

## 二维 FDTD 分析土壤及地下管道的时域散射场\*

周蔚红, 周东明, 刘克成

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 首先应用 FDTD 在二维空间内计算了土壤的时域散射场, 并与理论公式进行比较, 在一定精度下, 二者吻合得较好。进一步用 GPML 吸收边界模拟探测地下管道, 并给出了不同深度、不同直径的管道散射的数值结果。

**关键词:** FDTD; 散射; GPML

**中图分类号:** TN974      **文献标识码:** A

## An Analysis of Time-domain Scattering Field in Soil and Underground Pipe with 2-D FDTD

ZHOU Wei-hong, ZHOU Dong-ming, LIU Ke-cheng

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An analysis of time-domain scattering field has been given in soil with 2-D FDTD, and the numerical results are verified by comparing with the theory. The detecting of the underground pipe was simulated by using GPML absorbing boundary condition, numerical results of scattering of pipe are given in different sizes and different depths.

**Key words:** FDTD; scattering; GPML

土壤作为一种有耗色散媒质, 其散射特性与频率有关。从概念上讲, 即媒质参数  $\epsilon$  和  $\mu$  不再是常数, 而是随频率变化的函数。通常只有电介电常数  $\epsilon$  随频率变化, 即为电色散。目前, 运用 FDTD 处理有耗色散媒质的算法<sup>[1,2]</sup> 已比较成熟。由于计算空间中土壤和空气并存, 而土壤是有耗媒质, 因此选择了能同时吸收土壤中的凋落波, 也能吸收空气中传输波的吸收边界——GPML<sup>[2,3]</sup>, 并用它来模拟探测地下管道。

### 1 土壤散射场的建模与分析

由于地面为无限大半平面, 入射波的引入是在位于土壤上方的一半封闭面上进行的, 而非经典 FDTD 算法中的封闭源面, 因此入射波不是无限的, 而是有限的平面波源, 在吸收边界和内部计算域的连接面上会存在入射波的不连续性。因此考虑用如图 1 所示二维空间来分析地面散射, 可以大大增加所考虑地面的尺寸, 减小误差的产生。

自由空间中媒质参数为  $\epsilon_0, \mu_0$ , 土壤中电介电常数为  $\epsilon_0, \epsilon_r$ , 磁介电常数为  $\mu_0$ 。以 HH 极化为例, 将整个 2-D FDTD 计算空间分为 4 个域来考虑, 依次为: 计算域中的空气部分(域 1), 计算域中的土壤部分(域 2), GPML 中与空气相接部分(域 3), GPML 中与土壤相接部分(域 4)。注意在计算域内部, 空气与土壤的连接面上的介电常数为二者的均值。

入射波取为高斯脉冲:

$$f(t) = \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (1)$$

图 2 给出的是土壤反射与透射波的电场值。由图可知, 土壤上方的反射波在任何位置都具有相同的响应; 而在土壤下方, 由于土壤为有耗媒质, 不同深度的透射波有幅值上的差别, 并且深度越深, 衰减越大, 幅值越小。

\* 收稿日期: 2003 - 06 - 23

作者简介: 周蔚红(1972—), 女, 博士生。

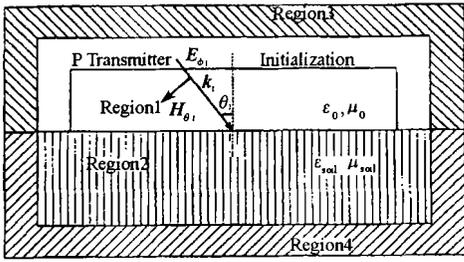


图1 2-D FDTD 土壤散射计算空间

Fig.1 Calculating range for 2-D FDTD soil scattering

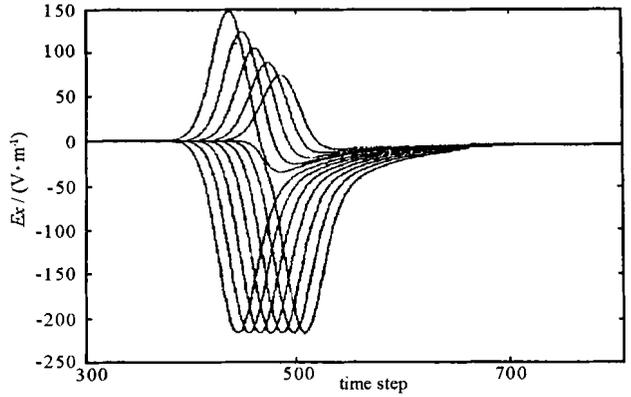


图2 土壤反射与透射波电场值

Fig.2 The reflective and transmission fields for soil

### 2 与理论公式进行比较

在 2-D FDTD 计算中, 将总散场分离界面设置在土壤上方。上部为散射场区, 下部为总场区。因为在土壤与空气的分界面上存在介质不连续性, 所以虽然切向总场满足连续条件, 但切向散射场并不连续。当平面正弦波入射时, 考虑土壤空气分离界面上一点  $S$ , 该点的入射场  $E_i$  可由解析式获取, 反射场则由 FDTD 运算求解出的总场减去该点的入射场得到。而土壤反射系数(如图 3) 可从理论上推出, 对于 HH 极化:

$$R_{th} = \frac{\cos \theta_t - \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_t + \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1 - \sin^2 \theta_i}} \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_1 = \epsilon_0$ , 为空气介电常数, 土壤介电常数  $\epsilon_2$  采用单极点模型形式, 即

$$\epsilon(w) = \epsilon_0 \left( \epsilon_f + \frac{\sigma_0}{jw \epsilon_0} \right) \quad (3)$$

理论和数值计算结果如图 4。由图可知, 在一定精度下, 二者吻合得较好。

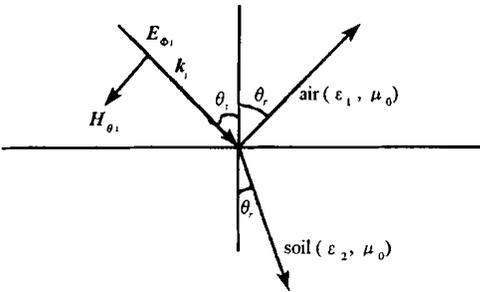


图3 土壤反射系数计算示意图

Fig.3 Sketch map for calculate soil reflection coefficient

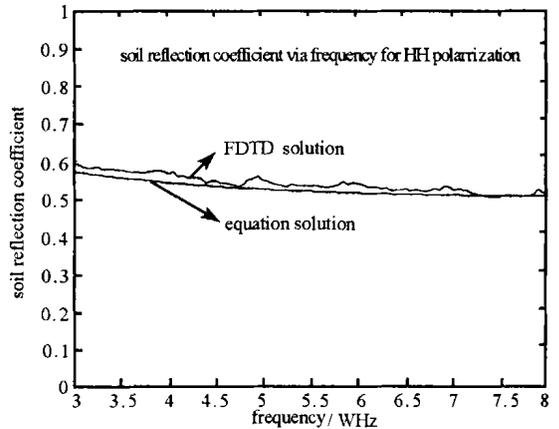


图4 土壤反射系数 FDTD 结果与公式解对照

Fig.4 Soil reflection coefficient for FDTD and theory

### 3 模拟探测地下管道

在有耗媒质中, Maxwell 方程组为:

$$\Delta_s \times \mathbf{E} = -jw \mu_0 \mathbf{H} \quad (4a)$$

$$\Delta_s \times \mathbf{H} = -jw \epsilon \mathbf{E} \quad (4b)$$

其中,  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \left[ \epsilon \pm j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right]$ ,  $\Delta_s = a_x \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x} + a_y \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} + a_z \frac{1}{s_z} \frac{\partial}{\partial z}$ , 且

$$s_x(x) = s_{x0}(x) \left[ 1 + \frac{\alpha_x(x)}{j\omega \epsilon} \right], \quad s_y(y) = s_{y0}(y) \left[ 1 + \frac{\alpha_y(y)}{j\omega \epsilon} \right], \quad s_z(z) = s_{z0}(z) \left[ 1 + \frac{\alpha_z(z)}{j\omega \epsilon} \right]$$

假设无限长管道位于土壤下方(如图 5), 该问题实际上是二维 FDTD 计算问题。考虑二维 TE 平面脉冲波入射,  $E_x = 0, \partial/\partial x = 0$ , 则有

$$\frac{\partial E_y}{S_{z0(z)} \partial z} = j\omega \mu \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} \tag{5a}$$

$$\frac{\partial E_z}{S_{y0(y)} \partial y} = j\omega \mu \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} \tag{5b}$$

$$\frac{\partial H_x}{S_{z0(z)} \partial z} = \left[ j\omega \epsilon + (\sigma + \alpha_z) + \frac{\sigma_z}{j\omega \epsilon} \right] E_y \tag{5c}$$

$$- \frac{\partial H_x}{S_{y0(y)} \partial y} = \left[ (j\omega \epsilon + (\sigma + \alpha_y) + \frac{\sigma_y}{j\omega \epsilon}) E_z \right] \tag{5d}$$

引入辅助场变量  $\partial E_y^I / \partial t = E_y, \partial E_z^I / \partial t = E_z$ , 并转换到时域, 得到

$$\frac{\partial E_y}{S_{z0(z)} \partial z} = \mu \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} \tag{6a}$$

$$\frac{\partial E_z}{S_{y0(y)} \partial y} = \mu \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} \tag{6b}$$

$$\frac{\partial H_x}{S_{z0(z)} \partial z} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + (\sigma + \alpha_z) E_y + \frac{\sigma_z}{\epsilon} E_y^I \tag{6c}$$

$$- \frac{\partial H_x}{S_{y0(y)} \partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + (\sigma + \alpha_y) E_z + \frac{\sigma_y}{\epsilon} E_z^I \tag{6d}$$

设入射脉冲波为  $E_x = \exp \left[ -\frac{(t - t_0)^2}{\tau^2} \right]$ 。数值结果如图 6。

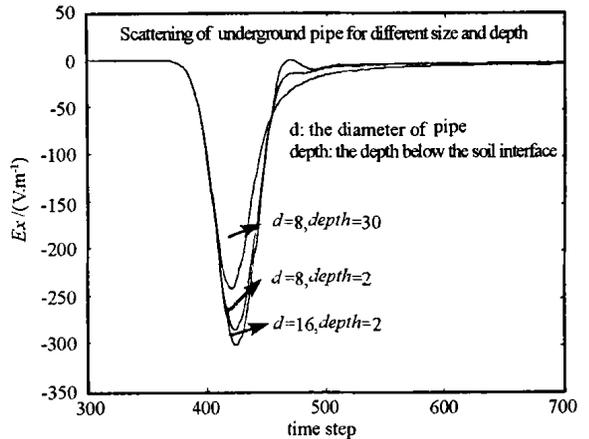
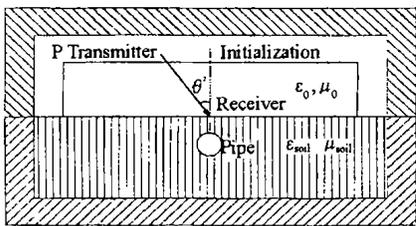


图 5 二维 FDTD 计算空间模拟地下管道散射  
Fig. 5 Simulation for scattering of pipe underground

图 6 FDTD 模拟脉冲波探测地下管道的数值结果  
Fig. 6 Solution for detecting pipe underground with pulse

由图 6 可知, 当管道位于不同深度时, 地表处接收到的回波不同, 管道尺寸不一样, 散射也有区别。当管道直径越大时, 雷达接收到的回波信号也越强, 而管道埋藏得越深, 回波则越弱。

参考文献:

[1] Gandhi O, Gao Ben-qing, Chen Ji-yuan. A Frequency-dependent Finite-difference Time domain Formulation for General Dispersive Media[J]. IEEE Trans. MTT, 1993, 41(4): 658- 664.  
 [2] Fan Guo-xin, Liu Qing Huo. An FDTD Algorithm with Perfectly Matched Layers for General Dispersive Media[J]. IEEE Trans. AP, 1995, 48(5): 637- 646.  
 [3] Fang Jiayuan, Wu Zhonghua. General Perfectly Matched Layers for the Absorption of Propagating and Evanescent Waves in Lossless and Lossy Media[J]. IEEE Trans. MTT, 1996, 44(12): 2216- 2222.  
 [4] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波的时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 194- 196.