

文章编号:1000-582X(2007)02-0050-03

FDTD/MOMTD 混合方法在探地雷达散射问题中的应用*

周超,俞集辉

(重庆大学 电气工程学院,重庆 400030)

摘要:为了分析和研究探地雷达的地下散射问题,构建了时域有限差分法和时域矩量法相结合的混合方法,并采用该混合方法进行仿真,当散射良导体距离地面高度不同时,计算得出探地雷达接收天线中心馈电点的电流波形,通过定性和定量分析证明该混合方法所得的结果的正确性。

关键词:时域有限差分法;时域矩量法;混合方法

中图分类号:TN959

文献标识码:A

探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称GPR)方法是一种用于确定地下介质分布的广谱(1MHz~1GHz)电磁技术.利用探地雷达的一个天线发射电磁波,另一个天线接受来自地下介质的反射波.考虑到电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场量强度及其波形将随所通过介质的电性质和几何形态而变化.于是,可根据接收到电磁波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形等信息,来分析、推测地下介质的分布和结构特征.由此可反映出探地雷达的广阔应用前景.

探地雷达的应用,其关键点是复杂的地下散射电磁场的数值仿真,它已受到人们广泛的关注.考虑到探地雷达发射和吸收的都是瞬态脉冲波,若采用时域方法分析探地雷达应当比采用频域方法会显得方便有效.时域有限差分法^[1-2](FDTD)对于复杂情况的电磁散射问题有着广泛的应用,而时域矩量法^[3-4](MOMTD)对于处理脉冲天线辐射问题有着良好的表现.文献[5]的作者充分利用它们的长处,把这2种方法结合起来形成了其混合方法.文献[6]的作者应用其混合方法计算基站天线的吸收电磁能量的比值,得到了很好的效果.该论文将其混合方法用以求解探地雷达的地下散射问题.

1 FDTD/MOMTD 混合方法的构成思路

对于麦克斯韦旋度方程

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{J}_m. \quad (2)$$

FDTD在空间和时间上采取交替抽样的离散方式^[3],每一个 \mathbf{E} (或 \mathbf{H})场分量周围有4个 \mathbf{E} (或 \mathbf{H})场分量环绕,形成了将麦克斯韦旋度方程转化为含时间变量的一组差分方程,并在时间轴上逐步推进地求解空间分布的电磁场.

用MOMTD处理电场积分方程

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \nabla \Phi(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV', \quad (4)$$

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'. \quad (5)$$

在一维情况下,对式(3)-(5)进行离散化^[4-5],从而逐步求解出各时间步上各个离散点的时变电流密度 \mathbf{J} 和时变电荷密度 ρ ,再据此求解空间任意点的 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} .其中

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t). \quad (6)$$

若使用这2种方法考虑在时间上同步,在计算空间上相吻合^[1-2].先利用MOMTD式(3)-(5),以及由FDTD方法解得的散射体在天线上的散射电场,根据在良导体的切向总电场为零的条件,来求解 S 面内天线的时变电流密度 \mathbf{J} 和时变电荷密度 ρ ,再利用式(3)和式(6)和已经求得的前面时刻的 \mathbf{J} 和 ρ ,求解得到 S

* 收稿日期:2006-09-06

作者简介:周超(1979-),男,重庆大学硕士研究生,主要从事电磁兼容及环境保护的研究.俞集辉,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):023-65112230;E-mail:yujihui@cqu.edu.cn.

衔接面上的天线辐射电场 E_i 和磁场 H_i , 它们将是 S 面外和 T 面内的总电磁场的已知激励条件(总场边界条件), 如图1所示. 然后, 运用 FDTD 的计算公式(1) - (2) 及其总场边界条件求得在 S 面外和 T 面内的总场和在 S 面内由散射体引起的散射场.

这样, 利用了 MOMTD 和 FDTD 2 种方法的各自特色和优势, 构成了同步求解探地雷达散射问题的 FDTD/MOMTD 混合方法.

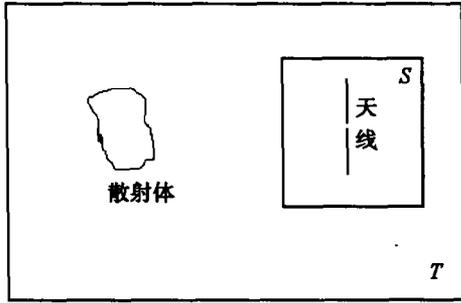


图1 MOMTD/FDTD混合方法求解区域示意图

2 FDTD/MOMTD混合方法的实现

用 MOMTD/FDTD 混合方法来求解图2所示的探地雷达天线辐射和地下散射体的散射问题, 其具体实现步骤如下:

1) 基于图2所示探地雷达, 构造出雷达天线辐射和地下散射体散射计算图, 如图1所示. 整个问题求解区域分解成2个部分, 一个是采用 MOMTD 分析计算的 S 闭合面内的天线辐射区域, 另一个是采用 FDTD 计算的包括散射体在内的 T 闭合面所包围的整个散射区域.

2) 通过天线各离散点前面时间步的电流密度 J 和 ρ 电荷密度(设置在开始时刻的前面需要时间步的电流密度 J 和电荷密度 ρ 为零), 以及用 FDTD 计算的在天线位置被散射体散射的切向电场, 并根据在良导体的切向总电场为零的条件, 应用 MOMTD 计算出当前时刻的电流密度 $J^{n+\frac{1}{2}}$ 和电荷密度 ρ^n .

3) 应用 MOMTD 计算出天线在其天线区域边界 S 面辐射产生的电场 E_i^n 和磁场 $H_i^{n+\frac{1}{2}}$ 作为整个空间 S 面外的人射场.

4) 应用 FDTD 中人射波的加入方法(总场边界条件)^[3] 处理在 S 面上的人射场 E_i 和 H_i , 从而可计算在 S 面外和 T 面内由天线辐射和散射体散射共同作用而引起的电场 E^n 和磁场 $H^{n+\frac{1}{2}}$, 以及在 S 面内仅由散射体散射引起的在天线处的切向电场 E^n 和切向磁场 $H^{n+\frac{1}{2}}$. 最后返回第2步反复循环执行.

按照以上步骤循环执行, 可以求解得到各时间步

在 S 面外总的电场 E 和磁场 H , 在 S 面内仅由散射体散射作用引起的电场 E 和磁场 H 以及天线各离散点的电流密度 J 和电荷密度 ρ .

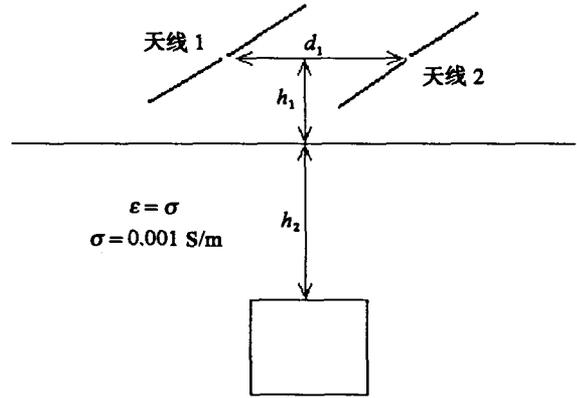


图2 探地雷达仿真实例示意图

3 实例仿真与结果分析

探地雷达仿真实例如上图2所示, 按照上节中所讲述的 MOMTD/FDTD 混合方法计算步骤, 对其实例进行计算仿真, 并对其结果进行分析.

在图2中, 发射对称振子线天线1和接收对称振子线天线2平行排列且相距 $d_1 = 0.6$ m, 位于距地面高度为 $h_1 = 0.3$ m 的平面内, 在距离地下 h_2 的深度处有边长为 0.6 m 的正方体的良导体. 其地下土壤的相对介电常数, 电导率. 对称振子的长度 $L = 0.32$ m, 半径 $r = 0.0033$ m. 在发射天线的中心馈电点加上高斯脉冲激励电压

$$V_i(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-3T}{T}\right)^2\right], \quad (7)$$

其中, $T = 2$ ns.

当散射良导体距地面的距离 $h_2 = 1$ m 时, 应用 FDTD/MOMTD 混合方法求解得到的接收天线2中心馈电点的电流波形如图3所示.

当散射良导体距地面的距离 $h_2 = 2$ m 时, 应用 FDTD/MOMTD 混合方法求解得到的接收天线2中心馈电点的电流波形如图4所示.

对2种情况的计算结果进行比较, 在20 ns前, 2种情况的接收天线2的电流波形相同, 都是接收天线2接收到的由发射天线1发射来的和由地面反射的脉冲电磁波. 在图3中, 接收天线2在25 ns左右接收到由在地下1 m深处的散射良导体反射回来的电磁波; 在图4中, 接收天线2在40 ns左右接收到由在地下2 m深处的散射良导体反射回来的电磁波. 这是由于电磁脉冲波在地下行走的距离在图4情况下是图3情况下的2倍, 所以图4情况下接收天线2接收到散射体反射信号的时间将近图3情况下的2倍. 在图3中,

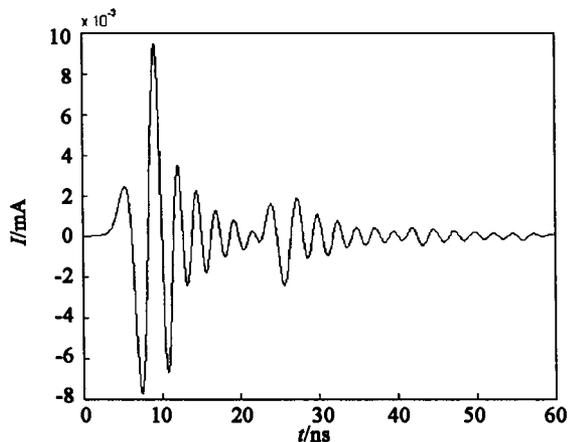


图3 当 $h_2 = 1$ m 时接收天线 2 中心点电流

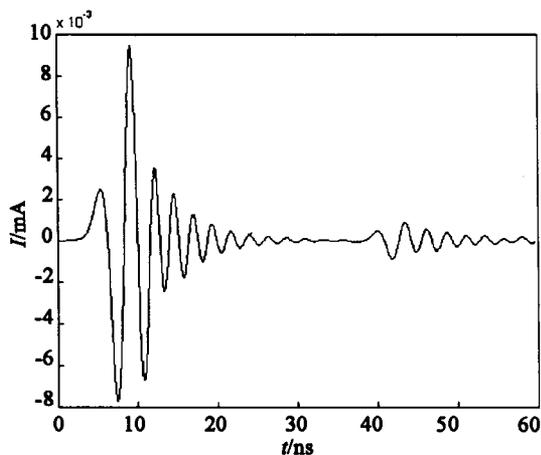


图4 当 $h_2 = 2$ m 时接收天线 2 中心点电流

电流波形在到达 40 ns 时有增加的趋势,这是因为在地下被散射体反射的电磁波在反射回地面时又再次受到地面向下的反射,再经过一次散射体的反射再被接收天线 2 接收. 经上述定性分析,可以看出其用 MOMTD/FDTD 混合方法仿真的结果是基本符合实际情况的.

脉冲电磁波虽然在地下有耗媒质中波速是随着频率色散的,但脉冲波频谱是由频率为零向频率越高的方向衰减的,并且地下土壤的电导率 $\sigma = 0.001$ S/m 并不高. 于是,在这里近似把在地下传播的电磁波按照在没有色散电导率的介质中处理,其传播速度为

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{1}{c \sqrt{\epsilon_r}},$$

找出接收天线 2 在 20 ns 前接收到的由发射天线 1 发射和地面反射电磁波所产生的电流为最小值的时刻 t_1 ,再找到接收天线 2 在 20 ns 后接收到的由地下散射

体反射回来的电磁波产生的电流为最小值的时刻 t_2 ,计算脉冲电磁波由发射天线 1 发射,经过地下散射体反射后再由接收天线 2 接收到该信号的整个过程时间 $t_0 = t_2 - t_1$. 根据电磁波经地下散射体反射传播的时间 t_0 ,天线距地面的距离 h_1 ,发射天线 1 和接收天线 2 的距离 d_1 ,电磁波在地面上空气中传播的速度 c ,以及电磁波在地面下土壤中传播的速度,反过来求出地下散射体距离地面的深度. 按照以上所述的方法,计算出在图 3 情况下和图 4 情况下散射物体距离地面的深度分别为 1.01 m 和 2.02 m,这和当初仿真计算设定的情况相差不大. 通过上述定量的分析,可以说明用 MOMTD/FDTD 混合方法仿真的结果是比较准确的,并且说明根据接收天线接收得到的信号波形可以大概的得出散射体的深度和得到一些相应的分析信息.

4 结论

综合了 FDTD 计算有耗媒质散射问题和 MOMTD 计算天线辐射问题各自的优点,建立了 FDTD/MOMTD 混合方法,并用于求解探地雷达的地下散射问题. 该混合方法对探地雷达地下散射问题的仿真结果与实际情况分析基本符合,其计算结果比较准确,其仿真所得波形对探地雷达的反演成像以及信号识别有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [2] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 程引会, 周辉, 张广发. 二维电场积分方程时域矩量求解方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(1): 51-55.
- [4] 谢秦川, 刘顺昆, 陈雨生. 细线结构时域电场积分方程的有限差分求解[J]. 电波科学学报, 2000, 15(1): 45-48.
- [5] RUBIO BRETONES A, MITTRA R, GOMEZ MARTIN R. A hybrid technique combining the method of moments in the time domain and FDTD[J]. IEEE Microwave And Guided Wave Letters, 1998, 8(8): 281-283.
- [6] LAUTRU D, WIATR J, TABBARA W, et al. A MOMTD/FDTD hybrid method to calculate the SAR induced by a Base Station Antenna[C] // Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE. Salt Lake City: [s. n], 2000: 757-760.

PID Control for Multivariable System Based on Ameliorative RBF Neural Networks

LI Shao-ming, LIU Ying-hu

(School of Electrical Engineering & information, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: Aiming at systems which are of characteristics of multi-input and multi-output, nonlinearity and time-variation in the industrial control fields, this paper presents a intelligent PID control method based on ameliorative RBF neural networks, which constructs RBF neural networks identifier on-line and identifies a controlled object on-line by means of adopting the nearest neighbor-clustering algorithm, and adjusts parameters of PID controller on-line and realizes decoupling control of multivariable, nonlinear and time-variation system. The simulation result indicates that the controller can get parameters which are optimal under some control law, it makes the decoupled system, compared to the PID control method based on the conventional RBF neural networks, has perfect dynamic and static performances, possesses the advantages of high precision, quick response speed and is of great adaptability and robustness.

Key words: ameliorative RBF neural networks; nonlinear and time-variation system; PID control; nearest neighbor-clustering algorithm; decoupling control

(编辑 侯 湘)

(上接第52页)

Application of a FDTD/MOMTD Hybrid Method to the Scattering Problem of the Ground Penetrating Radar

ZHOU Chao, YI Ji-hui

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to analyze and research the scattering problem of the ground penetrating radar under the ground, a hybrid method combining FDTD and MOMTD is constructed to solve the problem. The curve of current on central feeding point of pick-up antenna is obtained by simulating when different distance between the ideal conductor and the ground is considered. correctness of the result gained by employing the hybrid method is proved through qualitative and quantitative analysis.

Key words: finite difference time domain; method of moments in the time domain, hybrid method

(编辑 姚 飞)