

随机分布树干层中球的电磁散射

王显德¹, 张忠治¹, 傅君眉²

(1. 中国电波传播研究所青岛分所, 青岛 266071; 2 西安交通大学, 西安 710049)

摘 要: 本文用随机分布的有限长多层介质圆柱模拟树干层, 用互易原理得到了位于粗糙地面上有限长多层介质圆柱与球目标的二阶散射场近似解析表达式. 在 L、C、X 波段下, 研究了位于此环境中金属球目标与周围树干相互作用的电磁散射, 计算结果表明, 在低频段时树干对目标影响大, 低频段可以穿透植被层并应用于目标探测和识别.

关键词: 互易原理; 有限长多层圆柱的散射; 球散射; 粗糙地面

中图分类号: TN7 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2000)12-0125-03

Electromagnetic Scattering from Sphere Buried in Layer of Randomly Distributed Trunk

WANG Xiande¹, ZHANG Zhongzhi¹, FU Junmei²

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation (Qingdao), Qingdao 266071, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The finite length multi layer dielectric cylinder is used to model the trunk. The electromagnetic scattering model for adjacent trunks and sphere above a rough surface ground plane is analyzed by using the reciprocity theorem. The validity of the method is checked by numerical computations based on the moment method. The influence of randomly distributed trunk on the scattering pattern of sphere is discussed at L, C and X bands. It is shown that the low frequency can be used for the purpose of target detection buried in a discrete random media.

Key words: reciprocity theorem; electromagnetic scattering for finite length multilayer dielectric cylinder; sphere scattering; rough surface ground plane

1 引言

随机媒质中目标的探测与识别是人们十分关心的研究课题. 在实验方面, 世界发达国家研制了低频 SAR 实验系统, 如瑞典国防部^[1]研制的低频宽带 SAR 系统; 美国 Michigan 环境研究所与海军空战中心^[2]研制的 P3 超宽带 SAR 系统; 美国陆军实验室研制的超宽带冲击脉冲体制的 SAR 成像系统用于隐蔽目标探测. 在理论方面, 利用解析方法和数值方法对复杂环境中的目标特性进行了研究. 如 Tateibal^[3]利用边界条件和随机媒质中的格林函数方法, 研究了处于强起伏随机媒质中导体圆柱的电磁散射; Miyazaki^[4]用 FDTD 方法研究了随机媒质中目标的电磁散射, 建立了散射信号与随机媒质的关系. 本文用随机分布的有限长多层介质圆柱模拟树干层, 用迭代方法及等效原理^[5,7]和波理论方法^[9], 求解得到了有限长多层介质圆柱和球的散射矩阵, 用互易原理^[6]研究了位于此环境中金属球目标与周围树干相互作用的电磁散射模型, 用矩量法验证了此方法的有效性. 在 L、C、X 等波段下, 研究了周围树干对球目标散射特性的影响.

2 树干层中球的散射矩阵

散射场与入射场之间的耦合关系可以由散射矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \frac{e^{jk_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{vw} & S_{wh} \\ S_{hw} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 k_0 为传播常数, r 为观察点的坐标.

2.1 有限长多层介质圆柱的散射矩阵

假设有有限长多层介质圆柱为 K 层, 长度为 b , 第 i 层半径、介电常数和导磁率分别为 a^i 、 ϵ_i 、 μ_i ($i = 1, 2, \dots, K$). 对于任意极化的入射平面波, 根据等效原理用圆柱表面的等效表面电流源和磁流源替代内场求解其散射. 在远场近似下, 经推导求得其散射矩阵为^[7]:

$$\bar{S} = (k_0 a^K b / 2 \sin \theta'_i) [(D^e e_z + j \bar{D}^h e_z) \hat{k}_s \times (\hat{k}_s \times \hat{z}') + (D^h e_z - j \bar{D}^e e_z) \hat{k}_s \times \hat{z}'] \sin V / V \quad (2)$$

其中 $V = 0.5 k_0 b (\hat{k}_i - \hat{k}_s) \cdot \hat{z}'$, D^e 、 \bar{D}^e 、 D^h 、 \bar{D}^h 与 C_n^{TM} 、 C_n^{TE} 、 \bar{C}_n 关系见文献^[8], C_n^{TM} 、 C_n^{TE} 、 \bar{C}_n 的表达式见文^[7].

2.2 球的散射矩阵

将入射平面波展开为球面波,然后将入射波、散射波和透射波用矢量波函数表示^[9],根据边界条件,求得球的散射矩阵为:

$$S_{sw} = -\frac{i}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (2-\delta_m) \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \\ \times [A_n \frac{m^2}{\sin\theta_s \sin\theta_i} P_n^m(\cos\theta) P_n^m(\cos\theta_i) \\ + B_n \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta) \frac{d}{d\theta_i} P_n^m(\cos\theta_i)] \cos m(\varphi - \varphi_i) \quad (3a)$$

$$S_{sh} = -\frac{i}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (2-\delta_m) \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \\ \times [A_n \frac{m}{\sin\theta} P_n^m(\cos\theta) \frac{d}{d\theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) \\ + B_n \frac{m}{\sin\theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta)] \sin m(\varphi - \varphi_i) \quad (3b)$$

$$S_{hw} = -\frac{i}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (2-\delta_m) \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \\ \times [-A_n \frac{m}{\sin\theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta) \\ - B_n \frac{m}{\sin\theta} P_n^m(\cos\theta) \frac{d}{d\theta_i} P_n^m(\cos\theta_i)] \sin m(\varphi - \varphi_i) \quad (3c)$$

$$S_{hh} = -\frac{i}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (2-\delta_m) \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \\ \times [A_n \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta) \frac{d}{d\theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) \\ + B_n \frac{m^2}{\sin\theta_s \sin\theta_i} P_n^m(\cos\theta) P_n^m(\cos\theta_i)] \cos m(\varphi - \varphi_i) \quad (3d)$$

其中 A_n, B_n 表达式见文献[8].

2.3 树干与球的二阶散射矩阵

在文[7]中应用互易原理理解了相邻树干之间二阶散射场.假设沿树干的轴向球处于相互作用近区,沿径向处于相互作用的远区,即满足条件: $2(a^k)^2/\lambda < \rho \leq b^2/\lambda, \rho > 2a^2/\lambda$.同理可以得到树干与球的二阶散射场近似表达式.当考虑地面影响时,用镜像理论^[10]考虑二次散射,可以得到十种散射机理:(1)树干-球-地面的散射场;(2)地面-树干-球的散射场;(3)地面-树干-球-地面的散射场;(4)树干-地面-球的散射场;(5)树干-地面-球-地面的散射场;(6)球-树干-地面的散射场;(7)地面-球-树干-地面的散射场;(8)地面-球-树干的散射场;(9)球-地面-树干的散射场;(10)地面-球-地面-树干的散射场.树干-球(球-树干)-地面的散射可由树干-球(球-树干)的二阶散射经地面散射矩阵修正得到.当地面不太粗糙,表面高度具有高斯分布时,则地面散射主要由镜面反射的相干散射决定,其散射矩阵可以通过相干场反射系数进行修正得到^[11],表示为 $R_p = \Gamma_{p0} \exp(-2k_0^2 s^2 \cos^2\theta_i)$, s 为粗糙地面的均方根高度, Γ_{p0} 为水平地面的 Fresnel 反射系数.同理可以得到地面-树干-球(球-树干)的散射矩阵.根据球位于树干的镜像散射锥时,树干-地面-球(球-地面-树干)的相互作用存在,并由镜像理论得到其散射矩阵.由于篇幅有限这里没有一一给出散射矩阵的具体表达式.

当球处于一层随机分布树干层中时,球的散射由一阶散

射和二阶散射(包括球与树干相互作用的二阶散射场,由前面讨论的方法得到,并用相干传播常数修正波在传播过程中的路径衰减).这里仅给出一阶散射场表达式如下(球的直接散射场,地面-球的散射场,球-地面的散射场,地面-球-地面的散射场):

$$f_{pq} = S_i + S_{gi} + S_{ig} + S_{gg} \quad (4)$$

$$S_i = T_s S^0(k_s, k_i) T_i, S_{gi} = e^{i\tau} T_s R T_s^0(k_{sg}, k_i) T_i,$$

$$S_{ig} = e^{i\tau} T_s^0(k_s, k_r) T_r R T_s$$

$$S_{gg} = e^{i2\tau} T_s R T_s^0(k_{gq}, k_r) T_r R T_i$$

$$T_{i/r/s} = \begin{bmatrix} e^{iM_{iv}^{r/s} L} & 0 \\ 0 & e^{iM_{ih}^{r/s} L} \end{bmatrix}$$

$M_{pq}^{i/r/s} = \frac{2\pi D_i}{k_0 d} \sum S^0(k_{i/r/s}, k_{i/r/s})$, $k_{i/r/s}$ 为入射波(地面反射波、散射波)单位矢量, D_i 为单位面积内树干个数, d 为树干的高度, L 为波的传播路径长度.

3 数值计算及讨论

这里用 NEC 软件,验证互易定理求解有限长圆柱与金属球目标位于良导体地面上时二阶散射场计算方法的有效性,计算结果如图 1,可以看出二阶散射理论同矩量法有较好的一致性.用随机数产生位于粗糙地面上层随机分布的垂直树干层,然后用 Monte Carlo 模拟技术及相干波传播理论研究球处于此环境中的电磁散射.计算时每一次样本为 40 棵随机地分布在 2.56×2.56 平方米粗糙地面上,并使树干之间的距离大于 30 厘米,取 30 个样本进行平均.树干用有限长两层介质圆柱模拟,粗糙地面及树干的介电参数如表 1.地面的粗糙度为 $k_s = 0.2$.树干的长度为 100 厘米,半径为 4 厘米,树干内层的半径与外层的半径之比为 0.9.球的半径为 5 厘米,球中心的位置坐标 $(\rho, \varphi, \tilde{z}) = (25 \text{ 厘米}, 180^\circ, 50 \text{ 厘米})$.在 L(1.2GHz)、C(5.3GHz)、X(9.25GHz)波段下,计算球位于此环境中,受环境树干影响(树干对目标的二阶散射作用)的后向散射系数,计算结果如图 2.从图 2 可以看出,当球处于环境(树干)中时,散射系数受周围树干的影响而变小;在不同的频段下,由于波在媒质中传播的衰减不同而使球的散射系数不同,低频(L 波段)时,散射系数远大于高频(C、X 波段)时的散射系数,而 C、X 波段下,球的散射系数差别不是太多,说明低频具有穿透能力可以用于目标检测.

表 1 树干及地面的介电参数

		L 波段	C 波段	X 波段
树	ϵ_i^+ 内层	12.5 + 4.5j	9.3 + 3.3j	7.8 + 3.2j
	ϵ_i^- 外层	4 + j		
地面		5.6 + 1.4j	6.6 + 0.9j	5.8 + 1.4j

4 结论

本文用有限长多层介质圆柱模拟树干,用互易定理求解了树干与金属目标相互作用的二阶散射场近似表达式.用矩量法验证了二阶近似理论的有效性.用 Monte Carlo 模拟技术研究了基于粗糙地面上层随机垂直分布树干层中球的电磁

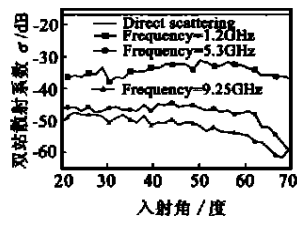
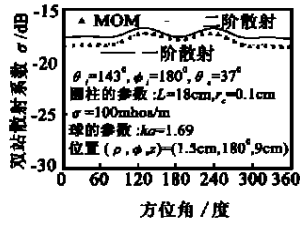


图 1 位于导体面上球与圆柱的双站散射系数(VV极化)

图 2 球与树干层的相互作用

散射。目标球的散射系数在 L 波段下较 C、X 波段散射系数大,表明低频具有穿透植被的能力,可以用来探测隐藏目标。进一步的工作是用 L 系统产生分形树构成森林环境模型,研究位于此环境中目标的电磁散射。

参考文献:

[1] D. R. Sheen et al. P-3 Ultrawideband SAR: description and examples [J]. IEEE AES Magazine, 1996: 25- 29.

[2] H. Hellsten et al. Ultrawideband VHF SAR design and measurements [A]. Proceedings of SPIE 1994, 2217: 16- 25.

[3] M. Tateiba et al. Numerical analysis of wave scattering from a conducting cylinder in turbulent media [A]. Proc. IGASS 1994, 1: 90- 93.

[4] Y. Miyazaki, J. Sonoda, and Y. Jonori. Statistical analysis of electromagnetic scattering of buried objects in random media using FDTD method [J]. Trans. IEE of Japan, Part - C, 1997, 117(1): 35- 41.

[5] M. O. Kolawole. Scattering from dielectric cylinders having radially layered permittivity [J]. J. EM Waves Applications, 1992, 6(2): 235- 259.

[6] K. Sarabandi and P. F. Polatin. Electromagnetic Scattering from Two Adjacent Objects [J]. IEEE Trans, Antennas Propagation, 1994, 42(4): 510- 516.

[7] Wang Xiande et al. The study of an electromagnetic scattering model for two adjacent trunks above a rough surface ground plane. Microwave and Optical Technology Letters [J], 1999, 20(6): 369- 376.

[8] F. T. Ulaby and C. Elachi. Radar polarimetric for geoscience applications. Norwood, MA: Artech House, 1990.

[9] J. A. Stratton. Electromagnetic Theory [M]. New York: McGraw Hill, 1941.

[10] L. V. Lindell and E. Alanen. Exact image theory for the Sommerfeld half space problem, Part III: general formulation [J]. IEEE Trans. AP, 1984, 32: 1027- 1032.

[11] R. D. D. Roo, F. T. Ulaby. Bistatic Specular Scattering from rough dielectric surfaces [J]. IEEE Trans, Antennas Propagation, 1994, 42: 220 - 231.

[12] L. Tsang, J. A. Kong, and R. T. Shin. Theory of Microwave Remote Sensing [M]. New York: Wiley Interscience, 1985.

作者简介:



王显德 1989 年毕业于兰州大学电信系, 1996 年获西安交通大学电信学院硕士学位. 1989 年 7 月至 1993 年 8 月在电子部二十二所从事目标瞬态电磁特性研究和冲击雷达反隐身机理与目标冲击响应研究工作. 现为西安交通大学博士生, 主要从事环境建模及其电磁散射研究.

张忠治 研究员, 1962 年毕业于武汉大学物理系, 国防科工委军用目标特性和传输特性专业组成员, 电科院电子专家委员会委员. 主要从事对流层传播、雷达目标与杂波方面的研究.

傅君眉 教授, 博士生导师, 毕业于交通大学, 主要从事电磁场与微波技术、微波通信及光通信等方面的理论研究.

(上接第 130 页)

参考文献:

[1] R. M. Walser. A study of thin film magnetodielectrics [D], Doctoral Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor. 1967.

[2] R. S. Zich, ed. Frequency selective surface [J]. Special issue, Electromagnetics, 1985, 5(4).

[3] R. E. Eaves. Electromagnetic boundary conditions for laminar regions [J]. J. Phys. D: Appl. Phys. 1972, 5: 2145- 2151.

[4] E. F. Knott and K. B. Langsdth. Performance degradation of jaumann absorbers due to curvature [J]. IEEE Trans. On Antennas and Propagation [J]. 1980, AP-28(1): 137- 139.

[5] T. B. A Senior, S. R. Legault. Diffraction by an anisotropic impedance half plane at skew incidence [M]. Electromagnetics, 18, 2, 1997: 207- 255(G. Pelosi and J.L. Volakis (eds.), Special Issue For the Centennial of Sommerfeld's Diffraction Problem, Part I).

[6] R. A. Hurd, E. Lunenburg. Diffraction by an anisotropic impedance half plane [J]. Canadian Journal of Physics. 1985, 63: 1135- 1140.

[7] H. H. Seyd, J. L. Volakis. PTD Analysis of Impedance Structures. July 1996: 983- 988.

作者简介:



吴先良 1955 年出生, 1982 年毕业于安徽大学电子工程与信息科学系, 现为安徽大学电子工程与信息科学系教授, 中国电子学会高级会员, 主要从事电磁散射、电磁理论和数值方法研究工作, 出版专著两部发表论文 30 余篇.