

# 路面材料介电常数非均匀模型雷达电磁波模拟

蔡迎春<sup>1,2</sup>, 王复明<sup>\*2</sup>, 刘俊<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2. 郑州大学 环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对实际路面材料颗粒的随机分布特点以及离散颗粒对电磁波的散射事实, 建立了半空间路面雷达电磁波一维时域有限差分(1D-FDTD)方程, 实现了沥青路面材料均匀和非均匀介电常数两种模型的空耦合天线雷达电磁波正演模拟, 并对以上两种模拟波与实测波形进行了对比分析. 结果表明: 路面材料的非均匀介电常数模型更加符合工程实际, 为路面雷达进一步精确检测厚度及其他应用提供了新的方法.

**关键词:** 路面雷达; 一维时域有限差分法; 非均匀的; 介电常数

**中图分类号:** U412.2 **文献标志码:** A

## 0 引言

路面雷达(ground penetrating radar, 简称GPR)因其无损伤、高效率、低成本和高分辨率成像等优点, 已成为路面厚度和相关病害的重要检测工具之一<sup>[1]</sup>, 广泛应用于路面的质量评价和养护管理. 一般情况下, 在模拟路面雷达电磁波于路面结构层传播时, 往往都是假设路面各层材料介电特性为均质的<sup>[2]</sup>. 但实际路面工程中, 材料介电特性的完全均匀性很难满足. 比如沥青路面, 沥青混合料是由不同粒径和级配的骨料、沥青、空气、水(常称“四相”)等材料混合而成, 甚至一些学者提出沥青混合料介电常数是这四相材料的介电常数及其体积比的函数<sup>[3]</sup>. 而这些材料颗粒的分布完全是随机组合的, 因此考虑材料介电常数的随机非均匀分布进行雷达电磁波模拟, 能够更加真实体现材料的组合特点, 更合理再现雷达电磁波在路面中传播的真实性.

时域有限差分(FDTD)法经过40多年的发展已成为一种成熟的电磁数值计算方法, 应用范围涉及几乎所有电磁领域. 同其他方法相比, 它具有适应性广、存储量小、运算快、程序通用以及适于并行计算等特点. 而雷达作为时域瞬态电磁场

理论发展过程中的重要成果, 其基本原理符合电磁学理论. 因此, 本文采用一维时域有限差分(1D-FDTD)法模拟路面非均匀分布介电常数的雷达电磁波传播的回波波形, 将差分网格电磁特性设为随机分布, 以便易于实现.

## 1 路面雷达电磁波在路面结构层传播的1D-FDTD差分方程

### 1.1 1D-FDTD差分方程

在一维直线坐标体系下, 采用Yee氏<sup>[4]</sup>网格剖分原则对路面雷达电磁波在路面结构层体层状体系传播空间进行剖分, 建立如图1所示的计算模型. 图1(a)中, 第1层为自由空间, 第2层为路面面层, 第3层为路面基层. 图1(b)为一维FDTD剖分后的一个yell元胞单元中的电场和磁场分布. 选取一个有限FDTD计算区域为 $0 \leq y \leq y_1$ .

根据文献[4], 对于有耗媒质中无源区域的Maxwell方程一维问题, 设电磁波沿方向y传播, 介质参数和场量均与x、z无关,  $\partial/\partial x = 0, \partial/\partial z = 0$ . 可得到一维的电磁波传播Maxwell方程(其中H为磁场强度; E为电场强度;  $\epsilon$ 为介质介电常数;  $\mu$ 为磁导率, 在实际的路面工程中, 路面材料的磁

导率一般选取为  $1.0$ ;  $\sigma$  为电导率):

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_x}{\partial y} &= \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} &= -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

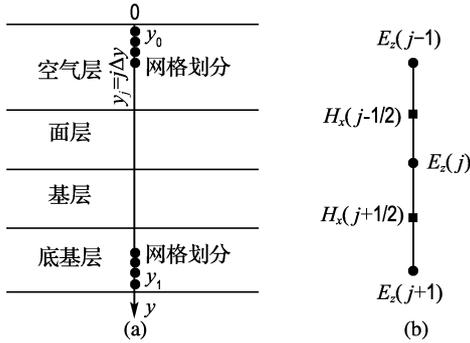


图1 分析模型与雷达电磁场的网格节点分布

Fig.1 Analytical model and grid node distribution of electromagnetic field

对方程(1)进行关于时间和空间的一阶偏导中心差分,可得计算空间各个网格的1D-FDTD离散差分形式方程(2)、(3):

$$E_z^{n+1}(j) = CA(j)E_z^n(j) - CB(j)[H_x^{n+1/2}(j + 1/2) - H_x^{n+1/2}(j - 1/2)]/\Delta y \quad (2)$$

$$H_x^{n+1/2}(j + 1/2) = H_x^{n+1/2}(j + 1/2) - CQ(j) \times [E_z^n(j + 1) - E_z^n(j)]/\Delta y \quad (3)$$

其中

$$CA(j) = \frac{1 - \frac{\sigma(j)\Delta t}{2\epsilon(j)}}{1 + \frac{\sigma(j)\Delta t}{2\epsilon(j)}}, CB(j) = \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon(j)}}{1 + \frac{\sigma(j)\Delta t}{2\epsilon(j)}}$$

$$CP(j) = 1, CQ(j) = \frac{\Delta t}{\mu(j)} = \Delta t \quad (4)$$

## 1.2 吸收边界条件

由于计算机容量的限制,在实际计算中,FDTD只能在有限区域进行,而这样的假设会出现非物理的电磁波反射,严重影响计算的精度.所以必须设置相应的吸收边界条件,以保证电磁波在边界上保持外向行进的特征.本文选取FDTD计算区域为  $0 \leq y \leq y_1$ ,因此必须在  $y = y_0, y = y_1$  两点处设置吸收边界条件.本文采用Mur的一阶近似吸收边界条件<sup>[5]</sup>,其FDTD差分公式推导基本过程如下.

由于雷达电磁波本身是个波的传播过程,考察一维波动方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

它可分解为2个单向波方程:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \varphi &= 0 \\ \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \varphi &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

当边界上电磁场满足式(6)时,电磁场仍是单向波形式,不产生反射,这就是Mur一阶吸收边界条件.由于边界上只存在电场强度,用电场强度  $E$  代替式(6)中变量  $\varphi$ .这样式(6)中的两个方程就分别代表了  $y = y_0, y = y_1$  两吸收边界点处的微分方程.对以上两个方程按照FDTD差分原则进行时间空间偏导中心差分,可得本文的Mur一阶近似吸收边界FDTD差分形式(7)、(8)( $v$ 为光的传播速度):

$$E_z^{n+1}(y_0) = E_z^n(y_0 + 1) + \frac{\frac{v}{\sqrt{\epsilon(y_0)}}\Delta t - \Delta y}{\frac{v}{\sqrt{\epsilon(y_0)}}\Delta t + \Delta y} \times [E_z^{n+1}(y_0 + 1) - E_z^n(y_0)] \quad (7)$$

$$E_z^{n+1}(y_1) = E_z^n(y_1 - 1) + \frac{\frac{v}{\sqrt{\epsilon(y_1)}}\Delta t - \Delta y}{\frac{v}{\sqrt{\epsilon(y_1)}}\Delta t + \Delta y} \times [E_z^{n+1}(y_1 - 1) - E_z^n(y_1)] \quad (8)$$

## 2 路面材料非均匀介电常数雷达电磁波模拟

### 2.1 模型建立

该模型主要针对空气耦合天线探地雷达,模型基本参数为网格尺寸及时间步长  $\Delta y = 2.5 \times 10^{-3}$  m,  $\Delta t = 5 \times 10^{-12}$  s,按照上述计算理论实现了1D-FDTD介电常数均匀和非均匀分布的计算.

### 2.2 理论算例

设计如下的路面结构:面层厚度为30.0 cm,基层厚度为30.0 cm,底基层厚度为50.0 cm;对应的面层、基层及底基层的介电常数分别为6.0、12.0、18.0,它们的电导率分别为0.01、0.02、0.03.选择面层介电常数按非均匀分布3种模型:即平均值为6.0,而标准差分别为0、0.5、1.0,采用图2所示的入射波,可模拟得到图3所示的雷达回波对比.

从理论分析可知,非均匀和均匀(图 3 中变异系数为 0)分布的介电常数对雷达回波影响明显.

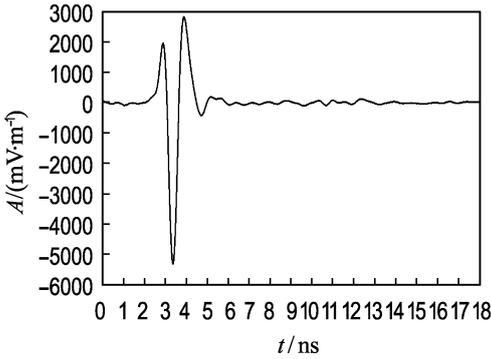


图 2 路面雷达入射波

Fig. 2 GPR incident waveform

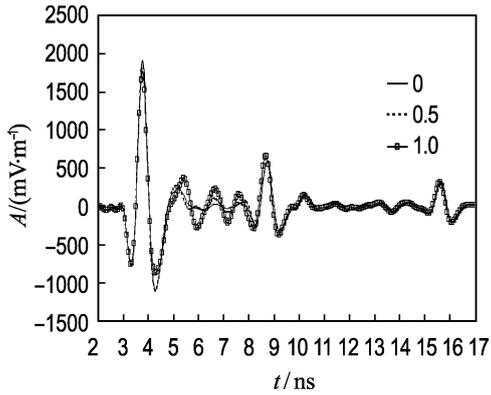


图 3 面层非均匀分布的路面雷达模拟回波

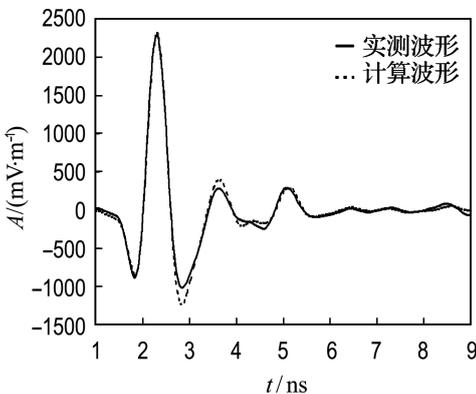
Fig. 3 The GPR wave reflected from surface of inhomogeneous dielectric

### 2.3 实际算例

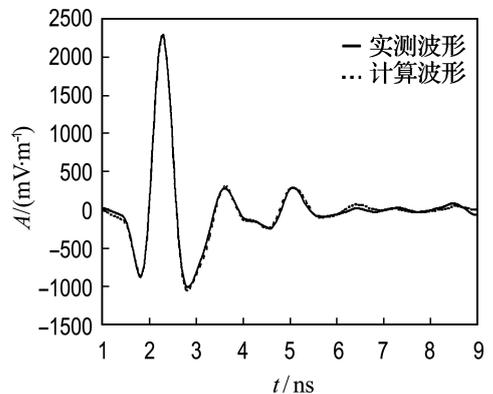
由于只考虑基层以上的雷达反射波,空气层及路面基层厚度分别固定为 16.25、30.00 cm,空

气介电常数选取为 1.0;基层介电常数采用均匀分布;而面层内部介电常数分别按照均匀和正态非均匀分布两种情况选取.当按均匀分布选取时,面层均匀介电常数采用介电常数仪直接测量其芯样表面处来获取.当按非均匀分布选取时,面层内部的介电常数分布基于均匀分布选取时测量出的介电常数作为平均值按照正态非均匀分布选取.选用某半刚性基层沥青路面高速公路两测试点为实例,各自钻芯实测面层厚度分别为 16.7、15.8 cm.而面层介电常数分别按均匀和非均匀分布两种模型选取,下面对两测试点按以上两种模型分别进行雷达电磁波 1D-FDTD 正演模拟并与实际采集的雷达反射波波形对比.

(1)两测试点沥青面层材料的介电常数按均匀分布选取.面层分两层摊铺,上、下面层沥青混合料的级配不一样,所以上、下面层各自的介电常数也不相同.为此本文对取出芯样的上、下面层表面及基层顶面分别用介电常数仪器来测量出它们的介电常数,测量结果为第一芯样点沥青面层的均匀介电常数模型上面层 5.9,下面层 7.2,基层 9.0;第二芯样点沥青面层的均匀介电常数模型上面层 5.9,下面层 6.0,基层 9.0.实际钻芯上、下层厚度用直尺测量出:第 1 个测试点上面层厚度为 8 cm,下面层厚度为 8.7 cm;第 2 个测试点上面层厚度为 8 cm,下面层厚度为 7.8 cm.选取实际雷达平面入射波(中心频率为 1 GHz),如图 2 所示.将两测试点基本参数输入模型中并分别进行模拟,得到两测试点面层介电常数按均匀分布选取情况下的模拟波形与实际采集波形对比图 4(a)、5(a).



(a) 均匀介质



(b) 非均匀介质

图 4 第一芯样点面层介电常数均匀及非均匀选取下的路面雷达反射波与实测波比较

Fig. 4 Comparison between GPR actual measurement wave and simulation wave (the first point surface's dielectric constant selected on homogeneous or on inhomogeneous)

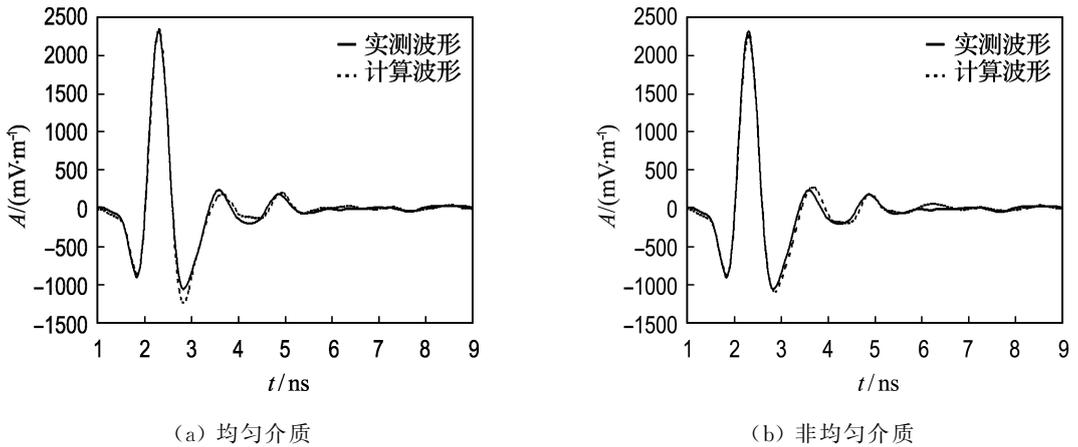


图5 第二芯样点面层介电常数均匀及非均匀选取下的路面雷达反射波与实测波比较  
Fig. 5 Comparison between GPR actual measurement wave and simulation wave (the second point surface's dielectric constant selected on homogeneous or on inhomogeneous)

(2) 两测试点沥青面层材料介电常数按非均匀分布选取. 上、下面层介电常数基于均匀分布模型测量出的介电常数作为平均值按照正态非均匀分布选取, 选取的结果如表1所示(表中序号为从面层的第1个网格开始). 实测的基层介电常数如

表1所示. 同样采用图2所示的实际雷达平面入射波. 将两测试点基本参数输入模型中并进行正演模拟, 得到两测试点面层介电常数按非均匀分布选取下的模拟波形与实际采集波形对比图4(b)、5(b).

表1 基于非均匀模型的两测试点面层介电常数取值

Tab. 1 The two surface's dielectric constant based on inhomogeneous model

第一芯样点沥青面层的非均匀介电常数模型				第二芯样点沥青面层的非均匀介电常数模型							
序号	数值	序号	数值	序号	数值	序号	数值	序号	数值	序号	数值
1	5.9	12	7.0	23	6.2	1	5.9	12	6.0	23	8.0
2	5.6	13	6.4	24	5.9	2	5.3	13	7.7	24	6.1
3	5.7	14	5.3	25	7.6	3	7.6	14	5.3	25	5.1
4	7.3	15	8.0	26	6.1	4	5.5	15	7.1	26	6.9
5	5.8	16	7.2	27	6.7	5	5.3	16	5.6	27	6.0
6	5.1	17	6.4	28	6.3	6	7.1	17	7.8	28	7.1
7	7.3	18	7.7	29	5.1	7	5.7	18	6.8	29	8.2
8	7.0	19	8.2	30	5.2	8	4.4	19	6.4	30	6.4
9	6.2	20	6.0	31	6.7	9	7.3	20	6.6	31	7.2
10	7.7	21	6.4	32	6.8	10	6.8	21	5.2	32	4.8
11	7.3	22	8.4	33	5.6	11	7.5	22	7.3		

从图4、5可以看出:

无论是面层介电常数按均匀分布选取还是按非均匀分布选取, 模拟出的雷达反射波都能反映出雷达电磁波在路面结构层传播后得到的反射波基本特征, 即雷达电磁波反射波会出现两个主波峰, 它们分别是在空气与面层介电常数突变界面

以及面层与基层介电常数突变界面处出现的两个反射波峰; 从面层介电常数按均匀分布选取和非均匀分布选取下得到的模拟反射波两者与实测反射波对比分析可以看出, 面层介电常数按非均匀分布选取下得到的模拟反射波与实测反射波形吻合得更好.

### 3 结 论

通过对路面面层材料介电常数按均匀和非均匀分布选取两种模型的路面雷达电磁波一维时域有限差分模拟分析可以看出:两种正演模拟得到的雷达反射波都能反映出雷达电磁波在路面结构层传播时得到的实测反射波基本形状和特点;但面层材料介电常数按非均匀分布选取模型得到的正演模拟雷达反射波与实测反射波波形吻合得更好.特别是,如果利用反射波形进行介电特性反演时,波形的微小差异也会导致反演结果较大误差.因此,开展非均匀分布介电常数的正、反演分析,能够更实际反映路面材料介电特性的真实特性.

#### 参考文献:

[1] SAARENKETO Timo, SCULLION Tom. Road evaluation with ground penetrating radar [J]. *Journal*

*of Applied Geophysics*, 2000, **43**:119-138

- [2] 张 蓓. 路面结构层材料介电特性及其厚度反演分析的系统识别方法——路面雷达关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2003:6-10
- [3] SMITH S S, SCULLION T. Development of ground-penetrating radar equipment for detecting pavement condition for preventive-maintenance SHRP-H-672 [R]. Washington D C:Strategic Highway Research Program, 1993
- [4] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media [J]. *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, 1966, **14**(3):302-307
- [5] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electro-magnetic field equations [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1981, **23**(4):377-382

## Ground penetrating radar electromagnetic waves simulation of pavement model with pavement material's inhomogeneous dielectric parameter

CAI Ying-chun<sup>1,2</sup>, WANG Fu-ming<sup>\*2</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>

( 1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Environmental and Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China )

**Abstract:** According to random distribution characteristics of practical pavement particles and scattering of dispersed particles on electromagnetic wave, the one-dimension finite difference time domain (1D-FDTD) equations of ground penetrating radar (GPR) electromagnetic wave, which propagates in half-space, are briefly established. And the electromagnetic wave of the air-coupled antenna GPR which propagates in asphalt pavement with surface material's homogeneous or inhomogeneous dielectric parameter are all forward simulated. Then the comparisons between the two models simulation waves and actual measurement wave are analyzed. It is concluded that the first model with the surface material's dielectric parameter selected on random can inosculate the actual measurement wave and well correspond to the reality. The research is helpful for GPR backward simulation as measuring thickness and other applications.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); 1D-FDTD method; inhomogeneous; dielectric constant