

一种新型探地雷达天线的 FDTD 分析

刘立业 粟毅 刘克成 毛钧杰

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 探地雷达系统一般采用超宽带短脉冲信号,因而其天线系统也必须为宽带的。该文给出一种新型的探地雷达天线,该天线为置于镜像面上且具有离散指数电阻加载的单偶极子。通过 FDTD 法对该天线辐射特性的仿真计算表明,选择合适的电阻加载方式,可以消除由于天线末端阻抗不匹配而引起的二次反射,使天线具有较好的辐射波形和一定的带宽,从而满足实际探地雷达系统的需要。文中还分析了收发天线不同组合方式对直耦信号和目标回波信号的影响。

关键词 探地雷达天线, FDTD 方法, 广义完全匹配吸收层

中图分类号: TN820.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0654-04

FDTD Analysis of a Novel GPR Antenna

Liu Li-ye Su Yi Liu Ke-cheng Mao Jun-jie

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

Abstract The Ground-Penetrating Radar (GPR) systems usually use broadband electromagnetic pulse, so the antennas must be wideband and can couple electromagnetic energy into the ground. A novel GPR antenna that the dipole with discrete exponential resistive loading is above the image plane is present in this paper. Radiation characteristics of the antenna are researched through the Finite Difference Time Domain (FDTD) method. The results show that the antenna in the paper terminates the reflections at the end of antennas through resistive loading, and it can be applied in GPR systems. Several different modes of employed antennas to influence the coupled signal and the scatter signal are also studied.

Key words GPR antennas, FDTD method, Generalized perfectly matched layer

1 引言

工作于毫微秒级无载频脉冲体制下的探地雷达(GPR)是当今各种地下浅层目标非破坏性探测技术中最具有应用前景和发展前途的方法之一,近些年来得到了长足的发展,越来越受到国内外许多工程部门的关注。探地雷达主要应用于公路、桥梁、隧道、建筑和矿井的无损检测,地质勘探与研究,以及地下管线、地雷、未爆炸军火(UXO)等各种金属和非金属目标的检测、定位、成像和识别等^[1]。

天线是探地雷达系统至关重要的组成部分,它直接影响整个系统的性能。探地雷达系统一般使用超宽带短脉冲信号,从而要求天线也应具有一定的带宽和方向性以及较好的保形性。一般宽带天线在其末端处由于阻抗不连续,会形成一定的反射,从而引起发射波形的失真。所以,探地雷达天线需要采用终端加入电阻来减少其反射。到目前为止,只有几种类型的天线可以满足这种需要,如:电阻加载的蝶形天线,TEM喇叭天线及其变形以及螺旋天线等。Smith等^[2]采用时域有限差分法(FDTD)分析了有屏蔽腔和末端电阻加载的蝶形天线,天线的边缘采用梯形网格近似,但这种天线在

其末端仍然存在一定的反射。Delft大学^[3]等研究机构给出了电容和电阻渐变的蝶形天线,这种天线比一般终端加入电阻的蝶形天线在辐射特性上有较大的改善,但因加载的缝隙比较复杂,理论仿真比较困难,因此找出使天线性能最优化的参数是一个较困难的任务。Lee Kwan-Ho^[4]在天线末端加入3种不同形式的阻抗匹配卡(线性加载、平方加载和指数加载),其结果可以较好地消除天线末端的反射,但这种连续加载的R-cards难以加工实现。

FDTD方法能够方便地模拟各种复杂天线,并且通过一次计算即可获得宽频带内天线的频域特性,也可以形象地给出天线及其附近电磁波的辐射过程,这种电磁场的可视化结果为天线的设计和改进了提供了直观的物理依据^[5,6]。本文给出了一种离散指数电阻加载形式的单偶极天线,该天线通过在偶极面上进行分段集总电阻加载来消除天线末端处的反射,文中采用FDTD法计算了天线的辐射特性以及不同的收发天线组合形式对直耦信号和目标信号的影响。结果表明,通过选取合适的指数加载形式,该天线同样可以较好地消除天线末端因阻抗不连续而引起的反射,从而使其具有较好的保形性和带宽。同时因为这种形式的天线较易加工,所以能够在实际的探地雷达系统中可得到很好的应用。

2 天线的 FDTD 模型

2.1 集总加载电阻的处理

本文所介绍的离散指数电阻加载的偶极线如图1所示,锥形的振子位于镜像接地面之上并呈斜向展开,在天线振子臂上距离馈源一定距离处开始进行间隔均匀、阻值呈指数递增分布的离散电阻加载。具体选取电阻加载的形式为

$$R = R_{\min} \exp\left(\gamma \frac{x - x_0}{l}\right) \quad (1)$$

其中 $R_{\min}$ 为开始处加载的电阻值, γ 为可选的指数系数, x 为振子上任意一点距离馈源的距离, x_0 为进行电阻加载点距馈源的距离, l 为位于镜像面之上的振子长度。

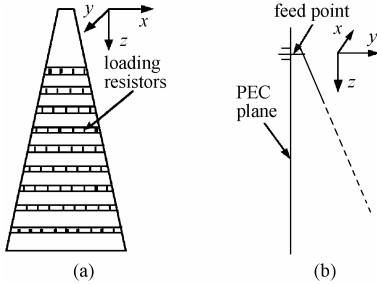


图1 离散指数电阻加载的探地雷达天线示意图
(a) 正面 (b) 侧面

Fig.1 The GPR antenna with discrete exponential resistor-loaded
(a)frontal view (b)side view

FDTD在分析电路的集总参数时,通常将其转化为分布参数。根据文献[6],FDTD差分格式中的电场分量公式修正如下所示(这里,我们仅给出 E_z 分量的差分公式,其它电场分量与之类似;而磁场分量不需要进行修正):

$$E_z^{n+1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) = \frac{C}{C + G\Delta t} E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta x \Delta y \Delta t}{C \Delta z \Delta t} \cdot (\nabla \times H^{n+1/2})_z \quad (2)$$

其中 $C = \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z}$ 表示 FDTD 网格内的集总电容;

$G = \sigma \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} = \frac{1}{R}$ 表示网格内的集总电导。因此, FDTD 电场分量的差分格式可以通过设置其网格内的 ε 和 σ 得到,本文中 ε 取自由空间中的介电常数 ε_0 。

2.2 同轴激励

本文采用文献[7]中的同轴网格与 Yee 网格的转换算法,同轴线内采用电压、电流模型。因而在同轴线与 Yee 网格的交界处有:

$$H_z^{n+1}\left(i_a + \frac{1}{2}, j_a + \frac{1}{2}, k_a\right) = H_z^{n+1/2}\left(i_a + \frac{1}{2}, j_a + \frac{1}{2}, k_a\right) - \frac{2\Delta t}{\mu_0 \Delta x \ln(\Delta x/a)} E_y^n\left(i_a + 1, j_a + \frac{1}{2}, k_a\right) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} \left[e_x^n\left(i_a + \frac{1}{2}, j_a + 1, k_a\right) - \frac{2}{\Delta x \ln(\Delta x/a)} V^n(j_a) \right] \quad (3)$$

$$I^{n+1/2}\left(j_t + \frac{1}{2}\right) = \Delta z \left[H_x^{n+1/2}\left(i_a, j_a + \frac{1}{2}, k_a + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i_a, j_a + \frac{1}{2}, k_a - \frac{1}{2}\right) \right] - \Delta x \left[H_z^{n+1/2}\left(i_a + \frac{1}{2}, j_a + \frac{1}{2}, k_a\right) - H_z^{n+1/2}\left(i_a - \frac{1}{2}, j_a + \frac{1}{2}, k_a\right) \right] \quad (4)$$

其中 a 为同轴线半径。式(3)和式(4)一起给出了描述同轴线口径处内外场之间的耦合。式(3)给出同轴线口径处电压对外部场的影响,而式(4)则给出口径外部场对同轴线内电流的影响。

因为在探地雷达应用中,背景媒质一般是有耗媒质,而 Berenger's PML^[8]只能吸收自由空间中传播的波,而不能很好地吸收有耗媒质中的凋落场。因而本文将采用能够用于有耗媒质的广义完全匹配吸收层(GPML)^[9]。GPML吸收边界条件实质上是对Berenger's PML的推广,其比PML更加适用于有耗媒质中电磁场传播的计算。

3 天线辐射特性分析

3.1 加载电阻的影响

在地下目标浅层探测应用中,所研究的目标和地面都处于天线的近场区,因而我们主要分析距离天线较近区域的辐射场。图1所示的天线模型参数如下所示:系数 $\gamma = 8.0$; 振子长度 $l = 20\text{cm}$, 底面宽度 10cm ; 接地板大小为 $30\text{cm} \times 20\text{cm}$; 振子与接地面的夹角为 20° ; 电阻加载起始位置 $x_0 = 4\text{cm}$, 电阻值 $R_{\min} = 2.5\Omega$; 振子臂上电阻加载的层数为15,其纵向间距为 1cm 。在FDTD模拟计算中,选取空间步长为 0.5cm 。激励源信号为高斯脉冲微分形式:

$$v(t) = v_0 \frac{(t - t_0)}{\tau} \exp\left\{-\frac{(t - t_0)^2}{\tau^2}\right\} \quad (5)$$

其中 $v_0 = 2.5\text{V}$, $t_0 = 0.667\text{ns}$ 和 $\tau = t_0/4$ 。

图2所示为进行电阻加载前后,空间某观察点(天线口面正下方,距离馈源 50cm)处的辐射电场时域波形。由图中结果可知,未进行电阻加载的天线因为其末端阻抗不匹配而产生多次反射,这种多次反射信号会与目标信号重叠,从而很难加以区分。而进行阻抗加载后,使天线上的电流呈行波分布,从而消除了这种多次反射,但加入电阻加载会使天线的辐射场变小,即天线发射波形的改善是以牺牲天线的辐射效率为代价的。

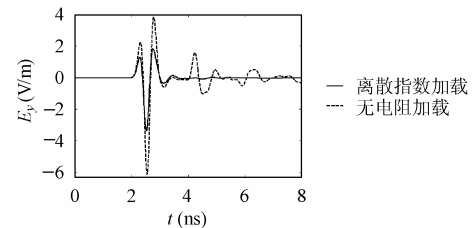


图2 电阻加载对天线辐射场的影响
Fig.2 The radiation waveform with/without resistor-loaded

3.2 天线辐射特性

FDTD 所计算的天线在 E 面(YOZ 平面——位于镜像面中心且垂直于镜像面)和 H 面(XOZ 平面)的“方向图”以及不同角度的辐射场如图 3 所示(天线的参数同上)。这里, 给出的场强度为电场 E_y 分量瞬态场的峰-峰值, 观察点馈源距离 $R=0.5\text{m}$ 。

由图中的结果可知, 天线在 E 面上具有一定的方向性; 在 H 面上具有较宽的方向性; 在口面下方的辐射场均具有较好的保形性, 因而收发天线沿 H 面移动有利于地下目标的检测和成像。天线存在一定的后向辐射, 但其辐射场在空间传播中快速凋落。

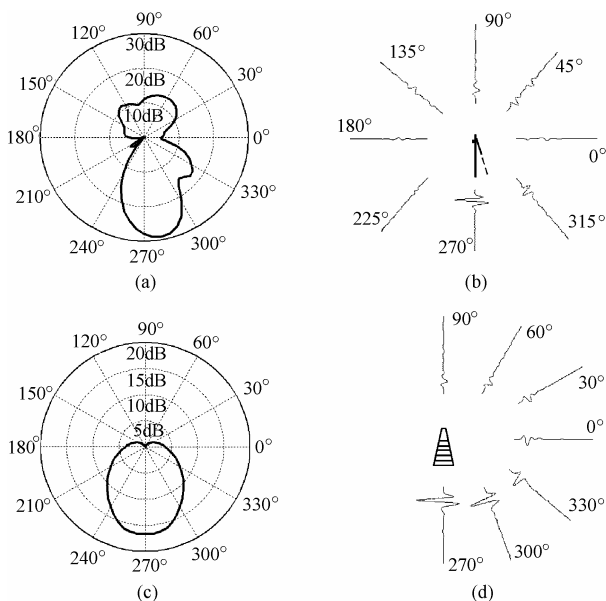


图3 天线“方向图”和不同方向上的辐射波形
(a) E 面“方向图”, (b) E 面不同角度的空间辐射场,
(c) H 面“方向图”, (d) H 面不同角度的空间辐射场

Fig.3 The radiation patterns and waveforms of E_y component in E plane and H plane

(a) Radiation pattern in E plane (b) Radiation waveforms in E plane
(c) Radiation pattern in H plane (d) Radiation waveforms in H plane

3.3 有耗媒质对天线辐射特性的影响

一般来说, GPR 系统的天线是近地面放置的(距离地面只有几~几十厘米), 所以其辐射特性会受到无限大有耗媒质界面(地面)的影响, 尤其对于一些平面天线(如蝶形天线), 这种相互作用更加明显。在此, 我们将分析文中的天线位于有耗媒质上方时其电磁辐射特性。图 4 给出了天线(接地板最下端)距离地面(介电参数为 $\epsilon_r=16.0$ 和 $\sigma=0.1\text{S/m}$)不同高度时, 土壤中某观察点(位于馈源正下方地面下 5cm)处的辐射电场。

由图 4 可以看出, 当天线位于有耗媒质上方时, 媒质对天线产生的加载作用很小, 基本上可以忽略。这主要是因为天线上的电流呈行波分布, 其末端的电流很小, 而且天线馈源处距离地面具有一定的高度, 因此对于中心频率在 1GHz

以上的脉冲信号而言, 高度对天线辐射场影响不大。所以在进行地下目标检测应用中, 为使耦合到地下的能量增加, 应该使天线尽可能靠近地面。

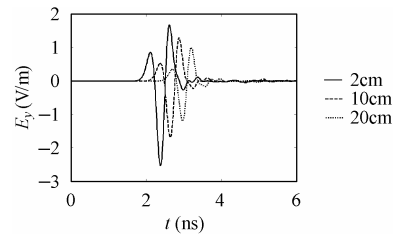


Fig.4 天线位于有耗媒质上方时的辐射场
Fig.4 The radiation waveforms of the antenna
for various heights above lossy half-space

3.4 收/发天线不同组合形式对直耦和目标信号的影响

探地雷达天线系统一般由置于地面上的收/发两个天线组成, 这时接收天线所接收到的信号由以下几部分组成: 收发天线之间的直接耦合信号(D); 地面直接反射回波(G); 地下目标反射回波信号(S)以及系统噪声和干扰信号。对于文中的天线而言, 不同的组合方式将影响收发天线之间的直耦信号以及地下目标的散射回波信号。为检测地下目标, 收发天线应该保持相同的极化方式, 所以天线可采用的 4 种不同的组合形式如图 5 所示。

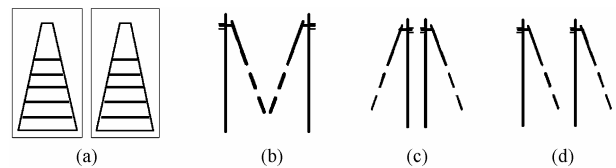


图5 收发天线不同的组合方式
(a)方式1 (b)方式2 (c)方式3 (d)方式4

Fig.5 The several different used modes about transmitter/receiver antennas (a) mode 1 (b) mode 2 (c) mode 3 (d) mode 4

表 1 给出了在以上 4 种方式下, 收发天线间的直耦信号、地面反射信号和去除直达波(天线直耦信号和地面反射信号)后的目标散射回波信号及其之间的比例关系。计算中, 假定土壤为无限大的均匀有耗媒质, 其介电参数为 $\epsilon_r=5.0$ 和 $\sigma=0.05\text{S/m}$; 目标体为截面 $5\times 5\text{cm}^2$, 长 35cm 的金属长方体, 上底面埋深 10cm, 其轴线与天线极化方向平行; 收发天线位于目标的正上方, 其接地板下端距离地面高度为 10cm, 天线激励信号如式(5)所示。在方式 1 中, 收发天线馈源间距 21cm; 其它 3 种方式中, 镜像面间距分别为 25, 10 和 15cm。整个计算区域采用 GPML 边界条件进行截断。表 1 中的数据

表 1 4 种不同收发天线组合方式下的直耦信号和目标信号

	方式 1	方式 2	方式 3	方式 4
直耦信号(D)	0.0963	0.0267	0.0054	0.0366
地面反射(G)	0.0710	0.0073	0.0029	0.0183
$ D+G / G $	1.4896	3.6591	2.3248	2.0052
目标信号(S)	0.0108	0.0024	0.0010	0.0055
$ D+G / S $	5.8805	11.3152	6.6585	6.6678

均为接收天线接收到的时域信号的峰-峰值。

从表中的结果可知,不同天线组合方式对直耦信号和目标信号均存在较大的影响。虽然方式1的直耦波和地面反射波均最大,但其 $|D+G|/|G|$ 和 $|D+G|/|S|$ 均相对最小,这就是说,不论是在路面分层还是地下目标检测应用中,方式1的信杂比相对最大,因而为最佳选择。

除了选择合适的收发天线组合方式之外,也可以采用其他办法减小直耦信号。对于本文天线而言,因为直耦信号主要来自于馈源和侧面处的耦合,而从天线口面处的耦合信号相对较小,所以如果能够减小馈源处的耦合信号则可在一定程度上提高整个系统的信杂比。减小直耦信号的方法主要有两种:(1)对于每个收发天线均加入屏蔽腔和吸波材料。屏蔽腔和吸波材料的加入可以减小收发天线之间的直耦信号,提高系统的信杂比,同时也可以减小外部物体和外部射频信号等噪声的干扰,但会降低天线的辐射效率。(2)加大馈源端的距离,减小天线口面间的距离,即收发天线按一定角度倾斜放置。这种方式在减小收发天线间直耦信号的同时也增加了收发天线辐射的重叠区域,因此可提高系统的信杂比。

4 结束语

探地雷达系统要求天线具有较好的辐射波形,因此需要在天线末端加入电阻来消除其多次反射的影响。本文给出了一种离散指数加载的探地雷达天线,并采用FDTD法分析了该天线的电磁辐射特性。结果表明,通过选择合适的镜像面上的偶极天线长度和所加载的电阻分布,就可以很好地消除天线末端的反射影响,但这是以牺牲天线的效率为代价。通过天线在E面和H面上的“方向图”和不同角度的辐射波形可以看出:天线在E面上具有一定的方向性,在H面上具有较好的全向性,因此收/发天线沿H面移动有利于地下目标的检测和成像。

本文还分析了几种收发天线的组合使用方式对直耦信号和目标回波信号的影响。当收发天线镜像面位于同一平面上时,目标信号相对于直达波最大,系统的信杂比最大、效果最佳,从而有利于路面分层检测和地下目标检测等应用。为进一步减小直耦信号以及减小外部物体和噪声的影响,可

考虑对收发天线进行屏蔽处理。

参考文献

- [1] Peters Jr. L, Daniels J J, Young J D. Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool. *Proc. IEEE*, 1994, .82(10): 1802 – 1822.
- [2] Bourgeois J M, Smith G S. A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment. *IEEE Trans.on Geosci. Remote Sens.*, 1996, 34(1): 36 – 44.
- [3] Lestari A A, Yarovoy A G, Ligthart L P. An efficient ultra-wideband bow-tie antenna. <http://irctr.et.tudelft.nl/GPR/PDF/Publications/2001/>
- [4] Lee Kwan-Ho, Venkatarayalu N V, Chen Chi-Chih. Numerical modeling development for characterizing complex GPR problems. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, SPIE, 2002, 4758: 652 – 656.
- [5] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 168 – 186.
- [6] Kunz K S, Luebbers R J. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic. Boca Raton: CRC Press, 1993: 185 – 201.
- [7] Maloney J G, Shlager K L, Smith G S. A simple FDTD model for transient excitation of antennas by transmission lines. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1994, 42(2): 289 – 292.
- [8] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Physics*, 1994, 114(10): 185 – 200.
- [9] Fang Jiayuan, Wu Zhonghua. Generalized perfectly matched layer for the absorption of propagating and evanescent waves in lossless and lossy media. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 1996, 44(12): 2216 – 2222.

刘立业: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向包括地下目标的电磁散射特性分析及数据解译等。

栗毅: 男, 19601年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括雷达信号处理、遥感信息处理和目标识别等。