

基于探地雷达复垦土壤土层分层识别

周涛¹, 张世文^{2*}, 冯志军¹, 兰淼², 芮婷婷¹

¹安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南

²安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年8月13日; 录用日期: 2022年9月12日; 发布日期: 2022年9月21日

摘要

探地雷达可以通过发射电磁波信号来获取地下介质的结构信息, 合适的信号变化方法可以更加显著地获取地下结构的分层情况, 对地下结构探测具有重要意义。本研究通过利用探地雷达对复垦土壤进行探测, 利用其瞬时属性特征来判断复垦土壤的土层分层情况。研究表明, 探地雷达获取的电磁波信号可以突出显示地下结构特征, 而利用其信号的瞬时属性特征可以良好地判断具体的土层分层位置。

关键词

探地雷达, 复垦土壤, 瞬时属性

Layered Recognition of Reclaimed Soil Based on Ground Penetrating Radar

Tao Zhou¹, Shiwen Zhang^{2*}, Zhijun Feng¹, Miao Lan², Tingting Rui¹

¹School of Spatial Informatics and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Aug. 13th, 2022; accepted: Sep. 12th, 2022; published: Sep. 21st, 2022

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) can acquire the structural information of underground media by transmitting electromagnetic wave signals, and the appropriate signal change method can more significantly acquire the layering of underground structures, which is of great significance to the detection of underground structures. In this study, the reclaimed soil was detected by GPR, and its instantaneous attribute characteristics were used to judge the soil stratification of reclaimed soil.

*通讯作者。

The results show that the electromagnetic wave signals obtained by ground penetrating radar can highlight the characteristics of underground structure, and the instantaneous attribute characteristics of the signals can be used to judge the specific soil layer position.

Keywords

Ground Penetrating Radar, Reclaiming Soil, Instantaneous Property

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

土地复垦逐渐成为治理矿区环境的重要手段,其目的是使被破坏的耕地逐渐恢复到原有生产力的状态,并且重建原有生态环境,弥补煤炭开采对生态环境造成的影响[1][2]。传统的土地复垦手段主要为地下充填煤矿废弃物(粉煤灰、煤矸石等),其上覆土。土层结构是影响土壤质量的主要因素,准确获取土层结构信息可以很好地确定土地的利用模式[3]。

近年来,探地雷达作为一种高效、便捷、快速、无损的地球物理探测方法,其主要原理是通过分析高频宽带电磁波在介质内部传播过程来确定地下介质的介电属性及其分布规律。早期探地雷达主要用于道路裂缝监测、资源探测等工程领域[4],近些年,探地雷达以其对地下介质特性检验的出色表现已经开始应用于土壤方面的研究,其主要集中在土壤含水率及容重探测、土层分层等方面[5][6],其主要是通过分析脉冲电磁波的回波信号的传播特征以及变化规律来反映出地下物体介质的介电性质及状态等。

本文基于探地雷达原始时域信号特征和信号处理下探地雷达数据属性特征来获取复垦土层的分层结构,旨在为复垦土壤领域中土层分层结构的判别提供理论和依据。

2. 材料和方法

2.1. 数据预处理方法

首先,采用去直流漂移、信号增益、背景去除等数据预处理算法,实现对雷达数据的预处理,得到明显的土层剖面信息;之后提取单道波形数据进行希尔伯特变换,提取其瞬时频率、相位和振幅特征,最后根据多种特征值确定复垦土层的分层结构。

2.2. 希尔伯特变换及瞬时属性的提取

瞬时频率作为地震三瞬信号中的一种变换方法,其主要是通过瞬时相位推导出来。其中,瞬时振幅是反射强度的表达,其计算是通过原信号进行希尔伯特变换后得到的解析信号,瞬时振幅面积计算方法为一定时窗下瞬时振幅的积分值。因此通过对时域雷达数据进行 Hilbert 变换:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(s)}{t-s} ds \quad (1)$$

其中 $\hat{x}(t)$ 是 $x(s)$ 的希尔伯特变换函数,积分是柯西原理值积分。希尔伯特变换后产生复杂的雷达虚部信号 $x_i(t)$,探地雷达信号被认为是实部信号 $x_r(t)$ 。

$$\hat{x}(t) = x_r(t) + jx_i(t) \quad (2)$$

其中 $j = \sqrt{-1}$ 。可定义瞬时振幅为:

$$\bar{A}_i(t) = \sqrt{x_r^2(t) + x_i^2(t)} \quad (3)$$

瞬时频率作为探地雷达信号解释中的重要因素之一,对于地下介质的响应程度较敏锐,已广泛应用于桥梁振动监测、地震勘测、机械以及雷达等各方面。瞬时频率来源于瞬时相位,其计算通过对瞬时相位求导后得到,其意义在于代表某一时刻的频率大小。瞬时相位可被定义为:

$$\tilde{\Psi}_i(t) = \tan^{-1} \left[\frac{x_i(t)}{x_r(t)} \right] \quad (4)$$

瞬时频率则为:

$$\bar{f}_i(t) = \frac{d\tilde{\Psi}_i(t)}{2\pi dt} \quad (5)$$

瞬时频率是一种基于探地雷达原始信号下的参数分析方法,其主要是揭示雷达信号在介质传播过程中的动力学信息,避免了原始时域信号波形特征分析带来的分析偏差。

3. 复垦土体实例分析

3.1. 数据获取

淮南市煤炭资源丰富,但大量的开采对土地造成较为严重的破坏,市内以对破坏土地进行了必要的复垦修复,实验区选取为淮南市某一复垦土地,其复垦方式为粉煤灰充填复垦,覆土厚度在 20~40 cm 之间,实验仪器选用为探地雷达,通过实际开挖剖面获取土层厚度,共选取覆土厚度为 20 cm、30 cm 和 40 cm 的区域进行测线探测。图 1 以一条水平的探地雷达测线为例,雷达天线的中心频率为 500 MHz,数据通过铺设测线的方式获取,测线布设长 10 m,根据实际开挖剖面获取此处的覆土厚度为 40 cm。由图 1 可知,在 18 ns 处便出现了较为明显的响应信号,但其连续性较差,虽然可以初步判断土层分层情况,但原始剖面上的分界情况并不清晰,难以定量分析土层分层的具体情况。

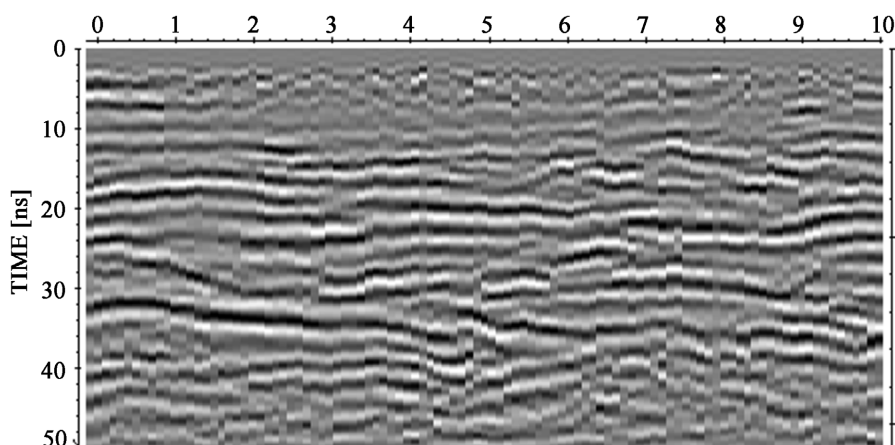


Figure 1. Two-dimensional cross-sectional view of fly ash reclamation

图 1. 粉煤灰复垦下的二维剖面图

3.2. 雷达信号瞬时属性分析

为了获取不同覆土厚度下的雷达探测结果的差异性以及准确判断土层和充填层的分界位置,利用希

尔伯特变换提取了不同覆土厚度下的原始雷达信号的瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位三种瞬时属性，对土层分层情况进行多参数评价。

瞬时振幅是反射强度的度量，由于不同介质之间的介电常数差异，当电磁波由介电常数较高的介质传播至介电常数较低的介质时，瞬时振幅会出现较大的变化[7]。图2为不同覆土厚度下的雷达信号的瞬时振幅图，由于两种介质之间的性质差异，在不同覆土厚度的情况下，均出现了振幅能量值骤降的情况，这是由于土层介电常数高于填充层造成的，所以根据瞬时振幅可以较为清晰地获取土层和充填层的分界面的位置，进而判断土层与充填层的分层结构；同时，随着覆土厚度的增加，根据瞬时振幅获取的分界面位置也会逐步的向后推移。

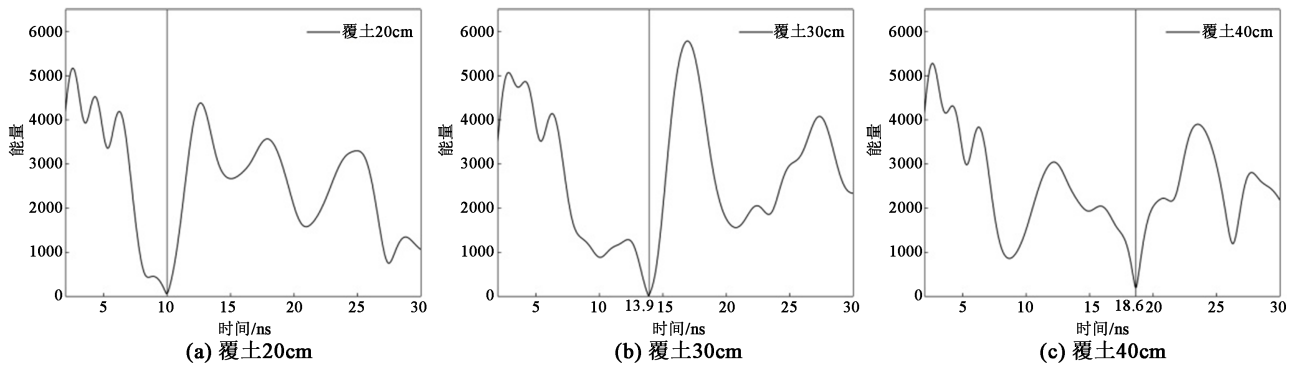


Figure 2. Instantaneous amplitude diagrams under different cover soil thicknesses

图2. 不同覆土厚度下的瞬时振幅图

瞬时频率可以反映电磁波传播过程中的频率变化，当两种介质存在差异时频率分量便会出现波动。

图3为不同覆土厚度下的雷达原始信号的瞬时频率图。由图3可知，在不同覆土厚度的情况下，电磁波的频率处于不断波动之中[8]，但其起伏较小，电磁波在土壤中传播时获取的为一种非平稳信号，所以频率会发生不断变化。根据瞬时频率变化曲线，在图中标记处均出现了频率信息突变的情况，其位置的频率信息普遍低于主频信号，说明这些位置存在异常，为低频信号区，其主要是由于介质性质的突变造成的，根据频率的突变位置表明，其与瞬时振幅的突变位置相同，说明在土层中的异常位置，两种属性均会出现较大的变化，可以根据两种属性信息联合分析。

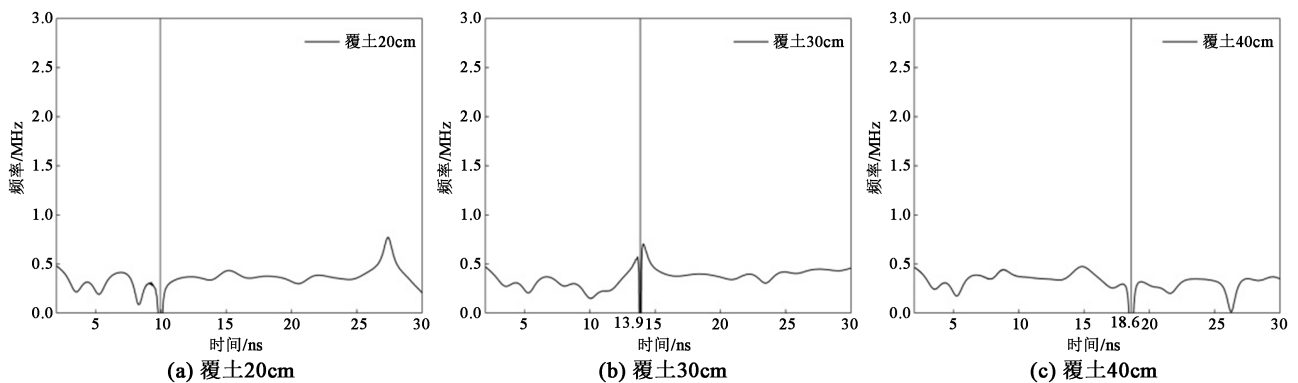


Figure 3. Instantaneous frequency diagram under different cover soil thickness

图3. 不同覆土厚度下的瞬时频率图

瞬时相位是反射波同相轴连续性的量度，具有很高的分辨率。由于瞬时相位与振幅无关，不论反射

信号强弱如何变化,相位都能同等的表现出来,因此瞬时相位在弱反射信号的分析上具有独特的优势[9]。

图4为不同覆土厚度下的相位谱,在土层结构中,虽然不同深度位置存在一些差异,但对于已稳定的土层,其性质差异较小,在图中标记位置外,其相位谱分布较为均匀,而在标记位置,相位信号会出现较大差异,信号强弱差异明显,很好地揭示了由于土层分层结构情况不同而引起的复垦土壤结构的非均质特征;不同覆土厚度下,其异常位置的相位信息也存在较大差异,说明在同一种土层结构中,由于土层内部的具体理化性质差异,也会出现较为明显的特征差异。

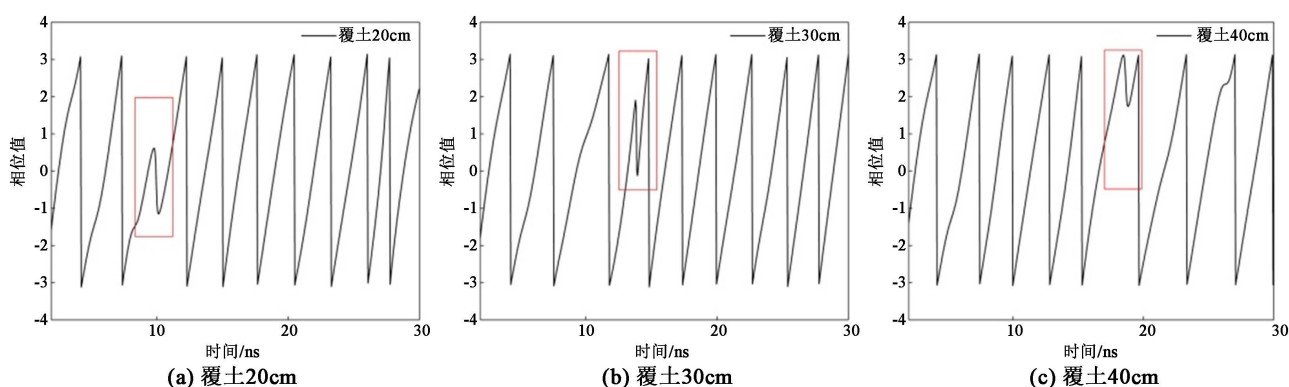


Figure 4. Instantaneous phase diagrams under different covering thicknesses

图4. 不同覆土厚度下的瞬时相位图

综上所述,探地雷达瞬时属性可以较好地判断复垦土层的分层结构,对于复垦土层覆土厚度的变化,均可以准确地识别出土层结构的分层位置,瞬时振幅和瞬时属性可以根据其特征值的突变来判断土层的分层情况,而相位谱可以借助其高分辨率的优势将强弱不同的信号以不同形式呈现出来,通过结合信号瞬时属性的分析,可以很好地利用于复垦土壤分层信息的识别之中。

4. 结论

1) 探地雷达瞬时属性是一种利用多参数分析的方法,通过提取雷达信号中的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等信息,可以实现对土层结构中的异常位置进行多参数、多角度的评价,避免了仅依靠原始信号的解译误差。

2) 通过对具体复垦土层的结构分析,多种瞬时属性的联合分析可以对土层的分层信息进行联合判断,多属性参数的相互结合、相互验证,使得最后的探测结果更加精确。

基金项目

国家重点研发计划项目(2020YFC1908601)。

参考文献

- [1] 沈强, 张世文, 葛畅, 等. 矿业废弃地重构土壤重金属含量高光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1214-1220.
- [2] 张世文, 卜中原, 沈强, 等. 粤北南岭大宝山矿流域山水林田湖草修复阻力与优先级分析[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8920-8929.
- [3] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276-280.
- [4] 王超, 林振荣, 李洁. HHT在探地雷达检测路基质量中的应用[J]. 地球物理学进展, 36(4): 1711-1716.
- [5] 刘万里, 马泽洋, 张学亮. 基于探地雷达的特厚煤层厚度动态探测技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2706-2714.

- [6] 罗古拜, 曹银贵, 白中科, 等. 露天矿区排土场复垦地土壤容重差异、GPR 特征识别与反演[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 441-452.
- [7] 杨晓杰, 刘冬明, 王孝存. 深厚软弱土层沉降变形规律堆载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 4259-4266.
- [8] 胡振琪, 陈宝政, 陈星彤. 应用探地雷达检测复垦土壤的分层结构[J]. 中国矿业, 2005, 14(3): 73-75.
- [9] 王焱, 鹿琪, 刘财, 等. 利用 GPR 天线-目标极化的瞬时属性分析方法探测 LNAPL 污染土壤[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(2): 491-500.