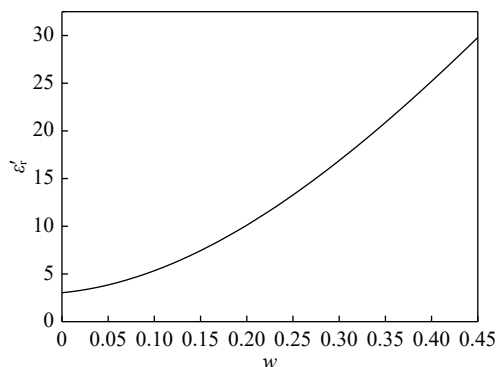


图 5 土壤介电常数实部随土壤湿度变化曲线

Fig. 5 Change curve of real part of soil dielectric constant with soil moisture

从图 5 可以看出,土壤介电常数实部随湿度的增大非线性增大。

数值仿真时,入射电磁波的频率取为 0.3 GHz,入射角 $\theta_i = 15^\circ$, FDTD 空间网格宽度 $\Delta = \lambda/20$, 时间网格宽度 $dt = \frac{\Delta}{2c}$, c 为真空中的光速。土壤表面用带限 Weierstrass-Mandelbrot 函数模拟, 取样长度 $L = 3600\Delta$, 统计个数为 20 个。组合目标几何尺寸如图 1 所示, 上方半圆为玻璃, 介电常数取为 $\epsilon_r = 2.2$; 下方两个圆为橡胶, 介电常数取为 $\epsilon_r = 3$; 中间等腰梯形为理想导体, 目标尺度 $k_t = 1$ 。

需要说明的是,考虑到土壤对电磁波有较大的衰减作用, FDTD 计算中土壤的介电常数取为复介电常数, 且在设置吸收边界时已考虑了土壤的深度, 即在粗糙地面与目标复合散射问题中, 土壤取为均匀无限大半空间介质。FDTD 计算时用吸收边界吸收外行波来进行仿真, 对土壤深度应理解为无限大, 实际仿真中只需考虑粗糙面起伏程度, 对土壤深度取合适的网格数目即可。因此, 下文没有仿真土壤深度对复合散射系数的影响。另外, 限于篇幅, 本文只给出入射波为 TM 波情形的数值仿真结果。

4.1 高度起伏均方根对复合散射系数的影响

图 6 为复合散射系数 σ_s 随高度起伏均方根 δ 变化的仿真结果。仿真时, 土壤表面分形参数 $D = 1.35$, $b = 0.5e$, e 为自然常数, $N = 10$, 介电常数 $\epsilon_r = 7.4511 - j1.3901$ (湿度 $w = 0.15$, 以下不再说明), 目标尺度 $k_t = 1$ 。从图 6 可以看出: σ_s 随 θ_s 振荡的变化, 在镜反射方向 ($\theta_s = 15^\circ$) 处达到最大; 存在散射增强效应(这一规律后文不再赘述); δ 对 σ_s 的

影响较大, 在 θ_s 变化的绝大部分范围内(镜反射方向附近除外), δ 越大, σ_s 越大, 角分布曲线振荡的幅度越小, 振荡得越快。

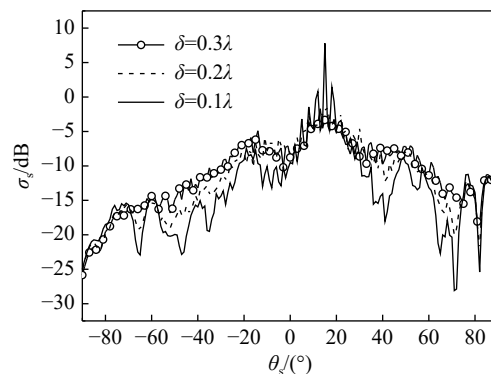


图 6 高度起伏均方根对复合散射系数的影响

Fig. 6 Influence of the root mean square on composite scattering coefficient

土壤表面高度起伏均方根越大, 则土壤表面的粗糙度就越大, 镜向方向散射减弱, 其他方向散射增强, 散射效应增强, 所以复合散射系数就越大。

4.2 分形参数对复合散射系数的影响

4.2.1 分维对复合散射系数的影响

图 7 为复合散射系数 σ_s 随分维 D 变化的仿真结果。仿真时, $b = 0.5e$, $N = 10$, $\delta = 0.15\lambda$, $\epsilon_r = 7.4511 - j1.3901$, $k_t = 1$ 。从图 7 可以看出: σ_s 随 θ_s 振荡的变化, 在镜反射方向 ($\theta_s = 15^\circ$) 处达到最大; D 对 σ_s 的影响较大, 在散射角变化的整个范围内, D 越大, σ_s 越大, 角分布曲线振荡的幅度越小, 振荡得越快。

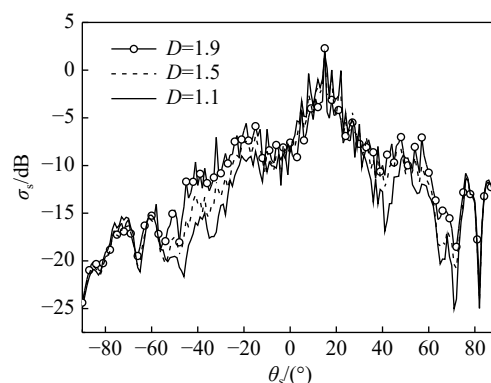


图 7 分维对复合散射系数的影响

Fig. 7 Influence of the fractal dimension on composite scattering coefficient

分维越大, 表明土壤表面的粗糙度就越大, 则镜向方向散射减弱, 其他方向散射增强, 散射效应增强, 所以复合散射系数就越大。

复合散射系数随分维变化而变化的规律对于背景中目标的检测、识别及相关的电磁逆散射问

题的解决具有重要的应用价值.

4.2.2 标度区间对复合散射系数的影响

图8为复合散射系数 σ_s 随标度区间 N 变化的仿真结果. 仿真时, $D = 1.35$, $b = 0.5e$, $\delta = 0.15\lambda$, $\varepsilon_r = 7.4511 - j1.3901$, $k_t = 1$. 从图8可以看出, N 对 σ_s 几乎没有影响.

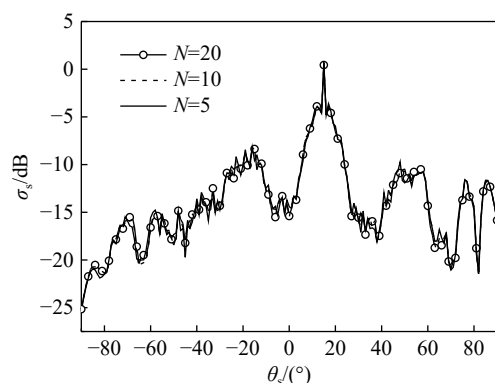


图8 标度区间对复合散射系数的影响

Fig. 8 Influence of the scale interval on composite scattering coefficient

随着 N 的增加, 越来越多的频率分量加到准周期上, 只是引起粗糙面的细微结构发生变化, 因此对复合散射系数几乎没有影响.

4.2.3 空间基频对复合散射系数的影响

图9为复合散射系数 σ_s 随空间基频 b 变化的仿真结果. 计算中, $D = 1.35$, $N = 10$, $\delta = 0.15\lambda$, $\varepsilon_r = 7.4511 - j1.3901$, $k_t = 1$. 从图9可以看出, b 对 σ_s 基本上没有影响.

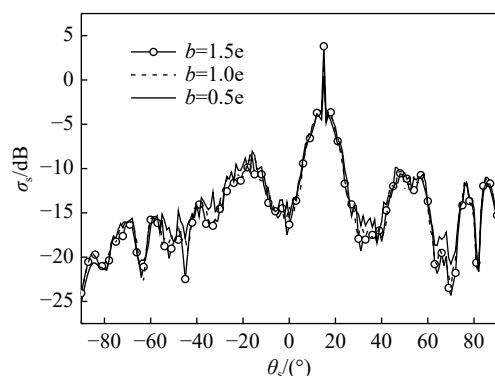


图9 空间基频对复合散射系数的影响

Fig. 9 Influence of the spatial fundamental frequency on composite scattering coefficient

同样地, 空间基频变化只是影响到粗糙面的细微结构, 因此对复合散射系数基本上没有影响.

4.3 土壤湿度对复合散射系数的影响

图10为复合散射系数 σ_s 随土壤湿度 w 变化的仿真结果. 计算中, $D = 1.35$, $N = 10$, $b = 0.5e$, $\delta = 0.15\lambda$,

$k_t = 1$. 从图10可以看出, w 对 σ_s 的影响虽然不是太大, 但有非常明显的规律可循, 即在散射角变化的整体范围内, w 越大, σ_s 越大.

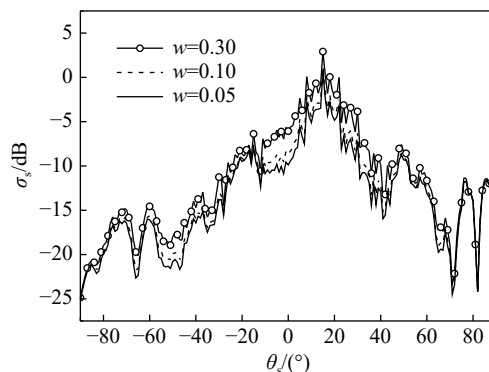


图10 土壤湿度对复合散射系数的影响

Fig. 10 Influence of the soil moisture on composite scattering coefficient

土壤湿度越大, 土壤的介电常数的实部越大, 透射到土壤表面下方的能量越小, 散射到土壤表面上方的能量越大, 所以复合散射系数就越大.

同理, 复合散射系数随土壤湿度变化而变化的规律对于背景中目标的检测、识别及相关的电磁逆散射问题的解决具有重要的应用价值. 下文不再赘述.

4.4 目标尺度对复合散射系数的影响

图11为复合散射系数 σ_s 随目标尺度 k_t 变化的仿真结果. 计算中, $D = 1.35$, $N = 10$, $b = 0.5e$, $\delta = 0.15\lambda$, $\varepsilon_r = 5.3433 - j1.3901$. 从图11可以看出, 组合目标尺度 k_t 对复合散射系数 σ_s 的影响比较大, 且比较复杂, 无固定的规律可循. 另外, 不难看出, 目标尺度对复合散射系数角分布曲线振荡的快慢影响很大, k_t 越大, 曲线振荡得越慢, 反之, 曲线振荡得越快.

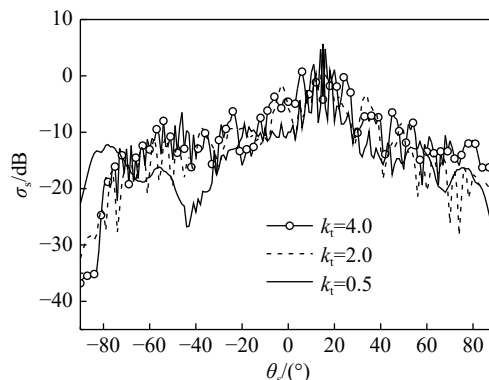


图11 目标尺度对复合散射系数的影响

Fig. 11 Influence of the target scale on composite scattering coefficient

组合目标尺度越大, 对确定的入射波波长而

言,相当于组合目标的粗糙度减小,对应的角分布曲线振荡得越慢。

4.5 目标介电常数对复合散射系数的影响

图 12 为复合散射系数 σ_s 随目标介电常数 ε_t 变化的仿真结果. 计算中, $D = 1.35$, $N = 10$, $b = 0.5e$, $\delta = 0.15\lambda$, $\varepsilon_r = 5.3433 - j1.3901$, $k_t = 1$. 从图 12 可以看出: 当 $\theta_s < -15^\circ$, $\theta_s > 40^\circ$ 时, ε_t 对 σ_s 的影响较大, σ_s 随 ε_t 的增大而增大; 当 $-15^\circ < \theta_s < 40^\circ$ 时, ε_t 对 σ_s 的影响较小, 但 σ_s 仍随 ε_t 的增大而增大。

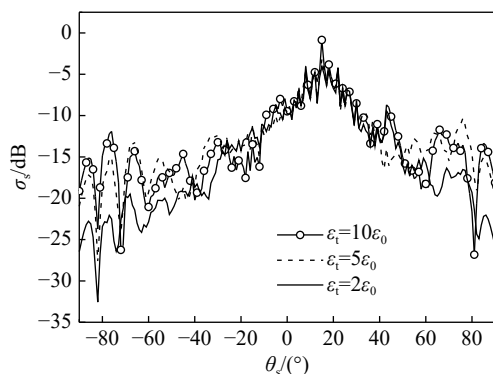


图 12 目标介电常数对复合散射系数的影响

Fig. 12 Influence of the target dielectric constant on composite scattering coefficient

在其他参数不变的条件下,目标介电常数越大,目标表面散射作用越强,所以散射系数越大。

4.6 入射角对后向散射系数的影响

图 13 为复合散射系数 σ_s 随入射角 θ_i 变化的仿真结果. 计算中, $D = 1.35$, $N = 10$, $b = 0.5e$, $\delta = 0.15\lambda$, $\varepsilon_r = 5.3433 - j1.3901$, $k_t = 1$. 从图 13 可以看出,随着入射角的变化,角分布曲线的最大值位置发生了变化,入射角对复合散射系数的影响是非常复杂的,但不难看出,入射角越大,对应的曲线振荡得越慢,反之,振荡得越快,尤其在镜反射方向处显示得非常明显。

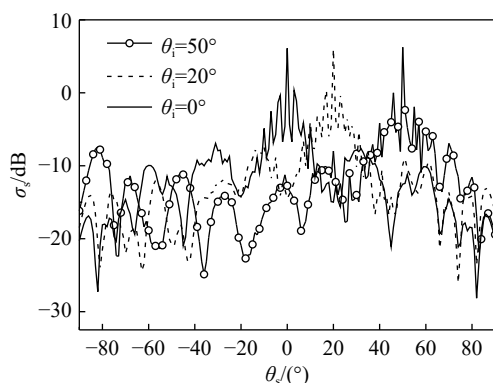


图 13 入射角对复合散射系数的影响

Fig. 13 Influence of the incidence angle on composite scattering coefficient

5 结 论

本文运用 FDTD 法研究了带限 Weierstrass-Mandelbrot 分形土壤表面与置于其上组合目标的电磁散射,研究结果可用于求解地、海粗糙面与置于其上任意目标的复合电磁散射问题,对地、海表面与临近复杂目标复合电磁散射特性的认识以及复杂环境和随机介质中目标的监测、探测、识别均具有重要的应用价值. 而且与其他的数值计算方法相比,采用 FDTD 算法既可获得较高的准确性,同时又可减少计算时间和内存占用量. 因此,本文在理论上是对背景与目标复合电磁散射数值计算方法的进一步推广. 在实践上又可以解决一些具体的工程实际问题,尤其是背景为陆地土壤表面,目标为复杂组合目标,而且目标是置于土壤表面上的情形,与一些实际的工程问题非常贴近. 当然,本文研究中所取土壤表面为一维的,目标为二维的,还未涉及二维背景表面与三维复杂目标的复合散射问题,这些问题仍需今后进一步探索。

参考文献

- [1] CHANG W, DING K H, TSANG L, et al. Microwave scattering and medium characterization for terrestrial snow with QCA-Mie and bicontinuous models: comparison studies[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, 54(6): 3637-3648.
- [2] TAN S, ZHU J Y, TSANG L, et al. Microwave signatures of snow cover using numerical Maxwell equations based on discrete dipole approximation in bicontinuous media and half-space dyadic Green's function[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2017, 10(11): 4686-4702.
- [3] TSANG L, LIAO T H, TAN S, et al. Rough surface and volume scattering of soil surfaces, ocean surfaces, snow, and vegetation based on numerical Maxwell model of 3-D simulations[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2017, 10(11): 4703-4720.
- [4] KIM S B, VAN ZYL J J, JOHNSON J T, et al. Surface soil moisture retrieval using the L-band synthetic aperture radar onboard the soil moisture active-passive satellite and evaluation at core validation sites[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2017, 55(4): 1897-1914.
- [5] KHANKHOJE U K, PADHY S. Stochastic solutions to rough surface scattering using the finite element

- method[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2017, 65(8): 4170-4180.
- [6] 陈晓盼, 肖舒文, 李柏文, 等. 面向工程应用的电磁散射特性建模关键问题研究[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(1): 27-32.
- CHEN X P, XIAO S W, LI B W, et al. Key issues of electromagnetic scattering modeling and simulations oriented to engineering application[J]. *Chinese journal of radio science*, 2019, 34(1): 27-32. (in Chinese)
- [7] 贾春刚, 郭立新, 刘伟, 等. 并行FDTD方法在海面及其上方漂浮目标复合电磁散射中的应用[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(1): 116-122.
- JIA C G, GUO L X, LIU W, et al. Application of parallel FDTD to EM scattering from a target floating on sea surface[J]. *Chinese journal of radio science*, 2016, 31(1): 116-122. (in Chinese)
- [8] 孟肖, 郭立新, 黄青青, 等. 基于并行双尺度射线追踪的海面电磁散射计算[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(4): 725-730.
- MENG X, GUO L X, HUANG Q Q, et al. EM scattering from the sea surface based on the parallelized two scale model ray tracing[J]. *Chinese journal of radio science*, 2016, 31(4): 725-730. (in Chinese)
- [9] 王晶晶, 王安琪, 蒋铁珍, 等. 基于特征基函数法的一维理想导体粗糙海面电磁散射快速算法研究[J]. *电波科学学报*, 2018, 33(5): 605-612.
- WANG J J, WANG A Q, JIANG T Z, et al. A fast algorithm for electromagnetic scattering from a 1D perfectly electric conduct rough sea surface based on characteristics basis function method[J]. *Chinese journal of radio science*, 2018, 33(5): 605-612. (in Chinese)
- [10] REN Y, HUANG W F, NIU J, et al. A hybrid solver based on domain decomposition method for the composite scattering in layered medium[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2017, 16: 420-423.
- [11] BELLEZ S, BOURLIER C, KUBICKE G. 3-D scattering from a PEC target buried beneath a dielectric rough surface: an efficient PILE-ACA algorithm for solving a hybrid KA-EFIE formulation[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2015, 63(11): 5003-5014.
- [12] XU R W, GUO L X, HE H J, et al. A hybrid FEM/MoM technique for 3-D electromagnetic scattering from a dielectric object above a conductive rough surface[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2016, 13(3): 314-318.
- [13] HE H J, GUO L X. A multi hybrid FE-BI-KA technique for 3-D electromagnetic scattering from a coated object above a conductive rough surface[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2016, 13(12): 2009-2013.
- [14] SUN H L, TONG C M, ZOU G X. High efficiency iterative solver for modeling composite rough surface electromagnetic scattering[J]. *Electromagnetics*, 2017, 7(2): 113-126.
- [15] YANG W, QI C. Multipath scattering simulation and SAR analysis for a composite model[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2015, 57(7): 1689-1695.
- [16] FAN T Q, GUO L X, LV B, et al. An improved back-ward SBR-PO/PTD hybrid method for the backward scattering prediction of an electrically large target[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2015, 15: 512-515.
- [17] YANG J, DU Y, SHI J. Polarimetric simulations of bistatic scattering from perfectly conducting ocean surfaces with 3 m/s wind speed at L-band[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2016, 9(3): 1176-1186.
- [18] TAN S, CHANG W, TSANG L, et al. Modeling both active and passive microwave remote sensing of snow using dense media radiative transfer (DMRT) theory with multiple scattering and backscattering enhancement[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2015, 8(9): 4418-4430.
- [19] REN X C, ZHAO Y, YANG P J, et al. Electromagnetic scattering by multiple columns partially buried in a ground plane[J]. *International journal of antennas and propagation*, 2017: 8101509.
- [20] 任新成, 朱小敏, 刘鹏. 大地土壤表面与浅埋多目标宽带复合电磁散射研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(20): 204101.
- REN X C, ZHU X M, LIU P. Wide-band composite electromagnetic scattering from the earth soil surface and multiple targets shallowly buried[J]. *Acta physica sinica*, 2016, 65(20): 204101. (in Chinese)
- [21] 任新成, 朱小敏, 刘鹏. 雪层覆盖土壤表面与半埋柱体宽带复合散射FDTD方法[J]. *计算物理*, 2017, 34(3): 327-334.
- REN X C, ZHU X M, LIU P. FDTD study on wide-band composite scattering from soil surface covered with snow and a partially buried column[J]. *Chinese journal of computational physics*, 2017, 34(3): 327-334. (in Chinese)
- [22] PEPLINSKI N R, ULABY F T, DOBSON M C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range[J]. *IEEE trans-*

- actions on geoscience and remote sensing, 1995, 33(3): 803-807.
- [23] PEPLINSKI N R, ULABY F T, DOBSON M C. Corrections to dielectric properties of soils in the 0.3-1.3GHz ranges[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1995, 33(6): 1340.
- [24] 殷红成. “目标与环境电磁散射特性技术”专刊前言[J]. 电波科学学报, 2019, 34(1): 1.
- [25] 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.
- GUO L X, WEI Y W, CHAI S R. A review on the research of composite electromagnetic scattering from target and rough surface[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(1): 69-84. (in Chinese)
- [26] 张羽绒, 何思远, 张云华, 等. 粗糙地面上复杂目标的正向散射中心参数化建模研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(2): 205-213.
- ZHANG Y R, HE S Y, ZHANG Y H, et al. Forward scattering center parametric modeling of complex targets on the ground rough surface[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(2): 205-213. (in Chinese)
- [27] 邹高翔, 童创明, 高飞, 等. 复杂陆地粗糙面及其上方坦克目标复合散射研究[J]. 电波科学学报, 2017, 32(3): 261-272.
- ZOU G X, TONG C M, GAO F, et al. Composite electromagnetic scattering from tank target above complicated ground rough surface[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(3): 261-272. (in Chinese)
- [28] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman, 1982.
- [29] FALCONER K. Fractal geometry: mathematical foundations and application[M]. New York: Wiley, 1990.
- [30] 郭立新, 吴振森, 柯熙政. 二维带限分形粗糙面电磁散射的基尔霍夫近似[J]. 电子学报, 2000, 28(9): 128-130.
- GUO L X, WU Z S, KE X Z. Electromagnetic scattering from 2D Band-limited fractal surface using Kirchhoff approximation[J]. Acta electronica sinica, 2000, 28(9): 128-130. (in Chinese)
- [31] 郭立新, 王运华, 吴振森. 双尺度动态分形粗糙海面的电磁散射及多普勒谱研究[J]. 物理学报, 2005, 54(1): 96-101.
- GUO L X, WANG Y H, WU Z S. Study on the electromagnetic scattering and Doppler spectra from two-scale time-varying fractal rough sea surface[J]. Acta physica sinica, 2005, 54(1): 96-101. (in Chinese)
- [32] 任新成, 田炜, 刘鹏, 等. 分形大地土壤表面与部分埋藏目标复合散射特性[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 023201.
- REN X C, TIAN W, LIU P, et al. Characteristics of composite electromagnetic scattering from fractal earth soil surface and target buried partially[J]. High power laser and particle beams, 2017, 29(2): 023201. (in Chinese)
- [33] 侯占峰, 薛晶, 闫建国, 等. 分形模型应用于土壤表面特性的评定[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 96-99.
- HOU Z F, XUE J, YAN J G, et al. Fractional model applicable to characterization of soil surface[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (natural science edition), 2014, 35(6): 96-99. (in Chinese)
- [34] 曾江源, 李震, 陈权, 等. SAR土壤水分反演中的介电常数实部简化模型[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(6): 556-562.
- ZENG J Y, LI Z, CHEN Q, et al. A simplified model of the real part of the soil complex permittivity for soil moisture estimation from SAR image[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2012, 31(6): 556-562. (in Chinese)
- [35] 王学, 刘全明, 屈忠义, 等. 盐渍化土壤水分微波雷达反演与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 108-114.
- WANG X, LIU Q M, QU Z Y, et al. Inversion and verification of salinity soil moisture using microwave radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 108-114. (in Chinese)
- [36] WANG J R, SCHMUGGE T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water constant[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1980, 18(4): 288-295.
- [37] 刘军, 赵少杰, 蒋玲梅, 等. 微波波段土壤的介电常数模型研究进展[J]. 遥感信息, 2015, 30(1): 5-13.
- LIU J, ZHAO S J, JIANG L M, et al. Research progress on dielectric constant model of soil at microwave frequency[J]. Remote sensing information, 2015, 30(1): 5-13. (in Chinese)
- [38] DUAN X Y, MOGHADDAM M. Full-wave electromagnetic scattering from rough surfaces with buried in homogeneities[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2017, 55(6): 3338-3353.
- [39] DARAWANKUL A, JOHNSON J T. Band-limited exponential correlation function for rough-surface scattering[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2007, 45(5): 1198-1206.

- [40] ISLAM M, KHARKOVSKY S. Detection and monitoring of gap in concrete based composite structures using microwave dual waveguide sensor[J]. *IEEE sensors journal*, 2017, 17(4): 986-993.
- [41] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 168-256.



刘鹏 (1971—), 男, 陕西人, 复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室副教授, 研究方向为环境与目标的电磁波散射与传播、海洋与舰船 SAR 遥感、计算电磁学、有限元方法.

作者简介



王玉清 (1970—), 女, 陕西人, 延安大学物理与电子信息学院高级实验师, 研究方向为环境与目标的电磁波散射与传播、计算电磁学.



任新成 (1967—), 男, 陕西人, 延安大学物理与电子信息学院教授, 研究方向为环境与目标的电磁波散射与传播、计算电磁学、时域有限差分方法、矩量法.

(上接第 186 页)

- [19] 张其林, 张源源, 李东帅, 等. 地形地表的不规则起伏对雷电电磁场传输的影响[J]. *气象学报*, 2013, 71(2): 357-365.
- ZHANG Q L, ZHANG Y Y, LI D S, et al. Effect of irregular terrain on propagation of lightning electromagnetic field[J]. *Acta meteorologica sinica*, 2013, 71(2): 357-365. (in Chinese)
- [20] 张金波, 彭晓宇, 王磊, 等. 复杂地形下架空线雷电感应过电压特性仿真研究[J]. *高电压技术*, 2019, 45(11): 3708-3714.
- ZHANG J B, PENG X Y, WANG L, et al. Simulation study of lightning induced voltages characteristics on overhead lines over complex mountainous terrain[J]. *High voltage engineering*, 2019, 45(11): 3708-3714. (in Chinese)
- [21] 唐雅丽. 雷击山体对电磁场及多导体架空线感应过电压的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- TANG Y L. Effect of the lightning striking to mountain on

electromagnetic field and induced overvoltages of multiconductor overhead lines[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.(in Chinese)

作者简介



吉德志 (1967—), 男, 云南人, 高级工程师, 主要从事电力生产工作.

张运龙 (1967—), 男, 云南人, 主要从事配电网管理工作.

王磊 (1978—), 男, 河南人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向包括电力系统中的防雷、高压和绝缘技术.