doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.040

基于微波频时域变换的土壤灌溉湿润锋检测技术

许景辉　李晓斌
(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为有效解决传统 TDR 系统在确定土壤湿润锋位置时带宽小、上升沿时间长、分层界面位置测量误差大等问题,本文在研究 TDR 阻抗测量的基础上,利用微波频域、时域变换理论提出了一种基于便携式矢量网络分析仪的土壤湿润峰测量方法。利用 ADS 仿真分析验证了 TDR 波形重新建模方法,证明了不同阻抗交界面检测的可靠性。通过油水交界面、2 层不同含水率土壤干湿交界面、3 层不同含水率土壤干湿交界面位置的测量,与传统 TDR 方法测得的结果进行对比,结果表明基于便携式矢量网络分析仪建立的微波阻抗反射信号转换模型在实际应用中具有很好的准确性,可为土壤分布式含水率的测定提供理论借鉴。

关键词: 土壤湿润锋; 微波测量; 频时域转换; 便携式矢量网络分析仪
中图分类号: S152.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0371-08　　**OSID**:

Soil Wetting Front Detection Based on Frequency Domain to Time Domain Conversion of Microwave

XU Jinghui　LI Xiaobin
(*College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Determining the location of the soil wetting front is of great significance for optimizing irrigation decision-making and realizing intelligent irrigation. The automatic device for detecting the soil wet-dry interface has not been commercialized at present. A soil wetting front measurement system was proposed with a vector network analyzer based on the research of TDR impedance measurement. Through TDR waveform reconstruction, the shortcomings of traditional TDR systems were effectively solved, such as insufficient bandwidth, long duration of rising edge of pulse and unclear boundary position detection. The reliability of the TDR waveform reconstruction method model was verified by simulation with ADS software. The locations of oil-water interface, dry-wet interface of two layers of soil with different moisture contents, and dry-wet interface of three layers of soil with different moisture contents were measured. The comparison between the results obtained by using the built model and the results obtained by the TDR method demonstrated the accuracy of the measurement. The theoretical simulation results carried out by ADS software showed that the TDR waveform converted from high frequency domain to time domain can accurately measure the position of impedance discontinuities. Through the two-layer and three-layer soil measurement experiments with different water contents, it was shown that this test method can be applied to actual production measurement. The accuracy of the reflection signal conversion model based on potable vector network analyzer in the actual application of determining the location of the soil moisture front provided a theoretical reference for the determination of the distributed soil moisture content.

Key words: soil wetting front; microwave measurement; frequency domain to time domain conversion; potable vector network analyzer

0　引言

湿润锋是指土壤水分下渗过程中,土壤被湿润的先头部位与干土层形成的明显交界面。在湿润锋处,土壤含水率有较大水势梯度,水分将在水势作用下使湿润锋不断下移。IBRAGIMOV 等[1]通过估计

收稿日期: 2021-08-27　修回日期: 2021-10-28
基金项目: 陕西水利科技计划项目(2021slkj-7)和国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)
作者简介: 许景辉(1978—),男,副教授,博士,主要从事农业电气化与农业智能化检测研究,E-mail: x36936@163.com

湿润锋位置改善棉花灌溉计划,灌溉作物水分生产率(ICWP)提高了 12.3%;ADIMASSU 等[2]借助湿润锋的检测降低了辣椒种植过程中的灌水量并提高了产量。确定土壤湿润锋位置对于优化水资源管理[3-5]、评估灌溉时间[6-8]、确定灌溉过程中水分动态运动规律[9-10]、施肥决策[11-12]、水盐运移[13-14]、水土流失[15]等研究具有重要意义。但目前对土壤湿润锋测量还没有自动化装置,急需一种经济、准确的土壤湿润锋测定方法满足实际生产的需要。

目前对土壤湿润锋的相关研究主要以时域反射法(TDR)为主。时域反射法由 TOPP 等[16]提出,是根据电磁波反射原理实现对土壤含水率的测定[17]。LEDIEU 等[18]利用 TDR 与射线法测得的薄层含水率结果进行对比,说明其可以测量薄层土壤含水率。HACHIMI 等[19]提出了估算土壤水力性质和湿润锋的数值方法,计算量较大。TIMLIN 等[20]将迹线仿真方法与非线性优化程序耦合,以拟合 TDR 探针在湿润前沿上方和下方的表观长度以及在湿润前沿下方的土壤介电常数,但精度有限。CUI 等[21]通过对 48 个不同土壤剖面和入渗条件下的入渗情况进行总结,建立了一种基于湿润锋移动特性的一维入渗模型(TCWF)。FAN 等[22]使用 HYDRUS-2D 进行了数值模拟,研究了土壤质地、初始含水率、压头、水分长度和埋深对润湿模式特征的影响,但未实现湿润峰的测定。ASLANNEJAD 等[23]发现水分渗入土壤时,在湿润前沿温度会升高。SUREEPHONG 等[24]采用 FDR 和 RB 传感器实时检测湿润峰位置,但测量精度较差。GERMANN 等[25]利用不同深度探针的 TDR 信号变化来估计湿润锋线的位置。FENG 等[26]提出了一个多截面模型来模拟分层土壤系统中电磁波的传播,对分层土壤样品中的反射波形进行了建模。传统 TDR 技术存在带宽不足、脉冲上升沿持续时间长、与边界位置检测不清楚等问题,需要更高精度的测量方法来提高湿润锋测量精度。

本文利用便携式矢量网络分析仪(VNA)进行土壤浸润线的测定,通过 VNA 测量土壤湿润锋处的反射参数,用数学模型重建 TDR 波形,可以有效提高测量精度,解决土壤湿润锋测量的问题。

1 土壤微波时域频域换算原理

土壤不同位置的阻抗特性不同,当被测处土壤阻抗 Z_L 不等于延长电缆的特性阻抗 Z_0 时,称为阻抗不匹配,土壤被测界面的阻抗不匹配反映为时域反射信号的变化。土壤湿润锋位置前后的含水率有较大变化,当电磁波通过土壤湿润锋界面时,可视为土壤中阻抗不连续交界面,电磁波会有部分能量从被测界面反射回输入端,形成反射信号,剩余的能量会继续传输。

在土壤介电测量中,采用反射系数 Γ 描述电磁波在土壤介质传输过程中遇到不连续阻抗时的反射情况[27],即

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} \tag{1}$$

式中 V_{ref}——反射波振幅

V_{inc}——入射波振幅

TDR 探针埋入土壤后,沿着探针上的每一点分布式阻抗遵守式(1)。对于被测土壤,反射信号的强度取决于信号源阻抗与被测处土壤阻抗的失配程度,此时反射系数的表达式定义为

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{\dfrac{Z_L - Z_0}{Z_0}}{\dfrac{Z_L + Z_0}{Z_0}} = \frac{\dfrac{Z_L}{Z_0} - 1}{\dfrac{Z_L}{Z_0} + 1} \tag{2}$$

由式(2)进一步解出

$$\frac{Z_L}{Z_0} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \tag{3}$$

时域设备的源阻抗 Z_0 为 50 Ω,可以得到土壤阻抗和反射系数之间的关系为

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 50 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \tag{4}$$

如果 2 个阻抗之间的距离小于时域设备激励信号上升时间等效的传播距离的 1/2,测量仪器将无法区分相邻土层湿润锋。在一个上升沿时间内,阶跃信号所传播的距离是 TDR 可分辨的最小阻抗不连续距离,称为 TDR 的分辨率。因此,一台 TDR 设备要获得更高的分辨率,其阶跃信号发生器所发出的阶跃信号上升沿时间需越短越好,这无疑会增加成本。

矢量网络分析仪具有较高的带宽,可将其频域反射信号转换为时域进行表达。首先在时域中构建理想的脉冲信号 v_0,将它作为激励信号经离散傅里叶变换到频域后得到脉冲信号 V_0,公式为

$$V_0(e^{jw}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_0[n] e^{-jwn} \tag{5}$$

式中 $v_0[n]$——时域下的理想激励脉冲信号

n——点数 w——角频率

$V_0(e^{jw})$——频域下的脉冲信号

借助于矢量网络分析仪,可以得到频域下的反射参数 S_{11},将它和脉冲信号 V_0 相乘,得到 $R(e^{jw})$,即

$$R(e^{jw}) = S_{11}(e^{jw}) V_0(e^{jw}) \tag{6}$$

式中 $S_{11}(e^{jw})$——频域下的反射参数 S_{11}

$R(e^{jw})$——S_{11}经脉冲激励下的频域波形

根据时域卷积定理公式

$$S_{11}[n]v_0[n]\leftrightarrow S_{11}(e^{jw})V_0(e^{jw}) \tag{7}$$

式中　$S_{11}[n]$——时域下的反射系数

可在时域中实现对反射信号的激励响应，从而在频域中完成 TDR 波形的分析和建模。通过离散傅里叶逆变换，得到时域中的 $r[n]$，即可得到湿润锋处的时域反射信号。经阻抗转换式(4)可完成对土壤中阻抗随时间变化的分析。$r[n]$计算式为

$$r[n]=\frac{1}{2\pi}\int_{2\pi}R(e^{jw})e^{jwn}dw \tag{8}$$

式中　$r[n]$——$S_{11}[n]$时域卷积下的波形信号

2　VNA 测量湿润锋理论仿真

为了验证算法的正确性，图 1 用理想传输线元件仿真土壤不同湿度下的阻抗，在 ADS(Advanced design system)中设定了 3 个不连续阻抗，分别为 80、20、130 Ω。

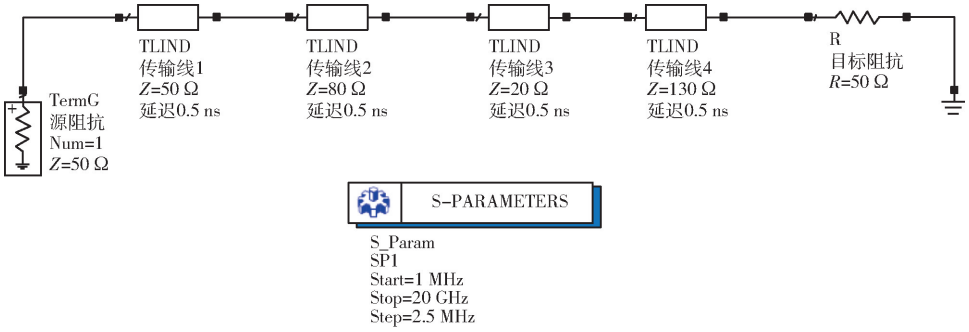

图 1　ADS 反射信号测量仿真电路

Fig. 1　Simulation circuit of ADS reflected signal measurement

设置起始频率为 1 MHz，终止频率为 20 GHz，步长为 2.5 MHz，仿真测得的信号为频域信号，在频域下测得的反射系数 S_{11}的实部和虚部如图 2 所示。

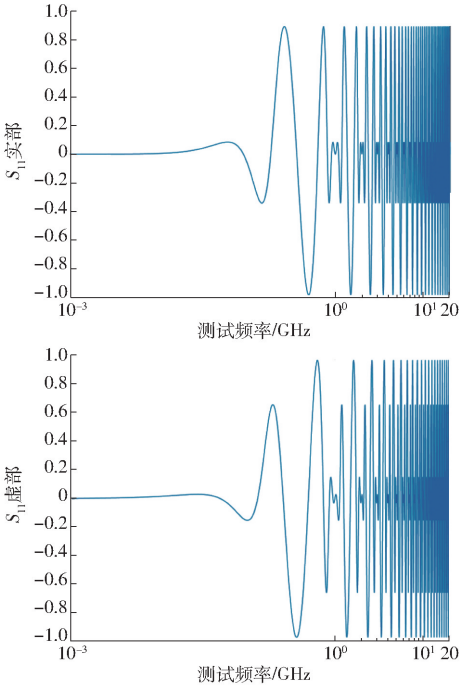

图 2　S_{11}的实部和虚部变化曲线

Fig. 2　Variation curves of real and imaginary parts of S_{11}

S_{11}经离散反傅里叶变换(式(8))得到正弦响应下的时域反射系数，反射系数经式(6)计算得到阻抗，如图 3 所示。

S_{11}与脉冲信号耦合后进行离散反傅里叶变换，通过式(8)得到的脉冲响应下的时域反射系数，如图 4 所示。

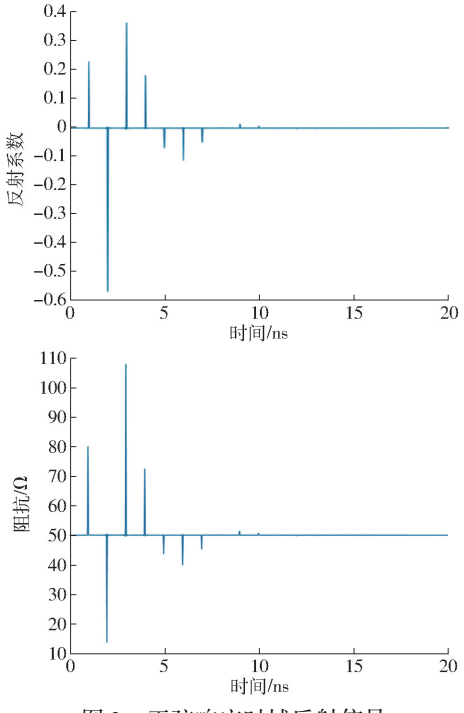

图 3　正弦响应时域反射信号

Fig. 3　Single bit response time-domain reflection signal

图 4 中反射系数跃变时刻反映不同阻抗传输线的连接位置。从图 4 可以看出，第 1 个反射系数变化点发生在阻抗为 50 Ω 的传输线 1 与阻抗为 80 Ω 的传输线 2 连接处，第 2 个反射系数变化点发生在阻抗为 80 Ω 的传输线 2 与阻抗为20 Ω的传输线 3 连接处，第 3 个反射系数变化点发生在阻抗为 20 Ω 的传输线 3 与阻抗为 130 Ω 的传输线 4 连接处。

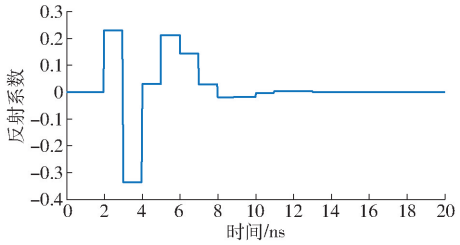

图 4 脉冲响应时域反射系数

Fig. 4 Impulse response time-domain reflection coefficient

ADS 仿真结果表明,通过本算法得到的反射系数变化值和图 1 设定的阻抗变化值相符合,验证了算法的正确性。

3 实验验证

3.1 液体交界面测定

液体与 TDR 探针具有很好的接触,可以用液体材料进行分界面测量效果的实验。食用油和水相对介电常数相差很大,食用油是非极性分子,水是极性分子,二者互不相溶。由于食用油的密度比水小,在带有刻度的烧杯中加入一定量的水和食用油后,静置一段时间会出现分层现象。分层质地材料具有不同的电磁波传播速度[28]。因此,可以采用水油分界面模拟不同湿度的土壤分界面。

测量系统结构示意图如图 5 所示,AnritsuVNA 型号为 MS2028B/2,测量频率范围为 1 MHz ~ 20 GHz,同轴探头的末端为待测的油水混合液时,设置扫描频率范围为 1 MHz ~ 6 GHz,采样点为 2 048 个。

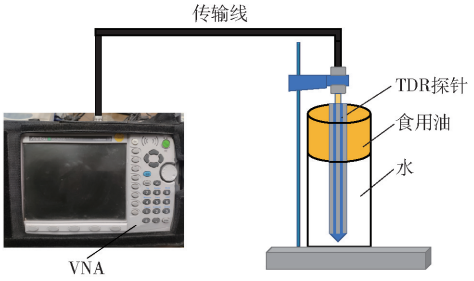

图 5 测量系统结构示意图

Fig. 5 Schematic of measurement system structure

根据电磁波传播理论,电磁波在任意介质中的传播速度 v 为

$$v=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon'\mu_r\dfrac{1+\sqrt{1+\tan^2\delta}}{2}}}\approx\frac{c}{\sqrt{k_a}} \tag{9}$$

式中 c——电磁波速度

ε'——介质介电常数

μ_r——介质磁导率(土壤一般认为是 1)

δ——介电损耗

k_a——视在介电常数

在常温下食用油的介电常数为 2 ~ 4,水的介电常数为 80,故电磁波在油中的传播速度更快,反映在反射系数图中即为电磁波在油中具有更短的传播间距。图 6 基于 VNA 测得的结果很好地反映了这一现象,且随着油水分界面下移,油层面逐渐加厚,电磁波在油中的传播时间也越长。

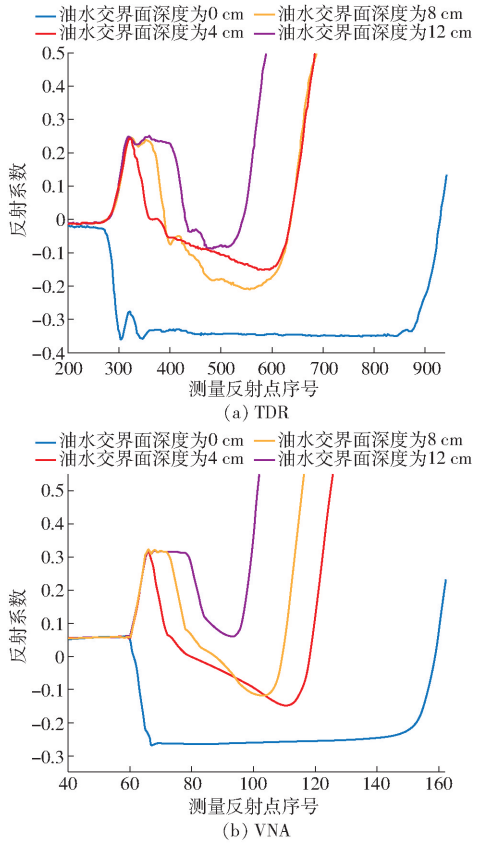

图 6 基于 TDR 和 VNA 的反射系数时域测量结果

Fig. 6 Time-domain measurement results based on TDR and VNA

图 6 结果表明,基于 VNA 构建的时域阻抗可以准确观测到水油分界面的位置。相比于 TDR 设备直接测量得到的波形,基于 VNA 测得的反射系数不仅有着更快的上升沿,在阻抗波动上也较为平滑,说明此种方法有效提高了测量准确性,其交界面测量更加明确。

从图 7 可以看出,油水混合液的反射起始点为第 60 点。测量过程中保持油层和水层的总厚度为 20 cm,通过增加油层厚度使得油水分界面下移,当油层实际厚度分别为 4、8、12 cm 时测得的油水分界面的测量反射点分别在第 66、72、78 点。由此得到电磁波经过深度分别为 4、8、12 cm 的实际油水交界面处所用的时间之比为 6∶12∶18。由图 8 可知,油水分界面的模型测量值与实际测量值的决定系数达到了 1,具有非常好的线性相关性,进一步证明了模型的可靠性。

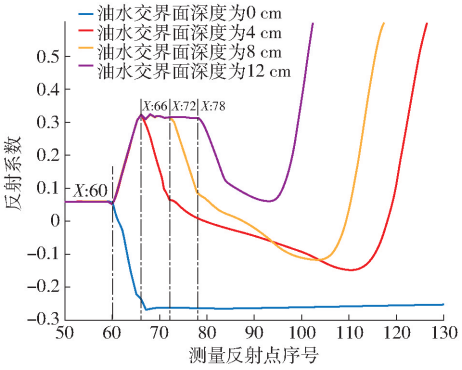

图 7　油水交界面反射系数变化曲线

Fig. 7　Variation curves of reflection coefficient of water-oil interface

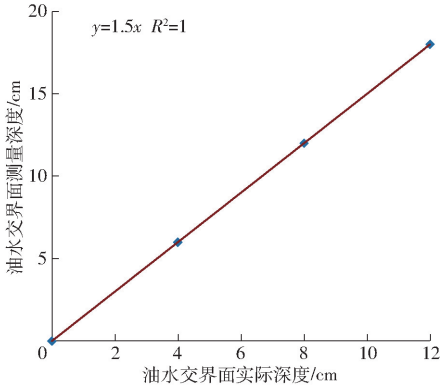

图 8　油水交界面位置测量回归分析

Fig. 8　Regression analysis of oil-water interface position measurement

3.2　双层土壤湿润锋测量

土壤与液体不同，为了验证其在土壤多孔、多相介质中的应用效果，在实验室中进行土壤测试实验。根据 TDR 探针长度，配置了 3 个总长均为 19 cm 的含有不同湿润锋的黄土样品。3 个样品第 1 段长度分别是 4、8、12 cm 的体积含水率为 20% 的湿土，第 2 段长度分别是 15、11、7 cm 的干土。不同体积含水率土壤样品具有不同的介电常数[29]，因而电磁波在其中的传播速度也不同。

测量设置扫描频率范围为 1 MHz ~ 6 GHz，采样点为 2 048 个，测量结果如图 9 所示。本文对于阻抗的测量均通过切线法[30]在反射系数图中找到土壤湿润锋位置。3 个样品的反射起始点均为第 205 点，当第 1 段湿土的深度分别为 4、8、12 cm 时，土壤干湿交界面的位置分别在第 209、217、224 点，终止点分别在第 230、233、234 点。

将测试点进行归一化处理，建立模型测量值与样土物理值的相关关系（图 10），决定系数达到 0.995 8，证明在不同长度湿土测得的干湿交界面位置与实际湿润锋位置具有良好的线性相关性。

3.3　3 层土壤湿润锋测量

为了进一步探讨更多不同含水率下的土壤湿润

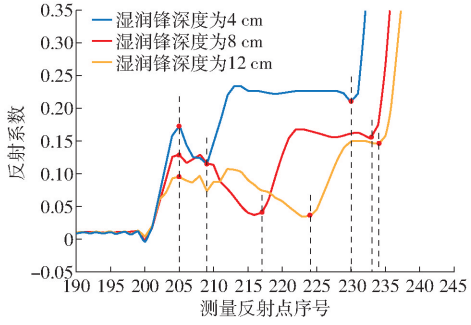

图 9　双层土壤介质测得的反射系数

Fig. 9　Reflection coefficient of two-layer soil medium

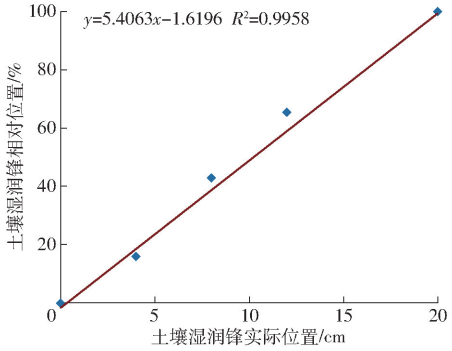

图 10　双层土湿润锋相关性校验结果

Fig. 10　Correlation verification of two-layer soil wetting front

锋位置关系，配置 3 种不同含水率下的黄土样品，每个样品用长度为 6.3 cm 的 PVC 管填充，3 种土壤样品含水率分别为 0、10%、20%。按照不同排列组合方法，使电磁波通过 6 种不同含水率组合（样品 a：0、10%、20%；样品 b：0、20%、10%；样品 c：10%、0、20%；样品 d：10%、20%、0；样品 e：20%、0、10%；样品 f：20%、10%、0）的土壤样品。

测量设置采样频率范围为 1 MHz ~ 16 GHz，采样点为 2 048 个，得到反射系数随时间变化的曲线如图 11 所示。

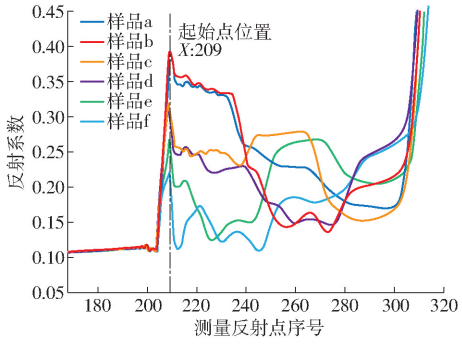

图 11　3 层土壤介质测得的反射系数

Fig. 11　Measured reflection coefficient of three-layer soil medium

不同含水率组合的土壤样品总的含水率相同，曲线中起始点相同，为第 209 点。由于电磁波经过的每一个交界面存在多重反射，导致反射信号变

化有延迟,因此不同曲线的终止点稍有差异,但大致相同。

不同含水率下的土壤阻抗不同,因而反射系数不同。土壤含水率越大,阻抗越小,反射系数越小。不同含水率下的土壤介电常数不同,因此电磁波在 3 个样品中的传播时间不同。土壤含水率越大,电磁波传播速度越慢,从而电磁波停留在样品中的时间也更长,因此不同土壤湿度交界面的位置会随着土壤样品的不同排列组合变化而变化。

3 层土壤样品测得的反射系数如图 12 所示。图中利用切线法标记了不同湿度土壤交界面及终止点的位置,较好地反映了电磁波在 6 组不同样品的 3 层土壤中的传播速度。

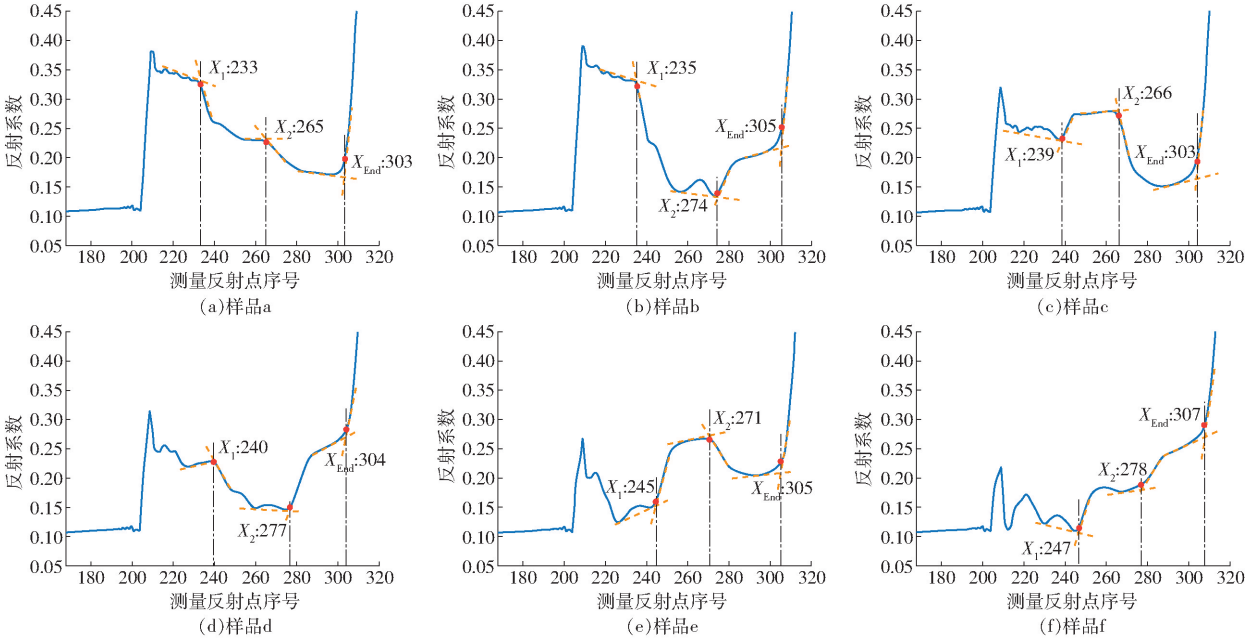

图 12 土壤样品反射系数变化曲线

Fig. 12 Soil sample reflection coefficient variation curves

以样品 a 和样品 b 测得的反射系数结果(图 12a、12b)为例,样品 a 中干土、含水率 10% 下的湿土、含水率 20% 下的湿土测得的反射系数分别为 0.33、0.23、0.18。转换结果中,反射起始点为第 209 点,干土和含水率 10% 下的湿土交界面位置在第 233 点,记为第 1 处湿润锋位置 X_1,含水率 10% 下的湿土和含水率 20% 下的湿土交界面位置在第 265 点,记为第 2 处湿润锋位置 X_2,反射终止点 X_{End} 为第 303 点。据此得到电磁波在干土、含水率 10% 下的湿土和含水率 20% 下的湿土中的滞留时间之比为 12∶16∶19。

同样地,样品 b 中干土、含水率 20% 下的湿土、含水率 10% 下的湿土测得的反射系数分别为 0.33、0.12、0.21。转换结果中,反射起始点位置不变,第 1 处湿润锋位置在第 235 点,第 2 处湿润锋位置在第 274 点,反射终止点为第 305 点。据此得到电磁波在干土、20% 含水率下的湿土和 10% 含水率下的湿土中的滞留时间之比为 26∶39∶31。

考虑到配置每个土壤样品过程中 3 块样土的长度均为 6.3 cm,因而土层实际厚度之比为 1∶1∶1。由于干土的介电常数最小,且基本不受频率变化影响,湿土中含水率越大介电常数越大,因而电磁波在干土中传播速度最快,滞留时间最短,在含水率 20% 土壤样品中传播速度最慢,滞留时间最长,反映在图中即为干土所占的采样点数最少,含水率 10% 下的湿土所占采样点数适中,含水率 20% 下的湿土所占采样点数最多,再考虑到湿土介电常数会受频率的影响而产生一定变化,因而样品 a、b 电磁波滞留时间之比符合实际规律。同理,样品 c ~ f 的测试结果分析可以依次类推,电磁波在同一种土壤下不同含水率的土层中传播速度之比均在 1∶1∶1左右。

为了进一步分析转换结果和实际湿润锋位置的相关性,将所有 3 层土壤样品的测试点进行归一化处理,建立模型测量值与样土物理值的相关关系(图 13),证明 3 种不同含水率土壤在 6 种排列组合下测得的干湿交界面位置与实际湿润锋位置具有良好的线性相关性。

3.4 测量的适应性分析

由于实际灌溉中常见的土壤干湿结构为上层湿土,下层干土,在水分变化规律相同的基础上,将 2 层土壤样品湿润锋归一化后的结果与 3 层土壤样

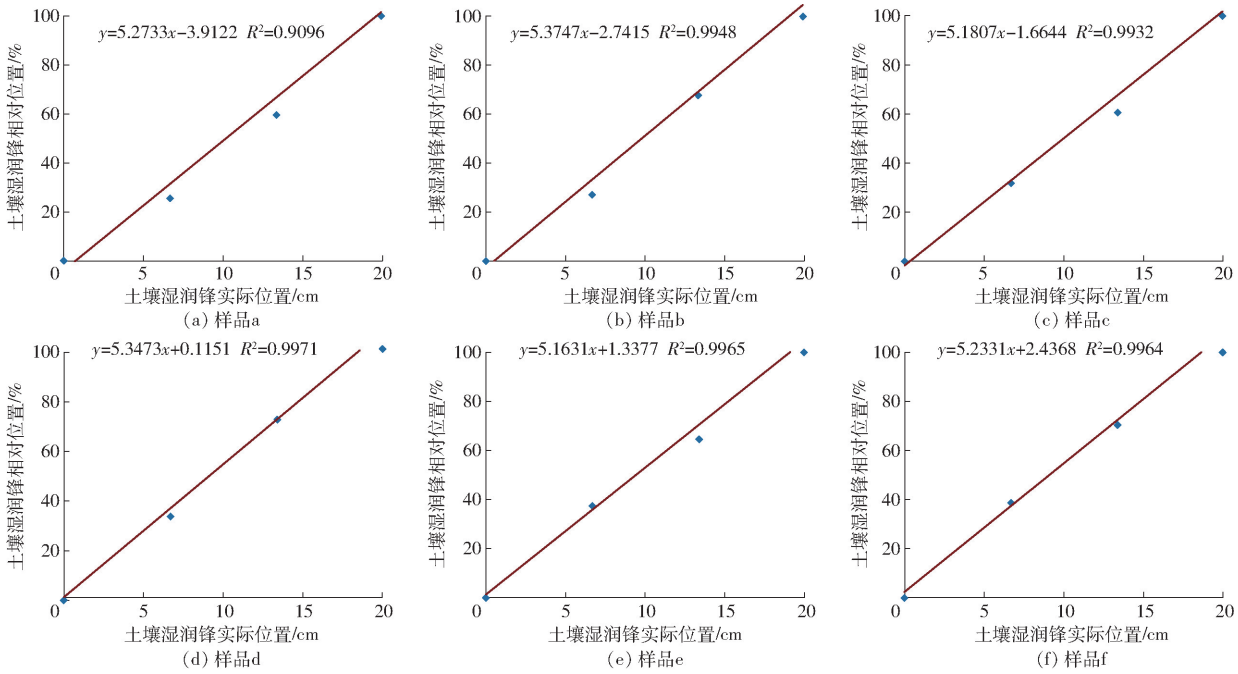

图 13　3 层土壤样品湿润锋相关性校验结果

Fig. 13　Wetting front correlation verification results of three-layer soil samples

品 f 湿润锋归一化后的结果进行相关性校检(图 14),决定系数达到 0.993 4。本研究在 2、3 层的结构样品中均证明了基于 VNA 的模型测量方法具有良好的线性相关性,证明了基于 VNA 测得的土壤湿润锋位置与实际湿润锋位置在土壤含水率变化趋势相同情况下具有良好的适应性。

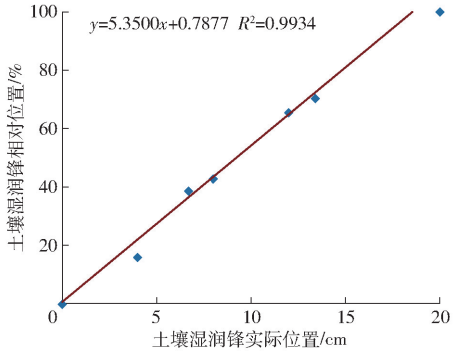

图 14　湿土-干土湿润锋相关性校验结果

Fig. 14　Correlation verification of wet－dry soil wetting front

4　结论

(1)基于频时域变换的测量方法中,通过 ADS 软件进行理论仿真结果表明,由高频频域转换成时域的 TDR 波形能够准确地测量阻抗不连续点的位置。油水交界面的测量值与实际测量值的决定系数达到了 1,具有非常好的线性相关性,表明模型的可靠性。

(2)通过 2、3 层不同含水率的土壤测量实验,表明本实验方法可应用于实际生产测量中。将 2、3 层土壤测试点进行归一化处理,建立模型测量值与样土物理值的相关关系,在不同土壤含水率样品组合下测得的干湿交界面位置与实际湿润锋位置的决定系数均大于 0.99,具有良好的线性相关性。

(3)基于频域变换的湿润锋测量中,选用较大频率范围、较多采样点测量时会提高测量精度。本文方法可为土壤分布式含水率的测定提供理论借鉴。

参　考　文　献

[1] IBRAGIMOV N, AVLIYAKULOV M, DURDIEV N, et al. Cotton irrigation scheduling improvements using wetting front detectors in Uzbekistan[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106538.

[2] ADIMASSU Z, BALANA B B, APPOH R, et al. The use of the wetting front detector as an irrigation-scheduling tool for pepper production in the Upper East Region of Ghana: evidence from field experiment and farmers' perceptions[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(4): 696－713.

[3] LEUTHER F, WELLER U, WALLACH R, et al. Quantitative analysis of wetting front instabilities in soil caused by treated waste water irrigation[J]. Geoderma, 2018, 319(2): 132－141.

[4] SHIRI J, KARIMI B, KARIMI N, et al. Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: multi criteria assessment of soft computing models[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585(5－6): 124792.

[5] 王策, 张展羽, 陈晓安, 等. 基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J]. 农业机械学报,2021, 52(10):314－326,348.
WANG Ce, ZHANG Zhanyu, CHEN Xiaoan, et al. Dual-permeability model for crack preferential flow based on principle of

water volume balance and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10): 314 - 326,348. (in Chinese)
[6] STIRZAKER R J, MAEKO T C, ANNANDALE J G, et al. Scheduling irrigation from wetting front depth[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 306 - 313.
[7] STIRZAKER R, HUTCHINSON P. Irrigation controlled by a wetting front detector: field evaluation under sprinkler irrigation [J]. Soil Research, 2005, 43(8): 935 - 943.
[8] STIRZAKER R. When to turn the water off: scheduling micro-irrigation with a wetting front detector[J]. Irrigation Science, 2003, 22(3): 177 - 185.
[9] SUBBAIAH R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation[J]. Irrigation Science, 2013, 31(3): 225 - 258.
[10] 岳海英,李援农. 滴灌土壤湿润体含水率分布规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(2):137 - 139.
YUE Haiying, LI Yuannong. Experimental study on distribution rule of soil moisture in wetting front under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010,29(2):137 - 139. (in Chinese)
[11] LI J, ZHANG J, RAO M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(2): 89 - 104.
[12] HAYNES R. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops[J]. Fertilizer Research, 1985, 6(3): 235 - 255.
[13] SKINNER A J, LAMBERT M F. An automatic soil pore-water salinity sensor based on a wetting-front detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 11(1): 245 - 254.
[14] 孙燕, 王建, 王全九, 等. 生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2022,53(1):302 - 310.
SUN Yan, WANG Jian, WANG Quanjiu, et al. Effect of biochemical fulvic acid on water and salt transport characteristics in saline-alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(1):302 - 310. (in Chinese)
[15] LIU H, LEI T, ZHAO J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1 - 2): 24 - 32.
[16] TOPP G C, DAVIS J, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574 - 582.
[17] TOPP G, DAVIS J, ANNAN A. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4): 672 - 678.
[18] LEDIEU J, DE RIDDER P, DE CLERCK P, et al. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1986, 88(3 - 4): 319 - 328.
[19] HACHIMI M, MASLOUHI A, QANZA H, et al. Numerical methods for estimating the soil hydraulic properties and the wetting front in the soil[J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52(11): 1402 - 1413.
[20] TIMLIN D, PACHEPSKY Y. Infiltration measurement using a vertical time-domain reflectometry probe and a reflection simulation model[J]. Soil Science, 2002, 167(1): 1 - 8.
[21] CUI G, ZHU J. Infiltration model based on traveling characteristics of wetting front[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(1): 45 - 55.
[22] FAN Y W, HUANG N, ZHANG J, et al. Simulation of soil wetting pattern of vertical moistube-irrigation[J]. Water, 2018, 10(5): 601.
[23] ASLANNEJAD H, TERZIS A, HASSANIZADEH S M, et al. Occurrence of temperature spikes at a wetting front during spontaneous imbibition[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1 - 15.
[24] SUREEPHONG P, WIANGNAK P, WICHA S. The comparison of soil sensors for integrated creation of IOT-based wetting front detector (WFD) with an efficient irrigation system to support precision farming[C]//2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT), 2017: 132 - 135.
[25] GERMANN P F. Shape of time domain reflectometry signals during the passing of wetting fronts[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(2): 1 - 5.
[26] FENG W, LIN C P, DESCHAMPS R, et al. Theoretical model of a multisection time domain reflectometry measurement system[J]. Water Resources Research, 1999, 35(8): 2321 - 2331.
[27] BOGLIONE L, WEBSTER R. Unifying interpretation of reflection coefficient and Smith chart definitions[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(12): 1479 - 1487.
[28] CHAN C Y, KNIGHT R J. Laboratory measurements of electromagnetic wave velocity in layered sands[J]. Water Resources Research, 2001, 37(4): 1099 - 1105.
[29] ROTH C, MALICKI M, PLAGGE R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR[J]. Journal of Soil Science, 1992, 43(1): 1 - 13.
[30] 沈绍祥, 冯炜, 纪奕才, 等. TDR 波形传输时间的切线法判定与实现[J]. 科学技术与工程, 2009,9(24): 7537 - 7541.
SHEN Shaoxiang, FENG Wei, JI Yicai, et al. Determination and realization of tangent line method for TDR waveform transmission time[J]. Science Technology and Engineering,2009,9(24): 7537 - 7541. (in Chinese)