

基于希尔伯特-黄变换的覆土层厚度动态探测

张世文¹ 周涛² 王阳¹ 程琦² 冯志军² 王维瑞³

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001; 2. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 淮南 232001;
3. 北京市耕地建设保护中心, 北京 100074)

摘要: 准确揭示动态沉降过程中土层厚度及其变化情况对合理确定覆土层厚度, 科学评价复垦土体稳定性具有重要意义。通过野外试验, 结合探地雷达数据, 基于希尔伯特-黄变换 (Hilbert - Huang transform, HHT) 进行信号处理, 根据希尔伯特谱确定覆土层所在的时域范围; 提取由 HHT 获取的多个固有模式函数 (Intrinsic mode function, IMF) 的时间-瞬时频率信息, 建立 IMF2 分量与相对介电常数的关系模型, 进而获取覆土层厚度; 将所建立的关系模型进一步应用于时间序列上的覆土层厚度的探测之中, 实现覆土层厚度的动态探测。研究结果表明: 覆土层下沉会引起层状介质之间的介电常数差异, 进而导致分界面处的振幅变化; 瞬时频率平均值与相对介电常数之间存在较高相关性, 其利用多项式回归的建模决定系数 R^2 达到 0.887 0; 综合考虑时域下的振幅与瞬时频率变化的联合时频分析可有效探测覆土层厚度, 随覆土层厚度的增加和时间的推移探测精度整体略有下降, 探测结果的平均相对误差为 3.65%。

关键词: 复垦土层; 探地雷达; 希尔伯特-黄变换; 时间序列

中图分类号: S281 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0338-09 **OSID:** 

Dynamic Detection of Overburden Thickness Based on Hilbert - Huang Transform

ZHANG Shiwen¹ ZHOU Tao² WANG Yang¹ CHENG Qi² FENG Zhijun² WANG Weirui³

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
2. School of Spatial Informatics and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
3. Beijing Cultivated Land Construction and Protection Center, Beijing 100074, China)

Abstract: Accurately revealing the thickness of soil and its changes in the process of dynamic settlement is of great significance for reasonably determining the thickness of overburden and scientifically evaluating the stability of reclaimed soil. Through field tests, combined with ground penetrating radar data, signal processing was carried out based on Hilbert - Huang transform (HHT), and the time domain range of overburden was determined according to Hilbert spectrum. Extracting the time instantaneous frequency information of multiple intrinsic mode functions (IMF) obtained by HHT, the relationship model between IMF2 component and relative dielectric constant was established, and the detection of overburden thickness was realized. The established relationship model was further applied to the detection of overburden thickness on time series, so as to realize the dynamic detection of overburden thickness. The results showed that the subsidence of overburden could cause the change of dielectric constant difference between layered media, and then cause the change of amplitude at the interface. Based on HHT method, the time-domain position of the overburden could be better obtained. In different reclamation times, the time-domain range of the overburden was in dynamic change. There was a high correlation between the average instantaneous frequency and the relative dielectric constant, and the R^2 modeled by polynomial regression was 0.887 0. The combined time-frequency analysis considering the amplitude and instantaneous frequency changes in the time domain can effectively detect the thickness of the overburden layer; with the increase of the thickness of overburden layer and the passage of time, the detection accuracy was decreased slightly, and the average relative error was 3.65%.

Key words: reclaimed soil; ground penetrating radar; Hilbert - Huang transform; time series

收稿日期: 2022 - 06 - 06 修回日期: 2022 - 08 - 24

基金项目: 2022 年北京市创新团队——粮食作物团队土壤评价与质量提升岗位项目 (BAIC02 - 2022)、安徽省自然资源科技项目 (2020 - K - 8)、淮北矿业集团科技研发项目 (2022 - 103) 和国家重点研发计划项目 (2020YFC1908600)

作者简介: 张世文 (1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿区土地复垦与生态修复研究, E-mail: mamin1190@126.com

0 引言

矿产资源的开发与利用大力促进了人类生产力的发展,提高了人们的生活水平^[1]。但由于矿产资源的不合理开采,导致耕地损毁,景观格局破坏,危害农民的自身利益^[2-3]。近年来,我国面临着矿产资源枯竭的问题,废弃矿山逐年增多^[4]。土地复垦是实现废弃矿山修复的重要途径,然而土体结构从复垦结束到稳定的过程中,会出现覆土层沉降的问题,进而影响土层结构。目前,覆土层厚度的探测方法主要是钢钎法^[5]和剖面法^[6]。虽然这些方法准确度较高,不需要较为复杂的数据分析,但因其费时费力,且会对原土体结构造成破坏,故不宜大面积使用^[7]。同时,由于传统方法无法实现对土层厚度的动态探测,因此无法计算覆土层的下沉范围,影响其稳沉时间的判断。探地雷达作为一种新型的近地微波探测技术,因其快速、无损、可大面积探测等优点,获得了广泛的应用^[8-9]。

早期的探地雷达技术主要应用于工程勘察方面,近年来,探地雷达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^[10]及容重探测^[11]、土层分层^[12]等方面。在土层分层的研究中,采用的主要方法是“波速-介电常数”法,由于该方法仅从单一时域上进行分析,在情况较为复杂的复垦土体结构中,容易产生人为的主观判断,ALI 等^[13]利用探地雷达测量混凝土厚度时,使用单一时域信号进行分析,在探测结果中出现了较为明显的杂波干扰,影响最终的厚度判断;而将数据转至频域分析后,虽然可以获取较为清晰的频率信息,却缺少必要的时域信息,同样无法较为准确地判断分层信息,XU 等^[14]在研究中指出傅里叶变换主要适用于平稳信号,由于时频位置的阻碍,导致其对于非平稳信号无法正确分析。希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)将数据从单一的时域或频域转至时频域,可以获得由时间、频率和能量组成的三维信息图,更加方便了雷达信号特征值的选取。BEHESHTI 等^[15]利用 HHT 分析进行海洋平台检测,表明 HHT 可以准确地进行损伤检测,并可确定损伤的位置和严重程度;王超等^[16]在探地雷达检测路基质量的研究中,利用 HHT 作为数据处理方法,结合探地雷达信号可以较好地识别异常体的位置。当前有关 HHT 方法在雷达信号中的应用较少,主要集中在确定建筑材料和较为平稳的土体及路面结构的异常位置。由于 HHT 主要用于非平稳信号的处理,复垦土体作为一种干扰信号较多的土体结构,HHT 在一定程度上可以减弱噪声

的干扰,提供较为准确的时间-频率信息。针对处于动态变化的非均质复垦土体^[17-18],结合 HHT 获取的信息和介电常数开展覆土厚度随时间变化分析值得进一步研究。

在前人研究基础上,本文通过野外试验布设与探测,基于 HHT 方法进行信号处理,根据时频谱图确定覆土层分层的时域位置,提取时域范围内随时间变化的瞬时频率信息,建立其与相对介电常数的关系模型,探测土层厚度及其变化,以期掌握复垦土壤的覆土层厚度及其变化情况提供相应的理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计及数据获取

为模拟土地复垦过程,准确揭示动态沉降过程中土层厚度及其变化情况,明确探地雷达对不同覆土层厚度的敏感性,选择 40、60、80 cm 共 3 种覆土层厚度布设试验小区,小区之间间隔 1 m,小区面积为 1 m × 1 m,其下填充厚为 20 cm 的建筑废弃物,作为填充层(图 1)。

试验仪器选用瑞典 MALA 公司生产的 PRO EX 专业型探地雷达,采集数据方式为固定偏移距方法及关键点测法,沿布设区域进行测线采集,测线长 7.5 m 左右。结合覆土层厚度,天线中心频率为 500 MHz,采样时窗设置为 50 ns,采样点数目为 1 024 个,天线平均移动速度为 0.02 m/s。试验于 2021 年 6 月 9 日开始,至 2021 年 7 月 23 日共采集 6 次数据,采样时间间隔为 7 d,采集数据包括线测及点测数据,并同时获取覆土层厚度变化情况。待覆土层结构达到稳定(复垦后 45 d),延布设测线在每个试验小区采集 4 个样点及其对应的土壤容重、含水率数据,由于覆土层厚度 80 cm 的小区信号干扰较大,探测深度较深,所采集的信号受到较大影响,因此,剔除两个受干扰、噪声较大的采样点,共获取 10 个采样点数据,同时在每个小区随机选取 2 个采样点,进行点测数据采集。试验中电磁波在介质中的平均速率根据覆土层和填充层的分界面位置估算。

1.2 数据预处理

由于无法保证每次探测中电磁波信号的时间零点一致,需对数据进行时间零点校正。电磁波在土壤介质中传播时会发生衰减,土层内部结构的不均一性以及地表杂质的干扰将导致接收到的回波信号缺少一部分重要信息,存在较多的杂波干扰,需对获取的信号进行增益处理,突出底层被直达波压制的信号。

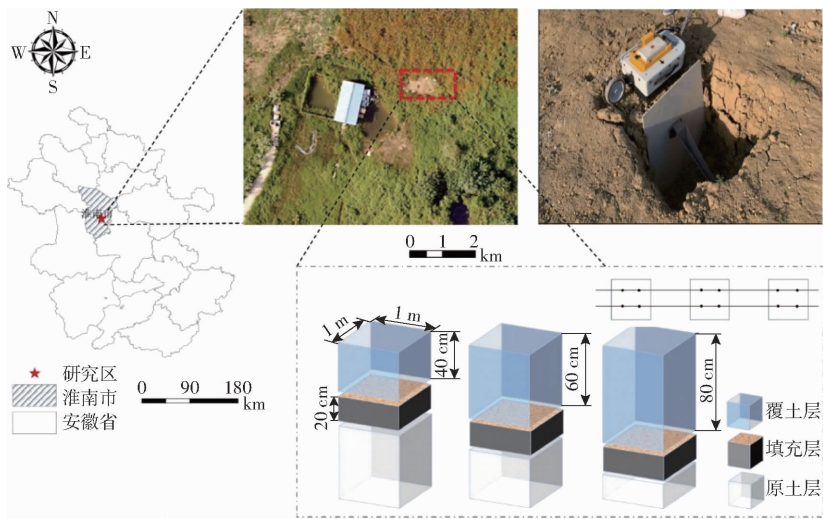


图 1 试验小区及其布设示意图

Fig. 1 Schematic of test area and its layout

本文以长短时窗能量比值法(Long short window energy ratio, STA/LTA)^[19]作为零点校正方法,该方法比传统方法更加方便及准确;增益方法选用自动增益控制(Automatic gain control, AGC)方法对信号进行增益处理,在增益之前,采用去直流漂移方法去除雷达在空气及地面间产生的低频信号,保留高频信号,在增益之后,采用巴斯沃斯滤波去除毛刺噪声,平滑波形。图 2 为处理前后的图像对比,图 2b 中直达波时间提前是因为进行了零点校正。

变换,公式为

$$\hat{c}_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau \tag{1}$$

式中 t ——时间 τ ——弛豫时间

根据欧拉公式可得其解析信号 $z_i(t)$ 为

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \tag{2}$$

其中
$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \hat{c}_i^2(t)} \tag{3}$$

瞬时相位为

$$\varphi_i(t) = \arctan \frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)} \tag{4}$$

式中 $a_i(t)$ ——瞬时振幅

$\varphi_i(t)$ ——瞬时相位

$\theta_i(t)$ ——相位, (°)

瞬时频率 $\omega_i(t)$ 通过对瞬时相位函数微分处理得到,即

$$\omega_i(t) = \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \tag{5}$$

信号 $c_i(t)$ 的希尔伯特谱表示为

$$H(\omega, t) = \begin{cases} R \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} & (\omega_i(t) = \omega) \\ 0 & (\omega_i(t) \neq \omega) \end{cases} \tag{6}$$

式中 R ——残差项

n ——IMF 分量个数

ω ——频率, Hz

1.4 电磁波反射和散射

电磁波在土体结构中传播时,会发生菲涅尔现象,即反射与折射。反射系数用来衡量反射的强度,反射系数是层状介质分界面处反射光强度与入射光强度的比值,当两种介质介电常数相差过大时,会导致电磁波信号在分界面处产生较强的振幅^[22]。

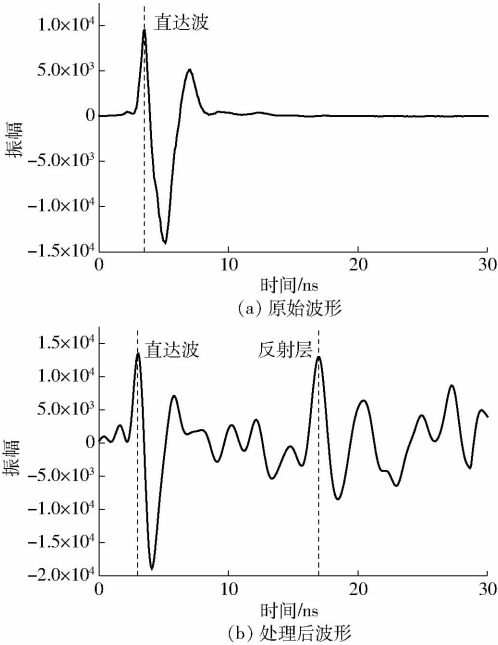


图 2 波形预处理前后对比

Fig. 2 Comparison before and after waveform preprocessing

1.3 覆土层分层及厚度信息获取

HHT 主要适用于非线性非平稳信号的处理^[20-21],首先对经过经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)后的若干个固有模态函数(Intrinsic mode function, IMF)分量 $c_i(t)$ 进行 Hilbert

图 3 为在覆土层沉降过程中覆土层与填充层分界面处的振幅变化情况,随着复垦后时间的推移,图中标注位置(分界面)处的振幅信号逐渐增大,主要原因是土层沉降过程中,土体结构中含水率及容重增加,覆土层介电常数随之增大,两层介质之间介电常数相差较多,所以分界面处伴随着高振幅的产生。

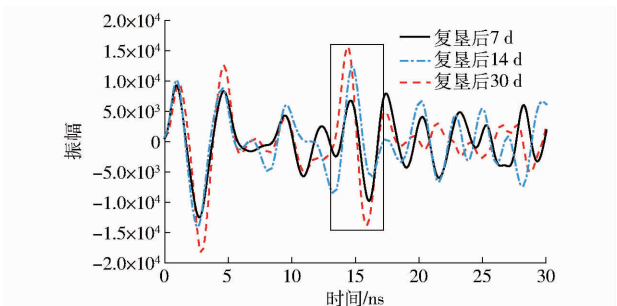


图 3 不同复垦时间下的分界面处振幅差异
Fig.3 Amplitude difference at interface under different reclamation time

当电磁波在介质中传播时,会偏离一个或多个局部不均匀性的直线轨迹,这一物理现象称为散射。土壤结构一般是由土壤颗粒、水和空气组成的三相多孔介质,当电磁波通过土体时,电磁波会发生多次散射,此时的散射被称为瑞利散射^[23]。电磁波在土体中传播时,其极性分子在外电场作用下,沿着电场方向转向,由于分子的惯性较大,需要较长的时间才能建立偶极子转向,特别在高频电场的作用下,取向极化跟不上外电场的变化,便会引起电磁波频率衰减,其中,介质的介电常数为电磁波频率衰减的主要因素。

根据德拜模型^[24]

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (7)$$

式中 ε_{γ} ——介质相对介电常数

ε_s ——低频下粒子介电常数

ε_{∞} ——高频下粒子介电常数

可知,相对介电常数与频率呈负相关关系,随着介电常数的增大,频率随之减小。土层由于其厚度与介电常数不同会引起电磁波信号频率信息的变化,因此,可以通过分析其频谱信息获取土层介电常数。

1.5 覆土层介电常数确定

采集土样后,土壤样品质量含水率利用干燥法获取,然后利用公式计算出样品体积含水率,计算公式为

$$\theta_v = \theta_m \rho \quad (8)$$

式中 θ_v ——土壤样品体积含水率

θ_m ——土壤样品质量含水率

ρ ——土壤样品容重

土壤含水率是土壤相对介电常数的主要影响因

素,Topp 公式是公认的反演介电常数效果最好的经验公式,其介电模型为

$$\varepsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.0\theta_v^3 \quad (9)$$

1.6 覆土层厚度确定

电磁波在复垦土体中传播速度 v 为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (10)$$

式中 c ——电磁波在真空中的传播速度

所测覆土层厚度 d 表达式为

$$d = vt = \frac{ct}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (11)$$

2 结果与分析

2.1 同一复垦时间下覆土层厚度探测及模型建立

2.1.1 基于 HHT 的覆土层时域范围

考虑沉降性质以及外界干扰程度,本文利用复垦后 45 d 的采样点数据建立覆土层厚度探测模型。为探究不同覆土层厚度所在的时域范围,每个试验小区选取两个实际采样点,利用 HHT 分析复垦后 45 d 不同覆土层厚度下的雷达数据,结果见图 4。

由图 4 可以看出,在同种土层的不同深度位置,瞬时频率会随着土层深度的变化产生波动,主要波动范围在 500 MHz 左右,即探地雷达的主频频率。由于复垦土体内部干扰信号的影响,在部分时刻的瞬时频率会产生较大波动;同时,在覆土层和填充层的分界面位置的瞬时频率均会有所增加,说明当电磁波在土体结构中传播时,到达填充层时,由于填充层的介电常数较覆土层小,根据德拜模型,瞬时频率会有所增长。

随着覆土层厚度的增加,覆土层和填充层的分界面位置逐渐向后推移。覆土层厚度 40 cm 处的分界面所在的时域位置为 16 ns 左右,覆土层厚度 60 cm 和 80 cm 处的分界面位置分别为 18 ns 和 23 ns 左右,由于存在 2 ns 的直达波信号,在计算覆土层的时域范围时,应该除去 2 ns,不同覆土层厚度的时域范围大致为 2 ~ 16 ns、2 ~ 18 ns 和 2 ~ 23 ns。位于相同覆土层厚度下采样点的覆土层时域范围相差较小,电磁波在其覆土层的传播时间差距在 2 ns 之内。

2.1.2 基于瞬时频率的土壤介电常数估算

为研究覆土层所在时域范围内的瞬时频率变化情况,计算其瞬时频率平均值,根据实际采样点数据,结合希尔伯特谱对固有模态函数分量进行提取(图 5)。

图 5 以覆土层厚度 40 cm 采样点 1 为例,图 5a 由图 5b 的多个 IMF 分量叠加而成,图 5b 中由上至

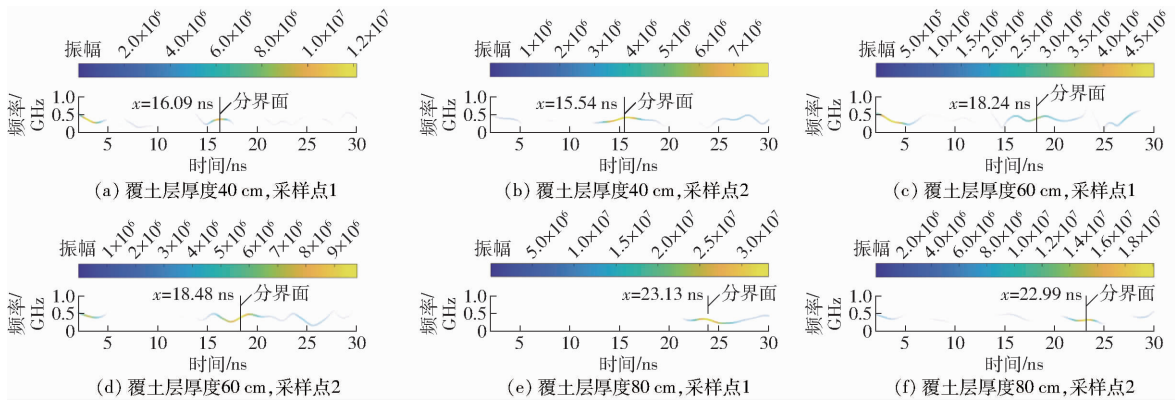


图 4 不同覆土层厚度、不同采样点下的希尔伯特谱

Fig. 4 Hilbert spectrum under different overburden thicknesses and different sampling points

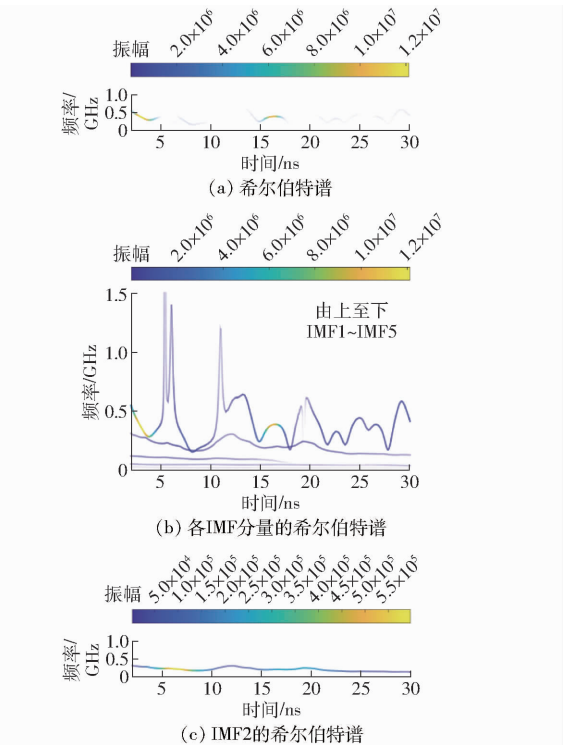


图 5 希尔伯特谱及 IMF 分量

Fig. 5 Hilbert spectrum and IMF component

下依次为分量 IMF1 ~ IMF5。图 5b 中,IMF1 主要由噪声信号构成,其瞬时频率变化幅度较大,由于土体结构的不稳定性,导致干扰强度较大,会出现较多高于探地雷达主频信号的分量,在分析中,需进一步剔除这部分噪声;IMF2 信号主要在探地雷达的主频信号内波动,其随着时间处于不断的波动之中,可以较为准确地反映电磁波在土体结构中传播时的频率变化情况;而其余分量主要为低频信号,由于其主要表示电磁波在长时间下的衰减变化,低频分量会随时间逐步趋近于 0,无法反映土体结构中频率的动态变化,故需舍去。在进一步剔除噪声及低频信号的干扰下,选取 IMF2(图 5c)作为瞬时频率变化曲线进行后续分析。

为建立最佳的反演模型,提取 10 个采样点雷达

信号时域范围内的 IMF2 瞬时频率平均值,结合采样点实测相对介电常数,通过线性、指数、多项式等多种回归方法建立瞬时频率平均值和相对介电常数的关系模型(表 1)。

表 1 不同回归方法 IMF2 瞬时频率平均值和相对介电常数关系模型反演结果对比

Tab. 1 Comparison of inversion results of instantaneous frequency average of IMF2 and relative dielectric constant relationship models with different regression methods

回归方法	计算公式	R^2
指数	$y = 579.74e^{-0.011x}$	0.875 6 **
线性	$y = -0.138 1x + 59.519$	0.886 2 **
多项式	$y = 0.000 3x^2 - 0.342 3x + 94.213$	0.887 0 **

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

从表 1 可以看出,基于不同回归方法建立的瞬时频率平均值和相对介电常数关系模型中,多项式回归所构建的模型精度较其他回归方法高,建模集决定系数 R^2 为 0.887 0。根据模型可知,相对介电常数与瞬时频率平均值呈负相关关系,随着瞬时频率平均值的增大,相对介电常数随之减小,这与罗古拜等^[11]的研究结果一致。

为验证模型在不同覆土层厚度探测下的精度,提取每个小区的探地雷达点测数据,将其希尔伯特谱的 IMF2 的瞬时频率平均值代入模型求取覆土层相对介电常数;根据式(11)计算覆土层厚度,并与实测值进行对比(表 2)。

由表 2 可知,所有采样点的覆土层厚度探测相对误差均在 4% 以下。在覆土层厚度 40 cm 处探测误差主要在 1 cm 左右,相对误差主要分布在 1.5% 左右;在覆土层厚度 60 cm 小区,相对误差较覆土层厚度 40 cm 的小区大,出现了 2% 以上的相对误差;在覆土层厚度 80 cm 小区相对误差均在 2% 之上。说明随着覆土层厚度的增加,探测精度会有所下降,李俐等^[25]在利用探地雷达进行土层分层研究时发

表 2 不同覆土层厚度下实测值与反算结果对比

Tab.2 Comparison of measured values and back-calculated results under different overburden thicknesses

覆土层厚度/cm	样点序号	相对介电常数		覆土层厚度/cm		相对误差/%
		实测值	反算值	实测值	反算值	
40	1	8.95	8.65	35.2	35.8	1.70
	2	12.03	12.38	35.4	34.9	1.41
60	3	13.93	14.67	50.5	49.2	2.36
	4	14.02	13.74	50.1	50.6	1.00
80	5	15.53	14.37	60.8	63.2	3.95
	6	15.70	14.87	61.9	63.6	2.75

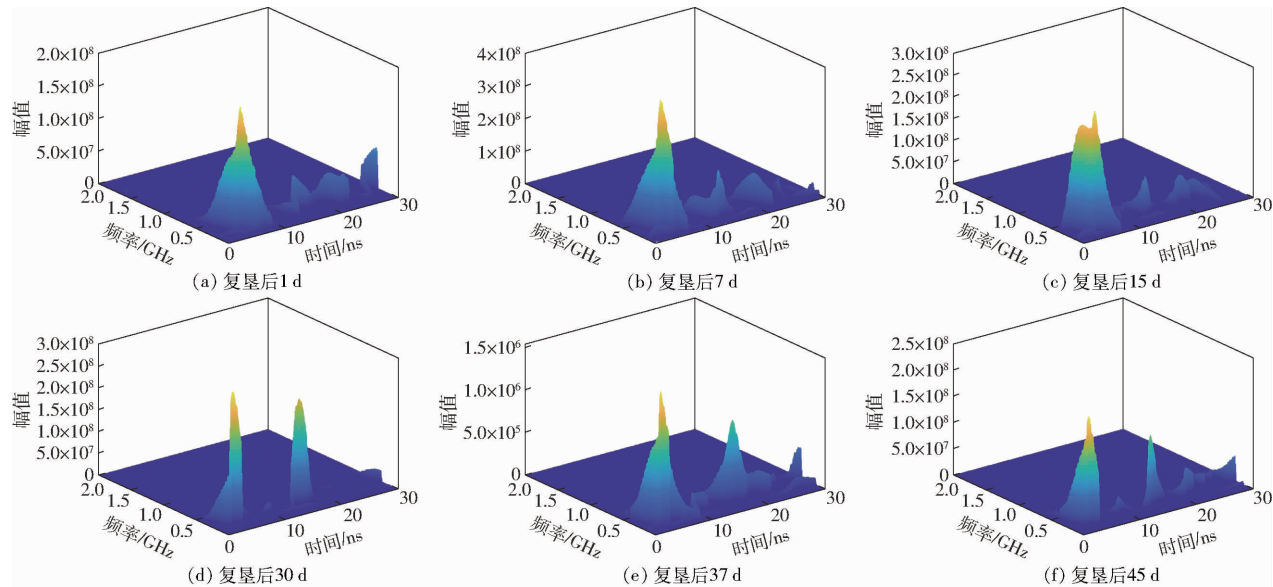


图 6 覆土层厚度 40 cm 不同复垦时间下的希尔伯特时频谱图

Fig.6 Hilbert time-frequency diagrams at different reclamation time with overburden thickness of 40 cm

表 3 不同复垦时间下覆土层厚度实测值与反算值对比

Tab.3 Comparison between measured and back-calculated values of overburden thickness at different reclamation time

覆土层厚度/cm	复垦时间/d	相对介电常数	覆土层厚度/cm		相对误差/%
		反算值	实测值	反算值	
40	1	18.58	40.0	39.4	1.50
	7	16.53	39.8	40.5	1.75
	15	14.79	39.5	39.5	0.13
	30	24.45	35.2	36.6	4.09
	37	31.72	35.0	36.5	4.20
	45	24.06	34.8	36.0	2.86
60	1	10.58	60.0	59.3	1.25
	7	14.87	58.3	59.7	2.16
	15	13.81	57.5	56.5	1.67
	30	12.56	51.0	53.4	4.78
	37	22.06	49.6	48.7	1.90
	45	17.12	49.5	46.8	5.37
80	1	11.59	80.0	77.0	3.74
	7	13.28	76.1	77.8	2.21
	15	15.74	69.2	72.3	4.45
	30	12.73	66.4	74.3	11.90
	37	18.23	62.1	65.1	4.75
	45	17.82	61.9	66.2	6.96

现,探地雷达对 70 cm 处的土层检出效果较差,因此在覆土层厚度 80 cm 处的相对误差会比较大。

2.2 不同复垦时间下覆土层厚度变化探测

对于不同复垦时间下的探地雷达数据,分别利用 HHT 方法获取覆土层的时域范围(图 6)、利用 IMF2 瞬时频率平均值获取电磁波在覆土层的相对介电常数,然后计算不同复垦时间下的覆土层厚度(表 3)。

图 6 中,无论何种复垦时间节点,第 1 个峰值位置均为直达波信号。初次探测中,信号起伏较为稳

定,有多个峰值产生,且所有峰值大致相同,由于初次探测时间较早,土层压实力度较小,土层中孔隙较多,所以导致两层之间介电常数差异较小且杂波信号较多,从而产生较小振幅及多个峰值,由于本文以第 1 分界面作为分析,可以获取在 13 ns 处出现的反射峰值作为分界面位置;在随后的探测中,直达波后的第 1 个峰值处的响应明显增强,主要原因是随着复垦后时间的推移,复垦土体内部孔隙度减小,容重和含水率增多^[26],导致上下界面的介电常数差异不断增加,在复垦后 30 d 的探测中,达到峰值,分界面的时域位置由复垦 7 d 的 12 ns 推迟至复垦 30 d 后的 15 ns;而在复垦 30 d 后的探测中,振幅略有减弱,由于土层内水分趋于饱和^[27],后续水分的蒸发与下渗作用会影响土体内部介电常数的减小^[28],电磁波在覆土层中的传播速度变快,分界面处的时域位置由复垦 30 d 后的 15 ns 提前至复垦后 45 d 的 13 ns。

不同覆土层厚度下希尔伯特谱变化规律总体一致,仅在分界面时域位置存在差异,覆土层厚度 60 cm 小区分界面的时域位置主要分布在 17 ~ 20 ns

之间,覆土层厚度 80 cm 小区分界面的时域位置主要分布在 20 ~ 25 ns 之间。

由表 3 可知,随着复垦后时间的推移,3 个小区内的相对介电常数总体呈上升趋势,均在复垦后 37 d 达到最大值。覆土层厚度 40 cm 小区在复垦初期(1 ~ 15 d)的探测精度较高,与实测值相比,相对误差不足 2%,在复垦 30 d 后的探测中,出现了较大的误差,达到 4% 以上;覆土层厚度 60 cm 小区,与 40 cm 小区初期探测精度较为接近,较大误差同样出现在复垦 30 d 之后,最大相对误差达到 5.37%;覆土层厚度 80 cm 小区,其最大相对误差为复垦后 30 d 的 11.90%,主要可能因为覆土层较厚,内部噪声干扰信号较强,导致相对介电常数计算结果误差较大,而在其他时间下的探测相对误差皆分布在 7% 以下。综合 3 个小区的探测结果,平均探测的相对误差为 3.65%。3 种不同覆土层厚度小区中,覆土层厚度 80 cm 小区探测精度相对较差,说明本文使用的雷达对于土层较薄的区域探测精度高,不同频率的探地雷达对于土层厚度的探测精度不同^[29],所以后续需结合不同频率的探地雷达进行分析。

2.3 覆土厚度探测误差源分析

随着时间的推移,在同一覆土层厚度下,探地雷达的探测精度会略有下降;随着覆土层厚度的增加,在同一时间下,探地雷达的探测精度也会有所下降。主要原因可能体现在 2 方面:① 在 3 个试验小区处均出现了最后 3 次的实测结果明显低于反算结果的问题,由于随着时间的推移,覆土层的下沉引起了填充层与覆土层分界面处的混合现象^[30],模糊了分界面的位置,引起时域上的信息误差,而本文主要以初始标定位置作为测量起点,从而导致反算值与实测值之间有所差异。② 由于含水率及容重的变化引起电磁波频率的衰减,根据 DOBSON 等^[31]提出的土壤介电常数模型,随着含水饱和度及容重的增大,土体结构内的介电常数也随之增大,雷达电磁波能量衰减明显,峰值频率会发生“漂移”。图 7a 为在同一覆土层厚度下随着沉降过程变化的频谱图,由于不同覆土层厚度下的峰值频率变化规律一致,以覆土层厚度 40 cm 小区为例进行分析,图 7b 为同一时间不同覆土层厚度下的频谱图。由图 7 可知,随着复垦后时间或覆土厚度的增加,峰值频率逐渐向低频移动,说明在传播过程中,雷达受到了较多的干扰,随着电磁波弛豫时间缩短,瞬时频率的变化波动更加复杂,从而影响了介电常数的推算,进而导致误差升高。

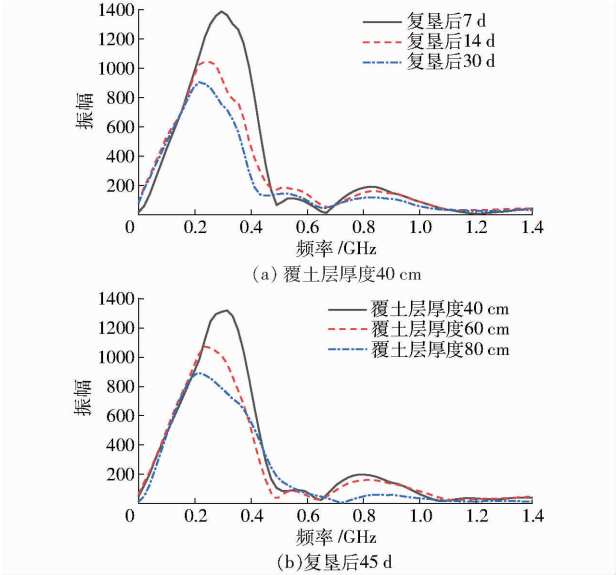


图 7 不同复垦时间及覆土层厚度下的频谱变化曲线

Fig.7 Spectrum variation diagrams at different reclamation time and reclamation thickness

3 讨论

随着大面积复垦土地开始出现,覆土层厚度的变化是影响作物生长的重要因素。而大面积的复垦土体监测费时费力,并不适用。探地雷达作为一种无损、大面积探测的技术手段,在复垦土体动态监测方面中有着极大作用。本文通过在时间序列下对新复垦土体进行多次探测,结合 HHT,将波形数据从一维转至二维,根据成像结果初步获取覆土层和填充层的分界信息;随后建立瞬时频率平均值与介电常数的函数关系推算介电常数,进而获取覆土层厚度变化,为覆土层厚度探测提供技术与理论支撑。

本文运用 HHT,摆脱了传统单一时域或频域分析的缺点。在土体结构成像结果中,可以清晰地获取频率随时间的变化情况,而传统的单一域分析无法将时域和频域结合,会导致最终结果的误差较大。同时通过获取的希尔伯特谱,比传统的单一波形数据更加直观。根据 HHT 获取频率随土层的变化情况,为获取较为准确的频率数据提供了依据。

在进行大范围的复垦监测时,由于电磁波在复杂的复垦土体中传播时的衰减程度不一,不同土壤类型会出现较大差别,KAZUNORI 等^[17]通过利用探地雷达对不同土壤类型进行杂波提取,发现不同土壤类型产生的杂波信号相差很大;另外,不同类型土体结构受自然条件影响不同^[32-33],从而会引起覆土层的下沉情况并不相同,所以在今后的研究需结合不同类型的土壤进行分析。在覆土层厚度动态变化过程中,存在诸多不确定因素,从而为土层厚度测量带来一系列影响,随时间的变化,土体内部结构也处于动态变化中,土体内部的含水率、含盐量、孔隙度

等均会成为影响雷达探测结果的重要因素,容易导致雷达信号噪声较多,影响后续分析^[34-35]。探地雷达在土体结构中传播时,电磁波的衰减也会随着探测深度的增加而不断增大,这也正是在覆土层厚度 80 cm 小区内,探测精度较差的原因。同时,由于频率随时间的渐变性,介电常数也随之变化,本文根据具体理化性质作为介电常数的获取方式,最终结果主要为覆土层的平均介电常数,通过该介电常数计算也会存在一定误差,但这种误差在实际应用中处于可接受的范围。

4 结论

(1)通过利用希尔伯特-黄变换方法可以获取

较为清晰的覆土层所在的时域范围,在不同覆土层厚度下,分界面处的时域位置随着覆土层厚度的增加而向后推移;在同一覆土层厚度下,随着复垦后时间的推移,分界面处的信号响应逐渐增强,其时域位置也随着复垦后时间的推移而变化。

(2)瞬时频率平均值与相对介电常数之间具有良好的相关性,通过多种回归方法建立两者的关系模型中,多项式回归方法建模效果最优,其建模 R^2 达 0.887 0。

(3)所提的覆土层厚度探测方法可以应用于不同复垦时间下的覆土层厚度探测中,其探测精度相对误差平均值为 3.65%,随着覆土层厚度的增加或复垦时间的推移,探测精度均会略有下降。

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): 224-230. SHEN Qiang, ZHANG Shiwen, GE Chang, et al. Hyperspectral inversion of heavy metal content in soils reconstituted by mining wasteland[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 224-230. (in Chinese)
- [2] 程琳琳,李继欣,徐颖慧,等. 基于综合评价的矿业废弃地整治时序确定[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 222-229. CHENG Linlin, LI Jixin, XU Yinghui, et al. Determination of reclamation sequence for mining wasteland based on comprehensive evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 222-229. (in Chinese)
- [3] 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. ZHANG Shiwen, BU Zhongyuan, SHEN Qiang, et al. Resistance and priority analysis of landscape forest fields, lakes, and grass restoration in Dabaoshan mining basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8920-8929. (in Chinese)
- [4] XIA K, XIA S S, SHEN Q, et al. Optimization of a soil particle content prediction model based on a combined spectral index and successive projections algorithm using Vis-NIR spectroscopy[J]. Spectroscopy, 2020, 35(12): 24-34.
- [5] 权鑫,史红伟,蔡强国,等. 室内模拟降雨情形下黄土坡面沉降程度的试验研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 98-106. QUAN Xin, SHI Hongwei, CAI Qiangguo, et al. Experimental study on the settlement of loess slope under indoor simulated rainfall[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2020, 49(2): 98-106. (in Chinese)
- [6] 柴晶,王全九,刘艳丽,等. 自然条件下土壤沉降量与土壤容重、地表糙度间的变化关系[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 261-265. CHAI Jing, WANG Quanjiu, LIU Yanli, et al. The relationship between soil settlement and soil bulk density and surface roughness under natural conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 261-265. (in Chinese)
- [7] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 14-17.
- [8] IMAD A Q, WEI X, ROGER R. Optimization of antenna configuration in multiple-frequency ground-penetrating radar system for railroad substructure assessment[J]. NDT and E International, 2009, 43(1): 20-28.
- [9] 刘万里,马修泽,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. LIU Wanli, MA Xiuzze, ZHANG Xueliang. Dynamic detection technology of extra-thick coal seam thickness based on ground-penetrating radar[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2706-2714. (in Chinese)
- [10] SHAMIR O, GOLDSHLEGER N, BASSON U, et al. Laboratory measurements of subsurface spatial moisture content by ground-penetrating radar diffraction and reflection imaging of agricultural soils[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1667-1676.
- [11] 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. LUO Gubai, CAO Yingui, BAI Zhongke, et al. Soil bulk density difference, ground-penetrating radar feature identification, and simulation for a reclaimed soil profile in the dumping site of an open pit mine[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(4): 441-452. (in Chinese)
- [12] ABDULLAH M S, KARIM H H, SAMUEEL Z W. Estimation of soil burial and pavement thickness using GPR technique (case study)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 856(1): 012043.
- [13] ALI E, PRAMUDITA A A, ARSENO D. Concrete thickness measurement model for GPR[C]//2019 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). IEEE, 2019.
- [14] XU J C, REN Q W, SHEN Z Z. Ground penetrating radar time-frequency analysis method based on synchrosqueezing wavelet transformation[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(1): 315-323.
- [15] BEHESHTI A S B, MALDAR M, DARVISHAN E, et al. Damage detection of offshore platforms using dispersion analysis in HHT frequency spectrum[J/OL]. Structures and Buildings, 2021. doi:10.1680/JSTBU.21.00075.

- [16] 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, 2021, 36(4): 1711–1716.
WANG Chao, LIN Zhenrong, LI Jie. Application of Hilbert–Huang transform in detecting the quality of roadbed by ground-penetrating radar[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(4): 1711–1716. (in Chinese)
- [17] KAZUNORI T, JAN I, HOLGER P, et al. Sensitivity analysis of soil heterogeneity for ground-penetrating radar measurements by means of a simple modeling[J]. Radio Science, 2015, 50(2): 79–86.
- [18] KAZUNORI T, JAN I, HOLGER P, et al. Influence of heterogeneous soils and clutter on the performance of ground-penetrating radar for landmine detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3464–3472.
- [19] 刘晓明, 赵君杰, 王运敏, 等. 基于改进的 STA/LTA 方法的微地震 P 波自动拾取技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 740–745.
LIU Xiaoming, ZHAO Junjie, WANG Yunmin, et al. Automatic picking of microseismic events P-wave arrivals based on improved method of STA/LTA[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2017, 38(5): 740–745. (in Chinese)
- [20] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903–909.
- [21] HUANG N E, SHEN S S P. Hilbert–Huang transform and its applications[M]. New Jersey: WorldScientific, 2014.
- [22] TOSTI F, LUCA B C, ALESSANDRO C, et al. An investigation into the railway ballast dielectric properties using different GPR antennas and frequency systems[J]. NDT and E International, 2018, 93(1): 131–140.
- [23] 柴华友, 柯文汇, 陈健, 等. 规则层状弹性介质中基阶模态瑞利波频散曲线计算新方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4873–4880, 4889.
CHAI Huayou, KE Wenhui, CHEN Jian, et al. A new approach to evaluate dispersion curve of rayleigh waves of the fundamental mode in regularly layered elastic media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4873–4880, 4889. (in Chinese)
- [24] LAI W L, KIND T, WIGGENHAUSER H. A study of concrete hydration and dielectric relaxation mechanism using ground-penetrating radar and short-time Fourier transform[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010(1): 1687–1701.
- [25] 李俐, 付雪, 崔佳, 等. 基于包络检波和 STFT 谱分析的探地雷达土壤分层信息识别[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 316–327.
LI Li, FU Xue, CUI Jia, et al. Soil layer identification based on envelope detector and STFT spectrum analysis of ground-penetrating radar signals[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(2): 316–327. (in Chinese)
- [26] 李玉岐, 张啸地, 翁天泉, 等. 排灌水引起砂土层沉降的宏观试验分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2015, 21(6): 795–802.
LI Yuqi, ZHANG Xiaodi, WENG Tianquan, et al. Macro-meso test analysis of sand subsidence caused by withdrawing and recharging water[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2015, 21(6): 795–802. (in Chinese)
- [27] 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(增刊2): 4259–4266.
YANG Xiaojie, LIU Dongming, WANG Xiaocun. Loading test study on settlement deformation law of deep soft soil layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Supp.2): 4259–4266. (in Chinese)
- [28] 安鹏, 张爱军, 邢义川, 等. 伊犁深厚湿陷性黄土浸水入渗及沉降变形特征分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 557–564.
AN Peng, ZHANG Aijun, XING Yichuan, et al. Analysis of soak infiltration and deformation characteristics for thick collapsible loess in Ili region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 557–564. (in Chinese)
- [29] 张金珠, 邹杰, 王振华, 等. 利用 GPR 多频天线振幅包络平均值法估算滴灌棉田土壤盐分含量[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 99–107.
ZHANG Jinzhu, ZOU Jie, WANG Zhenhua, et al. Estimation of soil salt content in drip irrigation cotton field using GPR multi-frequency antenna amplitude envelope average method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 99–107. (in Chinese)
- [30] 程琦, 张世文, 罗明, 等. 基于探地雷达粉煤灰充填复垦土壤含水率反演[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2159–2167.
CHENG Qi, ZHANG Shiwen, LUO Ming, et al. Inversion of reclaimed soil moisture based on ground-penetrating radar fly ash filling[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2159–2167. (in Chinese)
- [31] DOBSON M C, ULABY F T, HALLIKAINEN M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil—part II: dielectric mixing models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1): 35–46.
- [32] YANG D D, QIU H J, MA S Y, et al. Slow surface subsidence and its impact on shallow loess landslides in a coal mining area[J]. Catena, 2022, 209(P1): 105830.
- [33] WANG R, GAO P, ZHOU E, et al. Experimental detection of the volume of the drip irrigation soil wetted body using ground-penetrating radar[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 76(3): 199–210.
- [34] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 229–236.
WANG Jinman, GUO Lingli, BAI Zhongke, et al. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 229–236. (in Chinese)
- [35] 李光辉, 徐汇, 刘敏. 基于探地雷达杂波抑制与偏移成像的树木根系定位方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 206–214.
LI Guanghui, XU Hui, LIU Min. Tree-root localization method based on migration imaging with clutter suppressed in ground-penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 206–214. (in Chinese)