

基于 SDR 的探测雷达反演树干分层介电参数仿真

周海洋^{1,2,3}, 马和龙^{1,2}, 夏鹏凯^{1,2}, 孙卿峰^{1,2}, 林剑辉^{1,2,3}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 林业装备与自动化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083;
3. 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为有效检测树干分层介质厚度和相对介电常数, 该研究提出一种基于雷达探测的树干分层结构介电参数反演方法。基于斯涅耳定律结合树干生理结构特点, 构建雷达信号在树干分层结构中的传播模型。利用软件定义无线电平台 (software defined radio, SDR) 搭建树干探测雷达。然后采用稀疏分解算法、K-SVD 字典训练以及层剥离算法对探测雷达回波信号进行参数反演, 并对不同的稀疏分解算法反演结果进行了对比。试验表明在回波混叠和无混叠的情况下, 该方法均能够对树干分层介质厚度和相对介电常数进行估算; 无混叠时相对介电常数和厚度的反演误差分别在 2.93% 和 3.5% 以内, 混叠时相对介电常数和厚度的反演误差分别在 7.52% 和 7.61% 以内。综合试验结果表明, 在 5 种反演算法中, SAMP 算法在未知信号稀疏度的条件下表现最佳, 具有较高的反演准确率和鲁棒性。

关键词: 雷达; 反演; 树干检测; 软件无线电 (SDR); 分层结构; 介电参数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405101

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0165-09

周海洋, 马和龙, 夏鹏凯, 等. 基于 SDR 的探测雷达反演树干分层介电参数仿真[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 165-173. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405101 <http://www.tcsae.org>

ZHOU Haiyang, MA Helong, XIA Pengkai, et al. Inversing the dielectric parameters of trunk layers by SDR-based detection radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 165-173. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405101 <http://www.tcsae.org>

0 引言

树干有较厚的树皮和潜在储水能力, 含水量作为评估树干生理健康的重要指标, 获取该信息对农林业具有指导意义。多年生木本植物在生长过程中出现心材、边材、树皮等分层结构特征^[1]。树干径向的不同分层结构之间水分含量差异明显, 各分层的介电参数也不尽相同, 通过分析分层的介电参数, 可以有效地获取树干的分层结构特征。获取树干分层介电参数在指导农林生产和植物生理研究方面具有良好的应用前景。

由于环境政策和树木保护等条件的限制, 在实际中不能对树木进行破坏性试验, 因此无损检测方法在树木检测中占有重要地位。目前常用的无损检测方法主要有应力波^[2]、阻抗分析仪^[3]、CT 扫描^[4]、超声波^[5]和探地雷达 (ground-penetrating radar, GPR)^[6]等。应力波法检测效率低下; 阻抗分析仪测量结果容易受到环境影响, 测量范围有限; CT 扫描法涉及到的 X 射线扫描和核磁共振技术成本较高, 存在便携性差及放射源辐射等问题; 超声波法易受外界干扰、耦合, 存在信号发散等问题。相比上述几种方法, 探地雷达作为地质勘探领域广泛应用的无损检测方法, 除了应用于土木工程、交通工程、水文地质等方面外, 近年来也受到林业专家的广泛关注。

传统探地雷达具有设备成本高、携带不方便等缺点。针对上述缺点, 该研究利用软件定义无线电 (software definition radio, SDR) 设备进行探测雷达的开发。SDR 是一种无线电广播通信技术, 具有很强的灵活性和开放性, 利用 GNU Radio Companion (GRC) 软件可重新配置无线电系统^[7]。PONGCOL 等利用 Ettus USRP B210 软件无线电设备搭建双连续波雷达系统, 对反射信号进行实时处理、显示和分析, 实现地下掩埋物体的探测^[8]。ABID 等采用 SDR 技术搭建了调频连续波 (frequency modulated continuous wave, FMCW) 雷达, 将其用于检测和定位地下物体, 以获取物体的掩埋深度^[9]。SDR 可以在软件中进行无线电模块的组装调试, 利用该技术开发的雷达设备成本将显著降低。

本研究提出一种树干分层介电参数反演方法, 并借助软件无线电设备 LimeSDR (lime microsystems, england) 搭建探测雷达, 实现对树干分层结构的探测。使用稀疏分解算法、K-SVD 字典训练以及层剥离算法对探测雷达回波信号进行分层介电参数的反演。

1 雷达探测原理及设计

1.1 分层介质结构探测原理

探测雷达向探测空间发出电磁波以此探测目标信息, 发射出的电磁波在层状结构的传播过程中经过不同介质的交界面发生反射和折射, 并且此过程中的入射波、反射波以及折射波的传播方向遵循反射定律和折射定律^[10]。

根据斯涅耳定律, 可以计算电磁波在第 n 层与第

收稿日期: 2024-05-15 修订日期: 2024-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31901238)

作者简介: 周海洋, 博士, 讲师, 研究方向为植物生理信息检测。

Email: zhouhy@bjfu.edu.cn

$n+1$ 层界面间的反射系数 $R_{n,n+1}$ 、折射系数 $Z_{n,n+1}$ 和双向透射系数 $\rho_{n,n+1}$ 分别为^[11]

$$R_{n,n+1} = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}} \quad (1)$$

$$Z_{n,n+1} = \frac{2k_n}{k_n + k_{n+1}} \quad (2)$$

$$\rho_{n,n+1} = 1 - R_{n,n+1}^2 \quad (3)$$

式中, k_n 、 k_{n+1} 分别为电磁波在第 n 层与第 $n+1$ 层介质中的传播常数。

应用高频电磁波 (900 MHz~2.5 GHz) 探测雷达进行目标探测时角频率 ω 远大于电导率 σ , 而且一般的探测材料都属于非磁性材料, 即相对磁导率 $\mu \approx 1$, 于是, 式 (1) 和式 (2) 可简化为:

$$R_{n,n+1} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_n} - \sqrt{\varepsilon_{n+1}})}{(\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}})} \quad (4)$$

$$Z_{n,n+1} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{(\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}})} \quad (5)$$

式中 ε_n 、 ε_{n+1} 分别为第 n 层与第 $n+1$ 层介质的相对介电常数。

根据式 (4) 求得第 n 层介质的相对介电常数 ε_n , 由于电磁波在分层结构中是双向传播, 可得传播时间 τ_n , 对式 (6) 进行变形可求得介质厚度:

$$\tau_n = \frac{2d_n \sqrt{\varepsilon_n}}{c} \quad (6)$$

$$d_n = \frac{c\tau_n}{2\sqrt{\varepsilon_n}} \quad (7)$$

式中 d_n 为第 n 层的介质厚度, m; ε_n 为第 n 层的相对介电常数, 1; c 为真空中的光速, m/s。

电磁波在层状体系中的传播特性由发射波、结构层数目、各分层介质的介电常数和厚度决定, 当已知这些参数时可以求出反射回波的形状、幅度和时延等信息。因此, 当探测雷达发射波和层状介质模型先验时, 就可以建立电磁波在分层介质中的全反射模型。树干分层结构如图 1 所示。

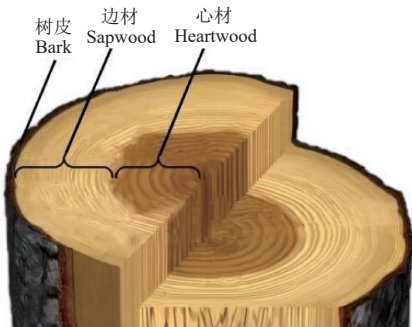
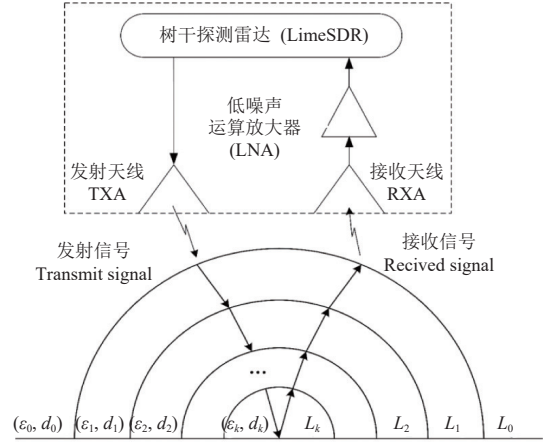


图 1 树干径向分层结构

Fig.1 Radially layered structure of trunk

本研究结合斯涅耳定律及树干分层结构特征, 构建雷达信号在树干分层结构的传播模型, 如图 2 所示。



注: L_0 表示空气层; L_1 表示第一层介质; L_2 表示第二层介质; L_k 表示第 k 层介质; ε_0 表示空气层介电常数, 1; ε_1 表示第一层介质介电常数, 1; ε_2 表示第二层介质介电常数, 1; ε_k 表示第 k 层介质介电常数, 1; d_0 表示空气层厚度, m; d_1 表示第一层介质厚度, m; d_2 表示第二层介质厚度, m; d_k 表示第 k 层介质厚度, m。

Note: L_0 is representative the air layer; L_1 is representative the first layer of medium; L_2 is representative the second layer of medium; L_k is representative the k -th layer of medium; ε_0 is representative the dielectric constant of the air layer; ε_1 is representative the dielectric constant of the first layer of medium; ε_2 is representative the dielectric constant of the second layer of medium; ε_k is representative the dielectric constant of the k -th layer of medium; d_0 is representative the thickness of the first layer of medium; d_1 is representative the thickness of the second layer of medium; d_k is representative the thickness of the k -th layer medium, m.

图 2 探测雷达信号在树干分层结构的传播模型

Fig.2 Propagation model of detection radar signals in the trunk layered structure

由于每一层的介质损耗, 可以忽略不同界面之间的多次反射, 定义广义反射系数 $\tilde{R}_{n,n+1}$ 为接收到的每层分界面的反射波振幅与发射波的比值, 由于第一层上方为空气介质, 因此有 $\tilde{R}_{0,1} = R_{0,1}$ ^[12]。推导 n 层的广义反射系数, 计算如下:

$$\tilde{R}_{n,n+1} = R_{n,n+1} \prod_{m=1}^n \rho_{m-1,m} e^{-2k_m d_m} \quad (8)$$

式中, k_m 为第 m 层的传播常数, 也即波数; d_m 为第 m 层的介质厚度。

上述方法采用了简化的修正计算方式, 在实测中会受探测环境影响而引起误差, 如当介质材料的电导率 σ 到一定程度的时候, 简化式会存在一定的误差, 且误差会随着层数的增大而增大。由于本研究是针对树干进行测量, 树干材料的电导率 σ 不超过 0.002 S/m, 层数最多为 3 层, 误差可控制在一定范围内, 测量得出的结果相对精确。

1.2 探测雷达设计

1.2.1 系统设计

近年来调频连续波雷达在探测雷达研究有着广泛的应用, 本文探索软件无线电平台实现调频连续波探测雷达的潜力, 调频连续波探测雷达的探测原理图如图 3 所示。

SDR 实现的调频连续波探测雷达包括软件部分和硬件部分; 软件部分包括在 PC 上运行的开源信号处理软件 GRC; 硬件部分包括 LimeSDR 设备、发射天线 (TXA) (YSUN, China)、接收天线 (RXA) (YSUN,

China)、低噪声运算放大器 (LNA) (QM, China), Lime-SDR 通过 USB3.0 与 PC(Hasee, China) 相连。

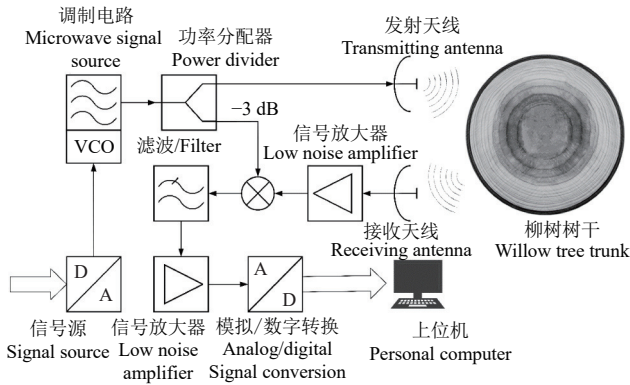


图 3 调频连续波探测雷达的探测原理

Fig.3 Detection principle of the frequency modulated continuous wave detection radar

LimeSDR 和发射天线构成雷达发射机；LimeSDR 和

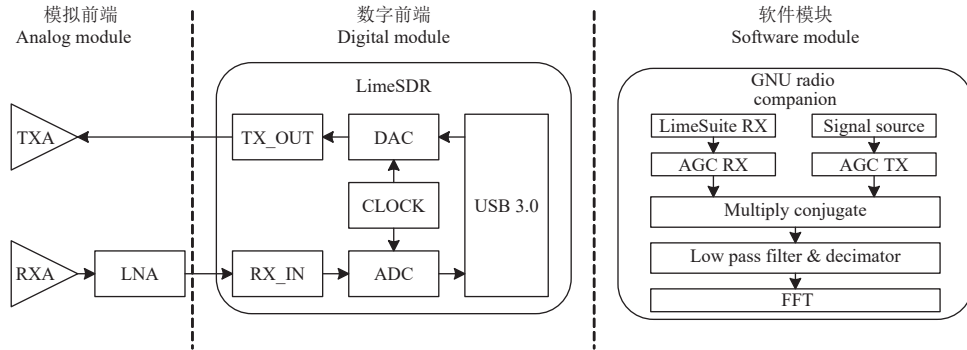


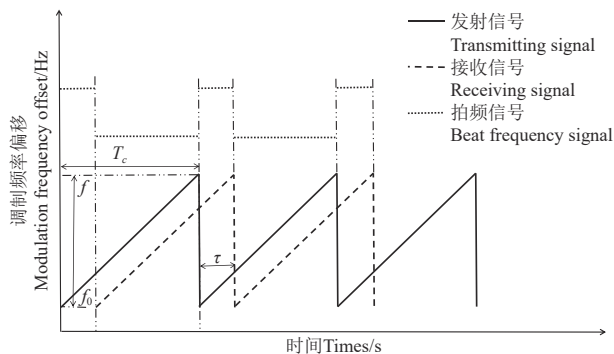
图 4 基于 LimeSDR 的调频连续波探测雷达系统

Fig.4 LimeSDR-based frequency modulated continuous wave detection radar system

1.2.3 软件设计

本研究中的软件处理模块由 GRC 软件实现，该软件为数字信号处理工作提供了一个容易定制的多操作系统平台。

系统的接收流程如下：信号源产生锯齿波信号，使用压控振荡器对锯齿波信号进行频率调制，从而产生调制信号。锯齿波调频连续信号如图 5 所示。



注： f_0 (表示同图中) 表示截止频率； f 表示瞬时频率； τ 表示时间常数； T_c 表示调制周期。
Note: f_0 is cut-off frequency; f is representative instantaneous frequency, Hz; τ is representative the time constant, s; T_c is representative the modulation period, s.

图 5 锯齿波调频连续信号示意图

Fig.5 Schematic diagram of sawtooth frequency modulation continuous signal

低噪声运算放大器及接收天线构成雷达接收机。利用 SDR 系统的多功能性，实现对探测雷达信号的生成、发射、接收和处理。

1.2.2 硬件设计

利用 SDR 技术，能以较低的分析复杂度和硬件成本实现探测雷达设计^[13]。

探测雷达硬件主要有 3 部分：模拟前端，数字前端和软件处理模块。1) 模拟前端负责发送、接收和放大信号；2) 数字前端，由 SDR 设备组成，可实现信号的产生和采集；3) 软件处理模块选择开源软件 GRC，实现信号处理、存储和分析。

模拟前端负责发射和接收雷达信号，雷达发射机向目标发射探测信号，雷达接收机接收探测目标的回波并提高信噪比。

数字前端选用 LimeSDR，生成要传输的信号，并将来自探测目标的回波信号进行数字化处理，该设备通过 USB 3.0 连接至个人电脑。探测雷达硬件部分如图 4 所示。

对锯齿波信号进行频率调制，产生的信号称为啁啾信号，图 6 是一个典型的啁啾信号示意图。

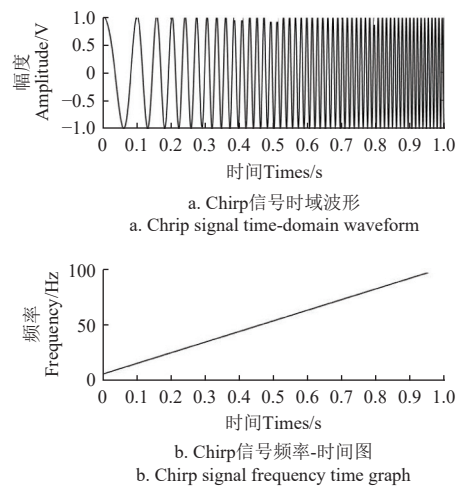


图 6 典型 Chirp 信号示意图

Fig.6 Schematic diagram of typical Chirp signal

调制信号经发射天线及板载发射信号放大器进入探测空间，并在树皮、边材和心材中形成发射信号。

发射信号经各层反射后由树皮表面射出，散射到达

接收天线, 然后经过低噪声运算放大器后由接收天线捕获, 即为接收信号。发射信号和接收信号两路信号经混频器相乘后, 得到的输出信号为系统信号, 该信号检波、采样后可以作为反演算法的输入, 用于分层介电参数的反演。

对接收到的啁啾信号进行解调后, 由于系统采用频率调制, 本研究对信号进行非相干解调, 得到接收信号的解调信号, 如图 7a 所示。然后将接收信号解调信号与发射信号解调信号相关联, 以便进一步分析信号。图中虚线和实线分别为发射、接收解调信号波形。

图 7b 为解调后的发射信号及接收信号。得到解调后的接收信号后, 要对信号进行预处理。首先, 分别采集解调的发射信号和接收信号, 然后将采集的信号做分割, 得到其中的一个周期, 将得到的波形作差, 即可得到仿真介质模型目标波形, 由于目标波形含有噪声, 需要对其做去噪处理, 即可得目标波形。

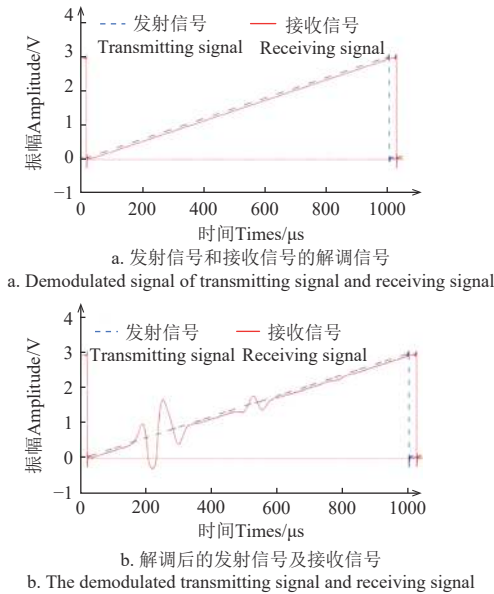


图 7 发射信号和接收信号的解调信号

Fig.7 Demodulate the transmitting signal and receiving signal

1.3 分层介电参数反演

1.3.1 稀疏分解算法

稀疏分解的关键是构造过完备字典, 本研究采用 K-SVD 算法训练字典。K-SVD 算法^[14]利用稀疏分解系数不断修改过完备字典中的原子, 最终得到的过完备字典能够很好地表征待分解信号。

信号的稀疏分解要解决的问题是在给定过完备字典 D 的前提下, 寻找信号最为稀疏的表示方法, 其数学表达为^[15]

$$P_0: \min \|\alpha\|_0 \text{ s.t. } x = D\alpha \quad (9)$$

式中 α 表示稀疏系数矢量, $\|\alpha\|_0$ 是 α 的稀疏度, 也就是 α 中非零元素的个数。实际应用中, 稀疏分解一般采用贪婪算法或凸松弛算法解决此问题, 包括正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP)^[16]、正则化正交匹配

追踪 (regularize orthogonal matching pursuit, ROMP)^[17]、分段正交匹配追踪 (segmented orthogonal matching pursuit, StOMP)^[18]、子空间追踪 (subspace pursuit, SP)^[19]和稀疏度自适应匹配追踪 (sparsity adaptive matching pursuit, SAMP)^[20]。

稀疏分解算法求解过程如下:

输入: $N \times N_T$ (N 表示信号的样本数量, N_T 表示时延的数量) 的时延过完备字典 ψ 、 $N \times 1$ 维观测向量 x 、各算法参数 (步长、稀疏度、迭代次数等)。

输出: 信号的稀疏表示系数 $\hat{\alpha}$, 含有各目标时延参数的原子集合 γ 。

得到 $\hat{\alpha}$ 后, 利用过完备字典可得重构信号 $\hat{x} = \gamma \hat{\alpha}$; ψ 中的原子对应的时间参数即为各分界面的反射时延; $\hat{\alpha}$ 则对应了各个回波的广义反射系数。

1.3.2 分层剥离算法

电磁波在介质中传播特性受介质介电常数和厚度等参数影响, 具体表现在雷达接收信号的幅度变化和时间延迟上, 因此利用之前估计得到的信号时延和点反射率可以结合多层介质的传播模型和层剥离算法 (layer stripping) 反演出每层介质的介电常数和厚度, 其详细的反演过程见^[21]:

1) 由稀疏分解算法估算各层介质的传播时延和广义反射系数;

2) 通过式 $\tau_1 = \frac{2d_0 \sqrt{\epsilon_0}}{C}$ (τ_1 表示时间常数, ϵ_0 表示介电常数, C 表示电容), 可得天线到第一层介质上表面的距离 d_0 ;

3) 由式 (8) 确定广义反射系数 $\tilde{R}_{0,1}$ 和 d_0 之后可以确定反射系数 $R_{0,1}$, 进而可以通过式 $R_{0,1} = \frac{(\sqrt{\epsilon_0} - \sqrt{\epsilon_1})}{(\sqrt{\epsilon_0} + \sqrt{\epsilon_1})}$ 求出第一层介电参数 ϵ_1 ;

4) 通过式 (3) 计算 $\rho_{0,1} = 1 - R_{0,1}^2$ 确定 $\rho_{0,1}$;

5) 得出时间常数 τ_1 、 τ_2 和 ϵ_1 后可以估算出第一层介质厚度 d_1 和第一层介质传播常数 k_1 , 再由式 $\tilde{R}_{1,2} = R_{1,2} \rho_{0,1} e^{-2k_1 d_1}$ 求出第 1 层的广义反射系数 $R_{1,2}$;

6) 由式 $R_{1,2} = \frac{(\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2})}{(\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})}$ 求出第二层介质介电参数 ϵ_2 ;

7) 整个参数反演过程就是以上几个步骤的重复迭代过程。

2 模型验证与样本实测

该研究设计正演试验和反演试验, 测试反演算法的准确性及探测雷达的性能。首先设计正演试验, 通过 gprMax 软件模拟电磁波在分层介质中的传播, 测试反演算法的准确度、效率等; 然后设计三层已知相对介电常数和厚度的仿真介质, 测试探测雷达反演参数的准确性。

最后为测试整个系统设计了柳树树干介电参数反演试验。柳树树干的切面呈圆柱形, 内部结构分层明显, 这种独特的结构特征在树干分层结构的研究中具有较好的代表性^[22]。分层结构的清晰度有助于精确操作和准确

分析数据，能够更有效地揭示树干分层结构与相关参数之间的关系。

2.1 介质模型正演试验

正演试验中，相对介电参数的设置基于雷达回波信号的反射叠加模型。相对介电参数具体计算方法如下：对于接收到的雷达回波信号，可以近似认为是各层界面反射波的叠加。假设 A_1 为反射波在空气与第 1 介质层界面处的幅度， A_2 为反射波在第 1 与第 2 介质层界面处的幅度， A_m 为雷达波的回波幅值，则第 1 介质层和第 2 介质层的相对介电常数 ε_1 和 ε_2 计算分别为^[23]

$$\varepsilon_1 = \left(1 + \frac{A_1}{A_m}\right)^2 \left(1 - \frac{A_1}{A_m}\right)^2 \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \frac{A_2}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 - \frac{A_2}{A_m}} \right]^2 \quad (11)$$

根据雷达回波信号反射叠加模型计算出空气层、树皮、边材介电常数分别为 1、5、11。

基于有限差分时间域 (finite difference time domain, FDTD)^[24] 的数值法已经广泛用于模拟电磁波在介质中的传播。为了测试反演算法，本研究利用 gprMax 软件创建正演模型，雷达波激励源采用雷克子波 (Rickerz)，频率为 2.4 GHz，介质层参数设置如下表 1 所示。

表 1 模拟介质层参数设置

Table 1 Parameters of medium layers in simulation

介质 Medium	相对介电常数 Relative dielectric constant ε_r	电导率 Conductivity $\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	相对渗透率 Relative permeability $M_r/\%$	磁损耗 Magnetic loss $\sigma^*/(\Omega\cdot\text{m}^{-1})$	厚度 Thickness $d/(\text{m})$
Layer0	1.0	0	1.0	0	0.10
Layer1	5.0	0.001 5	1.0	0	0.05
Layer2	11.0	0.001 0	1.0	0	0.50

将数据进行归一化，通过 gprMax 对上述模型进行仿真，并采用基于不同稀疏分解算法的反演算法对模拟介质进行反演。仿真模拟试验目标波形如图 8：

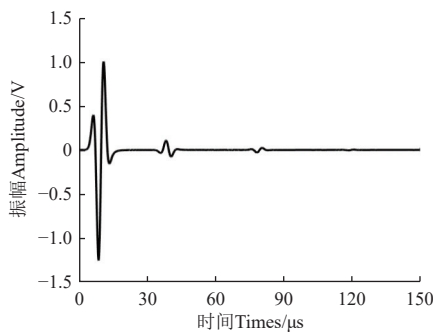


图 8 仿真模拟试验目标波形

Fig.8 Target waveform of the simulation test

由图 8 知，回波信号具有三次回波，多层介质模型各层厚度均大于 $1/8$ 波长，所以回波信号无混叠。

采用不同的反演算法对仿真模拟试验目标波形进行反演，对反演结果进行误差分析，误差分析采用相对误

差绝对值 (absolute value of relative error, ARE)，其计算式为

$$\text{ARE}_j = \left| \frac{\varepsilon_{mj} - \varepsilon_{rj}}{\varepsilon_{rj}} \right| \quad (12)$$

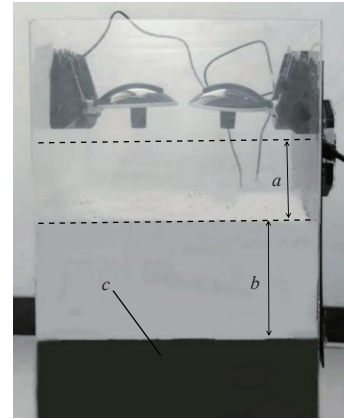
式中 ε_{mj} 和 ε_{rj} 分别表示第 j 层介质介电常数的反演结果和真实值，对于第 j 层介质的层厚误差分析同理。

2.2 反演验证试验

为了进一步测试探测雷达的有效性，进行反演试验，分别对仿真介质模型和柳树树干样本进行探测试验。

2.2.1 仿真介质模型试验

首先建立仿真介质模型，该模型第一层 (a 层) 为空气层，相对介电常数为 1，厚度为 8 cm；第二层 (b 层) 为石英砂，相对介电常数为 3.9，厚度为 10 cm，第三层 (c 层) 为土壤 (含水 20%)，相对介电常数为 16，厚度为 10 cm；由于建立的多层介质模型各层厚度均大于 $1/8$ 波长，所以回波信号无混叠。仿真介质模型如图 9 所示。



注：a 表示空气层，b 表示石英砂层；c 表示土壤层。

Note: a is representative the air layer, b is representative the quartz sand layer; c is representative the soil layer.

图 9 仿真介质模型

Fig.9 Simulated medium model

得到接收信号后，对信号进行预处理。首先，分别采集解调的发射信号和接收信号，将采集的信号做分割，得到其中的一个周期；然后将得到的波形去趋势和去噪处理，则可得目标波形。将此波形作为输入，利用反演算法对其进行反演。由图 10 可知，回波无混叠。

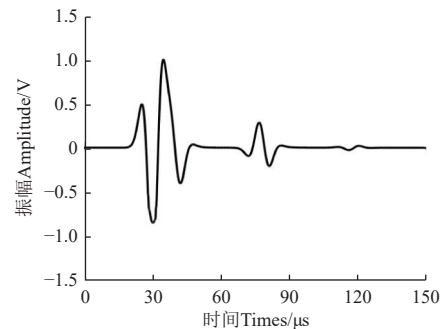


图 10 解调后的接收信号

Fig.10 Received signal after preprocessing

2.2.2 柳树树干样本试验

为了测试整个系统的性能,选择树干直径分别为 21、25、30 cm 的柳树树干样本进行试验。柳树切面呈圆柱形,内部结构分层明显;树干样本取出时间不超过 6 h,运输过程中采用保鲜膜进行包裹,尽可能保证 3 种树干样本与活立木具有近似的生理参数,样本如图 11 所示。对柳树树干样本从不同面(每 120°)进行雷达调频连续波探测,对同一直径树干样本探测结果取平均值。

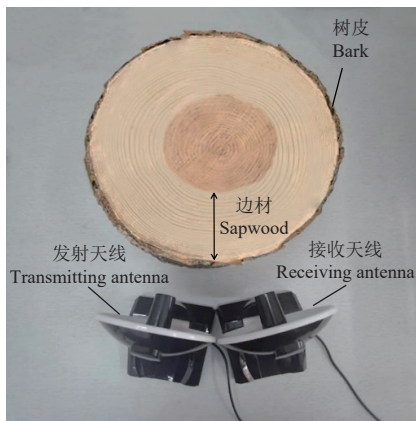


图 11 柳树树干样本
Fig.11 Willow trunk sample

由于分层厚度小于 1/8 波长,回波有混叠。得到接收信号后,对其进行预处理。图 12 为预处理后的接收信号。

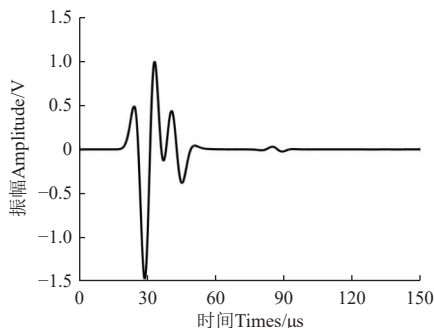


图 12 预处理后的接收信号
Fig.12 Received signal after preprocessin

3 结果与分析

3.1 正演试验结果

根据表 2 中的结果,几种反演算法均能反演分层介电参数,分层结构介电参数反演误差小于 2.62%,厚度反演误差小于 2.42%。由于本研究的反演计算方法采用了简化的计算方式,误差会随着层数的增加而增大。但 ROMP 和 StOMP 算法反演结果误差较大,而 OMP 和 SAMP 算法反演结果比较理想。由于 OMP 算法稀疏度设置恰当,结果显示该算法与其他算法相比耗时最少;由于列向量数量与实际信号的稀疏度不匹配,导致 ROMP、SP 算法稀疏度设置不当,所以反演的精度和效率较低。在实际应用中稀疏度未知,StOMP、SAMP 算法适用范围更广。

表 2 正演试验介电常数及厚度测量结果与误差

Table 2 Measurement results and errors of dielectric constant and thickness in forward modeling test

反演方法 Inversion method	ε_1	E_{ε_1}	ε_2	E_{ε_2}	d_1	E_{d_1}	d_2	E_{d_2}	运行时间 Run time/s
OMP	5.06	1.20	11.27	2.52	0.05	1.20	0.51	2.10	0.19
ROMP	5.07	1.51	11.26	2.37	0.05	1.20	0.51	1.78	0.17
StOMP	4.94	1.06	10.71	2.62	0.05	1.20	0.51	1.42	0.20
SP	4.93	1.32	11.28	2.60	0.05	1.20	0.49	2.42	0.21
SAMP	5.06	1.35	10.74	2.30	0.05	1.20	0.51	1.44	0.20

注: E_{ε_1} 表示正演模型第一层介质介电常数反演误差,%; E_{ε_2} 表示正演模型第二层介质介电常数反演误差,%; E_{d_1} 表示正演模型第一层介质厚度反演误差,%; E_{d_2} 表示正演模型第二层介质厚度反演误差,%。

Note: E_{ε_1} is representative the inversion error of the first layer dielectric constant of the forward model, %; E_{ε_2} is representative the inversion error of the dielectric constant of the second layer medium in the forward model, %; E_{d_1} is representative the inversion error of the first layer medium thickness in the forward model, %; E_{d_2} is representative the inversion error of the second layer medium thickness in the forward model, %.

3.2 反演试验结果

仿真介质模型参数反演结果误差如表 3 所示,由于仿真介质各层厚度均大于 1/8 波长,相对介电常数和介质厚度误差小于 2.93% 和 3.5%,信号无混叠时仿真介质模型试验参数反演精度较高。

表 3 反演试验误差对比

Table 3 Comparison of inversion test errors

反演方法 Inversion method	平均相对误差绝对值 Average absolute relative deviation/%				运行时长 Run time/s
	ε_q	ε_s	d_q	d_s	
OMP	1.44	2.87	1.37	1.80	0.23
ROMP	1.63	2.74	1.37	3.50	0.21
StOMP	1.64	2.87	1.37	2.30	0.27
SP	1.63	2.93	1.37	3.30	0.24
SAMP	1.43	2.65	1.37	2.10	0.21

注: ε_q 表示石英砂层介电常数反演误差; ε_s 表示土壤层介电常数反演误差; d_q 表示石英砂层介质厚度反演误差; d_s 表示土壤层介质厚度反演误差。

Note: ε_q is representative the inversion error of dielectric constant of the quartz sand layer; ε_s is representative the inversion error of dielectric constant of the soil layer; d_q is representative the inversion error of thickness of the quartz sand layer medium; d_s is representative the inversion error of thickness of the soil layer medium.

柳树树干样本试验中不同算法反演误差对比如表 4 所示。由于回波混叠,各个算法运行时间均有大幅度的提升。在信号发生混叠时,反演误差进一步增大。由于本研究的反演计算方法采用了简化的计算方式,误差会随着层数的增加而增大。 ε_3 与 d_2 反演误差已达到较高程度,如果层数继续增加反演结果将不可用。SAMP 算法具有适应性,在回波混叠时仍有较好的表现。而 StOMP、SP 算法反演误差较大,相对介电常数和厚度反演误差最高达到 7.52% 和 7.61%。

在回波无混叠情况下,各反演算法的误差较小,约为 1%~2%。随着探测层数增加,各算法反演精度下降。回波发生混叠时,多个反射波重叠,反射波的独立特征难以区分,导致反演难度增大,边材介电参数的相对误差绝对值小于 4.31%,心材介电参数的相对误差绝对值最高达 7.52%。

不同算法在柳树树干介电参数反演中的相对误差存在差异。ROMP 和 OMP 算法对稀疏度 K 依赖性较强,

稀疏度估计影响其收敛性和性能。SP 和 StOMP 算法具备自适应性，通过步长逼近原信号，但需设置迭代次数和门限，影响反演精度与效率。SAMP 算法自适应性强，在未知稀疏度条件下反演精度较高。

表 4 不同径阶柳树树干样本试验误差对比
Table 4 Comparison of absolute relative errors in willow trunk samples with different diameters

树干直径 Trunk diameter/cm	反演方法 Inversion method	平均相对误差绝对值 Average absolute relative deviation/%						运行时长 Run time/s
		ε_a	ε_b	ε_c	d_a	d_b	d_c	
21	OMP	1.63	3.44	5.53	1.20	2.00	6.92	0.27
	ROMP	1.51	3.60	5.60	1.20	4.00	7.38	0.35
	StOMP	1.62	3.95	6.33	1.20	2.00	6.76	0.42
	SP	1.74	4.17	7.22	1.20	4.00	7.53	0.37
	SAMP	1.53	3.52	5.26	1.20	2.00	6.30	0.25
25	OMP	1.66	3.55	5.55	1.31	2.35	6.95	0.27
	ROMP	1.54	3.82	5.63	1.31	4.12	7.41	0.35
	StOMP	1.65	4.01	6.50	1.31	2.35	6.79	0.42
	SP	1.76	4.25	7.43	1.31	4.12	7.60	0.37
	SAMP	1.56	3.67	5.40	1.31	2.35	6.32	0.25
30	OMP	1.77	3.61	5.58	1.32	2.55	6.97	0.27
	ROMP	1.56	3.88	5.78	1.32	4.29	7.42	0.35
	StOMP	1.66	4.11	6.62	1.32	2.55	6.80	0.42
	SP	1.77	4.31	7.52	1.32	4.29	7.61	0.37
	SAMP	1.58	3.83	5.45	1.32	2.55	6.33	0.26

注： ε_a 表示树皮层介电常数反演误差； ε_b 表示边材层介电常数反演误差； ε_c 表示心材层介电常数反演误差； d_a 表示树皮层介质厚度反演误差； d_b 表示边材层介质厚度反演误差； d_c 表示心材层介质厚度反演误差。
Note: ε_b is representative the inversion error the dielectric constant of the bark layer; ε_c is representative the inversion error the dielectric constant of the sapwood layer; ε_b is representative the inversion error the dielectric constant of the heartwood layer; d_b is representative the inversion error the thickness of the bark layer medium; d_s is representative the inversion error the thickness of the sapwood layer medium; d_h is representative the inversion error the thickness of the heartwood layer medium.

4 讨 论

本研究提出了基于 SDR 平台的调频连续波雷达方法，充分发挥其在树干分层结构无损检测中的高分辨率优势，通过电磁波反射与穿透特性，实现复杂环境中的高精度内部成像。柳树树干的分层特征具有较强的代表性，能够反映树木内部结构的典型特征。在不同径阶柳树树干的参数反演试验中，各径阶之间的反演误差差异较小，进一步验证了该方法在不同条件下的广泛适用性。然而，信号混叠、树种差异、环境湿度、温度以及探测层数的增加均会影响反演精度。为提高反演准确性，需进一步优化稀疏度参数并扩大树种选择范围，以增强普适性和可靠性。武夕等通过探地雷达仿真建立了板材内部观察模型，并结合应力波速度模型、断层成像算法等多种协同方法，实现了活立木内部复杂结构的精准定位与识别^[25]。本研究可以参考该方法，进一步优化树干分层结构的无损检测方案，以提高反演精度和可靠性。

本研究初步证实基于 SDR 的探测雷达在树干分层介电参数检测方法具有良好的应用价值，但还有很多工作亟待进一步深化：

- 1) 优化稀疏分解算法，特别是 StOMP 和 SAMP 算法，以提高在复杂信号环境中的准确性和适应性。同时，开发自适应稀疏度参数设置方法，减少人工干预，提高算法的自动化程度和反演精度。
- 2) 扩大试验样本的种类和数量，涵盖不同种类、不同树龄、不同生长环境和不同径阶的树木样本。这将有助于验证和提高该方法在不同条件下的普适性和可靠性。
- 3) 继续优化和升级 SDR 平台的硬件配置，提高系统的探测能力和分辨率。同时，研究开发低成本、高效率的硬件解决方案，推动该技术在 实际林业监测中的广泛应用。

4) 为了减小误差，可以结合应力波速度模型、断层成像算法等多种技术，建立综合检测方案，实现对树木内部结构介电参数的全面探测和精确分析。这将有效降低因回波混叠导致的介电参数存在的误差，提高检测的全面性和准确性。

5 结 论

本研究根据树干生理结构特征，结合斯涅耳定律，提出了雷达信号在树干中的传播模型，反演树干中树皮、边材、心材等径向分层结构的介电参数。

利用 SDR 设备实现树干探测雷达的构建，并得到雷达接收信号，采用稀疏分解算法、K-SVD 字典和分层剥离算法对接收信号进行反演，得到柳树树干的 分层介电参数。该探测雷达与传统探地雷达相比，分析和研究过程简单，成本优势显著。试验表明，在信号无混叠时相对介电常数和厚度的反演误差分别在 2.93% 和 3.5% 以内，混叠时相对介电常数和厚度的反演误差分别在 7.52% 和 7.61% 以内。本研究所提方法在促进植物生理研究发展方面具有良好的应用前景，为园林管理提供数据支撑，有助于农林业的健康发展。

[参 考 文 献]

[1] ATTIA Al Hagrey S. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity[J]. Journal of Experimental Botany. 2007; 58(4): 839-854.

[2] 魏梨, 李光辉, 马嘉辉. 基于交点拟合的林木缺陷检测[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 1-7.

WEI Shuo, LI Guanghui, MA Jiahui. Intersection fitting-based defect detection in trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 1-7. (in Chinese with English abstract)

- [3] YIN D H, XU Q J. Investigating the damage evolution of sandstone using electrical impedance spectroscopy[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 144(12): 104817.
- [4] MALEKI H R, ABAZADEH B, ARAO Y, et al. Selection of an appropriate non-destructive testing method for evaluating drilling-induced delamination in natural fiber composites[J]. *NDT and E International*, 2022, 126: 102567-102573.
- [5] 陈劲, 陈晓东, 赵辉, 等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42: 444-453.
CHEN Jin, CHEN Xiaodong, ZHAO Hui, et al. Experimental research and application of non-destructive detecting techniques for concrete-filled steel tubes based on infrared thermal imaging and ultrasonic method[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42: 444-453. (in Chinese with English abstract)
- [6] LI X F, LIU H, ZHOU F, et al. Deep learning-based nondestructive evaluation of reinforcement bars using ground-penetrating radar and electromagnetic induction data[J]. *Comput Aided Civ Inf*. 2022, 37(14): 1834-1853.
- [7] CAREY S C. Software defined radio for stepped-frequency, ground-penetrating radar[C]. //IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Atlanta, 2017, 4825-4828.
- [8] PONGCOL D, DARYL O J, GERASTA J M, et al. Dual continuous wave radar for ground object detection in GNU-Radio with USRP[C]. //International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), Laoag, Philippines, 2019, 1-6.
- [9] ABID N B, GHOZZI R, FAIEDH H, et al. Signal processing of range detection for FMCW ground-penetrating radar using software-defined radio[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(8): 711.
- [10] 江涌涛. 稀疏约束的探地雷达信号参数反演方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
JIANG Yongtao. Ground Penetrating Radar Signal Parameters Inversion Based on Sparsity Constraint[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张蓓. 路面结构层材料介电特性及其厚度反演分析的系统识别方法: 路面雷达关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
ZHANG Bei. System Identification Method for Backcalculating the Dielectric Property and Thickness of Pavement Structures: Study on Applied Technology of Ground Penetrating Radar[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李奕璇, 兰天, 杨小鹏, 等. 基于反射信号时域重构的探地雷达超薄层状介质参数反演方法[J]. *信号处理*, 2021, 37(10): 1952-1960.
LI Yixuan, LAN Tian, YANG Xiaopeng, et al. An inversion method of ultra-thin layered media of GPR based on time domain reconstruction of reflected signal[J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(10): 1952-1960. (in Chinese with English abstract)
- [13] BISTROVIC M, KOMORCEC D. Methods and proposals for solutions in the applicability of a software-defined radio in maritime communication[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022; 10(1): 118.
- [14] 林相泽, 张俊媛, 朱赛华, 等. 基于 K-SVD 和正交匹配追踪稀疏表示的稻飞虱图像分类方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 216-222.
LIN Xiangze, ZHANG Junyuan, ZHU Saihua, et al. Sparse representation classification method of rice planthopper image based on K-SVD and orthogonal matching pursuit algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(19): 216-222. (in Chinese with English abstract)
- [15] CHENG D, Zhang S, LIU X, et al. Feature selection by combining subspace learning with sparse representation[J]. *Multimedia Systems*, 2015, 10(23): 285-291.
- [16] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]. //Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 1993, 40-44.
- [17] NEEDELL D, VERSHYNIN R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 2010, 4(2): 310-316.
- [18] DONOHO D L, TSAIG Y, DRORI I, et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory* 2012, 58(2): 1094-1121.
- [19] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Information Theory* 2009, 55(5): 2230-2249.
- [20] DO Thong T, GAN L, NGUYEN N, et al. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing[C]. //Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA, 2008, 581-587.
- [21] CAORSI S, STASOLLA M. A layer stripping approach for EM reconstruction of stratified media[J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5855-5869.
- [22] 卢智远, 侯建强, 韩日霞, 等. 一腔多模动态扫频法测量生物材料的介电特性[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(3): 467-472.
LU Zhiyuan, HOU Jianqiang, HAN Rixia, et al. Testing dielectric properties of biological material by dynamic frequency sweep method for multimode cavity[J]. *Journal of southwest Jiaotong University*, 2013, 48(3): 467-472. (in Chinese with English abstract)

- [23] 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 with English abstract)
- [24] 宋文, 张敏, 吴克宁, 等. 潮土区农田土体构型层次的探测雷达无损探测试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 129-138.
SONG Wen, ZHANG Min, WU Kening, et al. Test on nondestructive detection of farmland solum structure in fluvo-aquic soil area using ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 129-138. (in Chinese with English abstract)
- [25] 武夕. 基于探地雷达的林木缺陷检测方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
WU Xi. Research on Wood Defect Detection Method Using Ground Penetrating Radar[D]. Wu xi: Jiangnan University, 2021. (in Chinese with English abstract)

Inversing the dielectric parameters of trunk layers by SDR-based detection radar

ZHOU Haiyang^{1,2,3}, MA Helong^{1,2}, XIA Pengkai^{1,2}, SUN Qingfeng^{1,2}, LIN Jianhui^{1,2,3}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Tree trunks with thick bark can be expected to serve as the potential water storage capacity. Moisture content is one of the most important indicators to monitor the physiological condition of tree trunks in the development of agriculture and forestry. Therefore, it is crucial to accurately obtain the thickness and relative dielectric constant of the layered medium in tree trunks. The growth and health status of trees can be evaluated to optimize the water management strategies. To this end, this study aims to invert the dielectric parameters of tree trunk layered structure using radar detection. Non-invasive detection was realized for the internal structure of tree trunk. The electrical characteristics of different layers were obtained for the medium layers in the tree trunk. According to Snell's law, the physiological structure of tree trunks were combined to construct the propagation model of radar signals in the layered structure of tree trunks. Electromagnetic properties of different media layers in tree trunks were considered, such as the thickness and relative dielectric constant differences of bark, sapwood, and heartwood. These key parameters were then evaluated using radar echo signals. In addition, the accurate inversion was also performed on the dielectric parameters of tree trunks using sparse decomposition. K-SVD dictionary training was combined to process and analyze radar signals. A software defined radio (SDR) platform was used to build a tree trunk detection radar system in the experiment. The accuracy of detection was further improved to easily adjust the operating frequency of the radar, and then modify the signal processing under different environments. Layer stripping algorithm was selected to invert the dielectric constant and thickness of the layered structure in the tree trunks. The echo signals detected by radar were collected to evaluate the performance of the improved model. A comparative experiments were conducted on the radar detection under two conditions: aliasing and no aliasing in the echo signal. In the absence of aliasing, the inversion errors of the relative dielectric constant and layer thickness of the tree trunk were within 2.93% and 3.5%, respectively; In the case of echo aliasing, the inversion errors of relative dielectric constant and thickness were 7.52% and 7.61%, respectively. The experimental results show that the robustness and practicality were achieved to accurately estimate the thickness and relative dielectric constant of the layered medium in tree trunks under different signal environments. Application prospects were also offered to promote the plant physiology. The finding can provide the accurate data support to monitor the tree health status. Effective technical references can also be provided to promote the garden management and water control in the sustainable agriculture and forestry.

Keywords: radar; inversion; tree trunk inspection; software defined radio (SDR); layered structure; dielectric parameters