



介质粗糙地面上目标散射中心正向建模与分析

田正秋, 何思远, 蔡志灏, 王筱祎

Forward modeling and analysis of target scattering centers on dielectric rough ground

TIAN Zhengqiu, HE Siyuan, CAI Zhihao, and WANG Xiaoyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024184>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粗糙地面上复杂目标的正向散射中心参数化建模研究

Forward scattering center parametric modeling of complex targets on the ground rough surface
电波科学学报. 2020, 35(2): 205–213

雷达目标的散射中心建模研究

Research on scattering center modeling for radar target
电波科学学报. 2020, 35(1): 106–115

基于FE-BI的介质粗糙面上方涂覆目标电磁散射特性研究

Electromagnetic scattering characteristics of a coated target above a dielectric rough surface based on the FE-BI method
电波科学学报. 2020, 35(2): 252–256

基于散射中心极化比的锥体目标姿态反演

Attitude inversion of cone targets based on polarization ratio of scattering center
电波科学学报. 2019, 34(6): 716–722

基于散射中心模型的目标电磁特性智能生成网络研究

Research on intelligent generation network of target electromagnetic characteristics based on scattering center model
电波科学学报. 2023, 38(5): 835–844

基于散射中心方位特性的大角度成像数据缩减方法

Wide-angle imaging simplified method based on the scattering center aspect dependences
电波科学学报. 2019, 34(1): 91–96



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

田正秋, 何思远, 蔡志灏, 等. 介质粗糙地面上目标散射中心正向建模与分析[J]. 电波科学学报, 2025, 40(1): 12-20. DOI: [10.12265/j.cjors.2024184](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024184)
TIAN Z Q, HE S Y, CAI Z H, et al. Forward modeling and analysis of target scattering centers on dielectric rough ground[J]. Chinese journal of radio science, 2025, 40(1): 12-20. (in Chinese). DOI: [10.12265/j.cjors.2024184](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024184)

介质粗糙地面上目标散射中心正向建模与分析

田正秋¹ 何思远^{1,2*} 蔡志灏¹ 王筱祎¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072; 2. 汉江国家实验室, 武汉 430073)

摘要 基于典型地面背景电磁散射特性的研究, 提出了介质粗糙地面上目标散射中心正向建模的方法。首先, 通过蒙特卡罗方法随机生成粗糙面, 利用高斯谱模拟三维粗糙地面模型, 采用介电常数对不同地面材料进行表征; 然后, 采用正向途径并结合射线追踪、分集技术将复杂的地面环境与 MSTAR(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) 库中的 BMP2 步兵战车目标模型的整体散射离散为多个散射源的集合, 再结合粗糙地面的不同介电常数进行分析, 利用高频近似方法进行求解; 最后, 通过重构的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像与 MSTAR 库实测数据集对比进行验证。结果表明, 本文提出的介质粗糙地面上目标散射中心正向建模方法能够提高与实测图像数据的相似度, 验证了其有效性。

关键词 散射中心正向建模; 粗糙地面; 介质涂覆; 耦合散射中心; MSTAR

中图分类号 TN957.52

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2025)01-0012-09

DOI [10.12265/j.cjors.2024184](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024184)

Forward modeling and analysis of target scattering centers on dielectric rough ground

TIAN Zhengqiu¹ HE Siyuan^{1,2*} CAI Zhihao¹ WANG Xiaoyi¹

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. The Hanjiang National Laboratory, Wuhan 430073, China)

Abstract This research presents a forward modeling approach for target scattering centers on a dielectric rough surface, which is directed to the investigation of the electromagnetic scattering for typical ground backgrounds. Initially, a rough surface is randomly generated by the Monte Carlo method, and a three-dimensional rough ground model is simulated using a Gaussian spectrum with different ground materials characterized by different permittivity. Subsequently, a forward approach is employed, and ray tracing and diversity techniques are used to decompose the scattering into a number of sources, which including the complex ground environment and BMP2 infantry fighting vehicle target from the Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition (MSTAR) dataset. Then, the solution is analyzed by considering different permittivity of rough surfaces and solving the problem using the high-frequency approximation. Finally, the reconstructed synthetic aperture radar (SAR) images and the MSTAR dataset are compared, the result shows that the proposed method improves image similarity, and confirming the efficiency of the proposed forward modeling method for target scattering centers on a dielectric rough surface.

Keywords forward modeling of scattering center; rough surface; dielectric coating; coupled scattering center; MSTAR

收稿日期: 2024-09-09

资助项目: 国家自然科学基金 (42188101)

通信作者: 何思远 E-mail: siyuanhe@whu.edu.cn

0 引言

随着计算电磁学的发展, 复杂环境中目标的电磁特性研究在很多应用中有着重要的价值和地位, 例如在雷达探测、地球探测与遥感、目标识别等方面。近些年, 自由空间中目标电磁散射分析已经得到了迅速的发展^[1], 但对于实际情况, 还需要考虑环境的影响, 以及目标与环境耦合对电磁散射的影响, 尤其是其电磁参数在不同的环境下是不一样的, 从而影响到目标识别的准确性。同时提出了许多计算方法, 主要包括数值方法和高频近似方法, 来对复杂环境电磁散射进行准确表征, 快速发展的是对环境与目标复合散射进行计算的算法。数值方法可以精确计算总散射场, 例如, 有限元法 (finite-element method, FEM)^[2-3]、时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 法^[4-5]、积分方程 (integral equation, IE) 法^[6-8]。其中, FEM 是建立数学模型来描述电磁散射行为, 通过网格将复杂几何区域划分为有限数量的离散子域, 并以数值近似的方式来解决实际的电磁散射问题, 并对适当的边界条件进行定义。FDTD 通过时间步进和空间离散化两种方法, 离散时域麦克斯韦方程组, 模拟电磁波的传播和相互作用。IE 法是将散射物体表面划分为小区域, 然后应用电磁场的 IE (通常是狄氏积分方程) 来描述电磁波在这些区域内的行为, 包括面积分和体积分。这些方程基于麦克斯韦方程组, 描述电场和磁场之间的相互关系, 以及电磁波如何与物体相互作用。IE 法的关键是建立适当的格林函数, 以求解积分方程, 然后通过数值方法来近似求解这些方程。当计算电大尺寸目标的电磁散射问题时, 使用数值方法会消耗大量计算时间和内存。为了解决这个问题, 高频计算方法被提出, 包括物理光学 (physical optics, PO)^[9]法与物理衍射理论 (physical theory of diffraction, PTD)^[10-11]。其中 PO 法通过计算面元散射贡献, 结合几何光学-PO (geometric optics PO, GO-PO) 法^[12-15]或弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR) 法进行射线耦合分析和计算; PTD 主要用于计算边缘绕射贡献。

对于不同的条件, 上述算法虽都有一定的优势, 但是仍然难以满足高效率的建模需求。近年来, 在电磁散射机理和电磁建模技术的基础上, 以更高效率的散射中心建模为基础, 提出了一些正向参数化建模方法, 正向计算参数化模型参数。其中, He 等人^[16]提出了简单模型的正向参数化频率依赖因子的计算方法; Li 等人^[17]基于面元上的电流分布确定了相应的散射中心模型参数; 闫华等人^[18]提出了任意多次

散射机理的目标散射中心频率依赖因子的明确数学表达式。前人所开展的研究是基于理想电导体 (perfect electric conductor, PEC) 粗糙面上的目标与背景的复合散射^[19-20], 而在实际的应用场景中, 需要更进一步考虑不同电磁参数对散射体目标建模带来的影响。

本文提出了介质粗糙面上目标散射中心正向建模的方法。从介质地面和目标的几何模型出发, 结合射线追踪 (ray tracing, RT) 和分集技术, 将目标与地面的整体散射特性离散为多个独立的部件散射源, 并结合高频理论计算推导散射源参数集, 正向构建了介质粗糙面上目标的散射中心参数化模型, 快速生成回波数据, 提高了计算效率。以 MSTAR 库中的 BMP2 步兵战车为例, 首先, 考虑目标与地面的耦合散射中心的影响, 引入粗糙面模型, 正向构建了 BMP2 目标与 PEC 地面的参数化模型, 并重构合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像数据。然后, 结合实际环境背景, 采用电磁参数对介质地面进行表征, 从而更接近实际场景中的耦合散射中心的特性。最后, 实验结果和数据集对比验证了本文提出的介质粗糙地面上目标散射中心正向建模方法的有效性, 与传统的基于回波数据的逆向反演方法相比, 该方法是“由因推果”的正向途径, 散射机理和模型物理含义清晰, 计算效率更高, 为雷达探测、目标识别提供了一条新的辅助途径。

1 复杂粗糙面模型

在研究目标电磁散射特性的过程中, 通常情况下目标并非处于自由空间中, 而是位于各种复杂的地理环境中。对于模拟粗糙地面, 常采用蒙特卡罗方法随机生成^[21]。粗糙面的材质在计算电磁散射时所带来的影响也不容忽视, 因此, 采用不同的介电常数对不同的地面进行表征, 从而建立更加精确的地面散射模型。

1.1 蒙特卡罗方法生成随机粗糙地面

蒙特卡罗方法的基本思路是首先采用经典的谱快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 作为平稳随机过程, 再以确定粗糙表面的某一功率频谱在频域内进行过滤, 最后进行逆 FFT (inverse FFT, IFFT) 可得到二维随机粗糙表面的高度起伏函数 $z = f(x)$ ^[19], 其表达式为

$$f(x) = \frac{1}{L} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} F(k_n) \exp(jk_n x) \quad (1)$$

三维随机粗糙面的高度起伏函数 $z = f(x, y)$ 由二维随机粗糙面扩展而来, 表达式为

$$f(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_x=-M/2+1}^{M/2} \sum_{n_y=-N/2+1}^{N/2} F(k_{m_x}, k_{n_y}) \exp[j(k_{m_x} x_m + k_{n_y} y_n)] \quad (2)$$

式中: L_x 、 L_y 分别为粗糙面的相关长度; M 、 N 为离散数量。

本文采用的粗糙地面是高斯粗糙面^[21], 可将各向同性的高斯粗糙面的随机粗糙面用功率谱密度函数表示, 表达式为

$$W(k_x, k_y) = h^2 \frac{L_x L_y}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{k_x^2 L_x^2 + k_y^2 L_y^2}{4}\right) \quad (3)$$

式中, h 为高斯粗糙面的均方根高度。

1.2 介质粗糙面模型

在电磁散射计算中, 一般将粗糙面简化为理想电导线的模型, 在海面目标的电磁散射分析中, 更普遍地采用这种“理想导线近似”的处理方式。对平行极化中电磁散射计算结果影响较大的地面背景(裸土、植被、荒漠等)和各种类型的人工表面, 这种近似处理方式产生的误差, 使理想电导线无法真实模拟地面背景电磁散射计算时的电磁特性。相对介电常数是地面背景电磁散射计算中不可或缺的参数, 因此为了更准确描述地面的电磁散射特性, 采用相对介电常数的改变来描述不同地面背景。本文中采用三种粗糙程度相同, 但介电常数不同的地面模型计算其电磁散射。其中, 粗糙地面的尺寸为 $600\lambda \times 600\lambda$, 相关长度 $L_x = L_y = 90\lambda$, 均方根高度 $h=0.3\lambda$, 粗糙地面模型如图1所示。

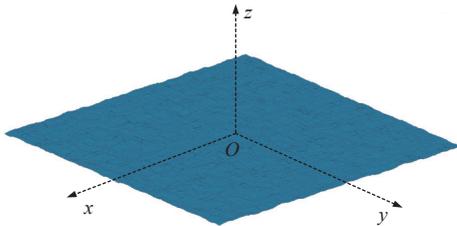


图1 粗糙地面模型示意图

Fig. 1 The schematic of a rough surface model

为了验证粗糙面的材质对电磁散射的影响, 采用不同电磁参数进行涂覆表征, 涂覆厚度为 0.4λ , 涂覆的三种介质在频率 9 GHz 下的相对介电常数分别为 $2.23-j0.55$ 、 $3.55-j0.73$ 、 $3.53-j0.85$ 。在俯仰角 $\theta=0\sim 60^\circ$ 、间隔为 1° , 方位角 $\varphi=90^\circ$ 下, 三种不同介质地面的雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 值如图2所示。可以看出, 不同的介质粗糙面模型, 其散射特性差异明显, 当涂覆的介电常数为 $2.23-j0.55$ 和 $3.55-j0.73$ 时, 两者 RCS 点对点的均方根差异为 12.8 dB; 当涂覆的介电常数为 $2.23-j0.55$ 和 $3.53-j0.85$ 时, 两者 RCS 点对点的均方根差异为 16.9 dB。由此

可知, 当目标处于不同的环境中, 其电磁参数不同导致散射特性的差异是不可忽略的。

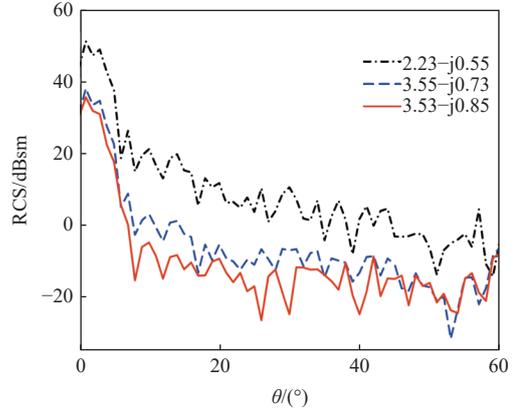


图2 不同介质地面的 RCS 对比

Fig. 2 The comparison of RCS for different medium surfaces

2 介质粗糙背景下的散射中心正向参数化建模

2.1 属性散射中心模型

本文采用的建模方式是散射中心正向参数化建模。首先, 从地面与目标的整体几何模型出发, 将目标分解为多个表面分区。然后, 基于已分区的几何模型, 采用空间 RT 与分集技术, 将所有射线按照不同的路径归类, 并分解为多个射线子集。再采用 GO-PO 法定量计算出每个射线集合的散射场。最后, 根据每个射线集合散射场的大小进行排序, 筛选出贡献占主导作用的强散射源作为强散射中心。本文采用属性散射中心模型^[22-24]进行表征, 具体形式如下:

$$\begin{aligned} E_i^s(f, \theta, \varphi, r_i) &= A_i \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \text{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\varphi - \bar{\varphi}_i) \right] \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \varphi) \\ &\cdot \exp \left[\frac{-4j\pi f}{c} (x_i \cos \varphi \cos \theta + y_i \sin \varphi \cos \theta + z_i \sin \varphi) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ 为散射中心; A_i 为第 i 个散射中心的幅度参数; f 为入射波频率; f_c 为散射中心频率; α_i 为频率依赖因子; c 为光速; L_i 为散射中心的长度参数; φ 为入射波方位角; $\bar{\varphi}_i$ 为分布型散射中心的方位角; γ_i 为衰减参量, 描述了幅度随方位角的轻微依赖特性, 通常取很小的一个值。若散射中心为局部性, 则 $L_i = 0$, 否则 $\gamma_i = 0$ 。

目标总散射场是 N 个散射中心贡献之和, 即

$$E_{\text{total}}^s(f, \varphi) = \sum_{i=1}^N E_i^s(f, \theta, \varphi, r_i) \quad (5)$$

散射中心各参数的计算流程^[25-26]如图3所示。

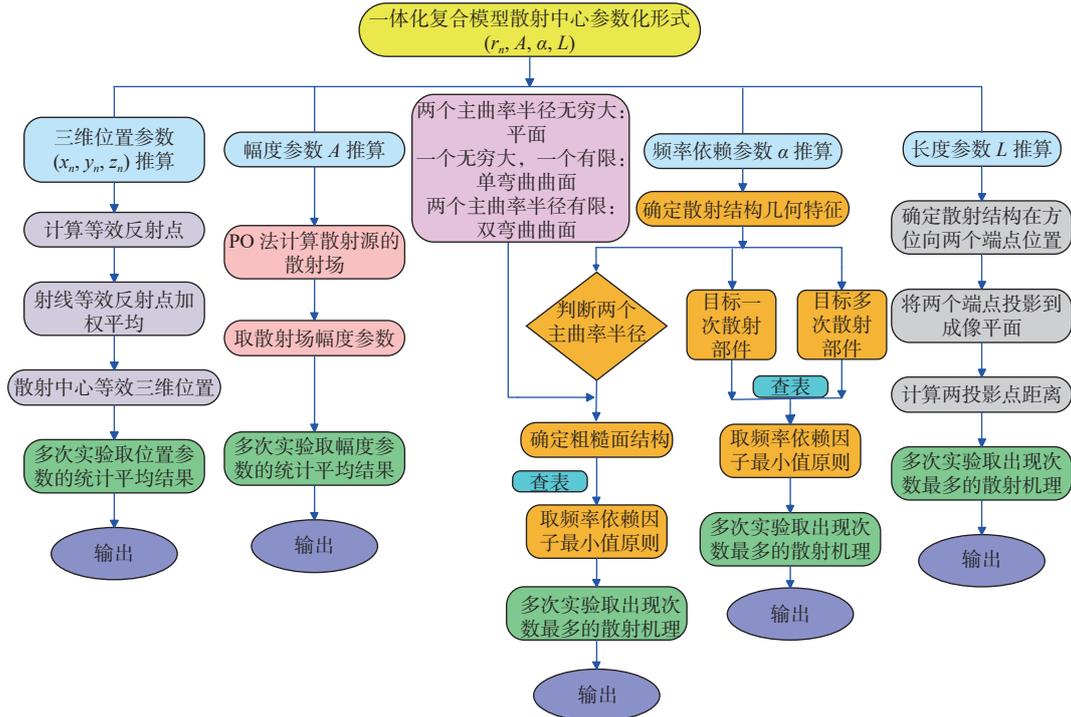


图 3 散射中心参数的计算流程图

Fig. 3 The flowchart for the calculation of scattering center parameters

2.2 目标与环境的耦合散射中心建模

在高频区, 后向散射总场的贡献来自于地面、目标及目标与地面耦合形成的散射源集合, 表达式为

$$E_{total}^s(f, \theta, \varphi, S) = \sum_{n=1}^{l+p+q} E_n^s(f, \theta, \varphi, S_n) \quad (6)$$

式中, l 、 p 、 q 分别为来源于地面、目标及目标与地面耦合形成的散射源个数。总的散射源集合为如下三个子集的并集:

$$S_{total}(f, \theta, \varphi, S_n) = S^{ground} \cup S^{target} \cup S^{coup} \quad (7)$$

为了对目标与地面的耦合散射进行精确求解, 通常采用 Johnson 提出的四路径模型^[27], 如图 4 所示。它能够有效地分析目标与环境之间的主要散射机制。

其中, 路径一代表目标部件自身的单次射线集及部件之间多次耦合射线集, 路径二表示目标-地面的二次耦合射线集, 路径三表示地面-目标的二次耦合射线集, 路径四表示地面与目标的多次耦合射线集。

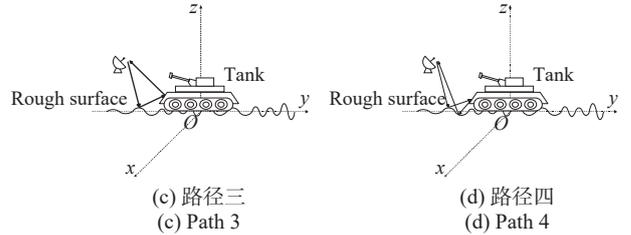
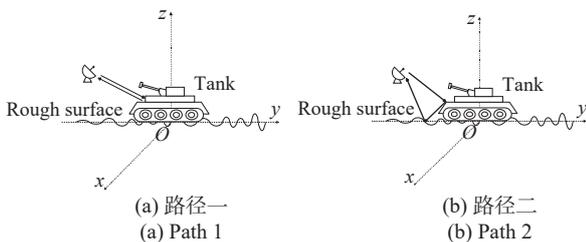


图 4 四路径模型分析地面目标一体模型的散射来源
Fig. 4 Analysis of the scattering sources for the target integrated model using the four-path model

3 算例分析

为了验证本文复杂粗糙地面上目标散射中心正向建模方法的有效性, 通过简化坦克模型以及 MSTAR(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) 数据库中的 BMP2 步兵战车进行了详细说明。首先, 采用散射中心正向建模的方法构建了简化坦克目标的参数化模型, 并基于此模型重构了 SAR 图像。将重构的 SAR 图像与暗室实验数据进行对比, 验证了该正向建模方法的有效性。然后, 将简化坦克模型置于地面背景中, 再次生成参数化模型, 并重构了目标的 RCS。通过与自由空间中简化坦克目标的 RCS 对比, 散射特性发生了显著变化, 结果表明环境因素在电磁散射中的影响不容忽视。为了进一步验证本文所提出方法的有效性, 以 MSTAR 库中的 BMP2 步兵战车为例, 构建了参数化模型, 通过该模型重构了 SAR 图像, 并将其与实测图像进行

对比,发现存在耦合散射中心缺失的问题。为了解决这一问题,引入粗糙面模型,将BMP2模型置于地面背景下,重新生成图像并与实测图像对比,结果表明耦合散射中心的数量有所增加,使得图像更接近于实测图像。然而,耦合散射中心的幅度明显高于实测图像中的散射亮点,考虑到目标一般处于非PEC的地面环境中,因此对地面进行介质涂覆后,耦合散射中心的强度有所下降,所得SAR图像与实测图像更为接近。

目前,SAR图像目标识别通常使用目标的结构特征来进行识别,用图像相似度来衡量参数化模型的精确度来表征目标结构特征。定义参数化模型重构SAR图像与实测图像的特征向量 f 、 g 的相似度为

$$\text{Cor} = \max \left\{ \frac{\sum_x \sum_y [f(x,y) - \bar{f}] [g(x - \Delta x, y - \Delta y) - \bar{g}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x,y) - \bar{f}]^2 \sum_x \sum_y [g(x - \Delta x, y - \Delta y) - \bar{g}]^2 \right\}^{1/2}} \right\} \quad (8)$$

式中: $f(x,y)$ 为重构SAR图像的像素灰度值; $g(x,y)$ 为实测图像的像素灰度值; \bar{f} 为重构SAR图像的平均灰度值; \bar{g} 为实测图像的平均灰度值; Δx 与 Δy 为实测图像的平移量。

3.1 简化坦克

简化坦克模型的所有部件均为规则的典型形体,尺寸为 $10\text{ m} \times 3.36\text{ m} \times 2.57\text{ m}$,简化坦克被分解为如图5所示的38个表面分区。

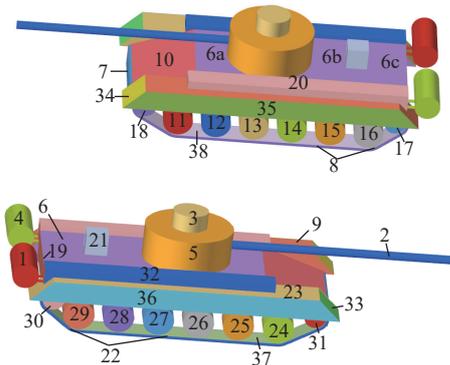


图5 简化坦克表面分区示意图

Fig. 5 Schematic of surface area division for the simplified tank

在俯仰角 $\theta=60^\circ$ 、方位角 $\varphi=90^\circ$ 、频率为9 GHz、HH极化下,采用散射中心正向参数化建模的方式构建的各散射中心的参数结果如表1所示。

根据参数化模型,重构简化坦克目标的SAR图像,并与暗室数据进行对比,如图6所示,分辨率为

$0.15\text{ m} \times 0.15\text{ m}$ 。其中,在暗室测量中,坦克模型按照1:4的尺寸进行等比例的缩比,频率按照4:1的比例放大,暗室中测量频率为 $9 \times 4 = 36\text{ GHz}$ 。筛选出8个强散射中心,散射中心1为炮管一次散射所形成,是长度最大的分布型散射中心;散射中心2为车盖上的立方体与车盖构成的二面角;散射中心3-5为右轮罩与车盖的多次散射形成;散射中心6为左轮罩与左护板构成的二面角,其散射幅值最高;散射中心7为炮台上的圆柱形成的顶帽结构;散射中心8为炮台与左轮罩形成的二面角。重构SAR图像与暗室所测量数据的位置、强度吻合,两者的图像相似度为85.74%,验证了散射中心正向参数化建模方法的有效性。

表1 简化坦克目标在 $\theta=60^\circ$ 、 $\varphi=90^\circ$ 下的散射中心参数

Tab. 1 The scattering center parameters of the simplified tank at $\theta=60^\circ$, $\varphi=90^\circ$

序号	散射来源	RCS/dBsm	α	L/m	位置坐标/m
1	2	26.93	0.5	5.00	(3.50,0.086,1.82)
2	6-21	29.38	1.0	0.48	(-2.05,0.25,1.37)
3	32-6a	16.69	1.0	0.72	(1.39,-1.00,1.37)
4	32-6b	23.39	1.0	0.79	(-1.40,-1.00,1.37)
5	32-6c	24.75	1.0	0.93	(-2.78,1.00,1.37)
6	9-20	43.09	1.0	4.98	(-0.55,1.5,1.27)
7	3-5	13.00	0.5	0	(0,0.39,2.17)
8	5-9	16.76	0.5	0	(0,1.00,1.47)

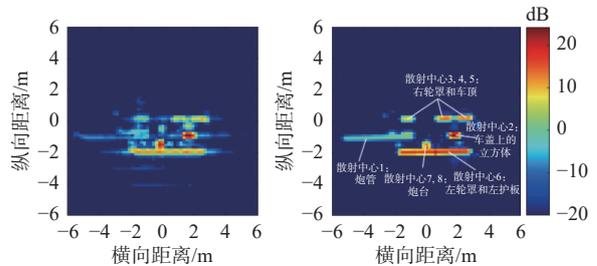


图6 简化坦克目标参数化模型重构SAR图像(左)与暗室测量图像(右)对比

Fig. 6 Comparison of the reconstructed SAR image of the simplified tank target parameterized model (left) and the measurement image (right)

而目标所处环境一般为非自由空间,将简化坦克目标置于PEC地面背景下,计算其参数化模型,并重构目标与地面的RCS。

以干燥土壤上的简化坦克目标为例,地面的尺寸为 $600\lambda \times 600\lambda$,相关长度 $L_x = L_y = 90\lambda$,均方根高度 $h=0.3\lambda$,粗糙面与简化坦克复合一体化模型分区如图7所示。

在 $\theta=30^\circ \sim 80^\circ$ 、 $\varphi=90^\circ$ 、频率为9 GHz的条件下,重构了自由空间中的简化坦克目标的RCS以及地面背景下的简化坦克目标的RCS,并将与商业软件

FEKO 结果进行对比, 如图 8 所示。结果表明, 当 θ 在 $55^\circ \sim 80^\circ$ 范围内时, 地面背景下简化坦克目标的重构 RCS 数值上相比于自由空间中简化坦克目标的 RCS 有显著的提升, 体现了粗糙面对电磁散射的影响。此外, 参数化模型重构的 RCS 与 FEKO 中的 RL-GO 法对比, 误差分别为 1.03 dB 和 2.74 dB, 进一步验证了该正向建模方法的精确度。基于 i9-13900KF、3.0 GHz、128 GB RAM 个人电脑的计算条件下, FEKO 计算单独坦克目标和 PEC 地面上目标的 RCS 分别花费了 47.27 min、264.58 min 的计算时间, 以及 2.64 GB、2.96 GB 的计算内存, 参数化重构分别需要 11.4 min、43.45 min 的计算时间和 0.83 GB、0.97 GB 的计算内存, 均优于 FEKO 的性能, 体现了本文提出的散射中心正向建模方法的高效性。

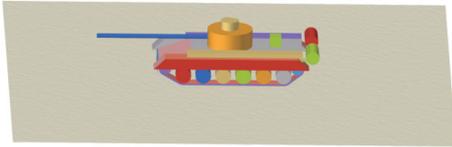


图 7 粗糙面与简化坦克复合一体化模型图

Fig. 7 Schematic of rough surface and simplified tank composite integrated model

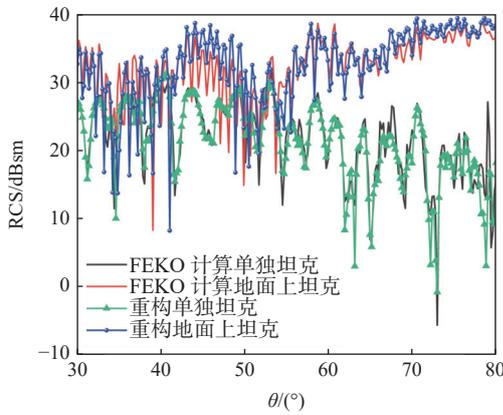


图 8 自由空间中坦克与地面背景下坦克 RCS 对比

Fig. 8 Comparison of the RCS for the tank alone in free space and tank on the rough surface

3.2 BMP2 步兵战车

以 MSTAR 库中的 BMP2 为例, 该模型几何尺寸为 $6.72 \text{ m} \times 3.10 \text{ m} \times 2.48 \text{ m}$, 首先对 BMP2 进行分区处理, 如图 9 所示, BMP2 被分解为 62 个表面分区。

在 $\theta=73^\circ$ 、 $\varphi=93^\circ$ 、频率为 9 GHz、HH 极化下, 采用散射中心正向参数化建模的方式构建的各散射中心的参数结果如表 2 所示。

表 2 中给出了前十个强散射中心, 其中, 散射中心 1、10 为炮台分别与潜望镜和炮台零件形成的二面角; 散射中心 2 为炮塔与周边零件之间形成的二面角; 散射中心 3、6 为车身与驾驶员舱盖的遮挡物

和炮塔红外探照灯形成的二面角; 散射中心 4 为车身单次散射所形成; 散射中心 5 为车前盖与炮管形成的二面角; 散射中心 7、9 为右侧履带上挡板分别与两个车轮形成的二面角; 散射中心 10 为炮塔底部与指挥舱舱盖形成的二面角。

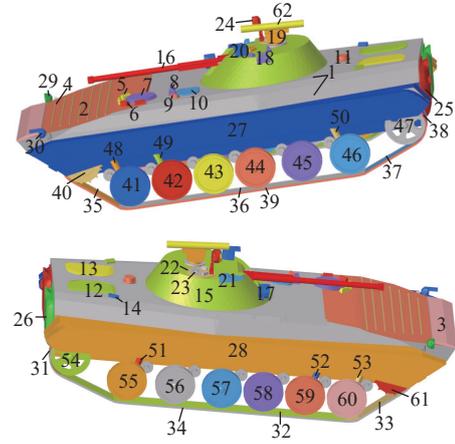


图 9 BMP2 表面分区示意图

Fig. 9 Schematic of surface area division for BMP2

表 2 BMP2 在 $\theta=73^\circ$ 、 $\varphi=93^\circ$ 下的散射中心参数

Tab. 2 Scattering center parameter of BMP2 at $\theta=73^\circ$ 、 $\varphi=93^\circ$

序号	散射来源	RCS/dBsm	α	L/m	位置坐标/m
1	15-20	9.37	1	0	(0.39, -0.28, 2.06)
2	19-23	3.42	1	0	(0.97, 0.07, 2.08)
3	1-8	-0.32	1	0	(-0.74, -0.54, 1.64)
4	1	-1.43	0	0	(-0.07, 1.22, 1.42)
5	2-16	-2.07	1	0.82	(-1.55, 0.071, 1.62)
6	1-17	-2.40	1	0	(-0.13, 0.60, 1.65)
7	28-57	-2.44	1	0	(0.34, 1.00, 0.65)
8	19-22	-2.56	1	0	(1.02, 0.071, 2.07)
9	28-58	-3.36	1	0	(-0.33, 1.00, 0.65)
10	21-15	-3.78	1	0	(0.40, 0.43, 2.01)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

将 BMP2 单独目标的散射中心参数化建模重构图像与 MSTAR 库中 BMP2 的最邻近方位角的实测图像进行对比, 如图 10 所示, 其中图像分辨率为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 。

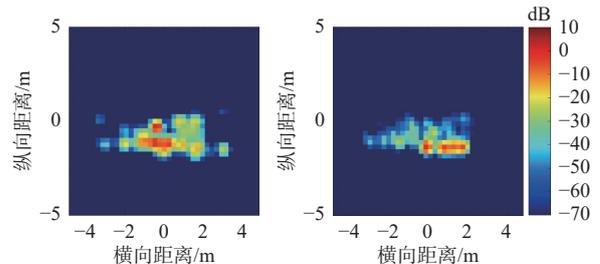


图 10 BMP2 单独目标重构图像 (左) 与 MSTAR 库实测图像 (右) 对比

Fig. 10 Comparison between the BMP2 reconstructed image (left) and the measured image from the MSTAR database (right)

本文中 BMP2 的几何模型与实际步兵战车存在少许结构上的差异, 两者的图像相似度为 74.65%, 因此, 目标 CAD 模型的不准确性仍然是限制散射中心模型重构目标特性与目标实测数据达成一致性的主要因素。从图 10 可以看出, 实测图像中幅度较大的散射中心主要分布在靠近雷达一侧, 而重构图像中幅度较大的散射中心来源主要是由炮塔和炮台与其他部件所构成的二面角, 靠近雷达一侧的散射中心的幅度相比之下较低。考虑到实测图像数据中的目标是处于复杂环境当中, 目标和粗糙地面之间的耦合散射的贡献也被计入其中, 因此在计算时, 将 BMP2 目标置于粗糙背景中。BMP2 与 PEC 地面复合一体化模型的地面尺寸为 $600\lambda \times 600\lambda$, 相关长度 $L_x = L_y = 90\lambda$, 均方根高度 $h=0.3\lambda$, 如图 11 所示。

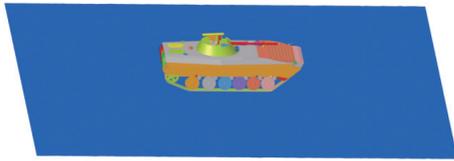


图 11 BMP2 与 PEC 地面复合一体化模型

Fig. 11 The schematic of perfect electric conductor(PEC) rough surface and BMP2 composite integrated model

在 $\theta=73^\circ$ 、 $\varphi=93^\circ$ 、频率为 9.6 GHz、HH 极化下, 采用散射中心正向参数化建模方式构建各散射中心的参数结果如表 3 所示。其中, 散射来源 63 为粗糙面。

表 3 BMP2 与 PEC 地面复合一体化模型在 $\theta=73^\circ$ 、 $\varphi=93^\circ$ 下的耦合散射中心参数

Tab. 3 The parameters of coupled scattering center for the BMP2 and a PEC surface at $\theta=73^\circ$, $\varphi=93^\circ$

序号	散射来源	RCS/dBsm	α	L/m	位置坐标/m
1	59-63	35.37	1	0	(-0.95,1.26,0.006)
2	58-63	32.42	1	0	(-0.27,1.29,-0.019)
3	55-63	27.63	1	0	(1.97,1.27,-0.027)
4	57-63	25.16	1	0	(0.40,1.27,-0.018)
5	34-63	23.40	1	0	(0.54,1.36,-0.004)
6	54-63	17.63	1	0	(2.94,1.28,0.005 6)
7	56-63	14.44	1	0	(1.15,1.27,-0.023)
8	62-63	12.65	1	0.95	(1.00,0.067,-0.055)
9	60-63	11.20	1	0	(-1.63,1.26,-0.003)
10	28-63	10.54	1	0	(0.30,1.51,-0.027)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

在考虑了目标与粗糙面的复合散射贡献后, 散射中心参数化建模重构图像与实测图像的相似度提升到了 80.8%, 从图 12 可以看出, 将目标置于粗糙面中后, 强散射中心主要由目标与粗糙面的多次散射形成。

在加入地面后, 由地面与右侧车轮耦合形成的散射中心幅值远高于其他散射中心, 与实测图像相

比, 参数化建模重构图像中的耦合散射中心的散射幅值强于右图实测中的散射点的幅值, 在计算中我们使用的地面的材质是 PEC, 而在实际测试数据中, 目标一般处于非 PEC 的粗糙地面上, 而介质地面与目标的耦合散射要弱于 PEC 地面与目标的耦合散射, 因此将目标所处的地面进行介质材料的涂覆。本文采用的是沙土的电磁参数来对粗糙面的表面进行涂覆, 电磁参数为 $2.5-j0.25$ 。对粗糙面涂覆后, 计算目标与地面一体化复合模型参数化模型。表 4 中为计算后筛选所得到的前十个强散射中心的参数结果。

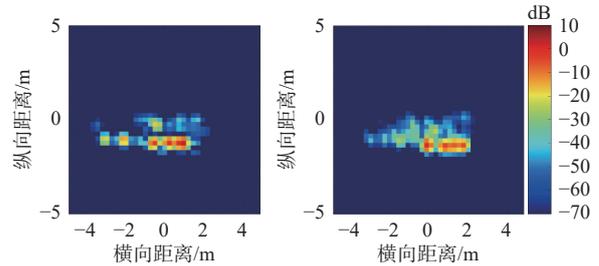


图 12 PEC 地面上 BMP2 目标重构图像(左)与 MSTAR 库实测图像(右)对比

Fig. 12 Comparison of the reconstructed image for the BMP2 target on the PEC ground (left) and the measured image from the MSTAR database (right)

表 4 BMP2 与介质地面复合一体化模型在 $\theta=73^\circ$ 、 $\varphi=93^\circ$ 下的耦合散射中心参数

Tab. 4 The parameters of coupled scattering center for the BMP2 and a PEC surface at $\theta=73^\circ$, $\varphi=93^\circ$

序号	散射来源	RCS/dBsm	α	L/m	位置坐标/m
1	59-63	19.78	1	0	(-0.95,1.26,0.006)
2	58-63	18.26	1	0	(-0.27,1.29,-0.019)
3	55-63	15.62	1	0	(1.97,1.27,-0.027)
4	57-63	13.10	1	0	(0.40,1.27,-0.018)
5	34-63	11.64	1	0	(0.54,1.36,-0.004)
6	54-63	11.60	1	0	(2.94,1.28,0.005 6)
7	15-20	9.48	1	0	(0.39,-0.28,2.06)
8	56-63	8.31	1	0	(1.15,1.27,-0.023)
9	62-63	6.73	1	0.95	(1.00,0.067,-0.055)
10	60-63	6.61	1	0	(-1.63,1.26,-0.003)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

将表 4 中的地面与目标的耦合散射中心的幅值与表 3 对比, 将地面采用实际的电磁参数进行表征, 耦合散射中心的幅值均明显降低。重构图像与实测图像的对比如图 13 所示, 图像相似度为 83.01%, 高于 PEC 地面上 BMP2 目标的相似度, 也进一步说明了在计算目标的散射特性时, 不仅要考虑到目标并非处于自由空间中, 也要考虑目标所处地面背景的材质并非 PEC。

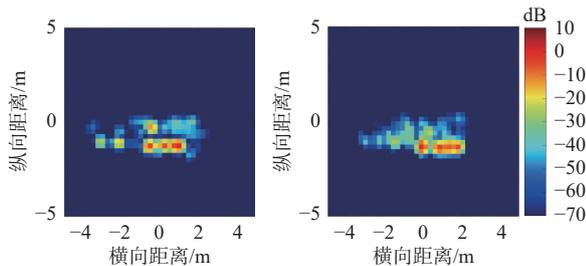


图 13 介质地面上 BMP2 目标重构图像 (左) 与 MSTAR 库实测图像 (右) 对比

Fig. 13 Comparison of the reconstructed image for the BMP2 target on the medium ground (left) and the measured image from the MSTAR database (right)

4 结 论

本文从复杂目标的 CAD 几何模型出发, 结合 RT 技术, 实现了复杂粗糙介质地面上的目标部件级散射中心正向参数化建模, 解决了介质粗糙面上目标与环境耦合电磁散射的问题。首先, 建立了简化坦克的参数化模型, 将参数化模型重构的 SAR 图像数据与可靠的暗室测量数据对比, 两者相似度为 85.74%, 验证了参数化模型的精确度。其次, 建立了 MSTAR 库中的 BMP2 步兵战车与地面的复合参数化模型, 计入了地面与目标耦合散射中心的贡献, 使得参数化模型的重构 SAR 图像的相似度提升到 80.8%。然而, 地面与目标的耦合散射中心的幅值与实测数据仍然存在差异, 因此, 我们考虑实际的环境因素, 并对地面进行介质材料的表征, 使得重构图像与实测数据 SAR 成像的相似度进一步提升至 83.01%, 由此验证了本文所提出方法的有效性, 证明了在目标识别中需要考虑地面与目标的复合散射以及地面的电磁特性的影响。

在实际的地面环境中, 通常存在一些其他环境因素, 例如沟壑、土丘等。这些环境因素与随机粗糙地面的电磁散射共同构成了整体环境的电磁散射特性, 对于这些复杂的环境因素还需要进一步研究。

参考文献

[1] 刘国钧, 陈绍业, 王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京: 高等教育出版社, 1957: 15.

[2] TEIXEIRA F L. Time-domain finite-difference and finite-element methods for Maxwell equations in complex media[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2008, 56(8): 2150-2166.

[3] ZHU X, LIU J, CUI Y, et al. A scalable parallel algorithm for 3-D magnetotelluric finite element modeling in anisotropic media[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2021, 60: 5904414.

[4] SINGH G, TAN E L, CHEN Z N. A split-step FDTD method for 3-D Maxwell's equations in general anisotropic media[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2010, 58(11): 3647-3657.

[5] ZHANG Y, FENG N, WANG L, et al. An FDTD method for fully anisotropic periodic structures impinged by obliquely incident plane waves[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 68(1): 366-376.

[6] WANG J, LI J, CHEN Y, et al. Simulation of 3-D electromagnetic scattering and inverse scattering by arbitrary anisotropic dielectric objects embedded in layered arbitrary anisotropic media[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(8): 6473-6478.

[7] MONZON J C. On a surface integral representation for homogeneous anisotropic regions: two-dimensional case[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 1988, 36(10): 1401-1406.

[8] ZHANG H W, HUANG X W, SHENG X Q. Surface integral equation solutions for electromagnetic scattering from a special class of anisotropic media[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2022, 70(9): 8204-8215.

[9] YAO J J, HE S Y, ZHANG Y H, et al. Evaluation of scattering from electrically large and complex PEC target coated with uniaxial electric anisotropic medium layer based on asymptotic solution in spectral domain[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2014, 62(4): 2175-2186.

[10] KNOTT E. The relationship between Mitzner's ILDC and Michaeli's equivalent currents[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 1985, 33(1): 112-114.

[11] WEINMANN F. Ray tracing with PO/PTD for RCS modeling of large complex objects[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2006, 54(6): 1797-1806.

[12] 何洋. 复杂目标精细化高频电磁建模方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.

HE Y. Refinement research on algorithms and applications of high-frequency electromagnetic scattering from complex targets[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)

[13] 何思远. 目标与粗糙面复合电磁散射特性的 MM-PO-UV 混合算法建模[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.

HE S Y. Simulation of electromagnetic scattering characteristics from composite model of target and rough surface using MM-PO-UV hybrid method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese)

[14] 余定峰. 复杂目标电磁散射算法与特性仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.

YU D F. Research on algorithms and characteristics simulation of electromagnetic scattering from complex target[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)

- [15] LIU J, HE S Y, ZHANG L, et al. An automatic and forward method to establish 3-D parametric scattering center models of complex targets for target recognition[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2020, 58(12): 8701-8716.
- [16] HE Y, HE S Y, ZHANG Y H, et al. A forward approach to establish parametric scattering center models for known complex radar targets applied to SAR ATR[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2014, 62(12): 6192-6205.
- [17] LI Q F, GUO K Y, SHENG X Q, et al. High precise scattering centers models for cone-shaped targets based on induced currents[J]. *International journal of antennas and propagation*, 2017, 2017(1): 7482895.
- [18] 闫华, 张磊, 陆金文, 等. 任意多次散射机理的 GTD 散射中心模型频率依赖因子表达[J]. *雷达学报*, 2021, 10(3): 370-381.
- [19] 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)
- [20] 闫华, 陈勇, 李胜, 等. 基于弹跳射线法的海面舰船目标三维散射中心快速建模方法[J]. *雷达学报*, 2019, 8(1): 111-120.
- [21] 郭立新, 王蕊, 吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] HUANG K, HE S Y, ZHANG Y H, et al. Composite scattering analysis of the ship on a rough surface based on the forward parametric scattering center modeling method[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2019, 18(12): 2493-2497.
- [23] WANG S, LI M, ZHANG J, et al. 3-D attributed scattering center model of dynamic group targets by forward parametric modeling method[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2024, 62: 5106216.
- [24] DING B, WEN G. Target reconstruction based on 3-D scattering center model for robust SAR ATR[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2018, 56(7): 3772-3785.
- [25] 查威, 张磊, 何思远, 等. 复杂目标散射中心正向建模数据分析[J]. *微波学报*, 2018, 34(2): 20-24.
- [26] 黄凯. 海上目标散射中心高效正向建模研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- HUANG K. Research on efficient forward modeling of maritime target scattering center [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020. (in Chinese)
- [27] JOHNSON J T. A study of the four-path model for scattering from an object above a half space[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2001, 3(2): 130-134.

作者简介



田正秋 (1998—), 女, 江苏人, 武汉大学电子信息学院在读硕士研究生, 研究方向为目标电磁散射特性计算及建模等。E-mail: zhengqiutian@whu.edu.cn



何思远 (1982—), 女, 浙江人, 武汉大学电子信息学院教授, 研究领域为目标电磁散射特性、计算电磁学、雷达成像等。E-mail: siyuanhe@whu.edu.cn



蔡志灏 (1994—), 男, 江西人, 武汉大学电子信息学院在读博士生, 研究领域为各向异性介质电磁散射特性、复杂目标电磁散射特性、计算电磁学等。E-mail: zhihaocai@whu.edu.cn



王筱祎 (1994—), 女, 湖北人, 武汉大学电子信息学院在读硕士研究生, 研究领域为复杂目标近场电磁散射特性、计算电磁学等。E-mail: wangxiaoyi0826@whu.edu.cn