

文章编号:1671-6833(2002)02-0044-03

# 路用探地雷达的回波模拟

孟美丽<sup>1</sup>,蔡迎春<sup>1</sup>,高海彬<sup>2</sup>

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州鑫泰路桥工程公司, 河南 郑州 450006)

**摘 要:** 分析了路用探地雷达电磁脉冲波在路面介质中的传播特性, 并根据路用探地雷达实际发射的脉冲子波和接收的反射波, 利用反演方法计算了路面介质的介电常数. 在此基础上, 采用回波模拟法对探地雷达脉冲波在路面结构层介质中的反射波进行了模拟合成. 实际算例表明, 回波模拟法对探地雷达反射波的模拟合成效果较好, 该模拟方法为正确解释路面结构提供了简便、可靠且有效的手段.

**关键词:** 探地雷达; 介电常数; 路面结构层; 回波模拟

**中图分类号:** TP 311.133.1

**文献标识码:** A

探地雷达勘测方法以其非破坏性探测、抗干扰性强、分辨率高、操作方便等优势, 在较短时间内被迅速推广应用于国内外公路检测中. 但当路用探地雷达探测路面结构层及其铺垫质量时, 路面结构层的变化和外界其它因素的干扰会使探地雷达反射剖面的图象变得复杂, 单靠人工解释会带来一定的偏差, 而目前又没有较成熟的反演方法可用来自动识别、解释实测结果. 针对这一情况, 有关学者指出, 回波模拟技术可有效地解决这一问题<sup>[1,2]</sup>. 但他们的回波模拟都是在四个基本参数(每层的介电常数、电导率、厚度和雷达子波)<sup>[3]</sup>已知的基础上进行的, 而实际路面结构层的电性特征和探地雷达发射的雷达子波却是未知的, 且因时因地因频率(具有频率依赖性)的变化而改变, 文献<sup>[1,2]</sup>却假定介质的介电常数和电导率为固定不变的常数, 这显然是不合适的. 为了获取适时的介电常数和雷达子波, 本文以路用探地雷达实际发射的脉冲子波和接受到的反射波为基础, 用反演方法计算路面介质的介电常数, 并在此基础上对雷达脉冲波在路面结构层介质中的反射波进行了模拟合成.

## 1 基本原理

路用探地雷达系统是根据电磁波反射原理设计的. 雷达天线发射的电磁波在路面结构层中的传播, 可以看成是平面电磁波在多层均匀介质中

的传播. 因此, 当雷达脉冲波垂直入射到路面沿路表以下深度方向(设为  $z$  轴)传播时, 电磁场满足的 Maxwell 方程为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon - j \omega \mu \sigma) E. \quad (1)$$

式中:  $E$  为正弦时变电场矢量;  $\omega$  为角频率;  $\mu$  为磁导率;  $\epsilon$  为介电常数;  $\sigma$  为介质导电率.

由方程(1), 可得其解为

$$E = E_0 e^{-j k z}, \quad (2)$$

其中,  $E_0$  为电场矢量的振幅;  $k$  为传播常数, 且

$$k = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - j \omega \mu \sigma}. \quad (3)$$

如果将  $k$  的实部和虚部分开, 可得衰减常数  $\alpha$  和相移常数  $\beta$  分别为

$$\alpha = \left( \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \right)^{1/2} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right]^{1/2} - 1^{1/2}; \quad (4)$$

$$\beta = \left( \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \right)^{1/2} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right]^{1/2} + 1^{1/2}. \quad (5)$$

由式(4)、(5)及式(2)可写成

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j \beta z}. \quad (6)$$

从上式可以看出, 路面介质中的电磁波振幅在传播方向上按指数律减小, 脉冲形状由于  $\beta$  的非线性相位而引起畸变.

在实际测量中, 雷达发射的高频电磁波在路面结构层中传播时, 每遇到不同的界面就会发生透射和反射. 当探地雷达脉冲波垂直入射时, 反射系数  $R(n)$  和透射系数  $T(n)$  分别为

收稿日期: 2002-01-02; 修订日期: 2002-02-15

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(19625205)

作者简介: 孟美丽(1977-), 女, 河南省安阳市人, 郑州大学硕士研究生.

$$R(n)=\frac{\sqrt{\epsilon_n}-\sqrt{\epsilon_{n+1}}}{\sqrt{\epsilon_n}+\sqrt{\epsilon_{n+1}}};$$

(7)

$$T(n)=\frac{2\sqrt{\epsilon_n}}{\sqrt{\epsilon_n}+\sqrt{\epsilon_{n+1}}}.$$

(8)

式中： $\epsilon_n$  为第  $n$  层介质的相对复介电常数。因此，反射电磁场  $E_R(n)$  和透射电磁场  $E_T(n+1)$  可表达为

$$E_R(n)=R(n)E_T(n);$$

(9)

$$E_T(n+1)=T(n)E_T(n).$$

(10)

若已知路面各结构层的复介电常数，由式 (7) ~ (10) 可计算各界面反射波和透射波的振幅；另外也可由各层的反射波幅和透射波幅反算各结构层的复介电常数，因为当探地雷达探测路面结构层时，遇到的第一个界面是空气与路表的分界面，而空气的相对介电常数为 1。

2 回波模拟

路用探地雷达的回波模拟就是利用路面结构层的介电性能和雷达子波模拟探地雷达响应，具体步骤如图 1 所示。

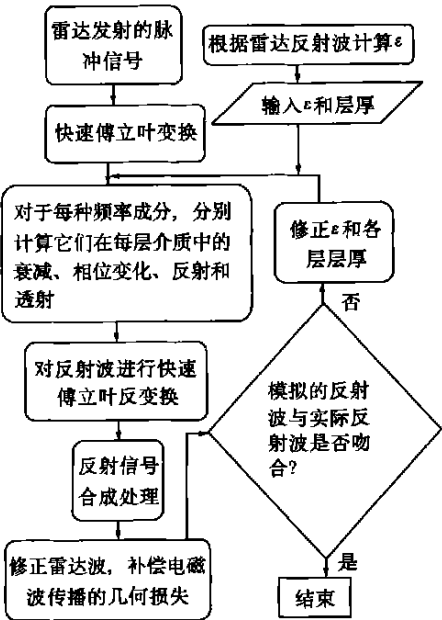


图 1 探地雷达回波模拟程序流程图  
Fig. 1 GPR echo wave simulation flow chat

首先，将时域内的入射波进行快速傅立叶变换，转换为频域内的信号；然后根据各层的复介电常数和厚度，在频域内计算各离散频点信号在层中的反射和透射，因为介质层中的衰减、频散、反

射和透射系数均与频率有关；最后，利用快速傅立叶逆变换，将频域反射信号变换成时域反射信号并进行信号合成。最后，与实测的雷达反射数据进行对比，适当地修正介质参数，使模拟合成的反射波与实测的反射波相吻合。

本文的回波模拟与文献 [1, 2] 不同的是，路面介质的复介电常数不是已知的，也不是事先假定的，而是根据反射波的有关数据，由式 (7) ~ (10) 计算得到的。

3 计算实例

本文利用探地雷达对单层混凝土板进行了测试试验，所采用的试验模型为两侧均为空气的混凝土板，板厚为 8.8cm。

根据上述电磁波理论和回波模拟步骤，我们在此针对单层混凝土板模型作些具体的推导和说明。如上面所述，回波模拟之前，首先要计算结构层的介电常数。由式 (7) ~ (10) 可知，要计算介质的介电常数，必须先求出反射系数，而某一路面结构的反射系数可用两种方法求得。

(1) 由探地雷达入射波和反射波数据求解总反射系数<sup>[4]</sup>：

$$\Gamma=\frac{\text{FFT}(Y_r)}{\text{FFT}(Y_i)}=\frac{F_r}{F_i},$$

(11)

式中： $Y_r$ 、 $Y_i$  分别为时域内的反射波和入射波。

(2) 总反射系数还可由各层的介电常数表示，对本文的单层混凝土板模型，电磁波垂直入射时，由式 (7)、(8) 可得总反射系数为

$$\Gamma=\frac{1-\sqrt{\epsilon}}{1+\sqrt{\epsilon}}+\frac{1-\sqrt{1/\epsilon}}{1+\sqrt{1/\epsilon}}\cdot\left(1+\frac{1-\sqrt{\epsilon}}{1+\sqrt{\epsilon}}\right)\cdot\left(1+\frac{1-\sqrt{1/\epsilon}}{1+\sqrt{1/\epsilon}}\right)\cdot e^{-2\frac{\omega}{c}d\sqrt{\epsilon}}.$$

(12)

由式 (11)、(12) 得到的反射系数应相等，据此可得一关于  $\epsilon$  方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{1-\sqrt{\epsilon}}{1+\sqrt{\epsilon}}+\frac{1-\sqrt{1/\epsilon}}{1+\sqrt{1/\epsilon}}\cdot\left(1+\frac{1-\sqrt{\epsilon}}{1+\sqrt{\epsilon}}\right)\cdot\left(1+\frac{1-\sqrt{1/\epsilon}}{1+\sqrt{1/\epsilon}}\right)\cdot e^{-2\frac{\omega}{c}d\sqrt{\epsilon}}-\frac{F_r}{F_i}=0.$$

(13)

求解上述方程，即可得到混凝土的复介电常数  $\epsilon$ ，然后按图 1 所述步骤进行回波模拟。

探地雷达对上述混凝土板进行实测时，选用中心频率为 1000 MHz 的天线，并采取垂直入射的方式。本次试验实测的探地雷达入射波和反射波分别如图 2 和图 3 中实线所示，考虑到介电常数

的频率依赖性,我们在频域内由式(13)求解混凝土的复介电常数,因此计算出的介电常数应随频率的变化而改变,结果也说明了这一点.本算例求得的复介电常数,实部在5~10范围内取值,虚部在-2左右波动,与混凝土的实际情况比较接近.

根据上面计算的介电常数,我们进行了回波模拟,模拟结果较好.

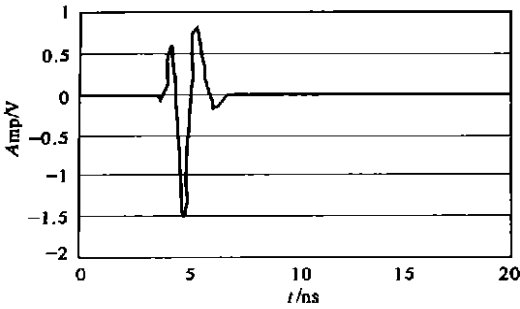


图2 入射波波形  
Fig. 2 Incident wave

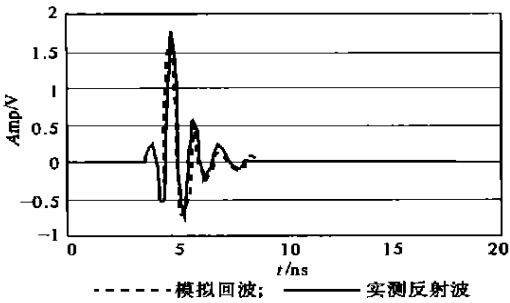


图3 模拟回波与实测反射波对比图  
Fig. 3 Comparison between simulated wave and actual wave

Simulation of Ground Penetrating Radar Echo Waves in Pavement Layers

MENG Mei-li<sup>1</sup>,CAI Ying-chun<sup>1</sup>,GAO Hai-bin<sup>2</sup>

(1.College of Environmental & Hydraulic Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China ;2.Zhengzhou Xintai Road Engineering Corporation ,Zhengzhou 450006,China)

**Abstract :** On the basis of incident wave and reflected wave of Ground Penetrating Radar the dielectric constants are computed . These dielectrics are used to simulate the echo wave of Ground Penetrating Radar . The simulated echo wave is compared with the actual reflected wave . The results show that the method used to compute the permittivity is feasible and the simulation is an effective way to examine the computed dielectrics .

**Key words :** ground penetrating radar (GPR) ;dielectric constant ;pavement layers ;simulation of echo waves

4 结论

本文分析了路用探地雷达电磁脉冲波在路面介质中的传播特性,并根据路用探地雷达实际发射的脉冲子波和接受的反射波,利用反演方法计算了路面介质的复介电常数.在此基础上,采用回波模拟法对探地雷达脉冲波在路面结构层介质中的反射波进行了模拟合成,与实测的反射波进行了对比分析.所得结果表明,回波模拟法对探地雷达反射波的模拟合成效果较好,该技术为正确解释路面结构提供了简便、可靠且有效的手段.此外,从本文还可看出,用回波模拟法检验计算介电常数也十分有效.但是由于测量误差和计算精度的影响,模拟效果还不是太好,但可以预见,随着算法的改进和计算精度的提高,效果会越来越好.

参考文献:

[ 1 ] 黄南晖.地质雷达探测的波场分析[J].中国地质大学学报,1993,18( 3 ):294~302.  
[ 2 ] 沈 飏,石庆华,孙忠良.道路铺砌层中探地雷达波传播的正演模拟及应用[J].石油地球物理勘探,1997,32( 增刊 ):135~140.  
[ 3 ] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1996.  
[ 4 ] AMARA Loulizi .Development of Ground Penetrating Radar Signal Modeling and Implementation for Transportation Infrastructure Assessment [ D ] . Virginia :the Virginia Polytechnic Institute and State University ,2001.