

指数型粗糙地面与上方矩形截面柱宽带电磁散射的时域有限差分法研究^{*}

朱小敏^{1)†} 任新成¹⁾ 郭立新²⁾

1)(延安大学物理与电子信息学院, 延安 716000)

2)(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2013年10月16日收到; 2013年10月28日收到修改稿)

采用土壤介电常数的四成分模型表示实际地面的介电特性, 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微分高斯脉冲波照射时粗糙地面与上方目标的宽带电磁散射问题, 得出了后向复合散射系数的频率响应曲线, 计算了后向复合散射系数随粗糙地面高度起伏均方根、相关长度、土壤湿度、目标尺寸、高度、倾角等几何参数及介电参数等的变化情况, 并做了详细分析与讨论, 得到了指数型粗糙地面与上方目标宽带电磁散射特性.

关键词: 时域有限差分法, 宽带电磁散射, 粗糙地面, 矩形截面柱

PACS: 41.20.Jb, 11.80.La

DOI: 10.7498/aps.63.054101

1 引言

地、海背景与目标的复合电磁散射研究是电磁散射领域较为复杂且具有实际应用价值的课题, 如随机起伏陆地与海面上方目标监测、低飞目标识别与制导截获技术、浅层地下目标勘探等许多理论和工程问题需要对地、海背景与目标的复合电磁散射进行研究. 特别是随着短脉冲和超宽带雷达在目标识别和遥感中的广泛应用, 超宽带雷达需要目标的宽带 RCS 以产生一维距离像^[1], 因此, 深入研究粗糙面与目标复合模型宽带电磁散射特性具有十分重要的意义.

由于近似解析方法对粗糙面粗糙度、坡度等参数有严格的适用范围, 因此多种数值计算方法在粗糙面与目标复合散射问题研究中得到快速发展和广泛应用^[2]. 叶红霞等利用互耦迭代算法研究了导体粗糙面与上方目标的差场散射^[3], Hu 等^[4]利用快速非均匀平面波算法分析了粗糙面与上方目标

的复合散射问题, 王运华等^[5]基于互易定理和矩量法研究了平面上方 2 维介质目标对高斯波束的电磁散射, Wang 等^[6]利用矩量法 (method of moment, MoM) 研究了粗糙面与部分埋藏目标复合散射问题, An 等^[7,8]利用特征基函数法结合矩阵分解算法研究了粗糙面与上方、下方目标的复合散射问题, 针对单频电磁波入射时粗糙面与目标复合电磁散射已研究得较为深入, 但对于脉冲波入射时复合模型的宽带电磁散射研究较少^[9].

传统频域数值算法 (如 MoM 等) 在分析粗糙面与目标宽带 RCS 时, 需在给定频段内每个频点上逐点计算, 效率很低, 尤其当宽带 RCS 随频率剧烈变化时, 要获得准确的频率响应就必须减小计算的频率间隔, 这显然会大大增加 CPU 的占用时间, 虽然近年来涌现出多种快速插值方法^[10,11], 但对于 RCS 随频率剧烈变化情形, 准确应用插值方法获得宽带 RCS 仍然非常困难. 时域有限差分法 (finite-difference time-domain method, FDTD) 作为时域数值方法, 在分析复合模型宽带散射特

^{*} 国家杰出青年科学基金 (批准号: 61225002) 和国家自然科学基金 (批准号: 61379026) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ydzxm123@163.com

性方面具有独特的优越性. 本文利用FDTD方法对粗糙地面与上方导体目标复合模型进行了时域散射研究, 在得到复合模型时域散射场后, 通过傅里叶变换获得了归一化雷达散射截面(normalized radar cross section, NRCS)随频率的响应曲线. 经过对相关计算数据的分析得到了一些结论, 这些结论对粗糙面与目标复合模型宽带散射特性的认识具有重要的意义.

2 复合散射模型

图1为随机粗糙面与上方目标复合电磁散射几何示意图, 随机粗糙面由Monte Carlo方法模拟产生^[12]. 粗糙面上方为半无限自由空间, 下方为半无限均匀土壤介质, 矩形截面柱目标 $abcd$ 位于粗糙面上方空间, h_t 表示目标几何中心到粗糙面的高度, 矩形目标 ab 边与 x 轴正向的夹角为 φ . 图2为粗糙面与上方目标复合电磁散射计算的FDTD模型, 其中TF/SF边界取为平面并延伸至吸收边界层, 下方为总场区, 上方为散射场区, 入射波通过设

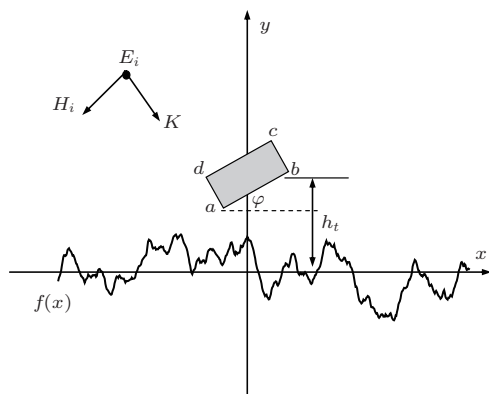


图1 粗糙面与上方目标复合散射几何示意图

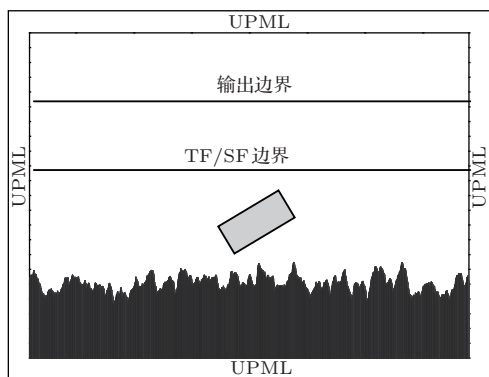


图2 粗糙面与上方目标复合散射 FDTD 模型

置在TF/SF边界上的等效电磁流引入总场区, 在散射场区设置输出边界, 输出边界与TF/SF边界平行并延伸至吸收层, FDTD计算区域外部设置UPML吸收边界, 厚度取10个网格.

3 FDTD方法

在二维情况下, 电磁波可分为TM波(E_z, H_x, H_y)和TE波(H_z, E_x, E_y), 以TM波为例, FDTD差分公式为^[13,14]

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

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

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) &= CP(m) \cdot H_y^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \\ &+ CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $CA(m)$, $CB(m)$, $CP(m)$, $CQ(m)$ 见文献^[13], 式中 m 的取值与左端场分量节点的空间位置相同.

入射波通过在TF/SF边界设置等效电磁流引入总场区, 根据等效原理在散射场区没有入射波. 本文入射波为微分高斯脉冲波, 表达式为

$$E_i(t) = \frac{t - t_0}{\tau} \exp \left[-\frac{4\pi(t - t_0)^2}{\tau^2} \right], \quad (4)$$

其中取 $\tau = 2.1/f_{\max} = 0.7 \text{ ns}$, $t_0 = 0.8\tau$.

图2中TF/SF边界延伸至吸收层, 为了消除截断边界处场值突变产生的人为反射, 给入射波附加平滑窗函数, 常用高斯窗函数

$$G(x, y) = \exp \left\{ -[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right\}$$

$$\times (\cos \theta_i / g)^2 \}, \quad (5)$$

其中 θ_i 为入射角, x_0, y_0 为 TF/SF 边界的中心点位置, 取 $x_0 = 0, y_0 = 0$, g 的选择应使窗函数在 TF/SF 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, 则

$$g = \rho_m \cos \theta / 2.6. \quad (6)$$

FDTD 计算只能在有限域进行, 为了模拟开域散射过程, 须在截断边界处设置吸收边界条件, 本文采用 UPML 吸收边界^[15]. UPML 吸收边界依据在单轴各向异性介质中, 电磁波仍满足麦克斯韦方程, 因此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 Maxwell 旋度方程可表示为

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu^* \frac{s_y}{s_x} H_x, \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu^* \frac{s_x}{s_y} H_y, \quad (8)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = (j\omega\varepsilon^* + \sigma^*) s_x s_y E_z, \quad (9)$$

其中 $\varepsilon^*, \mu^*, \sigma^*$ 表示与 UPML 层相邻内部介质的电磁参数, 本文在建模时记录左右两侧粗糙面与截断边界的交点位置, 交点位置下方 $\varepsilon^*, \mu^*, \sigma^*$ 取土壤电磁参数, 上方 $\varepsilon^*, \mu^*, \sigma^*$ 取自由空间电磁参数. 方程 (7)–(9) 中 s_w ($w = x, y$) 为沿 x 和 y 方向的单轴参数, 具体形式见文献^[13]. 令 $B_x = \mu^* H_x / s_x$, $B_y = \mu^* H_y / s_y$, $P'_z = s_x s_y E_z$, $P_z = P'_z / s_x$, 可得 UPML 层电磁场分量时域推进计算公式, 运用中心差分近似即可得到 TM 波 UPML 的 FDTD 公式.

FDTD 计算获得近场数据后, 利用瞬态场外推方法得到远区散射场, 通过傅里叶变换获得频域远区场, 归一化雷达散射截面定义为

$$\text{NRCS} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi r}{L} \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2}. \quad (10)$$

散射系数为

$$\sigma = 10 \log_{10}(\text{NRCS})(\text{dB}). \quad (11)$$

4 数值计算结果与讨论

4.1 算法有效性验证

为了验证算法的有效性, 首先用时谐场 FDTD 计算了一维高斯型粗糙面与上方无限长导体圆柱

目标的复合双站散射系数, 并与 MOM 计算结果进行了比较, 结果如图 3 所示. 入射波频率 $f = 0.3$ GHz, 入射角 $\theta_i = 60^\circ$, 粗糙面高度起伏均方根 $\delta = 0.2\lambda$, 相关长度 $l = 1.5\lambda$, 粗糙面相对复介电常数为 $\varepsilon_r = 2.5 - j0.18$, 无限长导体圆柱横截面半径 $r = \lambda$, 其中心到粗糙面距离 $h_t = 3.0\lambda$. 由图可以看出两种算法计算结果基本符合.

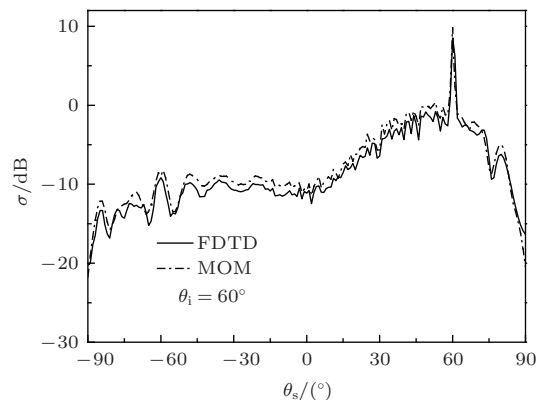


图3 粗糙面与目标双站散射 FDTD, MOM 计算结果比较

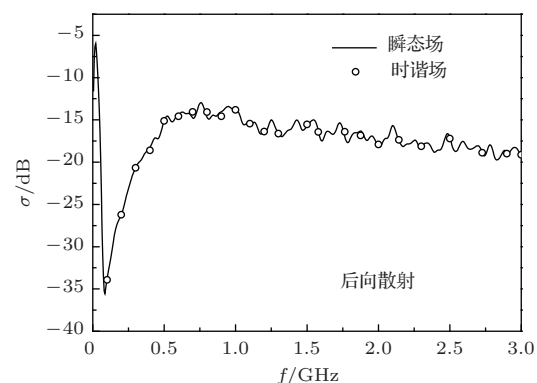


图4 粗糙面向后散射瞬态场 FDTD 与单频点计算比较

其次利用瞬态场 FDTD 计算了脉冲波入射下高斯型粗糙面向后散射系数, 并与时谐场 FDTD 逐频点计算结果进行比较, 如图 4 所示. 算例中均方根高度 $\delta = 0.02$ m, 相关长度 $l = 0.15$ m, 粗糙面相对介电常数 $\varepsilon_r = 16.16$, 电导率 $\sigma = 1.8$ S/m, 由图可以看出计算结果符合得很好. 在计算时间上, 瞬态场 FDTD 用时与单个频点时谐场 FDTD 计算用时相当, 但瞬态场 FDTD 一次计算即可获得宽频带内所有频点散射数据, 显然利用瞬态场 FDTD 分析宽带散射特性可极大提高计算效率.

在以下的数值计算中如无特殊说明, 入射波为 TM 极化微分高斯脉冲平面波, 入射角 $\theta_i = 30^\circ$,

网格宽度 $\Delta = 0.005$ m, 粗糙地面满足指数谱分布^[16], 取样长度 $L = 3200\Delta$, 统计个数 40 个, 目标(如图 1)边长 $ab = 80\Delta$, $bc = 20\Delta$, 目标倾角 $\varphi = 0^\circ$. 土壤介电常数利用 Wang 和 Schmugge 建立的四成分模型^[17] 计算, 土壤类型选择沙壤土, 图 5 给出了土壤相对介电常数随土壤湿度 m_v 的变化曲线, 结果显示土壤介电常数的实部和虚部随土壤湿度增大而增大, 实部增大更迅速.

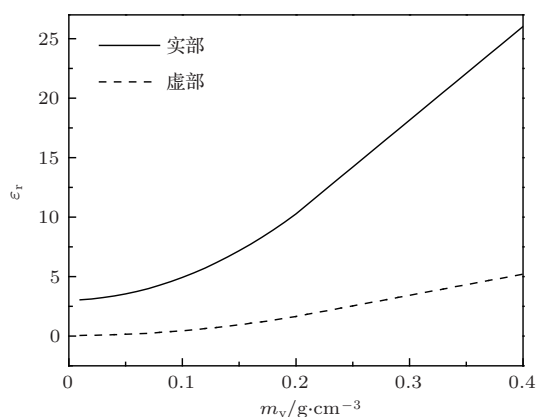


图 5 土壤相对介电常数随湿度变化曲线

4.2 粗糙地面高度起伏均方根对后向复合散射系数的影响

图 6 为后向复合散射系数 σ 随粗糙地面高度起伏均方根的变化关系. 计算中粗糙面相关长度 $l = 15$ cm, 土壤介电常数 $\varepsilon_r = 10.29 - j1.65$ (土壤湿度 $m_v = 0.2$ g/cm³), 目标中心距粗糙面高度 $h_t = 60\Delta$. 由图 6 可看出, 后向复合散射系数 σ 随频率振荡变化, δ 越小后向复合散射系数 σ 振荡幅度越大, 低频区 ($f < 400$ MHz) δ 对 σ 的影响较小, 频率增大时, σ 随 δ 的增大而增大. 这是由于当 δ 增大时, 粗糙面散射增强, 因此后向复合散射增强.

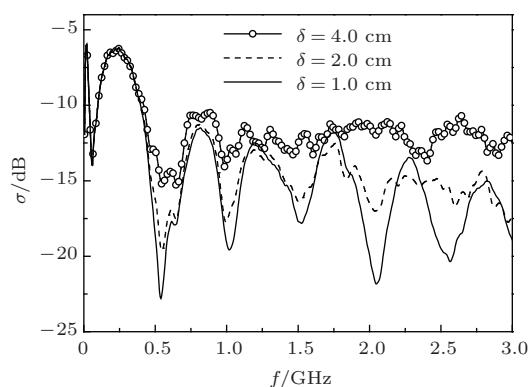


图 6 高度起伏均方根对后向复合散射系数的影响

4.3 粗糙地面相关长度对后向复合散射系数的影响

图 7 计算了后向复合散射系数 σ 随粗糙地面相关长度的变化关系. 其中粗糙地面高度起伏均方根 $\delta = 2$ cm, 其他参数同图 6. 由图 7 可看出, 频率较小时后向复合散射系数 σ 基本不随相关长度变化, 频率增大时 σ 受相关长度影响但规律较为复杂, 在部分频段上 σ 的起伏幅度随相关长度的增大而减小.

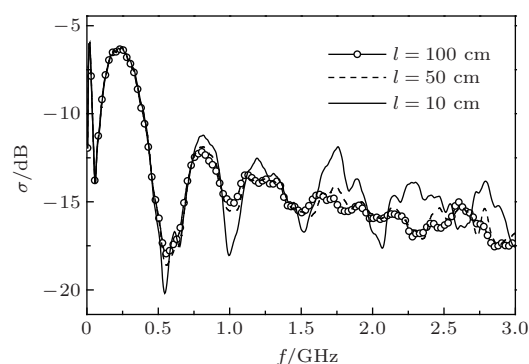


图 7 相关长度对后向复合散射系数的影响

4.4 土壤湿度对后向复合散射系数的影响

图 8 给出了后向复合散射系数 σ 随土壤湿度 m_v 的变化关系. 计算中粗糙面高度起伏均方根 $\delta = 2$ cm, 相关长度 $l = 15$ cm, 目标中心距粗糙地面高度 $h_t = 60\Delta$, 土壤介电常数 $\varepsilon_{r1} = 4.94 - j0.46$ ($m_v = 0.1$ g/cm³), $\varepsilon_{r2} = 10.29 - j1.65$ ($m_v = 0.2$ g/cm³), $\varepsilon_{r3} = 26.04 - j5.21$ ($m_v = 0.4$ g/cm³). 由图 8 可以得出, 在整个计算频带内后向复合散射系数 σ 随土壤湿度增大而增大. 由图 5 可知土壤介电常数实部在土壤湿度增大时比虚部增大更为迅速,

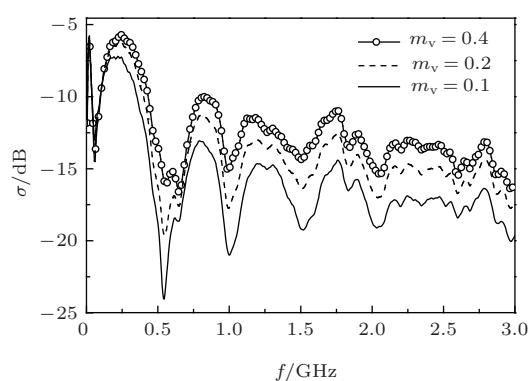


图 8 土壤湿度对后向复合散射系数的影响

因而土壤湿度增大时表面散射增强, 所以后向复合散射增强.

4.5 矩形截面柱几何参数对后向复合散射系数的影响

图9计算了矩形截面目标边长变化对后向复合散射系数 σ 的影响. 图9(a)中目标中心距粗糙面高度 $h_t = 60\Delta$, bc 边长 20Δ , 图9(b)中 $h_t = 100\Delta$, ab 边长 80Δ , 目标倾角均为 $\varphi = 0^\circ$, 土壤湿度 $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$. 由图9可以得出, 矩形截面目标 ab 边长度变化对后向复合散射系数 σ 影响较小, bc 边长度变化对 σ 影响较大. 图9(b)中低频区 σ 随 bc 边长度变化规律较为复杂, 当频率增大时, σ 随 bc 边长度增大而增大. 这是由于当目标侧面尺寸增大时, 目标侧面镜面反射波增强, 该反射波照射土壤表面, 引起土壤表面二次散射波增强, 因此后向复合散射系数增大.

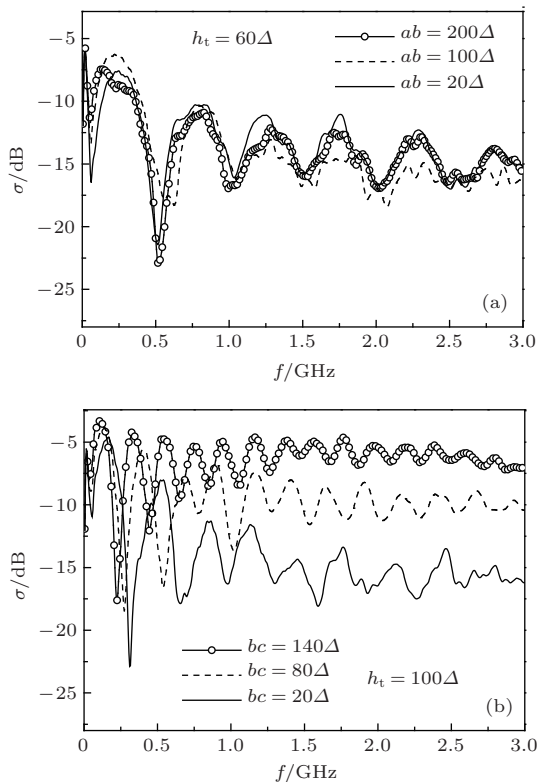


图9 矩形截面柱尺寸变化对后向复合散射系数的影响 (a) ab 边变化; (b) bc 边变化

图10为矩形截面导体目标倾角 φ 变化对后向复合散射系数 σ 的影响. 其中 $\delta = 2 \text{ cm}$, $l = 15 \text{ cm}$, $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$, 目标距粗糙面高度 $h_t = 60\Delta$. 由图10可以看出, 目标倾角 φ 取 30° 时(等于入射角 θ_i), 后向复合散射系数明显增大, φ 取其他值时 σ

变化较小. 后向复合散射主要来自土壤表面后向散射、目标后向散射以及土壤表面与目标后向耦合散射, 由图1所示几何关系可以看出, 当目标倾角取 30° 时, 目标表面(图1中 cd 面)法线方向与入射波方向平行, 即表面镜反射方向沿后向散射方向, 因此该倾角下后向复合散射明显增强, φ 取其他值时, 表面镜反射方向与后向散射方向不一致, 目标倾角变化对后向复合散射影响较小.

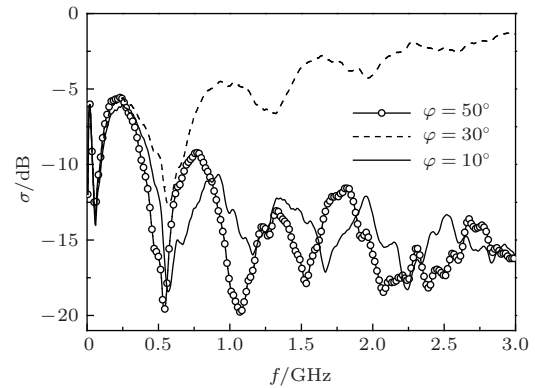


图10 目标倾角对后向复合散射系数的影响

图11给出了目标中心距粗糙面高度 h_t 变化对后向复合散射系数 σ 的影响. 其中粗糙地面 $\delta = 2 \text{ cm}$, $l = 15 \text{ cm}$, $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$. 由图11可以得出, 后向复合散射系数 σ 随频率振荡地变化, 频率越高振荡幅度越小, 同时 σ 随目标距粗糙面高度 h_t 变化, h_t 增大 σ 振荡幅度增大, σ 振荡越剧烈. 实际上目标高度 h_t 变化影响粗糙地面与目标之间的耦合散射, 计算结果表明矩形截面柱目标与粗糙地面之间耦合散射越强, 后向复合散射系数振荡幅度和振荡频率越小, 该结果对于复杂环境中目标的识别和目标参数的反演具有一定的应用价值.

4.6 矩形截面柱介电参数对后向复合散射系数的影响

图12为矩形截面柱目标介电常数 ϵ_r 变化对后向复合散射系数 σ 的影响. 其中 $\delta = 2 \text{ cm}$, $l = 15 \text{ cm}$, $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$, $h_t = 60\Delta$. 图12(a)为 ϵ_r 实部变化, 图12(b)为虚部变化. 由图12可看出, 当目标介电常数实部变化时, 低频区 σ 变化较小, 高频区 σ 随 ϵ_r 实部的增大而增大, 当目标介电常数虚部变化时, 在计算频带内 σ 随 ϵ_r 虚部的增大而增大, 但虚部较小时 σ 变化明显, 虚部较大时 σ 变化微小.

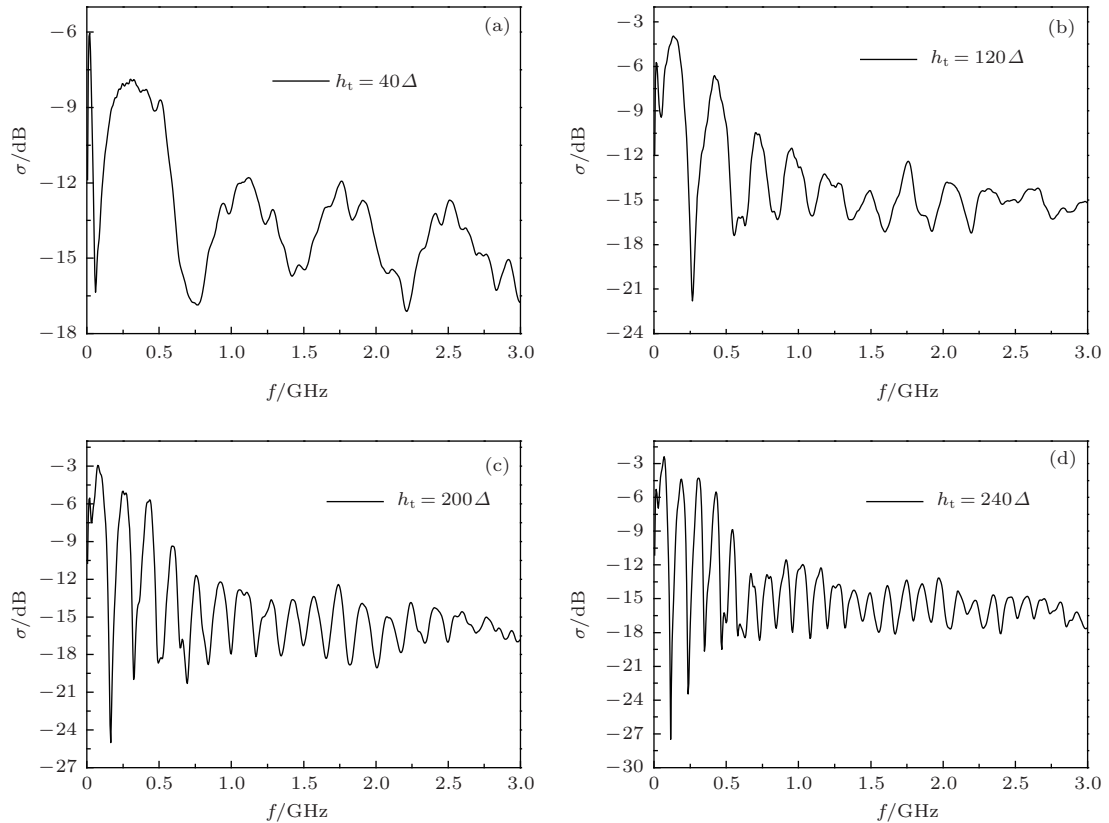


图 11 目标距粗糙面高度变化对后向复合散射系数的影响

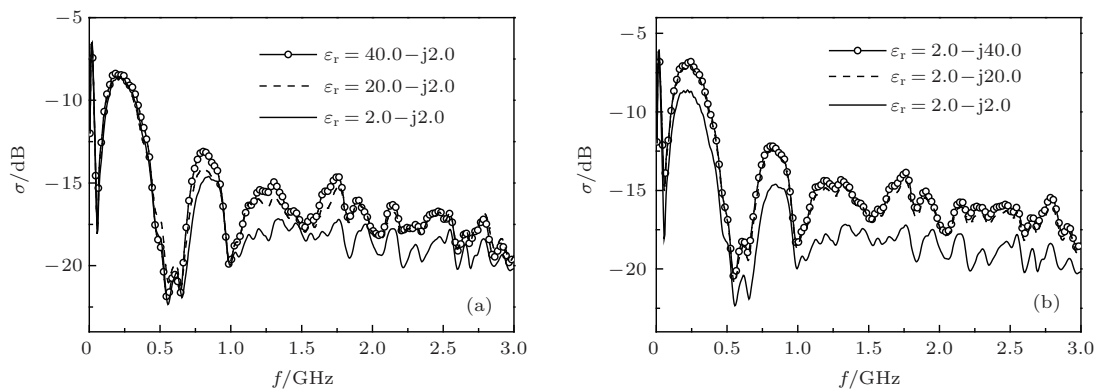


图 12 目标介电参数变化对后向复合散射系数的影响 (a) 实部变化; (b) 虚部变化

5 结 论

本文利用瞬态FDTD方法研究了微分高斯脉冲波照射时粗糙地面与上方目标宽带电磁散射问题, 分析了后向复合散射系数随粗糙面高度起伏均方根、相关长度、土壤湿度、目标尺寸、高度、倾角以及目标介电参数等的变化规律. 数值计算结果表明后向复合散射系数随各参数变化的规律较为复杂, 各个参数对后向复合散射系数的影响均受到其他参数的影响和制约. 本文计算结果对粗糙地面与目

标宽带复合电磁散射特性的认识以及复杂环境中目标的识别具有一定的应用价值. 当然本文的讨论仅限于一维指数型粗糙面问题, 对于一维其他类型粗糙面、二维粗糙面与更复杂目标的宽带复合散射问题还有待于进一步深入研究, 本文有关计算结果还有待于进一步实验验证.

参考文献

- [1] Sun J J, Tong C M 2013 *Journal of Microwaves* **29** 72 (in Chinese) [孙佳佳, 童创明 2013 微波学报 **29** 72]

- [2] Jin Y Q, Liu P, Ye H X 2008 *Theory and Method of Numerical Simulation of Composite Scattering from the Object and Randomly Rough Surface* (Beijing: Science Press) p165 (in Chinese) [金亚秋, 刘鹏, 叶红霞 2008 随机粗糙面与目标复合散射数值模拟理论与方法 (北京: 科学出版社) 第 165 页]
- [3] Ye H X, Jin Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 839 (in Chinese)[叶红霞, 金亚秋 2008 物理学报 **57** 839]
- [4] Hu B, Chew W C 2001 *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* **39** 1028
- [5] Wang Y H, Zhang Y M, Guo L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5529 (in Chinese)[王运华, 张彦敏, 郭立新 2008 物理学报 **57** 5529]
- [6] Wang X, Li L W 2009 *Prog. Electromagn. Res.* **91** 35
- [7] An Y Y, Wang D X, Chen R S 2013 *Electromagnetics* **33** 10
- [8] An Y Y, Chen R S, Xu P P, Liu Z W, Zha L P 2012 *Appl. Comput. Electrom.* **27** 541
- [9] Wang R, Guo L X, Li J, Liu X Y 2009 *Sci. China Ser. G-Phys. Mech. Astron.* **52** 665
- [10] Zhao K M, Sun Y F 2011 *Journal of Electronics & Information Technology* **33** 992 (in Chinese)[赵克明, 孙玉发 2011 电子与信息学报 **33** 992]
- [11] Du H M, Chen M S, Wu X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 097201 (in Chinese)[杜红梅, 陈明生, 吴先良 2012 物理学报 **61** 097201]
- [12] Hastings F D, Schneider J B, Broschat S L 1995 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **43** 1183
- [13] Ge D B, Yan Y B 2011 *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves* (3rd edition) (Xi'an: Xidian University Press) p104 (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 2011 电磁波时域有限差分方法 (第三版)(西安: 西安电子科技大学出版社) 第 104 页]
- [14] Kunz K S, Luebbers R J 1993 *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic* (Boca Raton, FL: CRC Press) p45
- [15] Chen Z M, Wu X M 2008 *Numer. Math. Theor. Meth. Appl.* **1** 113
- [16] Ren X C, Guo L X, Jiao Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144101 (in Chinese)[任新成, 郭立新, 焦永昌 2012 物理学报 **61** 144101]
- [17] Wang J R, Schmugge T J 1980 *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* **18** 288

Study on wide-band scattering from rectangular cross-section above rough land surface with exponential type distribution using FDTD*

Zhu Xiao-Min^{1)†} Ren Xin-Cheng¹⁾ Guo Li-Xin²⁾

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

2) (School of Physics and optoelectronic engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 16 October 2013; revised manuscript received 28 October 2013)

Abstract

The dielectric property of the actual land surface is expressed using the four-component model of dielectric constant of soil, the actual rough land surface is simulated with model of exponential type distribution rough surface and Monte Carlo method, the wide-band electromagnetic scattering from column with rectangular cross-section above rough land surface under Gaussian differential pulse irradiation is studied using FDTD, the curves of frequency distribution of back composite scattering coefficient is obtained, the back composite scattering coefficient varying with the root-mean-square of height fluctuation, the correlation length of rough land surface, the moisture capacity of soil, the geometric parameter of the target, such as height, size, tilt and dielectric parameter of the target is calculated in details, the characteristics of the wide-band composite scattering from object above rough land surface with exponential type distribution are obtained.

Keywords: wide-band electromagnetic scattering, rough land surface, column with rectangular cross-section, FDTD

PACS: 41.20.Jb, 11.80.La

DOI: 10.7498/aps.63.054101

* Projected by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (Grant No. 61225002), and the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 61379026).

† Corresponding author. E-mail: ydzxm123@163.com