

基于GprMax对路面地下缺陷探地雷达的正演模拟研究

梁田, 龚峰, 朱博凡, 张文峰, 孙鹏飞

河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

在交通基础设施长期使用过程中, 车辆载荷、环境因素、施工工艺等各种复杂的因素都会给地下结构造成空洞、裂缝或者脱空等问题。本文利用GprMax对探地雷达数据进行正演模拟, 分析不同情况下地下空洞的雷达图特征。得到的正演结果二维剖面结果表明: 不同大小的空洞, 空洞体积越下方反射或者散射效应所产生的次级弱回波信号越多。不同介质对雷达回波的影响产生的也不同, 相比空气、砂石、水三种介质, 其中空气介质的反射最强, 砂石介质最弱。不同形状的空洞对产生正演回波图像的电磁波传播路径和能量分布规律也不同。不同深度的空洞其深度越深能量反射越弱。正演模拟实际空洞与实际空洞图谱变化基本一致。对于城市道路的浅层深度0.3~1.5 m的空洞, 600 MHz的天线能较为清晰地观察出空洞形状和深度。结合实际案例, 通过对比正演模拟的雷达回波图谱得到较为一致的结果, 可为探地雷达检测地下病害提供理论支持和依据。

关键词

正演模拟, GprMax, 探地雷达

Research on GPR Forward Simulation of Pavement Subsurface Defects Based on GprMax

Tian Liang, Feng Gong, Bofan Zhu, Wenfeng Zhang, Pengfei Sun

School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: April 15, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

In the long-term use of transportation infrastructure, vehicle loads, environmental factors,

文章引用: 梁田, 龚峰, 朱博凡, 张文峰, 孙鹏飞. 基于 GprMax 对路面地下缺陷探地雷达的正演模拟研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(6): 970-983. DOI: 10.12677/ag.2026.166087

construction technology and other complex factors will cause problems such as cavities, cracks or voids in underground structures. In this paper, GprMax is used to carry out forward simulation of GPR data, and analyze the radar map characteristics of underground cavities under different conditions. The two-dimensional section results of the forward modeling results show that the larger the cavity volume, the more secondary weak echo signals are generated by the reflection or scattering effect. Different media have different effects on radar echo. Compared with air, sand and water, the reflection of air media is the strongest and sand and stone media is the weakest. The propagation path and energy distribution of electromagnetic wave generated by different shapes of cavities are also different. The deeper the hole is, the weaker the energy reflection is. The forward simulation of actual cavity pairs is basically consistent with the changes of actual cavity spectra. For the cavity with a shallow depth of 0.3~1.5 m in urban roads, the 600 MHz antenna can clearly observe the shape and depth of the cavity. Combined with the actual case, the more consistent results are obtained by comparing the forward simulation radar echo spectrum, which can provide theoretical support and basis for the detection of underground diseases by GPR.

Keywords

Forward Simulation, GprMax, Ground Penetrating Radar

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化的快速推进对交通基础设施的承载力与耐久性提出了更高要求。道路在长期使用过程中，路面地下结构在多重因素作用下易产生空洞、脱空、裂缝及松散体等隐蔽性缺陷[1]。这4种地下病害体会直接导致城市道路地面塌陷，采取有效的探测方法查明病害体位置，目前，道路地下缺陷检测技术已经形成多元化的技术体系，包括地质雷达法、地震波反射法、电磁感应法、超声波检测法、红外热成像技术等非破坏性检测手段，还有传统的钻孔取芯、地质钻探等侵入性方法[2]。地质雷达法由于具有无损、高分辨率、高效等优点，在城市复杂的路网环境中得到广泛应用，并且可以连续扫描进行精确的检测；地震波反射法是根据弹性波传播原理，能够较好地发现大面积空洞或者脱空的地方，但是操作比较麻烦，效率低，并且容易受到环境变化的影响[3]。GprMax 是较为典型的探地雷达正演模拟软件，GprMax 是一款用于探地雷达正演模拟的开源软件，其核心基于时域有限差分法，能够精确模拟电磁波在复杂介质中的传播过程[4]。该软件由爱丁堡大学的 Antonis Giannopoulos 教授推出，允许用户通过编写输入文件来高度定制化地定义模型的几何尺寸、介质属性、天线参数、激励源类型及网格划分等关键参数，从而构建地下模型。本文通过搭建不同情况空洞的道路结构模型，基于 GprMax 开展探地雷达数据正演模拟，探究不同情况下电磁波的传播特性，并且以实际工程案例展示正演模拟在工程中的应用价值，提高探地雷达数据解释的准确性，有效防治地面塌陷。

2. 探地雷达正演模拟原理

2.1. 探地雷达工作原理

探地雷达的工作原理基于电磁波传播理论。其系统主要由控制单元、发射天线与接收天线构成。工作时，发射天线向地下发射高频短脉冲电磁波，当电磁波在传播过程中遇到介电常数存在差异的地下介

质界面(如完好基层与空洞、脱空区的界面)时,会发生反射、折射和散射等现象[5]。接收天线则捕获这些返回地面的反射波信号,并通过控制单元记录信号的双程走时与振幅等信息[6]。通过对这些数据进行处理与成像,便可反演出地下介质的结构分布与物性参数,从而识别异常区域其反射系数 R 由介质的介电常数决定,通过对雷达主机所接收的反射与折射信号进行处理和图像解译,可以得到病害体的位置、形状和性质等信息,电磁波垂直入射非磁性介质时,反射系数 R 表示为[7]。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

式中, ϵ_1 和 ϵ_2 分别为上下相邻介质的介电常数。

2.2. 正演模拟原理

正演模拟是研究探地雷达波场特征、理解缺陷响应机理的重要手段。其中,基于时域有限差分法 FDTD (Finite-Difference Time-Domain, FDTD)的数值模拟方法,因其能直接求解麦克斯韦方程组、精确模拟电磁波在复杂介质中的传播过程,已成为探地雷达正演研究的主流技术[8]。FDTD 方法的核心是将计算区域离散化为 Yee 网格,对麦克斯韦旋度方程进行中心差分近似求解[9]。本研究采用基于 FDTD 的开源软件 GprMax 进行正演模拟,该软件允许用户通过编写输入文件定义模型的几何尺寸、介质属性(介电常数、电导率等)、天线参数及激励源,从而构建高度定制化的地下缺陷与修复模型[10]。

如下图 1 给出了 Yee 单元各个分量的空间坐标、时间维度取值规律,即 Yee 单元空间节点是半整数形式,时间是统一整数[11]-[13]。

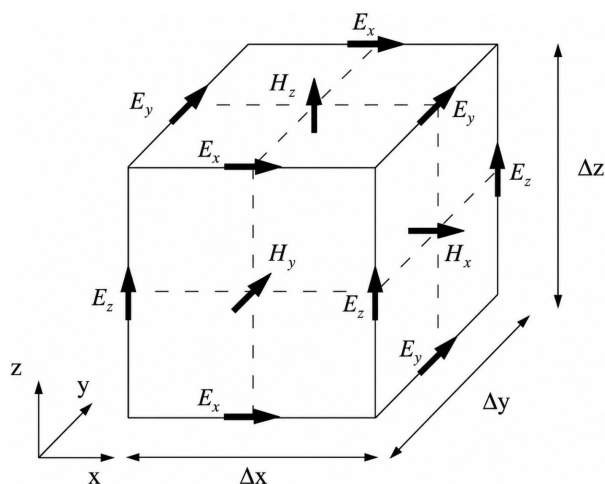


Figure 1. Yee cell
图 1. Yee 氏元胞

以时域有限差分方法麦克斯韦微分的旋度方程对其进行离散差分得到:

$$\begin{cases} \nabla \times E(r,t) = -\frac{\partial B(r,t)}{\partial t} \\ \nabla \times H(r,t) = J + \frac{\partial D(r,t)}{\partial t} \\ \nabla \times B(r,t) = 0 \\ \nabla \times D(r,t) = \rho(r,t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, E 为电场强度(V/m); B 为磁通量密度(Wb/m²); H 为磁场强度(A/m); J 为电流密度(A/m²); D 为电通量密度(C/m²); ρ 为电荷密度(C/m³); r 表示位置坐标(m); t 表示时间(s)。

在上图坐标系中可以将上述(2)公式表示, 即得到雷达正演模拟的方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z \end{cases} \quad (4)$$

对式(3)、(4)其下方脚标代指在该方向上的物理量, ε 为介电常数(F/m); μ 为磁导率(H/m); σ 为电导率(S/m)。根据 Yee 空间离散网格结构, 用有限差分法把上面提到的六个偏微分方程变成闭式。利用矩形网格结构, 在节点上按图 1 所示方向布置六个分量, 该种布置方法可以明显提高电磁场数值模拟的准确性以及传输性能。

3. 正演模拟研究

由于雷达检测过程中会与道路间存在间隙, 结合道路实际情况, 建立四层均匀的道路结构模型。其中: 第一层为沥青层介电常数设置为 4, 厚度为 0~0.15 m; 第二层为混凝土层介电常数设置为 1, 厚度为 0.15~0.30 m; 第三层为水稳碎石层介电常数设置为 5, 厚度为 0.3~0.5 m; 第四层为黏土和砂砾构成的路基层介电常数设置为 10, 厚度为 0.5~2.4 m。在 GprMax 中对道路结构模型进行正演, 正演出雷达二维剖面图。正演的中心频率设为 600 MHz, 在实际工程测量中设备自带的两种天线分别为 1200 MHz 与 600 MHz 其得到的图像深度不同 1200 MHz 天线仅能对道路表层进行探测深度为 0.5 m 左右, 而 600 MHz 的天线能探测的深度更深一些对于道路地下缺陷更便于观察。正演时窗为 50 ns, 激励源为 Ricker 子波, 天线步距为 0.01 m, 采样点数 512, 正演模拟空间为 4.2 m × 2.4 m。不同介质物性参数见表 1。

Table 1. Electromagnetic parameters of common media

表 1. 标常见介质电磁参数

介质	电导率(S/m)	介电常数	速度(m/ns)	衰减系数(dB/m)
空气	0	1	0.3	0
纯水	$10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	81	0.033	0.1
砂	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15	0.01
粘土	$10^{-1} \sim 1$	8~12	0.06	1~300
肥土	0.1~100	15	0.078	—
混凝土	1	6.4	0.12	—
沥青	—	3~5	0.12~0.18	—

3.1. 不同大小空洞正演

设置四个半径不同的球形在底基层与下卧土层界面下方，分别为半径 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m 的球形。具体位置为球心位于模型 Y 轴的 0.9 m 处、X 轴的 0.4 m、1.0 m、2.0 m、3.2 m 处的球体空腔，模拟理想状态下的规则形状空洞如图 2。

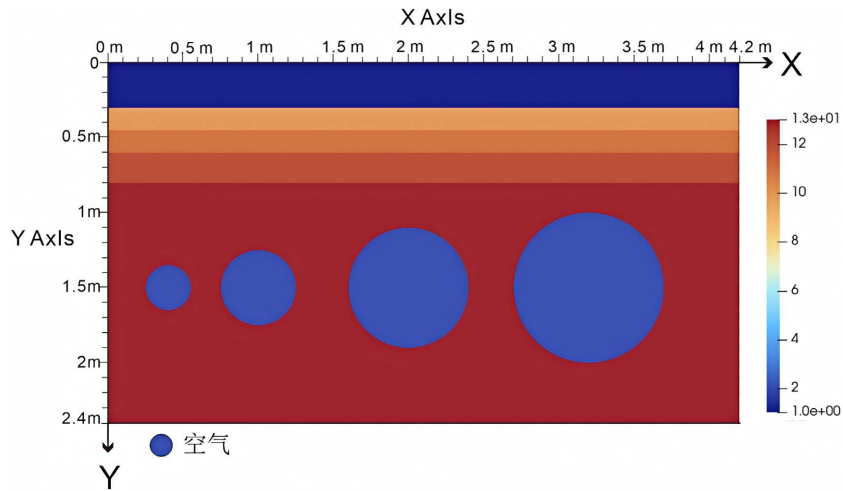


Figure 2. Forward simulation images of cavities of the same shape and different sizes
图 2. 相同形状不同大小空洞正演模拟图像

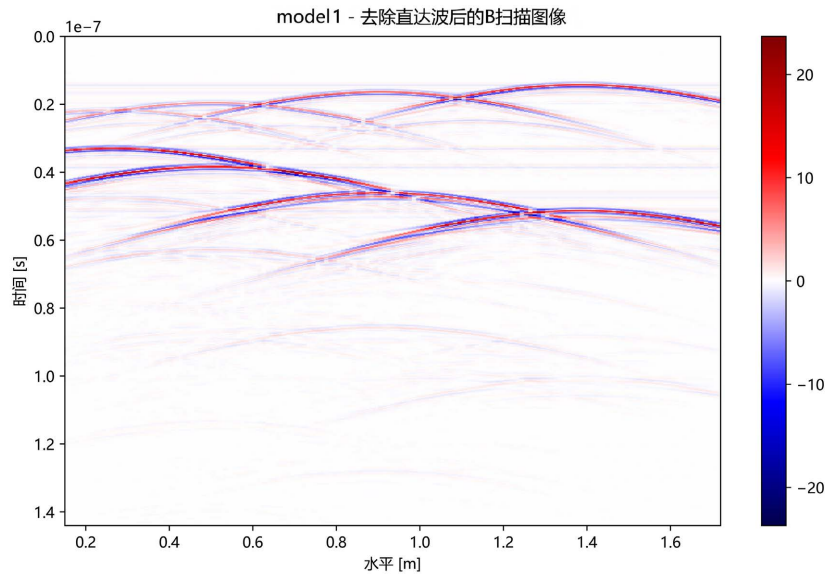


Figure 3. Forward simulation echo images of cavities of the same shape and different sizes
图 3. 相同形状不同大小空洞正演模拟回波图像

通过对图 3 正演结果数据进行解析，可以得出结论，各种球形空洞的雷达响应图像上具有明显的非均匀反射性，在回波强度、空间分布、覆盖范围等各方面均不一样。

直径为 0.1 米的微小空洞在回波图像上表现为弱振幅大小为 5 V/m 左右、边界清楚的反射弧，信号能量集中在一个区域内，同相轴接近直线形。空洞半径增大到 0.2 米的时候，反射强度明显增大振幅相比于直径 0.1 m 的，反射弧弯曲变大在回波图像中表现出的振幅大小为 10 V/m 左右，为中等强度信号同相

轴连续性、清晰度明显提高，异常区横向延伸也越来越大。

当空洞半径增大到 0.3 米的时候，反射波能量明显增多，在回波图像中表现出的振幅大小为 15 V/m 左右出现类似于“双曲线”或者“半椭圆形”的强同相轴。顶部集中了最明显的一个反射信号，呈辐射状向两边均匀展开，可以很好地体现空洞在水平面上的大小以及三维位置和延伸范围。

直径为 0.4 米的大空洞出现最明显的效果，反射信号强度最大在回波图像中表现出的振幅大小为 20 V/m 左右，为强正振幅信号，反射弧呈明显的弯折状，同相轴有较好的连续性，成像范围较广。该反射弧下面一般有多个反射或者散射效应所产生的次级弱回波信号。

3.2. 不同介质空洞正演

设置三个半径大小相同内部介质分别为空气、沙石、水气的球形空洞，其球心位于 Y 轴的 1.3 m 处，X 轴的 1 m、2.1 m、3.2 m 处，球体半径均为 0.3 m，以确保空洞的几何尺寸完全一致，仅改变内部填充介质的电磁特性如图 4 所示。

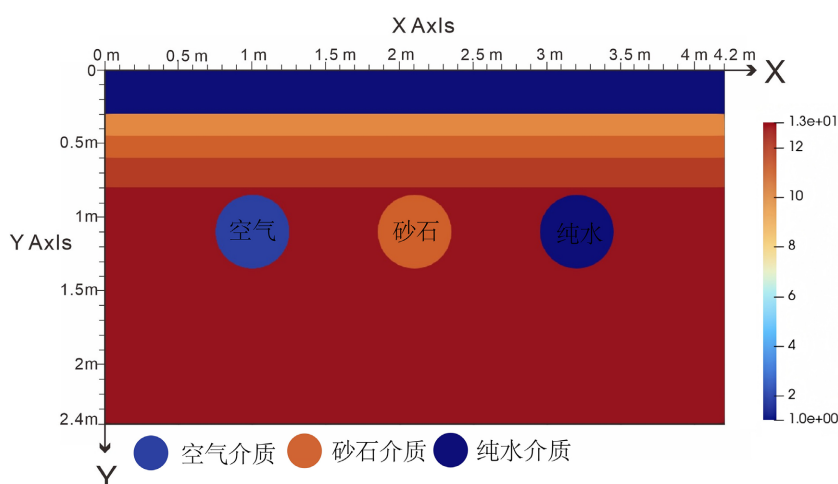


Figure 4. Forward simulation images of cavities of the same size and different media
图 4. 大小相同介质不同空洞正演模拟图像

经过对得到的回波数据如图 5 进行分析得知，虽然三个空洞的几何形状是相同的，但是由于内部填充介质的电磁性质不同，从而使得雷达回波异常出现明显的空间分布差别。

充空气的空洞，由于空气的介电常数 1.0 远低于周围底基层材料，电磁波在空洞界面处发生强烈反射，回波图像中出现典型的、强度较高的“双曲线”或“半椭圆”状强反射同相轴，同相轴顶部能量集中，边界清晰，与之前相同形状不同大小空洞模拟中半径 0.3 m 空气空洞的回波特征一致。在回波图像中表现出的振幅大小为 15 V/m 左右这种强反射主要源于空气与周围介质之间巨大的介电常数差异，使得大部分入射电磁波被反射回来。

对于沙石介质空洞，其介电常数与周围底基层材料的介电常数较为接近，差异较小。因此，在回波图像中，沙石空洞所产生的反射信号强度明显弱于空气空洞，反射同相轴的连续性和清晰度也有所降低，整体异常特征较为模糊。在回波图像中表现出的振幅大小为 1~5 V/m 左右有时甚至需要仔细辨别才能从背景噪声和正常界面反射中区分出沙石空洞的微弱反射信号。这是因为介电常数差异小，导致反射系数小，反射能量弱，使得电磁波大部分能够穿透或仅有少量被反射。

对于水体空洞的雷达回波影像上有着独特的特征。与气态空洞相比，水体空洞的同相位振幅分布以及强度模式都存在较大的差别，主要是因为水分子具有较高的介电常数，入射电磁波被强烈地反射出来，

因此产生了比较明显的回波信号和清楚的同相轴结构；另一方面由于水介质高导电性的物理特性(电导率约为 0.1 S/m)，在回波图像中表现出的振幅大小为 10 V/m 左右雷达信号在此处迅速衰减。衰减机制决定了水体空洞形成的回波特征是顶部峰高而平直、无下层回波，背景区域能量很快被消耗。

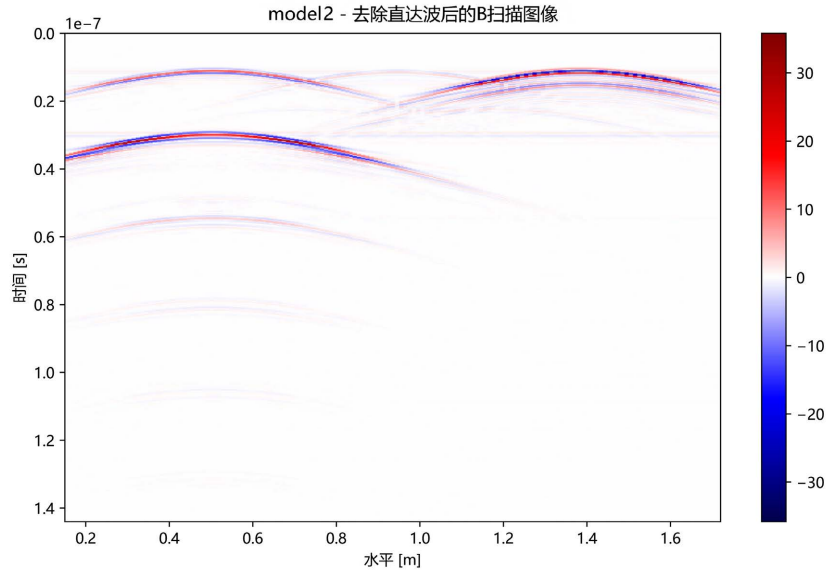


Figure 5. Forward simulation echo images of cavities of the same size and different media

图 5. 大小相同介质不同空洞正演模拟回波图像

3.3. 不同形状空洞正演

建立四个形状不同内部介质相同的四个物理模型，分别为球体、正方体、锥形体和长方体，以探究空洞形状对雷达回波特征的影响，如图 5~9 所示。所有空洞内部均填充空气，介电常数设为 1.0，电导率为 0.01 S/m ，以保证内部介质的一致性。为便于对比，四个空洞的体积尽可能保持相近，其中球体空洞半径设为 0.3 m ；正方体空洞边长 0.5 m ，高度 0.5 m ；正方体空洞边长为 0.45 m ；锥体空洞则模拟实际工程中可能出现的非规则形态，大致轮廓为一个底面半径 0.3 m 、高度 0.5 m 的类椭球体。所有空洞均设置在底基层与下卧土层界面下方，圆心或几何中心位于模型 Y 轴的 1.3 m 处，X 轴方向上均匀分布于 0.9 m 、 1.7 m 、 2.6 m 、 3.3 m 处，确保埋深一致如图 6。

根据对正演回波数据图如图 7 系统的分析可知，在相同的雷达回波响应下，不同的几何形状的空洞在相应的雷达回波上有着明显的空间分布上的区别，各个形状的空洞在回波图像中表现出的振幅大小为 15 V/m 左右。球形空洞的回波信号接近于对称的双曲线下降特性，这种特性是由于球面各个位置到天线距离的不同所造成，同时双曲线顶点处能明显看出峰值，曲线两侧变化比较平缓。

相对于正方体空腔，正方体空腔回波信号有明显的矩形边界的反射特征，四个角因为散射而产生明显的衍射峰，使回波图像的边缘更清楚，内部反射分布也比较均匀平滑。

锥体空洞的回波特性介于球形和不规则形状之间，具有拉长的双曲线反射特征。在主双曲线下方或上方会有一个或者多个随机分布的小振幅波动和杂乱回波，反映出来的是能量分布不是均匀的。在回波图像中表现出的振幅大小为 $1\sim 5 \text{ V/m}$ 左右相对于其他理想模型形成的对称的双曲线来说，其双曲线形态的对称性较差，在局部处由于表面凸起造成反射强度的变化明显，尤其是底部的回波信号。

在相同的条件之下沿着 X 轴对长方体和正方体做匀速扫描的时候，得到的回波信号图像存在着明显

的不同之处。主要原因就是两种材料在 X 轴上的几何尺寸不同，在 X 轴上的投影面积比正方体大，所以同相轴对应的回波轮廓呈拉伸后的半椭圆形或双曲线形分布。长方体端面位置反射信号集中造成强度分布出现双峰现象，中部能量分布比较均匀。长方体棱角处散射作用使整个回波形状沿长度方向上连续出现，称为条纹回波。即使两种空腔填充介质相同、体积相等，但是由于几何形状不同而导致的电磁波传播路径和能量分布规律也不同，因此两者的回波图谱就具有了不同的视觉特点。

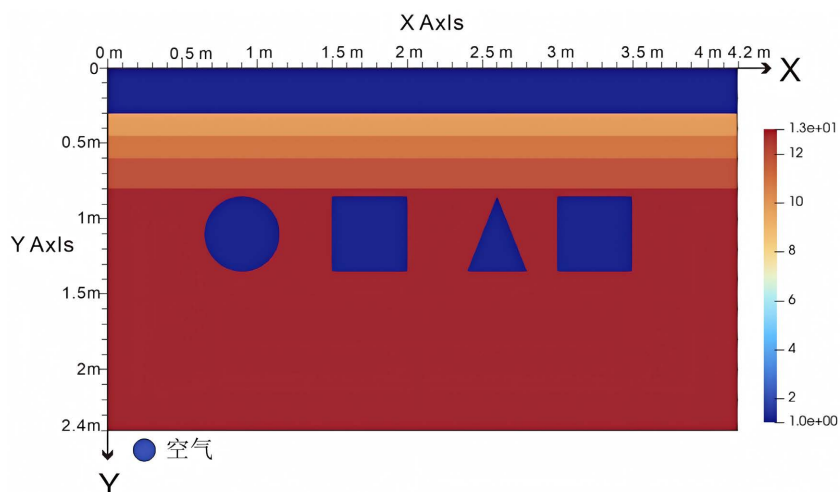


Figure 6. Forward modeling images of the same cavity in different media
图 6. 形状不同介质相同空洞正演模拟图像

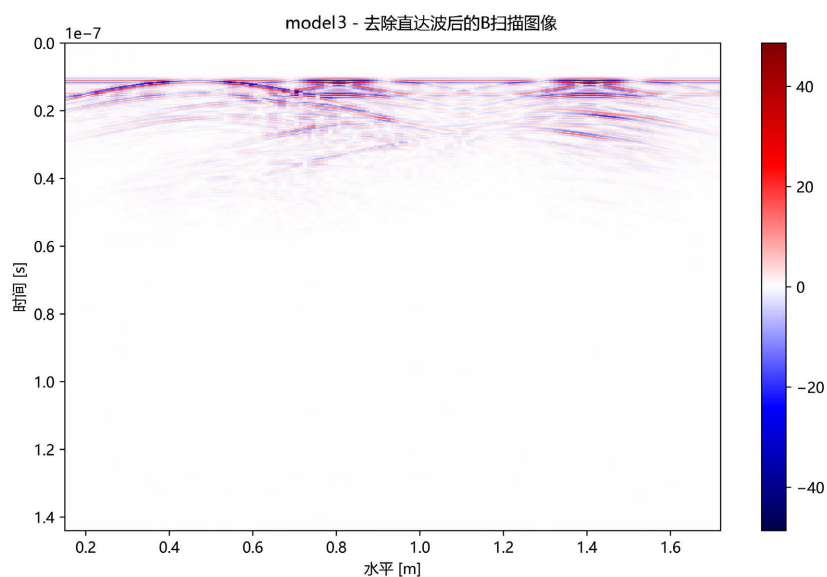


Figure 7. Forward modeling echo images of the same cavity in different media
图 7. 形状不同介质相同空洞正演模拟回波图像

3.4. 不同深度空洞正演

设置四个大小相同空洞内部介质相同的四个球体，球体半径均为 0.1 m，内部填充空气，介电常数 1.0，电导率 0.01 S/m，X 轴位置，Y 轴深度，即球心在模型中的水平位置分别为 X 轴 0.8 m、1.6 m、2.4 m、3.2 m，而垂直埋深 Y 轴坐标则依次为 1.4 m、1.2 m、1.0 m、0.8 m，呈现出由深至浅的变化趋势如图 8。

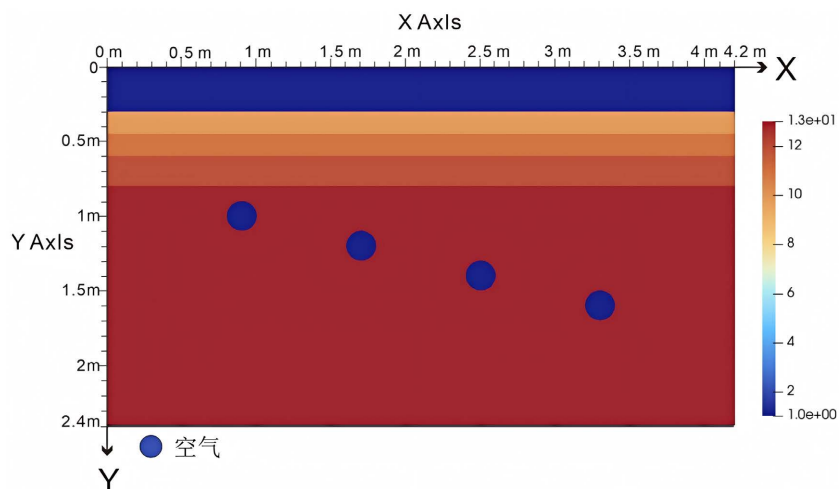


Figure 8. Forward simulation images of cavities of the same size, same medium and different depth

图 8. 相同大小相同介质不同深度空洞正演模拟图像

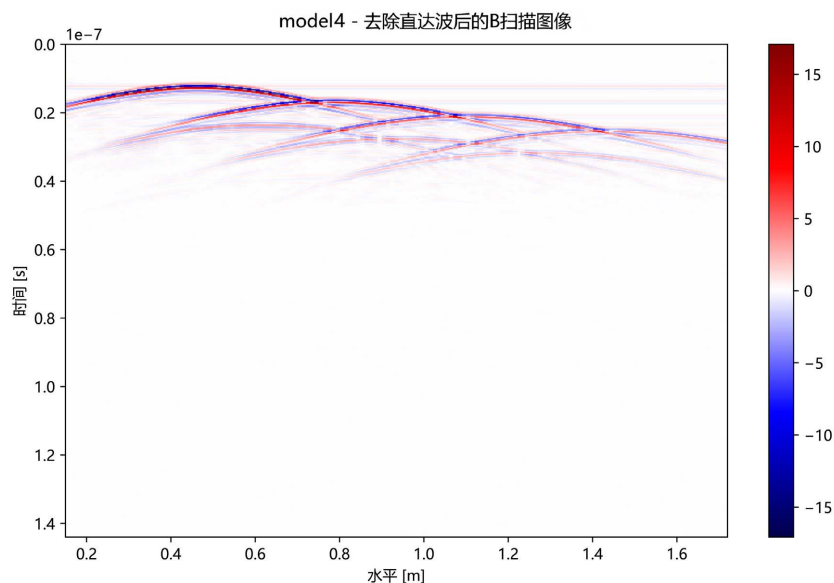


Figure 9. Forward simulation echo images of cavities with the same size and the same medium at different depths

图 9. 相同大小相同介质不同深度空洞正演模拟回波图像

分析正演回波图像如图 9 可知，在空洞大小和内部介质相同的情况下，埋深是影响雷达回波特征的另一个关键因素，主要体现在反射信号的双程走时、强度、同相轴形态及在图像中的垂直位置上，在回波图像中表现出的振幅大小为从 20 V/m 左右按照埋深逐渐衰减至 10 V/m 以下。

在埋深达到 0.8 m 的极端空洞里，地震反射波有最长的双程走时。从回波成像的角度来说，空洞所引起的同相轴在垂直方向上大部分位于时间窗的中下部，而且能量衰减明显。由于电磁波传播路径较长而能量损耗增大，所以所得反射信号的强度一般比较小，并且它的连续性以及清晰度比浅层空洞低一些，基本上呈平滑的反射状。这表现出深层空洞对于地震波传播的特殊性。

随着埋深减小至 1.0 m，反射波双程走时相应缩短，反射同相轴在图像中的垂直位置上移。此时，电

磁波传播距离缩短, 能量衰减减少, 反射信号强度有所增强, 同相轴的曲率略有增大, 边界也更为清晰, 整体异常特征比深埋空洞更为明显。

当埋深小于 1.2 m 时, 反射波双程旅行时间明显变短, 其同相轴的位置向上移到中上层的地质结构范围里。在这样的情况下, 地震数据中反射信号强度增大, 形成双曲线或者半椭圆形形态的同相轴具有更高的空间连续性以及清晰度, 顶部能量集中部分更加明显。该时期的探测精度大大提高了, 探测到的目标的形态特征和边界轮廓都可以得到较高的分辨率来准确刻画。

而对于埋深最浅 1.4 m 的空洞, 其反射波双程走时最短, 反射同相轴在图像中的垂直位置最高, 靠近时间窗口的顶部。由于埋深极浅, 电磁波几乎刚发射出去不久就遇到空洞界面并发生反射, 能量衰减最小, 因此反射信号强度最大, 同相轴的弯曲程度最大, 形态最为典型和显著, 有时甚至会出现因反射信号过强而产生的轻微“饱和”现象, 且异常区域在横向的覆盖范围也相对较大。

3.5. 实测空洞正演

建立一个不规则接近实际空洞的正演模型。该模型具有沿 X 轴方向逐渐扩大的非规则几何形状, 主要特点有三个, 分别为长径为 1.5 米、横截面宽度为 1 米、垂直深度为 0.5 米, 平均埋深为 1.4 米如图 10。

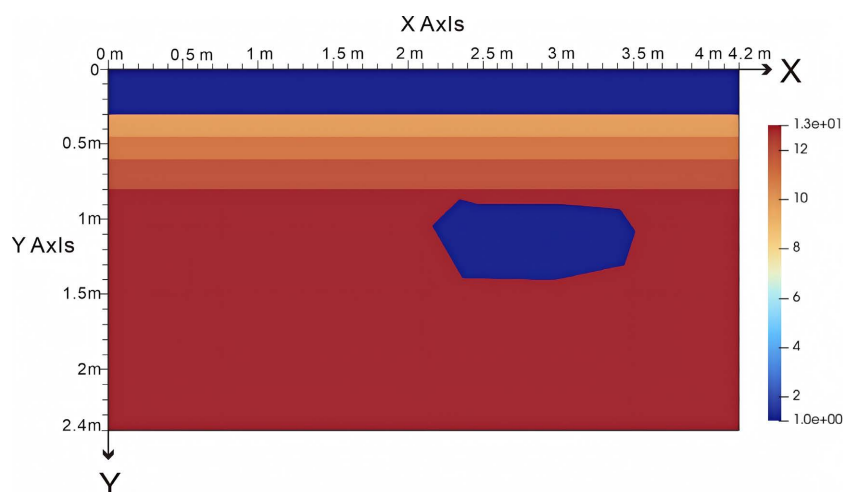


Figure 10. Irregular cavity simulation image
图 10. 不规则空洞模拟图像

经过分析正演实测雷达回波如图 11 发现, 实际测量得到的不规则空洞回波图谱的反射特性更趋复杂, 几何形状明显不同于传统规则空洞所具有的双曲线或者矩形包络的理想特性。

由于空洞顶部表面有两个凹陷区以及一个凸起脊线, 所以造成它产生的电磁波反射过程比较复杂。回波信号中对应区域出现的同相轴分布特征很复杂, 每个轴线在曲率和振幅上存在着较大的差别。顶部凹陷区由于局部形变效应造成的“局部加深”, 在同相轴形态和幅度上同周围区域比较有明显差别。

凸起的脊状结构会引起明显散射效应, 回波图像上会呈现沿着脊线延伸的等能量条带分布。当底面是西北向东南方向倾斜或者有局部凹陷的时候, 入射的电磁波与它相互作用之后就会产生路径差, 进而引起反射同相轴空间位置以及传播速度的变动。底面倾斜会造成特定方向上的信号偏移和展宽, 东南方位的局部凹陷会在该范围内产生一个独特的反射单元, 它的反射特性会有所区别。根据前面的分析可知, 在实际观测中不规则空洞回波信号不能用一个清晰的几何轮廓来表示, 而是一系列异质性反射成分叠加在一起所形成的一种复杂的分布模式。主要的原因是空洞边缘高度非均匀性的影响, 造成各个区域之间电磁波折射的角度、传播的距离、衰减特性有较大的差别, 在测量数据上留下的层层信息痕迹就是真实的反映。

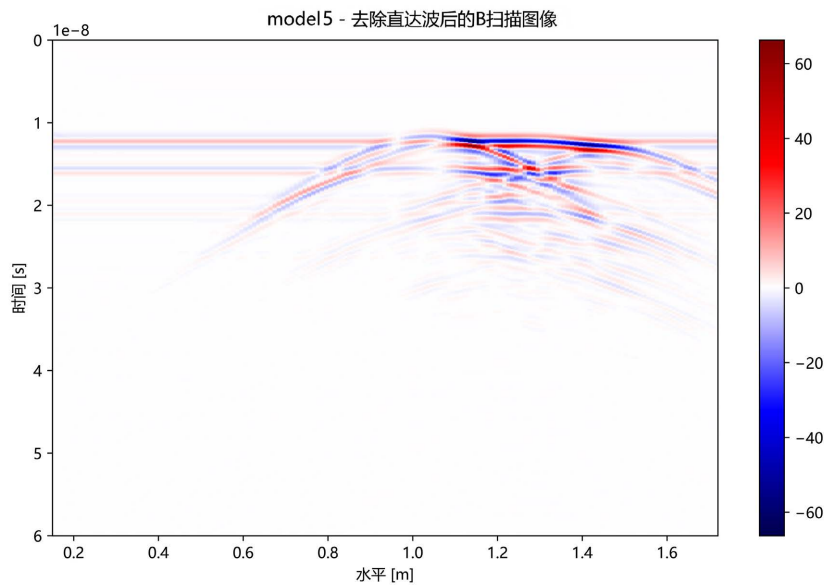


Figure 11. Irregular cavity simulation echo image
图 11. 不规则空洞模拟回波图像

4. 工程实例

4.1. 仪器设备

该实验采用意大利 IDS 公司的手推式低频探地雷达系统，使用的发射天线工作在 600 MHz 的中心频率。

4.2. 数据分析

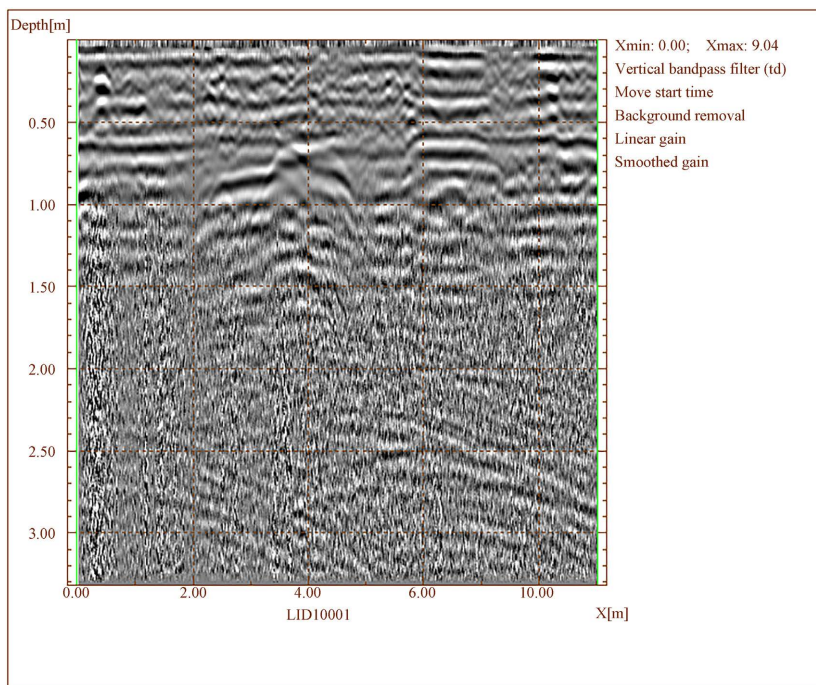


Figure 12. Measured cavity 1 radar atlas
图 12. 实测空洞 1 雷达图谱

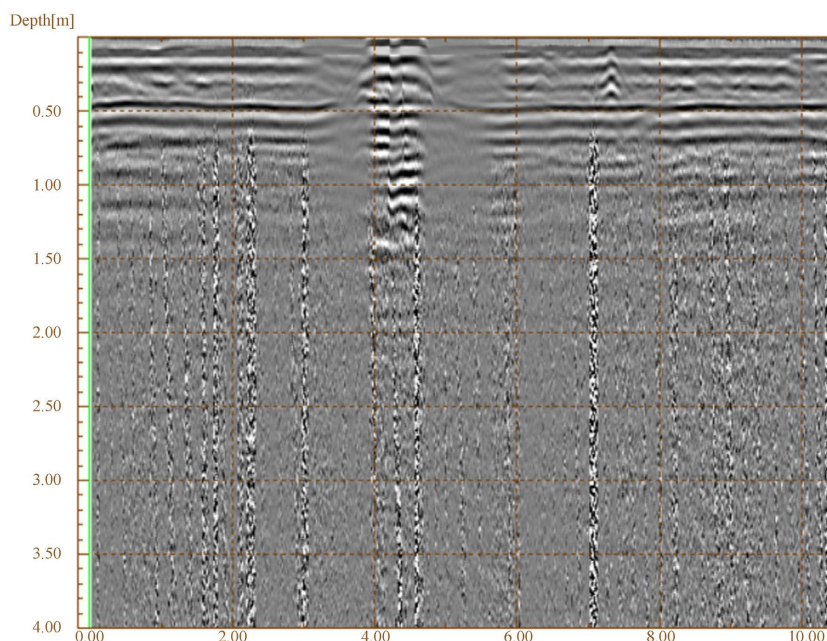


Figure 13. Measured cavity 2 radar atlas

图 13. 实测空洞 2 雷达图谱

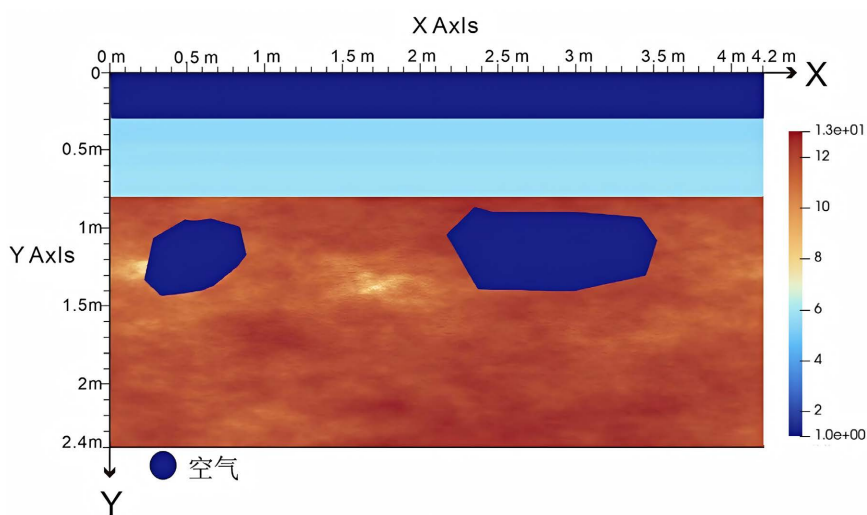


Figure 14. Measured cavity forward simulation image

图 14. 实测空洞正演模拟图像

研究所用工程实例的地点位于邯郸市，空洞 1、空洞 2 为两个相邻的不规则空洞如图 12、图 13。为反映真实情况建立与实测空洞对应的正演模型如图 14，图 14 中第一个空洞对应实测空洞 1 的平均深度为 0.3~1.0 m，平面尺寸为 0.6 m × 0.5 m；图 14 中第二个空洞对应实测空洞 2 的平均深度为 0.7~1.0 m，平面尺寸为 0.3 m × 1.0 m。通过二维雷达图谱可以看出，空洞 1 和空洞 2 两处空洞的雷达图谱反射信号明显增强，反射波振幅明显增大，空洞两侧均出现绕明显射波，空洞 2 的范围较大，因此下方多次波明显。对比实测空洞的正演模拟图像图 14 分析图 15 现场开挖验证图像显示，2 个空洞内部主要介质为空气，因此在灰度的雷达图谱中均表现出明显绕射波和多次波特征，其中对比实测正演模拟的回波图像图 16 与实测空洞回波图像图 12、图 13 进行特征对比分析可知，其中实测图像 12 对应图 16 中的第一个回波图像其峰值和绕射弧的形状

相符，在空洞的上层 0.8m 处产生绕射波，绕射波形态与图 16 的第二个空洞相比较为分散，实测图像的反射波与正演回波信号的深度相符为 1~1.5 m。实测图像图 13 与图 16 中的第二个信号相对应，实测中其空洞已经塌陷故将正演模型建立在混凝土层之下，得到的正演模拟回波图像也在其空洞上层开始产生绕射波，且正演回波信号在空洞上层中心处坐标 2.9m 处，绕射波与图 16 的第一个空洞相比较为集中范围集中且信号强度与实测回波信号产生的深度、形状基本吻合，表明所建立的正演模型能够准确还原实测空洞的雷达响应特征，正演模拟得到的回波规律与实际探测结果一致，可以为现场实测数据的识别与解译提供可靠依据。

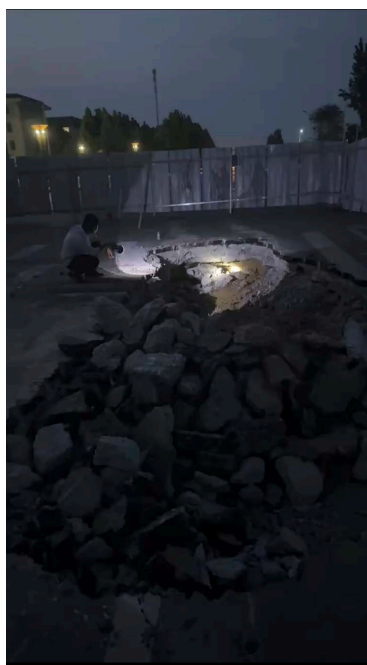


Figure 15. Measured cavity excavation verification image
图 15. 实测空洞开挖验证图像

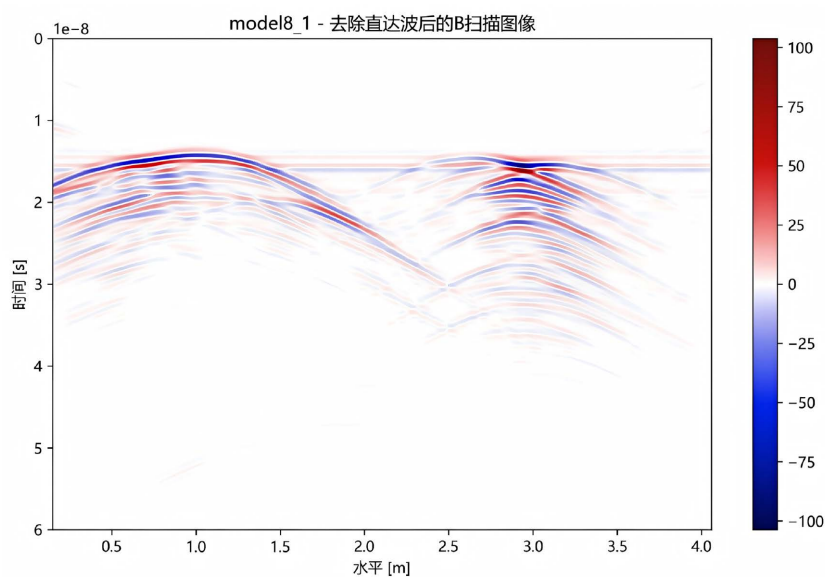


Figure 16. Measured cavity forward echo image
图 16. 实测空洞正演回波图像

5. 结论

本文通过使用 GprMax 对探地雷达在路面地下缺陷及缺陷修复结果的正演研究, 系统分析了不同大小、介质、形状和深度的空洞对雷达回波特征的影响, 并结合工程实例验证了正演模拟的有效性。相比于 2D 正演模拟本文使用的 3D 正演模拟对于精度方面更加完善能更精确地反映目标的空间分布, 但 2D 正演模拟得到图像速度更快但精度低, 3D 正演模拟得到图像速度慢但信息全。需根据精度需求计算成本权衡选择。研究表明, 规则空洞的雷达回波通常呈现出较为典型的双曲线或矩形包络特征, 其几何形态和物理参数(如介质的介电常数、电导率)对回波的振幅、同相轴形态及传播速度有显著影响。

对于不规则空洞, 由于其边缘的非均匀性、顶部凹陷与凸起结构以及底面倾斜或局部凹陷等复杂几何特征, 导致电磁波反射、散射过程更为复杂, 回波图谱表现为一系列异质性反射成分叠加形成的复杂分布模式, 难以用单一清晰的几何轮廓来描述。

工程实例中, 采用 600 MHz 中心频率的探地雷达系统对邯郸市某区域的两个相邻不规则空洞进行探测, 实测雷达图谱显示空洞区域反射信号增强、振幅增大, 并伴有明显绕射波和多次波, 与正演模拟结果在形态上基本一致, 现场开挖验证进一步证实了探地雷达技术在识别地下不规则空洞方面的可行性与准确性。本研究为探地雷达技术在路面地下缺陷检测与评估领域的应用提供了理论依据和实践参考, 有助于提高对复杂地下结构的解释精度。

参考文献

- [1] 赵明堂. 地质雷达技术在城市地面塌陷隐患调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(6): 904-909.
- [2] 赵镇, 黄勇, 冯昆. 三维探地雷达在道路检测中的研究与应用[J]. 测绘通报, 2024(2): 148-152.
- [3] 许泽善, 简世凯, 覃谭, 等. 探地雷达在道路脱空空洞病害检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(1): 116-125.
- [4] 刘康. 探地雷达技术在城市道路病害体探测中的应用[J]. 城市勘测, 2023(S1): 97-101.
- [5] 胡坪伸, 王新红, 张秉来, 等. 次生黄土介质环境地下管线雷达探测正演模拟及实践[J]. 工程地质学报, 2024, 32(2): 590-600.
- [6] 张迪, 莫其妙. 基于 GprMax 的地下管线探地雷达图像正演模拟[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(2): 168-182.
- [7] 李世念, 王秀荣, 林恬, 等. 基于 GprMax 的道路空洞三维探地雷达正演数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 132-138.
- [8] 孙鹏博. 基于 FDTD 的探地雷达管线探测正演模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [9] 宗鑫, 王心源, 刘传胜, 等. 探地雷达在地下考古遗存探测中的实验与应用[J]. 地球信息科学, 2016, 18(2): 272-281.
- [10] 白洁. 三维探地雷达在道路地下空洞检测中的应用[J]. 建材技术与应用, 2025(6): 102-105.
- [11] 李承瑾. 探地雷达在城市道路病害检测中的应用与案例分析[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(18): 77-79.
- [12] 李玉. 城市排水管道渗漏探地雷达正演模拟及信号处理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2023.
- [13] Li, Y., Li, Y., Chen, X. and Yu, J. (2018) Research on Ship-Radiated Noise Denoising Using Secondary Variational Mode Decomposition and Correlation Coefficient. *Sensors*, **18**, Article No. 48. <https://doi.org/10.3390/s18010048>