

基于低频滤波法的 T-TDR 含水率测量方法研究*

许景辉^{1,2} 马孝义¹ Sally D Logsdon³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 美国农业部农业研究局国家农业与环境实验室, 埃姆斯 IA 50011-3120)

摘要: 为了解决 T-TDR (Thermo-time domain reflectometry) 探针短, 土壤含水率测量效果差等技术问题, 提出了一种低频滤波法 LFF (Low frequency filter) 进行 TDR 波形分析的计算模型。通过对 TDR 波形快速傅里叶变换, 得到组成 TDR 波形的频谱, 对其低频滤波后重新快速傅里叶反变换, 可实现 LFF 变换。试验通过 4 种土壤, 每种 5 个含水率的 20 个土样进行测试, 通过 LFF 法和传统 WINTDR 法对比, 结果表明 LFF 法具有较好的计算结果, 其与干燥法的决定系数 R^2 达 0.983 5。LFF 法不仅有效提高了 T-TDR 短针土壤含水率的测试精度, 还简化了土壤含水率测试校验程序, 提高了测试效率。

关键词: 土壤 含水率 测量 低频滤波法 热脉冲-时域反射

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0172-05

引言

T-TDR (Thermo-time domain reflectometry) 是一种土壤多参数传感器^[1-2]。它能够同时、同地测定土壤含水率、电导率、容积热容量、热扩散系数以及蒸发量^[3-4], 是监测土壤水热动态过程空间和时间变异性的先进手段之一。Ren 等用其进行了土壤含水率测量^[5]。Liu 等用其测定了土壤颗粒密度^[6]。陆森等用其测量分析了土壤热导率误差, 结果表明 T-TDR 有很好的测量精度^[7]。Heitman 等根据土壤热平衡理论提出了一种基于 T-TDR 的土壤水分蒸发测量方法, 认为可以利用该技术自动测量土壤含水率及蒸发量^[8-9]。Xiao 等用多针 T-TDR 测定了田间玉米覆盖和裸地土壤蒸发量, 与波文比法 (BREB) 进行了比对, 认为两者的测量结果基本一致^[3]。

T-TDR 传感器由热探针和 TDR 探针组合而成。然而为了保证土壤热特性测量的精度, 其 4 cm 长度探针的设计却影响了 TDR 的测量精度, 电磁噪声、短探针特有的电磁反射叠加等使其土壤含水率测量精度较差或不稳定^[1,10]。对于短针 TDR 测量, Lin 曾提出用频域法解析 TDR 反射点, 以提高 TDR 测量精度^[11]。Jones 提出用 SFF 等办法提高短针 TDR 的测量精度。但这些方法计算繁琐, 很难应用

于实际之中。针对短针 T-TDR 含水率测量精度较差及使用前探针电气长度校准复杂等问题, 本文提出一种针对 TDR 波形进行低频滤波的 LFF (Low frequency filter) 方法。

1 材料和方法

1.1 TDR 测量土壤含水率的传统方法

TDR 是通过测量电磁波通过某介质传播时间进行该介质表观介电测量的电磁测量技术^[12]。TDR 测量精度取决于波形起始点和末端反射点的精确测定^[13]。TDR 起始点可由探针根部短路法精确确定, 而末端反射点需通过相应技术手段来完成^[10]。由于 TDR 末端反射点波形复杂, TDR 探针末端反射点确定精确度是 TDR 测量的关键^[14-15]。目前广泛采用的 TDR 分析软件均通过切线交叉法确定探针末端反射点 (图 1)^[10]。从图 1 可以看到, 纯水中的 TDR 波形末端反射点 c 是通过切线 a 和切线 b 的交叉点进行确定的。当 TDR 电缆较长或在非均匀土中测量时, 电磁波多次反射造成的噪声会干扰 TDR 波形底部平整度, 造成 TDR 探针末端切线计算错误或产生较大误差, 影响 TDR 测量精度^[10,16]。对于 T-TDR 的 4 cm 探针来说, 传统方法计算土壤含水率的效果不佳, 需寻求新的方法予以解决。

收稿日期: 2014-01-21 修回日期: 2014-02-26

* 国家自然科学基金资助项目 (51309193)、高等学校学科创新引智计划 (111 计划) 资助项目 (B12007)、陕西省农业攻关资助项目 (2012K02-15) 和西北农林科技大学基本科研业务费资助项目 (QN2011128)

作者简介: 许景辉, 博士生, 讲师, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: x36936@gmail.com

通讯作者: 马孝义, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: xiaoyimasl@yahoo.com.cn

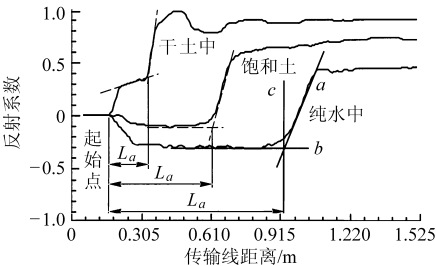


图 1 TDR 波形及探针末端反射点确定方法^[14]

Fig.1 TDR waveform and method to determine reflection point

1.2 低频滤波 LFF 法原理

TDR 波形是由电磁波反射系数离散序列组成的。对其进行快速傅里叶变换 (FFT) 后,可得到 TDR 波形的频谱组成^[17]。由傅里叶变换原理可知,TDR 时域波形可分解为不同频率的正弦波,决定 TDR 波形局部变化即反射点位置一般由高频组成,而决定 TDR 波形整体趋势变化一般由低频组成。若对 TDR 变换后波形进行低频滤波,然后用快速傅里叶反变换,那转换后的 TDR 波形将突出细部波形起伏,使得反射点变化更为剧烈,便于反射点的寻找^[17]。同理,低频滤波后的反变换也将影响 TDR 波形的整体变化趋势,研究此趋势在 LFF 前后变化的关系,也将发掘出新的 TDR 介电计算方法。

对 TDR 波形进行低频滤波变换需要快速离散傅里叶变换 FFT(Fast Fourier transtorm)。FFT 是离散傅里叶变换(DFT)的一种快速计算方法。傅里叶变换后进行时域抽样、时域截断、频域截断等步骤,即可得到^[18]

$$\text{FFT}\{X[n]\} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

$(n=0,1,2,\cdots;k=0,1,2,\cdots,N-1)$

(1)

式中 N ——TDR 采样点数

$x[n]$ ——时域测量序列

$X[n]$ ——频域测量序列

对 FFT 变化后的频域信号进行低频滤波,滤波后的信号再进行快速傅里叶反变换 IFFT,可重新在时域范围内审视 TDR 波形变化趋势。IFFT 的计算表达式为

$$\text{IFFT}\{x[n]\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

(2)

1.3 试验方案

为了检验 LFF 方法在 TDR 测量中的精度,通过 4 种土壤进行试验。进行试验的 TDR 传感器为 T-TDR 传感器,其探针长度为 4 cm,探针间距为 6 mm。其他设备有 Techtronic 公司的 1502C 型 TDR 检测仪、XB224 型称量天平、Imperial IV 型干燥箱。试验在美国农业部 National Laboratory for Agriculture and the Environment 实验室进行。为了分析土壤结构、

土壤质地等对土壤介电极化的影响,试验选用 4 种土壤的粘粒和砂粒质量分级各有不同,在一定程度上代表了农田典型土壤(表 1)。土样自然风干后,用 18 目筛子(孔径 1 mm)过筛,然后放入 105℃ 干燥箱干燥 24 h,干燥后的土样装入密封塑料袋中保存备用。根据 4 类土壤各自密度,计算并配比 5%、10%、15%、20%、25% 体积含水率的土样各 5 份。试样装入 PVC 管(管子高 80 mm,直径为 60 mm)中进行试验。每个土样实际体积含水率通过干燥法进行实测获得^[19],即

$$\theta_v = \frac{m_w \rho_b}{m_s \rho_w}$$

(3)

式中 m_w ——水的质量 m_s ——干土质量
 ρ_b ——土壤填装密度 ρ_w ——水密度

表 1 试验用土的质地和密度

Tab.1 Particle sizes and densities of soils

土壤名称	粘粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%	填装密度/ (g·cm ⁻³)
Hanlon	9.76	16.29	73.94	1.36
Till	20.34	30.26	49.41	1.30
Loess	27.15	69.79	3.06	1.30
Clarinda	54.31	36.88	8.81	1.28

1.4 试验步骤

20 个样品分别用 1502C 型检测仪进行测量,TDR 波形通过 WINTDR 软件读入计算机,每个波形由 251 个反射系数值组成。WINTDR 中 Dist/Div 设置为 0.05 m, Cursor 值根据 TDR 测水波形确定。TDR 波形通过 Matlab 编程进行 LFF 变换。试验通过传统方法、LFF 滤波法和干燥法测量土壤含水率,通过对比了解 LFF 滤波法进行 TDR 测量的优劣,其中 WINTDR 是传统 TDR 测量方法的重要代表,因此本文用 WINTDR 法表示传统 TDR 测量方法。

LFF 滤波法进行测量时,需有标准波形进行参照,根据传统 TDR 探针校验方法,本文选用空气中 TDR 波形和去离子水中 TDR 波形作为 0% 和 100% 含水率的波形参考^[20]。由于这 2 个波形为参照波形,因此可在土样测量前后测取,由于 LFF 法能自动进行不同含水率下的 TDR 波形比对,因此无需 TDR 测量前的探针电气长度计算,大大减小了 TDR 测量的繁琐性。

为了标准试验程序,本文试验步骤如下:首先测取空气和去离子水的 TDR 波形作为参照波形,然后测量土样 TDR 波形,将测取数据 LFF 变换后,选取低频滤波后的 TDR 波形起始点为计算数据,对参照波形和测量波形起始点归一化处理后,用此点计算土样含水率。

2 结果与分析

图 2 为 LFF 变换前后波形对比图,图中实线为变换前波形,虚线为 LFF 变换后波形。从图中可以看到,变换前、后的 TDR 波形在整体变化趋势上有所改变,但 TDR 反射点位置并未改变,这说明 LFF 对 TDR 波形反射点测定没有影响。但 LFF 变换后的虚线表明,土样和去离子水的探针末端波形变化更为显著,易于通过切线交叉法确定末端反射点,LFF 利于 TDR 含水率计算。同时,从 TDR 波形起点反射系数值来看,LFF 变换前、后,其数值有很大变化。变换前,不同介质 TDR 波形起点融为一体,此线为 TDR 同轴电缆的阻抗值。测量使用同一 TDR 传感器,排除测量误差外,不同 TDR 波形的起点是重合的。但 LFF 后,TDR 起点值有了很大变化,而且彼此比率值与含水率有一定关系。产生此现象的原因主要是,构成 TDR 波形的低频频率过滤后,决定 TDR 总体趋势变化的因素被去除,而决定 TDR 波形细部变化的高频部分仍然存在,使得 TDR 起点数值在变换前后有较大变化。

由于 TDR 波形变化趋势受多种因素影响,目前很难通过某一波形分析软件准确确定其末端反射点,但从图 2 中 TDR 起点 LFF 变换前、后的差别来看,如果将其值进行归一化处理,将土样 LFF 变换值与空气和水的 LFF 变换值进行对比计算,可以快速确定土壤体积含水率。

图 3 为干燥法、LFF 法和传统 WINTDR 法测量

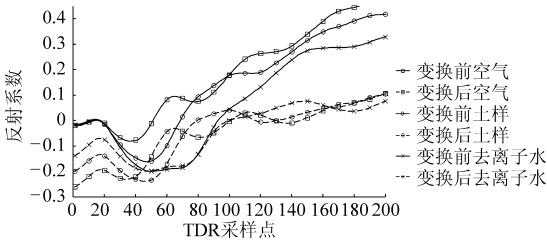


图 2 LFF 法变换前后 TDR 波形对比

Fig. 2 Chart of TDR waveform with LFF transformation

土样的结果对比。从图中可看到,4 种土壤的 LFF 法都具有较好的测量结果,其精确度比传统 WINTDR 波形分析法好。从 4 种土壤测量结果来看,LFF 波形分析法忽略了对 TDR 波形末端反射点的繁琐计算,它直接以 TDR 测量波形为分析对象,减少了切线交叉法的测量误差,其结果与干燥法相近,表现出较好的测量精度。通过对图 4 的相关性分析可知,LFF 法与干燥法的决定系数 R^2 为 0.983 5,而 WINTDR 法与干燥法的决定系数 R^2 为 0.851 3,这充分表明了 LFF 法进行短针 TDR 波形分析的优越性。

LFF 法不仅提高了 TDR 的测量精度,还简化了 TDR 探针的校验程序,虽然 2 种方法在测量前均需进行探针电气长度校验^[21],但 LFF 法无需 TDR 探针电气长度的计算,这大大减少了 TDR 探针校验程序以及计算过程中的误差,提高了 TDR 测量土壤含水率的工作效率,有效解决了短针 TDR 探头测量误差大等问题。深入分析不同频率范围的低频滤波,还会在消除含盐量等对 TDR 测量影响方面取得进展。

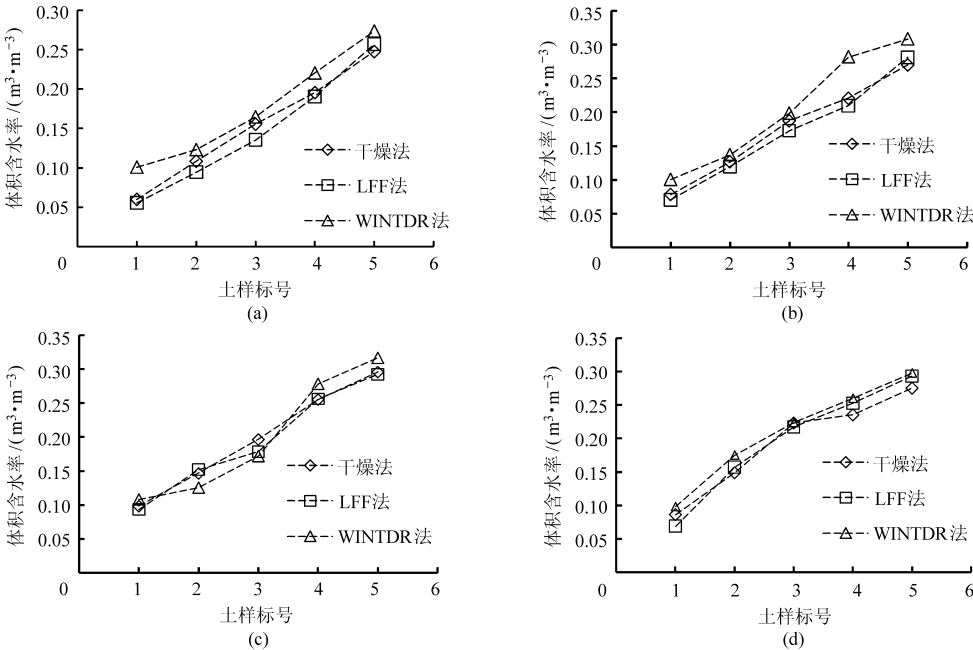


图 3 3 种方法测量土壤含水率对比

Fig. 3 Measure soil water content by three method

(a) Hanlon 土 (b) Till 土 (c) Loess 土 (d) Clarinda 土

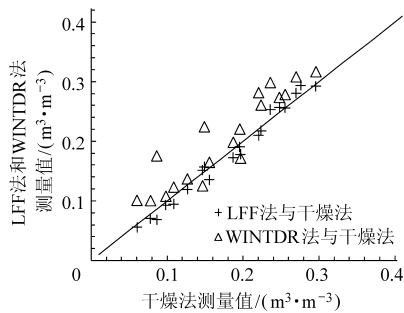


图 4 不同测量方法的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of different measurement methods

3 结论

(1)TDR 探针较短时,LFF 法直接以 TDR 总体

阻抗波形为研究对象,忽略了电磁噪声及短针电磁反射叠加等造成的波形影响,是提高其测量精度,减少探针电气长度校验程序的有效方法。

(2)通过 4 种土壤的试验对比,LFF 法比传统 WINTDR 测量方法有较高的测量精度,与干燥法对比,其决定系数 R^2 为 0.983 5,这有利于短针 T-TDR 探头测量精度的提高。

(3)深入分析不同低频范围滤波的 LFF 法,对 TDR 探头在不同土壤环境中的精确测量提供可能,以 TDR 波形为直接分析对象的 LFF 法有其一定的先进性和实用性。

参 考 文 献

1 Ren T, Noborio K, Horton R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 450 – 457.

2 韩文霆, 乔军, 许景辉. T-TDR 传感器土壤热场模拟与测温结点位置研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 106 – 111. Han Wenting, Qiao Jun, Xu Jinghui. Soil thermal field simulation and temperature node positions research of T-TDR sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 106 – 111. (in Chinese)

3 Xiao X, Horton R, Sauer T, et al. Cumulative soil water evaporation as a function of depth and time [J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(3): 1016 – 1022.

4 任图生, 邵明安, 巨兆强, 等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 I. 原理 [J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 225 – 229.

5 Ren T, Ju Z, Gong Y, et al. Comparing heat-pulse and time domain reflectometry soil water contents from thermo-time domain reflectometry probes [J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1080 – 1086.

6 Liu X, Ren T, Horton R. Determination of soil bulk density with thermo-time domain reflectometry sensors [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1000 – 1005.

7 陆森, 任图生, 杨洪, 等. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 20 – 25.

8 Heitman J, Horton R, Sauer T, et al. Sensible heat observations reveal soil-water evaporation dynamics [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(1): 165 – 171.

9 Heitman J, Xiao X, Horton R, et al. Sensible heat measurements indicating depth and magnitude of subsurface soil water evaporation [J]. Water Resources Research, 2008, 44(4): 006961 – 1 – 6.

10 Robinson D, Jones S B, Wraith J, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 444 – 475.

11 Lin C-P. Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 720 – 729.

12 Topp G, 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.

13 Heimovaara T. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6): 1410 – 1417.

14 Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 213 – 237.

15 Ferré P, Knight J, Rudolph D, et al. A numerically based analysis of the sensitivity of conventional and alternative time domain reflectometry probes [J]. Water Resources Research, 2000, 36(9): 2461 – 2468.

16 Robinson D, Schaap M, Jones S B, et al. Considerations for improving the accuracy of permittivity measurement using time domain reflectometry [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 62 – 70.

17 Heimovaara T. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms: 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils [J]. Water Resources Research, 1994, 30(2): 189 – 199.

18 赵录怀, 高金峰, 刘崇新. 信号与系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

19 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.

20 Malicki M, Plagge R, Roth C. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(3): 357 – 366.

21 许景辉,马孝义,Sally D Logsdon, 等. FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析[J]. 农业机械学报,2014,45(1):102 – 107.
Xu Jinghui, Ma Xiaoyi, Sally D Logsdon, et al. FDR probe structure influence on the soil dielectric spectrum measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(1):102 – 107. (in Chinese)

Measurement of Soil Moisture with T – TDR Probe Based on LFF Method

Xu Jinghui^{1,2} Ma Xiaoyi¹ Sally D Logsdon³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. National Lab. for Agriculture and the Environment, USDA-ARS, Ames IA 50011 – 3120, U. S. A)

Abstract: In order to improve the accuracy of soil moisture measurement by T – TDR (Thermo-time domain reflectometry) probe because the needles of T – TDR were too short, this paper presented a new TDR waveform analysis method named LFF (Low frequency filter). The TDR waveform was transformed by fast Fourier transform algorithm, and then the spectrum of TDR wave was obtained. The LFF transformation could be realized by filtering the low frequency of TDR wave spectrum and transforming it by inverse fast Fourier transform. Four kinds of soil samples prepared by five different volumetric water content with twenty specimen, were used in the experiment. Through comparing the LFF method and the traditional WINTDR method with the oven drying method respectively, LFF method showed better results. The correlation coefficient of LFF with the oven drying method was $R^2 = 0.983\ 5$. LFF method could improve the soil moisture measurement accuracy of T – TDR and simplify the test validation procedures and improve the test efficiency.

Key words: Soil Water content Measurement Low frequency filter T – TDR

(上接第 165 页)

Spatial Variability of Soil Water Retention Curve under Fertilization Practices in Arid-highland of the Loess Plateau

Gao Huiyi¹ Guo Shengli² Liu Wenzhao² Li Miao¹ Zhang Jian^{1,3}

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. China Sciences Intelligent Agriculture Development Co., Ltd. of Wuxi, Wuxi 214105, China)

Abstract: The aim of this study is to explore the spatial variability of soil moisture characteristic curve with the long-term fertilization, and find out the influencing factors of that variability. Based on the long-term experiment in Agricultural Ecological Experimental Station of the Loess Plateau of Chinese Academy in Changwu, the soil moisture of different suction with the long-term fertilization was measured using the method of high-speed centrifuge, and the water characteristic curves were obtained by the mathematical models of Van Gennuchten. Then, the parameters such as soil moisture characteristic curves, water capacity, water supply and soil moisture availability with the multiple fertilizations were compared. The results showed that the significant variations of soil moisture characteristic curve were attributed to the changes of soil structure caused by the long-term fertilization. Chemical fertilizers (N, NP) destroyed soil structure, which reduced the soil water capacity. Organic fertilizer (M, NPM) increased the soil organic matter content, and then improved the soil structure, which increased soil water capacity. The effectiveness of the soil moisture of applying manure (M, NPM) was significantly higher than that of N, NP, CK. The water supply capacity and soil water availability were ranked as N, CK, NP, NPM, M.

Key words: Fertilization measures Water characteristic curve Spatial variability Specific water capacity