

基于探地雷达杂波抑制与偏移成像的树木根系定位方法

李光辉 徐 汇 刘 敏

(江南大学人工智能与计算机学院, 无锡 214122)

摘要: 探地雷达在果树和古树名木养护管理领域具有广阔的应用前景。针对探地雷达采集的 B-scan 图像中杂波影响根系定位精度的问题,提出了基于鲁棒深度自动编码器(RDAE)、直接最小二乘法(DLS)和频率-波数域偏移(FKM)相结合的树木根系定位方法。首先,通过 RDAE 将零点校正后的 B-scan 图像分解为表示杂波的低秩分量和表示根系目标回波的稀疏分量,保留稀疏分量完成杂波抑制;然后使用 DLS 拟合目标回波形成的双曲线估算土壤的相对介电常数;最后,根据土壤的相对介电常数计算得出偏移速度作为频率-波数域偏移的输入进行偏移成像,获取根系的半径和深度信息从而完成根系定位。实验结果表明:RDAE 方法在仿真和实测数据上的杂波抑制效果对比均值减法(MS)、奇异值分解(SVD)和鲁棒主成分分析(RPCA)有着更高的信杂比和改善因子,通过 DLS 估计的土壤相对介电常数均方根相对误差为 3.84%,根系定位的最大半径相对误差和最大深度相对误差分别为 8.5%、8.7%,能够完成根系位置标定,满足根系无损检测的需求,可为树木健康管理和移植提供决策支持。

关键词: 树木; 根系定位; 探地雷达; 偏移成像; 鲁棒深度自动编码器; 双曲线拟合

中图分类号: S126; TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0206-09 OSID: 

Tree-root Localization Method Based on Migration Imaging with Clutter Suppressed in Ground-penetrating Radar

LI Guanghui XU Hui LIU Min

(School of Artificial Intelligence and Computer Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Ground-penetrating radar (GPR) has vast application potential for the root system testing of fruit trees and ancient trees. The clutter in GPR B-scan image often obscures the tree roots, thus reduces the accuracy of tree-root localization algorithm. A tree-root localization method combining robust deep autoencoder (RDAE), direct least square (DLS) and frequency-wave number migration (FKM) was proposed. Firstly, after performing time-zero correction, a GPR B-scan image was decomposed into its low-rank and sparse components by RDAE. The low-rank component represented the clutter, and the sparse component represented the response of the tree roots. Secondly, the dielectric constant of soil was estimated by fitting the target echo's hyperbolic curve with the direct least square method. Finally, the migration velocity was calculated according to the dielectric constant of soil, and then the migration velocity was taken as the input of frequency-wave number migration to get the radius and depth information of the tree-root. Experimental results showed that compared with the common clutter suppressed methods, including mean subtraction (MS), singular value decomposition (SVD), and robust principal component analysis (RPCA), RDAE had a better visual effect and higher signal-to-clutter ratio and improvement factor on both numerical simulated data and real GPR data. The root-mean-square relative error (RMSRE) value of the estimated dielectric constant of soil was 3.84%. The maximum radius relative error and the maximum depth relative error were 8.5% and 8.7%, respectively. The proposed method can meet the practical requirements of the tree-root non-destructive testing and provide decision support for tree health management and transplantation.

Key words: tree; tree-root localization; ground-penetrating radar; migration imaging; robust deep autoencoder; hyperbolic fitting

收稿日期: 2021-03-11 修回日期: 2022-01-17

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)3087)和无锡市国际科技研发合作项目(CZE02H1706)

作者简介: 李光辉(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事物联网、边缘计算与无损检测研究,E-mail: ghli@jiangnan.edu.cn

0 引言

根系检测是树木健康状况评价的重要手段,在古树名木和果树养护管理等方面都能发挥重要作用。现有的根系检测方法大致分为破坏性检测和无损检测^[1] (Non-destructive testing, NDT) 两类。传统的破坏性检测方法包括根钻法、土芯法、土壤剖面法和全根挖掘法^[2-3] 等,这些方法劳动强度大且费时费力,不适合大规模应用,还可能对周围的根系造成不可逆转的破坏。而 X 射线断层扫描、核磁共振方法、声学方法和电阻率层析成像^[4-8] 等检测方法能够实现根系参数无损测量。探地雷达 (Ground-penetrating radar, GPR) 作为一种新兴的地球物理探测方法,已经被应用于树木根系和树干的无损检测^[9-12]。与其它无损检测方法相比,探地雷达具有易于操作,野外便携,可以扫描大型根系并且能够快速、经济地进行重复测量等优点^[13-15]。

探地雷达沿扫描路径向地下发射电磁波,通过接收到的反射回波来绘制扫描区域的地下高分辨率雷达图 (B - scan 图像)。但是,探地雷达 B - scan 图像通常会因为发射和接收天线之间的直接耦合、地表反射和非平坦地形的散射响应引起的杂波造成模糊^[16]。因此,探地雷达 B - scan 图像应用于任何地下物体检测算法之前,必须先进行杂波抑制。最简单常用的方法是均值减法 (Mean subtraction, MS),但是目标响应的强度会受到均值减法的影响而减小。子空间方法,如奇异值分解 (Singular value decomposition, SVD)、主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 和独立成分分析 (Independent component analysis, ICA),将 B - scan 图像视为几个子空间的并集,通过去除杂波子空间来减弱杂波^[17-20]。但是,子空间方法需要对杂波子空间进行精确测量和划分才能获得理想的杂波抑制效果。鲁棒主成分分析 (Robust principal component analysis, RPCA) 通过优化低秩和稀疏矩阵表示问题来分离杂波和目标响应,在真实数据上表现优于子空间方法^[21]。

通过偏移技术对杂波抑制后的 B - scan 图像进行聚焦以实现目标定位。探地雷达常用的偏移算法包括后向投影算法 (Back projection, BP)、克希霍夫 (Kirchhoff) 积分法、逆时偏移 (Reverse time migration, RTM)、频率 - 波数域偏移 (F - K 偏移)^[22-25] 等。F - K 偏移在频率 - 波速域中采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 进行求解,相对其他 3 种偏移方法,具有更高的计算效率,实际应用广泛。然而偏移成像聚焦效果与偏移速度密切

相关,对于点目标来说,当偏移速度与实际速度一致时,能量汇聚到同一绕射点上,偏移能够完全聚焦,如果偏移速度小于实际速度,偏移就不能完全聚焦,目标形成的双曲线不能完全消除,如果偏移速度大于实际速度,双曲线开口方向有反转的趋势。为有效利用 B - scan 图像定位树木根系,本文提出基于 RPCA 和深度自动编码器结合的杂波抑制方法,使用直接最小二乘法拟合目标回波双曲线估算介质相对介电常数求取偏移速度,最后通过改进插值的 F - K 偏移实现根系定位。

1 研究方法

1.1 鲁棒深度自动编码器

从数学上讲,观测到的探地雷达 B - scan 数据 X 可以由一个表示直达波等背景信号的低秩矩阵 L ,一个表示目标回波信号的稀疏矩阵 S 和一个随机噪声矩阵 N 联合表示^[26],即

$$X = L + S + N \tag{1}$$

鲁棒主成分分析利用凸优化求解式 (1)。

$$\begin{cases} \min_{L,S} (\|L\|_* + \lambda \|S\|_1) \\ \text{s. t. } \|X - L - S\|_F \leq \varepsilon \end{cases} \tag{2}$$

- 式中 $\|\cdot\|_*$ ——核范数
 $\|\cdot\|_1$ —— ℓ_1 范数
 $\|\cdot\|_F$ ——F 范数
 λ ——控制稀疏矩阵稀疏性的惩罚系数
 ε ——任意正数

核范数用于对矩阵的奇异值求和来获取低秩分量,RPCA 用迭代奇异值的线性方法来求解核范数, ℓ_1 范数用于计算矩阵元素的绝对值之和来获取稀疏分量。本文应用 RPCA 和深度自动编码器相结合的鲁棒深度自动编码器 (Robust deep autoencoder, RDAE) 来抑制探地雷达 B - scan 图像的杂波。典型的自动编码器是一个 3 层结构的神经网络。如图 1 所示,自动编码器由包含 n 个节点的输入层、 h 个节

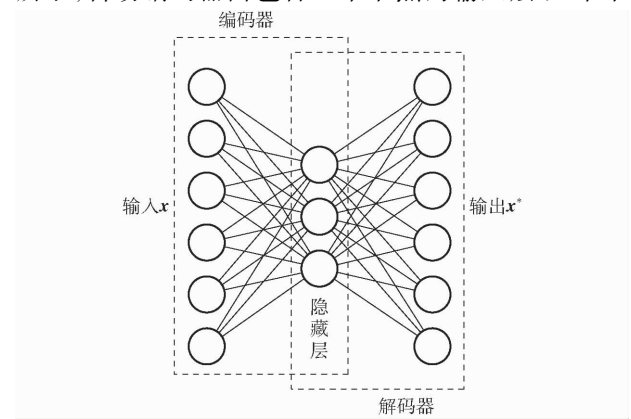


图 1 自动编码器结构图

Fig. 1 Architecture of autoencoder

点的隐藏层和 n 个节点的输出层组成。自动编码器的目标是最小化输入数据 $\mathbf{x}$ 与输出数据 $\mathbf{x}^*$ 之间的重构误差,因此可以将最小化重构误差作为自动编码器的损失函数,即

$$\min \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\|_2 = \min_{D,E} \|\mathbf{x} - D(E(\mathbf{x}))\|_2 \quad (3)$$

式中 $\|\cdot\|_2$ —— ℓ_2 范数
 $E(\cdot)$ ——编码器 $D(\cdot)$ ——解码器

具有多个隐藏层的自动编码器被称为深度自动编码器^[27],每增加一个隐藏层需要增加一对编码器和解码器,通过多个编码器和解码器,深度自动编码器可以有效地表示输入数据上的复杂分布。RDAE 获取稀疏分量的方式类似于 RPCA,采用 ℓ_1 范数,但是 RDAE 继承了深度自动编码器获取低秩分量的非线性能力,在不规则杂波条件下优于 RPCA, RDAE 将式(2)修改为优化问题

$$\begin{cases} \min_{L,S} (\|L - D(E(L))\|_2 + \lambda \|S\|_1) \\ \text{s. t. } \|X - L - S\|_F \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

RDAE 不是直接求解,而是采用交替方向乘子法 (Alternating direction method of multipliers, ADMM) 求解式(4)的增广拉格朗日函数。对于 $m \times n$ 的 B - scan 图像矩阵,初始化 $\lambda = 1/\sqrt{\max(m,n)}$ 求解得到低秩矩阵 L 和稀疏矩阵 S 。

1.2 直接最小二乘法

一般地,当探地雷达天线扫描经过树根上部土壤时,树根反射雷达脉冲形成的回波双曲线可以表示为

$$\frac{t^2}{t_0^2} - \frac{(x - x_0)^2}{\left(\frac{t_0 c}{2\sqrt{\varepsilon_r}}\right)^2} = 1 \quad (5)$$

式中 x ——天线位置
 t ——雷达波的双向传播时间
 c ——真空中光速
 ε_r ——土壤的相对介电常数
 (x_0, t_0) ——双曲线顶点坐标

在式(5)中,树根直径被忽略,这是可以接受

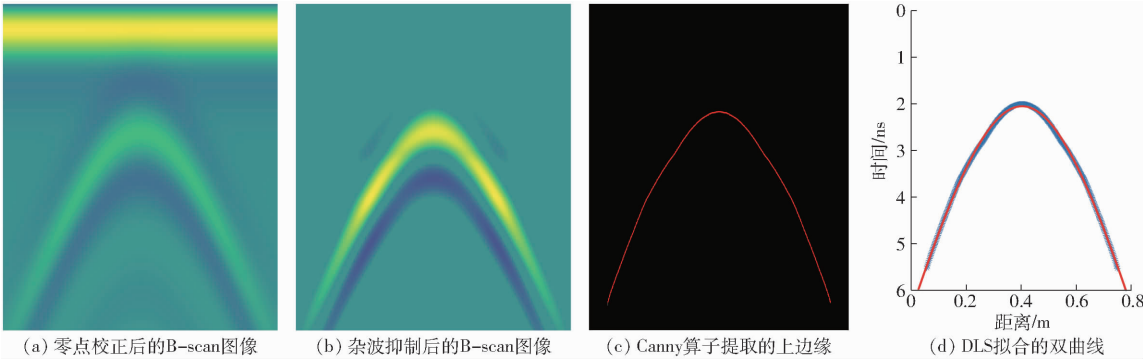


图 3 基于 DLS 算法拟合双曲线示例

Fig. 3 Examples of hyperbola fitting with DLS algorithm

的,因为本文中的树根直径比雷达波长小。土壤的相对介电常数采用直接最小二乘法 (Direct least square, DLS) 拟合双曲线计算^[28]。相较于霍夫变换 (Hough transform, HT), DLS 对不规则双曲线拟合效果更好。图 2 为执行 DLS 算法的流程图。为了说明该过程,给出了图 3 所示的 DLS 方法处理仿真 B - scan 图像的示例。图 3a、3b 为进行零点校正和杂波抑制后的 B - scan 图像,转为灰度图以获取联通区域,采用 Canny 算子提取的联通域边缘拟合图 3c 中标红的上边缘。在 DLS 循环的每次迭代中,从上边缘随机选取 10 个坐标点,记录每次求解的参数 $(x_0, t_0, \varepsilon_r)$,使用 DLS 拟合的双曲线见图 3d。本文已利用仿真数据对 DLS 的准确性进行了测试,该仿真涉及具有不同相对介电常数的均质土壤。在用 DLS 拟合双曲线的循环迭代过程中,当待拟合的点到双曲线的误差平方和 (Sum of the squared errors, SSE) 小于给定阈值时,终止迭代。

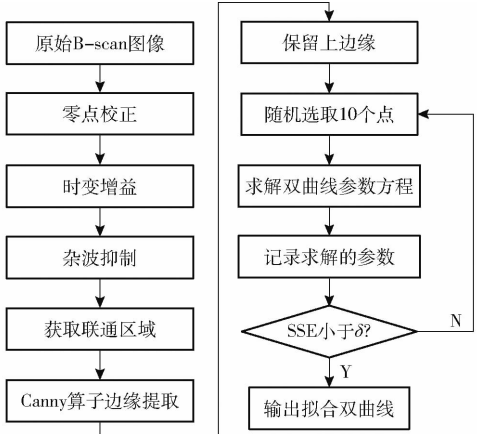


图 2 基于 DLS 的双曲线参数估计算法流程图
Fig. 2 Flow chart of DLS-based algorithm for hyperbola parameter estimation

1.3 F - K 偏移

根据惠更斯原理,如果电磁波的波前 (Wavefront) 在 t 时刻的位置是已知的,将 t 时刻波前上的每个点看作 $t + \Delta t$ 时刻波前的子波源,如图 4 所示, $t + \Delta t$ 时刻的波前可由 t 时刻波前叠加

重建。在探地雷达检测中,电磁波从空气传播进入地下界面,将地下界面的各个反射点看作子波源,对接收到的记录剖面作时间反演,即为探地雷达的偏移成像。

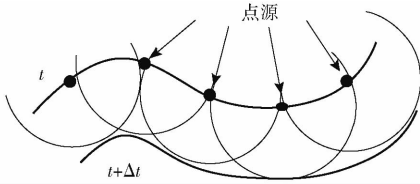


图 4 惠更斯原理图

Fig. 4 Schematic illustration of Huygens principle

设探地雷达 B-scan 记录剖面为 $p(x, z=0, t)$, z 是垂直坐标, 向下为正, $P(k_x, z=0, \omega)$ 是偏移后剖面 $p(x, z, t=0)$ 的二维傅里叶变换, 即

$$P(k_x, z=0, \omega) = \iint p(x, z=0, t) e^{-j(k_x x + \omega t)} dx dt \quad (6)$$

将式(6)在频率-波数域做波场外推, 深度 z 处的波场可以表示为

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, z=0, \omega) e^{jk_z z} \quad (7)$$

由于探地雷达记录电磁波的双程走时, 因此可以把波速视为介质中波速 v 的一半, 根据色散方程, k_x 、 k_z 和 ω 的关系可以表示为

$$\frac{\omega^2}{\left(\frac{v}{2}\right)^2} = k_x^2 + k_z^2 \quad (8)$$

设 $p(x, z, t)$ 是 $P(k_x, z, \omega)$ 关于 k_x 、 ω 的二维傅里叶逆变换, 代入色散方程式(8), 同时令 $t=0$ 可得偏移后的图像。

$$p(x, z, t=0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint P(k_x, z=0, \omega = \frac{v}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2}) \cdot \frac{v}{2 \sqrt{1 + k_x^2/k_z^2}} e^{jk_x x} e^{jk_z z} dk_x dk_z \quad (9)$$

为了提高偏移图像的分辨率, 在 F-K 偏移的实现上改进了时频插值方法^[29]。首先, 对杂波抑制后的 B-scan 数据在 t 方向进行零填充来提高频率域的分辨率, 使得 ω 到 k_z 域的插值误差减小, 然后在快速傅里叶逆变换前对 k_x 域中数据进行零填充以提高 x 方向上的空间采样率。改进后的 F-K 偏移流程如图 5 所示。

2 实验与结果分析

2.1 实验数据采集

实测数据采集使用美国 GSSI 公司的 SIR-3000 型探地雷达, 雷达天线包含 400、900 MHz 2 种频率, 如图 6 所示。实验数据分成实测数据和仿真

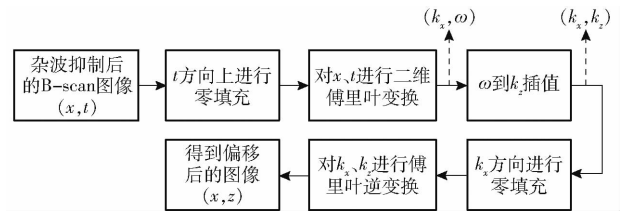


图 5 改进的 F-K 偏移流程图

Fig. 5 Flow chart of improved F-K migration

数据 2 组。实测场地位于江南大学西北操场沙坑, 选择人工填埋的香樟粗枝代替真实根系, 开展根系定位的模拟实验, 检测区域的土壤类型主要为细沙, 细沙材质均一, 易于模拟且相对介电常数与土壤较为接近, 实测实验期间未发生降雨, 细沙的含水率稳定。仿真数据使用基于时域有限差分 (FDTD) 方法求解麦克斯韦方程的开源软件 gprMax^[30] 获得, gprMax 允许 CPU 并行计算, 并且支持 GPU 加速运算。gprMax 中大多数命令是可选的, 但必须指定模型尺寸, 空间离散化步长和时窗大小。本文实验数据处理平台搭载 Intel Core(TM) i7-9700 处理器, 主频 3.0 GHz, 内存 16 GB, Nvidia GTX1660 显卡, 6GB 显存。开发环境为 Matlab 2019a、Python 3.8 和深度学习框架 Pytorch 1.5。



图 6 GSSI SIR-3000 型探地雷达

Fig. 6 GSSI SIR-3000 model ground-penetrating radar

2.2 杂波抑制

首先使用仿真模型对提出的方法进行测试, 仿真模型模拟了城市路面的分层结构, 如图 7 所示, 仿真的分层模型由 15 cm 厚的沥青层、15 cm 厚的水泥层和 50 cm 深的干燥黏土组成, 水泥层的粗糙上下

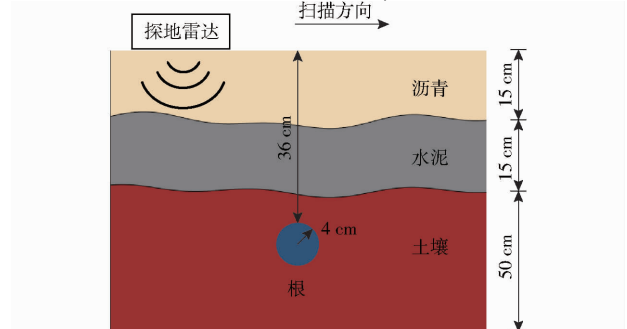


图 7 城市路面结构的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of urban road structure

表面高度在 3 cm 内变化,埋在土壤中的根系半径为 4 cm,探地雷达沿扫描方向进行探测,仿真基本参数见表 1。

表 1 仿真基本参数
Tab.1 Simulation parameters

参数	数值/类型	
模型尺寸/(m×m)	1.8×0.8	
空间离散步长 Δx、Δy、Δz/m	0.002	
时窗大小/ns	12	
脉冲波形	Ricker	
天线中心频率/MHz	400	
天线收发距离/m	0.004	
天线移动步长/m	0.01	
采样间隔/ns	4.717×10 ⁻³	
测线长度/m	1.8	
根系	相对介电常数 ε _r	24
	电导率 σ/(S·m ⁻¹)	0.001
干燥黏土	相对介电常数 ε _r	6
	电导率 σ/(S·m ⁻¹)	0.01
沥青	相对介电常数 ε _r	5
	电导率 σ/(S·m ⁻¹)	0.001
水泥	相对介电常数 ε _r	7
	电导率 σ/(S·m ⁻¹)	0.001

使用改善因子 (Improvement factor, IF) 定量分析杂波抑制前后图像信杂比 (Signal-to-clutter ratio,

SCR) 的改善程度,IF 值越大,杂波抑制方法性能越好。IF 定义为

$$F=10\lg\frac{S_{\text{after}}}{S_{\text{before}}}$$
 (10)

其中, F 为改善因子, S_{before} 和 S_{after} 分别是应用杂波抑制方法前后 B-scan 图像的信杂比,信杂比定义为

$$S=\frac{\frac{1}{N_s}\sum_{p\in R_s}|I(p)|^2}{\frac{1}{N_c}\sum_{p\in R_c}|I(p)|^2}$$
 (11)

式中 N_s ——目标信号区域 R_s 中的像素数
 N_c ——杂波区域 R_c 中的像素数
 $I(p)$ ——B-scan 图像第 p 个像素的信号强度

如图 8 所示,由于水泥层粗糙不平表面的影响,许多不均匀的杂波无法通过 MS 和 SVD 很好地与目标回波分离。RPCA 和 RDAE 通过低秩和稀疏矩阵分解,能更好地分离杂波并保留目标回波。RDAE 中深度自动编码器共包含 7 层,每层的节点数为 512、128、32、8、32、128、512,激活函数为 Sigmoid,以便深度自动编码器学习输入的非线性表示。表 2 给出了 4 种方法的 IF 值,去除 2 个最大主成分的 SVD 性能比 MS 略好,RPCA 和 RDAE 能更好地分离目标信号与杂波,但 RDAE 具有更高的 IF 值。

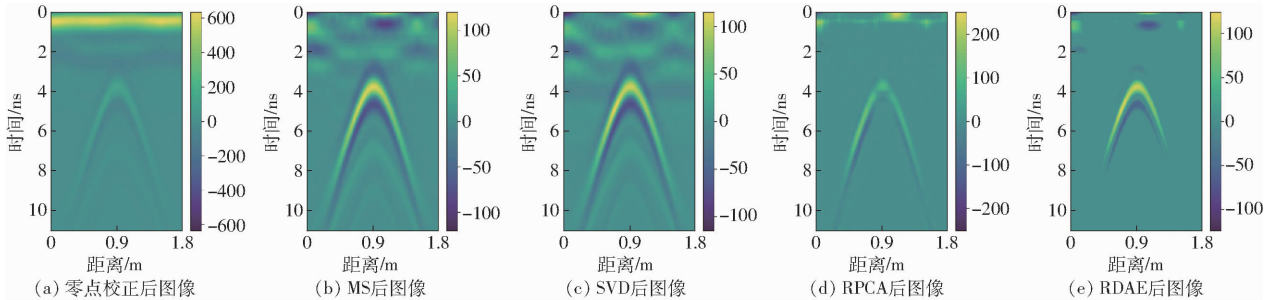


图 8 不同方法对仿真数据的杂波抑制结果

Fig.8 Clutter suppression results for simulated data with different methods

表 2 仿真和实测数据的 IF 结果

Tab.2 IF results of simulated and real data

方法	仿真数据	实测数据
MS	14.14	8.32
SVD	14.27	7.68
RPCA	17.78	10.75
RDAE	22.55	12.41

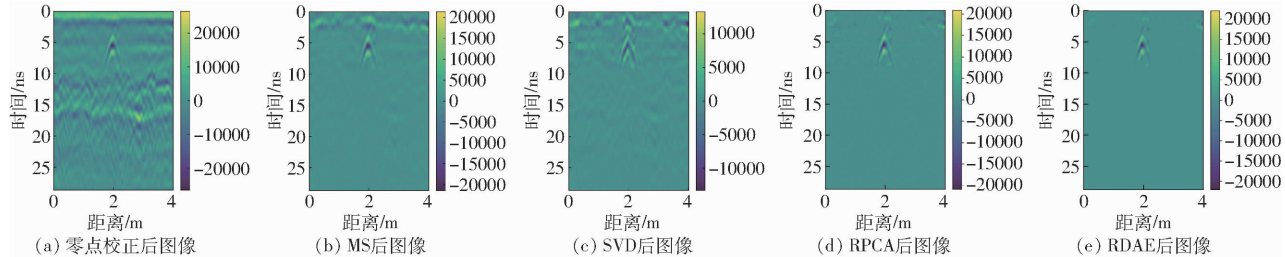


图 9 不同方法对真实数据的杂波抑制结果

Fig.9 Clutter suppression results for real data with different methods

回波信号出现在 10 ns 内,因此在杂波抑制前对原始数据进行时变增益,降低其在 10 ns 往后的信号强度。图 9b ~ 9e 分别为使用 MS、SVD、RPCA 和 RDAE 方法对图 9a 进行杂波抑制后的结果。由于不平整表面的影响,MS 和 SVD 呈现相似的结果,杂波抑制后的目标图像仍包含一些杂波部分,但去除了 2 个最大奇异值的 SVD 降低了目标信号的强度,IF 值低于 MS。RPCA 方法将目标与杂波分离良好,基于 RDAE 的杂波抑制方法可以更有效地从原始 B-scan 图像中提取目标响应,并且在 4 种杂波抑制方法中具有最清晰的背景、最高的 IF 值。

2.3 相对介电常数估计

为了评估使用直接最小二乘法估计介质相对介电常数的准确性,在 gprMax 中模拟了 12 种不同的均质土壤,相对介电常数从 2(干燥土壤)到 13(潮湿土壤)。通过计算均方根相对误差(Root-mean-square relative error, RMSRE)来评估准确性。

按照图 2 所示流程,土壤相对介电常数的估计结果如图 10 所示,拟合真实值和估计值得到拟合曲线为 $y = 0.965x - 0.018$,均方根相对误差为 3.84%,相对介电常数估计有较高的准确性。

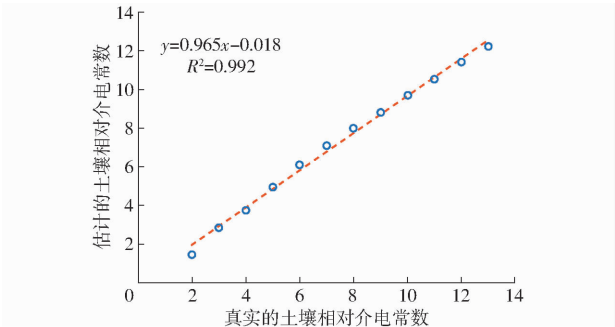


图 10 用 DLS 估算土壤相对介电常数的结果
Fig. 10 Results of soil relative permittivity estimation using DLS method

2.4 根系定位

首先模拟了均一介质的土壤验证本文所提出的 RDAE、DLS 和 FKM 相结合的根系定位方法。

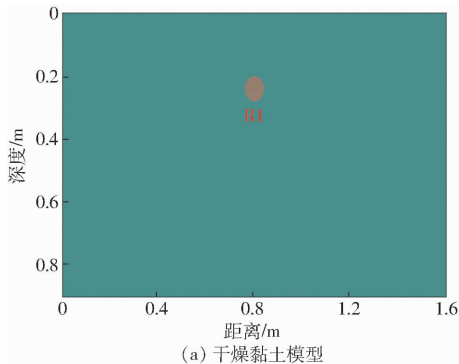


图 11a 为模型尺寸为 1.6 m × 0.9 m 的均匀干燥黏土,半径为 0.04 m 的根系埋在 0.2 m 深处,其余参数与 2.1 节中仿真模型一致。依次进行杂波抑制和土壤相对介电常数估计,真实土壤相对介电常数为 6,估计的土壤相对介电常数为 5.772,根据 $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 计算偏移速度为 0.124 m/ns,与真实速度 0.122 m/ns 的误差为 1.6%,图 11b 为偏移成像结果,点目标能很好地聚焦,位置信息与模型有极高的重合度。

对图 7 中的分层模型进行偏移成像,在使用 DLS 估计模型相对介电常数时,为方便计算将其视为均一介质计算模型的等效介电常数^[31],得到整个模型相对介电常数为 7.29,偏移速度为 0.111 m/ns,将其作为 F-K 偏移的输入,得到图 12a 所示偏移成像结果,图像中双曲线未完全消除,偏移速度小于实际速度,点状目标未能很好地聚焦。当速度增大为 0.117 m/ns 时,偏移成像如图 12b 所示,能很好地聚焦于一点。

图 13a 为 2.2 节中实测模型的实物图,将半径 0.052 m 的香樟树枝 R3 埋在 0.3 m 深的沙子中,对杂波抑制后的图像(图 9e)使用 DLS 估算出的沙子相对介电常数为 12.46,偏移速度为 0.085 m/ns,图 13b 为偏移成像结果。在相同的沙子介质中,依次放置 R4、R5、R6 这 3 个半径不同的香樟树枝于 0.15、0.25、0.35 m 深处,如图 13c 所示。图 13d 为杂波抑制后的偏移成像结果。

2.5 根系定位结果及分析

为了评价所提的方法定位根系的效果,对比偏移前后根系的位置和尺寸,通过二值化后的偏移图像选取点目标的边界值,如表 3 所示,其中边界值依次是偏移成像聚焦点的左边界、右边界、上边界和下边界。图 14 为根据表 3 绘制的偏移前后根系位置和大小对比图,根系偏移位置和半径都与真实值高度接近。通过计算圆心距离、半径相对误差和深度相对误差定量分析根系定位精度,圆心距离通过

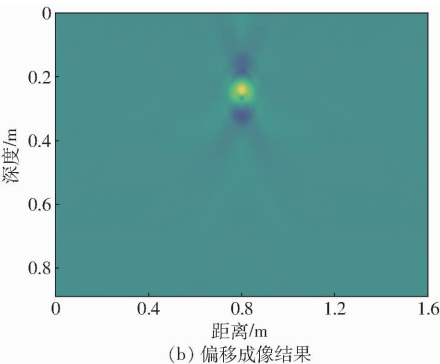


图 11 均质土壤单根偏移成像结果
Fig. 11 Migration imaging results of single tree-root in homogeneous soil

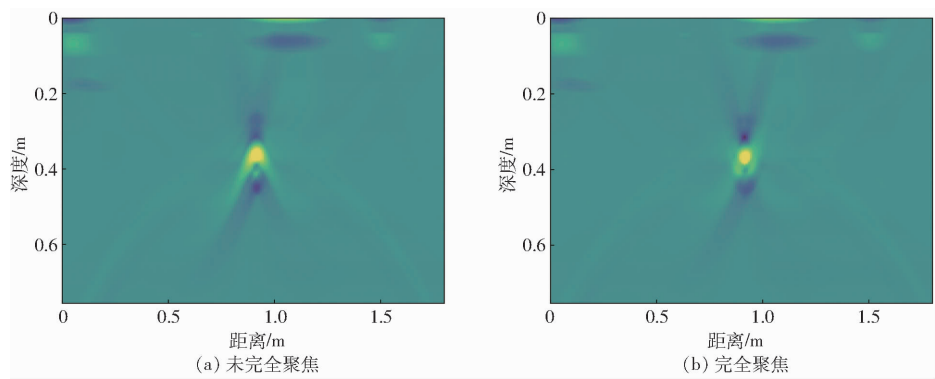


图 12 分层模型单根偏移成像结果

Fig. 12 Migration results of single tree-root in stratified model

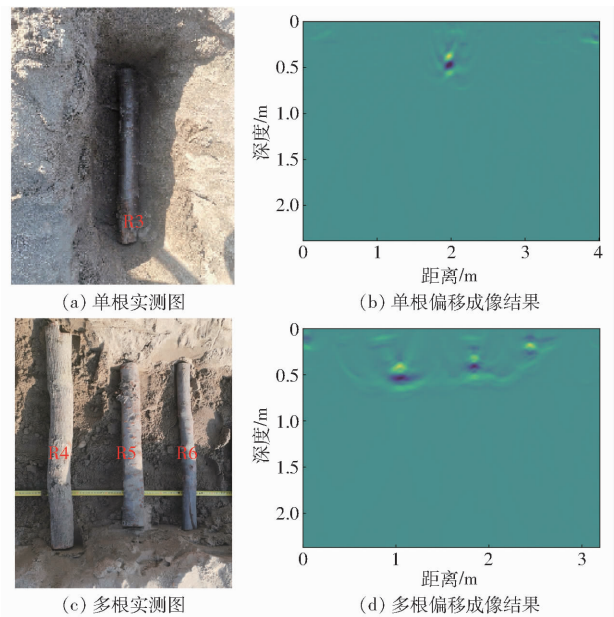


图 13 实测数据偏移成像结果

Fig. 13 Migration results of real data

$\sqrt{(x_{Ri} - \hat{x}_{Ri})^2 + (y_{Ri} - \hat{y}_{Ri})^2}$ 计算, (x_{Ri}, y_{Ri}) 为根系剖面圆心坐标, $(\hat{x}_{Ri}, \hat{y}_{Ri})$ 为偏移后点目标的圆心坐标。由偏移前后根系参数对比(表 4)可知,最大圆心距离为 3.5 cm,最大半径相对误差为 8.5%,最大深度误差为 8.7%,能够完成根系位置标定,满足城市环境中树木根系无损检测的要求。

本文利用探地雷达检测仪在检测区域内扫描根系,收集数据,相较于根钻法和全根挖掘法等传统破坏性检测方法,检测快速,劳动成本低并且不会对周围根系造成不可逆转的破坏。为了进一步说明本文方法的优势,以文中仿真城市路面结构的 B-scan 图像和根 R3 的实测 B-scan 图像为样本,针对杂波抑制、双曲线拟合及偏移成像 3 个步骤,分别对比了与 RPCA、HT 和 Kirchhoff 偏移的计算耗时。仿真的 B-scan 图像尺寸为 $3\,393 \times 180$,即由 180 个 A-scan 迹线组成,每个 A-scan 迹线包含 3 393 个采样点,实测的 B-scan 图像尺寸为 313×409 ,表 5 为仿真数据和实测数据在根系定位 3 个步骤与其它方法

表 3 偏移前后根系参数对比				
Tab. 3 Comparison of tree-root parameters before and after migration				
序号	参数	真实值	偏移值	m
R1	边界	0.76,0.84,0.20,0.28	0.751,0.837,0.194,0.271	
	半径	0.040	0.042	
	深度	0.200	0.194	
	圆心坐标	(0.80,0.24)	(0.793,0.235)	
R2	边界	0.86,0.94,0.36,0.44	0.853,0.939,0.341,0.427	
	半径	0.040	0.043	
	深度	0.360	0.341	
	圆心坐标	(0.90,0.40)	(0.896,0.383)	
R3	边界	1.948,2.052,0.300,0.404	1.922,2.030,0.307,0.399	
	半径	0.052	0.054	
	深度	0.300	0.307	
	圆心坐标	(2.000,0.352)	(1.976,0.353)	
R4	边界	0.923,1.077,0.350,0.504	0.951,1.111,0.337,0.485	
	半径	0.077	0.080	
	深度	0.350	0.337	
	圆心坐标	(1.000,0.427)	(1.031,0.411)	
R5	边界	1.753,1.847,0.250,0.344	1.768,1.867,0.268,0.353	
	半径	0.047	0.051	
	深度	0.250	0.268	
	圆心坐标	(1.800,0.297)	(1.818,0.31)	
R6	边界	2.364,2.436,0.150,0.222	2.371,2.449,0.137,0.208	
	半径	0.036	0.039	
	深度	0.150	0.137	
	圆心坐标	(2.400,0.186)	(2.410,0.173)	

的计算耗时对比,虽然 RDAE 对单个 B-scan 图像耗时大于 RPCA,但是 RDAE 方法具有更高的信杂比和 IF 值,并且可以使用预训练的深度自动编码器降低对多个 B-scan 图像的杂波抑制时间。DLS 和 F-K 偏移分别在双曲线拟合和偏移成像步骤中计算耗时低于 HT 和 Kirchhoff 偏移,总体来说,本文所提的方法在计算耗时上优于其它 3 种方法。

3 结论

(1)将探地雷达 B-scan 图像建模成表示杂波

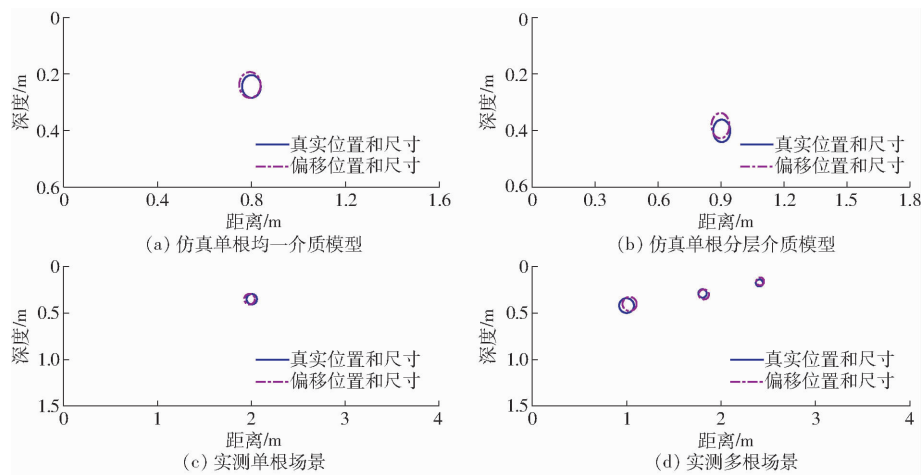


图 14 偏移前后根系位置和尺寸对比

Fig. 14 Comparison of tree-root position and size before and after migration

表 4 偏移前后根系参数对比

Tab.4 Comparison of tree-root parameters before and after migration

序号	圆心距离/cm	半径相对误差/%	深度相对误差/%
R1	0.9	5.0	3.0
R2	1.7	7.5	5.3
R3	2.4	3.8	2.3
R4	3.5	3.9	3.7
R5	2.2	8.5	7.2
R6	1.6	8.3	8.7

表 5 计算耗时对比

Tab.5 Comparison of computational time

数据类型	杂波抑制时间		双曲线拟合时间		偏移成像时间	
	RPCA	RDAE	HT	DLS	Kirchhoff	F-K
仿真数据	34.77	56.38	15.13	11.65	30.57	9.82
实测数据	9.01	27.06	14.72	11.41	6.93	2.14

的低秩矩阵和表示目标回波的稀疏矩阵,杂波抑制问题转换为低秩和稀疏矩阵分解问题。实验表明,本文提出的 RDAE 杂波抑制方法在仿真和实测数据的杂波抑制效果均优于 RPCA 等传统方法,杂波抑制后的图像拥有更清晰的背景和更高的 IF 值。

(2)DLS 拟合双曲线能更精确地估计土壤的相对介电常数,在数值模拟实验中估算的土壤相对介电常数的均方根相对误差为 3.84%,为 F-K 偏移提供了可靠的输入。

(3)对于根系定位问题,本文提出基于 RDAE 杂波抑制的 F-K 偏移根系定位方法,在仿真和实测数据上都有较高的定位精度,偏移位置与真实位置的最大圆心距离为 3.5 cm,最大半径相对误差和最大深度相对误差分别为 8.5%、8.7%,能够应对复杂的分层介质模型,满足实际应用中树木根系无损检测的需求。

参 考 文 献

[1] WAI-LOK LAI W, DÉROBERT X, ANNAN P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: a 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis[J]. NDT & E International, 2018, 96: 58 – 78.

[2] ESHEL A, BEECKMAN T. Plant roots; the hidden half[M]. Florida: CRC Press, 2013.

[3] SCHROTH G, SINCLAIR F L. Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods[M]. CABI,2003.

[4] TRACY S R, ROBERTS J A, BLACK C R, et al. The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(2): 311 – 313.

[5] 姚建峰,赵燕东,张会儒,等. 树木微钻仪钻针阻力表达方法研究[J]. 农业机械学报,2021,52(8):271 – 277, 286. YAO Jianfeng, ZHAO Yandong, ZHANG Huiru, et al. Drill resistance expression method of tree micro drill instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8):271 – 277,286. (in Chinese)

[6] 张建锋,吴迪,龚向阳,等. 基于核磁共振成像技术的作物根系无损检测[J]. 农业工程学报,2012,28(8):181 – 185. ZHANG Jianfeng, WU Di, GONG Xiangyang, et al. Non-destructive detection of plant roots based on magnetic resonance imaging technology[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(8):181 – 185. (in Chinese)

[7] PAGLIS M C. Application of electrical resistivity tomography for detecting root biomass in coffee trees[J]. International Journal of Geophysics, 2013, 2013:1 – 6.

[8] AMATO M, BASSO B, CELANO G, et al. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging[J]. Tree Physiology, 2008, 28(8):1441 – 1448.

[9] CUI X, GUO L, CHEN J, et al. Estimating tree-root biomass in different depths using ground-penetrating radar: evidence from

- a controlled experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(6):3410–3423.
- [10] 文剑,李伟林,肖中亮,等.活立木内部缺陷雷达波检测研究[J].农业机械学报,2017,48(10):180–188.
WEN Jian, LI Weilin, XIAO Zhongliang, et al. Radar wave detection of standing trees internal defect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):180–188. (in Chinese)
- [11] 刘秀位,谷慧杰,韩洁,等.基于探地雷达和电容法的作物根系原位无损测量技术研究进展[J].农业工程学报,2020,36(20):226–237.
LIU Xiuwei, GU Huijie, HAN Jie, et al. Research progress of ground penetrating radar and electrical capacitance for in-situ non-destructive measurement of crop roots[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20):226–237. (in Chinese)
- [12] 王明凯,李文彬,文剑.基于探地雷达对粗根的识别技术研究[J].森林工程,2020,36(3):21–27.
WANG Mingkai, LI Wenbin, WEN Jian. Study on recognition technology of coarse roots using ground-penetrating radar[J]. Forest Engineering, 2020, 36(3):21–27. (in Chinese)
- [13] GUO L, CHEN J, CUI X, et al. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review [J]. Plant and Soil, 2013, 362(1):1–23.
- [14] 崔喜红,陈晋,沈金松,等.基于探地雷达的树木根径估算模型及根生物量估算新方法[J].中国科学:地球科学,2011,41(2):243–252.
CUI Xihong, CHEN Jin, SHEN Jinsong, et al. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(2):243–252. (in Chinese)
- [15] 李子敬,陈晓,舒健骅,等.树木根系分布与结构研究方法综述[J].世界林业研究,2015,28(3):13–18.
LI Zijing, CHEN Xiao, SHU Jianhua, et al. Research methods for tree root system distribution and structure: a review[J]. World Forestry Research, 2015, 28(3):13–18. (in Chinese)
- [16] DANIELS D J. Ground penetrating radar[M]. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, 2004.
- [17] 郑晨,席晓莉,宋忠国,等.基于子空间技术中奇异向量分析的穿墙雷达杂波抑制方法[J].电子学报,2019,47(4):848–854.
ZHENG Chen, XI Xiaoli, SONG Zhongguo, et al. A singular vector stationarity method for clutter mitigation in through-the-wall radar based on subspace method[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(4):848–854. (in Chinese)
- [18] ABUJARAD F, NADIM G, OMAR A. Clutter reduction and detection of landmine objects in ground penetrating radar data using singular value decomposition (SVD) [C] // International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. IEEE, 2005.
- [19] CHEN G, FU L, CHEN K, et al. Adaptive ground clutter reduction in ground-penetrating radar data based on principal component analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2019, 57(6):3271–3282.
- [20] KUMLU D, ERER I, KAPLAN N H. Low complexity clutter removal in GPR images via lattice filters[J]. Digital Signal Processing, 2020, 101:102724.
- [21] YOON Y S, KIM D, YOON J, et al. Iterative robust PCA method to detect landmines in Ground Penetrating Radar[C] // 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf19). IEEE, 2019.
- [22] 雷文太,曾胜,赵健,等.探地雷达对两层介质中目标的快速后向投影成像方法[J].电子与信息学报,2012,34(5):1045–1050.
LEI Wentai, ZENG Sheng, ZHAO Jian, et al. Ground penetrating radar fast back projection imaging technique of targets located in two layered medium [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(5):1045–1050. (in Chinese)
- [23] JOHN H B. Reverse-time prestack depth migration of GPR data from topography for amplitude reconstruction in complex environments[J]. Journal of Earth Science, 2015, 26(6):791–798.
- [24] 王敏玲,梁值欢,王洪华,等.探地雷达逆时偏移成像方法研究现状及进展[J].地球物理学进展,2019,34(5):387–396.
WANG Mingling, LIANG Zhihuan, WANG Honghua, et al. Review of reverse time migration in ground penetrating radar[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5):387–396. (in Chinese)
- [25] XU X, MILLER E L, RAPPAPORT C M. Minimum entropy regularization in frequency-wavenumber migration to localize subsurface objects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8):1804–1812.
- [26] NI Z K, YE S, SHI C, et al. Clutter suppression in GPR B-scan images using robust autoencoder[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 99:1–5.
- [27] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553):436–444.
- [28] O'LEARY P, ZSOMBOR-MURRAY P. Direct and specific least-square fitting of hyperbolas and ellipses [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(3):492–503.
- [29] YANG Z, YANGX, WANG B, et al. Improved F-K migration based on interpolation method for GPR imaging[C] // 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2019.
- [30] WARREN C, GIANOPOULOS A, GIANNAKIS I. gprMax: open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar[J]. Computer Physics Communications, 2016, 209:163–170.
- [31] 肖敏,陈昌彦,苏兆锋,等.地下多层介质土体等效介电常数的计算方法[J].物探与化探,2013,37(2):368–372.
XIAO Min, CHEN Changyan, SU Zhaofeng, et al. The calculation method of equivalent dielectric constant of multi-layer underground media[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2):368–372. (in Chinese)