doi: 10.11720/wtyht.2026.1277
靳杰栋,刘四新,倪建福,等.包含实体天线模型的探地雷达数值仿真与响应特征分析[J].物探与化探,2026,50(1):155-161. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1277
Jin J D, Liu S X, Ni J F, et al. Numerical simulation of the wavefield responses of a ground-penetrating radar incorporating a physical antenna model[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 155-161. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1277

包含实体天线模型的探地雷达数值仿真与响应特征分析

靳杰栋,刘四新,倪建福,鹿琪,邓莉,田森,赵前程,胡铭奇
(吉林大学 地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130026)

摘 要: 利用数值模型或物理模型模拟复杂目标体存在时的探地雷达波场响应特征,对于深入理解实际探地雷达记录并准确识别目标体至关重要。然而,现有探地雷达数值模拟研究多基于点源模型进行简单模拟分析,未考虑天线实体,不能准确反映实际情况。本文基于 gprMax 软件,结合探地雷达天线模型和实际探测场景进行模拟研究,详细研究了探地雷达信号的响应过程,分析了其响应规律。结果表明,包含实体天线的模拟信号相比传统点源模拟更贴合实际测量,实际指导意义优于传统点源模拟。

关键词:时域有限差分;gprMax;探地雷达;数值仿真
中图分类号: P31;P631 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0155-07

0 引言

探地雷达(GPR)是用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律及属性的一种地球物理方法,它利用宽带电磁波以脉冲形式来探测地表之下的物体或结构,或者确定不可视的物体或结构。探地雷达作为一种以介质电磁性质差异为基础的无损检测方法,已被广泛应用于土木工程场地勘查[1]、地雷探测[2]、环境与水文地质研究[3]、农业评估[4]、考古调查[5]、极地考察[6]以及航空航天[7]等前沿工程与科学研究领域。

随着计算机及电子信息等相关技术的飞速发展,探地雷达在探测及数据处理解释方面取得了很大进步,探地雷达的研究也迎来新的井喷发展。正演模拟可以模拟探地雷达的信号响应,指导实际的应用,曾昭发等[8]早已深入研究了探地雷达的数据处理与解释,对于之后的研究具有深远指导意义。同时,国内外有很多学者也对正演的优越性以及准确性进行了研究,尹光辉等[9]建立了理想条件下道路路基充气和充水空洞模型,用 gprMax 对不同空洞模型进行正演模拟,并对得到的模拟雷达图像进行分析;杨洁等[10]论述了 6 种地下典型目标体模型正演模拟的图像特征,构建了典型目标体的正演模型并将正演模拟剖面图中的各个典型目标体的图像识别特点进行了汇总;Mapoka 等[11]通过二维 gprMax 仿真,研究了土壤电磁特性对探地雷达波的影响;Wu 等[12]建立三维模型模拟了三维探地雷达在衬砌检测中的应用,分析了空隙在不同测量线路中的响应特征,并通过隧道工程验证了正演建模结果的可靠性。

国内外关于正演模拟的研究虽层出不穷,但基本都是基于点源来进行简单模拟,和实际情况有很大差别,且都集中于对剖面图像进行分析,实用性不高。本研究基于以上考量,在模拟时创新性地采用两种频率的商业天线实物模型,利用 gprMax 软件进行模拟,并进行实际测量实验,详细地对比模拟与实测信号单道曲线,使研究结果更加详细且符合实际需求。

收稿日期: 2025-08-07; **修回日期**: 2025-10-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(42542015;42374178)
第一作者: 靳杰栋(2002-),男,硕士研究生,主要研究方向为探地雷达。Email:jinjd24@mails.jlu.edu.cn
通讯作者: 刘四新(1966-),男,山西太谷人,日本东北大学工学博士,教授,博士生导师,主要从事探地雷达、钻孔雷达及电磁波测井等方法的理论及应用研究工作。Email:liusixin@jlu.edu.cn

1 基本原理

1.1 时域有限差分方法

时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)以麦克斯韦方程组为基础,采用差分方法直接离散时域麦克斯韦方程,同时采用立方体网格和差分算法,网格形式和算法均十分简单,计算速度快。本研究使用的软件 gprMax 便是基于 FDTD 开发。麦克斯韦方程组描述了电磁场的运动学规律和动力学规律,宏观来看,所有的电磁现象都可通过方程组来描述[13]。以下为部分麦克斯韦方程的微分形式:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + \boldsymbol{J} ,$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} 。$$

式中:$\boldsymbol{E}$ 为电场强度;$\boldsymbol{D}$ 为电位移;$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度;$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度;J 为电流密度。$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{H}$ 这四个矢量称为场量,是需要求解的。

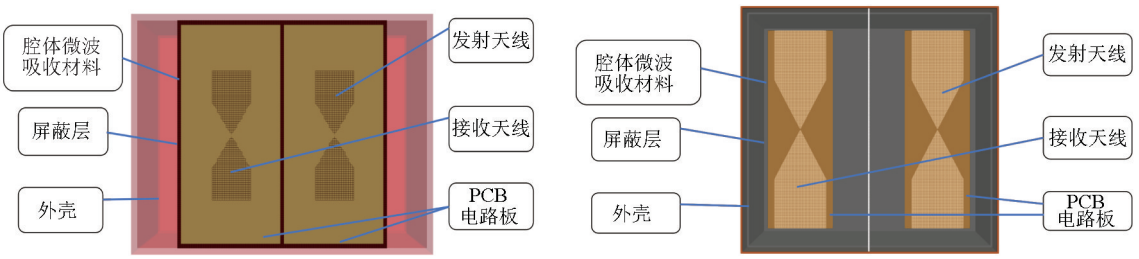
在 FDTD 算法中,网格被剖分为 Yee 网格的形式,电场和磁场元胞差半个网格,将求解空间离散成笛卡尔坐标上的长方体网状结构是 FDTD 的核心思想,网状结构中的一个最小单元就是一个典型的三维 Yee 元胞结构,也叫 Yee 网格。

1.2 gprMax 模拟软件介绍

gprMax 是一款开源软件,可用于模拟电磁波在介质中的传播[14],采用了 Yee 算法和 FDTD 方法来求解三维麦克斯韦方程组。它的 Python 架构使得用户可以灵活地进行模拟和定制,同时采用 Cython 编写关键部分以提高性能。该软件充分利用了 NVIDIA CUDA 的 GPU 编程模拟,使其能够在 GPU 上运行求解器。这种多平台、多核心的特性使得 gprMax 成为 GPR 研究中的卓越工具[15]。

gprMax 有很多比较实用且强大的功能,例如:①可以精确建模各种各向异性材料;②可以建立有相对真实的介电常数和几何特性的土壤模型,还可以使用相关公式精确建模色散材料;③可以建立表面粗糙的模型;④可以调用内置的天线模型库。

本研究采用 gprMax 内置的天线模型 GSSI 1.5GHz 天线和 GSSI 400MHz 天线(图 1)。GSSI 1.5GHz 天线尺寸(单位:mm)为 170×108×45,GSSI 400MHz 天线尺寸(单位:mm)为 300×300×170。两种天线以真实商业天线为基准进行建模,且已经通过将一系列实验中典型 GPR 目标嵌入乳液中的响应与包含天线模型的实验模拟进行比较,对天线模型进行了验证[16]。



(a) GSSI 1.5GHz (b) GSSI 400MHz

图 1 模拟 GSSI 天线模型(修改自文献[16])

Fig. 1 Simulated GSSI antenna model(modified from reference[16])

2 实验

合成数据实验和实测数据实验均在吉林大学模型实验室中进行。在实验室中依据实际场景建立模拟模型(图 2):设置 2.5 m×0.3 m×1 m 的空间,网格大小为 2 mm,最上层为 30 cm 厚的空气层,下面为 70 cm 厚的砂土层(相对介电常数 $\varepsilon_r = 4$),砂土中埋有 4 根管子,管子之间水平距离 0.5 m。第一根管子的水平位置为 x 轴正向 0.5 m,埋深 40 cm,外径 4 cm,内径 3 cm,材质为 PVC 塑料($\varepsilon_r = 2$);第二根管子埋深 45 cm,外径 4 cm,内径 3 cm,材质为铜($\varepsilon_r = 1$);第三根管子埋深 40 cm,外径 4 cm,内径 3 cm,材质为铜($\varepsilon_r = 1$);第四根管子埋深 20 cm,外径 3 cm,内径 2 cm,材质为 PVC 塑料($\varepsilon_r = 2$)。

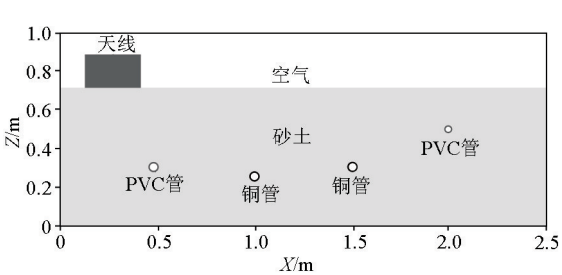


图 2 模拟实验模型示意

Fig. 2 Simulation experiment modeling diagram

数值模拟实验采用 GSSI 400MHz、GSSI 1.5GHz 天线,分别沿地面进行模拟探测,天线起始位置为 x 轴正向 0.2 m 处,天线步长设置为 5 cm,时窗设置为 20 ns。模拟后得到两张合成剖面图(图 3)。

实测数据实验采用 Mala 1.6GHz 及 Mala 500MHz 对实际场景进行探测,实际场景的目标体摆放与模拟实验模型一致。使用 matGPR 处理图像数据,分别对图像采用 T0 校正、修剪时窗、去直达、AGC 增益等处理方法,成图见图 4。

模拟实验分别生成第 6、16、26、36 道的 A 扫描图,对应实测实验中 x 分别为 0.5、1.0、1.5 m 和 2.0 m 处的单道波形。为消除幅值差异影响,所有波形在对比前均进行了归一化处理。

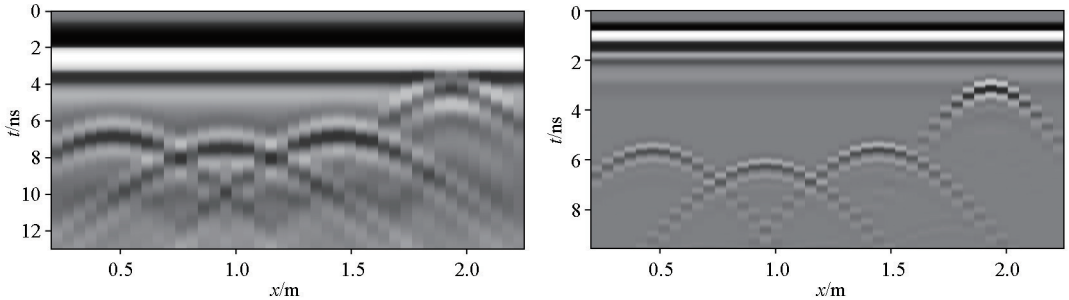


图 3　模拟实验剖面 B 扫描图像

Fig. 3　Simulation experiment profile B-scan

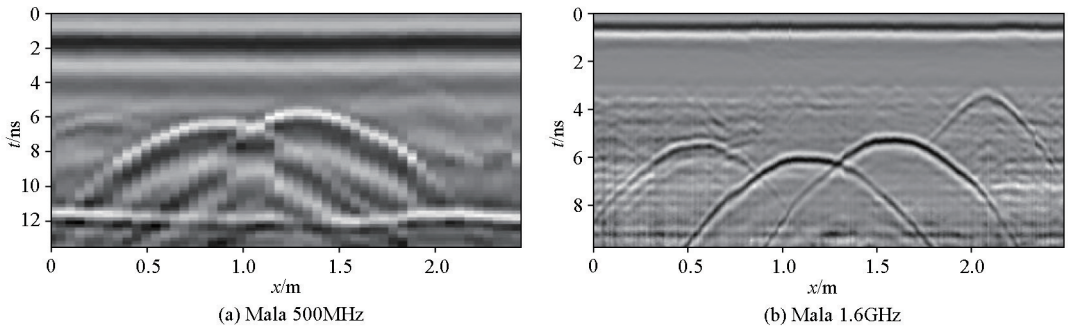


图 4　实测实验剖面 B 扫描图像

Fig. 4　Measured profile B-scan

比较图 3、图 4 可见:低频天线分辨率较低,Mala 500MHz 图中仅有 2 个异常造成明显反射波,左右两侧的目标体反射波不够清晰,而 Mala 1.6GHz 图中可清晰地看到 4 个目标体的反射波;2 个实验的高、低频天线模拟结果基本一致,计算时间及距离相互符合,对应较好。Mala 500MHz 的实测图中位于 12 ns 处的直线(图 4a),经过计算为实验场景砂土池的底部。

3　单道信号对比

3.1　低频天线

对比 GSSI 400MHz 以及实测所采用的 Mala 500MHz 天线的单道波形(图 5),模拟与实测的直达波波形基本一致,但是由于天线型号以及频率稍有不同,其频率响应和带宽也略微不同。

1)0.5 m 处,模拟信号与实测信号位于 6~8 ns 时段的目标反射波对应较差,到时与波形均有差别,但 9~11 ns 时段的信号基本对应。

2)1 m 处,模拟信号的波形比实测信号略宽,二者的目标反射波基本对应,仅幅值与到时有略微差别,甚至之后多次波的信号曲线波形也基本对应;这说明模型中多层次界面及多次反射干涉效应在模拟中得到了较好再现。

3)1.5 m 处的模拟信号与实测信号基本对应,模拟信号的目标反射波波形略宽,到时提前 0.4 ns;二者幅值有略微差别。

4)2 m 处的模拟信号与实测信号的目标反射波基本重合,到时接近且幅值基本一致。

比较点源 400MHz 仿真信号与实测 Mala 500MHz 的信号波形可见:点源模型的直达波在到时上较实测信号提前或滞后,且波形宽度与振幅均存在偏差;此外,其目标反射波无论是到时、幅值还是波形轮廓,均与实测曲线差异较大,无法准确重现实测中反

射峰的时相和衰减特征,导致整体匹配度和相关性显著下降。

将实测信号与 GSSI 400MHz 模拟信号的频谱可视化(图 6),结果表明二者的频谱质心位置和带宽高度一致,仅在幅值分布上存在细微差异。而对比点源 400MHz 模拟信号与实测信号,发现其频谱质心出现明显偏移,整体频谱对应度显著低于基于实体天线模型的模拟结果。

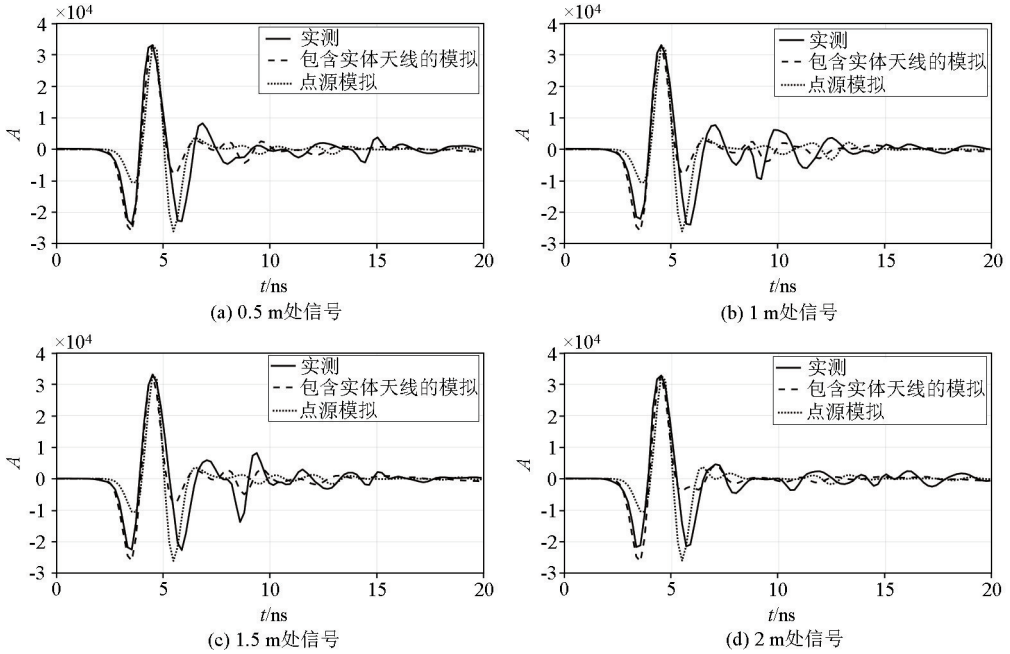


图 5 点源 400MHz、GSSI 400MHz 与实测 Mala 500MHz A 扫描结果

Fig. 5 Point-source simulation 400MHz、GSSI 400MHz and measured Mala 500MHz A-scan

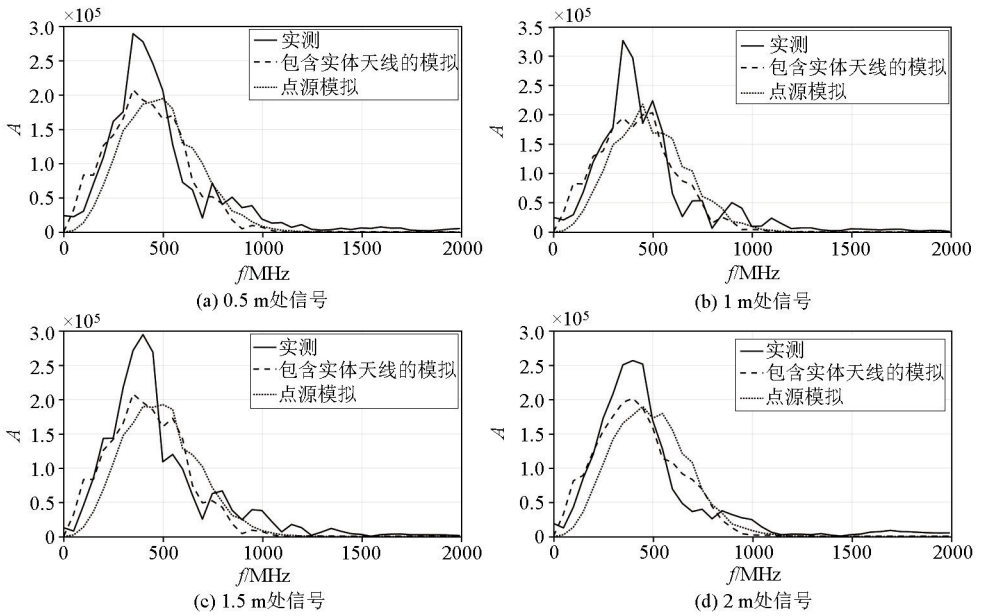


图 6 点源 400MHz、GSSI 400MHz 与实测 Mala 500MHz 信号频谱对比

Fig. 6 Comparison of the frequency spectra of Point-source simulation 400MHz、GSSI 400MHz and measured Mala 500MHz signals

3.2 高频天线

对比 GSSI 1.5GHz 以及实测所采用的 Mala 1.6GHz 天线的各单道 E_y 波形(图 7),GSSI 1.5GHz 的直达波波形与实测 Mala 1.6GHz 的直达波波形有一些差异,带宽略有差别。

1)0.5 m 处,实测信号与模拟信号的目标反射波波形基本一致,到时仅相差 0.4 ns,幅值有略微差别。

2)1 m 处和 1.5 m 处,实测与模拟的目标体反射波信号比较明显,形状基本一致,到时仅相差约 0.3 ns,模拟信号与实测信号对应较好。

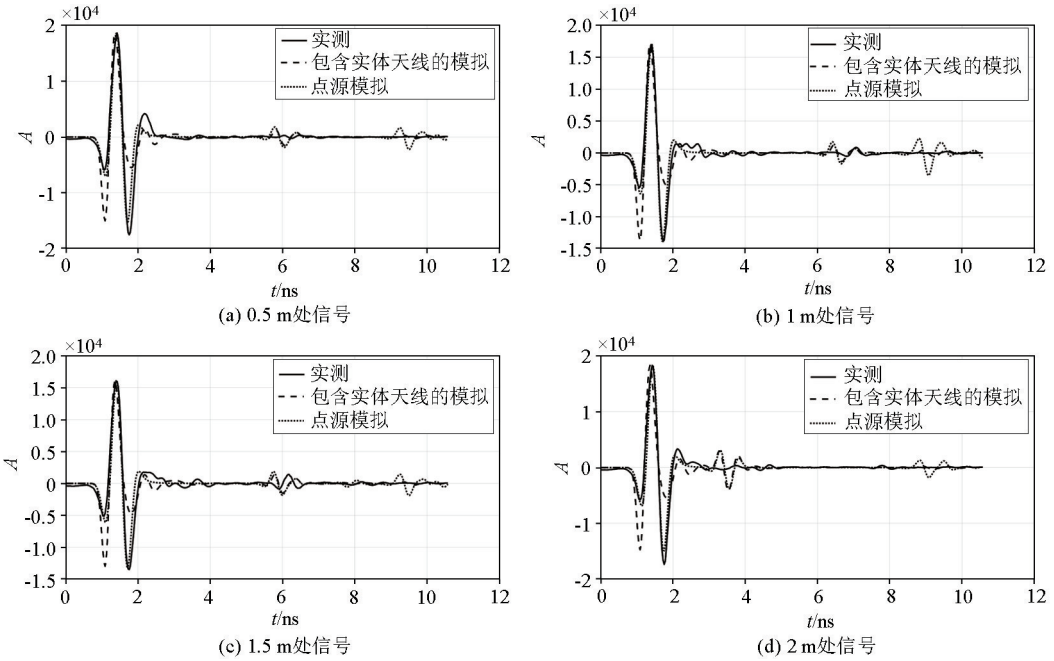


图 7　点源 1.5GHz、GSSI 1.5GHz 与实测 Mala 1.6GHz A 扫描结果

Fig. 7　Point-source simulation 1.5GHz、GSSI 1.5GHz and measured Mala 1.6GHz A-scan

3)2 m 处,模拟信号的目标反射波相对明显,极性与直达波相反,而实测信号的目标反射波幅度较小,到时相对模拟信号延后 0.9 ns,但波形轮廓与模拟信号基本一致。

综合来看,高频条件下,铜管的反射波比 PVC 塑料管更为明显,且模拟结果与实测数据的吻合度更高。同时,将点源 1.5GHz 仿真信号与实测信号的单道波形进行对比,结果表明:尽管两者的直达波波形基本一致,但点源模型生成的尾波(8~10 ns)未能像实测数据那样平稳衰减,反而出现了不符合实际的"理想化"振荡;相比之下,基于 GSSI 1.5GHz 天线模型的仿真信号尾波则与实测曲线一致地呈现出衰减趋势。因此,GSSI 1.5GHz 天线模型仿真比点源模型更能真实地再现雷达信号的传播特性。

将实测信号与 GSSI 1.5GHz 模拟信号的频谱可视化(图 8),结果表明二者的频谱质心位置和带

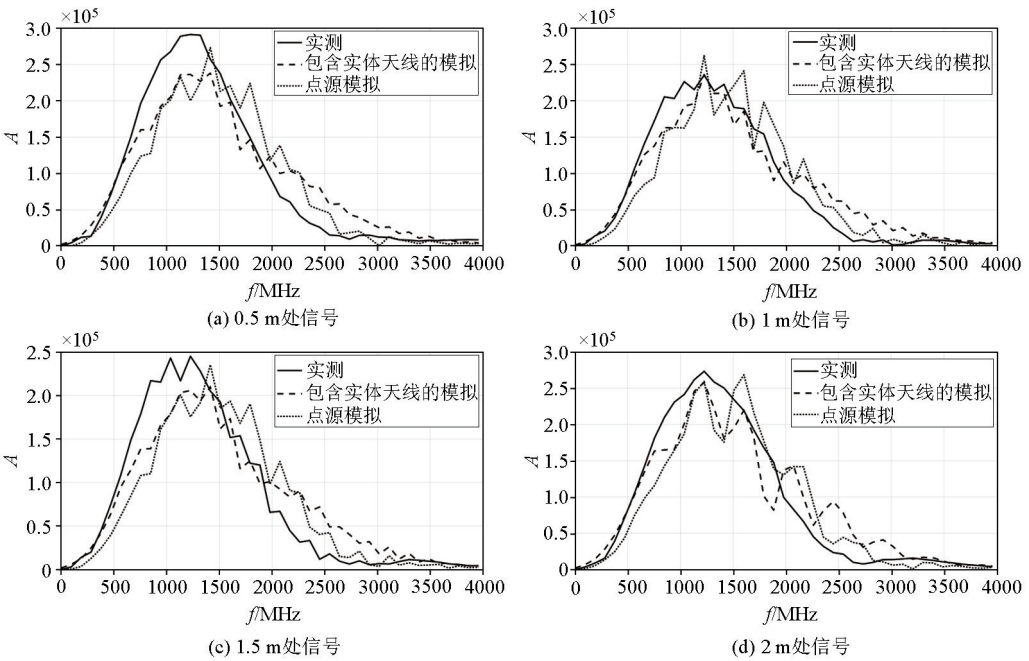


图 8　点源 1.5GHz、GSSI 1.5GHz 与实测 Mala 1.6GHz 信号频谱对比

Fig. 8　Comparison of the frequency spectra of Point-source simulation 1.5GHz、GSSI 1.5GHz and measured Mala 1.6GHz signals

宽基本一致,仅在幅值分布上存在细微差异。而对比点源 1.5GHz 模拟信号与实测信号,发现其频谱质心出现偏移且能量相对分散,整体频谱对应度略低于基于实体天线模型的模拟结果。

为量化模拟与实测波形的一致性,计算了模拟信号相对实测信号的皮尔逊相关系数(数值越接近 1 表示相关性越强)。计算结果(表 1)显示:①低频天线模拟,采用实体天线模型的仿真信号在所有测点上的相关系数均高于对应的点源模拟,证明其与实测数据的匹配度和整体相关性更优;②高频天线模拟,高频天线模型的整体相关系数略低于高频点源模型,主要由于高频天线的辐射模式和传播特性与实测天线存在差异,导致信号中最强的部分——直达波与实测信号之间存在差异。

表 1　高、低频天线模拟与实测信号的皮尔逊相关系数

Table 1　Pearson correlation coefficients of simulated and measured signals for high-frequency and low-frequency antennas

距离/m	低频点源模拟	包含低频实体天线模拟	高频点源模拟	包含高频实体天线模拟	高频点源模拟(去除直达波)	包含高频实体天线模拟(去除直达波)
0.5	0.814	0.889	0.935	0.9254	0.247	0.360
1.0	0.814	0.861	0.950	0.8797	0.407	0.413
1.5	0.792	0.875	0.933	0.8775	0.501	0.510
2.0	0.823	0.893	0.948	0.8979	0.348	0.454

然而,尽管直达波是信号中最强的成分,但它并不反映地下目标的真实反射特性;因此,为了更准确地聚焦于地下介质的反射特性,去除了直达波的影响,使反射波的特征更加突出。去除直达波后,实体天线模型的仿真信号相关系数超过了点源模型,进一步验证了实体天线模型在重现实测地下反射特征方面的优势。

由以上对比可见,虽然实测信号与包含实体天线的模拟信号基本匹配,但是仍旧存在诸如带宽、幅度以及到时上的微小差异。原因分析如下:

1)两种雷达系统的波形特性可能有所不同,它们可能使用不同的脉冲宽度、脉冲间隔和发射模式,从而影响信号的形状和响应,且模拟与实测天线频率不同,在分辨率上也会有差别。

2)模拟通常是基于理想化的假设,如均匀的地下介质和无干扰的条件,而实际测量则会受到实际环境中的砂土不均匀性、湿度、温度变化和噪声干扰等因素的影响,因此实测数据中的信号可能会显示更多的干扰,导致信号波形的不规则性或强度的差异。

3)模拟中使用的模型埋深和管道几何均为理想值,而真实场地可能存在管道位置、倾斜度偏差及周边散射体等,这些因素也会带来部分误差。

4)本研究中,模拟使用了 GSSI 天线,而实测数据使用了 Mala 天线。尽管这两款天线的工作频率接近,但它们在频率响应、脉冲宽度和辐射模式等方面存在差异,这可能引入系统误差。这些差异可能导致两种天线在反射波的幅度和时延上存在偏差,尤其是在高频信号的传播过程中。同时,这些差异也会影响信号的接收质量和目标的分辨率,进而影响模拟与实测数据之间的匹配程度。

4　结论

以往关于探地雷达模拟的研究大多局限于点源模拟以及剖面分析,不够详细且难以贴合实际。基于实用的角度,本研究创新性地采用不同频率的商业天线模型,结合实测场景进行模拟,并与传统点源模型进行了对比分析。研究结果表明,基于屏蔽实体天线模型的仿真信号表现出更高的皮尔逊相关系数,频谱质心与带宽几乎与实测信号完全重合,总体匹配度明显优于点源模型。实体天线模型能够准确再现天线的几何结构、馈电方式及屏蔽效应,尤其在直达波、反射波和尾波的时频特征上,模拟信号与实测信号更为接近;因此,采用实体天线的数值仿真在重现实测雷达信号方面具有显著优势,能够为现场探测与结果解释提供更为可靠的数值依据。

参考文献(References):

[1] Klewe T, Strangfeld C, Kruschwitz S. Review of moisture measurements in civil engineering with ground penetrating radar-Applied methods and signal features[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122250.

[2] Šipoš D, Gleich D. A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2234.

[3] Looms M C, Jensen K H, Binley A, et al. Monitoring unsaturated flow and transport using cross-borehole geophysical methods[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 227-237.

[4] Iwasaki K, Tamura M, Sato H, et al. Application of ground-penetrating radar and a combined penetrometer-moisture probe for evaluating spatial distribution of soil moisture and soil hardness in coastal and inland windbreaks[J]. Geosciences, 2020, 10(6): 238.

[5] Wang Z, Zeng Z F, Zhang L. Ground penetrating radar exploration at archaeological site in Shi Village, Xia County, Shanxi Province [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 660(1): 012117.

[6] Jacob R W, Trop J M, Kochel R C. Subsurface architecture of alpine icy debris fans: Integration of ground-penetrating radar and surface observations in Alaska and New Zealand[J]. Geomorphology, 2021, 375: 107544.

[7] Giannakis I, Zhou F, Warren C, et al. Inferring the shallow layered structure at the Chang'E-4 landing site: A novel interpretation approach using lunar penetrating radar [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(16): e2021GL092866.

[8] 曾昭发,刘四新,冯晅,等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
Zeng Z F, Liu S X, Feng X, et al. Principle and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[9] 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.
Yin G H, Feng Y N, Zhang H K, et al. Forward simulation of ground-penetrating radar for roadbed void detection using gprMax software [J]. Geophysical Prospecting and Exploration Computational Techniques, 2016, 38(4): 480-486.

[10] 杨洁,王云龙,张雪,等. 基于正演模拟的地下典型目标体探地雷达图像特征分析与评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8540-8551.
Yang J, Wang Y L, Zhang X, et al. Analysis and evaluation of GPR image features for typical underground targets based on forward simulation [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8540-8551.

[11] Mapoka K O M, Birrell S J, Tekeste M Z, et al. Using gprMax to model ground-penetrating radar (GPR) to locate corn seed as an attempt to measure planting depth[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(3): 673-686.

[12] Wu X L, Bao X H, Chen X S, et al. 3D forward modeling analysis of lining void detection based on gprMax[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(2): 127-135.

[13] 曾昭发,刘四新,冯晅,等. 探地雷达原理与应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2023.
Zeng Z F, Liu S X, Feng X, et al. Principles and applications of ground penetrating radar[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023.

[14] Chatterjee S, Bhattacharya A. Earth simulation for time domain GPR application using gprMax simulator[C]//Agra: 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). IEEE, 2016: 1-5.

[15] Chatterjee S, Bhattacharya A, Duggal S. Methodology for utilization of a generalised antenna in gprMax simulator[C]//Munich: Multimodal Sensing: Technologies and Applications, SPIE, 2019: 18.

[16] Warren C, Giannopoulos A. Creating finite-difference time-domain models of commercial ground-penetrating radar antennas using Taguchi's optimization method[J]. Geophysics, 2011, 76(2): G37-G47.

Numerical simulation of the wavefield responses of a ground-penetrating radar incorporating a physical antenna model

JIN Jie-Dong, LIU Si-Xin, NI Jian-Fu, LU Qi, DENG Li, TIAN Sen, ZHAO Qian-Cheng, HU Ming-Qi

(*College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun* 130026, *China*)

Abstract: Simulating the wavefield responses of a ground-penetrating radar (GPR) in the presence of a complex object using a numerical or physical model can provide critical insights for better understanding real-world GPR records and accurately identifying the object. However, current numerical simulations rely primarily on simple point source models while neglecting the physical antenna, thus failing to accurately reflect the actual conditions. Based on the gprMax software, this study delved into the response process and characteristics of the GPR signal by integrating the GPR antenna model and the real-world detection scenario. The results demonstrate that the numerical simulation incorporating the physical antenna model produced responses closer to the actual responses, providing more effective guidance compared to traditional point source simulations.

Key words: finite-difference time-domain (FDTD) method; gprMax; ground-penetrating radar (GPR); numerical simulation

(本文编辑:叶佩,沈效群)