先进光电测量、分析与制造

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250528001

基于冲激响应的探地雷达快速仿真方法研究

姚　攀[1]，刘宝军[1]，李保国[1]，沈　锋[2*]

（1. 广东电网有限责任公司江门供电局，广东 江门 529000；2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要： 针对步进频连续波（SFCW）探地雷达（GPR）传统仿真方法因需逐频点计算而导致的耗时长、灵活性差问题，提出一种基于冲激响应的快速仿真方法。该方法将GPR系统建模为线性时不变系统，通过计算其冲激响应并与输入信号卷积来获取对应的回波信号，并求解出系统传递函数用于SFCW的回波信号计算，从而有效避免了每个频率的重复仿真，显著提高仿真效率。研究结果表明，该方法在确保仿真结果准确性的前提下，显著提升了仿真效率（仿真时间约为传统方法的16.4%），且与实际测量结果的误差控制在4.34%以内。所提方法有效解决了现有GPR仿真耗时长、资源消耗大的问题，为探地雷达的高效仿真及在复杂环境下的应用提供技术支撑。

关键词： 探地雷达；冲激响应；步进频连续波；快速仿真方法

中图分类号： TN953.1　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0777－07

Rapid Simulation of Ground-Penetrating Radar Using an Impulse-Response-Based Approach

YAO Pan[1], LIU Baojun[1], LI Baoguo[1], SHEN Feng[2]

(1. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jiangmen 529000, CHN; 2. School of Instrument Science and Engineering, Harbin Institute of Technology , Harbin 150001, CHN)

Abstract: Current ground-penetrating radar (GPR) simulation approaches are often computationally intensive and exhibit poor flexibility, particularly when employing stepped-frequency continuous-wave (SFCW) signals. Conventional techniques typically simulate each frequency sequentially, resulting in low computational efficiency and rendering them unsuitable for complex scenarios. To address these limitations, this study introduces an impulse - response-based fast simulation method. By modeling the GPR system as a linear time-invariant (LTI) system, the proposed approach generates echo signals through the convolution of impulse responses with input signals and derives a system transfer function to facilitate the computation of SFCW echo signals. This strategy effectively eliminates the need for repetitive simulations at each frequency, thereby substantially enhancing the computational efficiency. Comparative experimental evaluations demonstrate that the proposed method significantly reduces simulation time while maintaining high accuracy, with deviations from actual measurements controlled within 4.34%. The developed methodology successfully addresses the longstanding challenges of time consumption and excessive resource utilization in GPR simulations, thereby providing a robust framework for efficient GPR emulation and its application in complex environments.

Key words: ground penetrating radar; impulse response; stepping frequency continuous wave; rapid simulation methods

收稿日期：2025－05－28.

基金项目：国家自然科学基金项目（52371351）.

*通信作者：沈　锋

0 引言

自20世纪90年代以来，探地雷达（GPR）作为一种非破坏性的地球勘探技术逐渐普及。它通过分析电磁波在地下不同介质中反射和散射的情况来获取地下结构信息，已广泛应用于公路检测、地雷探测、地下水文调查、管道和电缆检查、冰川研究、考古等领域，并随着技术发展进一步扩展到穿墙探测和生物医学等新领域[1-3]。

在探测过程中，GPR会向地下发射电磁波，当电磁波遇到地下介质界面时会产生反射信号并被接收天线记录。通过精确测量电磁波往返传播的时间差，并结合已知电磁波波速参数，可以计算出地下目标的垂直埋深。值得注意的是，GPR的空间分辨能力呈现自地表向下递减的趋势，而其穿透地层的有效深度则与工作频率呈反相关关系。较低频段电磁波具有更强的穿透能力，可探测更深层的地质结构，但其横向分辨率相对较低。通过移动GPR设备并对接收信号进行处理，可生成地下结构的二维截面图（B-scan）[4]。

根据发射信号形式不同，GPR通常有不同的工作模式。其中，脉冲式信号具有高载频和窄脉冲的特征，通常用于精度要求高的工程场景[5]。调频连续波（FMCW）模式利用发射和接收信号的相位差计算距离[6]，但连续波发射限制了瞬时带宽[7]。步进频连续波（SFCW）模式则通过在一系列离散频点依次发射连续波实现宽带信号[8-11]，具有高分辨率成像能力，特别适合静止目标的检测[12-14]。

对GPR系统的仿真研究一直是探地雷达领域中的重要课题。其中，电磁仿真对探地雷达系统至关重要，可优化设计、降低成本，提升探测性能。其有助于分析复杂环境影响，预测系统缺陷，并为参数设置提供依据。高睦志等研究了基于Matlab和CST的联合仿真技术，通过Matlab强大的计算能力进行快速仿真[15]；刘健明等引入向量化滑动窗时域有限差分（Moving Window Finite-Difference Time-Domain，MW-FDTD）方法，提高了树林电波传播的计算效率[16]；冯健等提出基于FCC-FDTD的亚网格技术，该方法通过线性插值和加权平均的方式来处理粗细网格边界，从而实现粗细网格之间的数据交换，极大地加快了仿真速度[17]。尽管这些方法都在特定领域内提高了仿真效率，但在集成复杂性、适用范围、精度保持及实现复杂度等方面存在不足。

针对SFCW信号，本文基于冲激响应的快速仿真方法，将GPR系统视为线性时不变（LTI）系统，先计算系统的冲激响应，再将输入信号与该冲激响应卷积，以获得回波信号。该方法无需对每个频点分别进行仿真，显著减少了计算量和仿真时间。在确保结果准确的同时，该方法显著提升仿真效率、减小内存等计算资源的占用，并且便于快速调整和测试不同输入信号或场景参数，提高系统参数适应性。总之，基于冲激响应的仿真方法高效可靠，为探地雷达的研究与应用提供了强大的支撑。

1 仿真方法

1.1 FDTD更新方程

通过麦克斯韦的时域方程实现FDTD算法，麦克斯韦时域方程形式为：

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \tag{1}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - M \tag{2}$$

$$\nabla \cdot D = \rho_e \tag{3}$$

$$\nabla \cdot M = \rho_m \tag{4}$$

式中，H为磁场强度（A/m），E为电场强度（V/m），B为磁通量密度（Wb/m^2），D为电通量密度（C/m^2），J为电流密度（A/m^2），M为磁流密度（V/m^2），ρ_e为电荷密度（C/m^3），ρ_m为磁荷密度（Wb/m^3）[13]。

在FDTD方法中，电磁场的时域演化通过交替更新机制实现。具体而言，当前时刻的电场分布基于前一时刻磁场旋度计算更新，而更新后的电场又作为下一时间步磁场计算的输入，形成时空交错的递推链条。这种显式迭代机制通过离散化的空间网格（Δx, Δy, Δz）与时间步长（Δt）对连续电磁场进行采样。离散参数必须满足Courant-Friedrichs-Lewy（CFL）稳定性准则：

$$\Delta t \leqslant \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}}} \tag{5}$$

式中，c表示光速。

1.2 基于冲激响应的探地雷达仿真方法

针对传统电磁仿真方法灵活性不足和计算效率低的问题，提出一种基于冲激响应的探地雷达快速仿真方法。该方法将探地雷达发射、传播环境和

探测目标构成的系统建模为线性时不变系统，其中发射信号作为系统输入，接收信号作为系统输出。

传统FDTD方法对同一系统的不同频率信号需要分别计算，特别是在SFCW信号仿真中，每个频点都需单独进行一次FDTD仿真，因此n个频点需要执行n次仿真，计算量随频点数线性增长。为解决这一问题，本文采用冲激响应法。该方法仅通过一次FDTD仿真获得系统的时域冲激响应$y(t)$，从而计算出系统的传递函数$h(t)$，如图1所示。然后，将任意SFCW输入信号与$h(t)$进行卷积运算，即可快速生成对应场景的回波信号。



图1　LTI系统

设输入信号为$x(t)$，系统冲激响应为$h(t)$，输出信号为$y(t)$。则有卷积关系：

$$x(t)*h(t)=y(t) \tag{6}$$

式中，*表示卷积运算。对上式进行拉氏变换，得：

$$X(s)\times H(s)=Y(s) \tag{7}$$

式中，$x(t)$及其拉普拉斯变换$X(s)$表示SFCW输入信号，$h(t)$及其拉普拉斯变换$H(s)$表示系统的传递函数（冲激响应对应的传递函数形式），而$y(t)$及其拉普拉斯变换$Y(s)$表示系统对SFCW输入信号产生的输出回波信号。

上述方法以系统冲激响应与激励信号进行时域卷积来代替对各频点逐一仿真的过程，可以在保证仿真精度的同时显著提高仿真效率。

以探地雷达中的SFCW信号源为例，传统方法所需总时间为$n\times t_1+t_2$，而所提方法所需总时间为$t_1+t_2+t_3$。鉴于计算机在卷积运算方面具有高效性，t_3可以忽略不计，所以本文方法所需总时间约为传统方法的$1/n$，其数据对比如表1所示。

表1　本文方法和传统方法对比

每个计算步骤所需时间	传统方法	本文方法
应用FDTD方法仿真所需时间	对n个频率信号分别进行仿真所需时间$n\times t_1$	只对冲激信号进行仿真花费时间为t_1
其他计算步骤所需时间	数据整合所需时间t_2	数据整合所需时间t_2+计算卷积所需时间t_3
所需总时间	$n\times t_1+t_2$	$t_1+t_2+t_3$

1.3　SFCW信号的探地雷达回波信号仿真

1.3.1　SFCW信号介绍

SFCW信号通过在一系列离散频率点依次发射连续波信号来覆盖目标频带。每个频率保持一段时间，以便接收机能够捕获该频率下的回波信号。SFCW信号在探地雷达中具有高分辨率、强穿透力、抗干扰能力、目标识别、多普勒效应测量、高效数据采集和系统稳定性等优势，实验以SFCW为例展示基于冲激响应的探地雷达仿真方法。图2展示了SFCW信号频率随时间的变化规律。

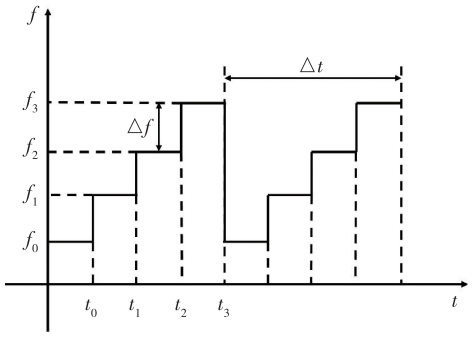


图2　SFCW信号频率随时间的变化

仿真实验中使用的SFCW信号频率范围为0.3～0.7 GHz，共50个离散频点，其数学表达式为：

$$\begin{cases} x_{\mathrm{SFCW}}(n,t)=\sin(2\pi f_n t) \\ f_n=0.3+0.001n \end{cases} \tag{8}$$

式中，f_n为第n个频点的频率，$1\leqslant n\leqslant 50$；$x_{\mathrm{SFCW}}(n,t)$为SFCW信号的表达式。

1.3.2　SFCW信号下的LTI系统公式推导

针对探地雷达、传播环境及探测目标构成的系统，根据信号处理理论，系统的冲激响应即为其传递函数$h(t)$。当输入为单位冲激信号时，系统的输出就是其冲激响应。因此，可以通过一次FDTD仿真，计算系统对冲激输入的响应$y(t)$，从而得到系统的传递函数$h(t)=y(t)$。

$$y(t)=\delta(t)*h(t) \tag{9}$$

确定传递函数$h(t)$之后，将其与实际的SFCW输入信号x_{SFCW}进行卷积，即可得到系统对SFCW信号的输出响应。

$$y_{\mathrm{SFCW}}(t)=x_{\mathrm{SFCW}}(t)*h(t) \tag{10}$$

式中，$x_{\mathrm{SFCW}}(t)$表示GPR系统发射天线发射的SFCW信号，$y_{\mathrm{SFCW}}(t)$表示系统在SFCW输入下的输出响应（即接收天线收到的回波信号）。

在实际仿真中，为需要获得二维截面图（B-scan），需要在多个位置处获取一系列的一维信号图

（A-scan）。假设需要获得n个位置处的A-scan，则需计算对应的n个冲激响应，分别记为$h_1(t)$，$h_2(t)$，…，$h_n(t)$。对每一个冲激响应$h_i(t)$（i=1，2，…，n）按照上述方法与发射信号卷积，得到第i位置处的回波信号$y_i(t)$。将这n个A-scan数据按位置依次排列形成矩阵$\boldsymbol{Y}$：

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} y_1(t_1) & y_2(t_1) & \cdots & y_n(t_1) \\ y_1(t_2) & \cdots & & \cdots \\ \cdots & & \cdots & \\ y_1(t_{\mathrm{m}}) & \cdots & & y_n(t_m) \end{bmatrix} \tag{11}$$

由于输入信号为冲击信号，所以系统输出的$y(t)$与传递函数$h(t)$相对。

为了组成B-scan，需要在运算时算出n个A-scan的传递函数$h_1(t)$，$h_2(t)$，…，$h_n(t)$，对每一个传递函数进行上述运算：

$$\begin{aligned} &x_{\mathrm{SFCW}}(t)*\{h_1(t),h_2(t),\cdots,h_n(t)\}= \\ &\{y_{\mathrm{SFCW1}}(t),y_{\mathrm{SFCW2}}(t),\cdots,y_{\mathrm{SFCW}n}(t)\} \end{aligned} \tag{12}$$

式中，$y_{\mathrm{SFCW1}}(t)$，$y_{\mathrm{SFCW2}}(t)$，…，$y_{\mathrm{SFCW}n}(t)$为n个A-scan的结果，假设每一个$y_{\mathrm{SFCW}}(t)$有m个离散点，即$y_{\mathrm{SFCW}}(t_1)$，$y_{\mathrm{SFCW}}(t_2)$，…，$y_{\mathrm{SFCW}}(t_m)$，将n个A-scan组成B-scan的矩阵为：

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{SFCW}}=\begin{bmatrix} y_{\mathrm{SFCW1}}(t_1) & y_{\mathrm{SFCW2}}(t_1) & \cdots & y_{\mathrm{SFCW}n}(t_1) \\ y_{\mathrm{SFCW1}}(t_2) & \cdots & & \cdots \\ \cdots & & \cdots & \\ y_{\mathrm{SFCW1}}(t_m) & \cdots & & y_{\mathrm{SFCW}n}(t_m) \end{bmatrix} \tag{13}$$

对以上矩阵进行归一化处理，并根据数值大小赋予不同颜色即可实现可视化，得到对应场景的B-scan图像。

2 仿真过程与结果

2.1 仿真过程

图3给出了本研究搭建的仿真场景。场地尺寸为6.3 m×3.9 m，内部埋设有形状和尺寸各异的金属目标，由左至右依次为三根高度不同的金属条、两个金属圆柱、两个长方体金属块以及一个八棱锥体金属块。

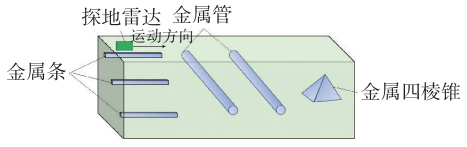


图3 探地雷达仿真场地和运动方向

在仿真过程中，探地雷达从场地一端的A点沿直线移动至另一端的B点（如图3所示），在移动过程中对场地进行多次扫描（如图4所示）。

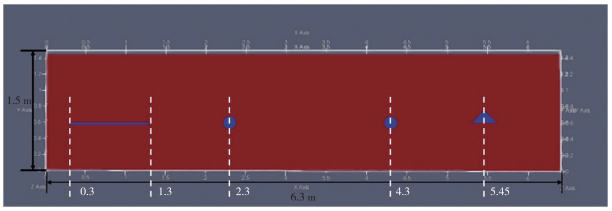


图4 仿真建模

如图5为得到由传递函数组成的B-scan图像。

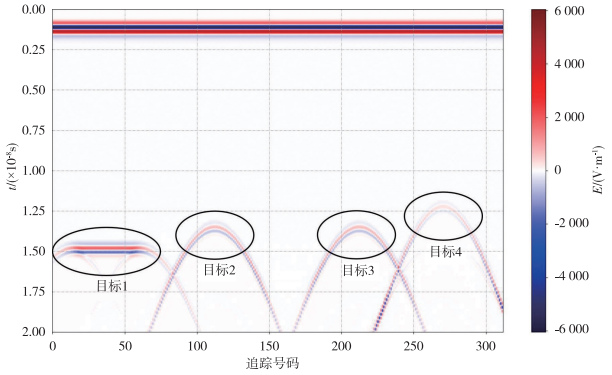


图5 脉冲信号回波信号

将上述每一个位置处获得的冲激响应A-scan与实际SFCW发射信号进行卷积计算，得到SFCW激励下各位置的回波A-scan信号，将这些SFCW回波信号组合形成B-scan图像如图6所示。

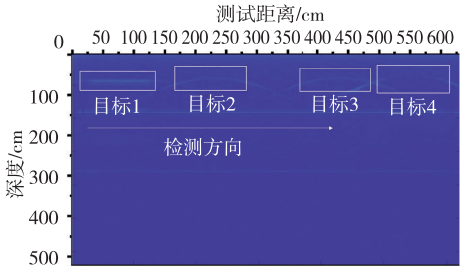


图6 卷积后的回波信号

为对比效果，采用传统方法对同一场景直接进行SFCW信号仿真，所得B-scan结果如图7所示。

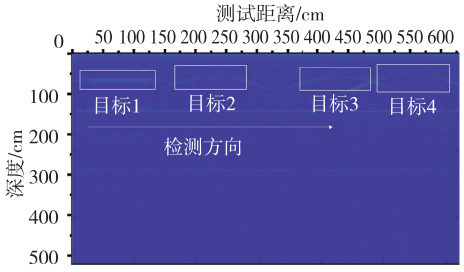


图7 应用传统方法进行仿真的回波信号

所提方法成功模拟了上述场景中不同形状的4个目标。由于上述两幅图像在后处理过程中采用了相同的方法，图6和图7的图像并无明显差别，可以看到对于场景中的4个金属目标，本文方法均能有效探测并成像。在图6中4个目标的深度为73 cm，70 cm，70 cm，50 cm；图7中4个目标的深度为74 cm，70 cm，70 cm，49 cm，可以看到在仿真中，目标位置的误差小于2%。将仿真结果与采用GPRmax进行的单频点仿真结果进行对比验证，结果如图8所示。所提方法对SFCW信号源下探地雷达回波的仿真与单频逐点仿真结果一致性良好，且仿真耗时显著缩短。表2给出了传统方法与本文方法的具体耗时对比，本文方法所用时间是传统方法的16.4%。

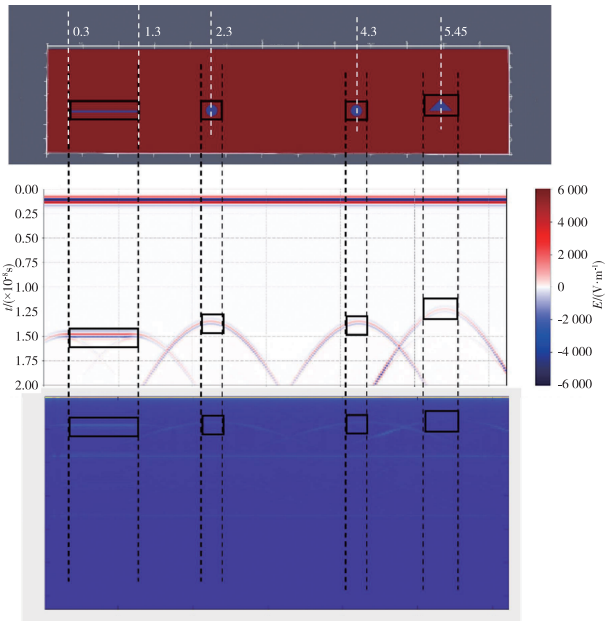


图8　仿真模型和两种回波的对比

表2　本文方法和传统方法用时对比

参数	传统方法	本文方法
所需总时间/s	$N\times t_1+t_2$	$t_1+t_2+t_3$
仿真实验时间/s	458.6	75.3

为进一步验证本文方法的有效性，将其与一种基于深度学习的GPR仿真模型[15]进行对比。该模型通过RNN进行优化，能够快速对特定的场景进行电磁仿真计算，研究的场景如图9所示。计算区域大小为2 m×2 m，吸收边界层（PML）的厚度为0.1 m，发射和接收天线间距设为0.03 m，扫描步长为0.04 m。模型中介质参数设定如下：土壤、物体1和物体2的相对介电常数分别为3，6和9，电导率均为0.01 S/m。

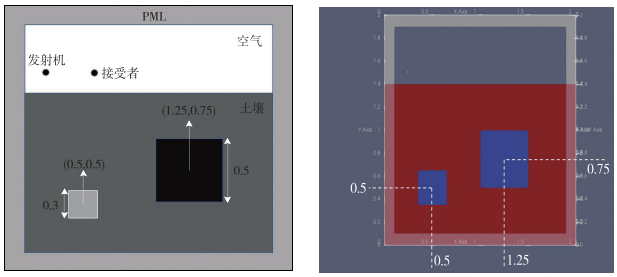
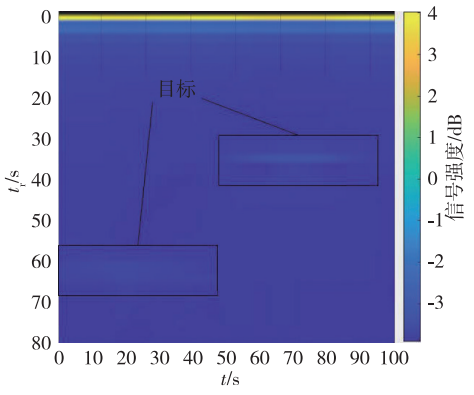


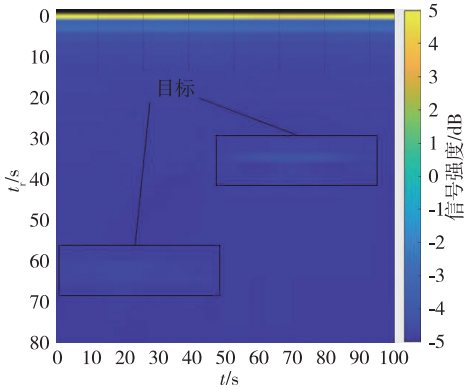
图9　仿真模型

2.2　仿真结果

两种方法的仿真结果对比如图10所示。可以看到，两种结果高度一致。然而，在计算效率上差异明显。传统FDTD逐频仿真耗时约47 985.14 s，基于深度学习的GPR仿真方法耗时约101.66 s，而本文方法仅耗时99.34 s。可见，相较于直接FDTD仿真，本文方法显著提升仿真效率。即使与深度学习加速方法相比，本文方法所用时间减少2.28%，在保证精度的同时体现出更高的效率。



（a）RNN方法



（b）基于LTI系统冲激响应的探地雷达快速仿真方法

图10　仿真结果对比

3 实验验证

3.1 实验设备介绍

所使用的探地雷达系统主要由雷达主机(含控制与信号处理单元)、发射与接收天线、数据采集与处理单元、显示与存储设备以及移动平台等关键组件组成,用于实现城市道路空洞探测和变电站接地线检测等功能。雷达主机负责整个系统的运行控制和信号处理;发射天线向地下发射高频电磁脉冲,接收天线捕捉反射回来的信号;数据采集与处理单元记录并处理这些信号,显示与存储设备用于实时显示采集到的数据图像并保存原始数据供后续分析;移动平台则确保雷达系统能够在检测区域内稳定移动。

实验平台如图11所示,由可拆卸碳纤维管搭建而成。该设计在保证平台强度的同时大幅降低重量,便于设备搬运。平台上集成了完整的天线收发系统,可直接进行信号发射与接收。



(a) 车体设计图 (b) 车体实物图

图11 探地雷达实验平台

3.2 实验场地介绍

实验在专门的试验场地进行,如图12所示,探测目标为地下埋设的接地线。

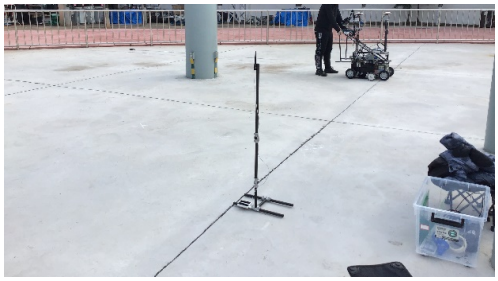
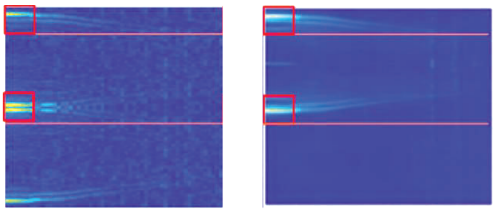


图12 探地雷达实验平台

3.3 仿真和实验结果对比

仿真结果与实测结果的对比如图13所示,其中图13(a)为实测B-scan,图13(b)为采用本文方法得到的仿真B-scan。可以看出,仿真结果与实测结果高度一致,可以准确定位出地下电缆的位置。实测分析表明,仿真图像与真实探测图像吻合良好,最大误差不超过4.34%。这证明了本文方法能够有效预测地下目标的位置,具有很高的精度和可靠性。



(a)实测B-scan (b) 仿真B-scan

图13 仿真和实验结果

4 结论

本文提出一种基于冲激响应法的SFCW信号快速仿真方法,并通过理论推导和实验验证了其可行性和有效性。结果表明,该方法能够在显著提升仿真效率的同时,保持与逐频FDTD仿真相当的精度。仿真得到的回波信号与实际测量结果高度一致,证明了基于冲激响应的探地雷达快速仿真方法的有效性。该方法不仅可以在较短时间内提供接近实测的仿真结果,还使研究人员和工程师更便捷地预测和评估不同场景下探地雷达的性能。

参考文献:

[1] Sun Y, Gai L, Wang G, et al. Research on spectrum characteristics of ground penetrating radar for road underground water-rich body [C]//2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, 2023: 1-3.

[2] Zhang Y, Xie S, Zhong J. Research on 3D imaging of unmanned vehicle ground penetrating radar [C]//2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, 2023: 1-4.

[3] David William Raj L, Banerjee U, Thilagaraj M, et al. Detection of underground object using ground penetrating radar [C]//2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, 2023: 1-4.

[4] Srimuk P, Boonpoonga A, Kaemarungsi K, et al. Hyperbolic pattern detection in ground penetrating radar images using faster R-CNN[C]//2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2023: 1-4.

[5] Huang Z, Jia Y, Fan X, et al. Domain adaptive recognition of defects for ground penetrating radar images [C]//2023 8th International Conference on Signal and Image Processing, 2023: 409-413.

[6] Forte E, Roncoroni G, Pipan M. Are lunar penetrating radar data so unusual? some relevant issues about their processing and analysis [C]//2023 12th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 2023: 1-4.

[7] Salari A, Esposito G, Catapano I, et al. A compact and light-weight ground penetrating radar system for unmanned aerial vehicles[C]//2023 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting, 2023: 221-222.

[8] Álvarez-Narciandi G, García-Fernández M, Álvarez-López Y, et al. Comparison of different height estimation sources on the performance of a UAV-mounted MIMO-SAR ground penetrating radar system [C]//2023 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, 2023: 161-163.

[9] Sun H H, Cheng W, Fan Z. Dual-polarized ground-penetrating radar method for sizing cylindrical metal bars[C]//2023 12th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 2023: 1-4.

[10] 吕　博. 沥青路面结构性能检测中三维探地雷达的应用[J]. 交通世界, 2024, (19): 67-69.

[11] 张廷旭. 探地雷达＋注浆技术在公路养护中的应用[J]. 科学技术创新, 2024, (15): 95-98.
Zhang Tingxu. Aplication of ground penetrating radar and grouting technology in highway maintenance [J]. Scientific and Technological Innovation, 2024, (15): 95-98.

[12] 柴新朝, 侯智超, 王春洋, 等. 地铁隧道探地雷达检测车的研发与应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(4): 713-721.
Chai Xinchao, Hou Zhichao, Wang Chunyang, et al. Research and application of metro tunnel radar detection vehicle [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(4): 713-721.

[13] 许　冲, 刘庆华. 融合多头注意力机制的探地雷达反演网络[J/OL]. 现代雷达, 2024: 1-15. (2024-07-25).
Xu Chong, Liu Qinghua. Ground penetrating radar inversion network combined with multi-head attention mechanism [J/OL]. Modern Radar, 2024: 1-15. (2024-07-25).

[14] 刘军伟, 闫景晨, 权　磊, 等. 探地雷达在多年冻土区特殊结构路基服役状态评价中的应用[J]. 路基工程, 2024(6): 107-112.
Liu Junwei, Yan Jingchen, Quan Lei, et al. Application of ground penetrating radar in service status evaluation of special structure subgrade in permafrost area [J]. Subgrade Engineering, 2024(6): 107-112.

[15] 高睦志, 姜大伟, 王士铨, 等. 基于Matlab和CST联合仿真的电磁超表面自动设计方法[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(11): 87-91.
Gao Muzhi, Jiang Dawei, Wang Shiquan, et al. An automatic design method of electromagnetic metasurface based on Matlab and CST co-simulation [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(11): 87-91.

[16] 刘健明, 陈　鹏, 杨永钦, 等. 基于MW-FDTD与树木精细模型的树林电波传播研究[J]. 电波科学学报, 2025, 40(3): 559-566.
Liu Jianming, Chen Peng, Yang Yongqin, et al. Research on electromagnetic wave propagation in forest based on MW-FDTD and refined tree model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025, 40(3): 559-566.

[17] 冯　健, 闫晨晨, 方　明. 面中心立方体网格FDTD方法中亚网格技术研究[J/OL]. 微波学报, 2024: 1-6. (2024-05-23).
Feng Jian, Yan Chenchen, Fang Ming. Research on subgrid technique of FDTD method for face-centered cube grid [J/OL]. Journal of Microwaves, 2024: 1-6. (2024-05-23).

[20] 赵昀杰, 程　曦, 邵　维, 等. 基于深度学习的探地雷达物理等效仿真模型[C]//第十八届全国电波传播年会, 2023: 611-615.
Zhao Yunjie, Cheng Xi, Shao Wei, et al. Deep learning-based physical equivalent simulation model for ground-penetrating radar system [C]//Chinese National Symposium on Radio Propagation (CNSRP), 2023: 611-615.

作者简介：

姚　攀(1983—)，男，湖北省黄冈市人，高级工程师，主要研究方向为电气工程技术、机械化施工等；

沈　锋(1981—)，男，江苏省盐城市人，教授，博士生导师，入选国家级高层次青年人才计划，长期从事无人系统环境智能感知、多源信息融合、通导一体化、机器人等领域的研究工作。