

探地雷达检测技术的优化研究

牛玉超

中铁隧道集团一处有限公司 重庆 401120

【摘要】探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 作为一种高效的无损检测技术, 广泛应用于道路、隧道及地下结构检测。然而, 受限于复杂环境干扰、数据解译难度及设备性能等因素, 其检测精度和效率仍有提升空间。本文聚焦探地雷达技术的优化路径, 从多通道接收、双频控制、数据融合算法及可视化技术等角度提出改进方案, 并通过实验验证优化效果, 旨在为高精度检测提供理论支持与实践参考。

【关键词】探地雷达; 检测技术; 优化研究; 信号处理; 成像算法

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 是一种利用电磁波进行地下目标探测的技术, 具有无损、高效、高精度等优点, 广泛应用于工程地质、考古、环境监测等领域。在工程地质中, 探地雷达可用于探测地下空洞、溶洞、地层结构等, 为工程建设提供重要的地质信息; 在考古领域, 探地雷达能够无损探测地下文物, 为考古发掘提供科学依据; 在环境监测方面, 探地雷达可用于地下水污染监测、土壤结构分析等, 对环境保护具有重要意义。然而, 现有探地雷达检测技术在分辨率、抗干扰能力等方面存在不足, 难以满足日益增长的应用需求。因此, 开展探地雷达检测技术优化研究, 提高其检测精度和效率, 具有重要的现实意义和科学价值。

近年来, 国内外学者在探地雷达检测技术优化方面开展了大量研究。在信号处理方面, 研究者们提出了多种算法, 如小波变换、主成分分析等, 以提高信号的分辨率和抗干扰能力; 在天线设计方面, 新型天线结构不断涌现, 如阵列天线、超宽带天线等, 以适应不同应用场景的需求; 在数据处理软件方面, 研究者们开发了多种高效的数据处理平台, 提高了数据处理的效率和准确性。然而, 现有研究仍存在一些不足, 如算法的通用性不强、天线成本较高、数据处理软件的功能不够完善等。因此, 进一步开展探地雷达检测技术优化研究, 具有重要的理论和实践意义。

本文旨在通过技术优化, 提高探地雷达的检测精度和效率。具体目标包括: 改进探地雷达的信号处理算法, 提高信号的分辨率和抗干扰能力; 优化探地雷达的天线设计, 增强其对不同介质的适应性; 开发高效的探地雷达数据处理软件, 提高数据处理的效率和准确性。通过上述研究, 为探地雷达在工程地质、考古、环境监测等领域的应用提供技术支持。

1 探地雷达检测技术概述

1.1 探地雷达的基本原理

探地雷达系统主要由发射天线、接收天线和信号处理单元组成。发射天线负责将高频电磁波以脉冲形式发送到

地下, 当电磁波遇到地下介质的不均匀界面, 如空洞、岩石层或水分离面时, 会发生反射。接收天线捕捉这些反射波, 并通过信号处理单元分析反射波的强度、波形和到达时间, 从而推断地下目标体的位置、形状和性质。电磁波的传播速度、反射强度和相位变化等特性, 受地下介质的电磁性质 (如介电常数、电导率) 影响较大。因此, 通过分析反射波的特征, 可以获取地下介质的详细信息。电磁波的传播特性不仅受到介质的介电常数和电导率的影响, 还受到介质的磁导率、频率和温度等因素的影响。例如, 介质的介电常数决定了电磁波的传播速度和反射强度, 而电导率决定了电磁波的衰减程度。因此, 在探地雷达的数据分析过程中, 需要综合考虑这些因素, 以提高数据的准确性和分辨率。此外, 探地雷达系统的设计和优化也需要考虑这些因素的影响, 例如选择合适的工作频率和天线类型, 以提高系统的性能和探测效果。

1.2 现有技术分类

根据发射信号的类型, 探地雷达可分为脉冲雷达和连续波雷达。脉冲雷达通过发射短脉冲信号工作, 具有较宽的频谱和较高的分辨率, 因而能够在短时间内捕捉到更多的细节信息, 适合于高精度检测需求。相比之下, 连续波雷达发射连续的正弦波信号, 具有较窄的频谱和较低的分辨率, 但其优势在于信号稳定, 适用于对信号连续性要求较高的场景。这两种技术在不同的应用场合各有优劣, 选择合适的技术对于实现高效准确的地质探测至关重要。

1.2 现有技术存在的问题

探地雷达通过高频电磁波探测地下介质的介电特性差异, 实现结构层厚度、缺陷及隐患的识别。这种技术在地质勘探、考古发掘和土木工程等领域具有广泛的应用前景, 能够高效、精准地获取地下信息。然而, 现有技术仍面临一些亟待解决的问题。

首先, 信号衰减与噪声干扰是限制探地雷达性能的重要因素。在复杂的地质条件下, 如含有大量水分、矿物质或空隙的地层, 电磁波的能量会迅速衰减, 导致探测深度和

分辨率大幅下降。这不仅影响了数据的准确性，也使得雷达在某些地质环境中的应用受到限制。其次，数据解译高度依赖经验。探地雷达获取的B-scan数据具有显著的时空交织特征，即数据在时间和空间维度上相互关联。这种复杂性使得人工解译效率低下，且容易受到解译人员主观经验的影响，难以保证解译结果的一致性和可靠性。因此，如何开发自动化、智能化的数据解译方法成为当前研究的热点之一。此外，实时性不足也是现有技术的一大瓶颈。传统的数据处理方法难以实现对数据质量的实时评估与反馈，往往需要耗费大量时间进行后处理。这在需要快速响应的应用场景中，如地质灾害监测和施工现场的质量控制，显得尤为突出。

2 检测技术优化路径

2.1 多通道接收技术与双频控制优化

2.1.1 多通道接收技术优化

在现代科技的发展中，信号接收和处理技术扮演着至关重要的角色。多通道接收技术和双频控制技术作为其中的佼佼者，已经在诸多领域展现出显著的优势。多通道接收技术通过多天线阵列同步接收信号，从而提升信噪比与分辨率。该技术的核心在于利用多个接收通道同时接收和处理信号，通过合并多个通道的信息来增强整体信号质量。相比传统的单通道接收系统，多通道接收技术能够显著减少信号衰减，增强对深层目标的捕捉能力。多通道接收技术的基本原理是基于天线阵列的信号合成与处理。假设一个天线阵列由N个天线单元组成，每个天线单元接收到的信号经过各自的接收通道进行放大、滤波和模数转换后，送入信号处理单元进行合成。通过合理的信号合成算法，可以将N个通道的信号合并为一个高质量的信号，从而提升信噪比和分辨率。

综上所述，多通道接收技术优化方案包括以下三个方面：

(1) 天线阵列设计：天线阵列的设计是决定多通道接收系统性能的关键因素之一。为了获得最佳的接收效果，需要合理选择天线单元的数量、排列方式和间距。一般来说，天线单元的数量越多，接收信号的信噪比越高，但系统的复杂度和成本也会相应增加。因此，需要根据具体的应用需求进行权衡。

(2) 信号合成算法：信号合成算法是多通道接收技术的核心之一。常用的信号合成算法包括线性加权合成、最大似然估计合成等。不同的合成算法具有不同的优缺点，需要根据具体的应用场景进行选择和优化。例如，线性加权合成算法简单易实现，但对天线阵列的均匀性要求较高；而最大似然估计合成算法则能够更好地处理非均匀阵列的情况，但计算复杂度较高。

(3) 硬件设计：多通道接收系统的硬件设计需要考虑多个方面，包括接收通道的带宽、噪声系数、动态范围等。为了获得最佳的接收效果，需要选择高性能的接收芯片和模数转换芯片，并设计合理的电路布局和信号调理电路。

此外，还需要考虑系统的功耗和散热问题，以确保系统的稳定性和可靠性。

2.1.2 双频控制优化

双频控制技术结合高频（1-2 GHz）与低频（100-500 MHz）雷达波的优势，通过同时使用高频和低频雷达波进行检测，实现浅层高分辨率检测和深层穿透的效果。双频控制技术的基本原理是利用不同频率的雷达波在介质中的传播特性不同。高频雷达波具有波长短、分辨率高的特点，适用于浅层高分辨率检测；而低频雷达波具有波长长、穿透能力强的特点，适用于深层穿透检测。通过同时使用高频和低频雷达波进行检测，可以获得浅层和深层目标的综合信息。在隧道超前预报中，双频控制技术已经展现出显著的优势。通过使用双频雷达系统进行检测，可以将探测深度提高至10米以上，同时保持浅层分辨率。这对于隧道施工过程中的安全性和效率具有重要意义。

双频控制优化方案包括以下几个方面：

(1) 频率选择：频率选择是双频控制技术的关键因素之一。为了获得最佳的探测效果，需要根据具体的应用场景选择合适的频率组合。一般来说，高频雷达波的频率应该选择在1-2 GHz之间，以获得较高的分辨率；而低频雷达波的频率应该选择在100-500 MHz之间，以获得较强的穿透能力。

(2) 信号处理算法：双频控制技术的信号处理算法需要同时处理高频和低频雷达波的数据。为了获得最佳的探测效果，需要设计合理的信号处理算法，包括信号滤波、信号合成、目标识别等。常用的信号处理算法包括傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换等。需要根据具体的应用场景进行选择和优化。

(3) 硬件设计：双频控制系统的硬件设计需要考虑多个方面，包括雷达发射机的频率稳定性、接收机的灵敏度、信号调理电路的设计等。为了获得最佳的探测效果，需要选择高性能的雷达发射机和接收机，并设计合理的电路布局和信号调理电路。此外，还需要考虑系统的功耗和散热问题，以确保系统的稳定性和可靠性。

2.2 数据融合与算法优化

2.2.1 时空特征融合算法

针对B-scan数据的多维特性，我们提出了一种时域与频域双通道特征提取方法。具体而言，首先利用一维傅里叶变换（公式1）对时域信息进行压缩，提取频域特征，同时采用一维卷积操作对频域信息进行压缩，提取时域特征。这两个过程有效地将时频信息分别转化为更具代表性的特征向量。随后，通过图卷积网络（公式2）将这些时空特征进行融合，进一步挖掘数据中的潜在关联和模式，从而显著提升异常检测的精度。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad \text{公式 (1)、(2)}$$

$$H^{(l+1)} = \text{ReLU}(\tilde{A}H^{(l)}W^{(l)})$$

2.2.2 动态决策库与半监督训练

在模型训练过程中，我们引入了无监督对比学习来预训练模型，并通过半监督动态决策库进行更新。这种方法显著减少了对大量标注数据的依赖，实现了更高效的模型优化。实验显示，该方法在隧道衬砌检测中表现出色，可将误报率降低至5%以下，这证明了其在实际应用中的有效性和优越性。

2.3 可视化与实时评估系统

基于多源雷达数据的三维重构模块，可将地质扫描数据转换为高精度立体影像，直观呈现地下空间的空洞分布、结构裂缝等隐患形态，使工程人员能够快速完成病害定位与评估，为工程维护提供可视化决策支持。在数据处理层面，可以系统搭载智能化质控分析平台，通过多级信号优化处理保障数据可靠性：首先采用环境噪声抑制算法消除背景干扰，继而运用非递归算法进行信号特征增强。配合自适应的智能决策引擎，提升在线诊断功能，实现对检测数据的毫秒级解析，实现异常状况的即时预警与处置。

3 实证研究与分析

3.1 场景

选取某城市主干道及隧道工程作为测试对象，对比优化前后检测效果。测试地点位于该城市主干道的一段长约2000米的隧道内，该隧道为双向四车道，设计净高5.5米，是城市重要的交通枢纽。

3.2 参数

实验中采用了双频控制（500 MHz/1.5 GHz）、多通道接收（4通道）、数据融合算法（时频双通道）。双频控制用于在不同深度和分辨率需求下切换工作频率，多通道接收则提高了数据的多样性和准确性，数据融合算法通过时频双通道的结合进一步优化了检测效果。

3.3 实验过程

首先在隧道内布置检测设备，确保覆盖整个测试区域。设备启动后，分别在传统方法和优化方法下进行多次检测，记录各项数据。检测过程中，环境条件保持相对稳定，避免外界因素干扰实验结果。

3.4 实验结果

表1 传统方法与优化方法性能对比

指标	传统方法	优化方法
探测深度 (m)	5.2	8.7
分辨率 (mm)	50	20
误报率 (%)	15	4.5

实验数据表明，优化后系统在探测深度、分辨率及误报率方面均显著提升。探测深度从5.2米增加到8.7米，分辨率从50毫米提高到20毫米，误报率从15%下降到4.5%。

4 结论与展望

本文通过多通道接收、双频控制、数据融合算法及可视化技术的综合优化，实现了探地雷达检测精度与效率的全面提升。这一突破性的进展为地质探测、地下结构检测等领域带来了革命性的变革。未来，研究将聚焦于以下几个关键方向：

智能化解译模型：结合深度学习实现全自动数据解译。通过利用先进的神经网络和机器学习技术，可以大幅提高数据处理的自动化水平，减少人工干预，并显著提升解译的准确性和速度。这不仅能够加速探测结果的生成，还能在复杂地质条件下提供更为可靠的判断。

多传感器融合：集成红外、声波等传感器，增强复杂环境适应性。通过将不同传感器的数据进行综合分析，可以获取更加全面和准确的环境信息。例如，红外传感器可以在低能见度条件下提供额外的热成像信息，而声波传感器可以用于检测地下空洞和裂隙。这些信息的融合将使探地雷达系统在各种复杂环境中都能表现出色。

标准化应用体系：制定探地雷达技术规范，推动其在政府审计、市政工程中的普及。建立统一的技术标准和应用规范，可以确保不同设备和系统之间的兼容性和互操作性。这不仅有助于提高技术的可靠性和安全性，还能够促进探地雷达技术在更广泛的领域得到应用，如基础设施检测、灾害预防等领域。

通过这些未来的研究方向，探地雷达技术将不断迈向新的高度，为各行业带来更多的价值和机遇。

参考文献：

- [1] 李枫. (2022). 探地雷达技术在道路检测中的应用. 交通世界(35), 58-60+63.
- [2] 陈光谋. (2022). 探地雷达技术在道路检测中的应用. 交通世界(27), 106-108.
- [3] 曾雄鹰, 王佳龙, 梁晓东, 余涛&黄小林. (2022). 基于双频高动态探地雷达技术的道路地下病害检测研究. 地球物理学进展(05), 2225-2232.
- [4] 丁涛. (2022). 探地雷达技术在水利工程质量检测中的应用. 黑龙江水利科技(02), 164-166.
- [5] 许晓莹&陈斌. (2021). 探地雷达技术在城市道路地下空洞隐患检测的应用研究. 市政技术(S1), 143-148+176.
- [6] 胡泽超. (2021). 探地雷达技术在高海拔隧道衬砌支护质量检测中的应用. 江西建材(11), 40-42.
- [7] 刘恒柏, 江波, 瞿起明&李耀南. (2021). 基于车载探地雷达技术的碎石道床检测数据的应用探讨. 铁道建筑(08), 134-137+158.
- [8] 梁湛, 梁焕周&江林. (2021). 探地雷达技术在铁路隧道监测中的应用. 北京测绘(05), 684-687.
- [9] 王晓鹏. (2020). 探地雷达技术在道路检测中的应用. 中国高新科技(14), 106-107.