

雪层覆盖的粗糙地面与上方矩形截面柱复合电磁散射的时域有限差分法研究*

任新成^{1)2)†} 郭立新³⁾ 焦永昌¹⁾

1) (西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

2) (延安大学物理与电子信息学院, 延安 716000)

3) (西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

(2011年7月29日收到; 2011年12月26日收到修改稿)

采用土壤介电常数的四成分模型和雪的介电常数模型分别表示实际的地面和雪层的介电特性, 应用指数型分布粗糙面模型和 Monte Carlo 方法模拟实际的粗糙地面, 运用时域有限差分方法研究了雪层覆盖的粗糙地面与上方矩形截面柱的复合电磁散射问题, 得出了复合电磁散射系数的角分布曲线, 计算了双站复合散射系数随土壤与雪层粗糙度参数、介电参数、矩形截面柱几何参数、介电参数等的变化情况, 并做了详细分析与讨论. 得到了雪层覆盖的粗糙地面与上方矩形截面柱复合电磁散射特性.

关键词: 时域有限差分法, 电磁散射, 粗糙地面, 矩形截面柱

PACS: 41.20.Jb, 11.80.La

1 引言

地、海背景与目标的复合电磁散射研究一直是电磁散射领域较为复杂的课题, 在雷达探测、海洋、地面遥感、目标隐身技术以及地下矿井、管道、隧道探测和识别等诸多领域有着非常重要的应用, 长期以来一直是广大学者所关注的热点问题之一.

针对粗糙面与目标的复合电磁散射问题, 目前除了应用几何绕射理论和物理光学等近似方法求解外, 基于各种微分/积分方程的电磁场数值方法, 如 MOM, EFIE/MFIE/CFIE, FDTD, FEM/BEM, 以及基于这些数值算法的改进算法, 如基于矩量法的快速迭代算法 (MOMI)、多极子方法和基于有限元法的区域分解法等, 也被应用到求解粗糙面与目

标的复合散射中, 并且可以得到较精确的数值解. 国外 Shenawee 等^[1,2] 利用最陡下降快速多极子方法分析了粗糙面与下方目标的复合电磁散射特性, Li 等人应用复镜向技术和 MLFMA 方法研究了平直分界面与上方多个目标的复合电磁散射特性^[3]. 国内复旦大学 Ye 和 Jin^[4] 运用快速互耦迭代算法研究了粗糙面与上方目标的复合电磁散射; 西安电子科技大学郭立新等^[5] 运用物理光学近似、基尔霍夫近似, 同时借助互易性原理分析了时变海面与上方导体平板的复合电磁散射特性; 王蕊等^[6] 运用 MOM 研究了不同土壤类型的粗糙地面与其下方埋藏目标的复合电磁散射^[6]; 空军工程大学姬伟杰和童创明^[7] 运用基于前后向迭代算法和双共轭梯度法的快速互耦迭代算法分析了分层粗糙面与下方介质目标的复合电磁散射. 本文应用时域有限差分方法 (FDTD) 研究了雪层覆盖的粗糙地面与上

* 国家自然科学基金 (批准号: 60971067)、中国博士后科学基金项目 (批准号: 20090461284) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2010JM8017) 资助的课题.

† E-mail: yauxchren@yahoo.com.cn

方矩形截面柱的复合电磁散射特.

2 复合散射模型

图 1 为分层随机粗糙面与上方矩形截面柱复合散射几何示意图, 粗糙面 1 上方为半无限自由空间, 粗糙面 2 下方为半无限均匀土壤介质, 两粗糙面之间是厚度为 h_s 的均匀雪层, 矩形截面柱目标 $abcd$ 位于粗糙面 1 上方空间, 其中心到粗糙面 1 的高度用 h_t 表示, 矩形目标 ab 边与 x 轴正向的夹角为 φ . 图 2 为分层粗糙面与矩形截面柱复合散射的 FDTD 计算模型, 连接边界 AB 为平面, 其下方为总场区, 上方为散射场区, 入射波通过设置在连接边界上的等效电磁流引入, 输出边界 CD 处于散射场区, 利用等效原理可以求得远区散射场, FDTD 计算区域外部设置 (UPML) 吸收边界, 厚度取 10 个网格.

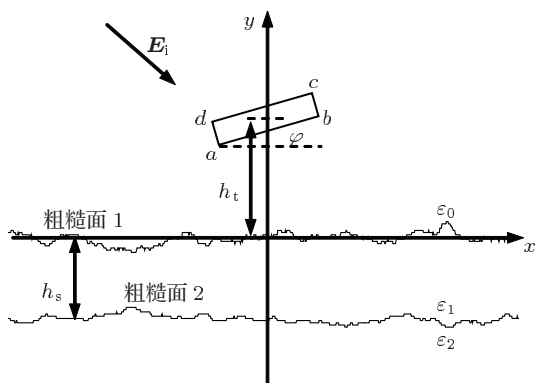


图 1 分层粗糙面与上方矩形截面柱复合散射几何示意图

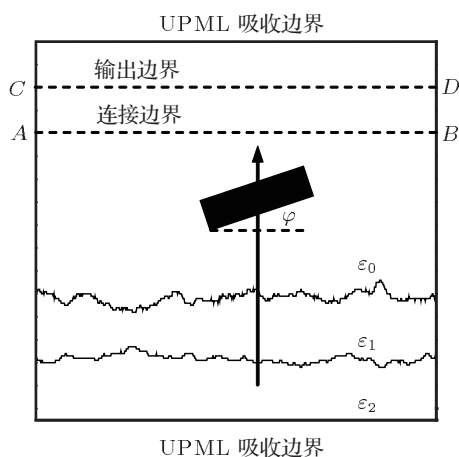


图 2 分层粗糙面与上方矩形截面柱复合散射 FDTD 计算模型

2.1 粗糙面模拟

一维随机粗糙面可以利用 Monte Carlo 方法^[8]模拟生成, 粗糙表面被认为是由大量的谐波叠加而成, 谐波的振幅是独立的高斯随机变量, 其方差正比于特定波数的功率谱 $S(k_j)$, 由下列函数生成长度为 L 的一维粗糙表面样本, 即

$$f(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{j=N-1} F(k_j) \cdot \exp(ik_j x_n), \quad (1)$$

式中 $x_n = n\Delta x$ ($n = 1, \dots, N$) 表示粗糙表面上第 n 个离散点, Δx 为相邻采样点间的距离, 离散波数 k_j 的表达式为 $k_j = 2\pi j/L$, $F(k_j)$ 为 $f(x_n)$ 的空间 Fourier 变换, 定义为

$$F(k_j) = \sqrt{2\pi L S(k_j)} \times \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} [N(0, 1) + iN(0, 1)] & n \neq 0, \\ N(0, 1) & n = 0, \frac{N}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $S(k_j)$ 为粗糙表面的功率谱密度, $N(0, 1)$ 表示均值为 0, 方差为 1 的高斯随机变量, 当 $j > N/2$ 时, $F(k_j)$ 满足共轭对称关系 $F(k_j) = F(k_{N-j})^*$. 这样可以保证进行 Fourier 逆变换后所得到的粗糙表面的轮廓 $f(x_n)$ 是实数.

指数型分布粗糙表面的功率谱密度为

$$S(k_j) = \frac{\delta^2 l}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{1 + k_j^2 l^2} \right). \quad (3)$$

本文中实际地面为服从指数型分布的粗糙面.

2.2 土壤与雪的介电常数模型

土壤的介电常数主要受入射频率 f , 土壤湿度 m_v , 土壤表面温度 T , 土壤类型等因素的影响. Wang 和 Schmugge^[9] 建立了一种四成分模型, 设土壤的沙土含量为 S , 黏土含量为 C , 则土壤的湿度压缩点 W_p 为

$$W_p = 0.06774 - 0.00064S + 0.00478C, \quad (4)$$

临界体湿度 m_t 为

$$m_t = 0.49W_p + 0.165. \quad (5)$$

设土壤中岩石密度为 ρ_r , 干土壤密度为 ρ_b , 则土壤的积孔率 p 为

$$p = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}. \quad (6)$$

一般情况下, 土壤中岩石密度 $\rho_r = 2.6 \text{ g/cm}^3$, ρ_b 由下式确定

$$\rho_b = \frac{3.455}{R^{0.3018}}, \quad (7)$$

$$R = 25.1 - 0.21S + 0.22C. \quad (8)$$

当 $m_v \leq m_t$ 时, 土壤等效介电常数

$$\varepsilon = m_v \varepsilon_x + (p - m_v) \varepsilon_a + (1 - p) \varepsilon_r, \quad (9)$$

其中

$$\varepsilon_x = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \beta \frac{m_v}{m_t}, \quad (10)$$

$$\beta = -0.57W_p + 0.481, \quad (11)$$

式中 $\varepsilon_a = 1.0$ 为空气的介电常数, $\varepsilon_i = 3.15 - j0.025$ 为冰的介电常数, $\varepsilon_r = 5.0 - j0.1$ 为岩石的介电常数, ε_w 为纯水的介电常数, 它由 Debye 公式计算, 即

$$\varepsilon_w = 4.9 + \frac{\varepsilon_{w0} - 4.9}{1 + j2\pi f \tau_w}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{w0} &= 88.045 - 0.4147T \\ &+ 6.295 \times 10^{-4}T^2 + 1.075 \times 10^{-5}T^3, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} 2\pi\tau_w &= 1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12}T \\ &+ 6.938 \times 10^{-14}T^2 - 5.096 \times 10^{-16}T^3. \end{aligned} \quad (14)$$

当 $m_v > m_t$ 时, 土壤等效介电常数

$$\begin{aligned} \varepsilon &= m_t \varepsilon_x + (m_v - m_t) \varepsilon_w \\ &+ (p - m_v) \varepsilon_a + (1 - p) \varepsilon_r, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \beta. \quad (16)$$

雪是由水、冰晶体和空气组成的混合物, 根据雪中是否含有液态水可将雪分为干雪、潮雪、湿雪. 雪的介电常数满足下列关系式^[10]

$$\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + u} = p_w \frac{\varepsilon_w - 1}{\varepsilon_w + u} + p_i \frac{\varepsilon_i - 1}{\varepsilon_i + u} + p_a \frac{\varepsilon_a - 1}{\varepsilon_a + u}, \quad (17)$$

其中 ε_s 表示雪的等效介电常数, $\varepsilon_w, \varepsilon_i$ 与 ε_a 分别表示纯水、冰晶体和空气的介电常数, p_w, p_i 与 p_a 分别表示纯水、冰晶体和空气的体积百分率.

(17) 式中 u 反映雪的类型, 取值为

$$u = \begin{cases} 2 & \text{干雪,} \\ 9 & \text{潮雪,} \\ 20 & \text{湿雪.} \end{cases} \quad (18)$$

3 FDTD 方法

3.1 二维麦克斯韦方程 FDTD 差分公式

对于二维麦克斯韦方程, 横磁 (TM) 波只有 E_z, H_x, H_y 分量, 横电 (TE) 波只有 H_z, E_x, E_y 分量. 以 TM 波为例, FDTD 差分公式为^[11]

$$\begin{aligned} &H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) \\ &= CP(m) \cdot H_x^{n-1/2} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) \\ &\quad - CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \\ &= CP(m) \cdot H_y^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \\ &\quad + CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &E_z^{n+1}(i, j) \\ &= CA(m) \cdot E_z^n(i, j) + CB(m) \\ &\quad \times \left[\frac{H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - H_y^{n+1/2} \left(i - \frac{1}{2}, j \right)}{\Delta x} \right. \\ &\quad \left. - \frac{H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n+1/2} \left(i, j - \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} \right], \end{aligned} \quad (21)$$

式中系数

$$CA(m) = \frac{\varepsilon(m) - \frac{\sigma(m)}{2}}{\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2}},$$

$$CB(m) = \frac{1}{\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2}}, \quad (22)$$

$$CP(m) = \frac{\frac{\mu(m)}{\Delta t} - \frac{\sigma_m(m)}{2}}{\frac{\mu(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma_m(m)}{2}},$$

$$CQ(m) = \frac{1}{\frac{\mu(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma_m(m)}{2}}, \quad (23)$$

(22) 和 (23) 式中 CA, CB, CP, CQ 中标号 m 的取值与 (19)—(21) 式左端场分量节点的空间位置相同. 为了使 TE 波方程离散形式与 TM 波有相似

形式, 将 (19)—(21) 式中空间坐标沿 x 和 y 方向分别移动半个网格, 并将离散时间 t 也移动半个时间步 $\Delta t/2$, 再利用 TE 波和 TM 波之间的对偶关系, 就可得到 TE 波入射时电场和磁场的 FDTD 计算公式^[11], 这里不再赘述.

3.2 入射波的引入

根据等效原理在总场边界设置等效电磁流可以在总场区引进入射波, 而在散射场区没有入射波. 假定入射角为 θ_i , 波数为 \mathbf{k}_i

$$\mathbf{k}_i = \hat{x} \sin \theta_i - \hat{y} \cos \theta_i; \quad (24)$$

总场边界上的点 $\mathbf{r} = x\hat{x} + y\hat{y}$ 在入射波方向上的投影 d 为

$$d = \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} = x \sin \theta_i - y \cos \theta_i; \quad (25)$$

内插确定距离 d 的入射波为

$$E_{\text{inc}}^n(d) = [1 - d + \text{floor}(d)]E_{\text{inc}}^n[\text{floor}(d)] + [d - \text{floor}(d)]E_{\text{inc}}^n[\text{floor}(d) + 1], \quad (26)$$

$$H_{\text{inc}}^n(d) = [1 - d + \text{floor}(d)]H_{\text{inc}}^n[\text{floor}(d)] + [d - \text{floor}(d)]H_{\text{inc}}^n[\text{floor}(d) + 1], \quad (27)$$

式中 $\text{floor}(d)$ 表示向下取整. 总场边界上 \mathbf{r} 点的入射场值为

$$E_z(\mathbf{r}) = E_{\text{inc}}(d), \quad (28)$$

$$H_x(\mathbf{r}) = -\cos \theta_i H_{\text{inc}}(d), \quad (29)$$

$$H_y(\mathbf{r}) = \sin \theta_i H_{\text{inc}}(d). \quad (30)$$

为了消除截断边界处场值突变产生的人为反射, 给入射平面波附加平滑的窗函数, 常用高斯窗函数

$$G(x, y) = \exp\{ -[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] (\cos \theta / g)^2 \}, \quad (31)$$

式中 θ 为入射角, x_0, y_0 为总场边界的中心点位置, 以下 $x_0 = 0, y_0 = 0$, g 的选择应使窗函数在总场边界边缘处下降为中心点处值的 10^{-3} , 假设 ρ_m 为中心到边缘最小距离

$$\exp[-(\rho_m \cos \theta / g)^2] = 10^{-3}, \quad (32)$$

所以

$$g = \rho_m \cos \theta / 2.6. \quad (33)$$

3.3 吸收边界条件

由于计算机容量的限制, FDTD 计算只能在有限区域进行. 为了能模拟开域电磁散射过程, 在计算区域的截断边界处必须给出吸收边界条件, 本文中采用 UPML 吸收边界. UPML 吸收边界最初由 Sacks^[12] 和 Gedney^[13] 提出, 它与 Berenger^[14] 的完全匹配层 (PML) 场分量分裂理论不同, 其依据在单轴各向异性介质中, 电磁波仍满足麦克斯韦方程, 所以只要设置合适的单轴参数就可以形成完全匹配层. 以 TM 波为例, 各向异性介质麦克斯韦旋度方程 (无源) 可表示为

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu_1 \frac{s_y}{s_x} H_x, \quad (34)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu_1 \frac{s_x}{s_y} H_y, \quad (35)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = (j\omega\varepsilon_1 + \sigma_1) s_x s_y E_z, \quad (36)$$

其中 ε_1, μ_1 和 σ_1 代表图 2 中与 UPML 层相邻的内部介质的介电常数、磁导系数和电导率. $s_w (w = x, y)$ 是沿着 x 和 y 方向的单轴参数, 取以下形式

$$s_w = \kappa_w + \sigma_w / j\omega\varepsilon_0, \quad (37)$$

上式中 κ_w, σ_w 的表达式为

$$\sigma_x(x) = \sigma_{x,\max} \frac{|x - x_0|^m}{d^m}, \quad (38)$$

$$\kappa_x(x) = 1 + (\kappa_{x,\max} - 1) \frac{|x - x_0|^m}{d^m}, \quad (39)$$

其中 d 为 UPML 层的厚度, x_0 为 UPML 层靠近 FDTD 区的界面位置, $\sigma_{x,\max}, \kappa_{x,\max}$ 和 m 为常数, 具体取值参见文献 [13]. 令 $B_x = \mu_1 H_x / s_x$, $B_y = \mu_1 H_y / s_y$, $P'_z = s_x s_y E_z$, $P_z = P'_z / s_x$, 则 UPML 中由 $H_x, H_y \rightarrow P'_z \rightarrow P_z \rightarrow E_z$ 的时域推进计算公式为

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon_1 \frac{\partial P'_z}{\partial t} + \sigma_1 P'_z, \quad (40)$$

$$\frac{\partial P'_z}{\partial t} = \kappa_x \frac{\partial P_z}{\partial t} + \frac{\sigma_x}{\varepsilon_0} P_z, \quad (41)$$

$$\frac{\partial P_z}{\partial t} = \kappa_y \frac{\partial E_z}{\partial t} + \frac{\sigma_y}{\varepsilon_0} E_z. \quad (42)$$

由 $E_z \rightarrow B_x, B_y \rightarrow H_x, H_y$ 的时域推进计算公式为

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -\kappa_y \frac{\partial B_x}{\partial t} - \frac{\sigma_y}{\varepsilon_0} B_x, \quad (43)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \kappa_x \frac{\partial B_y}{\partial t} + \frac{\sigma_x}{\varepsilon_0} B_y, \quad (44)$$

$$\kappa_x \frac{\partial B_x}{\partial t} + \frac{\sigma_x}{\varepsilon_0} B_x = \mu_1 \frac{\partial H_x}{\partial t}, \quad (45)$$

$$\kappa_y \frac{\partial B_y}{\partial t} + \frac{\sigma_y}{\varepsilon_0} B_y = \mu_1 \frac{\partial H_y}{\partial t}. \quad (46)$$

对(40)—(46)式运用中心差分近似即可得到UPML中的FDTD公式^[11],这里不再给出.

3.4 近-远场外推

FDTD计算中,在计算达到稳态后提取输出边界上场的幅值和相位,用时谐场外推公式进行外推.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_s &= \hat{z} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{j_0 k}{2\pi r}} \exp(-j_0 k r) \\ &\quad \times (-Z f_z - f_{mx} \sin \phi), \end{aligned} \quad (47)$$

式中 $j_0 = \sqrt{-1}$, k 为入射波数, Z 为波阻抗, ϕ 表示散射波与 x 轴夹角,与散射角 θ_s 的关系 $\phi = 90^\circ - \theta_s$. 电流矩与磁流矩分量 f_z, f_{mx} 可表示为

$$\begin{aligned} f_z &= -\Delta x \sum_{i=i_C}^{i_D} H_x(i, j_{CD} + 1/2) \\ &\quad \times \exp(j_0 k \Delta x ((j_{CD} + 1/2) \sin \phi \\ &\quad + i \cos \phi)), \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} f_{mx} &= -\Delta x \sum_{i=i_C}^{i_D} E_z(i, j_{CD}) \\ &\quad \times \exp(j_0 k \Delta x (j_{CD} \sin \phi + i \cos \phi)), \end{aligned} \quad (49)$$

其中 j_{CD} 表示图2中输出边界 CD 处的节点纵坐标.由(47)—(49)式可得远区散射场 \mathbf{E}_s ,远区雷达散射截面为

$$RCS = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi r}{L} \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2}, \quad (50)$$

这样,远区散射系数为

$$\sigma = 10 \lg RCS. \quad (51)$$

4 数值结果与讨论

在以下的数值计算中如无特殊说明,入射波频率 $f = 0.3 \text{ GHz}$,入射角 $\theta_i = 30^\circ$,随机粗糙面概率分布服从指数型分布,粗糙面的抽样长度 $L = 102.4\lambda$,网格宽度 $\Delta x = \lambda/20$,粗糙面个数取30个,UPML层厚度取10个网格,矩形截面柱(见图1)为理想导体, ab 边长 2.0λ , bc 边长 1.0λ , ab 边倾角 $\varphi = 0^\circ$.

4.1 算法有效性验证

为了验证算法的有效性,首先运用FDTD计算单层指数型随机粗糙面散射的双站散射系数 σ ,并与MOM计算结果进行比较,结果如图3所示.粗糙面高度均方根 $\delta = 0.2\lambda$,相关长度 $l = 1.5\lambda$,入射波长 $\lambda = 0.03 \text{ m}$,下层介质介电常数 $\varepsilon_s = 3.93 - j0.51$.两种算法计算结果基本一致.

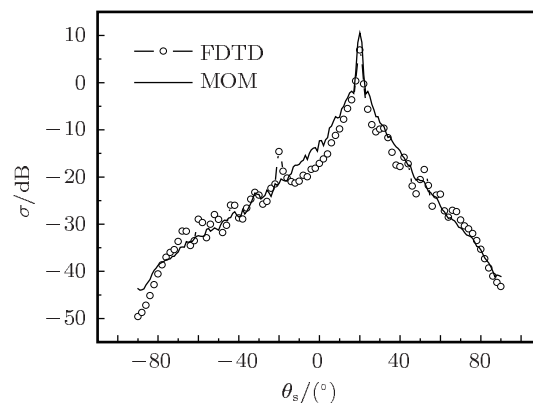


图3 FDTD与MOM数值计算结果比较

4.2 粗糙面粗糙度参数对散射系数的影响

图4为TM波入射下雪层覆盖粗糙地面与上方矩形截面导体柱的复合散射系数随粗糙面高度起伏均方根的变化关系.计算中两粗糙面相关长度 $l_1 = l_2 = 1.0\lambda$,雪层厚度 $h_s = 1.0\lambda$,目标距雪层表面高度 $h_t = 2.0\lambda$.图4(a),(b)为干雪覆盖土壤,干雪介电常数 $\varepsilon_1 = 1.11 - j0.0029$,土壤(湿度 $m_v = 0.1$)介电常数 $\varepsilon_2 = 5.16 - j0.13$.图4(c),(d)为湿雪覆盖土壤,湿雪介电常数 $\varepsilon_1 = 5.49 - j0.054$,土壤(湿度 $m_v = 0.2$)介电常数 $\varepsilon_2 = 11.20 - j0.36$.图4(a),(c)反映雪层表面高度起伏均方根变化对复合散射系数的影响,图4(b),(d)反映土壤层表面高度起伏均方根变化对复合散射系数的影响.由图可知,干雪覆盖土壤时(图4(a),(b)),雪层表面高度起伏均方根变化对复合散射系数的影响很小(图4(a));土壤层表面高度起伏均方根变化对复合散射系数的影响,在相干散射方向附近,高度均方根越小复合散射系数越大,在非相干散射方向高度均方根越小散射系数越小,在大散射角方向,复合散射系数变化较小(图4(b)).而湿雪覆盖土壤时(图4(c),(d)),雪层表面高度起伏均方根变化对复合散射系数的影响在相干散射方向附近(除镜

向外), 高度均方根越小复合散射系数越大, 在非相干散射方向高度均方根越小散射系数越小, 在大散

射角方向, 复合散射系数变化较小 (图 4(c)), 土壤层表面高度均方根变化对复合散射系数几乎没有影

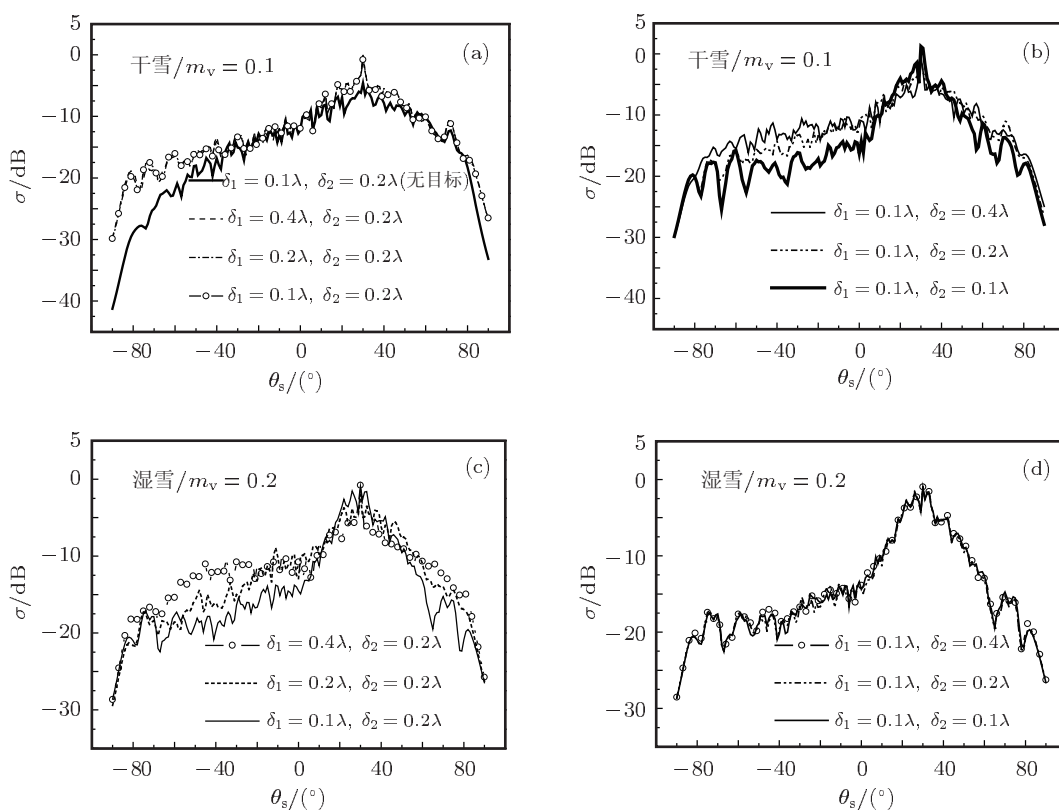


图 4 高度起伏均方根对复合散射系数的影响 (a), (c) 雪层高度均方根; (b), (d) 土壤层高度均方根

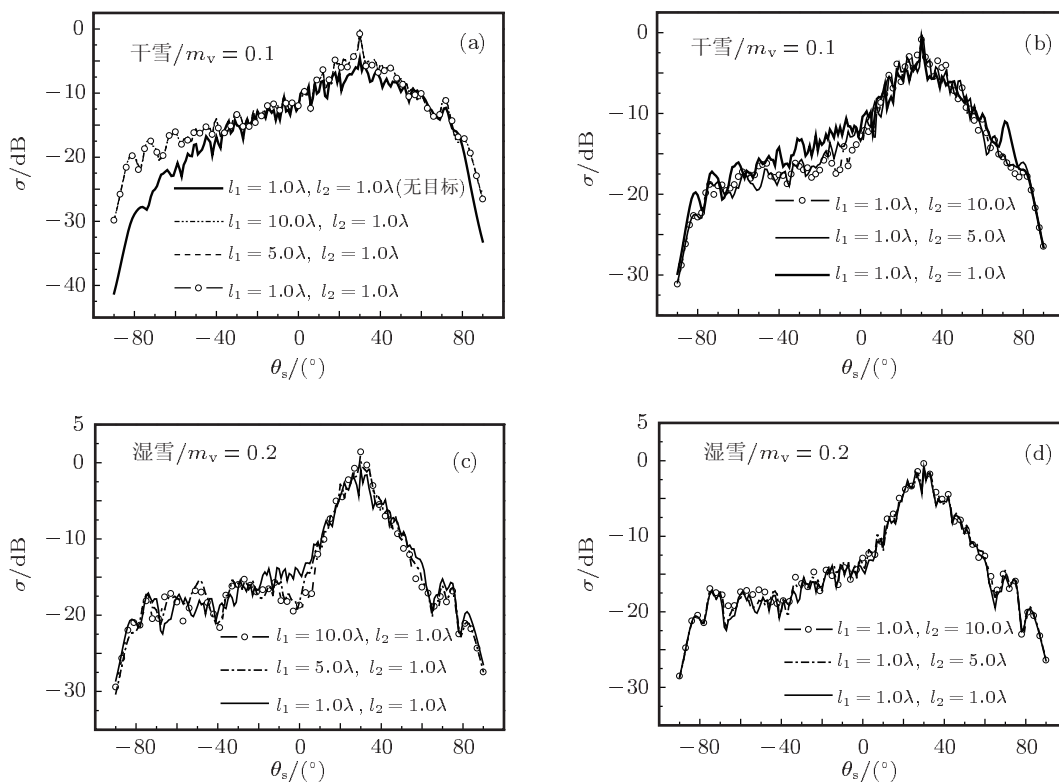


图 5 粗糙面相关长度变化对复合散射系数的影响 (a), (c) 雪层相关长度; (b), (d) 土壤层相关长度

响(图4(d)). 图4(a)中还计算了无目标时干雪覆盖土壤的双站散射系数,可以看出,有目标时的散射系数普遍大于无目标情况,尤其在大散射角方向这种变化更为明显.

图5给出了TM波入射下雪层覆盖粗糙地面与上方矩形截面导体柱的复合散射系数随粗糙面相关长度的变化关系. 计算中雪层表面高度均方根 $\delta_1 = 0.1\lambda$, 土壤层表面高度均方根 $\delta_2 = 0.2\lambda$, 雪层厚度、目标高度、雪层介电常数、土壤层介电常数取值均与图4中一致. 图5(a), (b)为干雪覆盖土壤, 图5(c), (d)为湿雪覆盖土壤; 图5(a), (c)为雪层表面相关长度变化对复合散射系数的影响, 图5(b), (d)为土壤层表面相关长度变化对复合散射系数的影响. 从计算结果可以得出, 相关长度对复合散射系数的影响较小, 图5(a), (d)中复合散射系数几乎不随相关长度变化, 图5(b), (c)中复合散射系数在镜向和后向散射方向之间局部区域表现为随相关长度增大而减小. 图5(a)中也画出了无目标时的双站散射系数曲线, 由图可看出, 在相干散射方向附近和大散射角方向, 有目标时的散射系数大于无目标情况.

4.3 矩形截面导体柱参数对散射系数的影响

图6计算了矩形截面导体柱尺寸变化对复合散射系数的影响. 计算中只改变矩形截面导体柱 ab 边长度, bc 边长仍保持为 1.0λ , 两层粗糙面粗糙度参数 $\delta_1 = 0.1\lambda$, $\delta_2 = 0.2\lambda$, $l_1 = l_2 = 1.0\lambda$, 雪层厚度 $h_s = 0.5\lambda$, 导体柱距雪层表面高度 $h_t = 2.0\lambda$, 雪层介电常数 $\epsilon_1 = 5.49 - j0.054$, 土壤介电常数 $\epsilon_2 = 11.20 - j0.36$. 由图6可以得出显示, 当 ab 边长度增大时, 复合散射系数在相干散射方向(镜向)附近明显增大, 在非相干散射方向复合散射系数随 ab 边长度增大而减小, ab 边长越大, 相干散射方向的峰越窄, ab 边长越小, 相干散射方向的峰越宽. 这是因为当目标尺寸增大时, 目标上表面的镜面散射作用增大, 但目标尺寸与粗糙面长度比较仍很小, 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7为导体柱中心距雪层表面高度变化对复合散射系数的影响. 计算中 $\delta_1 = \delta_2 = 0.1\lambda$, $l_1 = l_2 = 1.0\lambda$, 雪层厚度 $h_s = 0.5\lambda$, 雪层介电常

数 $\epsilon_1 = 5.49 - j0.054$, 土壤介电常数 $\epsilon_2 = 11.20 - j0.36$. 可以看出, 在大散射角方向导体柱高度越小复合散射系数越大, 在其他散射角方向目标导体柱高度变化对复合散射系数的影响不明显. 这是因为散射波来自粗糙面散射、目标表面散射以及粗糙面与目标的二次耦合散射, 散射波接收位置在无限远处, 导体柱高度变化幅度相对于接收距离来讲, 变化幅度很小, 因此复合散射系数变化不明显, 但在大散射角方向, 导体柱高度变化对二次耦合散射影响较大, 导体柱高度越小二次耦合散射越强, 因此在大散射角方向目标高度越小复合散射系数越大.

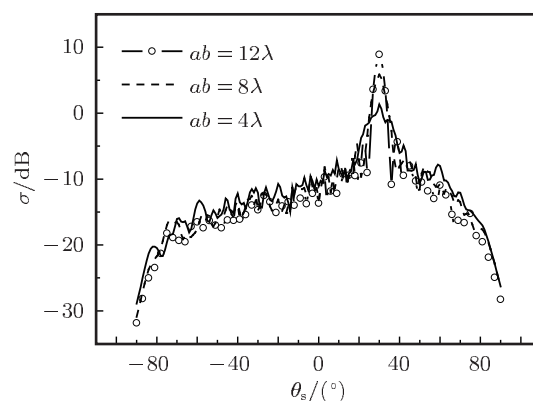


图6 矩形截面柱尺寸变化对复合散射系数的影响

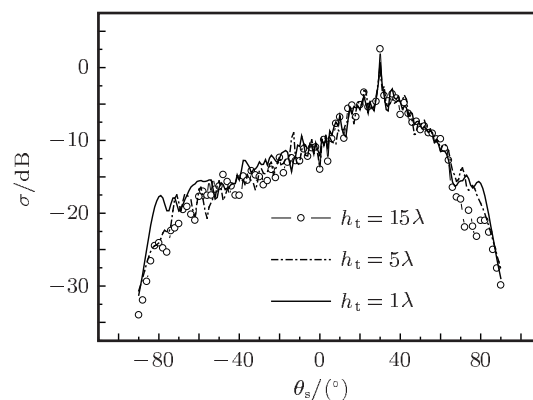


图7 矩形截面柱中心距雪层表面的高度对复合散射系数的影响

图8给出了导体柱倾角变化对复合散射系数的影响. 计算中 $\delta_1 = \delta_2 = 0.1\lambda$, $l_1 = l_2 = 1.0\lambda$, 雪层厚度 $h_s = 0.5\lambda$, 目标距雪层表面高度 $h_t = 1.5\lambda$, 雪层介电常数 $\epsilon_1 = 5.49 - j0.054$, 土壤介电常数 $\epsilon_2 = 11.20 - j0.36$. 由图8可以得出导体柱倾角变化对后向一侧的复合散射系数影响较大, 导体

柱倾角 $\varphi = 10^\circ$ 时, 复合散射系数在 $-10^\circ \sim 20^\circ$ 散射角之间有一明显凸起; $\varphi = 30^\circ$ 时, 复合散射系数在 $-50^\circ \sim -10^\circ$ 散射角之间有一明显凸起; $\varphi = 60^\circ$ 时, 复合散射系数在 $-90^\circ \sim -70^\circ$ 散射角之间有一明显凸起, 在其他散射角方向复合散射系数变化不大.

图 9 计算了目标介电常数变化对复合散射系数的影响. 计算中 $\delta_1 = 0.1\lambda$, $\delta_2 = 0.2\lambda$, $l_1 = l_2 = 1.0\lambda$, 矩形截面柱目标 ab 边长 4.0λ , bc 边长 2.0λ , 目标距雪层表面高度 $h_t = 2.5\lambda$, 雪层厚度 $h_s = 0.5\lambda$, 雪层介电常数 $\varepsilon_1 = 1.63 - j0.008$, 土壤介电常数 $\varepsilon_2 = 11.20 - j0.36$. 图 9(a) 为目标介电常数的实部变化对复合散射系数的影响, 图 9(b) 为目标介电常数的虚部变化对复合散射系数的影响. 由图 9 可

知, 不论介电常数的实部或者虚部变化, 在相干散射方向附近复合散射系数随目标介电常数的增大而增大, 在其他散射角方向复合散射系数变化很小.

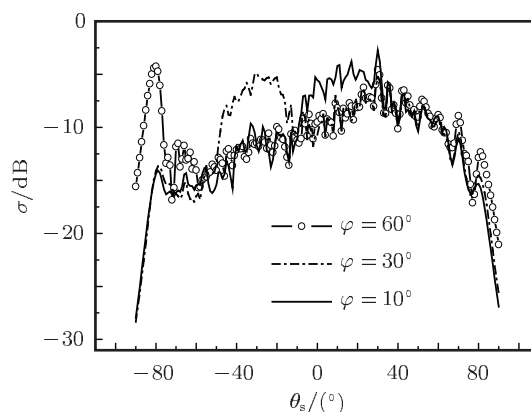


图 8 矩形截面柱倾角变化对复合散射系数的影响

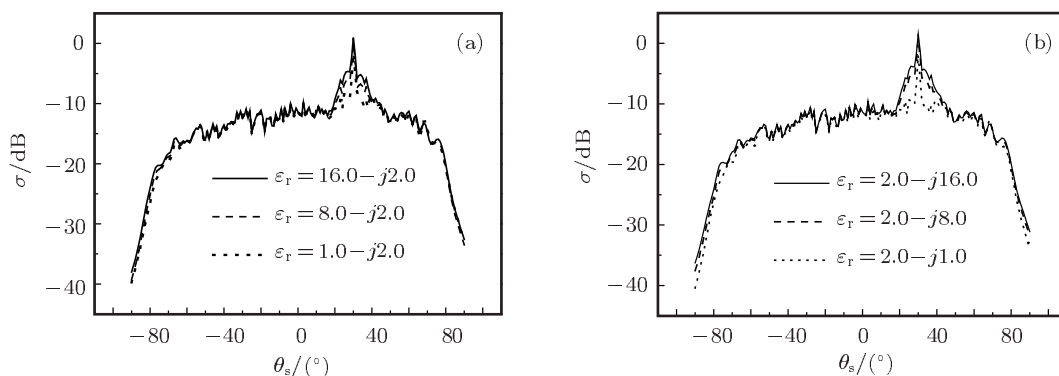


图 9 矩形截面柱介电常数变化对复合散射系数的影响 (a) 介电常数实部; (b) 介电常数虚部

4.4 雪层与土壤层参数变化对散射系数的影响

图 10 研究了土壤湿度变化对复合散射系数的影响. 计算中 $\delta_1 = 0.1\lambda$, $\delta_2 = 0.2\lambda$, $l_1 = l_2 =$

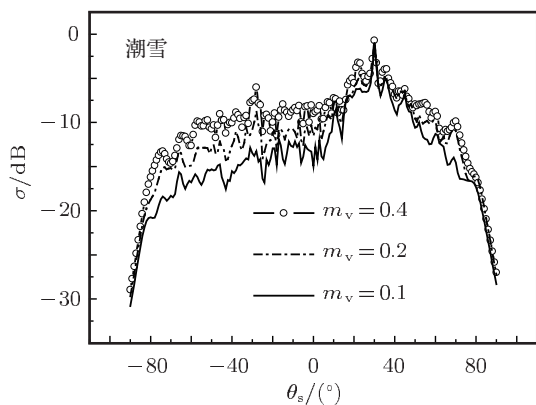


图 10 土壤湿度变化对复合散射系数的影响

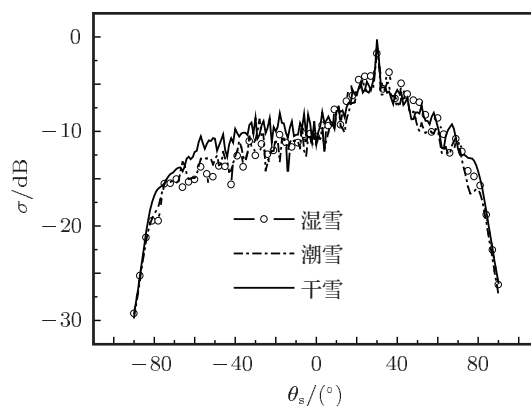


图 11 雪层类型变化对复合散射系数的影响

1.0λ , 雪层厚度 $h_s = 0.5\lambda$, 雪层介电常数 $\varepsilon_1 = 1.63 - j0.008$, 目标距雪层表面高度 $h_t = 2.0\lambda$, 土壤介电常数与湿度有关, 可按 (9) 式或 (15) 式计算得到. 由图 10 可以得出, 在散射角变化范围为 $-80^\circ \sim 10^\circ$

时, 土壤湿度变化对复合散射系数影响较为明显, 土壤湿度越大复合散射系数越大, 在其他散射角方向也存在相同规律, 但复合散射系数的变化较小.

图 11 计算了雪层类型变化对复合散射系数的影响. 计算中 $\delta_1 = 0.1\lambda$, $\delta_2 = 0.2\lambda$, $l_1 = l_2 = 1.0\lambda$, 雪层厚度 $h_s = 0.5\lambda$, 目标距雪层表面高度 $h_t = 2.0\lambda$, 土壤介电常数 $\varepsilon_2 = 11.20 - j0.36$, 不同类型雪的介电常数按 (17) 式计算. 图 11 显示雪层类型变化对复合散射系数影响的规律较为复杂, 三条曲线相互交织, 复合散射系数的变化较小, 仅散射角在 -70° — -20° 时, 干雪对应的复合散射系数大于其他两种情况.

5 结论

本文运用 FDTD 方法, 结合土壤介电常数的四

成分模型公式以及雪的介电常数模型公式, 研究了雪层覆盖的粗糙地面与其上方矩形截面柱的复合电磁散射特性, 主要分析了双站复合散射系数随粗糙面粗糙度参数、矩形截面柱参数以及雪层与土壤层参数等的变化规律. 数值计算结果表明, 双站复合散射系数随各个参数变化的规律非常复杂, 每个参数对散射系数的影响均受到其他参数的影响和制约. 当然, 本文只是采用指数型粗糙面来模拟实际的粗糙地面和粗糙雪面, 运用 FDTD 方法研究了该粗糙面与目标的复合电磁散射问题, 而且仅限于一维的情形, 有关计算结果还有待于进一步的实验验证. 对其他类型的粗糙地面和粗糙雪面, 如分形及二维的电磁散射问题还有待于进一步深入研究.

-
- [1] Shenawee M E, Carey Rappaport, Miller E L, Silevitch M B 2011 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **39** 1174
- [2] Shenawee M E 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **42** 67
- [3] Li L 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **51** 810
- [4] Ye H X, Jin Y Q 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44** 108
- [5] Guo L X, Wang R, Wang Y H, Wu Z S 2008 *Chinese J. Geophys.* **51** 1695 (in Chinese) [郭立新, 王蕊, 王运华, 吴振森 2008 地球物理学报 **51** 1695]
- [6] Wang R, Guo L X, Wang A Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3179 (in Chinese) [王蕊, 郭立新, 王安琪 2010 物理学报 **59** 3179]
- [7] Ji W J, Tong C M 2010 *Chinese J. Radio Sci.* **25** 336 (in Chinese) [姬伟杰, 童创明 2010 电波科学学报 **25** 336]
- [8] Hasting F D, Schneider J B, Broschat S L 1995 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **43** 1183
- [9] Wang J R, Schmugge T J 1980 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **18** 288
- [10] Li D X 1994 *Method and Application of Ground Penetrating Radar* (1st Ed.) (Beijing: Geology Publishing House) p156 (in Chinese) [李大心 1994 探地雷达方法与应用 (北京: 地质出版社) 第 156 页]
- [11] Ge D B, Yan Y B 2005 *Finite-Different Time-Domain for Electromagnetic Waves* (2nd Ed.) (Xi'an: Xidian University Press) p158 (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 电磁波时域有限差分方法 (第二版) (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 158 页]
- [12] Sacks Z S 1995 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **43** 1460
- [13] Gedney S D 1996 *Electromagnetics* **16** 425
- [14] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185

Investigation of electromagnetic scattering interaction between the column with rectangular cross-section and rough land surface covered with snow using finite difference time domain method*

Ren Xin-Cheng^{1)2)†} Guo Li-Xin³⁾ Jiao Yong-Chang¹⁾

1) (*National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*School of Physics and Electronic Information, Yanan University, Yan'an 716000, China*)

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

(Received 29 July 2011; revised manuscript received 26 December 2011)

Abstract

The dielectric properties of the actual land surface and snow deposit are described using the four-component model of dielectric constant of soil and the dielectric constant model of snow respectively. The actual rough land surface is simulated with the model of exponential type distribution rough surface and Monte Carlo method, the composite electromagnetic scatterings from the rough land surface covered with snow and the column with rectangular cross-section above it are studied using the finite-difference time-domain method, the curves of angular distribution of composite scattering coefficient are obtained, the bistatic composite scattering coefficient varying with the roughness parameter and dielectric parameter of soil and snow, the geometric parameter and dielectric parameter of the column with rectangular cross-section are calculated in detail. The characteristics of the composite scattering coefficient from rough land surface covered with snow and the column with rectangular cross-section above it are also obtained.

Keywords: finite difference time domain, electromagnetic scattering, rough land surface, column with rectangular cross-section

PACS: 41.20.Jb, 11.80.La

* Projected by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60971067), the Postdoctoral Science Foundation of China (Grant No. 20090461284) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JM8017).

† E-mail: yauxchren@yahoo.com.cn