

不同土壤类型的粗糙地面与其下方埋藏 目标复合电磁散射研究*

王 蕊[†] 郭立新 王安琪

(西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

(2009 年 7 月 12 日收到; 2009 年 8 月 7 日收到修改稿)

利用 MOM 研究了不同土壤类型的一维有耗介质粗糙地面与其下方二维埋藏目标的复合电磁散射问题, 在数值计算中, 引入了锥形入射波以减少粗糙面模拟中由于人为截断所引起的计算误差. 当给定入射波频率、土壤成分及土壤温度和土壤湿度后, 可以根据相关模型计算出土壤的相对介电常数. 数值结果以二维无限长导体圆柱为例, 利用 Monte Carlo 方法统计计算了双站复合散射截面随土壤类型、土壤湿度、入射波频率及均方根高度等的变化情况, 并做了详细分析及讨论. 该研究结果对于探地雷达在民用、军事、工业等多领域的应用具有一定的理论指导价值.

关键词: 粗糙地面, 土壤类型, 相对介电常数, 四成分模型

PACC: 4110H, 4120

1. 引 言

鉴于目标与实际粗糙地、海背景的复合电磁散射研究在雷达探测、海洋遥感和目标隐身技术中的重要指导意义, 相关问题的研究已引起了国内外学者的广泛关注. 当随机粗糙面上方或下方有目标存在时, 电磁散射包含了随机粗糙面与这些特定目标之间复杂的电磁相互作用, 这种相互作用在粗糙面及目标上产生了额外的感应电流, 从而在雷达检测、目标识别的过程中出现虚警或漏警情况, 同时也给目标的制导与跟踪带来很大的困难. 因此, 开展粗糙背景及其与目标复合电磁散射特性的研究, 通过建模建库和特征提取, 建立多干扰环境下目标的复合散射模型, 为目标回波特性的数据采集、特征提取、控制和识别、精确制导、仿真以及隐身与反隐身技术的深入研究提供必要的理论依据和实用模型. 目前, 大部分研究工作均基于海洋背景^[1-4]进行, 比如海面上方的低飞目标及海洋下面的潜游目标等等, 对于地面背景的相关研究并不多见, 事实上, 有关地面及其上方或下方目标的复合电磁散射研究同样具有不可低估的价值, 近年来, 随着探地

雷达在如地下管线的勘探、地下矿藏分布、混凝土结构中的孔洞、裂缝等缺陷损伤检测、考古学等一系列民用、工业、军事等领域的广泛应用, 研究不同土壤类型的地面与其埋地目标的复合电磁散射对其实际应用有着一定的指导意义. 在过去的粗糙面与目标复合电磁散射的研究中, 许多情况下, 分界面通常按平面^[5,6]边界来处理. 但与其相比, 粗糙面能够显著地影响目标的电磁散射特性. 一些近似解析方法仅能够解决微粗糙度粗糙面对目标的电磁散射特性的影响问题, 其他更多的问题则需要运用数值方法去研究. 数值方法之所以有意义, 这是因为它能够避开近似解析方法的局限性, 在近似解析方法失效时而得到一些重要的散射效应. 国内外学者对随机粗糙背景与其下方目标的复合电磁散射问题已经有少量的研究, 有学者用离散的电磁场方法^[7]研究粗糙面与其下方目标的复合散射问题, 有用 GFBM/SAA 方法^[8]研究部分埋藏目标的复合电磁散射问题, 还有一些学者^[9-13]也研究了这一问题, 但就不同土壤类型的指数谱地面与其下方埋藏目标的复合电磁散射, 国内外相关文献鲜有报道. 本文利用矩量法在一种四成分土壤模型的基础上, 对不同土壤类型的随机地面与其下方埋藏目标的

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 72105486), 国家自然科学基金 (批准号: 60971067), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070701010) 资助的课题.

[†] E-mail: doufuruier@xidian.edu.cn

复合电磁散射进行了计算与研究. 数值结果以二维导体圆柱为例, 计算了土壤类型、土壤湿度、入射波频率及均方根高度等因素对复合散射系数的影响.

2. 基本理论

2.1. 散射模型

这里应用 Monte Carlo (线性滤波法) 模拟生成

$$F(K_i) = \sqrt{2\pi LW(K_i)} \begin{cases} [N(0,1) + jN(0,1)] / \sqrt{2}, & i \neq 0, P/2, \\ N(0,1), & i = 0, P/2, \end{cases} \quad (2)$$

对于 $i < 0$, $F(K_i) = F(K_{-i})^*$, 其中 $K_i = 2\pi i/L$, $F(k_{-i})^*$ 表示取 $F(k_{-i})$ 的共轭, $k_i = 2\pi i/L$. 这里取指数谱做为地面轮廓谱, 可表示为

$$W(K_i) = \sqrt{2\pi} \delta^2 l^2 (1 + K_i^2 l^2)^{3/2}, \quad (3)$$

其中 δ 和 l 分别表示粗糙地面的均方根高度与相关长度. 在具体计算(1)式时通常是利用快速 Fourier 变换(FFT)来实现的.

图 1 给出了一维有耗介质粗糙地面与其下方埋藏目标的复合电磁散射示意图. 粗糙表面轮廓记为 S_r , 目标表面轮廓记为 S_0 , H 表示目标的埋藏深度(目标中心与粗糙面中心之间的距离).

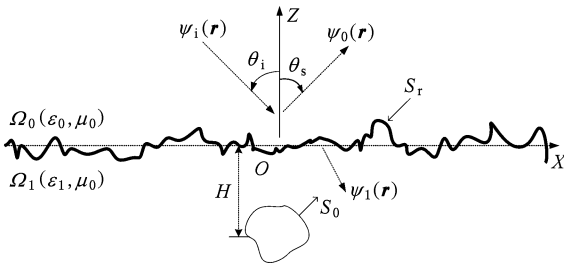


图 1 一维粗糙地面与下方目标复合电磁散射示意图

考虑波 $\psi_i(\mathbf{r})$ 入射到一维粗糙面上, $\psi_0(\mathbf{r})$ 表示粗糙面 S_r 上表面任意点的总场, $\psi_1(\mathbf{r})$ 表示粗糙面 S_r 下表面和目标表面任意点的总场, 它们分别满足以下边界方程:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \psi_0(\mathbf{r}) - \int_{S_r} \left[\psi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} \right. \\ & \left. - G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \psi_0(\mathbf{r}')}{\partial n'} \right] ds' \\ & = \psi_i(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in S_r, \end{aligned} \quad (4a)$$

随机粗糙地面轮廓. 假设要产生的一维地面的长度为 L , 等间隔离散点数为 $P + 1$, 相邻两点间的距离为 Δx , $L = P\Delta x$, 则每一点 $x_p = p\Delta x$ ($p = 1, \dots, P$) 处的高度为^[14,15]

$$f(x_p) = \frac{1}{L} \sum_{i=-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}-1} F(K_i) \exp(jK_i x_p), \quad (1)$$

$f(x_p)$ 即为所构造的地表轮廓. 式中, 对 $i \geq 0$,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \psi_1(\mathbf{r}) + \int_{S_r} \left[\psi_1(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} \right. \\ & \left. - G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \psi_1(\mathbf{r}')}{\partial n'} \right] ds' \\ & + \int_{S_0} \psi_1(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds' = 0, \quad \mathbf{r} \in S_r, \end{aligned} \quad (4b)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \psi_1(\mathbf{r}) + \int_{S_r} \left[\psi_1(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} \right. \\ & \left. - G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \psi_1(\mathbf{r}')}{\partial n'} \right] ds' \\ & + \int_{S_0} \psi_1(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds' = 0, \quad \mathbf{r} \in S_0, \end{aligned} \quad (4c)$$

其中

$$G_{0,1}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{i}{4} \mathbf{H}_0^{(1)}(k_{0,1} |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|),$$

$$\frac{\partial G_{0,1}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} = \frac{ik_{0,1}}{4} \hat{\mathbf{n}} \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} H_1^{(1)}(k_{0,1} |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|).$$

对于粗糙面 S_r 上的任意点 \mathbf{r} , $\psi_0(\mathbf{r})$ 和 $\psi_1(\mathbf{r})$ 满足边界条件^[16]

$$\psi_0(\mathbf{r}) = \psi_1(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in S_r, \quad (5a)$$

$$\frac{\partial \psi_0(\mathbf{r})}{\partial n} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_1(\mathbf{r})}{\partial n}, \quad \mathbf{r} \in S_r. \quad (5b)$$

(4a) — (4c) 式可以重新写成如下形式:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \psi_0(\mathbf{r}) - \int_{S_r} \psi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds' \\ & + \int_{S_r} G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \psi_0(\mathbf{r}')}{\partial n'} ds' = \psi_i(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in S_r, \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\frac{1}{2} \psi_0(\mathbf{r}) + \int_{S_r} \psi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds'$$

$$- \rho \int_{S_r} G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \psi_0(\mathbf{r}')}{\partial n'} ds' + \int_{S_0} \psi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds' = 0, \quad \mathbf{r} \in S_r, \quad (6b)$$

$$\int_{S_r} \psi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds' - \rho \int_{S_r} G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \psi_0(\mathbf{r}')}{\partial n'} ds' + \frac{1}{2} \psi_0(\mathbf{r}) + \int_{S_0} \psi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} ds' = 0, \quad \mathbf{r} \in S_0. \quad (6c)$$

将粗糙面 S_r 沿 \hat{x} 方向离散, 将目标沿其表面轮廓 S_0 离散, 利用矩量法可以将(6)式的积分方程离散化为下面的矩阵方程:

$$A_{mn} = \begin{cases} -\gamma_n \Delta x \frac{ik_0}{4} (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{R}_{mn}) H_1^{(1)}(k_0 |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|), & m \neq n, \\ \frac{1}{2} - \frac{f''(x_m) \Delta x}{4\pi\gamma_m^2}, & m = n, \end{cases} \quad (9a)$$

$$B_{mn} = \begin{cases} \gamma_n \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|), & m \neq n, \\ \gamma_m \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}[k_0 \Delta x \gamma_m / (2e)], & m = n, \end{cases} \quad (9b)$$

$$C_{mn} = \begin{cases} \gamma_n \Delta x \frac{ik_1}{4} (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{R}_{mn}) H_1^{(1)}(k_1 |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|), & m \neq n, \\ \frac{1}{2} + \frac{f''(x_m) \Delta x}{4\pi\gamma_m^2}, & m = n, \end{cases} \quad (9c)$$

$$D_{mn} = \begin{cases} \gamma_n \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|), & m \neq n, \\ \gamma_m \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}[k_1 \Delta x \gamma_m / (2e)], & m = n. \end{cases} \quad (9d)$$

从以上四式可以看出 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 四个矩阵块仅与粗糙面的信息有关而与目标无关, 假设粗糙面的采样点数为 N_1 , 则 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 四个矩阵块大小均为 $N_1 \times N_1$.

$$E_{mp} = \Delta o \frac{ik_1}{4} (\hat{\mathbf{n}}_o \cdot \mathbf{R}_{mp}) H_1^{(1)}(k_1 |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_{op}|), \quad (9e)$$

$$F_{qn} = \gamma_n \Delta x \frac{ik_1}{4} (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{R}_{qn}) H_1^{(1)}(k_1 |\mathbf{r}_{oq} - \mathbf{r}_n|), \quad (9f)$$

$$G_{qn} = -\gamma_n \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 |\mathbf{r}_{oq} - \mathbf{r}_n|), \quad (9g)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & -\rho\mathbf{D} & \mathbf{E} \\ \mathbf{F} & -\rho\mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_1 \\ \bar{\mathbf{V}}_2 \\ \bar{\mathbf{V}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{\psi}}_i \\ \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{0}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

解向量分别为

$$V_1(x) = \psi_0(\mathbf{r})|_{r \in S_r}, \quad (8a)$$

$$V_2(x) = \frac{\partial \psi_0(\mathbf{r})}{\partial n} \Big|_{r \in S_r}, \quad (8b)$$

$$V_3(x) = \psi_1(\mathbf{r})|_{r \in S_0}. \quad (8c)$$

矩阵总共由 9 个大小不一的矩阵块组成, 其中, 前四个矩阵块元素分别可以表示为

$$H_{qp} = \begin{cases} \Delta o \frac{ik_1}{4} (\hat{\mathbf{n}}_o \cdot \mathbf{R}_{qp}) H_1^{(1)}(k_1 |\mathbf{r}_{oq} - \mathbf{r}_{op}|), & q \neq p, \\ \frac{1}{2} + \frac{Z''_0(x_{op}) \Delta x}{4\pi\gamma_{op}^2}, & q = p. \end{cases} \quad (9h)$$

上面 $H_1^{(1)}$ 是第一类一阶汉克函数. $\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G}$ 代表粗糙面和目标的耦合作用的矩阵块, \mathbf{E} 矩阵块大小为 $N_1 \times N_2$, \mathbf{F} 矩阵块为 $N_2 \times N_1$, \mathbf{G} 矩阵块为 $N_2 \times N_1$. 而 \mathbf{H} 矩阵块仅仅由目标信息决定, 其大小为 $N_2 \times N_2$.

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{-f'(x_n)\hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{z}}}{\sqrt{1 + [f'(x_n)]^2}},$$

$$\mathbf{R}_{ij} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}, \quad i = m, q; j = n, p, \quad (10a)$$

$$\gamma_n = \sqrt{1 + [f'(x_n)]^2},$$

$$\gamma_m = \sqrt{1 + [f'(x_m)]^2}, \quad (10b)$$

$$\gamma_{op} = \sqrt{1 + [Z'_{01}(x_{op})]^2},$$

$$\gamma_{oq} = \sqrt{1 + [Z'_{01}(x_{oq})]^2}, \quad (10c)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_0 = \frac{-Z'_0(x_{op})\hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{z}}}{\sqrt{1 + [Z'_0(x_{op})]^2}}, \quad (10d)$$

其中, $f''(x)$ 是粗糙面 S_r 高度起伏函数 $f(x)$ 的二阶导数. r_m, r_n 是粗糙面 S_r 上任意两点, $r_{oq}, r_{op} \in S_0$. 这里 $Z_0(x)$ 表示目标的轮廓, Z'_0 和 Z''_0 分别为 Z_0 的一阶和二阶导数.

为了避免人为的边缘衍射, 利用 Thorsos 锥形波^[14,17]代替一般的平面波入射

$$\psi_i(\mathbf{r}) = \exp[jk(x\sin\theta_i - z\cos\theta_i)(1 + w(\mathbf{r}))]$$

$$\times \exp\left[-\left(\frac{x + z\tan\theta_i}{g}\right)^2\right], \quad (11)$$

$$w(\mathbf{r}) = \left[2\left(\frac{x + z\tan\theta_i}{g}\right)^2 - 1\right]/(kg\cos\theta_i)^2. \quad (12)$$

这里 g 是波束宽度, 它决定了锥形波的照射区域和纳入数值计算的粗糙面长度, 对数值计算结果的精度和计算效率有最直接的影响. 图 2 给出了 $\theta_i = -30^\circ$ 时的锥形入射波能量分布示意图, 可以看出锥形波从粗糙面中心到边缘, 激励场从有到无缓慢变化至 0, 当 $w(\mathbf{r}) = 0$ 时, 即为 Gauss 波束; Thorsos 锥形波多了一项对波传播相位函数的修正因子.

利用共轭梯度法解矩阵方程 (7) 就可以求得

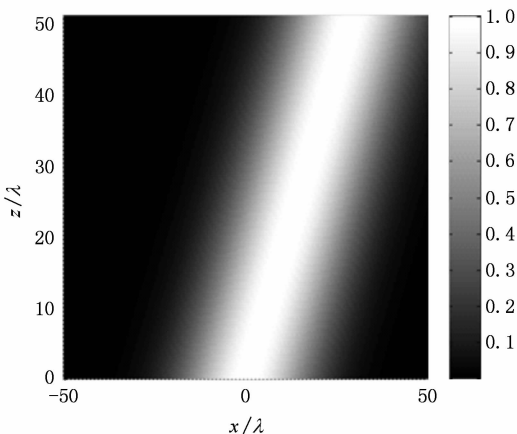


图 2 锥形入射波的能量分布

$\bar{\mathbf{V}}_1$ 和 $\bar{\mathbf{V}}_2$, 则上半空间的散射场的表达式为

$$\psi_s(\mathbf{r}) = \frac{e^{ik_0 r}}{r} \psi_s^N(\theta_s, \theta_i), \quad (13)$$

其中

$$\psi_s^N(\theta_s, \theta_i) = \frac{i}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0}} e^{-i\pi/4} \left\{ \int_{S_r} [-i(\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{k}_s) V_1(x) - V_2(x)] \exp(-i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}) \right.$$

$$\times \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx, \quad (14)$$

这里 $\mathbf{k}_s = k_0(\sin\theta_s\hat{\mathbf{x}} + \cos\theta_s\hat{\mathbf{z}})$, θ_s 是散射角. 将 (14) 式代入下式即可得到归一化的散射系数^[18]:

$$\sigma(\theta_s) = \frac{|\psi_s^N(\theta_s, \theta_i)|^2}{g \sqrt{\frac{\pi}{2} \cos\theta_i} \left(1 - \frac{1 + 2\tan^2\theta_i}{2k_0^2 g^2 \cos^2\theta_i}\right)}. \quad (15)$$

2.2. 土壤类型分析

一般来说在微波段土壤的相对介电常数对雷达回波的影响是很大的, 相对介电常数越大, 反射雷达波束的作用越强, 透射作用越小, 而且土壤的相对介电常数和土壤湿度有很大的关系. 就土壤电磁特性而言, 土壤是由空气、固态土壤、束缚水和自由水四种物质组成的介电混合物. 由于作用于束缚水的吸附力非常强, 束缚水分子与入射电磁波相互作用的方式与自由水分子有很大的不同, 使束缚水和自由水的介电特性各异. 束缚水、自由水的相对介电常数都是入射电磁波的频率、物理温度、盐度的函数. 一般来说, 土壤的相对介电常数主要受到以下几个方面的影响^[19] (见表 1).

土壤的相对介电常数用以下形式表示:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (16)$$

上式中, ε' 为相对介电常数的实部, 其含义为在两种不同介质表面发生的波的折射和反射现象, 与介质的介电特性有关; ε'' 为相对介电常数的虚部, 与入射电磁波在介质中的衰减 (吸收和转化) 有关.

Wang 和 Schmutge 建立了一种四成分模型^[19], 设干的土壤中沙土含量 (S) 和黏土含量 (C), 其中 $S + C \leq 100\%$, 定义土壤的湿度压缩点为

$$W_p = 0.06774 - 0.00064 \times S + 0.00478 \times C, \quad (17)$$

则临界体湿度的经验公式为

$$m_i = 0.49W_p + 0.165. \quad (18)$$

定义参数 $\beta = -0.57W_p + 0.481$. 一般情况下, 土壤中岩石的密度 $\rho_r = 2.6 \text{ g/cm}^3$, 设干土壤的密度为 ρ_b , 则土壤的积孔率为

表 1 土壤相对介电常数影响因素

影响因素	入射频率	均方根高度	相关长度	土壤湿度	土壤表面温度	土壤沙含量	土壤粘土含量
符号表示	f/GHz	δ/m	l/m	$m_v/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$T/^\circ\text{C}$	$S/\%$	$C/\%$

$$p = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}, \quad (19)$$

ρ_b 由下面公式确定:

$$\rho_b = 3.455/R^{0.3018}, \quad (20)$$

$$R = 25.1 - 0.21 \times S + 0.22 \times C. \quad (21)$$

上面的参数确定后,可以根据土壤湿度来计算其等效相对介电常数.当 $m_v \leq m_t$ 时,

$$\varepsilon = m_v \varepsilon_x + (p - m_v) \varepsilon_a + (1 - p) \varepsilon_r, \quad (22)$$

其中 $\varepsilon_x = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \frac{m_v}{m_t} \beta$. 当 $m_v > m_t$ 时,

$$\varepsilon = m_t \varepsilon_x + (m_v - m_t) \varepsilon_w + (p - m_v) \varepsilon_a + (1 - p) \varepsilon_r, \quad (23)$$

其中 $\varepsilon_x = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \beta$. 式中的 $\varepsilon_i = (3.2, 0.1)$ 是冰的相对介电常数; $\varepsilon_r = (5.0, 0.1)$ 为岩石的相对介电常数; $\varepsilon_a = 1.0$ 是空气的相对介电常数. 而 ε_w 是纯水的相对介电常数,它可由 Debye 公式计算,即

$$\varepsilon_w = 4.9 + \frac{\varepsilon_{w0} - 4.9}{1 + i2\pi f \tau_w}, \quad (24)$$

其中

$$\varepsilon_{w0}(T) = 88.045 - 0.4147T + 6.295 \times 10^{-4}T^2 + 1.075 \times 10^{-5}T^3, \quad (25)$$

$$2\pi\tau_w(T) = 1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12}T + 6.938 \times 10^{-14}T^2 - 5.096 \times 10^{-16}T^3, \quad (26)$$

T 是土壤的摄氏温度. 当给定工作频率、土壤成分及土壤温度和湿度后,可以利用上述公式计算出土壤的等效相对介电常数. 表 2 给出了不同类型土壤的含沙量和黏土含量^[19].

表 1 不同土壤类型含沙量与黏土含量表

土壤类型	含沙量 S/%	黏土含量 C/%
沙壤土	51.5	13.5
粉沙壤土	17.2	19.0
粉质黏土	5.0	47.4

图 3 给出了入射频率为 4.7 GHz 时不同类型土壤的相对介电常数随土壤体积分水量的变化情况,其中土壤温度为 20 °C. 从图中可以看出,当土壤体积分水量增大时,土壤的相对介电常数实部迅速增

大,虚部有减小的趋势,但在土壤湿度小的情况下这种变化趋势不是很明显. 图 4 给出了土壤相对介电常数随入射频率的变化情况,其中,土壤湿度 $m_v = 0.15$. 从图中可以看出,随着频率的增大,土壤相对介电常数的实部逐渐减小,虚部逐渐增大. 同时,从图中还可以看出,土壤类型对土壤的相对介电常数有很大的影响,所以在进行土壤散射计算时,必须要考虑土壤的类型.

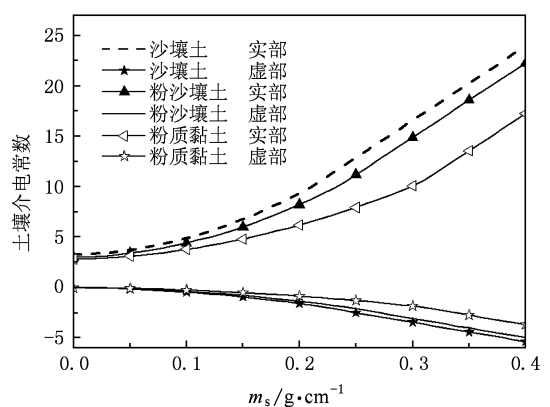


图 3 土壤相对介电常数随土壤体积分水量的变化

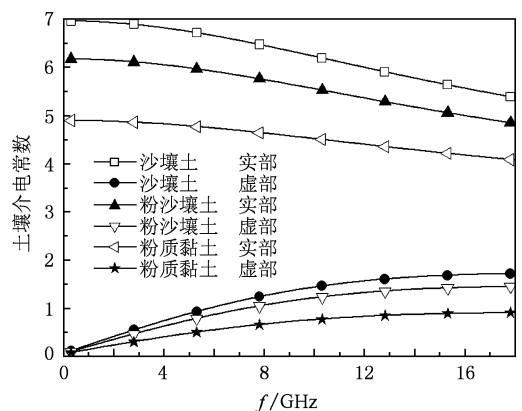


图 4 土壤相对介电常数随频率的变化情况

采用了 HP 公司生产的型号为 HP LaserJet 1300 激光打印机,如图 1 所示.

3. 数值计算结果与分析

数值结果以圆柱目标为例,指数谱粗糙地面长

度为 51.2λ , 统计样本数为 100, 锥形入射波因子 $g = \lambda/4$. 图 5 首先给出了地面与其下方目标复合散射系数随土壤类型的变化. 其中, 粗糙地面的均方根高度及相关长度分别为 $\delta = 0.05\lambda, l = 0.5\lambda$, 圆柱半径为 1.5λ , 埋藏深度为 $H = 2\lambda$, 入射角为 30° , 入射频率为 $f = 1.2 \text{ GHz}$, 土壤湿度和温度分别为 $m_v = 0.15 \text{ g/cm}^3, T = 20^\circ\text{C}$, 对于不同的土壤类型, 可以依据入射波频率及土壤湿度、温度计算其相对介电常数 ε , 如图 5 所示. 可以看出, 从沙壤土到粉质黏土, 复合散射的镜向幅值有所降低, 这是因为随着土壤组分的改变, 相对介电常数也随之发生变化, 粉质黏土相较沙壤土的相对介电常数小, 所以镜向散射系数的幅值较沙壤土及粉沙壤土更小. 另外, 由于这三种土壤组分的相对介电常数相差并不是很大, 所以除了镜向散射方向以外的散射系数幅值差异并不是很大.

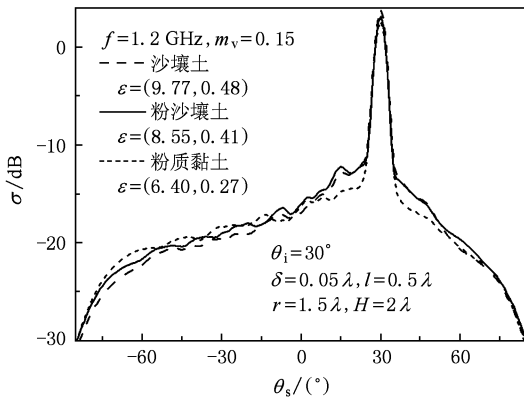


图 5 复合散射系数随土壤类型的变化

图 6 给出了地面与其下方埋藏目标复合散射系数随土壤湿度的变化. 其中, 土壤类型为粉沙壤土, 土壤湿度分别取 $0.1, 0.2, 0.4 \text{ g/cm}^3$, 其他参数同图 5. 对于确定的土壤类型, 由于土壤湿度发生了变化, 我们也可以得到其对应不同湿度的等效介电常数 ε , 如图 6 所示. 从图中可以看出, 随着粉沙壤土湿度的改变, 其相对介电常数发生了很大的变化, 镜向散射幅值随着土壤湿度的增大而增大; 同时, 由于三种湿度相应的等效相对介电常数差异较大, 所以除镜向方向外, 非相干散射幅值变化也较明显.

图 7 给出了地面与其下方埋藏目标复合散射系数随土壤均方根高度的变化. 其中, 土壤类型为沙壤土, 入射波频率 $f = 3 \text{ GHz}$, 相对介电常数 $\varepsilon = (6.91, 0.63)$, 其他参数同图 5. 图 7(a) 的均方根高度变化范围为 $\delta = 0.05-0.3\lambda$, 图 7(b) 均方根高

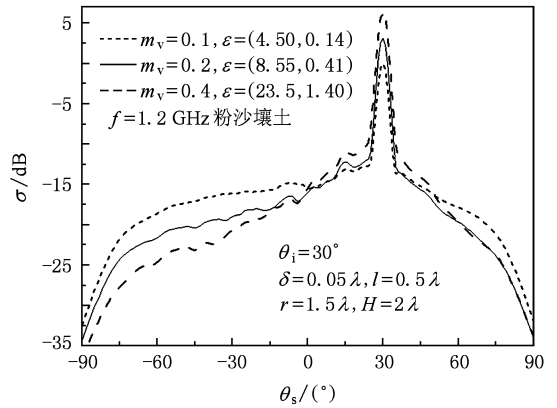


图 6 复合散射系数随土壤湿度的变化

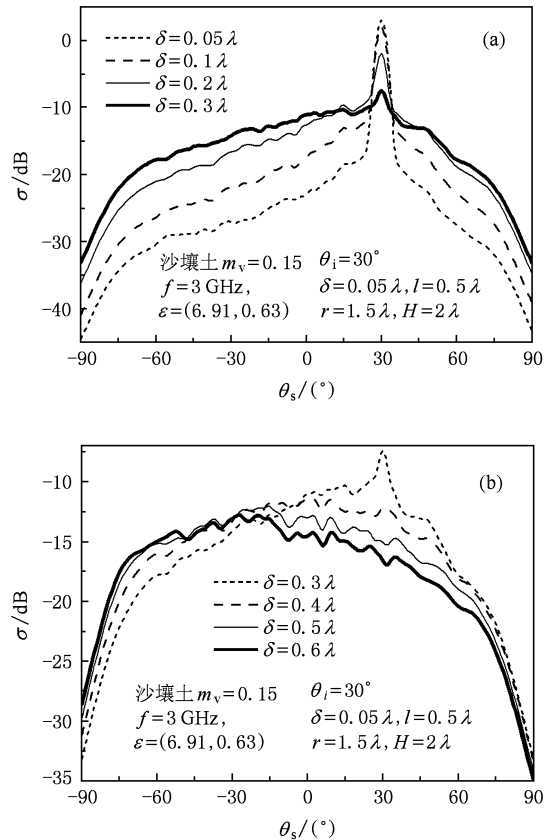


图 7 复合散射系数随土壤均方根高度的变化

度变化范围为 $\delta = 0.3-0.6\lambda$. 从图中可以看出, 随着均方根高度的增大, 双站散射系数镜向幅值均有所减小. 这主要是因为均方根高度增大意味着地面轮廓变得更加粗糙, 所以非相干散射将逐渐增强, 相干散射将明显减弱, 所以镜向部分的峰值随着 δ 的增大而减小. 另外, 从图 7(b) 还可以发现, 当均方根高度 δ 增加到一定程度, 镜向方向不再是整个散射范围内散射系数幅值最大的方向, 取而代之的是

后向散射方向,其散射系数幅值最大,后向增强效应较明显,这也是非相干散射增强的一种表现。

图 8 给出了复合散射系数随入射波频率的变化情况。其中,土壤类型为粉质黏土,土壤湿度为 $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$,相关计算参数如图中所示。随着入射波频率的增大,等效相对介电常数实部减小,虚部增大,但总体而言,虚部较实部数值很小,所以散射幅值在一定程度上主要取决于实部的变化,可以发现,随着入射波频率的增大,散射曲线的镜向峰值逐渐减小,这主要是由于我们在计算复合散射系数随入射波频率的变化时,地面的粗糙度 ($\delta =$

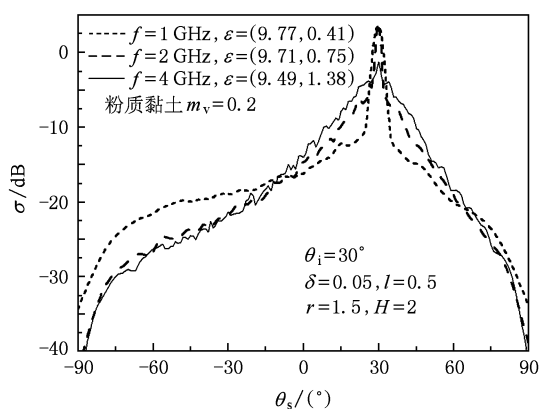


图 8 不同入射频率下的复合散射系数

0.05λ , $l = 1.5\lambda$) 及目标参数均固定,入射波频率越高,入射波长越短,则粗糙面的相对粗糙度就越大,加之,相对介电常数的实部随入射波频率的增大而减小,所以散射曲线的镜向峰值随入射波频率的增大而减小。

4. 结 论

本文利用基于电流计算的矩量法分析了不同土壤类型的随机粗糙地面与其下方掩埋目标的双站复合散射特性。由于在微波段土壤的相对介电常数对雷达回波的影响很大,而土壤的相对介电常数和土壤湿度等参数有很大的关系,因此,为了尽可能模拟实际土壤类型下的随机有耗介质粗糙地面,研究其与下方埋藏目标的复合电磁散射,我们基于四成分模型计算了考虑土壤湿度、温度、组分及入射波频率等的相对介电常数。数值结果以二维无限长导体圆柱为例,利用 Monte Carlo 方法统计计算了双站复合散射截面随土壤类型、土壤湿度、入射波频率及均方根高度等的变化情况,并做了详细分析及讨论。该研究结果对于实际中探地雷达在矿藏开采、扫雷、地基勘探、考古等一系列民用、工业、军事等领域的应用具有一定的理论指导价值。

- [1] Liu P, Jin Y Q 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **52** 1205
- [2] Wang R, Guo L X, Qin S T, Wu Z S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3473 (in Chinese) [王蕊,郭立新,秦三团,吴振森 2008 物理学报 **57** 3473]
- [3] Wang R, Guo L X 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 517
- [4] Li J, Guo L X, Zeng H 2008 *Waves in Random and Complex Media* **18** 641
- [5] Shi Y, Liang C H 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing Lett.* **4** 37
- [6] Guo L X, Kim C Y 2002 *Microwave and Opt. Tech. Lett.* **33** 142
- [7] Firoozabadi R, Miller E L, Rappaport C M, Morgenthaler A W 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **45** 104
- [8] Li Z X 2006 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **54** 2072
- [9] Yasemin A, Ibrahim A, Ali Y 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **45** 251
- [10] Cmielewski O, Saillard M, Belkebir K, Tortel H 2006 *IEEE*

- Trans. Geosci. Remote Sensing Lett.* **3** 442
- [11] Sarabandi K, Dehmollaian M, Mosallaei H 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44** 2072
- [12] Kevin O N, Lussky R F, Paulsen K D 1996 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **34** 367
- [13] Rappaport C M 2006 *Microwave Symposium Digest 2006 IEEE MTT-S International* 280
- [14] Thorsos E 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 78
- [15] Wang R, Guo L X, Ma J, Wu Z S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1503
- [16] Wang X, Wang C F, Gan Y B 2003 *PIER* **40** 207
- [17] Tsang L, Kong J A, Ding K H 2001 *Scattering of Electromagnetic Waves* (United States of America: John Wiley & Sons. Inc)
- [18] Donohue D J, Ku H C, Thompson D R 1998 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **46** 121
- [19] Wang J R, Schmugge T J 1980 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **18** 288

Investigation of electromagnetic scattering interaction between the buried target and the rough surface in different types of soil *

Wang Rui[†] Guo Li-Xin Wang An-Qi

(*School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 12 July 2009; revised manuscript received 7 August 2009)

Abstract

The problem of the composite electromagnetic scattering from 2-D buried target at the 1-D randomly rough surface with lossy media, which is different in different types of soil, is solved by the method of moments, while the tapered incident wave is chosen to reduce the truncation error. The relative dielectric constant of the soil could be calculated according to the frequency of the incident wave, the soil components, the soil moisture and soil temperature based on a certain model. The Monte-Carlo procedure is employed to calculate the bistatic scattering cross section, which is dependent on the soil components, the soil moisture, the frequency of the incident wave, as well as the rms height of the randomly rough surface in details. The numerical results provide a guide in the application of ground penetrating radar in military, civil, as well as industrial fields.

Keywords: rough surface, soil type, relative dielectric constant, four component model

PACC: 4110H, 4120

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 72105486) the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60971067), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China (20070701010).

[†] E-mail: doufuruier@xidian.edu.cn