

基于扩频与极化增益补偿的多层钢筋探测

夏子涵¹, 薛松涛^{1,2,3}, 谢丽宇^{1,3,4}, 刘江⁵, 周雷军⁵

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学工学部建筑学科, 宫城县仙台市 982-577;
3. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 4. 新疆大学土木工程与建筑学院, 乌鲁木齐
830049; 5. 上海秋元华林建设集团有限公司, 上海 201318)

摘要:针对现有的探地雷达(GPR)技术在多层钢筋密集场景下,仍面临分辨率不足、信号重叠以及信噪比降低等问题,提出了一种基于扩频与极化增益补偿的多层钢筋探测方法。该方法通过优化频谱扩展技术,有效克服了频率跳变和数据融合中信息丢失的问题。同时,利用金属的电磁反射特性与极化反转增益放大机制,增强了钢筋反射信号的强度,从而显著提升钢筋探测的能力。CST 数值模拟结果表明,金属反射信号的极化偏转特性能够显著提高回波信号中钢筋反射的信噪比,极化匹配传输效率最大可提升约 20 dB。此外,在 gprMax 中对频谱扩展前后的探地雷达数据进行了模拟计算与后处理分析。结果表明,本文所提出的探地雷达扩频技术能够有效提升距离分辨率,解决了窄距双层钢筋反射信号混淆问题,成功实现了其独立定位,最大误差仅为 5.25%。此外,本文还进行了多信噪比工况下的鲁棒性分析,进一步验证了该方法在复杂实际环境中的适用性和可靠性。

关键词:钢筋无损检测;探地雷达;频谱扩展;数据融合;金属反射信号;极化反转;增益补偿;雷达距离分辨率

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 1671-5497(2026)08-2150-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250012

Multi-layer rebar detection method based on spread spectrum and polarization gain compensation

XIA Zi-han¹, XUE Song-tao^{1,2,3}, XIE Li-yu^{1,3,4}, LIU Jiang⁵, ZHOU Lei-jun⁵

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830049, China; 5. Shanghai Choyoin Construction Group Co., Ltd., Shanghai 201318, China)

Abstract: To address the issues of insufficient resolution, signal overlap, and reduced signal-to-noise ratio that existing Ground Penetrating Radar(GPR) technology still faces in multi-layer dense rebar scenarios, a multi-layer rebar detection method based on spread spectrum and polarization gain compensation is

收稿日期: 2025-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178298, 52078375); 国家重点研发计划重点专项项目(2021YFE0112200).

作者简介: 夏子涵(1996-), 男, 博士研究生. 研究方向: 结构健康监测, 探地雷达. E-mail: xzho00@tongji.edu.cn

通信作者: 谢丽宇(1978-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 结构健康监测, 无源无线监测系统.

E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn

proposed. The proposed approach optimizes the spread spectrum technique to effectively mitigate the issues of frequency discontinuities and information loss during data fusion. Additionally, it leverages the electromagnetic reflective properties of metal and the amplification mechanism of polarization reversal to enhance the intensity of rebar reflection signals, thereby significantly improving detection performance. The numerical simulation results obtained using CST demonstrate that the polarization deflection characteristics of metal reflection signals can significantly enhance the SNR of rebar reflections in echo signals. The polarization matching transmission efficiency can be improved by up to approximately 20 dB. Additionally, simulations and post-processing analyses were performed on GPR data before and after spectrum expansion using gprMax. The results demonstrate that the GPR frequency expansion technique proposed in this study effectively enhances distance resolution, resolves the issue of overlapping reflection signals from closely spaced double-layered rebars, and successfully achieves their independent localization, with a maximum error of only 5.25%. In addition, the robustness analysis under multiple SNR conditions is also carried out in this paper to further validate the applicability and reliability of the method in complex practical environments.

Key words: non-destructive detection of rebar; ground penetrating radar (GPR); spectrum expansion; data fusion; metal reflection signals; polarization reversal; gain compensation; radar range resolution

0 引言

现代工程中,钢筋混凝土结构广泛应用于建筑、桥梁和道路等基础设施建设。然而,随着结构复杂性的提高,尤其在多层钢筋布置中,钢筋的排列方式和间距已成为影响结构性能与无损检测精度的关键因素。

探地雷达(Ground penetrating radar, GPR)作为一种无损检测技术,已经广泛应用于钢筋探测、裂缝监测、地下管线探测等领域。尤其在钢筋探测方面,探地雷达可以通过反射回波判断钢筋的位置、形状及深度,因此成为检测钢筋分布的重要手段。然而,在多层钢筋排布的情况下,探地雷达的应用面临不少技术挑战。首先,当多层钢筋之间的间距较小时,雷达信号的反射回波会相互重叠,从而导致不同钢筋层次的信号难以分辨。这一问题主要源于探地雷达的探测深度与精度之间的权衡。为了提高探测深度,通常需要使用较低的中心频率,但低频信号的分辨率较低,容易导致不同层钢筋的信号重叠。而为了提高精度,则需要增加雷达的中心频率,但这又会限制探测深度,无法有效检测到深层钢筋。

为了克服其权衡的限制,许多学者们提出了多种频率数据融合的方法。Xu等^[1]提出了一种在不同中心频率下获取探地雷达数据的融合方法。Zhao和Yuan^[2]提出了一种基于遗传算法的多频GPR数据的自适应加权融合方法,并在不同

的考古条件下完成了数据融合的测试。Zhao等^[3]提出了一种基于时变加权策略的新型多频GPR数据融合方法,并在从中国太行山脉的石灰石采石场获得的数据上对其进行了测试。Guan和Liu^[4]提出了一种联合滑动窗口和小波变换加权的方法来进行高低频数据的融合从而实现了对于顶煤结构内部结构信息解读。Bi等^[5]基于权重考虑对多频GPR数据融合提出3种算法,并通过融合雷达剖面 and 拉普拉斯算子对融合效果进行定性和定量的评价和比较。上述文献综述表明,现有的GPR数据融合方法在一定程度上实现了深度和分辨率的协调,浅层的高频信息为主导保证了雷达剖面在浅层拥有较高的分辨率,而低频信息则主导了深层剖面的构建,从而确保了雷达能够探测到更深的地下目标。这种频率调配的策略在一定条件下成功地在浅层和深层之间建立了一定的协调关系,提升了探测的整体效果。

现有融合方法仍存在问题。首先,频段选择时存在频率跳变或重叠现象,导致浅层与深层过渡区数据缺失或不连贯,影响整体图像质量和精度,尤其在复杂地下结构中易出现空白或伪影。其次,虽然现有方法兼顾浅层和深层探测,但难以实现窄距钢筋的独立精确定位。在多层钢筋的复杂场景中,频段融合仅能同时获取深浅层信息,而无法有效区分各层钢筋。

在钢筋探测研究中,de Coster等^[6]指出,现有

的数据融合方法在处理雷达数据时未充分考虑天线效应,导致数据融合过程中出现了异常的重叠现象。因此,必须在数据融合过程中充分滤除天线效应以实现不同频段信号的更好叠加,提升探测的准确性。此外,已有研究表明雷达数据的带宽扩展能够显著提高距离向的分辨率。通过对测量的雷达信号进行带宽扩展,雷达系统可以捕捉到更细致的信号细节,从而在浅层探测中获得更高的分辨率,尤其是在钢筋等细小结构的检测中。然而,带宽扩展虽然能提升分辨率,但也伴随着一定的挑战。首先,在天线设计中,大带宽与高增益往往是相悖的,大带宽的频段探测对天线的设计和性能提出了更高的要求。其次,滤除天线效应的信号初始增益可能减少达 3~6 dB,这些衰减可能需要后续增益调整以确保信号强度^[7,8]。

已有研究表明,在钢筋探测中可以充分利用金属的电磁特性来缓解带宽扩展的增益衰减问题。金属表面通常被认为是理想的电磁波反射体,其对入射电磁波会产生强烈的镜面反射效应,而混凝土等非金属或低导电性材料则无法像金属那样产生完整的镜面反射。针对这一差异,利用金属的极化转换特性,可以通过使用对称圆极化天线来提高信号的增益,增益提升的贡献约为 2~5 dB。同时,圆极化天线相较于线极化天线,在多径传播环境中表现更为稳定,并且能够有效减少反射和折射造成的信号衰减,增强信号的穿透力和接收灵敏度^[9]。因此,采用对称圆极化天线能够在大带宽扩展的同时,有效保证信号的增益,进而提高探测分辨率,并确保系统在钢筋检测中具有足够的动态信噪比。

本文提出了一种基于频谱扩展和极化增益补偿的多层钢筋探测方法,旨在解决当前钢筋探测中存在的分辨率不足和信噪比降低的问题,仿真验证与频谱扩展的应用测试证明,其能够显著提升探地雷达的距离分辨率,并实现对窄距双层钢筋的高精度定位,最后通过对多种信噪比工况下的信号进行反演,来分析其频谱扩展的鲁棒性。

1 探地雷达检测机制

1.1 广义 GPR 模型

探地雷达基于其工作机制主要分为两种:脉冲探地雷达和步进频率连续波雷达。脉冲探地雷达通过发射极窄的宽频带电磁脉冲信号,利用信

号在地下介质中的传播与反射特性实现目标物的探测。步进频率连续波(Stepped-frequency continuous wave, SFCW)雷达通过逐步改变发射信号的频率来覆盖所需的频段范围进行探测。

脉冲探地雷达在扩频时由于信号的不连续性,存在跳频现象,难以实现宽频带信号的无缝拼接。SFCW 雷达由于每个频点的频率步进是精确设定的,并且在连续扫描过程中没有频率丢失或跳跃,扫描的频率点在频谱上是连续分布的,这使得雷达可以在后续处理阶段将这些频率点的响应拼接起来,形成一个完整的宽频带信号。

1.1.1 单基地 SFCW 雷达

基于矢量网络分析仪(VNA)结合喇叭天线的单基地模式是一种常用的步进频率连续波雷达系统,即单基地 SFCW 雷达^[10]。喇叭天线的高增益和连续波雷达的 100% 的占空比使得检测系统可以实现高动态信噪比的离地测量^[11]。基于因果时不变假设,该系统可以被建模为一个线性系统,如图 1 所示。

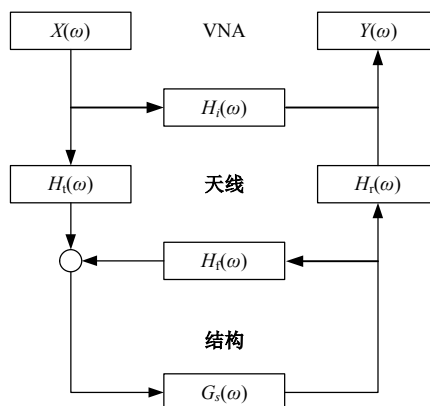


图 1 单基地 SFCW 雷达系统示意图

Fig. 1 Single-based SFCW radar system

矢量网络分析仪直接测量与频率相关的复数信号,即返回信号和发射信号之间的 $S_{11}(\omega)$, ω 即角频率。

$$S_{11}(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = H_i(\omega) + \frac{H_t(\omega)G_s(\omega)H_r(\omega)}{1 - H_t(\omega)G_s(\omega)} \quad (1)$$

式中: $Y(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 分别为 VNA 参考平面上接收和发射的信号给出; ω 为角频率; $S_{11}(\omega)$ 为反射系数; $H_i(\omega)$ 为收发通道间的直接耦合传递函数; $H_t(\omega)$ 和 $H_r(\omega)$ 分别为天线的发射和接收传递函数; $G_s(\omega)$ 为待测结构的传递函数; $H_t(\omega)$ 为天线与待测结构间的反馈传递函数。

单基地 SFCW-GPR 在发射通道和接收通道

1.2 天线远场近场修正模型

双基地 SFCW 雷达测量时,通常根据电磁波的波前进行选择参数测量。在工程应用中,最广泛的当属远场区测量。当测量距离满足远场测量的要求时,天线发射的电磁波相位和幅度分布稳定,波前趋于平面波,通过天线的辐射场分布来直接测量天线的频率响应。然而,当测量距离不满足远场测量要求时,天线发射的电磁波波前为曲面波,天线的辐射特性与周围环境存在谐振效应,天线的频率响应并不稳定,需要采用经验性的方法来拟合天线的近场频率响应。Qureshi 等^[14]曾提出一种利用非冗余采样的标定数据来实现天线近场远场响应的转换。然而,由于 GPR 测量时于其传播介质电参数的不确定性,上述方法在迁移到探地雷达的测量时无法很好地实现效果^[15]。为了获取精确的近场天线频率响应,de Coster 等^[6]提出了利用建议通过最小二乘的方式来确定天线的近场频率响应。

探地雷达主要分为两种测量方式:地面耦合测量与空气耦合测量。当探地雷达采用空气耦合测量,通常视为远场测量,可以直接将天线的远场辐射特性作为天线频率响应的修正模型。然而,还有一些探地雷达采用地面耦合测量的时候,其是天线的近场测量,需要确定天线的近场频率响应。具体的近、远场频率响应校正方法可参考文献^[15]的研究工作,本文不再赘述。

1.3 基于极化特性的增益补偿

遇到理想金属表面时,会发生极化转换。线极化和圆极化转换的理论推导如下所示。

1.3.1 线极化相位反转

假设入射的线极化电磁波沿 z 轴传播,并具有沿 x 方向的电场分量。入射电场可以表示为:

$$\vec{E}_{\text{incident}} = E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t) \quad (3)$$

式中: E_0 为电场的幅度; $\hat{x}$ 为电场方向的单位向量; k 为波数; ω 为角频率; t 为时间。

当线极化电磁波遇到理想金属表面时,由于反射面的边界条件,入射波的电场必须与反射波的电场在界面处互相抵消,满足电场在理想导体表面为零的条件。为了满足这一条件,反射电场必须反向于入射电场,从而产生了 180° 的相位差,即反射后的电场为:

$$\vec{E}_{\text{reflected}} = -E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t) \quad (4)$$

1.3.2 圆极化相位反转

对于左旋圆极化和右旋圆极化电磁波,如图 5 所示。两种圆极化的电场矢量可以表示为:

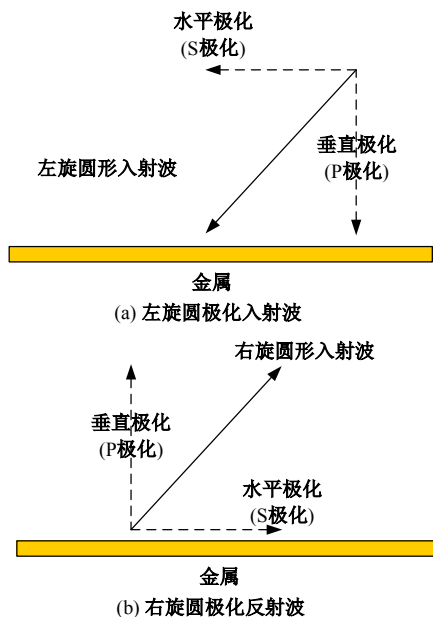


图 5 圆极化的金属反射示意图

Fig. 5 Schematic diagram of metal reflections for circular polarization

$$\vec{E}_{\text{LCP}} = E_0 (\hat{x} \cos(kz - \omega t) + \hat{y} \sin(kz - \omega t)) \quad (5)$$

$$\vec{E}_{\text{RCP}} = E_0 (\hat{x} \cos(kz - \omega t) - \hat{y} \sin(kz - \omega t)) \quad (6)$$

式中: $\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 分别为电场分量在 x 和 y 方向上的单位向量,可以将入射的左旋圆极化电磁波分解为水平极化(S-偏振) $\vec{E}_s$ 和垂直极化(P-偏振) $\vec{E}_p$ 两部分。

$$\vec{E}_{\text{LCP}} = \vec{E}_s + \vec{E}_p \quad (7)$$

对于 S-偏振电磁波,电场方向平行于金属表面。因此,当电磁波到达金属表面时,表面电荷会产生一个等幅反向的电场以抵消入射波的电场。这导致了反射后的 S-偏振电场方向发生 180° 相位翻转,即:

$$\vec{E}_{\text{reflected-S}} = -\vec{E}_{\text{incident-S}} = -E_0 \cos(kz - \omega t) \quad (8)$$

对于 P-偏振电磁波,电场矢量垂直于金属表面的分量。由于金属是理想导体,P-偏振的垂直分量在界面上产生的电流不会导致相位的 180° 变化,反而会产生一个与入射波电场方向相同的反射电场。这样,在 P-偏振情况下,反射波的相位

不变:

$$\vec{E}_{\text{reflected-S}} = \vec{E}_{\text{incident-S}} = E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (9)$$

因此,反射后的电场为:

$$\vec{E}_{\text{reflected}} = E_0(-\hat{x} \cos(kz - \omega t) + \hat{y} \sin(kz - \omega t)) \quad (10)$$

可以看出,这正是右旋圆极化波的表达形式。因此,原来的左旋圆极化波经过金属表面的反射后,转换为了右旋圆极化波。

通过右旋极化天线接收被金属反射回来的左旋极化天线发射的电磁波,可以提高金属反射在回波信号中的信噪比。

2 极化匹配增益验证

由于信号带宽与增益往往是相悖的,因此首先需要验证极化匹配对信号增益的效果。本文利用 CST 软件对天线的极化特性进行了数值模拟。重点分析在极化匹配和极化偏离两种条件下,回波信号强度的变化特性及其对信噪比的影响。

2.1 模型建模

如图 6 所示,仿真场景中使用了双极化喇叭天线,电场矢量 E 方向定义为入射电磁波的极化方向。入射电磁波从喇叭天线的开口方向入射,双极化天线在两个相互垂直的极化方向各自有一个接收端口,通过记录两个端口的数据来分析电磁波极化对信号强度的影响。

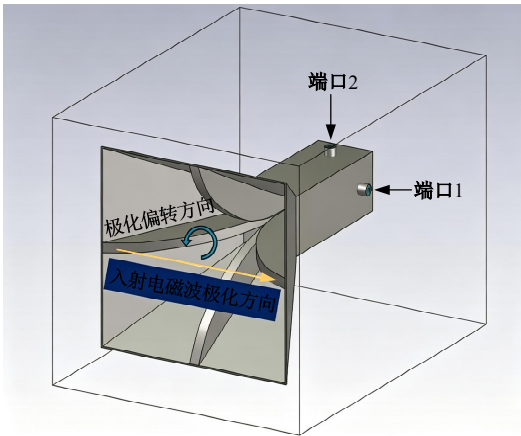


图 6 双极化喇叭天线模型 CST 示意图

Fig. 6 A dual-polarized horn antenna in CST

2.2 模拟结果

模型中设置了入射电磁波不同的入射角度,以模拟极化匹配和偏离情况下的反射特性。根据探地雷达的常用工作范围,天线的分析带宽范围为 1~5 GHz。入射电磁波的极化角度从 0°到

90°,以步长 10°变化。在入射电磁波极化角度偏转的过程中,端口 1 的特性表征为极化偏离的入射特性,端口 2 的特性表征为极化匹配的入射特性。图 7(彩图参见电子版,下同)展示了入射电磁波极化方向与天线极化特性的相互联系,其使用传输系数来衡量极化匹配效率。

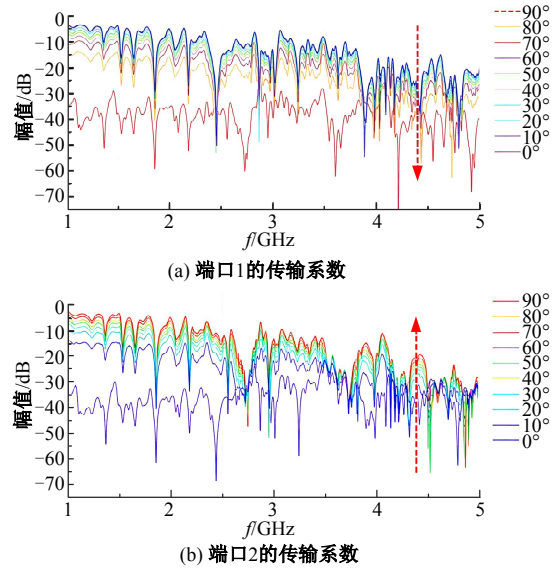


图 7 入射电磁波极化匹配示意图

Fig. 7 Schematic diagram of incident electromagnetic wave polarization matching

在图 7(a)中,在入射电磁波的极化角度与端口 1 对应的天线的极化角度一致时,1~5 GHz 频段的回波信号强度最高,整体信号保持稳定;随着入射电磁波的极化角度与端口 1 对应的天线的极化角度偏离增大,1~5 GHz 频段回波信号的强度逐渐下降,当入射电磁波的极化方向与端口 1 对应的天线的极化角度相互垂直时,1~5 GHz 频段回波信号的强度基本全在 -30 dB 以下。在实际工程中,当信号强度降低至 -30 dB 以下时,表明目标信号的强度与周围环境噪声基本一致,目标信息无法识别获取。同理,在图 7(b)中,随着入射电磁波与端口 2 对应的天线极化角度的匹配度不断提高,1~5 GHz 频段回波信号的强度从最开始的平均 -30 dB 以下逐渐提升至 -5 dB 左右。

2.3 结果分析

对入射电磁波不同入射角度的极化匹配进行定量分析,采用根均方值来衡量不同入射角度的整体极化匹配效率。极化匹配和偏离情况下的两者的变化趋势如图 8 所示。

当入射电磁波的极化角度为 0°时,端口 1 的极化匹配达到最佳,传输系数的幅值根均方值为

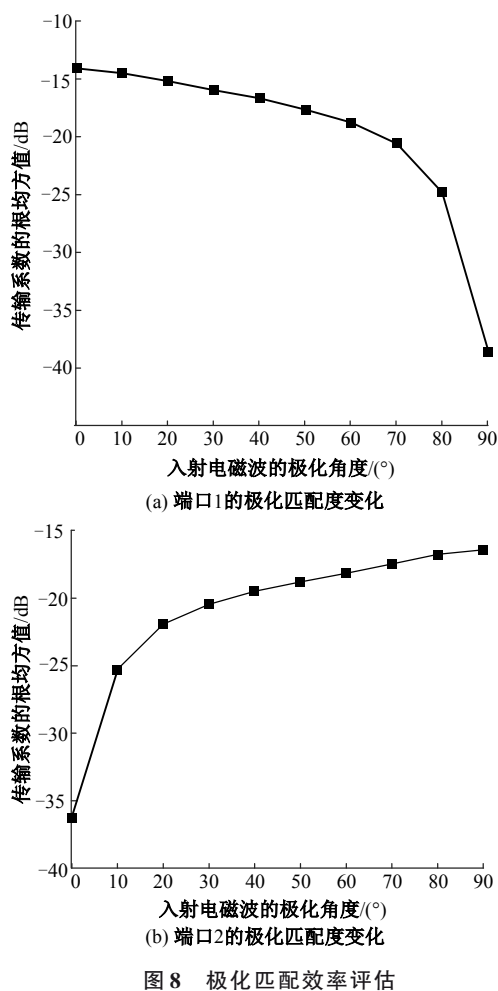


图 8 极化匹配效率评估

Fig. 8 Evaluation of polarization matching efficiency

—15 dB 左右;端口 2 的极化匹配最差,传输系数的幅值根均方值为—36 dB 左右。当入射电磁波的极化角度为 90°时,此时端口 1 的极化匹配急剧下降,信号能量损失严重,传输系数的幅值根均方值降低至—40 dB 左右;端口 2 的极化匹配达到最佳,传输系数的幅值根均方值提高至—17 dB。

数值模拟的结果显示,极化匹配最好与最差的情况相比,传输效率提升了约 20 dB。因此,当从金属反射到天线的电磁波极化特性与天线极化特性一致时,基于极化特性的增益补偿可以有效提升探地雷达的回波信号中的目标反射强度,从而提高目标探测能力,尤其在传播介质与目标反射的极化特性存在差异时的效果更为明显。

3 频谱扩展应用案例

本文采用了开源软件 gprMax 进行数值模拟来评估频谱扩展对探地雷达探测性能的改进效果。gprMax 是一个基于有限差分时域法(FDTD)的仿真工具,能够有效模拟探地雷达电

磁波在复杂介质中的传播和散射行为。

3.1 模型建模

如图 9 所示,模拟环境通过 gprMax 构建了一个二维模型,模型大小为 15 cm×15 cm,尺寸为混凝土块的标准试样。试样中包含金属钢筋,其直径为 8 mm,距离底部分别为 4 cm 和 7 cm。模型的介质参数设置为混凝土,其中相对介电常数设置为 4.2,来模拟实际探测混凝土结构中钢筋的反射信号。

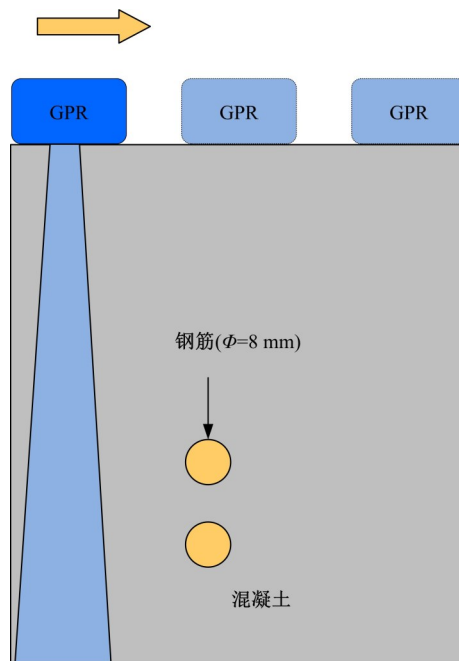


图 9 gprMax 模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of gprMax model

模型尺寸为 15 cm×15 cm,计算域边界使用完全匹配层(PML)吸收边界反射,确保信号传播的数值稳定性和准确性。在 gprMax 中可以直接仿真点源的激励,点源激励不会包含天线的响应,因此点源激励计算的仿真数据可以直接对频谱带宽扩展前后的信号进行分析。

首先,在保证满足 CFL 条件的基础上采用 Impulse 激励,其表达式为:

$$W = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

将 Impulse 激励作为激励源时,可以通过 FDTD 计算出待测结构的时域响应。在获得待测结构的时域响应之后,需要将其转换为频域的数据才能进行频谱扩展。因为时域采样的最小间隔对应了频域的最大频率,因此在满足 FDTD 的基础上,分别选择不同的最小时域间隔即可获取频谱宽度不同的时域响应,再将获取的时域响应

与 Ricker 子波进行卷积即可计算出不同频谱宽度的探地雷达时域信号。

3.2 模拟结果

工程中探地雷达要求单脉冲检测的输入信噪比应大于 13 dB^[16]。因此,本文首先在信噪比为 15 dB 的情况下进行模拟验证。

数值仿真计算了频谱未扩展和频谱扩展 2 倍后的探地雷达数据,其仿真计算的 B-Scan 数据如图 10 所示。

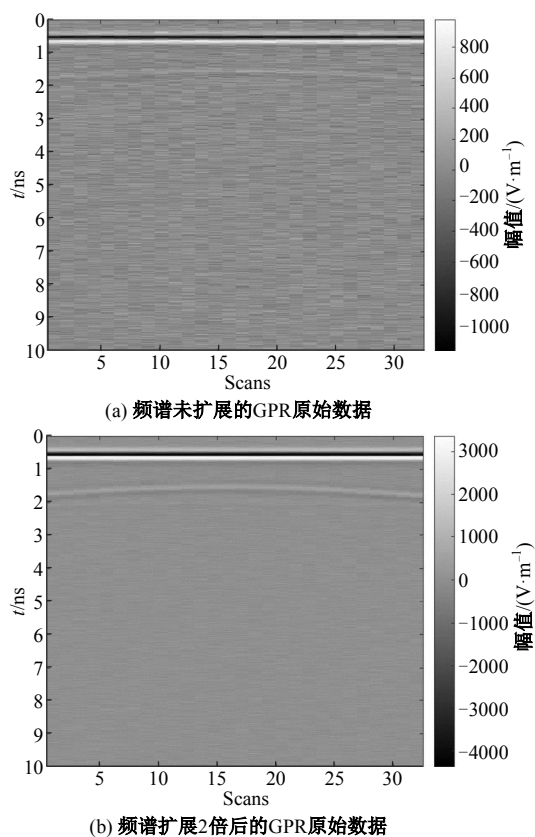


图 10 探地雷达 B-scan 数据对比

Fig. 10 Comparison of GPR B-scan data

图 10(a)展示了频谱未扩展的 GPR 回波数据,反射信号特征较为模糊,背景噪声较高。图 10(b)为频谱扩展 2 倍后的 GPR 回波数据,可以观察到反射信号明显增强,目标的边界特征更清晰。频谱扩展 2 倍后覆盖了更宽的频带范围,增加了高频成分,有效提高了目标的横向与纵向分辨率。但两种情况下的原始数据都无法区分出两根钢筋之间的间距,需要对数据进行去直达波和增益补偿处理来进一步获得两根钢筋的距离向信息。

图 11 为基于均值法去除直达波并采用了用于放大目标特征的平方非线性增益的效果图。

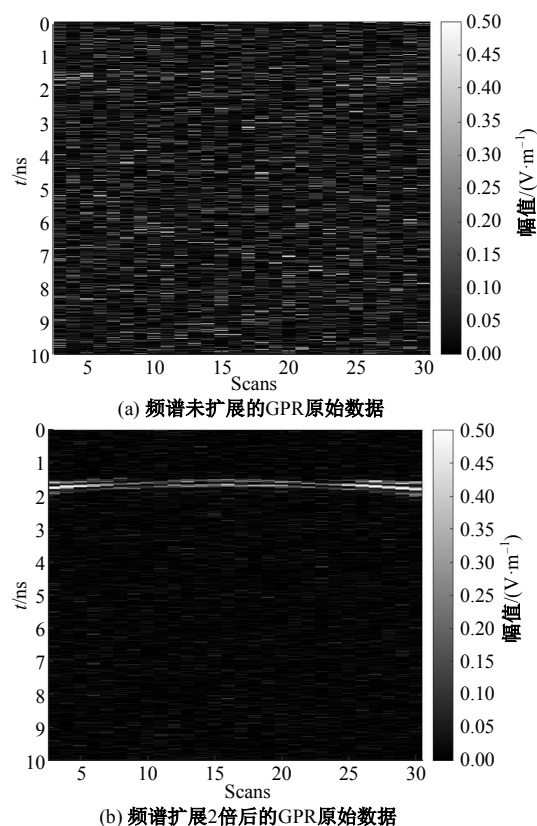


图 11 滤直达波的增益处理数据对比

Fig. 11 Comparison of gain-processed data for filtered direct wave

此处需要注意的是,基于实际检测工程中环境噪声在传播的全过程以及全部频谱范围内一直存在且均匀分布,目标信号在探地雷达的回波信号中通常与噪声可以明显区分出来,这就表明目标信号的能量强度在探地雷达的某个时域范围内更强。因此,在基于均值法去除直达波之后对全时长的探地雷达信号采用平方非线性增益,会使得探地雷达信号中目标信号的强反射会更加凸出,噪声被增益的强度将低于目标信号的被平方非线性增益放大后的强度。

图 11(a)是频谱未扩展情况下经过去直达波处理后的非线性增强结果,尽管背景噪声有所降低,但目标反射特征仍然模糊,细节分辨不足。图 11(b)为频谱扩展 2 倍后的 GPR 回波数据经过数据处理后的结果,可以看出的是目标的边界特征清晰可见,显示了更高的信号质量和分辨能力。

为了进一步显示频谱扩展后的距离分辨率提升效果,图 12 展示了两者的时间尺度放大的效果。

从图 12(a)中可以看出,频谱未扩展的数据中在进行时间尺度放大后依旧无法区分两根钢筋的反射特征,噪声占比高。频谱扩展 2 倍后的

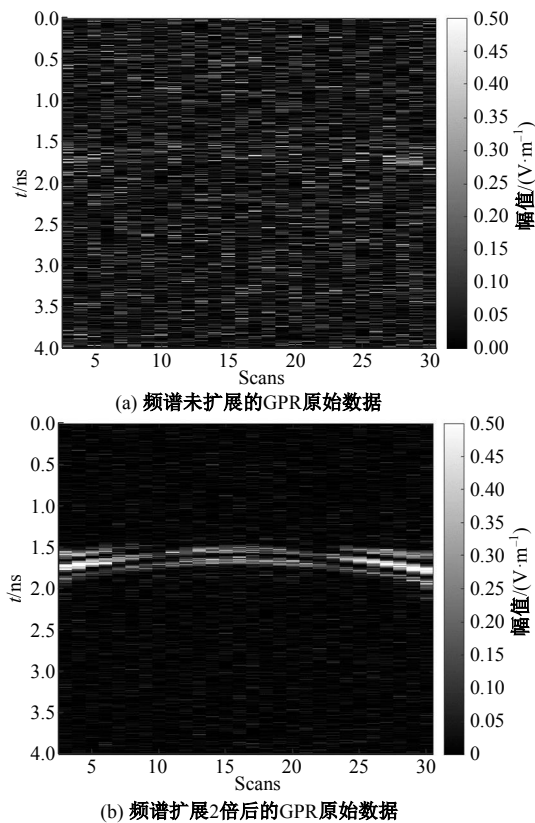


图 12 时间尺度放大的数据对比

Fig. 12 Comparison of data for time scale enlargement

GPR 回波数据图 12(b) 在进行时间尺度放大后实现了距离分辨率的提升, 可以直接识别出两根钢筋的反射特征。

3.3 结果分析

使用基于工程中最通用的速度射线反演法分别对频谱扩展前后的探地雷达原始数据以及后处理的数据进行反演, 根据其反演结果定量评估频谱扩展前后的探地雷达对于钢筋探测性能的提升。

3.3.1 原始数据分析

由于速度射线法需要定位目标反射峰值, 频谱扩展前、后的探地雷达 B-Scan 数据均无法区分两根钢筋各自的反射, 因此需要从 A-Scan 中进行识别定位。频谱扩展前、后探地雷达的相同迹线 A-Scan 原始数据如图 13 所示。

由图 13 可定性观察到, 频谱扩展 2 倍后目标反射相对于背景噪声更加突出。为了定量评价噪声变化, 在避开目标反射的背景时间窗内计算 A-Scan 信号的噪声均方根幅值。结果表明, 频谱扩展 2 倍后噪声均方根幅值较扩展前降低约 70%, 其噪声功率相应降低约 10 dB, 目标反射更

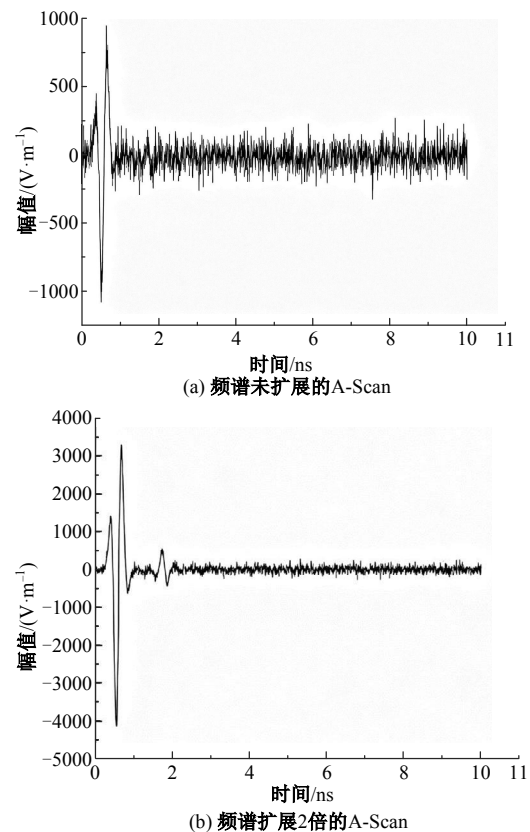


图 13 频谱扩展前后探地雷达 A-Scan 原始数据

Fig. 13 GPR A-Scan before and after spectrum expansion

加清晰。相比之下, 频谱未扩展的钢筋反射与噪声信息相互干扰, 难以识别, 还是只能从 B-Scan 原始数据来定位一个目标反射信息。频谱扩展 2 倍后信噪比得到了提升, 但在 A-Scan 原始数据中, 两根钢筋的反射只能观测到一个目标峰值。因此, 两种情况的原始数据都只能对第一层钢筋进行反演定位。这进一步说明, 背景噪声的存在会对深层目标反射的识别过程造成限制, 需要结合增益处理进一步优化识别效果。

3.3.2 后处理数据分析

尽管频谱扩展后的数据仅从 A-Scan 就可以较好地对第一层钢筋进行定位, 但为了进一步评估频谱扩展前后对于窄距钢筋的探测能力, 需对频谱扩展前后两种情况的原始数据进行后处理。

在滤除直达波并采用了用于放大目标特征的平方非线性增益之后, 频谱未扩展的探地雷达 B-Scan 数据中的钢筋反射和噪声已经相互混淆, 两根钢筋的反射都无法识别。然而, 频谱扩展 2 倍后的探地雷达 B-Scan 数据中的两根钢筋的反射较为明显, 可以直接对两根钢筋进行反演定位。

最终反演的钢筋位置如图 14 和表 1 所示。

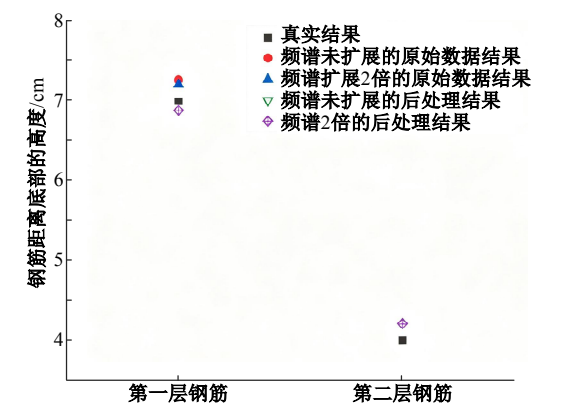


图 14 两层钢筋高度的反演结果

Fig. 14 Inversion results for two layers of rebar height

表 1 两层钢筋高度的反演结果

钢筋距离底部高度/cm	真实结果	频谱未扩展		频谱扩展 2 倍	
		原始数据	后处理	原始数据	后处理
第一层钢筋	7.00	7.26	无法计测	7.21	6.89
第一层误差/%	—	3.71	—	3	1.57
第二层钢筋	4.00	无法计测	无法计测	无法计测	4.21
第二层误差/%	—	3.71	—	—	5.25

从上述的结果可以看出,对于频谱未扩展的测量原始数据,仅能对第一层钢筋的高度进行测量,反演误差为 3.71%;经过后处理后,噪声反而淹没了钢筋反射信息,无法得到有效的计算结果。相比之下,频谱扩展 2 倍后的探地雷达原始数据对第一层钢筋的反演误差降低至 3%,精度有所提升。此外,通过滤除直达波并结合增益处

理,不仅能够成功实现对第一层钢筋的定位,还能同时对第二层钢筋进行定位。其中,第一层钢筋的定位误差进一步降低至 1.57%,而第二层钢筋的定位误差为 5.25%。

上述结果表明,频谱扩展显著改善了钢筋定位精度和多层目标的探测能力。虽然频谱扩展会引入更多的高频成分和相应的高频噪声,但通过结合直达波滤除与非线性增益处理,可以有效抑制噪声对信号的干扰,从而增强目标反射信号的清晰度。尤其在处理距离较近、间距较小的钢筋定位问题时,频谱扩展能够实现多目标钢筋的精确定位。

4 多信噪比工况的鲁棒性分析

前文已详细分析了 15 dB 信噪比条件下频谱扩展的性能,并验证了其满足工程最低要求的可行性。为全面评估该方法在实际工程中的鲁棒性,本文将分别针对高(30 dB)、中(20 dB)和低(10 dB)信噪比工况进行研究(见图 15)。

高信噪比环境下,适用于浅层、地质条件优良的场景,此时回波信号强、噪声干扰小,系统可发挥最佳性能,展示设备的最优探测能力;中信噪比则常见于城市地下管线检测或考古勘探等常规工程,环境中存在适度土壤杂波和电磁干扰,有助于验证算法在真实场景中的稳定性和适应性;而低信噪比环境代表深层勘探、复杂地质结构或强电磁干扰等极端条件,系统在此面临严峻的抗干扰

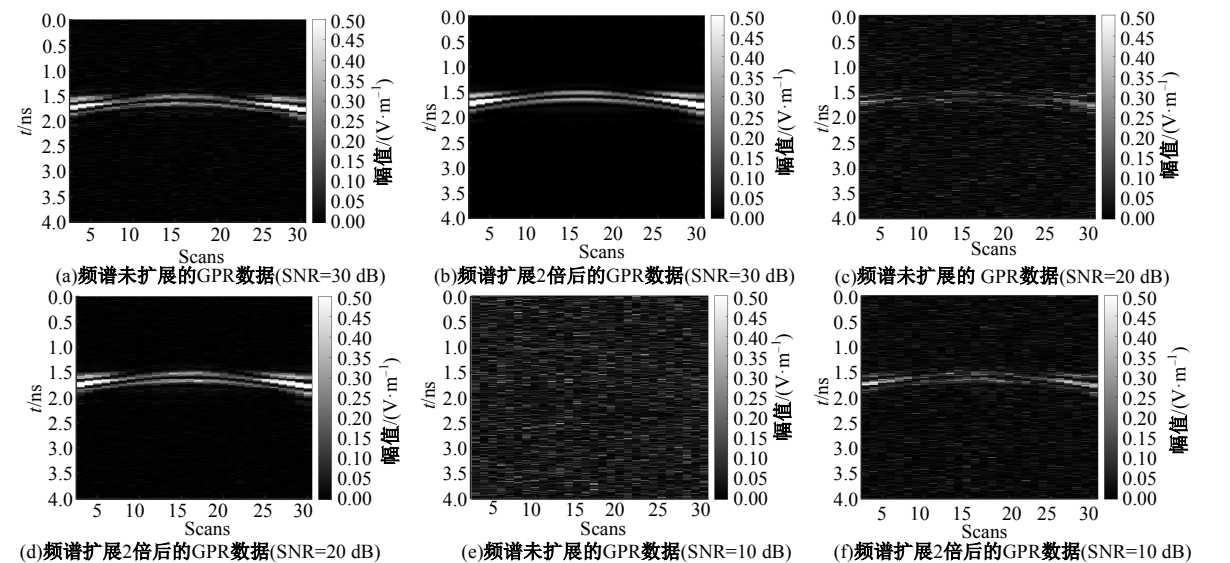


图 15 高、中、低信噪比工况对比

Fig. 15 Comparison of high, medium and low SNR conditions

挑战,分析这一工况有助于揭示性能瓶颈及未来改进方向。

4.1 高、中、低信噪比工况结果

高(SNR=30 dB)、中(SNR=20 dB)、低(SNR=10 dB)三种信噪比工况的数据经过去直达波和非线性增益之后的B-Scan如图15所示。

从图15可以看到:频谱扩展前,30 dB下回波信号明显、噪声较低;20 dB下目标反射只能模糊定位;10 dB下回波模糊、噪声严重,目标无法识别。频谱扩展后,30 dB噪声有效抑制、信号更清晰;20 dB细节得到改善;10 dB噪声大幅降低,目标可实现初步定位。

4.2 高、中、低信噪比工况结果分析

3种信噪比工况下,对频谱扩展后的信号进行反演得到的钢筋位置结果如表2所示。

在高信噪比(30 dB)下,各层目标在频谱扩展前后均能实现较高精度的反演;当信噪比降至

表2 三种信噪比工况的反演结果

Table 2 Inversion results for three SNR conditions

钢筋距离 底部高度	真实 结果	SNR= 30 dB	SNR= 20 dB	SNR= 10 dB
第一层钢筋	7.00	7.18	7.20	6.62
第一层误差/%	—	2.57	2.86	5.43
第二层钢筋	4.00	4.15	4.16	无法 计测
第二层误差/%	—	3.75	4	—

20 dB时,频谱扩展前难以对目标进行定位,但进行频谱扩展后仍能满足工程需求;而在10 dB的低信噪比环境中,第二层目标出现无法识别的情况,表明在深层或强干扰条件下该方法的适用性受到限制。上述结果,表明本文所提出的频谱扩展在常规工程环境(SNR $\geq$ 15 dB)中具有可靠鲁棒性,但对深层弱信号需辅以噪声抑制算法提升适用边界。

5 结 论

(1)采用电磁仿真软件CST分析了入射电磁波的极化匹配对回波信号强度的影响,证明了基于极化特性来放大金属反射目标在探地雷达回波信号的可行性,指出了极化匹配对信号提升的最大增益约为20 dB左右,对于钢筋探测领域的探地雷达天线极化特性选择提供了理论依据和案例支撑。

(2)采用了FDTD电磁仿真计算软件gprMax探究了频谱扩展对探地雷达检测性能的提升。案例结果表明,频谱扩展显著提升了钢筋定位的精度和多层目标的探测能力,成功实现了对两根窄距钢筋的定位,其最大误差为5.25%,这在未扩展频谱的情况下无法实现。在处理距离较近、间距较小的多钢筋定位问题时,频谱扩展能够实现窄距多目标的精确定位,展现出优越的应用潜力。同时,通过多信噪比工况的分析验证了频谱扩展的鲁棒性。

(3)今后研究中将开展对本文工作的进一步完善:①本文目前仅对未实际工作状态下的探测方法进行数值仿真计算和验证,后续将进行实验测试验证该方法在实际带噪环境中的探测效果;②本文目前仅对于电磁极化特性与回波信号的幅值进行了研究,后续将进一步探究电磁极化特性与回波信号的相位的影响并进行实验验证,同时利用检测目标的多种电磁特征进一步提高探测能力。

参考文献:

- [1] Xu X, Li J, Qiao X, et al. Fusion of multiple time-domain GPR datasets of different center frequencies[J]. Near Surf Geophys, 2019, 17: 141-150.
- [2] Zhao W, Yuan L, Forte E, et al. Multi-frequency GPR data fusion with genetic algorithms for archaeological prospection[J]. Remote Sens-Basel, 2021, 13: No. 2804.
- [3] Zhao W, Lu G. A novel multifrequency GPR data fusion algorithm based on time-varying weighting strategy[J]. IEEE Geosci Remote S, 2021, 19: 1-4.
- [4] Guan Z, Liu W. Multi-Frequency GPR data fusion through a joint sliding window and wavelet transform-weighting method for top-coal structure detection[J]. Applied Sciences, 2024, 14: No. 2721.
- [5] Bi W, Zhao Y, Shen R, et al. Multi-frequency GPR data fusion and its application in NDT[J]. Ndt & E Int, 2020, 115: No. 102289.
- [6] de Coster A, Lambot S. Fusion of multifrequency GPR data freed from antenna effects[J]. IEEE J-Stars, 2018, 11: 664-674.
- [7] Annan A P. Electromagnetic principles of ground penetrating radar[J]. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, 2009, 1: 3-41.

- [8] Leucci G. Ground penetrating radar: the electromagnetic signal attenuation and maximum penetration depth[J]. Scholarly Research Exchange, 2008, 2008: No. 926091.
- [9] Liu Y, Li K, Jia Y, et al. Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces[J]. IEEE T Antenn Propag, 2015, 64: 326-331.
- [10] Lambot S, Slob E C, van den Bosch I, et al. Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties[J]. IEEE T Geosci Remote, 2004, 42: 2555-2568.
- [11] 任仕召, 魏光辉, 潘晓东, 等. 典型雷达装备带内连续波辐射效应试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(5): 61-66.
- Ren Shi-zhao, Wei Guang-hui, Pan Xiao-dong, et al. Experimental study on radiation effect of in-band continuous wave on typical radar equipment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(5): 61-66.
- [12] Hiebel M. Fundamentals of Vector Network Analysis [M]. Berlin: Rohde & Schwarz, 2007.
- [13] Zhang J, Ye S, Lin Y, et al. A modified model for quasi-monostatic ground penetrating radar[J]. IEEE Geosci Remote S, 2019, 17: 406-410.
- [14] Qureshi M A, Schmidt C H, Eibert T F. Efficient near-field far-field transformation for nonredundant sampling representation on arbitrary surfaces in near-field antenna measurements[J]. IEEE T Antenn Propag, 2012, 61: 2025-2033.
- [15] Mourmeaux N, Tran A P, Lambot S. Soil permittivity and conductivity characterization by full-wave inversion of near-field GPR data[C] // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, 2014: 497-502.
- [16] Noon D A. Stepped-frequency radar design and signal processing enhances ground penetrating radar performance[D]. St. Lucia: Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Queensland, 1996.