

基于GprMax的道路路基空洞病害探地雷达正演模拟研究

赵永顺

重庆交通大学土木工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年6月16日; 录用日期: 2025年7月9日; 发布日期: 2025年7月17日

摘要

近年来, 中国公路建设迅速发展, 但由路基病害引发的塌陷事故亦频繁发生。探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)作为一种高效、精确且无损的探测技术, 已在道路隐患检测中得到广泛应用。为快速掌握道路内部空洞病害在探地雷达下的电磁响应特征, 提升空洞检测的准确性与技术指导水平。本文采用基于时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)的GprMax软件, 针对不同形状、不同填充物、不同尺寸及不同激励源中心频率条件下的道路空洞进行正演模拟。通过分析生成的B-scan雷达剖面图, 系统研究各类空洞病害的雷达波场响应特征, 为实际道路GPR探测中的数据分析与解译提供理论依据与技术支持。

关键词

探地雷达, 正演模拟, GprMax, 路基病害, 空洞

The Forward Modeling Study of Road Subgrade Cavities Using Ground Penetrating Radar Based on GprMax

Yongshun Zhao

College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: Jun. 16th, 2025; accepted: Jul. 9th, 2025; published: Jul. 17th, 2025

Abstract

In recent years, China's highway construction has developed rapidly, but collapse accidents caused by subgrade defects have also occurred frequently. Ground Penetrating Radar (GPR), as an efficient,

precise, and non-destructive detection technology, has been widely used in the detection of hidden road hazards. To quickly understand the electromagnetic response characteristics of subgrade cavities under GPR and improve the accuracy and technical guidance of cavity detection, this study employs GprMax software based on the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method to perform forward modeling of road cavities under various conditions—including different shapes, fillings, sizes, and center frequencies of excitation sources. By analyzing the generated B-scan radar profiles, the radar wavefield response characteristics of various cavity defects are systematically studied, providing theoretical foundations and technical support for data analysis and interpretation in practical GPR surveys of road infrastructure.

Keywords

Ground Penetrating Radar, Forward Modeling, GprMax, Subgrade Defects, Cavities

Copyright © 2025 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

随着中国经济持续增长和基础设施建设的加速推进, 全国道路网络规模不断扩大。根据交通运输部数据显示, 截至 2023 年底, 我国公路总里程为 543.68 万公里, 公路密度 56.63 公里/百平方公里[1]。然而, 道路规模的迅猛发展也带来了结构性安全隐患, 路基沉降、路面裂缝及塌陷等病害事件频发, 严重威胁城市运行安全并造成显著经济损失[2]。

道路地下空洞病害是道路结构中常见的隐性病害, 是指在道路基层或路基中形成的空腔或脱空区域, 通常由地下水渗漏、土体流失、地下管线破损或长期交通荷载作用等因素引起。这类病害不仅降低道路结构的承载性能, 影响通行的舒适性和安全性, 更可能在缺乏明显地表征兆的情况下迅速扩展, 最终诱发局部或整体路面塌陷, 对交通系统与人员安全构成严重威胁[3]。然而, 传统检测手段如钻探和开挖受限于成本高、效率低及检测范围有限等问题, 难以满足当前大规模、高效快速及无损的道路病害检测需求。相比之下, 探地雷达(GPR)凭借其高效、连续检测、无损、分辨率高等优势, 被广泛应用于深层道路结构病害检测[4]。

探地雷达正演模拟是探地雷达理论研究的重要内容, 是研究电磁波在地下介质中传播规律的有效方法, 其本质是对电磁波在不同介电特性介质中回波信号的模拟。因此, 利用计算机开展道路路基空洞正演模拟, 研究各种空洞模型的探地雷达探测图像特征和规律, 不必花费大量人力、物力和时间进行实地探测, 就可以得到接近实地探测的效果。这对于认识探地雷达实测结果, 准确解译探地雷达探测数据具有重要的意义[5]。近年来, 学者们在探地雷达正演模拟方面开展了大量研究。例如, 潘磊等[6]利用时域有限差分软件 GprMax, 构建逼真的土壤环境模型, 模拟电磁波在脱空土壤中的传播过程, 分析其回波雷达谱图, 并结合工程实例验证了数值模拟的有效性。刘海等[7]将物理模型试验与渗流场 - 电磁场数值模拟相结合, 探讨地下管线渗漏对探地雷达(GPR)信号特征的影响, 利用 GprMax 程序构建电磁波传播模型, 分析不同材质管道渗漏所引起的雷达响应变化。Diamanti 等[8]运用时域有限差分法(FDTD)构建了路面垂直裂缝的数值模型, 并比较了不同频率天线在裂缝检测中的效果。Li 等[9]通过对实际实验模型与 GprMax 正演模拟方法生成的模拟模型进行对比, 验证了使用 GprMax 模拟数据获取深度学习训练样本的可行性。

本文首先介绍了探地雷达及正演模拟的基本原理, 随后构建典型的路基病害模型, 并基于时域有限差

分法的 GprMax 软件进行正演模拟。通过分析研究空洞病害体的雷达波场响应特征，并通过实例验证正演模拟的有效性，这对提升探地雷达检测技术与雷达图像解译水平具有重要的理论价值和工程指导意义。

2. 探地雷达及 GprMax 正演模拟基本原理

2.1. 探地雷达基本原理

探地雷达通过发射天线向地下发射高频电磁波脉冲，当电磁波遇到地下不同介质的界面时，由于介电常数等电性参数的差异，电磁波的传播速度会发生变化，进而产生电磁波的反射回波。接收天线接收反射信号后，经由信号处理系统进行分析与处理，最终通过数据采集与处理系统将其转换为可视化图像。根据探地雷达生成的波形图像特征，可推断地下介质的分布情况。其工作原理如图 1 所示。

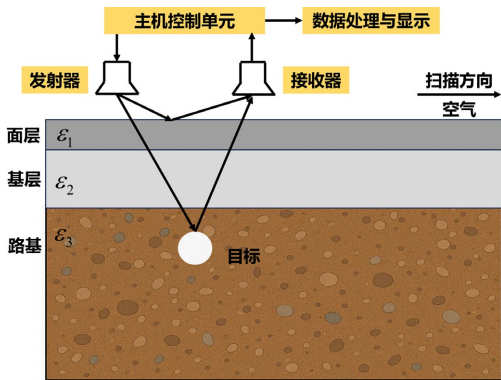


Figure 1. Ground penetrating radar working principle diagram
图 1. 探地雷达工作原理图

2.2. GprMax 正演模拟基本原理

GprMax 是一款开源的电磁波传播仿真软件，主要是用于模拟探地雷达回波信号的传播过程[10]。该软件最早由英国爱丁堡大学的 Antonis Giannopoulos 教授于 1996 年开发，并在后续版本中不断优化和扩展其功能[11]。GprMax 基于时域有限差分法(FDTD) [12]和完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)边界吸收条件[13]，并以 Yee 元细胞作为空间电磁场离散单元。该方法将 Maxwell 旋度方程离散化为差分形式，并在时间域内迭代求解，从而获得微分方程解的近似值。FDTD 方法具有良好的数值稳定性和收敛性，适用于复杂介质环境下的电磁波传播模拟。单个 Yee 网格结构的示意图如图 2 所示。

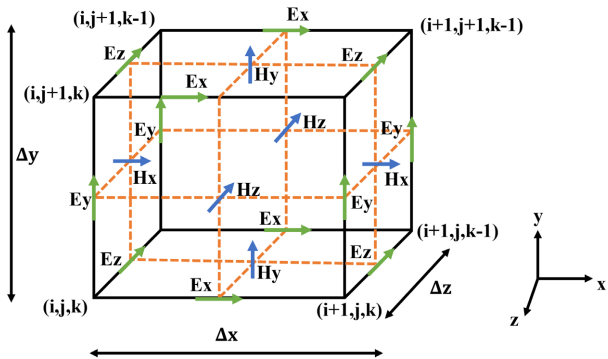


Figure 2. Schematic diagram of a single Yee grid structure
图 2. 单个 Yee 网格结构的示意图

通过电磁波与目标物体的相互影响,可以得到目标物体的探地雷达地质图像。根据电磁波理论,电磁场的运动学和动力学遵循 Maxwell 方程组,在微分形式下表达如式(1)-(4)所示。

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial(\vec{B})}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial(\vec{D})}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

式中, $\vec{E}$ 为电场强度(V/m); $\vec{B}$ 为磁感应强度(T); $\vec{H}$ 为磁场强度(A/m); $\vec{J}$ 为电流密度(A/m²); $\vec{D}$ 为电位移(C/m²); t 为时间(s); q 为电荷密度(C/m³)。

除上述参数外,想要确定电磁场的各场量,还需要引入介质的本构关系。本构关系是描述介质受外部电磁场影响的关系函数,与介质的电场和磁场属性存在紧密联系。在理论研究中,为研究电磁波在介质中的传播规律,假设介质为线性、均匀、各向同性介质,其本构关系如式(5)~(7)所示。

$$J = \sigma E \quad (5)$$

$$D = \varepsilon E \quad (6)$$

$$B = \mu H \quad (7)$$

式中, σ 表示介质的电导率(S/m),是描述介质在外加电场的作用下自由电荷运动产生电流的属性参数。 ε 表示介质的介电常数(F/m),是描述介质中束缚电荷在外加电场作用下的偏移属性,代表了介质中能量的储存。 μ 表示介质的磁导率(H/m),是描述介质对外加磁场固有的原子和分子磁化的属性参数。

3. GprMax 正演模拟

3.1. 正演模拟流程

使用 GprMax 进行正演模拟前,首先需要根据研究内容建立仿真模型,包括模型的尺寸及各参数设置。在确定正演模型的各个参数后,把这些参数信息保存在后缀名为.in 的输入文件内。运行并计算模型后可以得到一系列后缀名为.OUT 的输出文件。OUT 文件中包含反射信号、采样率和天线频率等参数,可以使用 GprMax 软件读取该.OUT 文件,获得 A-Scan 单道扫描图和 B-Scan 多道扫描图。GprMax 建模流程如图 3 所示。

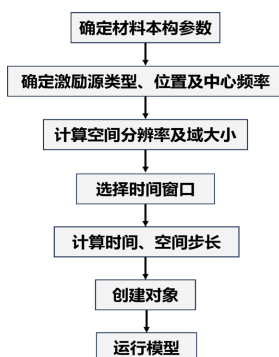


Figure 3. GprMax modeling flowchart

图 3. GprMax 建模流程图

3.2. 道路结构模型参数

本研究所建立的道路结构模型中,涉及的主要介质材料包括沥青、半刚性混合料及土壤,各介质的电磁参数设置参照常用工程材料的相对介电常数及电导率[14]。需要注意的是,不同地区土壤与道路材料的电磁参数可能因成分、密实度和含水率等差异而有所不同,因此在实际应用中应结合局部工程地质与材料特性对参数进行合理修正。以本研究所处的重庆地区为例,由于该地区降雨量充沛、气候湿润,路基土体含水率相对较高,导致其电磁特性较为特殊,因此其相对介电常数及电导率应取值较大,以更好地反映当地实际工况,确保模拟结果的准确性与适用性[15]。

为了构建地下待探测区域的物理模型,需要设置各层介质的相对介电常数和电导率等参数。根据实际道路结构,把模型划分为三层[16][17]:第一层是道路面层,由厚度为 20 cm 的沥青材料构成,沥青材料的相对介电常数为 4,电导率为 0.005 S/m;第二层是道路基层,由厚度为 40 cm 的半刚性混合料组成,主要有水泥土、二灰土、石灰土和水泥石灰土等半刚性材料,其相对介电常数为 9,电导率为 0.05 S/m;第三层是道路路基,由土壤或沙砾构成,其相对介电常数为 12,电导率为 0.01 S/m。为降低探测过程中电磁波的干扰,在沥青面层上方设置了 10 cm 厚的自由空间层,用以模拟空气环境并增强电磁波传播的准确性,空气相对介电常数为 1,电导率为 0 S/m。雷达激励源放置于沥青面层内。道路结构模型如图 4 所示。

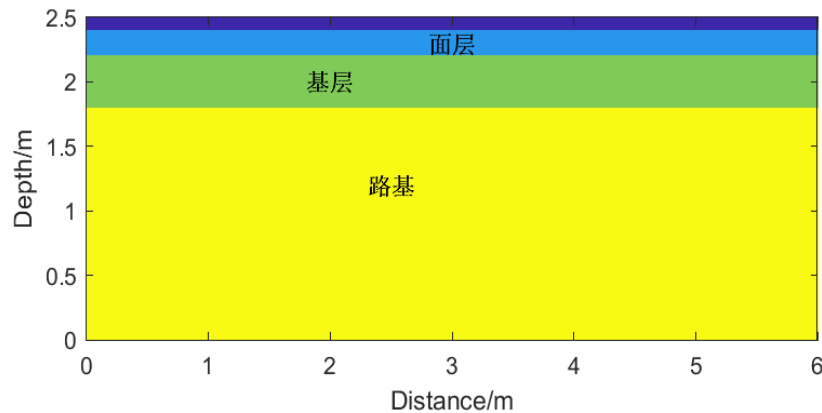


Figure 4. Road structure model diagram
图 4. 道路结构模型图

3.3. 正演模拟参数设置与选取依据

为兼顾探地雷达正演模拟的计算精度与效率,本文在模型参数设定上进行了合理优化。首先,空间网格尺寸设定为 0.01 m × 0.01 m × 0.01 m。虽然更小的网格尺寸(如 0.002 m)可以提高模拟结果的分辨率,减少数值色散误差,但同时也会显著增加计算量和内存需求,导致计算时间大幅延长。根据探地雷达数值模拟的一般经验,通常要求最小网格尺寸不超过最小波长的十分之一,即可保证计算精度和数值稳定性[18]。因此,综合考虑模拟精度与计算效率,选取 0.01 m 的网格划分能够在保证模拟图像清晰度的同时,可显著降低计算资源消耗。通道间距设置为 0.05 m,为空间网格尺寸的 5 倍,有助于在保证图像连续性的同时降低数据量,提升计算效率。模拟道数设定为 100 道,能够覆盖模型横向 6 m 范围,确保获得足够的横向分辨率以反映空洞结构特征。激励源先选用中心频率为 400 MHz 的 Ricker 子波,频率选择依据空洞目标埋深及分辨率需求确定,理论上探地雷达的有效探测深度与频率呈反比关系。根据已有工程经验[19],400 MHz 频率天线在典型道路结构中可实现 2~3 m 的有效探测深度,适合本研究中空洞目

标 1.2 m 埋深的探测需求, 同时兼顾穿透深度与分辨率的平衡。时窗设定需结合目标埋深与地下介质电磁特性, 以确保信号完整采集并提高数据质量。若时窗设置过大, 易引入冗余无效信息, 导致背景噪声比例上升, 信噪比下降, 同时加重数据存储与计算负担。为兼顾信号完整性与计算效率, 将时窗设定为 40 ns, 满足地下病害探测需求。

4. 道路路基空洞模型正演模拟

4.1. 不同形状空洞正演模拟

为了研究空洞形状差异对波场响应特征的影响, 本文设计了矩形和圆形两种形状的充气空洞病害模型进行数值仿真正演模拟。

4.1.1. 矩形空洞

本文建立的模型大小为 $6.0\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 0.01\text{ m}$, 空间网格划分为 $0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m}$, 道间距为 0.05 m, 模拟道数设置 100 道, 中心频率为 400 MHz 的 Ricker 子波作为激励源, 时窗设定为 40 ns, 发射天线起始坐标为(0.5, 2.4), 接收天线起始坐标为(0.55, 2.4)。根据道路结构模型, 在路基层构造一个大小为 0.4 m 的矩形空洞, 空洞中心点深度距离地表为 1.2 m。矩形空洞左下顶点坐标(2.8, 1.1), 右上顶点坐标(3.2, 1.5)。该模型结构如图 5 所示, 正演模拟结果如图 6 所示。

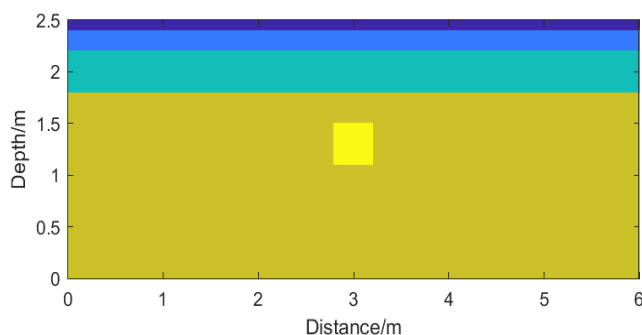


Figure 5. Schematic diagram of a rectangular cavity model
图 5. 矩形空洞模型示意图

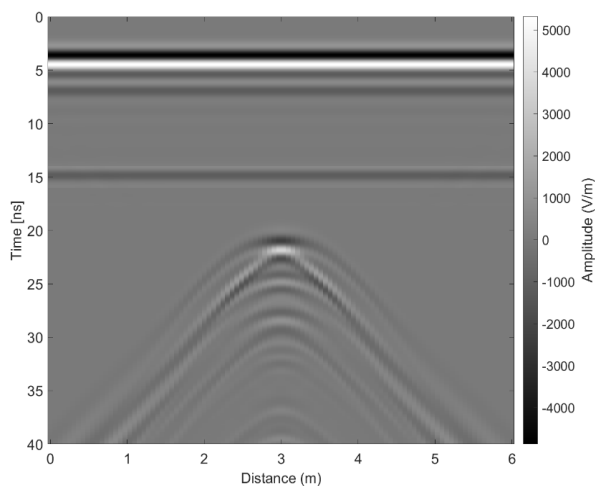


Figure 6. Forward simulation diagram of a rectangular cavity
图 6. 矩形空洞正演模拟图

从矩形空洞正演模拟图可以看出，在 4.5 ns 和 15 ns 左右出现明显的水平反射界面，表明此处界面上下两侧介质的电磁参数存在较大差异，推测分别对应于道路面层与基层、基层与路基之间的分界面。在 21 ns 左右、横向 3 m 位置处，出现了明显的双曲线强反射信号，其曲率较低，且伴随一条长约 0.4 m 的水平直线反射特征，与模型中矩形空洞的尺寸基本一致，说明该反射特征为空洞目标体的电磁响应。由于矩形空洞在水平方向上具有较长的顶部边界，其反射信号表现出明显的水平扩展性，顶点反射特征清晰，所形成的双曲线波形呈现出一定的水平弧度。该特征反映了空洞形状对电磁波传播路径和回波形态的显著影响。

4.1.2. 圆形空洞

在圆形空洞模拟中，依据相同的道路结构模型参数，在路基层中构造一个直径为 0.4 m 的圆形空洞，其圆心坐标为(3.0, 1.3)，空洞中心点距离地表深度为 1.2 m。除空洞形状外，其余模拟参数均与矩形空洞模型保持一致。该模型结构如图 7 所示，正演模拟结果如图 8 所示。

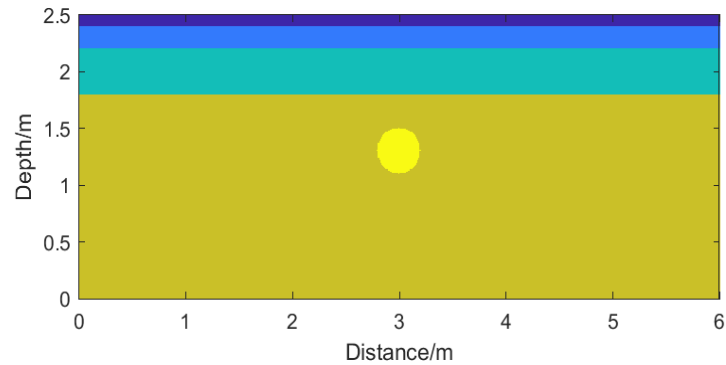


Figure 7. Schematic diagram of a circular cavity model
图 7. 圆形空洞模型示意图

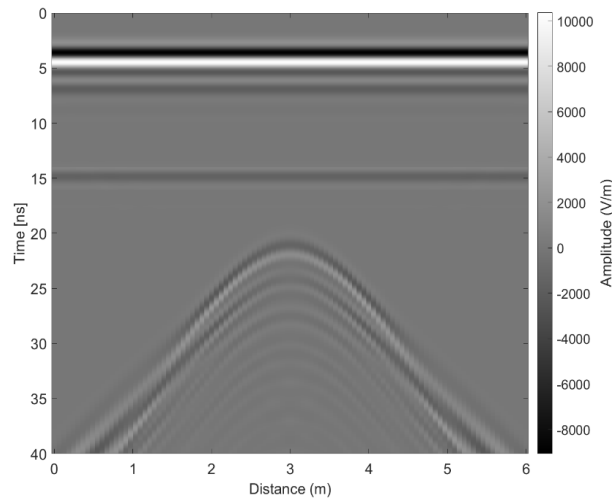


Figure 8. Forward simulation diagram of a circular cavity
图 8. 圆形空洞正演模拟图

从圆形空洞正演模拟图中可以看出，在横向 3 m，走时 21 ns 左右处出现明显的双曲线强反射特征，推测为圆形空洞上边界与周围介质之间电磁参数突变所引起的反射信号。在该双曲线下方还可见一条幅

度相对较弱的次级双曲线，推测为空洞底界面所产生的反射回波。整个雷达图像中异常特征清晰，呈现规则的双曲线形态，未出现明显的随机干扰，表明圆形空洞对电磁波的散射较为均匀。

通过对比矩形与圆形空洞的正演模拟结果可知，两者均表现为典型的双曲线反射特征，且双曲线开口均向下，顶端信号相对较清晰，底端信号相对较弱。矩形空洞在顶界面具有更长的水平延展性，其反射信号在顶端呈近似直线分布，顶端曲率小于底端曲率；而圆形空洞的上下边界则分别形成了两条近似平行的双曲线，边界曲率一致，形态对称。此外，在空洞宽度相同的条件下，矩形空洞的水平接触面更大，因而产生更多的电磁反射，增强了雷达回波的强度。综上，空洞形状不仅影响雷达图像中反射特征的几何形态，也对反射波强度和分布具有显著影响。

4.2. 不同形状路基含水正演模拟

4.2.1. 矩形富水体

在模拟矩形富水体的情形下，所建立的模型大小为 $6.0\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 0.005\text{ m}$ ，空间网格划分为 $0.005\text{ m} \times 0.005\text{ m} \times 0.005\text{ m}$ ，道间距为 0.05 m ，模拟道数设置为 100 道，天线频率为 400 MHz ，时窗为 40 ns ，发射天线起始坐标为 $(0.5, 2.4)$ ，接收天线起始坐标为 $(0.55, 2.4)$ 。根据道路结构模型，在路基层构造一个大小为 0.4 m 的富水矩形空洞，空洞中心点深度距离地表为 1.2 m 。富水矩形空洞左下顶点坐标 $(2.8, 1.1)$ ，右上顶点坐标 $(3.2, 1.5)$ 。水的相对介电常数是 81，电导率是 0.03 S/m 。正演模拟结果如图 9 所示。

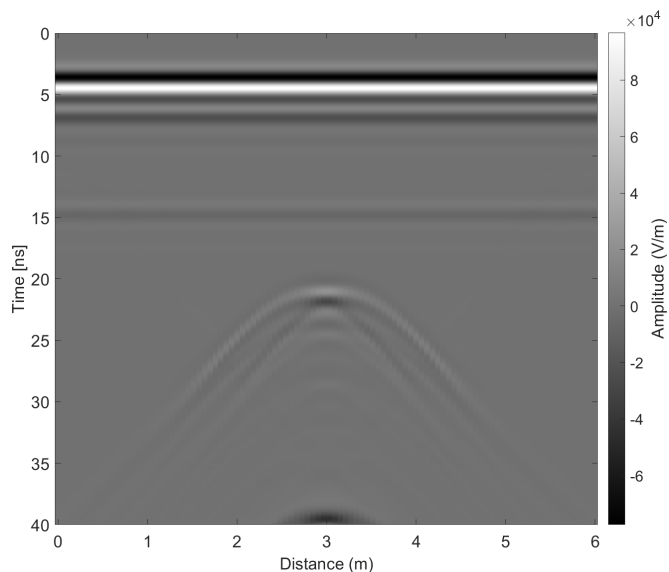


Figure 9. Forward simulation diagram of a rectangular water-rich body
图 9. 矩形富水体正演模拟图

在 4.5 ns 和 15 ns 左右出现明显的水平反射界面，分别对应于道路面层与基层、以及基层与路基之间的分界面，反映出不同结构层间的电磁性质变化。在走时约 21 ns 、横向约 3 m 位置处出现一个强反射信号，呈现典型的双曲线特征，该双曲线顶端曲率较小，近似一条直线，表明反射体的几何边界较为平坦。该位置处的反射信号最强，随着深度的增加，双曲线两翼的反射信号逐渐减弱，表明电磁波在更深层传播过程中能量损失增大或反射强度减弱。此外，波形图下方约 37 ns 处观察到一组反射波，这一现象可归因于电磁波在空洞底部界面处的再次反射。考虑到路基材料与水的相对介电常数分别为 12 和 81，电磁波在路基中的传播速度显著快于在水中，因此在空洞内部及其边界处形成多次反射现象。

4.2.2. 圆形富水体

在富水圆形空洞模拟中,依据相同的道路结构模型参数,在路基层构造一个直径为 0.4 m 的富水圆形空洞,其圆心坐标为(3.0, 1.3),空洞中心点深度距离地表为 1.2 m。除空洞几何形状不同外,其余模拟参数均与富水矩形空洞模型保持一致。正演模拟结果如图 10 所示。

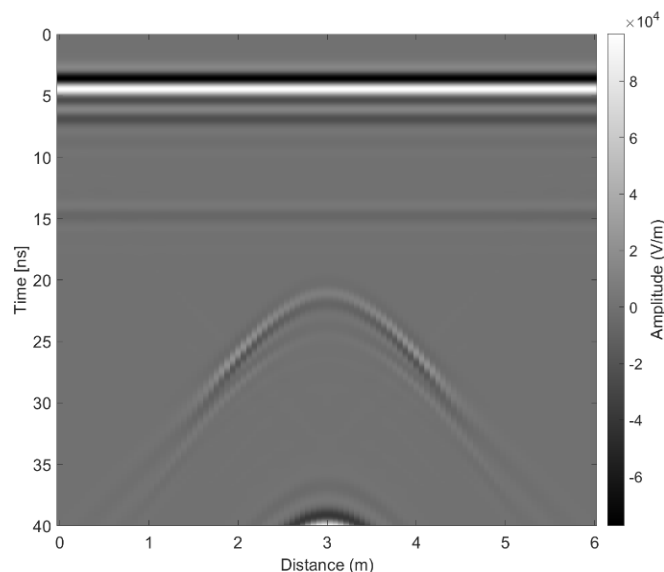


Figure 10. Forward simulation diagram of a circular water-rich body

图 10. 圆形富水体正演模拟图

圆形富水体在雷达图像中同样表现出典型的双曲线强反射特征,开口向下,反射曲线对称且清晰,表明反射体为几何规则的圆形结构。该双曲线顶部反射信号最强,显示电磁波在圆形富水体上边界处发生显著反射,与矩形空洞中观察到的现象一致。随着深度的增加,双曲线两翼的反射强度逐渐衰减,进一步验证了电磁波能量在穿越高介电常数介质(如水)过程中发生的耗散效应。值得注意的是,与富水矩形空洞模拟结果类似,同样可以观察到波形图下方约 37 ns 处还有一组反射波,这同样是由于电磁波在穿过水体后,在其底部边界处再次反射所致。

通过以上正演模拟结果可以看出,相较于充气空洞,富水空洞在雷达图像中呈现出信息量较少、信号分辨率较低的特点。这主要是由于电磁波在高介电常数介质(水体)中传播时会发生显著衰减,特别是高频成分被迅速吸收,从而削弱了回波信号的强度与清晰度。因此,空洞中是否含水将直接影响其在雷达图像中的反射特征。结合反射波的相位变化与频带响应特征,可作为判断路基中异常区域属性(如是否富水或充气空洞)的重要依据。

4.3. 不同大小圆形空洞正演模拟

为研究圆形充气空洞尺寸变化对雷达波场响应特征的影响,选择直径分别为 0.4 m、0.6 m 和 0.8 m 三种尺寸的圆形充气空洞模型进行正演模拟。空洞中心点深度距离地表为 1.2 m,激励源采用中心频率为 400 MHz 的 Ricker 波源,其他参数与前面充气圆形空洞模拟保持一致。正演模拟结果见图 11。

随着空洞尺寸的增加,其反射波形的双曲线上下端之间的距离逐渐变大,反映出顶端与底端界面位置的变化,使空洞病害在雷达图像中更加明显,有利于识别其空间位置。同时,空洞病害处的反射波幅值也随尺寸增加而显著变大,说明电磁反射波幅值与病害表面接触面积有关,两者呈正相关关系。

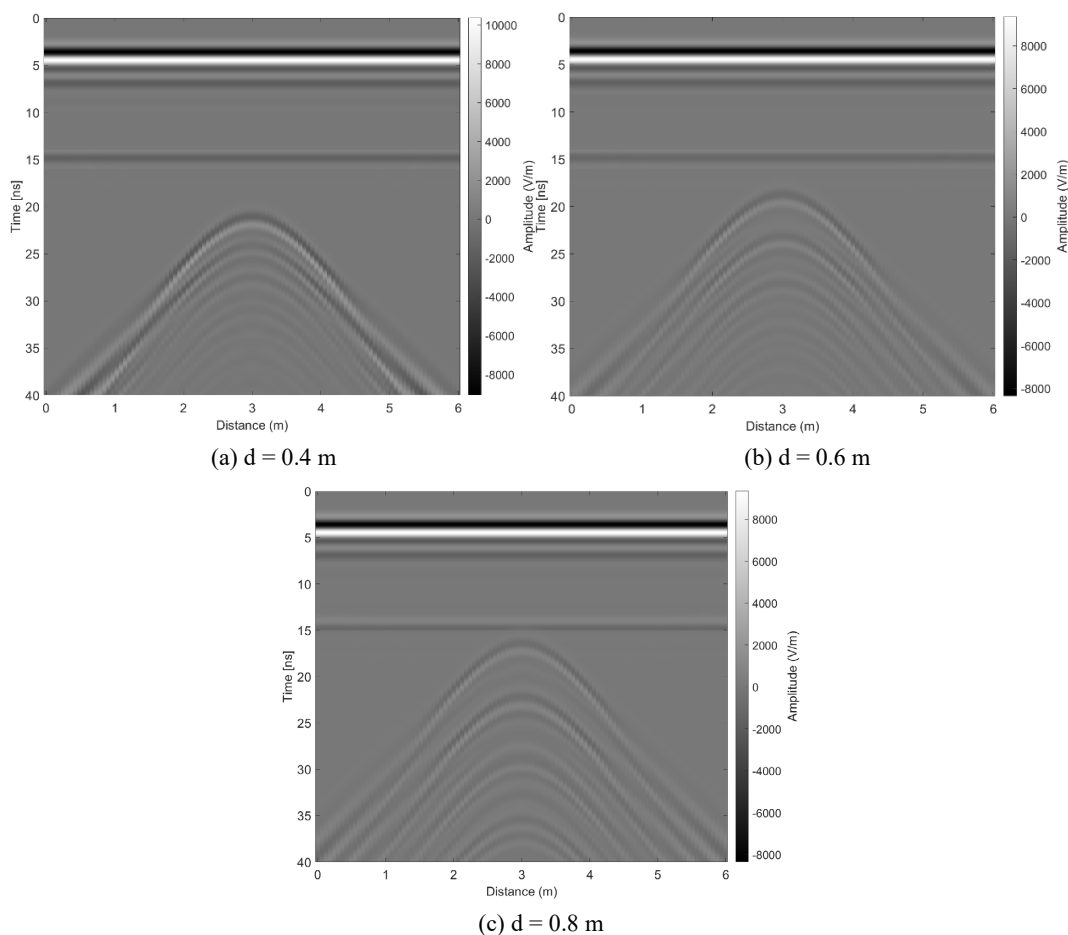
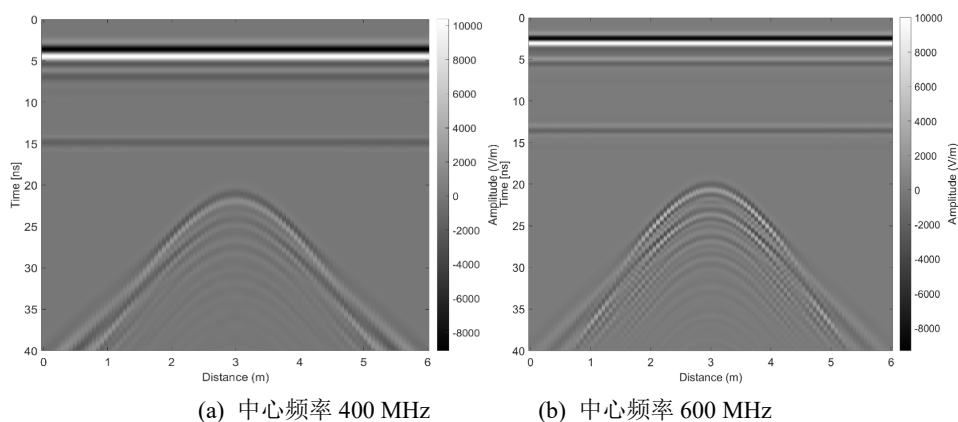
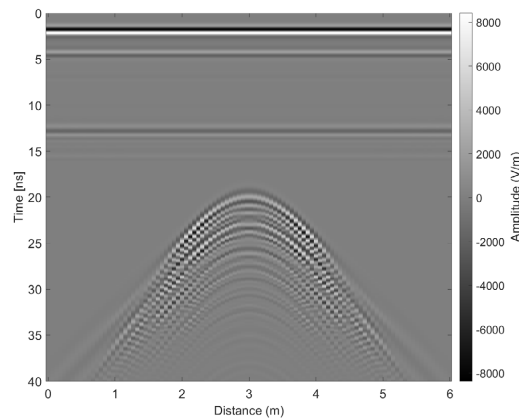


Figure 11. Forward simulation diagram of circular inflated cavities of different sizes
图 11. 不同大小圆形充气空洞正演模拟图

4.4. 不同激励源中心频率下的圆形空洞正演模拟

为研究激励源中心频率变化对雷达波成像特征的影响,选取中心频率分别为 400 MHz、600 MHz 和 900 MHz 的 Ricker 子波作为激励源,对同一圆形充气空洞模型进行正演模拟。该空洞直径为 0.4 m,空洞中心点深度距离地表为 1.2 m,其他参数与前面充气圆形空洞模拟保持一致。不同频率条件下的正演模拟结果如图 12 所示。





(c) 中心频率 900 MHz

Figure 12. Forward simulation diagram for different excitation source center frequencies
图 12. 不同激励源中心频率正演模拟图

对比不同中心频率下的正演模拟图像发现，400 MHz 条件下图像的分辨率最低，空洞边界模糊；而随着激励源中心频率的增大，雷达波正演模拟图像分辨率逐渐提升，反射特征更为清晰，尤其在 600 MHz 和 900 MHz 下的图像中，空洞边界识别效果明显增强。

5. 探测实例正演模拟验证

本次探测所采用的设备是中国电波所研发的 LTD-2600 型探地雷达，该设备兼容多种类型与频率的天线，可适用于多种探测环境与目标类型，具有较强的灵活性与适应性。LTD-2600 型号探地雷达的组成器件如图 13 所示。



Figure 13. Component diagram of the LTD-2600 model ground penetrating radar
图 13. LTD-2600 型号探地雷达组成器件图

本次工程实例是某公路路基，对其病害进行探测，针对病害严重区域进行注浆等处理以保证后续工作高效安全进行。探测过程中所使用的天线中心频率为 400 MHz，数据采集时窗设定为 40 ns。并通过 IDSP7.0S 探地雷达数据处理软件对采集到的雷达数据进行处理。

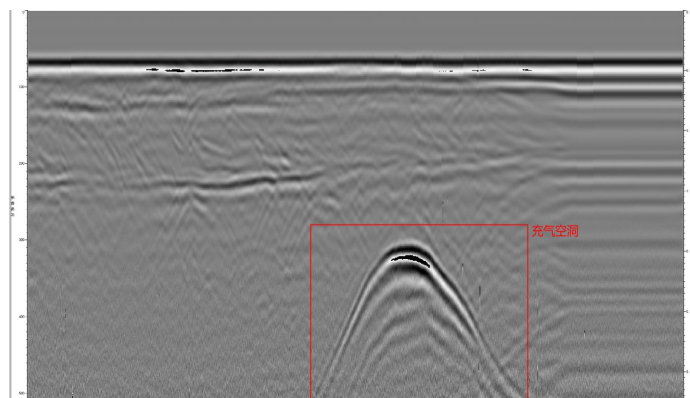


Figure 14. Measured radar image of an inflated cavity

图 14. 实测充气空洞雷达图像

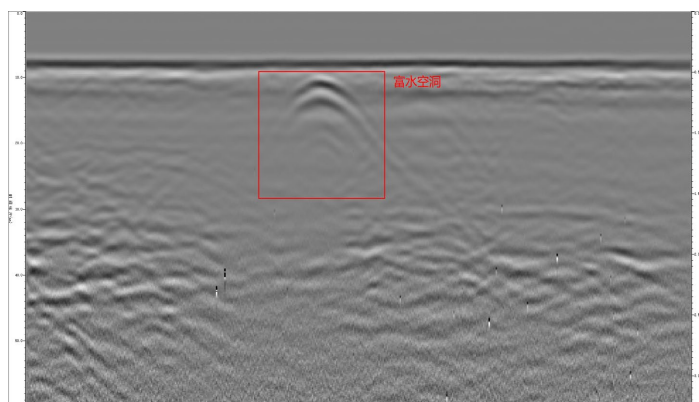


Figure 15. Measured radar image of a water-rich cavity

图 15. 实测富水体空洞雷达图像

图 14 所示图像为充气空洞的实测雷达图像，其双曲线特征清晰，回波信号强烈，形态与前文充气空洞正演模拟图像高度吻合，均呈现开口向下的对称双曲线，顶部反射信号较强，底部反射信号相对较弱。图 15 所示图像为富水空洞的实测雷达图像，信号同样呈双曲线形态，但其反射轮廓相对模糊，回波信号幅值较弱，与富水空洞正演模拟图像中的低分辨率和信号衰减特征高度一致。综上，通过对正演模拟结果与实测雷达图像进行对比分析，验证了两者在空洞识别与雷达波场响应特征方面具有良好的一致性。

6. 结论

本文通过 GprMax 电磁仿真软件，对道路结构中的空洞病害进行正演模拟。通过构建不同形状、不同填充物类型、不同尺寸及不同激励源中心频率的空洞模型，系统分析了各类病害目标的雷达波场响应特征，并将模拟结果与实测图像进行对比验证，得出以下结论：

- (1) 空洞形状对雷达波场响应特征具有显著影响。圆形空洞反射图像清晰对称，信号集中；而矩形空洞由于其水平延展性更强，导致产生更多电磁反射，图像中出现小尺度的干扰特征。
- (2) 填充介质的电磁特性直接影响空洞反射特征。高介电常数介质(如水)增强了界面反射，双曲线形态更加清晰，但同时伴随一定程度的波形衰减和底界面弱反射现象。
- (3) 空洞尺寸变化会影响反射波形的几何特征。随着空洞尺寸的增大，双曲线的延展范围和曲率均显著增大，有利于病害位置的识别和目标边界的判别。

(4) 激励源的中心频率对图像分辨率具有重要影响。在一定频率范围内,中心频率越高,探地雷达图像的空间分辨率越高,但穿透能力相对减弱,因此应根据探测需求合理选择频率。

(5) 将正演模拟结果与工程实测雷达图像进行对比分析表明,两者在目标形态、反射特征及波形响应等方面具有较高的一致性,验证了正演模拟方法在病害识别中的有效性与工程适用性。

综上所述,探地雷达在路基空洞探测中具有良好的应用前景,结合正演模拟分析,不仅有助于理解电磁波与目标物体的相互作用机理,还可为病害识别与图像解译提供重要的理论参考与实践指导。

参考文献

- [1] 2023 年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2024(15): 31-35.
- [2] Wang, Z., Zhu, J. and Ma, T. (2024) Review on Monitoring of Pavement Subgrade Settlement: Influencing Factor, Measurement and Advancement. *Measurement*, **237**, Article ID: 115225. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115225>
- [3] Li, F., Yang, F., Qiao, X., Xing, W., Zhou, C. and Xing, H. (2023) 3D Ground Penetrating Radar Cavity Identification Algorithm for Urban Roads Using Transfer Learning. *Measurement Science and Technology*, **34**, Article ID: 055106. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acb6e3>
- [4] Yang, M., Fang, H., Wang, F., Wang, Y., Du, X. and Lei, J. (2021) First-Order Symplectic Euler Method for Ground Penetrating Radar Forward Simulations in Dispersive Medium. *Construction and Building Materials*, **299**, Article ID: 123904. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123904>
- [5] Zhao, S. and Al-Qadi, I. (2017) Pavement Drainage Pipe Condition Assessment by GPR Image Reconstruction Using FDTD Modeling. *Construction and Building Materials*, **154**, 1283-1293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.103>
- [6] 潘磊, 宛新林, 孙天宇, 等. 基于 Gprmax 的探地雷达地下空洞的正演及其研究[J]. 安徽建筑, 2021, 28(11): 167-169.
- [7] 刘海, 黄肇刚, 岳云鹏, 等. 地下管线渗漏环境下探地雷达信号特征分析[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1257-1264.
- [8] Diamanti, N. and Redman, D. (2012) Field Observations and Numerical Models of GPR Response from Vertical Pavement Cracks. *Journal of Applied Geophysics*, **81**, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006>
- [9] Li, L., Yang, L., Hao, Z., Sun, X. and Chen, G. (2024) Road Sub-Surface Defect Detection Based on GprMax Forward Simulation-Sample Generation and Swin Transformer-YOLOX. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **18**, 334-349. <https://doi.org/10.1007/s11709-024-1076-0>
- [10] Warren, C., Giannopoulos, A. and Giannakis, I. (2016) GprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, **209**, 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
- [11] Giannopoulos, A. (2005) Modelling Ground Penetrating Radar by GprMax. *Construction and Building Materials*, **19**, 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007>
- [12] Kane Yee, (1966) Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **14**, 302-307. <https://doi.org/10.1109/tap.1966.1138693>
- [13] 冯德山, 杨良勇, 王珣. 探地雷达 FDTD 数值模拟中不分裂卷积完全匹配层对倏逝波的吸收效果研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4733-4746.
- [14] Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M. and Dixon, N. (2007) Assessment of in Situ Dielectric Constant of Pavement Materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2037**, 128-135. <https://doi.org/10.3141/2037-12>
- [15] 刘宸. 基于深度学习的路面内部病害 B 扫描数据扩充及自动识别研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [16] 尹光辉, 冯雨宁, 张怀凯, 等. 基于 GprMax 软件的道路路基空洞探地雷达正演模拟[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(4): 480-486.
- [17] 吴旭东, 何文勇, 龙万学, 等. 基于探地雷达的路基病害正演模拟及分析[J]. 中外公路, 2020, 40(S2): 105-109.
- [18] Giannopoulos, A. (2005) Modelling Ground Penetrating Radar by GprMax. *Construction and Building Materials*, **19**, 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007>
- [19] Thitimakorn, T., Kampananon, N., Jongjaiwanichkit, N. and Kupongsak, S. (2016) Subsurface Void Detection under the

Road Surface Using Ground Penetrating Radar (GPR), a Case Study in the Bangkok Metropolitan Area, Thailand. *International Journal of Geo-Engineering*, 7, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0017-8>