

Study on Detection Method of Thickness and Dielectric Property of Highway Based on Forward and Inverse Method

Yin De^{1,2,*}, Xue Bing^{1,2}, Fan Yao^{1,2}

¹Key Laboratory of Radiation and Detection Technology, Institute of Electronics, Chinese Academic of Sciences, Beijing, China

²Academy of Electronic Information and Communication Engineering, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Email address:

275316801@qq.com (Yin De), 282204910@qq.com (Xue Bing), 252705989@qq.com (Fan Yao)

*Corresponding author

To cite this article:

Yin De, Xue Bing, Fan Yao. Study on Detection Method of Thickness and Dielectric Property of Highway Based on Forward and Inverse Method. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 236-243. doi: 10.11648/j.sd.20170503.23

Received: March 21, 2017; Accepted: May 15, 2017; Published: May 20, 2017

Abstract: Highway, which is the most important transportation channel, plays a very important role in people's production and life. This paper pays attention to the current detection requirement of highway thickness and dielectric properties, based on the electromagnetic field theory and the forward and inverse method, taking advantage of ground penetrating radar to test the thickness and dielectric characteristics of highway, using 2D-FDTD to construct the forward model, a new inverse method is presented based on the forward model, the results of experiments show that the method is simple in principle, easy to use, low computational complexity and high accuracy, which has an important significance on detection of highway thickness and dielectric property.

Keywords: Forward and Inverse Method, GPR, Thickness, Dielectric Property, 2D-FDTD

基于正反演的公路厚度及介电特性的检测方法研究

尹德^{1,2*}, 薛冰^{1,2}, 范尧^{1,2}

¹电磁辐射与探测技术重点实验室, 中国科学院电子学研究所, 北京, 中国

²电子信息与通信工程学院, 中国科学院大学, 北京, 中国

邮箱

1275316801@qq.com (尹德), 282204910@qq.com (薛冰), 252705989@qq.com (范尧)

摘要: 公路作为目前最为重要的运输通道, 在人们的生产和生活中正发挥着十分关键的作用。本文针对目前公路的厚度及介电特性的检测需求, 基于电磁场理论和正反演方法, 使用探地雷达对公路结构层厚度及介电特性进行检测, 利用二维时域有限差分法构建正演模型, 并基于该正演模型提出了一种新的反演方法, 实验结果表明, 该方法原理简单、使用方便、计算量小、精度高, 对公路厚度及介电特性的检测有着重要的意义。

关键词: 正反演方法, 探地雷达, 厚度, 介电特性, 二维时域有限差分法

1. 引言

公路作为目前最为重要的交通运输方式，在人们的生产和生活中发挥着十分关键的作用[1]。近些年来，随着中国的经济水平的飞速发展，公路的运输量呈几何倍数增加，公路的建设突飞猛进[2]。然而，随着建设速度的加快，新建公路偷工减料的情况时有发生。构建一套科学的检测系统，对在建工程的施工质量进行评估，同时对已建成公路的使用性能进行评价，具有非常重要的经济意义和社会效益。

根据中国交通部2012年颁布实施的《公路质量检测评定标准(JTGF801-2012)》，公路质量评定的主要指标有：密度、平整度、压实度、弯沉值、抗折度、平整度等[3]。由于中国公路起步较晚，中国目前仍没有十分有效的检测系统对公路质量进行全面的评价。传统的检测方法主要是针对公路的厚度进行检测，这在实际工程应用中是不够的。

探地雷达是一种近些年来兴起的无损检测方法[4]，通过向公路发射高频脉冲，然后对接收到的信号进行处理，通过分析其时延特性、波形形状、波峰幅度、频谱特性等参数来获得的结构、层数、厚度、性质等参数，进而间接获得密度、平整度、压实度、抗折度、平整度等指标，劳动强度小，工作效率高，能够进行大范围的检测，获得路面结构的连续信息，测量结果稳定，受环境影响小，在公路检测中得到越来越广泛的应用。

正反演方法是近几年来探地雷达领域重点研究内容[5]。正演又称为回波模拟，是基于电磁波在路面介质中的传播规律，根据公路介质的介电性能，结构层的基本参数和雷达入射波来模拟探地雷达回波信号的方法，是研究高频电磁波在地下介质中传播规律的有效途径。反演的核心是参数调整，通过调整正演模型参数使模拟得到的波形和实际得到的波形尽可能吻合，从而获得实际路面的结构层基本参数。

2. 探地雷达的工作原理

探地雷达是利用电磁波来探测地下介质分布的设备[6]。电磁波在均匀地下介质中是以波动的形式传播的，其传播方式可用简谐平面波来近似代替，其在多层均匀介质中传播时，如果相邻两层介质的电磁特性有区别，就会发生反射和透射，方向遵循斯涅耳定律，大小满足能量守恒定律[7]，如图1所示。

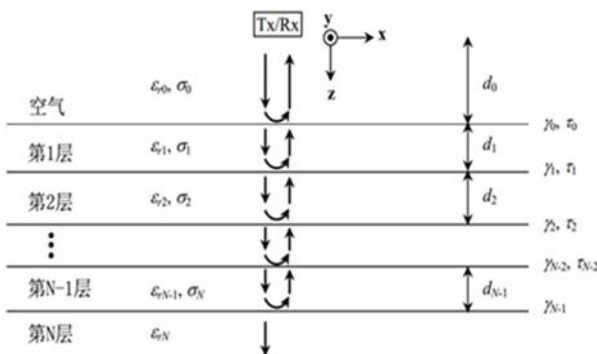


图1 探地雷达工作原理图。

电磁波遇到介电特性不同的分界层面均会发生反射，第*i*个分界界面处的反射系数 R_i 和折射系数 T_i 满足：

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,i}} - \sqrt{\epsilon_{r,i+1}}}{\sqrt{\epsilon_{r,i}} + \sqrt{\epsilon_{r,i+1}}} \tag{1}$$

$$T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r,i}}}{\sqrt{\epsilon_{r,i}} + \sqrt{\epsilon_{r,i+1}}} = 1 + R_i \tag{2}$$

在实际公路检测中，雷达实测的反射信号是由各个界面的反射波叠加的结果，如图2所示：

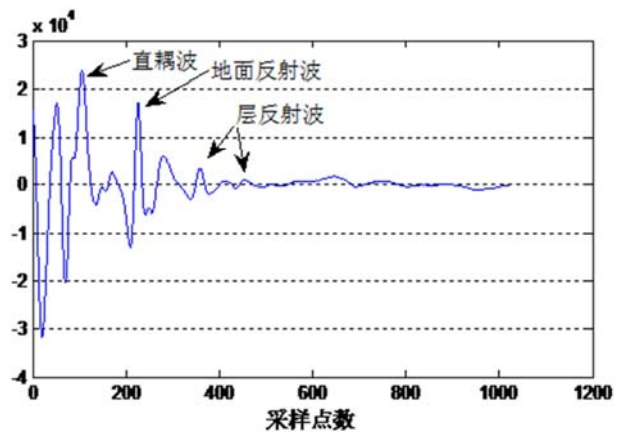


图2 雷达实测反射信号。

电磁波经过*n*层路面结构层得到的接收回波信号如下式3所示：

$$F_r = \left[R_1 + R_2(1 - R_1^2)T_1^2 + \dots + R_n \prod_{j=1}^{n-1} (1 - R_j^2)T_j^2 \right] F_i \tag{3}$$

$$= \left\{ \sum_{j=1}^n R_j \prod_{i=1}^{j-1} (1 - R_i^2)T_i^2 \right\} F_i$$

根据该反射波形，可以计算出公路各层的结构特性和介电特性。对于介电常数，通常的，我们可以采用式4和式5来计算：

$$\epsilon_{r,1} = \left(\frac{1 - \frac{A_1}{A_m}}{1 + \frac{A_1}{A_m}} \right)^2 \tag{4}$$

$$\epsilon_n = \epsilon_{n-1} \left(\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n-2} R_i \frac{A_{i+1}}{A_m} + \frac{A_n}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n-2} R_i \frac{A_{i+1}}{A_m} - \frac{A_n}{A_m}} \right)^2 \tag{5}$$

上式中， $A_1 \dots A_n$ 代表各分界面反射回波幅度， A_m 为地面金属板的反射回波幅度，因此根据接收回波的波形可以大致判断出各界面的介电常数。目前公认的是，该公

式计算第一层介电常数最为准确，层数越多，误差越大。电磁波在有耗介质中传播时，传播速度和介电常数满足定量关系，因此，在已知介电常数的基础上，通过对接收波形相邻两个波峰之间的时间差进行计算，可以粗略得到该层的厚度，第*i*层的厚度可表示为：

$$d_i = \frac{c\Delta t_i}{2\sqrt{\epsilon_i}} \quad (6)$$

式4-6均建立在路面媒质是均匀同质的基础上的，然而实际的公路介质一般均为有耗非均匀介质，总厚度一般为55-80厘米。由于路用探地雷达一般选用1000-2000MHz的高频脉冲，电磁波在路面介质中的波长一般为5-10厘米，此时可将路面结构层材料看做是均质的。

3. 正演模型的建立

根据电磁波在层状路面结构中传播的规律，基于探地雷达的工作原理，通过获取初始参数，我们就可以建立正演模型。建立正演模型的主要步骤如下：

- (1) 获取探地雷达发射的电磁脉冲信号
- (2) 将入射波变换到时域，即将时域信号转换为频域信号。
- (3) 根据实际路面层的结构和特性，建立层状结构物理模型，然后根据电磁波的传播特点，建立电磁波在层状结构中传播的总反射模型。
- (4) 分别计算各频率电磁波在路面结构层中的传播特性，得到频域内相应的反射信号。
- (5) 将各频率的入射波对应的反射信号合成得到频域内探地雷达的总反射信号。
- (6) 通过IFFT将总的频谱转换到时域，输出结果。

可以利用流程图的形式将建立正演模型的步骤归纳如下图3所示[8]：

建立正演模型，首先要获得公路的基本参数，这些基本参数主要包括：层数，各层的介电常数、电导率及其厚度，这些基本参数将直接决定着雷达电磁波在其中的传播特性，决定着反射信号的形状、幅度、时延等特征[9]。传统的方法是将电导率当做复介电常数的虚部进行求解[10]，这种方法是不科学的，没有考虑频率的影响，本文将电导率和介电常数当做两个参数进行求解，这样能有效减小误差[11]。

建立正演模型，最关键的在于如何有效的模拟电磁波在介质中的传播特性，目前常用的方法有时域有矩量法、有限元法和时域有限差分法(FDTD)[11]。时域有限差分法是一种时域数值计算方法，基于Maxwell方程组，对电场分量和磁场分量在空间和时间上采用交替抽样的反射，把含时间分量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程，然后在时间轴上逐步推进来求解电磁场。这种差分方程的特点是每个网格点上的电场分量只和相邻的磁场分量以及上一时刻该点的场值有关，磁场分量只和相邻的电场分量以及上一时刻该点的场值有关。时域有限差分法具有广泛的适用性，只要设定适当的参数，就能够有效的直接模拟各种复杂的电磁结构和电磁波的传播特性。由于时域有

限差分法直接从方程出发，直接在时域中模拟电磁波的传播过程，既简单又直观，目前已成为电磁场领域中一种非常重要的计算方法。

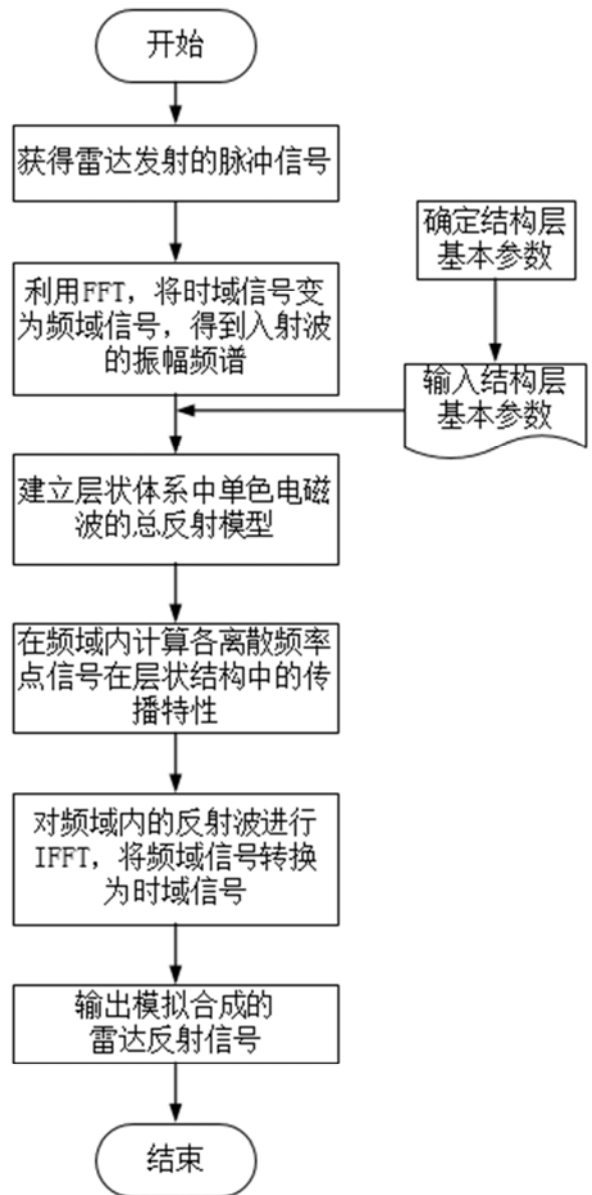


图3 建立正演模型的流程图。

4. 一种新的反演方法

利用正演模型初始参数模拟的回波波形和实测回波的波形在各方面的特征具有良好的一致性，但是两者在波幅和时延上都有一定的差别，并不完全吻合，这是因为设置的初始参数只是一个经验值，显然，经验值只表示一个大致的范围，与实际并不相同。要使正演模拟波形和实测波形尽可能拟合，就需要对初始参数进行调整，即反演出与实际情况相符的参数[12]。

反演分析是建立在正演的基础上的过程。反演的步骤如下图4所示：

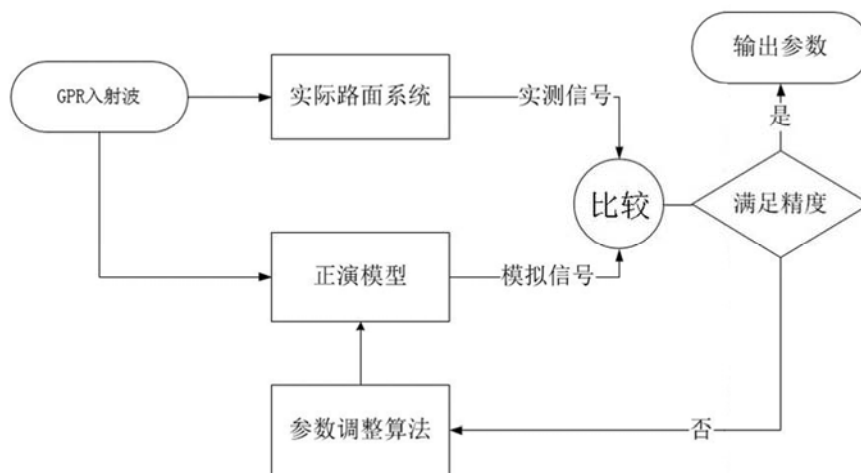


图4 反演的流程图。

反演分析的核心是迭代，即通过合适的参数调整算法，找出一组最符合实际情况的参数，使模拟信号和实测信号之间的目标函数的值最小。目前关于反演问题的参数调整算法国内外展开了大量的研究，主要的研究对象可分为以最速下降法、单纯形法为代表的传统算法和遗传算法为代表的现代智能算法。这些算法各有各的优缺点。在对最优化问题进行求解时，方程越多，未知量越多，计算量越大，很多时候，未知量之间存在着某种联系，通过这些联系显性化，能够减小计算时间，提高计算精度。本节基于随机梯度下降法，提出了一种新的方法。

介电常数、电导率和厚度对正演模拟波形的影响是有规律可循的。我们可以采用分步的方法进行反演。由于第一层上表面的反射波基本只与第一层的介电常数有关，与其电导率关系较小，因此，可以针对第一个波峰采用变步长随机梯度下降法反演第一层的介电常数，然后采用变步长随机梯度下降法反演第一层的厚度。针对第二个波峰（第一层下表面和第二层上表面），采用遗传算法联合反演第一层的电导率和第二层的介电常数，然后采用变步长随机梯度下降法反演第二层的厚度。针对第三个波峰（第二层下表面和第三层上表面），采用遗传算法联合反演第二层的电导率和第三层的介电常数，然后采用变步长随机梯度下降法反演第三层的厚度，如此往复，直至反演出所有的参数。

随机梯度下降法是基于每个样本来迭代，很容易得到最优解，每次只使用一个样本，和梯度下降法相比，随机梯度下降方法以损失很小的一部分精确度和增加一定数量的迭代次数为代价，换取了总体的优化效率的提升。增加的迭代次数远远小于样本的数量。遗传算法起源于对生物规律进行模拟的人工智能研究，对多解问题和最优化问题有着显著的优势。将二者结合起来，采用分步的思想来反演路面的基本参数，能够显著提高反演的速度、减小计算的次数、提高反演的精度，具有重要的意义。

基于变步长随机梯度下降法和遗传算法提出的新的方法具有变步长随机梯度下降法计算量小，速度快的特点，也具有遗传算法自动处理、连续获取、全局找最优解的特点。这种新的方法的主要实现步骤如下：

(1) 对采集到的初始信号进行预处理，得到处理后的接收回波信号；

(2) 结合已知信息，对接收回波信号进行分析，判断出测量公路的层数；

(3) 利用相移追踪匹配滤波法提取出电磁波在各结构层中传播的时间；

(4) 设置各层的初始参数，确定参数的调整范围，通过式5.3计算出各层的厚度表达式；

(5) 获得探地雷达的金属板全反射波，对其进行预处理，得到正演模型的输入波形；

(6) 将步骤4、5的信息代入建立的正演模型中，得到正演模拟回波；

(7) 对正演模拟波形和实测回波波形进行误差分析，若满足精度要求，则反演结束，正演模型的参数即可认为是实际路面的参数；若不满足精度要求，则采用变步长随机梯度下降法和遗传算法对正演模型的参数进行调整，然后返回步骤4，重复步骤4、5、6、7，直至找出模型最优解。

这种方法的优点在于：

(1) 无需设置各结构层的厚度，将正演模型的参数减少了三分之一，同时采用分步和联合仿真相结合的方式，避免了不必要的无意义计算；

(2) 实测信号和仿真信号在各分界面处对应的反射波具有相同的时间和时延，改变的只是各分界面处仿真信号的幅度和相位，误差函数具有很好的收敛性，不会出现误差过大的情况。

(3) 反演的过程思路清晰，顺序明确，便于查找错误；

这种方法可能存在以下问题：

(1) 忽略了某结构层电导率对该层上表面反射波幅度的影响，这可能导致一定的误差；

(2) 采用分步的方法进行参数调整，可能出现局部最优解；

(3) 该方法对实测信号的质量要求较高；

5. 实验及结果

5.1. 实验结果

在进行正反演之前,需要进行实验来获得需要的接收回波。利用矢量网络分析仪、发射天线、接收天线、泡沫、沥青板样件按照如下图5所示的结构搭建实验平台来模拟探地雷达系统,沥青板样件的厚度约为5厘米,长和宽均为1.2米。由于实际工作中探地雷达的发射机发射出的信号不可避免的存在各种噪音和拖尾,这会对实验结果产生很大的影响,因此这里选择使用二端口矢量网络分析仪来代替发射机和接收机的功能,以期尽量减小干扰和误差,矢量网络分析仪的发射波形如下图6所示,不难看出,该发射波形特性非常良好,几乎没有噪声,适合用于作为探地雷达输入脉冲波。在实际操作中,可以在实验平台周围

围上楔形吸波材料,同时保证四周空旷,以减少多次反射和杂波的干扰。



图5 搭建的实验平台。

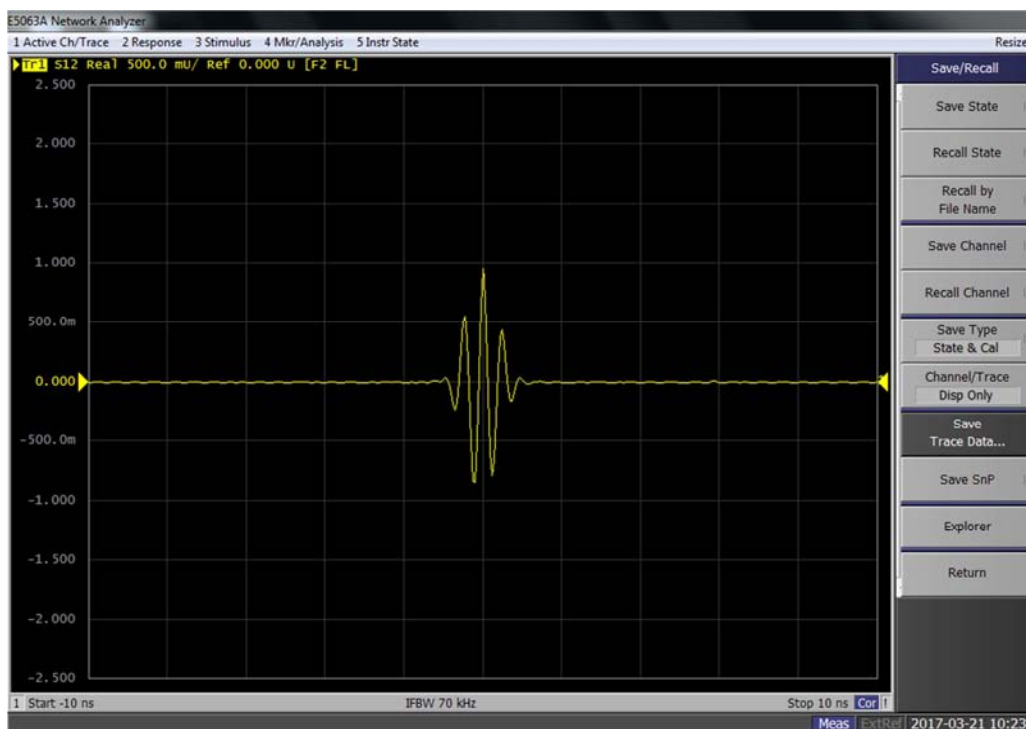


图6 矢量网络分析仪发射波形。

在进行实验前,还需要获得金属板全反射波形,以和正演模拟的金属板反射波形当做参考,便于归一化。得到的金属板反射波还含有各种杂波成分,需要对其进行滤波

处理,滤波后的金属板反射波如下图7所示,从图中可以看出,金属板反射波形波形完整,杂波小,与发射波形呈一次微分关系。

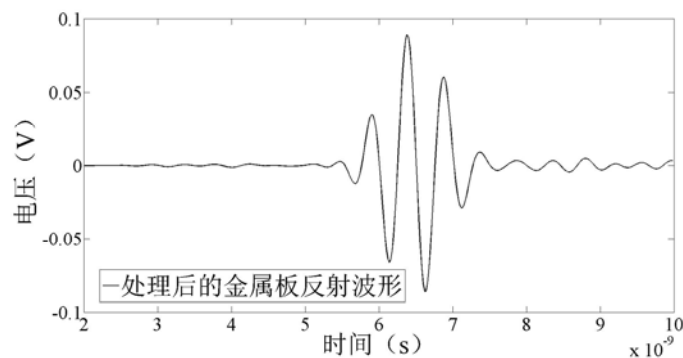


图7 处理后的金属板反射波形。

将沥青板放置在金属板上表面，进行测量，得到沥青板反射回波如下图8所示，从图中不难看出，反射回波信号共由两个反射波组成，分别为沥青上表层的反射波和金属板反射波。

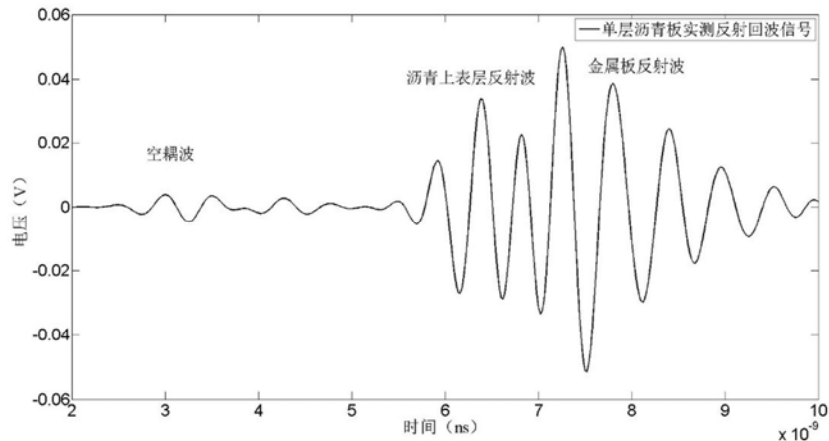


图8 实测得到的沥青板反射信号。

5.2. 单层沥青板反演结果

设置沥青板的初始参数为：厚度5.0cm，介电常数6，电导率0.05S/m，将初始参数和矢量网络分析仪的输出波形输入到建立的正演模型中，得到正演的模拟结果如下图9所示：

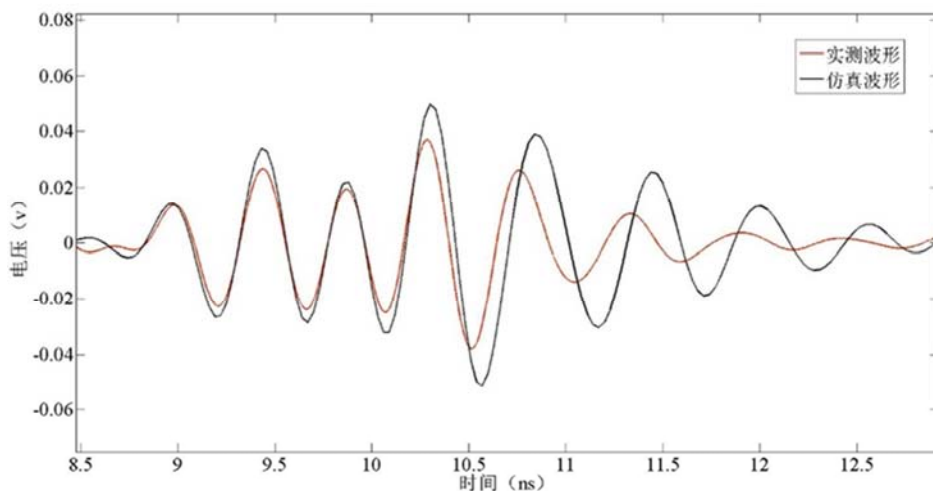


图9 实测和正演仿真的沥青板反射信号比较。

从上图中不难看出，正演仿真回波波形和实测回波波形之间的差值还是很大的。采用变步长随机梯度下降法对正演模型的初始参数进行调整。变步长随机梯度下降法的两个核心问题是是方向和步长，方向决定着是否走在了优化的道路上还是优化道路的负方向，步长是决定你要走多久才能到最优的地方，步长太大，结果就不精确，步长太小，花费的时间就多。首先来看方向问题，由于介电常数越大，沥青板上表面的反射回波就越大，由于图9中正演波形的第一个波峰比实测波形要大，因此可以判断出介电常数应该朝小的方向调整。调整介电常数为5.6，此时步长为0.4，方向为减小，发现正演波形的第一个波峰比实测波形要小，因此可以判断出介电常数应该朝大的方向调整，继续调整介电常数为5.8，此时步长为0.2，方向为增加，发现正演波形的第一个波峰比实测波形还是要小，介

电常数应该继续朝大的方向调整，继续调整介电常数为5.9，此时步长为0.1，方向为增加，发现正演波形的第一个波峰和实测波形已经比较接近了，比实测波形略小。此时由于波形的原因可能仍然不满足精度要求，但是由于介电常数的调整范围已经达到了设置的最小精度0.1，可以认为反演已经结束了。此时可以比较和实测波形精度要求最接近的两次波形，找出其中更接近的一个，得到介电常数的参数。最终得到的介电常数的初始参数为5.9。

在反演出介电常数和厚度后，用同样的方法可以反演出沥青板的厚度，沥青板的厚度为5.08cm。由于沥青板下面放置的是金属板，电磁波透过沥青板后的能量又全部被反射回去，因此不存在多解问题，在沥青板的介电常数和厚度确定后，第二个波峰的幅度和沥青板的电导率密切相关。重复介电常数的求解步骤，最终得到的反演的电导率

为0.05S/m，最终反演的波形如下图10所示，从图中不难看出，仿真的波形和实测波形在幅度和时间上均有很好的

一致性，只是在局部略有差别，这是由于色散造成的。

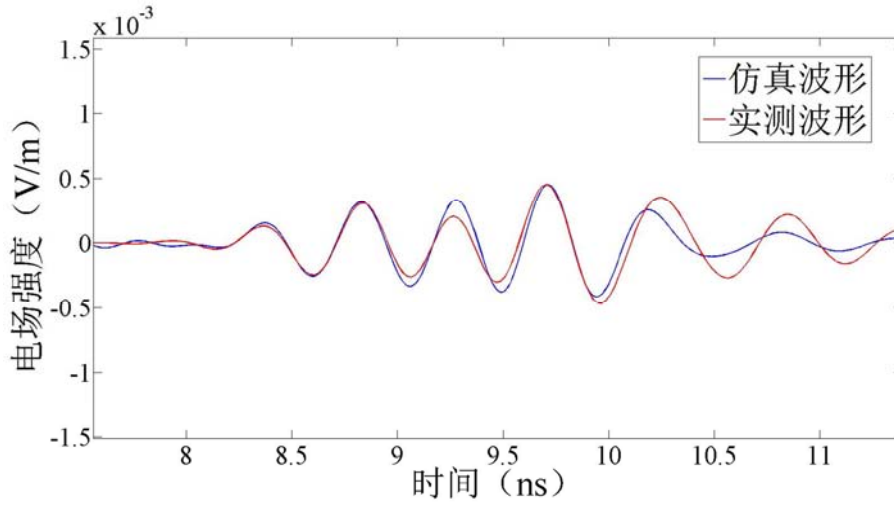


图10 最终反演仿真的波形和实测波形比较。

5.3. 实际路面反演结果

单层介质的反演较为简单，无需考虑多解问题，计算量小。实际生活中经常遇见的是多层介质。公路就是一个典型的多层层状结构。由于多层介质中上一介质层的电导率和下一层介质的介电常数共同作用于交界面处的反射波的幅度，因此存在多解问题，但是这些解中必然存在一

个最优解，通过遗传算法能够快速找出最优解。遗传算法起源于对生物规律进行模拟的人工智能研究，对多解问题和最优化问题有着显著的优势。

基于以上建立的正演模型，在中科院声学所所内的道路进行实验，实验场景如下图11所示：



图11 实际路面应用场景。

结合常见路面施工的经验值，可以设置正演模型三层介质的初始参数为：介电常数为6、8、12，厚度分别为8cm、10cm、15cm，电导率为0.02s/m、0.02s/m、0.04s/m。然后开始正演模拟和反演迭代，过程和上面均相同，在此不在介绍。最终得到的反演波形如下图12所示，反演的结果为：介电常数为5.8、7.6、10.2，厚度为7.8cm、10.3cm、15cm，电导率为0.032s/m、0.036s/m、0.04s/m。其中第

三层的厚度和电导率由于没有反射波的存在，因此只采用初始值。从图中可以看出，模拟波形和实际波形在面层反射波处拟合最好，在面层反射波的末尾，由于色散的原因，导致波形出现较大偏差，由于面层和基层的反射波互相叠加，这直接影响了基层的反射波。这也说明，在下一步的工作中，要想让实测路面波形和反演模拟波形拟合的尽量好，就不能不考虑色散的影响。

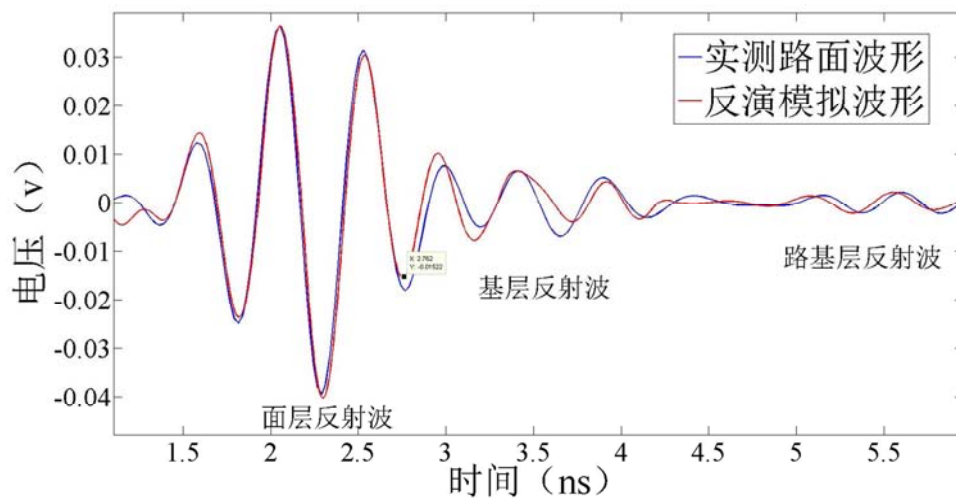


图12 实际路面反演结果。

6. 结论

本文基于电磁场理论和正反演方法, 针对公路结构层厚度及介电特性检测需求, 利用二维时域有限差分法构建正演模型, 并提出了一种简便的反演方法, 在实验室内和实际路面进行实验, 实验结果表明, 该方法原理简单、使用方便、计算量小、精度高, 对公路厚度及介电特性的检测有着重要的意义。

致谢

本文为北京市交通行业科技项目(7C1405473)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 沙增奉. 公路检测技术应用与其检测质量控制分析[J]. 工程技术(全文版), 2017(3):00160-00160.
- [2] Maierhofer C, Krause M, Niederleithinger E, et al. Non-Destructive Testing Methods at BAM for Damage Assessment and Quality Assurance in Civil Engineering[J]. E-journal of Nondestructive Testing, 2003(1).
- [3] Net N. Parameters That Influence The Results of Non Destructive Test Methods for Concrete Strength[J].
- [4] Liu Jun, Liu Min, Cheng Jian-chuan. Foreign GPR technique in the determination of the application of the asphalt layer thickness[J]. China & Foreign Highway, 2006, 26(2): 102-105.
- [5] Boughriet A H, Legrand C, Chapoton A. Noniterative stable transmission/reflection method for low-loss material complex permittivity determination[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1997, 45(1):52-57.
- [6] 赵璐璐. 探地雷达在道路质量检测中的应用研究[D]. 中国地质大学(北京), 2009.
- [7] Campione S, Sinclair M B, Capolino F. Effective medium representation and complex modes in 3D periodic metamaterials made of cubic resonators with large permittivity at mid-infrared frequencies[J]. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2013, 11(4):423-435.
- [8] 奚先, 姚姚. 二维随机介质及波动方程正演模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(5):546-552.
- [9] 赵贵章, 乔翠平, 闫永帅, 等. 介质含水量与介电常数模型参数试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3):7-10.
- [10] 钟燕辉, 张蓓, 王复明, 等. 路面结构层材料介电常数模型研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2006(4):20-22.
- [11] 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]. 重庆大学, 2003.
- [12] Saitoh S. Theory of reproducing kernels applications to approximate solutions of bounded linear operator equations on Hilbert spaces. [M]// Selected Papers on Analysis and Differential Equations. 2010:248-271.