

# 地下目标的瞬态电磁散射\*

兰康 王建 彭仲秋

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

**摘要** 本文运用时域有限差分法(FDTD)计算埋地物体的瞬态电磁散射,研究了目标的电磁脉冲响应与介质参数和地下结构的关系,为时域探地系统的目标检测和识别提供了一定的理论依据.本文的方法适用于任意形状的柱体目标以及任意二维地下结构,也易于推广到三维的情形.

**关键词** 瞬态电磁场,散射,时域有限差分法

## 1 引言

尽管近年来时域探地雷达已在国内外得到了迅速发展,地下目标时域电磁成像的研究也取得了一些进展<sup>[1]</sup>,然而由于大地媒质的复杂性,地下目标的识别尚无成熟的方法,对实测数据的解释水平有限,因此研究目标的时域散射特性,用以进行目标成像识别,是探地雷达的重要研究课题.

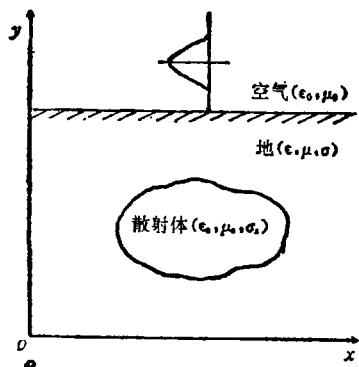


图1 埋地物体的散射计算模型

Oristaglio 等人<sup>[2]</sup>在阶跃脉冲激励下忽略位移电流后将有耗媒质中的时域波动方程简化为热传导方程,并利用差分方法进行求解,得到了埋地物体的时域散射特性,这种方法适用于宽脉冲探地系统,可以求解深层目标的散射.用窄脉冲激励时,时域波动方程不能简化为热传导方程,这种方法不再适用.本文引入时域有限差分(FDTD)法求解有耗媒质中物体的散射,得到了目标的瞬态电磁响应.这种方法简单、直观,计算效率高,便于处理任意地下结构(如分层大地媒质)和任意形状和数目的散射体的情形,能得到准确的早时响应,分辨率高.由于计算范围受硬件限制,

FDTD 法通常用于分析浅层目标的散射.

## 2 计算瞬态电磁响应的 FDTD 法

本文仅考虑二维柱体目标的散射,对于三维目标的散射具有类似的计算方法.计算模型如图1所示.设平面波自地面上方垂直入射; $(\epsilon, \mu, \sigma)$ 为地的电特性参量,可以是 $x, y$ 的变量; $(\epsilon_s, \mu_s, \sigma_s)$ 为散射体的电特性参量.

1994-01-04 收到, 1994-06-06 定稿

\* 国家自然科学基金资助项目

兰康 男, 1970年生, 博士, 从事瞬态电场理论及应用, 旋波媒质理论及应用等方面的研究工作.

王建 男, 1965年生, 讲师, 从事电磁散射和天线等方面的研究工作.

彭仲秋 男, 1943年生, 教授, 从事瞬态电磁场理论及应用方面的教学和科研工作.

在图 1 的坐标系中,激励脉冲为 TE 波时, Maxwell 方程组可化为

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_x \right).$$

根据 FDTD 法<sup>[3]</sup>,以上各式的差分格式为

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i, j) = & \left[ 1 - \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{\varepsilon(i, j)} \right] E_z^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j)\Delta x} [H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j) \\ & - H_y^{n+1/2}(i - 1/2, j)] - \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j)\Delta y} [H_x^{n+1/2}(i, j + 1/2) \\ & - H_x^{n+1/2}(i, j - 1/2)], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(i, j + 1/2) = & H_x^{n-1/2}(i, j + 1/2) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j + 1/2)\Delta y} \\ & \times [E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j) = & H_y^{n-1/2}(i + 1/2, j) + \frac{\Delta t}{\mu(i + 1/2, j)\Delta x} \\ & \times [E_z^n(i + 1, j) - E_z^n(i, j)]. \end{aligned} \quad (3)$$

尽管通常视地层为半无限介质,然而由于计算机内存和速度等运行环境的限制,我们采用吸收边界截断计算区域,在尺寸很有限的模型上模拟电磁波与目标的相互作用过程。Mur<sup>[4]</sup> 的一个吸收边界条件为

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(0, j) = & -E_z^{n-1}(1, j) + \frac{C\Delta t - \Delta x}{C\Delta t + \Delta x} [E_z^{n+1}(1, j) + E_z^{n-1}(0, j)] \\ & + \frac{2\Delta x}{C\Delta t + \Delta x} [E_z^n(0, j) + E_z^n(1, j)] + \frac{(C\Delta t)^2\Delta x}{2\Delta^2 y(C\Delta t + \Delta x)} \\ & \times [E_z^n(0, j + 1) - 2E_z^n(0, j) + E_z^n(0, j - 1) \\ & + E_z^n(1, j + 1)] - 2E_z^n(1, j) + E_z^n(1, j - 1). \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可见, Mur 的吸收边界条件对计算区域的角点不成立,为此我们取文献[5]的方法计算角点的场值:

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(0, 0) = & f_r \{ (1 - \sin \alpha)(1 - \cos \alpha) E_z^{n-1}(0, 0) + (1 - \sin \alpha) \cos \alpha E_z^{n-1}(1, 0) \\ & + \sin \alpha (1 - \cos \alpha) E_z^{n-1}(0, 1) + \sin \alpha \cos \alpha E_z^{n-1}(1, 1) \}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $f_r = [d_c / (d_c + 1)]^{1/2}$ ,  $d_c$  为计算区域对角线长度的一半,  $\alpha$  为对角线与边界的夹角。

空间网格  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , 时间步长  $\Delta t$  的选择应满足精度要求和稳定性条件<sup>[3]</sup>, 本文取  $\delta = \Delta x = \Delta y \leq \lambda / (10 \sqrt{|\varepsilon^*|})$ ,  $C_{\max} \Delta t \leq \delta / 2$ , 其中  $\varepsilon^* = \varepsilon + \sigma / (j\omega\varepsilon_0)$ ,  $\varepsilon_r$  为计算区域最大介电常数,  $C_{\max}$  为媒质中的最大波速,  $\omega$  为角频率,  $\lambda$  为自由空间波长。在空气与地,地与埋地物体的分界面,介电常数和导电率取平均值<sup>[6]</sup>  $\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2$ ,  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$ 。利用高斯脉冲模拟探地系统的激励源:

$$g(t) = \exp[-(2(t - t_0)/W)^2], \quad (6)$$

其中  $t_0$  为高斯脉冲的峰值时刻,  $W$  为高斯脉冲宽度。

### 3 算例和讨论

本文均取  $\mu_r = 1$ , 干土的电参数取  $\varepsilon_r = 5, \sigma = 0.001$ , 湿土取  $\varepsilon_r = 20, \sigma = 0.003$ ,

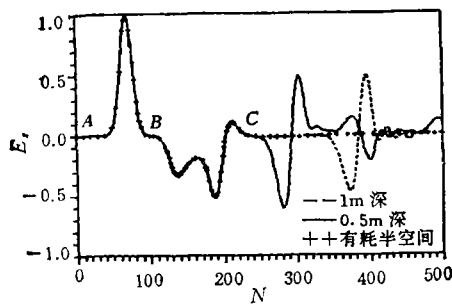


图2 不同埋地深度的金属柱体的散射

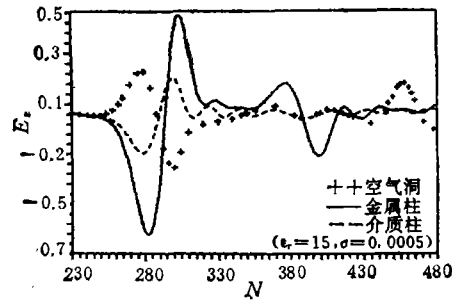


图3 不同埋地柱体的散射

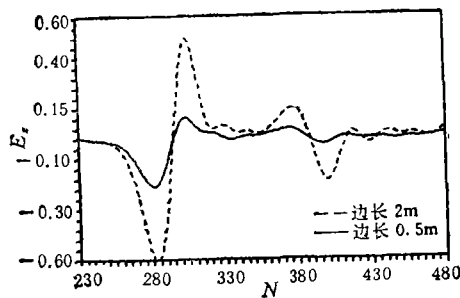


图4 相同深度不同大小的金属柱的散射

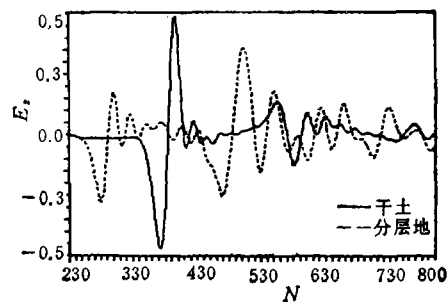


图5 分层地中金属导体的散射

高斯脉冲宽度取  $W = 2ns, t_0 = 5ns, \delta = \Delta x = \Delta y = 0.05m, C_{max}\Delta t = 0.025m$ . 空间网格  $i \times j = 80 \times 160, j = 120$  为地与空气界面, 激励脉冲加在  $j = 155$ , 即文献 [4]:  $E_z^i(i, 155) = g(n\Delta t)$ . 没有特别说明时, 文中考虑的埋地物体为边长 2m 的方柱, 埋地深度 0.5m.

图2—图5给出了埋地(干土)柱体正上方 ( $i = 40, j = 150$ ) 点记录的各时刻场点值. 在图2中,  $A-B$ 时刻为测试点入射场, 而  $B-C$ 为地面反射场,  $C$ 点以后记录的值为目标回波. 埋地深度不同, 金属柱体的回波到达测试点的时延也不同. 如果已知电磁波在地中传播的速度, 由目标回波相对于地表反射的直达波的时延可以得到埋地物体或地下分层界面的深度. 由于地面与埋地物体间的多次反射, 使得目标回波有很长拖尾, 而这些拖尾包含了目标信息. 因此探地雷达中目标的后期响应同早期响应一样可以用来展开目标识别工作, 特别是浅层目标, 其后期响应信号能量较强的情况. 由图2可见, 只要选择合理的收发时刻, 可以减小地面杂波影响而只接收目标回波. 图3—图5只给出了目标回波波形, 图3给出了大小相同, 位置相同的空气洞、介质柱、金属柱的回波, 不同异常体的散射场幅度不同, 拖尾形状也不相同, 通过比较回波波形, 可以判断目标的属性. 图4表明埋地物体大小不同, 回波幅度大小也不同. 回波波形的形状与幅度完全反映出目标特性. 图5给出了埋于湿土中 0.5m 深的金属导体的散射场, 湿土表面有一层 0.5m 厚的干土. 由于地中分层界面的反射, 杂波增加, 目标信息的提取难度增大. 图6给出的是  $N = 400$  时刻散射场空间分布, 表明不同的埋地物体对电磁脉冲传播(场分布、传播速度)的扰动不同. 文中没有列出多个目标存在时的场分布图, 通过测试地面上方水平方

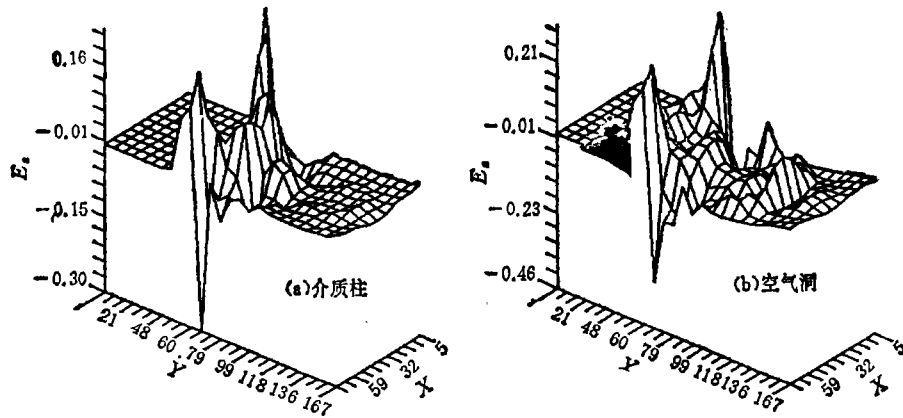


图 6  $N = 400$  时刻不同埋地物体散射场分布

向场分布,可以反映多个目标的存在,为了区分靠得很近的目标,可以减小脉冲宽度。

#### 4 结论

利用 FDTD 法可以有效地分析地下目标的电磁散射特性, 深入研究大地媒质中电磁现象的规律。利用目标回波的时延可以准确地判定目标深度; 回波波形的形状反映了目标的特性。

#### 参 考 文 献

- [1] 范国新,陈 平. 电波科学学报, 1992, 7(3): 1-20.
- [2] Oristagio M L, Hohman G W. Geophysics, 1984, 49(7): 870-894.
- [3] Taflove A, Brodwin M E. IEEE Trans. on MTT, 1975, MTT-23(8): 623-630.
- [4] Mur G. IEEE Trans. on EMC, 1981, EMC-23(4): 377-382.
- [5] Ummandar K R, Taflove A. IEEE Trans. on EMC, 1982, EMC-24(4): 397-405.
- [6] Reineix A, Jecko B. IEEE Trans. on AP, 1989, AP-37(11): 1361-1369.

## TRANSIENT EM FIELDS SCATTERING BY UNDERGROUND OBJECTS

Lan Kang Wang Jian Peng Zhongqiu

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract** Transient EM field scattering by underground objects using finite-difference method in time-domain (FDTD) is calculated, and object's response of an EM pulse related to dielectric parameters and underground structure is presented. Conclusions of this method can be used as theoretical evidences of object detecting and discriminating. The method can be applied to circumstances of arbitrary cylinder objects and two-dimensional underground structure, and can be developed to three-dimensional circumstances.

**Key words** Transient EM field, Scattering, FDTD method