

基于雷达技术的大埋深管线探测应用研究

王 伟

中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2022年8月15日; 录用日期: 2022年9月8日; 发布日期: 2022年9月15日

摘 要

用探地雷达探测地下管线是一种利用电磁波探测浅层地下介质结构的地球物理方法技术。探地雷达无损检测技术在综合地下管线检测领域得到了越来越广泛的研究及应用。首先, 介绍了电磁波探测原理, 利用时域有限差分法, 对大深度管线模型进行了反射波正演模拟, 分析不同介电常数下深部管线波场特征及规律; 其次对华能北京热电厂深部管线进行探测, 通过对雷达信号数据精细处理, 有效压制了探测区域内多种干扰源信号, 获得了探测区内直径2 m、埋深3~5 m非金属管线地下分布情况, 结合实例对深部管线探地雷达结果进行分析总结其规律特征, 并通过开挖施工验证了探测结果的准确性, 为后续开挖工程顺利实施提供了安全保障。

关键词

探地雷达, 正演模拟, 深部地下管线, 雷达信号

Study on the Application of Radar Technology in the Detection of Deep Buried Pipelines

Wei Wang

State Key Laboratory of Resource and Environmental Information Systems, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing

Received: Aug. 15th, 2022; accepted: Sep. 8th, 2022; published: Sep. 15th, 2022

Abstract

The detection of underground pipelines by GPR is a geophysical method using electromagnetic wave to detect the structure of shallow underground medium. GPR nondestructive testing tech-

nology has been more and more widely used in the field of comprehensive underground pipeline detection. Firstly, the principle of electromagnetic wave detection is introduced, and the reflection wave forward modeling of pipeline model with large depth is carried out by using the finite difference time domain method. The wave field characteristics and laws of deep pipelines under different dielectric constants are analyzed. Secondly, the detection of deep pipelines in Huaneng Beijing thermal power plant is carried out. Through the precise processing of radar signal data, a variety of interference source signals in the detection area are effectively suppressed, and the underground distribution of non-metallic pipelines with a diameter of 2 m and a buried depth of 3~5 m in the detection area is obtained. Combined with an example, the results of deep pipeline GPR are analyzed. The accuracy of the detection results is verified by the excavation construction, which provides a safety guarantee for the subsequent excavation project.

Keywords

GPR, Forward Modeling, Deep Underground Pipeline, GPR Signal

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来随着城市基础设施建设快速发展, 城区改造、道路开挖、管道改建等地下工程建设中, 很容易导致各类管道破裂的现象, 造成财产损失[1]。城市建设施工过程中精确定位地下管线分布是避免工程事故的必要前提。探地雷达是一种地球物理检测方法, 它是一种电磁法探测技术[2], 可用于埋藏于地下的各种管道的探测, 如金属管线、水泥管线、PVC 管线、地下电缆、输水管线、空洞、混凝土中的钢筋网, 还可划分回填层及计算各层层厚等[3] [4]。

常规的管线探测通常利用管线探测仪完成探测任务, 但由于其只针对金属管线, 且探测深度浅, 在应用范围方面存在不足[5]。而对于埋深较大的地下管线探测问题一直难以解决, 主要原因在于: 第一, 埋藏深度过大, 各种无损探测方法分辨率低难以捕捉到管线的特征; 第二, 对于分辨率较高的高频探测方法衰减快又难以达到 4 m 左右的深度; 第三, 管线埋设一般在场地狭小障碍较多的复杂地方, 由于其探测范围狭小, 不利于使用其它大规模的物探手段。探地雷达应用的范围极广, 在城市地下管线探测中, 不仅能够用来探测非金属管线, 而且能够弥补管线仪探测深度浅等缺点[6]。而且探地雷达能够利用屏蔽天线减少电磁波在地面上部反射造成的干扰; 同时通过选择低频天线(16~100 MHz)增加有效探测范围(探测深度 0~50 m); 在后续处理中利用滤波等方法再压制外部的各种频率的电磁干扰信号, 从而解决埋深较大的管线探测问题。在很多管线探测工程实例中, 经常遇到埋藏大于 2.5 m 的目标体, 且存在各种电磁干扰(如高压输电线的电晕、无线电发射设备、交流电网强大的电磁场以及各种电力设备等)。

本文结合北京华能热电厂深部地下管线探测工程, 探测管线埋深大约为 3~5 m。由于电厂内电磁信号干扰严重, 且地表为绿化草地覆盖, 给本次探测带来了很大的难题, 因此可先通过数值模拟研究目标体反射波场特征, 提高实测数据信号分析能力, 便可增加处理结果的可靠性。

2. 探地雷达方法原理

2.1. 探地雷达国内外研究现状

电磁波能量在地下介质中会产生衰减, 上世纪 50 年代 Bailey 将探地雷达应用与介质层相对单一的冰

层探测。直至上世纪 70 年代，探地雷达应用于月球表面探测，该技术得到了更多的发展，使得应用范围更加广泛，如岩层结构探测、地下水位探测、工程地质探测等。在全球探地雷达快速发展的同时，国内针对该研究也得到了长足的发展。自 90 年代以来，通过自主研发和国外仪器的引进等方式，探地雷达在工程地质探测及科学研究方面得到了普遍的使用，如公路路基检测、地质灾害预测、矿产工程探测、隧道超前预报、考古及文物保护、隧道衬砌病害探测、地下管线探测等。

2.2. 工作原理

如图 1 所示，探地雷达(也叫地质雷达或透地雷达)法是一种浅层地球物理勘探方法，它是由激发天线 T 将电磁波以脉冲形式传入地下，经地下电磁差异界面反射后传回地面，被接收天线 R 所接收，是一种反射法的探测技术。电磁波旅行时为：

$$t = \sqrt{4z^2 + x^2} / v \quad (1)$$

当地下介质中的介电常数已知时，便可确定波速 v ，可根据测得的时间 t 值，通过上式便可求得反射目标体的深度[7] [8] [9]。

探地雷达是以自激自收方式记录反射波的波形，所以其图像为每一道的反射波的波形连续组合起来的剖面。波形的正负峰分别以不同颜色填充，主要以灰度图显示，这样在电磁差异界面会形成明显的同相轴用来表示目标体的某一截面。在地下管线探测中常沿着管线横向截面拖动天线进行探测，通过数据处理获得探地雷达图像，并据此判断地下管线的位置和大小[10]。

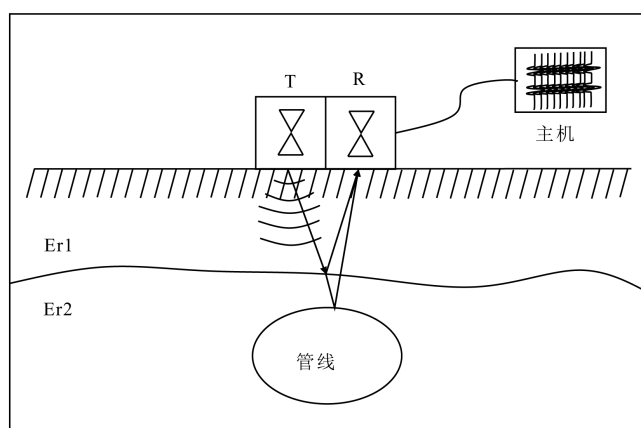


Figure 1. Working principle diagram of GPR

图 1. 探地雷达工作原理图

探地雷达在野外实际应用中它的探测深度主要取决于天线频率和地下介质的介电常数，介电常数的影响主要是因为介电常数越大对电磁波的吸收就越强。而天线频率与分辨率成正比，所以在能够达到探测深度时尽量选取高频天线。而它的探测效果与野外探地雷达工作时的参数选择，工区的现场环境干扰，以及后期的数据处理有关[11]。

2.3. 正演模拟原理

正演模拟采用时域有限差分法，该方法将麦克斯韦方程组进行差分离散，从而在时域进行电磁波的模拟，本次模拟 100 MHz 天线对大埋深为 5 m，半径为 1 m 的管线进行正演，分析其不同排列方式，不同材质的管线反射波特征规律，从而提高实测数据信号分析能力，对工区实测数据中的管线反射波特征起到指导作用。

2.3.1. 时域有限差分 FDTD 理论

麦克斯韦方程组统一了电场和磁场的基本规律，微分形式包含法拉第电磁感应定律和全电流定律两个旋度方程，以及静电场高斯定律、磁通连续性原理两个散度方程[12]。Yee 提出的时域有限差分法，是基于麦克斯韦旋度方程进行差分离散。麦克斯韦旋度方程[13] [14]：

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= \frac{\partial B}{\partial t} - J_m \\ \nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} + J \end{aligned} \tag{2}$$

E ——电场强度，单位 V/m； H ——磁场强度，单位 A/m； J ——电流密度，单位 A/m²；反映电损耗。
 D ——电通量密度，单位 C/m； B ——磁通密度，单位 Wb/m； J_m ——磁流密度，单位 V/m²；反映磁耗。

麦克斯韦方程组主要研究地下介质的磁场和电场特性。本构关系描述了物质的基本粒子在外部电磁场作用下的整体宏观特性。在各向同性线性介质中的本构关系为：

$$\begin{aligned} B &= \mu H & J &= \delta E \\ J_m &= \delta_m & D &= \varepsilon E \end{aligned}$$

μ ——磁导率，单位 H/m；真空中 = 4×10^{-7} H/m； δ ——电导率，单位 S/m；真空中 = 0。 δ_m ——导磁率，单位 Ω /m；真空中 = 0； ε ——介电常数，单位 F/m；真空中 = 8.85×10^{-12} F/m

在直角坐标系中，以 E, H 为变量展开麦克斯韦旋度方程分别为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \frac{\partial E_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z \end{aligned} \tag{3}$$

令 $f(x, y, z, t)$ 代表 E, H 在直角坐标系中的某个分量，时间和空间域中离散符号取为：

$$f(x, y, z, t) = f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = f^n(i, j, k) \tag{4}$$

Δx —— x 方向空间步长； Δt ——时间步长； j —— y 方向空间步长个数； Δy —— y 方向空间步长； n ——时间步长个数； k —— z 方向空间步长个数； Δy —— y 方向空间步长； i —— x 方向空间步长个数。

对 $f(x, y, z, t)$ 关于的时间 t 和空间 x, y, z 方向的一阶偏导数取中心差分近似为：

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=i\Delta x} &\approx \frac{f^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - f^n\left(i - \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta x} \\ \left. \frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=j\Delta y} &\approx \frac{f^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) - f^n\left(i, j - \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} \\ \left. \frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=k\Delta z} &\approx \frac{f^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - f^n\left(i, j, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \\ \left. \frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial t} \right|_{t=n\Delta t} &\approx \frac{f^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - f^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} \end{aligned} \tag{5}$$

模拟地质雷达的电磁波在地下介质层中传播时，Yee 提出一种计算电磁波数值的时域有限差分法，根据麦克斯韦方程组的差分近似形式，通过计算每个单位网格中的电场和磁场分量来计算获得整个仿真空间的电磁场值[18]，如图 2 所示。

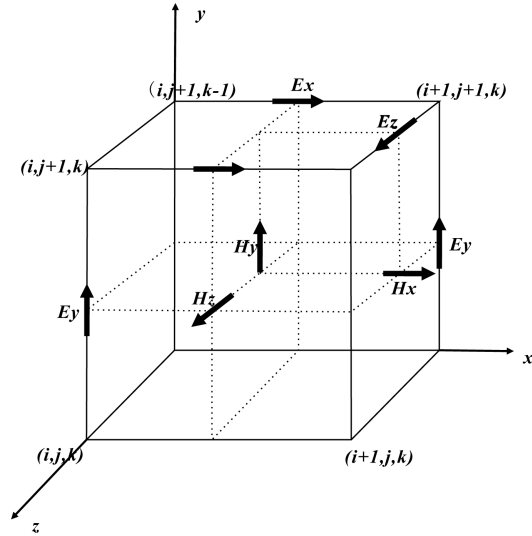


Figure 2. Yee cell
图 2. Yee 元胞

Yee 元胞中 E 分量与 H 分量在空间上都是垂直分布。 E 与 H 相互环绕。相邻 $E(H)$ 相隔一个空间(时间)步长，相邻 E, H 相隔半个空间(时间)步长。面上的磁场分量近似相等，Yee 元胞棱边的电场分量近似相等。 x, y, z 方向上的时间步长是相等的。

2.3.2. 激励源

数值模拟采用的激励源为 100 MHz 雷克子波，波形及其频谱如图 3 所示。雷克子波形状简单、零相位、只有一个正峰、两侧各有一个旁瓣、延续时间很短、收敛快。适用于雷达正演模型[16]。

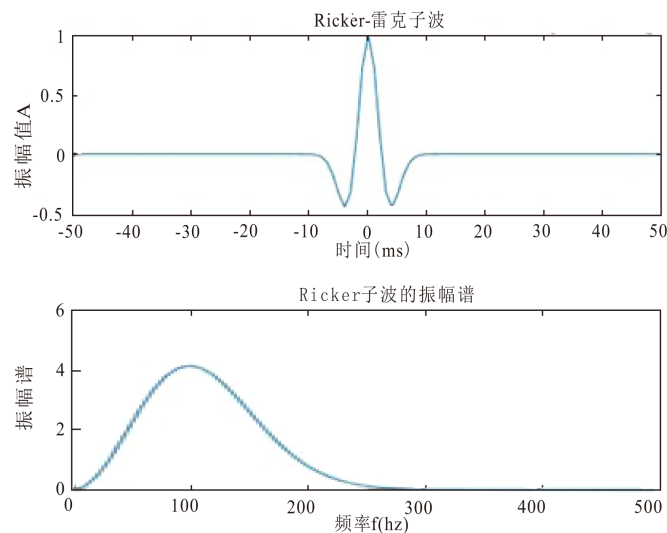


Figure 3. Ricker-incentive source
图 3. Ricker 激励源

2.3.3. 数值色散

时域有限差分法对麦克斯韦方程进行数值计算时，会引起色散，即速度将随频率改变而引起脉冲波形畸变等一些虚假现象。当离散间隔 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 满足以下条件能够减小这种色散[17]：

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{12}, \Delta y \leq \frac{\lambda}{12}, \Delta z \leq \frac{\lambda}{12}$$

λ 是介质中雷达波最下波长值，空间离散长度取满足上式的最小值。

2.3.4. 解的稳定性

FTDT 方法是以差分方程的解代替麦克斯韦旋度方程组的解。在时域有限差分法中空间步长($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)和时间步长 Δt 满足一定的关系条件，离散后的解是收敛且稳定的[18]。

$$\text{时间步长稳定性条件: } \Delta t = \frac{T}{\pi}$$

$$\text{二维空间时间步长与空间步长稳定性条件: } \Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}}$$

$$\text{三维空间时间步长与空间步长稳定性条件: } \Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}$$

2.3.5. 吸收边界条件

PML 吸收边界条件，是在模拟地下地质体时，由于地下实际为无限大空间电磁波会无限传波，但仿真的地下空间是有限的。当电磁波传播到界面时会发生波的反射，为了模拟无限大空间我们要将传播到界面的电磁波衰减掉。PML 边界能够大大的吸收电磁波且不发生反射[19]。

2.4. 二维地下管线正演模拟

地下管线探测中常沿着管线横向截面拖动天线进行探测，在对地下管线截面模拟中(图 4)，雷达正演

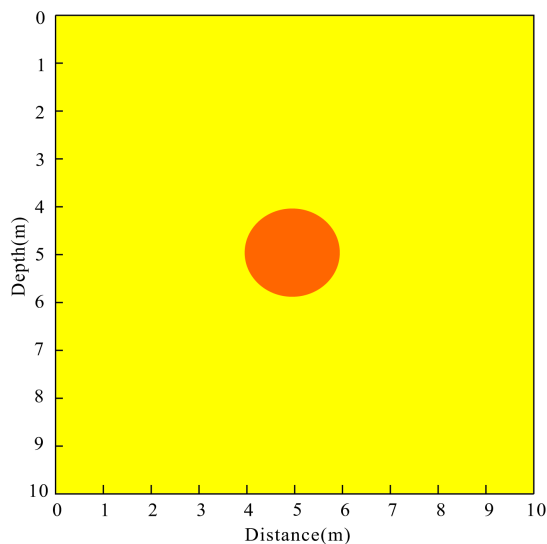


Figure 4. Forward model

图 4. 正演模型

模拟的天线中心频率为 100 MHz，周围土壤介质的介电常数为 9，待模拟的管线截面为混凝土材质假定介电常数为 5。管线半径为 1 m，坐标(5 m, 5 m)处。其合成的雷达剖面图如图 5 所示，图中可见圆在雷达正演模拟中呈双曲线，深度 4 m 处为弧形顶部，且为两层平行弧线。上层相位呈现蓝黄蓝，下层为黄蓝黄，这是由于电磁波从高介电常数介质进入低介电常数介质时反射系数为正，而从低介电常数介质到高介电常数中反射系数为负，相位发生反转所致[20]。电磁波在介质中传播的波场快照如图 6 所示，当电磁波在传播过程中遇到地下管线时，一部分电磁波发生波的反射，一部分透射过管线在管线下界面亦发生反射和透射。

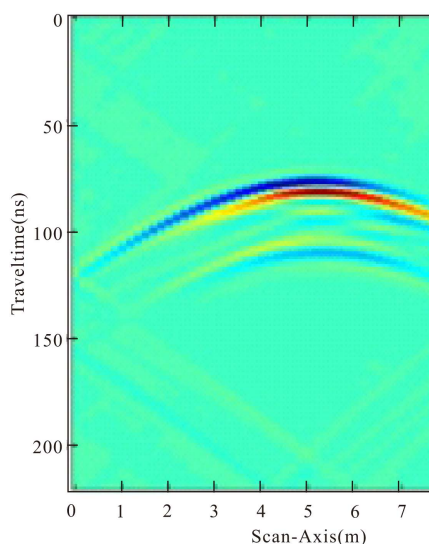


Figure 5. B-scan plot

图 5. B-scan 图

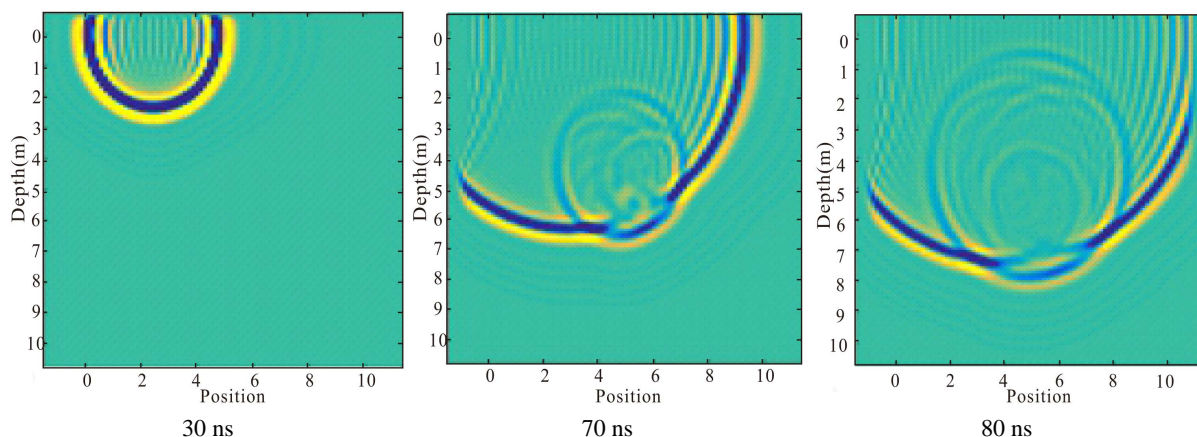


Figure 6. Wave field propagation snapshot

图 6. 波场传播快照

2.5. 多排管线模拟

图 7 为一排管线截面排布，模拟的天线频率为 100 MHz。周围土壤介质的介电常数为 9，模拟 3 个相同介电常数均为 5 的并排管线，管线半径为 1 m，管线埋深 5 m，管线间隔 6 m。合成的雷达剖面图如图 8 所示。从 B-scan 图中我们可以看出介电常数不变的并排管线反射波特征表现为相位一致，管线顶底界面的反射波时差为 40 ns，计算可得管线直径约为 2 m 与正演模型一致。

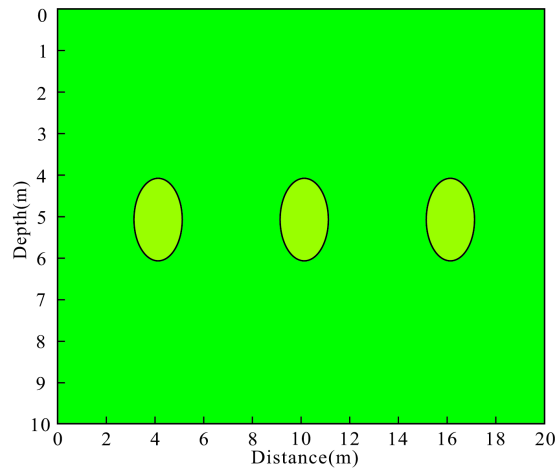


Figure 7. Forward model

图 7. 正演模型

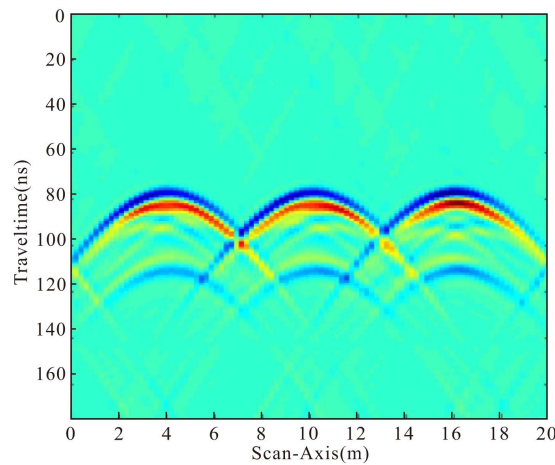


Figure 8. B-scan plot

图 8. B-scan 图

图 9 为一排管线截面排布，模拟的天线频率为 100 MHz。周围土壤介质的介电常数为 9，模拟 3 个并排管线介电常数依次为(5, 9, 20)，管线半径为 1 m，管线埋深 5 m，管线间隔 6 m。合成的雷达剖面图如图 10 所示。从图中我们可以看出随着反射系数绝对值依次增大，反射波越明显，管线下界面的反射波位置随着介电常数变大随之加深，这是因为电磁波在不同介质中的传播速度不同，介电常数越大传播速度越慢所致。

第一根管线模拟介电常数为 5 小于周围介质，电磁波由高介电介质传播到低介电介质相位不变；第二根管线介电常数与周围介质一致，无明显电磁波反射特征；第三根管线介电常数为 20 高于周围介质，由图 10 可以看出：反射波相位与第一根管线相位相反、发生反转。因此根据反射波相位特征判断地下存在不同材质的管线及分布。

图 11 为纵向排布的圆柱状管线截面，模拟的天线频率为 100 MHz。周围土壤介质的介电常数为 9，管线截面介质介电常数 5。管线半径为 1 m，其横坐标都在 10 m 处，纵坐标以此相隔 3 m 纵向排开。其合成的雷达剖面图如图 12 所示，从图中我们可以看出随着管线埋藏深度依次增大，反射波越弱。所以当地下埋藏多层管线时，由于上部管线会反射大部分的能量，透射后再反射能量越来越小，即其同相轴越来越模糊、开口角度越来越大。

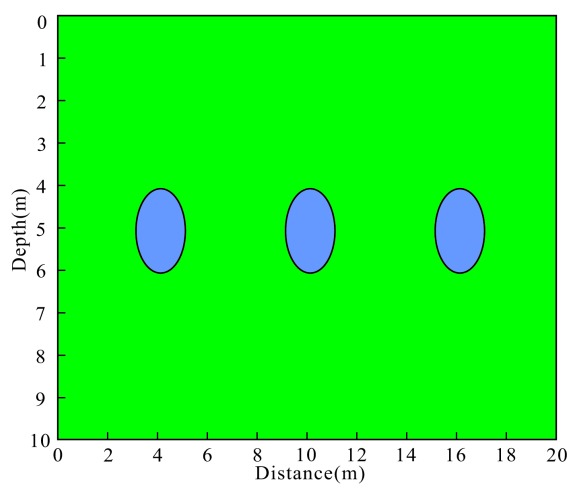


Figure 9. Forward model

图 9. 正演模型

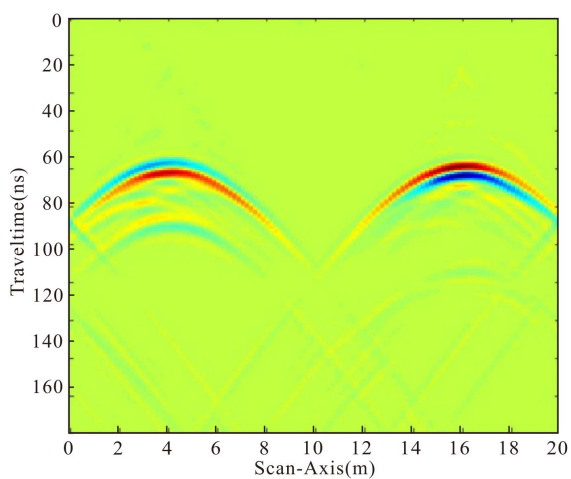


Figure 10. B-scan plot

图 10. B-scan 图

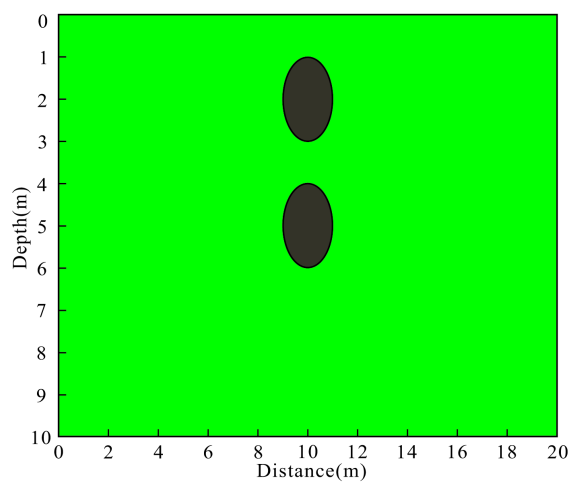


Figure 11. Forward model

图 11. 正演模型

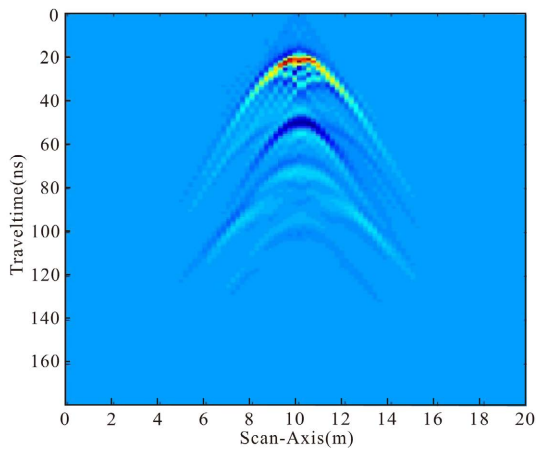


Figure 12. B-scan plot
图 12. B-scan 图

图 13 为纵向排布的圆柱状管线截面，模拟的天线频率为 100 MHz。周围土壤介质的介电常数为 9，

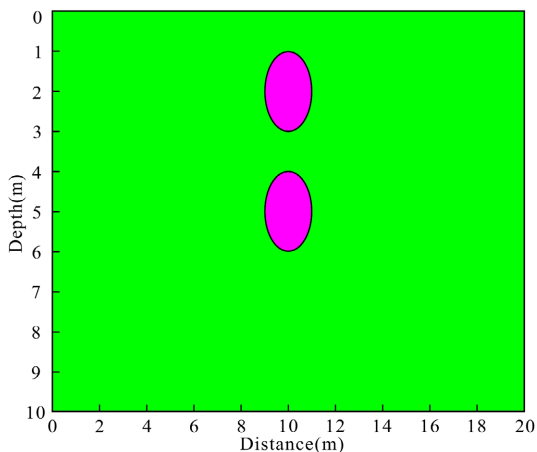


Figure 13. Forward model
图 13. 正演模型

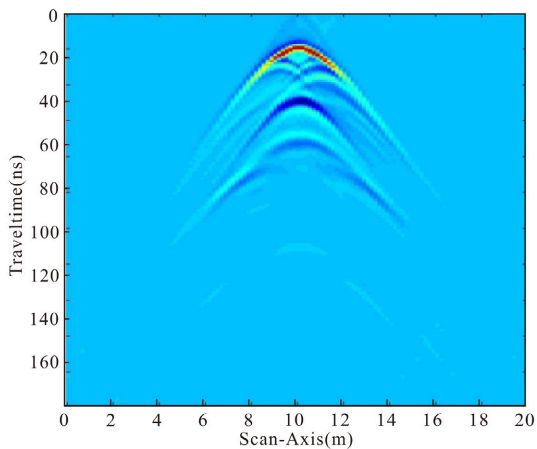


Figure 14. B-scan plot
图 14. B-scan 图

管线截面介质介电常数从上到下依次为(5, 20)。管线半径为 1 m，其横坐标都在 10 m 处，纵坐标以此相隔 3 m 纵向排开。其合成的雷达剖面图如图 14 所示，从图中我们可以看出随着管线埋藏深度依次增大，反射波越弱，即其同相轴越来越模糊、开口角度越来越大。上下管线反射波相位相反，所以也可以根据反射波相位特征判断地下存在不同材质的管线及分布。

3. 工程实例

以下通过对北京市朝阳区华能北京热电厂地下管线探测工程实例阐述探地雷达在地下深埋管线探测方面的应用。根据搜集、现场勘察的本场区地质资料可知所存在的难点问题在于，工区位于厂区内部的草坪之上对电磁波具有一定的吸收作用，外界电磁干扰严重主要干扰源有(高压输电线、无线电发射设备、交流电网、路灯杆以及各种电力设备等)，管线的埋藏深度大约在 3~5 m 左右。综合场地地质条件及表 1 中物性参数可见，场区内第四系粘土层、砂砾质粘土层与砂岩、花岗岩之间均存在较明显的电性差异。如果场区内存在有地下管线，由于水泥，金属物性参数与第四系地层之间存在着更为明显的差异，这为用反映电性差异的地质雷达法来探查地下管线提供了有利条件[21]。

Table 1. Physical parameters of some geotechnical media

表 1. 部分岩土介质的物性参数

序号	名称	介电常数	电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$
1	空气	1	-
2	水	81	10~30
3	粘土	3~15	$1\sim 2 \times 10^2$
4	砂质粘土	6~12	$1 \times 10^1\sim 1 \times 10^2$
5	砾石粘土	8~12	$2.2 \times 10^2\sim 7 \times 10^3$
6	混凝土	6.4	1.3×10^3

地质雷达测线布置主要在地下管线附近及道路共布设 16 条测线，在图 15 中用绿色标注线号。现场用皮尺依据标志物的位置对测线进行测量，并对物探测线控制点进行标注，测线尽量远离外界干扰源。如遇障碍物无法穿越测线位置时发生偏移的在原始记录表中做好记录并在图 15 平面布置图上进行说明。

地质雷达法是依据地下介质界面对电磁波的反射同相轴的连续性进行判断，数据利用美国的 Radan7 软件进行数据处理成图[22]。本次工作中所选工作参数为：天线主频：100 MHz (屏蔽天线)；时窗：140 ns、320 ns；采样点数：512；测量方式：距离模式；叠加次数：自动。

探地雷达法资料处理的目的是压制随机和规则的干扰波，提高信噪比与分辨率，在探测剖面上易于识别目标体。地质雷达法是依据地下介质界面对雷达波的反射同相轴的连续性进行判断，采用美国 Radan7 软件进行数据处理成图。其处理流程如下：数据编辑→距离归一化→调整地面时间零点→时间深度转换→增益调整→滤波→偏移→输出时间剖面图→根据速度分析进行时深转换。

图 16 为 100 MHz 天线探测数据中的一段(005 测线)，从黑框处可以很明显地发现在测线里程 2 m，埋深 4 m 处有雷达波同相轴出现与正演模型一致的弧形现象，此类反射信号为地下管线的雷达响应图像。而在里程 7 m，深 3 m 处的范围很广的弧形特征为一路灯杆的干扰特征[23] [24]。

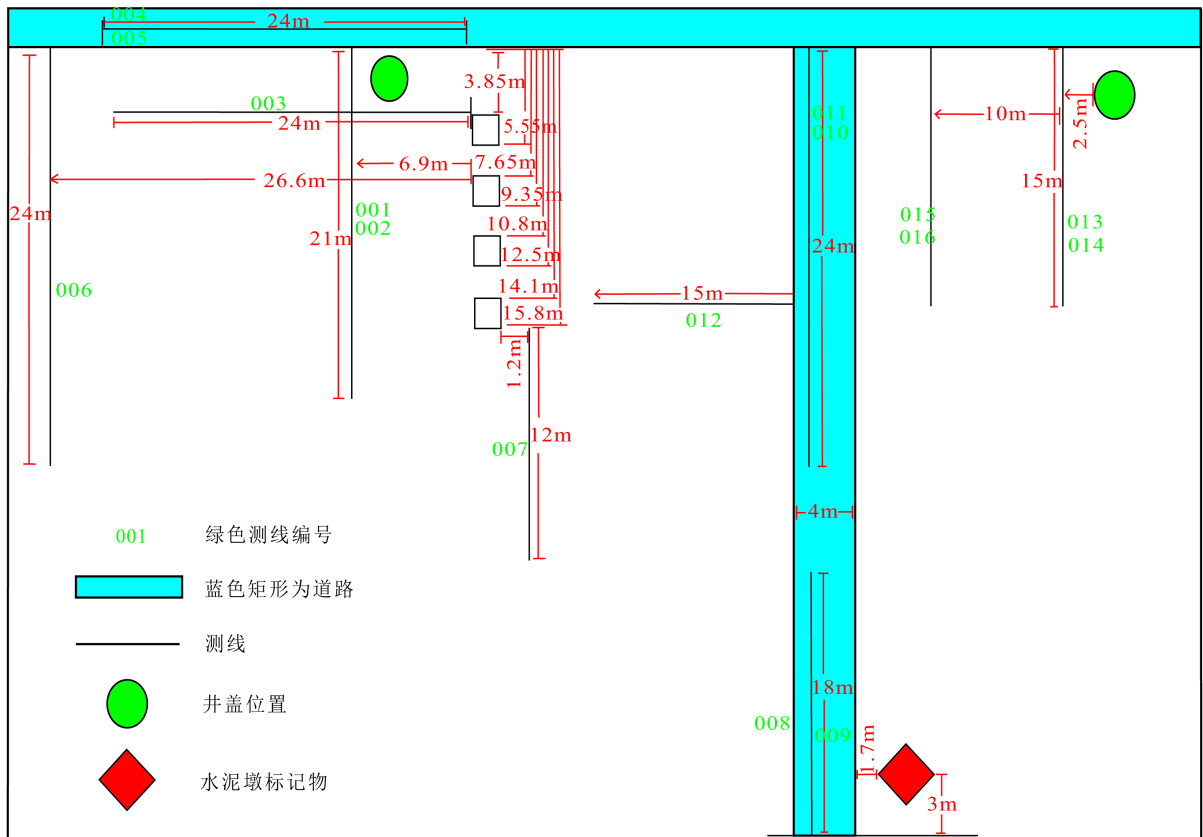


Figure 15. Line distribution
图 15. 测线分布图

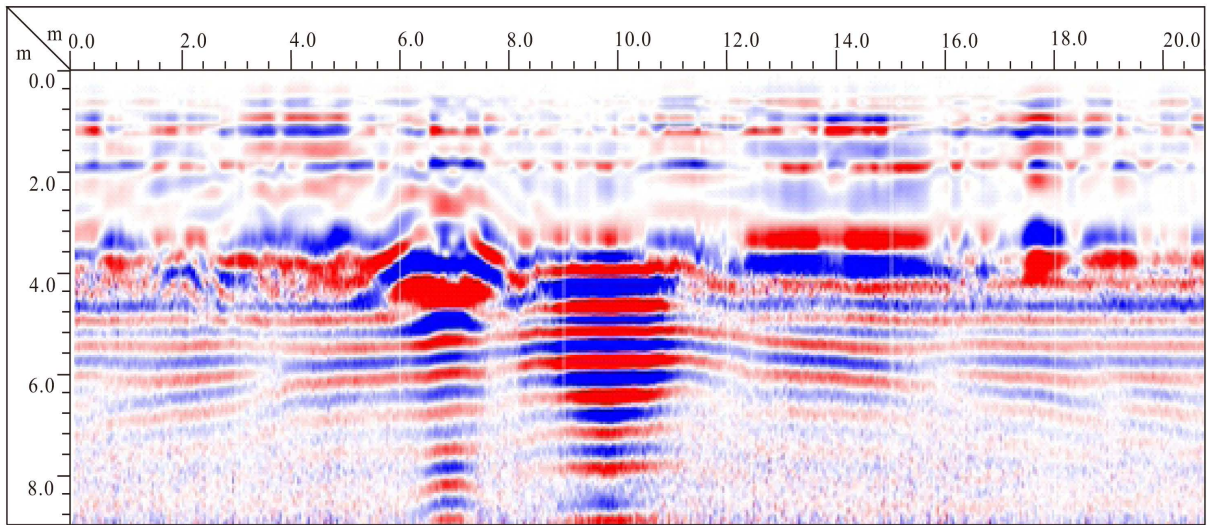


Figure 16. 100 MHz antenna profile
图 16. 100 MHz 天线剖面

通过对采集的雷达数据后处理再结合地质资料，获得探测区地下管线分布(图 17)，图中共探测了 4 条主管线，主要呈东西走向 L 型分布。东西向四条主要管线基本与东西向主路平行，其方向在西侧向北延伸。探测详细结果如图所示，本次探测在后期开挖中得到了很好的验证。

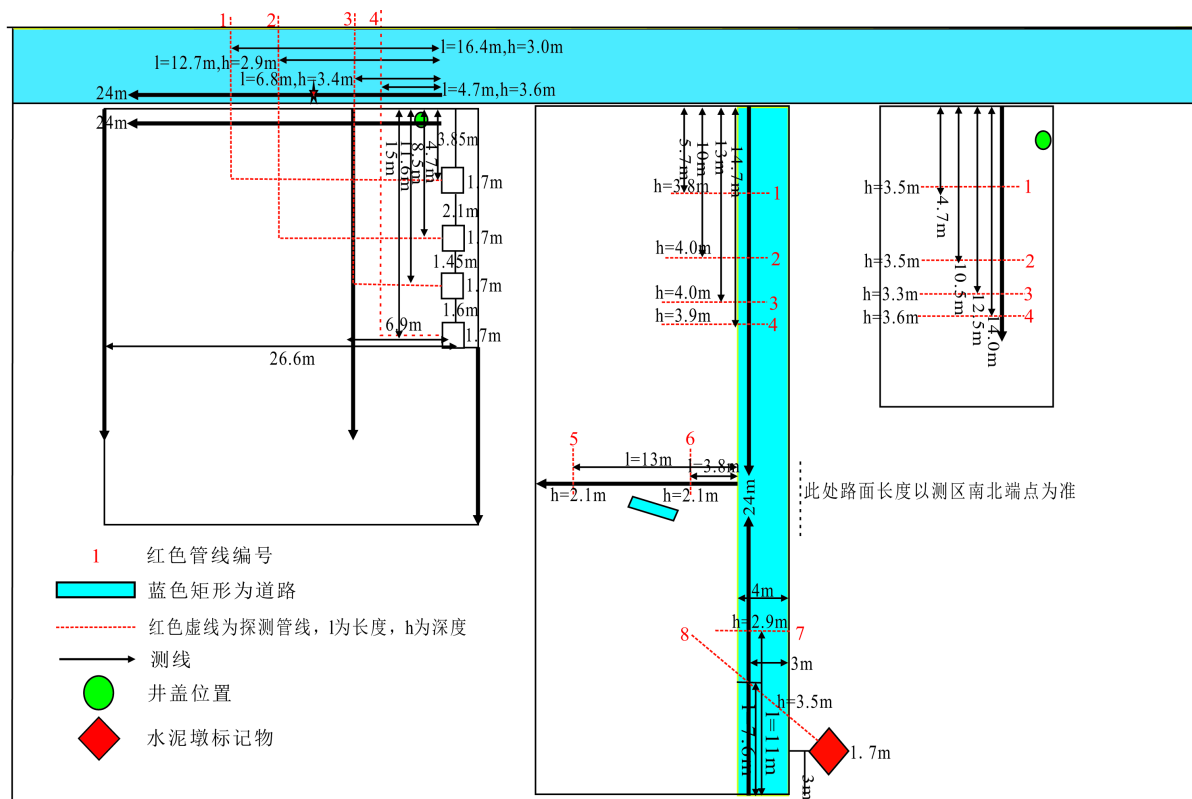


Figure 17. Detection result of Beijing Huaneng thermal power plant

图 17. 华能北京热电厂地下管线探测结果

4. 结论

通过数值模拟对电磁波反射信号特征识别与探地雷达在强干扰源背景下探测深部管线，得到如下结论：

- 1) 低频探地雷达探测深度大，能够探测到 4 m 埋深的管线，其效果优于管线探测仪；
- 2) 在存在外界强干扰的电厂区内，通过对地面上的电磁波屏蔽以及干扰波主频的滤除，能有效定位目标管线的位置；

3) 同一管线随着介电常数依次增大，反射波越明显，但下界面的反射波位置依次加深。这是由于电磁波在不同介质中的传播速度不同，介电常数越大传播速度越慢所致，通过反射波相位特征可判断管线材质；

4) 当地下埋藏多层管线时，由于上部管线会反射大部分的能量，透射后再反射能量越来越小，即其同相轴越来越模糊、开口角度越来越大。

基金项目

国家自然科学基金(41641040)；国家自然科学基金(41790443)。

参考文献

- [1] 代启林, 化得钧, 李娟, 杨国庆, 肖光莉. 探地雷达在含水地下管线探测中的研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(9): 94-98.
- [2] 陈立新, 苏钊, 卢建国, 张占地. 复杂条件下城市地下管线探测技术的应用[J]. 世界有色金属, 2016(22): 19-20.

- [3] 刘澜波, 钱荣毅. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2606-2617.
- [4] 姚显春, 闫茂, 吕高, 李宁. 地质雷达探测地下管线分类判别方法研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1740-1747.
- [5] 赵永辉, 吴健生, 万明浩. 探地雷达与管线探测仪的联合反演解释[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(1): 1-7.
- [6] 张劲松, 丛鑫, 杨伯钢, 王星杰, 刘英杰, 李新煜. 地下管线探测雷达图特征分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1244-1248.
- [7] 刘传奇, 李青, 闫子壮, 季伟伟, 王茂杰. 探地雷达对常见目标体的探测与识别[J]. 科技通报, 2019, 35(1): 66-70.
- [8] 姜卫方, 万明浩, 赵永辉, 王水强, 谭春. 地质雷达在滑坡面调查中的应用及效果分析[J]. 物探与化探, 2000, 24(3): 230-232+240.
- [9] 李嘉, 郭成超, 王复明, 张景伟. 探地雷达应用概述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 629-637.
- [10] 范昭平, 张丽华, 路勋. 探地雷达在多年冻土区公路工程勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2010, 38(3): 91-94.
- [11] 邓世坤. 探地雷达野外工作参数选择的基本原则[J]. 工程地球物理学报, 2005(5): 323-329.
- [12] 冯德山, 戴前伟, 何继善, 何刚. 探地雷达 GPR 正演模拟的时域有限差分实现(英文) [J]. 地球物理学进展, 2006(2): 630-636.
- [13] 尹光辉. 基于 GprMax 的道路空洞探地雷达图像正演模拟[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [14] 雷勤梅, 李颖. 地质雷达管线探测正演模拟研究[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(3): 402-414.
- [15] Yee, 李伟, 赵春晖, 徐娜. 基于 MATLAB 的时域有限差分法(FDTD)的研究[J]. 牡丹江大学学报, 2007, 16(7): 91-92.
- [16] 张海燕, 李庆忠. 几种常用解析子波的特性分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 651-657.
- [17] 陈明阳, 于荣金. PML 吸收边界的时域有限差分法的数值色散研究[J]. 光电子·激光, 2001, 12(2): 204-206.
- [18] 裴建新. 衰减介质中地质雷达数据正演模拟和叠前偏移方法研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [19] 秦臻, 宋建勇, 马晓宇, 宋雪娟. 基于二阶偏微分波动方程的 PML 吸收边界条件的方法[P]. 中国专利, CN201310606742.4, 2014-03-05.
- [20] 邓世坤, 王惠濂. 探地雷达图像的正演合成与偏移处理[J]. 地球物理学报, 1993, 36(4): 528-536.
- [21] 李勇. 地质雷达 SIR 在管线探测中的应用[C]//中国测绘学会科技信息网分会. 全国测绘科技信息网中南分网第二十八次学术信息交流会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2014: 5.
- [22] 梁栎文. 城市小区复杂地下管线探测试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2018.
- [23] 肖宏跃, 雷宛, 杨威. 地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 57-61.
- [24] 李思远. 针对地理管线探测的探地雷达正演模拟及成像对比研究[C]//2017 中国地球科学联合学术年会论文集(三十六)——专题 67: 煤炭资源与矿山地球物理、专题 68: 地球科学中的分形现象及理论、应用研究. 北京: 中国和平音像电子出版社, 2017: 20-22.