

拟与时频域特征的探地雷达路面裂缝识别方法研究

张木旺¹ 陈少华² 陈航³ 王贤军³

1. 武义县公路管理中心, 浙江 金华 321000

2. 武义县交通运输局, 浙江 金华 321000

3. 浦江县公路与运输事业发展中心, 浙江 金华 321000

[摘要]路面结构内部裂缝是影响道路安全与使用寿命的重要隐性病害,其高效、无损识别是当前道路智能养护研究的关键问题。针对现有探地雷达裂缝识别过程中存在的图谱解读主观性强、识别精度低等难题,文章提出了一种融合正演模拟与时频域特征分析的裂缝智能识别方法。首先,基于 Gprmax 构建典型道路结构三维 FDTD 仿真模型,模拟不同深度与层位裂缝的雷达响应特征,揭示电磁波传播与裂缝形态的关系;其次,从时域、频域及连续小波变换等多维角度提取雷达信号特征,分析其与裂缝位置、类型的关联规律,为后续自动化裂缝识别模型的构建提供特征依据,也为道路结构健康评估与养护决策提供技术支持。

[关键词]正演模拟;时频域特征;路面内部裂缝;三维探地雷达;道路检测

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19198

中图分类号: U216.41

文献标识码: A

Research on Ground Penetrating Radar Road Crack Identification Method Based on Time Frequency Domain Features

ZHANG Muwang¹, CHEN Shaohua², CHEN Hang³, WANG Xianjun³

1. Wuyi County Highway Management Center, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

2. Wuyi County Transportation Bureau, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

3. Pujiang County Highway and Transportation Development Center, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

Abstract: Internal cracks in road surface structures are important hidden diseases that affect road safety and service life, and their efficient and non-destructive identification is a key issue in current research on intelligent road maintenance. This article proposes an intelligent crack recognition method that combines forward simulation and time-frequency domain feature analysis to address the challenges of subjective interpretation and low recognition accuracy in the existing ground penetrating radar crack recognition process. Firstly, a typical 3D FDTD simulation model of road structure is constructed based on Gprmax to simulate the radar response characteristics of cracks at different depths and layers, revealing the relationship between electromagnetic wave propagation and crack morphology; Secondly, radar signal features are extracted from multidimensional perspectives such as time domain, frequency domain, and continuous wavelet transform, and their correlation with crack location and type is analyzed to provide feature basis for the construction of subsequent automated crack recognition models, as well as technical support for road structural health assessment and maintenance decision-making.

Keywords: forward simulation; time-frequency domain characteristics; internal cracks in the road surface; 3D ground penetrating radar; road detection

引言

我国交通基础设施服役年限持续增长,路面内部裂缝这类隐性病害愈发突出,其不仅削弱路面承载能力,还易引发水渗透、材料老化等二次破坏,严重影响道路运营安全与使用寿命,实现该类病害的高效、无损、精准识别成为道路养护领域的核心研究课题。

传统人工目测、钻芯取样等检测方法,存在主观性强、准确性低或破坏性检测、代表性差等局限。探地雷达(GPR)作为非接触式无损检测技术,凭借良好的地下结构穿透性与实时成像特性,在道路病害检测中应用潜力显著,三维阵列式 GPR 的普及更为此提供了技术支撑。国内外学者

已围绕 GPR 裂缝识别开展诸多研究,国外形成了相关雷达系统与自动识别方法,国内则聚焦于电磁参数建模、病害图谱解释等方向,但当前 GPR 应用仍面临图谱解读主观、电磁响应特征不明、识别精度偏低等问题,难以形成可推广的自动化识别体系。为此,本文结合正演模拟与时频特征分析手段,围绕“模拟-特征-验证”思路开展研究,旨在明确裂缝雷达响应机制、提取判别性信号特征,为路面内部裂缝智能识别算法构建提供理论与数据支撑。

1 正演模拟下的裂缝雷达响应特征分析

为系统研究探地雷达在路面裂缝识别中的响应规律,本文基于时域有限差分法(FDTD)建立典型道路结构模

型,利用 Gprmax 仿真平台模拟不同深度与不同层位裂缝的电磁响应过程。通过分析正演图谱中裂缝反射特征变化,提炼其形态规律与信号特征,为后续时频域分析提供数据支撑。

1.1 正演模拟方法与建模参数

1.1.1 Gprmax 正演模拟

Gprmax 是基于时域有限差分法(FDTD)的电磁波仿真软件,可通过输入文件设定介电参数、激励源与天线位置,完成模型构建与电磁波传播仿真,生成 A-scan、B-scan 图等输出结果^[1],本文基于该流程建立典型裂缝结构模型。

1.1.2 数值模型设计及参数选取

本文聚焦于道路结构内部裂缝病害的电磁响应特征研究,利用 Gprmax 软件建立了基于时域有限差分法(FDTD)的三维探地雷达正演模拟模型。根据典型道路结构组成,模型设置包括三层结构:沥青混凝土面层、水泥稳定碎石基层以及稳定土底基层^[2]。

正演模型的总体尺寸为 1.8m×0.68m×0.8m,各结构层厚度分别为:面层 18cm,基层 30cm,底基层 20cm。激励信号选用中心频率为 1500MHz 的 Ricker 子波,发送与接收天线间距设为 0.2m,总仿真时间窗为 15ns,道间距为 0.01m。

1.2 不同裂缝深度下的雷达图谱特征

为研究裂缝深度变化对雷达图谱特征的影响,在面层

与上基层的交界位置设置了三种不同裂缝深度的正演模拟模型,裂缝深度分别为 10cm、15cm 和 20cm,模拟时间窗设为 15ns。病害区域的介电常数设定为 1,电导率为 0,激励源为中心频率为 1200MHz 的 Ricker 子波^[3],收发天线间距为 0.2m,横向步进距离为 0.01m,采集道数共计 154 道。正演模拟得到的典型雷达剖面图如图 1 所示。

从图 1 可见,当道路结构中存在裂缝病害时,雷达剖面图中均呈现出明显的双曲线回波特征,表现为顶点振幅增强、两侧逐渐减弱的反射形态。这是由于电磁波遇到裂缝边界时产生局部反射,裂缝横向尺寸较小,反射波在时-空域中形成典型的双曲线结构。

具体而言,裂缝深度为 10cm 时,由于裂缝靠近天线表面,电磁波尚未发生明显衰减,反射波信号最为强烈,双曲线形态紧凑清晰;当裂缝深度增至 15cm,反射波能量略有下降,但图谱仍保持较好的识别度,双曲线开口相对变宽;而当裂缝深度达到 20cm 时,电磁波传播路径加长,介质吸收与能量衰减显著增强,回波信号明显减弱,需通过增益调整才能清晰辨识裂缝响应。

总体来看,随着裂缝深度的增加,图谱中双曲线特征的开口呈增大趋势,反射波延迟明显,离心率增大,图像中波形幅值和到达时刻的变化规律可为裂缝深度估计提供参考依据。这为后续的裂缝识别特征提取及深度反演提供了图谱基础和理论支持。

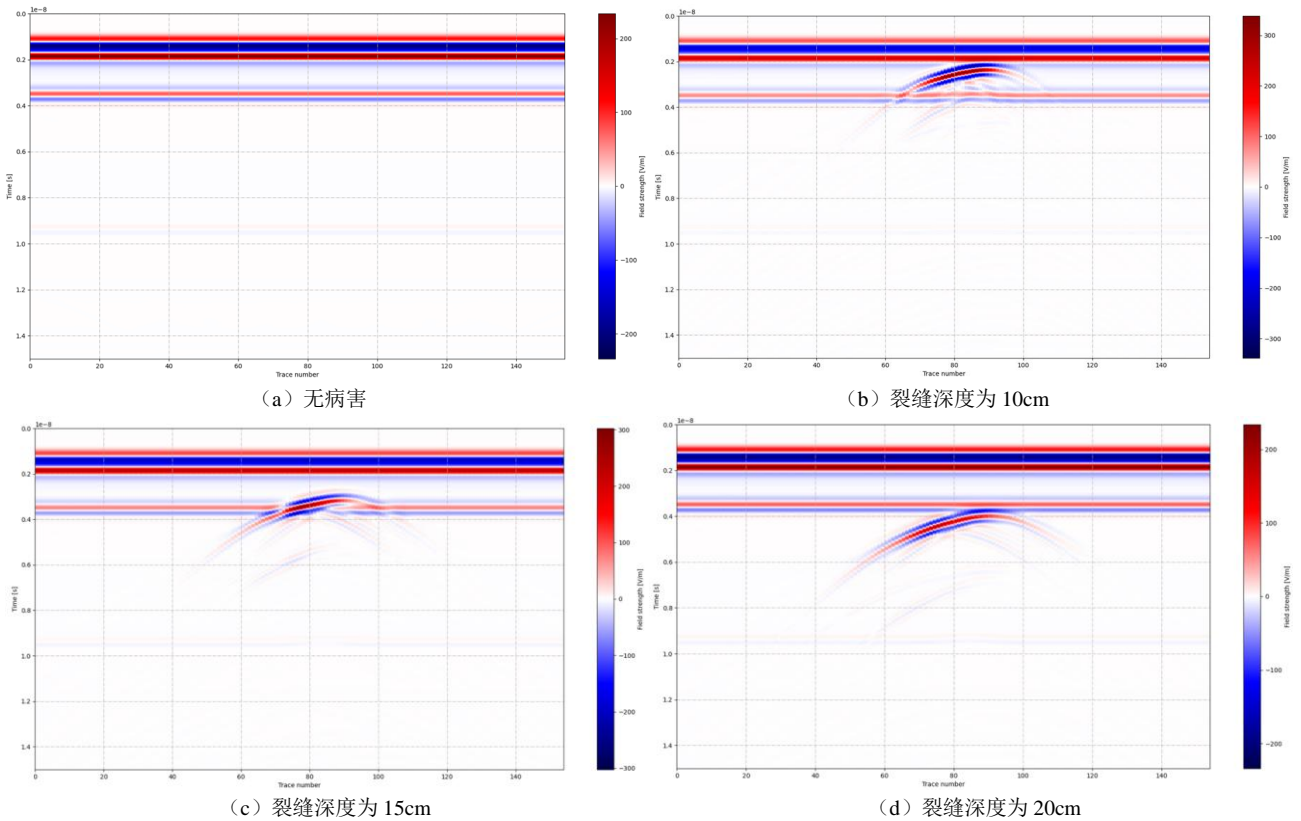


图 1 不同裂缝深度的病害模拟结果

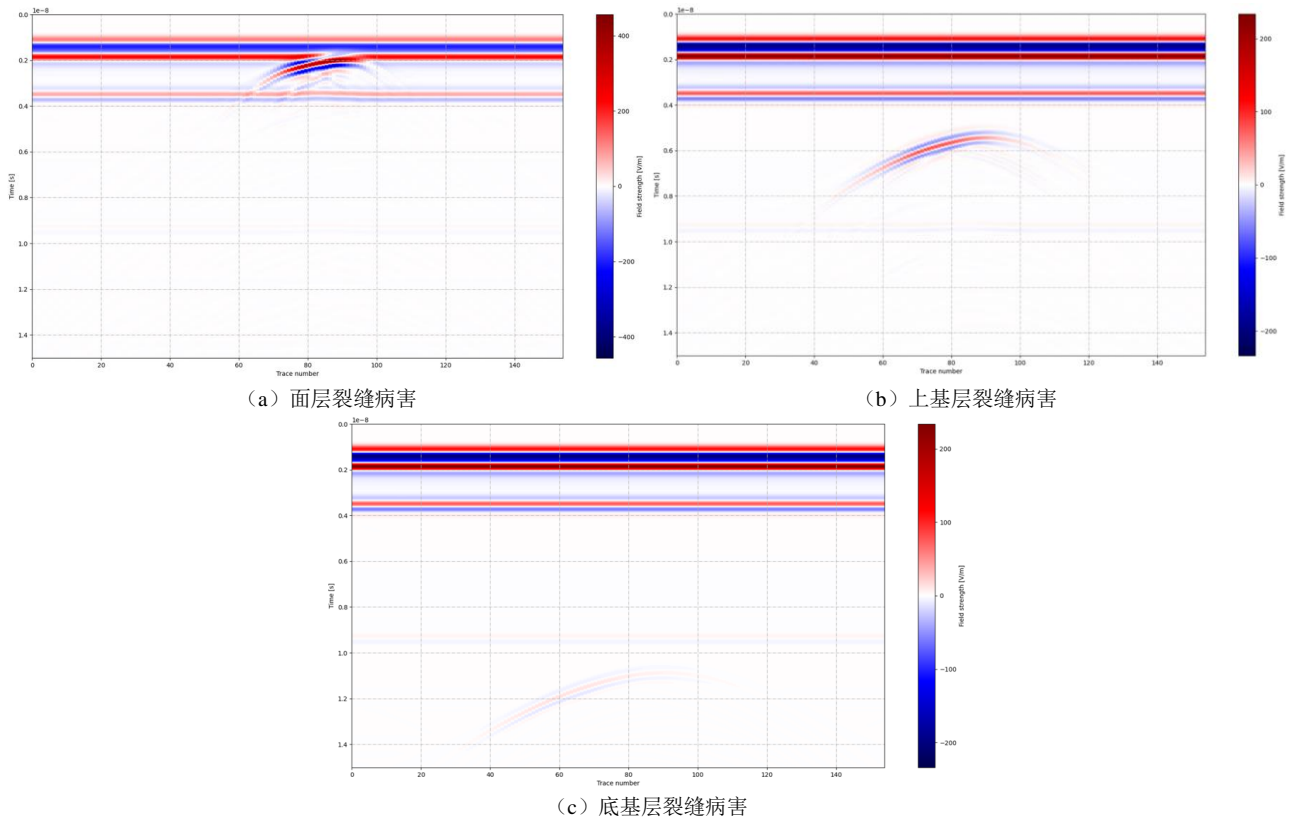


图2 不同层位的裂缝病害雷达图谱

1.3 不同裂缝层位下的雷达图谱特征

为研究裂缝位于不同结构层位时的雷达图谱响应特征,在路面结构的面层、基层与底基层位置分别设置了高度相同(5cm)的裂缝模型。接收天线分别布设在距地表0.38m和0.68m处,模拟时窗设定为15ns。激励源采用中心频率为1500MHz的Ricker子波,天线移动步长为0.01m,采集通道总数为154道。典型的正演模拟剖面图如图2所示。

通过对比不同层位裂缝病害的正演模拟图谱可以发现:尽管裂缝所处层位不同,其雷达剖面图均呈现出典型的抛物线(双曲线)特征,表明裂缝在电磁波作用下具有一致的反射规律。图谱特征可用于清晰地区分裂缝所处的结构层位,且随着裂缝深度的增加,其回波信号的强度逐渐减弱,反映出电磁波传播过程中的能量衰减现象。因此,结合图谱特征可初步判断裂缝的深度与空间位置。

进一步分析表明,面层裂缝图谱信号最清晰,可精准识别裂缝宽度、形态等细节;上基层裂缝信号略模糊,但仍能识别整体位置与走向;底基层裂缝反射波颜色更浅,因电磁波传播路径更长、能量损耗更大,这也进一步验证了裂缝深度与回波强度的关联性。

综上所述,通过Gprmax正演模拟构建不同深度与层位的裂缝病害模型,并分析其雷达剖面图谱特征,可以明

确地识别出裂缝在雷达图中的典型响应形态及其随埋深变化的图谱差异。这些结果不仅验证了探地雷达对内部裂缝的敏感性与识别能力,也为后续特征提取提供了直观基础。不同层位与深度的裂缝在雷达图谱中的回波幅度、形态轮廓及颜色反差等方面均具有显著差异,表明电磁响应特征与裂缝物理属性之间存在内在联系。

2 雷达信号的时频域特征提取分析

由于同一雷达图像特征可能由多种地质因素或地下目标(如空洞、异物、界面起伏等)引起,仅凭图谱形态难以准确判断具体的内部病害类型与位置。因此,本章从时域、频域及时频域三个维度对雷达信号进行深入分析与特征提取,旨在进一步揭示裂缝病害的辨识特征。

2.1 时域特征分析

时域分析是一种以时间为自变量,研究信号随时间变化特性的分析方法。通过提取平均值、方差、峰值等指标,可揭示信号整体特征,用于异常波形与局部异常点的识别^[4-5]。

为探究裂缝深度对雷达波信号传播特性的影响,本文设置了12个不同深度的裂缝模型,裂缝深度从6cm至18cm,间隔1cm,病害尺寸均为2cm×2cm,填充介质为空气。仿真时窗设置为15ns,激励源采用中心频率为1500MHz的Ricker子波。提取其雷达波形信号进行时域特征分析,结果如图3所示。

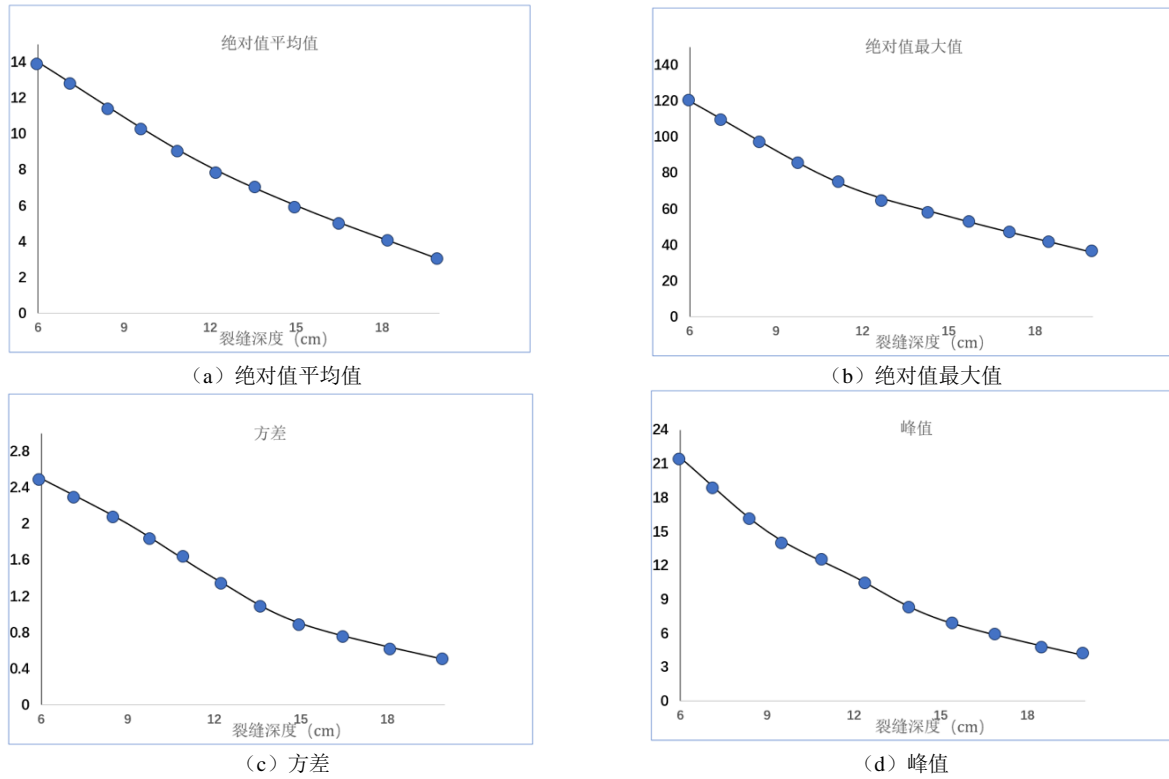


图 4 不同裂缝深度的时域特征值变化趋势

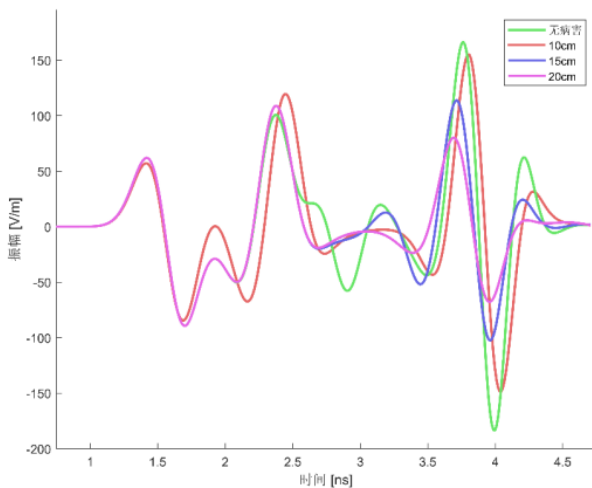


图 3 不同裂缝高度的时域曲线图

选取 3.5ns~4.25ns 信号特征明显区域分析, 结果显示裂缝深度与波形振幅呈负相关, 波峰波谷幅值随深度增加而降低, 且振幅峰值在时间轴上右移, 表现为信号到达时间延迟。进一步利用 MATLAB 软件提取波源信号, 截取时窗为 1ns 至 4.5ns 的有效波形数据, 剔除直达波的干扰, 绘制时域特征指标。图 4 所示结果表明, 存在裂缝病害时的时域特征值明显低于无病害情况, 且这些特征值随裂缝深度增加而逐渐减小, 呈现出良好的相关性。

2.2 频域特征分析

在对时域信号分析的基础上, 得到了路面不同裂缝深

度病害的雷达信号随时间的变化规律。但仅从时域层面分析仍不全面, 本节进一步引入频域分析方法, 对雷达波信号进行频谱特征提取。频域分析方法^[6]通过傅里叶变换将时域信号转化为不同频率成分的组合, 从而揭示信号在各频率上的分布与能量特征, 有助于识别隐藏的周期性规律和频谱结构, 是评估雷达信号反射能量变化的重要手段。

本文利用 Matlab 对不同裂缝深度的时域信号数据进行傅里叶变换, 将其转换为频域信号。选取裂缝深度为 10 cm、15 cm、20 cm 以及无病害的频域数据进行对比分析, 结果如图 5 所示。

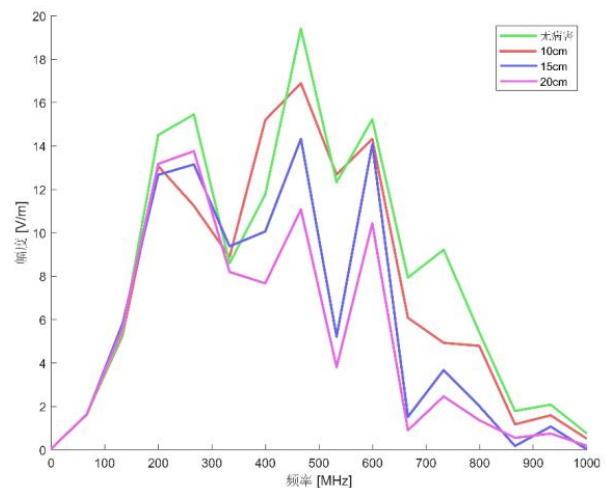


图 5 不同深度裂缝的频谱图

如图 5 所示，在 400 MHz~700 MHz 特征频段中，裂缝深度越大，频谱幅值整体越小。所有模型的频率峰值主要分布在 480 MHz、540 MHz 和 630 MHz 附近。主峰能量依次为无病害>10 cm>15 cm>20 cm，说明裂缝越深，能量衰减越显著，反映在图谱中为信号强度降低、能量集中区域减弱。

进一步利用 Matlab 计算各裂缝频域信号的特征值，结果如图 6 所示。分析发现，随着裂缝深度的增加，频域

的平均值、方差、均方根逐渐减小，而偏斜率呈上升趋势，说明频谱结构随裂缝变化具有可辨识特征。

2.3 时域特征分析

通过 Matlab 对不同裂缝深度的病害雷达信号进行连续小波变换 (ContinuousWaveletTransform, CWT)^[7]，提取其时频特征，分析不同频率成分随时间的变化规律。图 7 展示了各裂缝深度下的时频图，其能量分布特征如下。

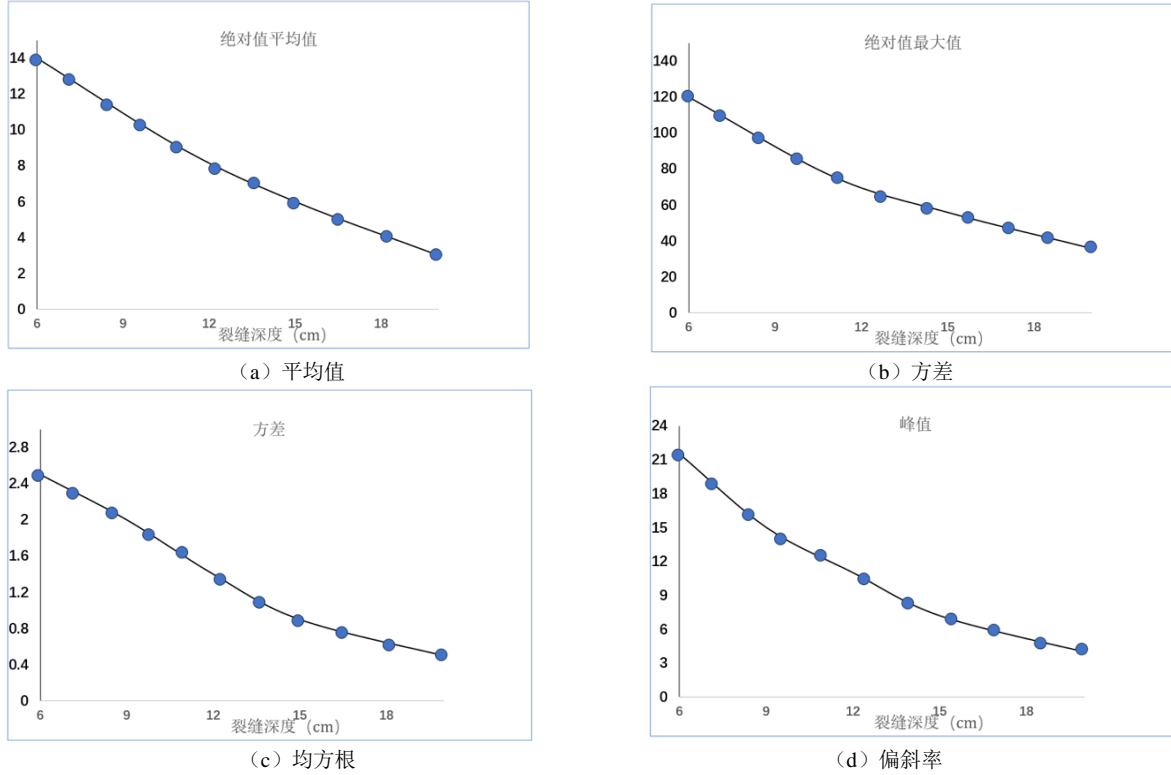


图 6 不同裂缝深度的时域特征值变化趋势

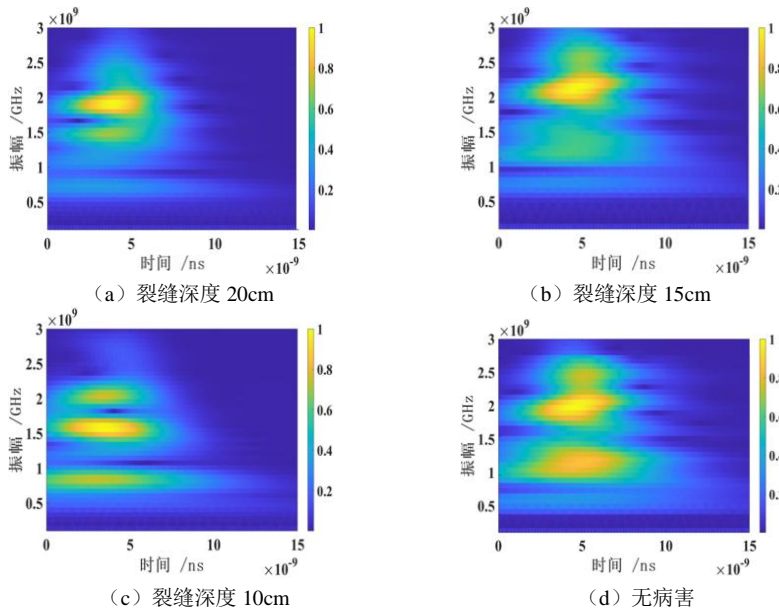


图 7 不同裂缝深度病害时频图

当裂缝深度为20cm时,能量主要集中在1.8~2.1GHz;裂缝深度为15cm时,能量主要集中在1.8~2.3GHz;裂缝深度为10cm时,能量分别集中于0.6~1.0GHz、1.4~1.7GHz和1.8~2.2GHz三个频段;无病害时频图的能量主要分布在1.0~1.4GHz、1.8~2.1GHz和2.3~2.6GHz,时间上集中于2.0~8.0ns。整体来看,裂缝病害的能量高亮区域在频率与时间分布上均与无病害存在差异:一方面,随着裂缝深度的增加,能量逐渐减弱,频谱分布更趋集中;另一方面,裂缝病害的能量响应在时间轴上出现更早,主要集中于1.0~7.0ns区间。这表明,小波变换可有效揭示裂缝深度对雷达信号时频特征的影响,为裂缝的准确识别提供依据。

综上所述,本章从时域、频域与时频域三个角度出发,系统分析了不同裂缝深度下雷达信号的响应特性。时域分析揭示了裂缝深度与反射波幅值、时延之间的关系,频域分析揭示了裂缝对雷达信号频谱能量分布的影响,而时频域分析则进一步刻画了能量在时间与频率维度上的动态变化规律。多维度特征的提取有助于深入揭示裂缝病害对雷达信号的干扰机制,并为精确识别裂缝提供理论支撑。

3 结论与展望

本研究围绕探地雷达在路面内部裂缝识别中的应用,提出了一种融合正演模拟与时频域特征分析的方法,并基于数值模拟、室内实验与工程实测三方面开展系统性研究,主要结论如下:

(1) 正演模拟方面:基于gprMax构建不同深度、不同层位的裂缝模型,模拟分析了裂缝在雷达图谱中的典型响应特征,发现其均呈现为明显的高亮双曲线回波,且随着裂缝深度增加,回波幅值逐渐减弱、图谱呈现更宽,具备可识别性。

(2) 时频域特征提取方面:从时域、频域和时频域三个维度对不同深度裂缝的雷达信号特征进行了系统分

析,提取了平均值、方差、峰值、偏斜率、小波能量分布等指标,发现裂缝深度与这些特征指标之间具有良好的相关性,证明多维度特征可有效支撑裂缝识别。

后续研究可进一步拓展复杂病害形态的建模与识别精度,引入深度学习等智能算法提升特征提取与分类能力,同时探索多模态数据融合方法,增强系统对多种病害情形的综合判断能力,并推动识别方法向集成化软件平台和工程现场实用化方向发展。

[参考文献]

- [1]郭道俊,周幸宇,许崇帮,等.基于DeepLabV3+网络改进的快速隧道病害分割方法[J].公路交通科技,2023,40(8):127-135.
 - [2]WangWJ,SuC.Convolutionalneuralnetwork-basedpavementcracksegmentationusingpyramidattentionnetwork[J].IEEE Access,2020(8):206548-206558.
 - [3]林伊.车载路面裂缝检测图像处理系统的设计与实现[D].武汉:华中科技大学,2011.
 - [4]SHAHEENM,AL-MAYAHA,TIGHES.Anovelmethodforevaluatinghotmixasphaltfatiguedamage:X-raycomputedtomography[J].ConstructionandBuildingMaterials,2016(113):121-133.
 - [5]Ayenu-PrahA,Attoh-OkineN.Evaluatingpavementcrackswithbidimensionalempiricalmodedecomposition[J].EURASIPJournalonAdvancesinSignalProcessing,2008(2008):1-7..
 - [6]邓飞.探地雷达隧道超前预报正演模拟及应用[J].建筑技术开发,2022,49(9):93-97.
 - [7]邢振邯,戴世鑫,陈铸,等.复杂地质条件下隧道地质雷达与数值模拟研究[J].山西建筑,2025,51(2):149-153.
- 作者简介:张木旺(1990.11—),武义县公路管理中心,男,汉,山东省菏泽市曹县件楼镇中张庄,公路工程工程师,硕士研究生,建筑与土木工程专业。