

应用倒谱域滤波的 TDR 波形分析

冯 炜^{①②} 纪奕才^① 方广有^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 倒谱域滤波能够有效的滤除多次反射回波。该文将倒谱域滤波方法引入 TDR(Time Domain Reflectometry) 波形分析, 通过将 TDR 波形在倒谱域内做滤波, 滤除多次反射回波对时域波形的影响, 进而快速准确测定脉冲在探头上传播时间, 反演土壤表观介电常数。利用倒谱域滤波法测试结果与双切线法结果相比, 具有更高的测试精度。

关键词: 复倒谱; TDR; 波形分析; 表观介电常数

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2984-04

Application of Cepstrum Filter to TDR Waveform Analysis

Feng Wei^{①②} Ji Yi-cai^① Fang Guang-you^①

^①(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The data processing in complex cepstrum domain can restrain the echo-like multi-reflection wave. The TDR (Time Domain Reflectometry) waveforms are analyzed in complex cepstrum domain in this paper. By filtering in complex cepstrum domain, the multi-reflection waves are eliminated. Used the cepstrum analysis, the travel time on the probes are determined. Apparent permittivity of soil is inversed with the cepstrum analysis. The results inversed with the complex domain filter method is more accurate than tangent-lines method.

Key words: Complex cepstrum; TDR(Time Domain reflectometry); Waveform analysis; Apparent permittivity

1 引言

倒谱最先由 Bogert 等人提出, 1965 年 Bogert 报告了一个观察: 如果信号中包含有回波, 它的功率谱的对数中就有一个由于回波引起的加性周期分量。Oppenheim 和 Schaffer 引入了复倒谱的概念。在复倒谱域内, 通过一定的处理技术, 可以分离卷积核和信号^[1]。针对某些包含有回波分量的时域信号, 可以利用倒谱域滤波的方法, 剔除多次回波分量, 还原原始信号^[2]。

时域反射仪(Time Domain Reflectometry, TDR) 是一种便捷有效的测定土壤电参数的仪器, 具有快速、准确、可连续原位测定、无辐射以及不破坏土壤样品等优点, 因此在土壤电参数测试中得到了广泛应用。图 1 是 TDR 土壤测试系统基本框图^[3]。

土壤表观介电常数 K 可以通过下式计算^[4,5]:

$$K = (ct/(2l_p))^2 \quad (1)$$

其中 c 是真空中光速, l_p 是探头探针长度, t 是脉冲在探头上的传播时间。

Topp 等人通过测定多种土壤, 得出计算体积含

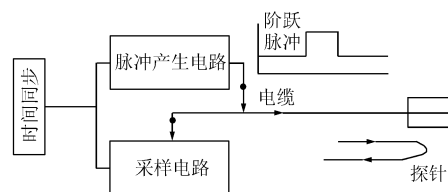


图 1 TDR 测试基本原理框图

水量的经验公式为

$$\theta_v = 4.3 \times 10^{-6} K^3 - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.3 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中 θ_v 是土壤的体积含水量。由式(1), 式(2)知, 土壤体积分含水量的准确反演依赖于传播时间 t 的测量和适当的土壤体积分含水量反演公式。

图 2 是利用 TDR 采集土壤样本的典型波形。采集波形是多次反射波的叠加, 不利于传播时间 t 的准确测量。在实际测量中为克服多次反射造成的波形失真, 采用双切线法估计传播时间 T 。图 3 是利用双切线法对 TDR 测试波形的处理, 将两条切线的交点作为回波返回的准确时刻。本文采用复倒谱域滤波的处理方法^[6], 通过对 TDR 测试波形在复倒谱域的处理, 滤除多次反射回波, 快速准确测定反

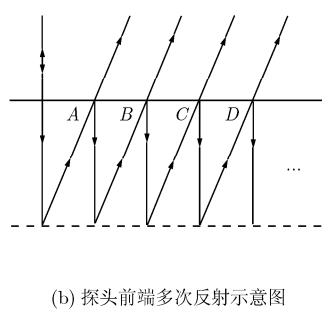
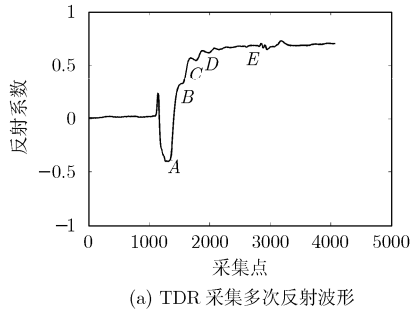


图 2 多次反射波形

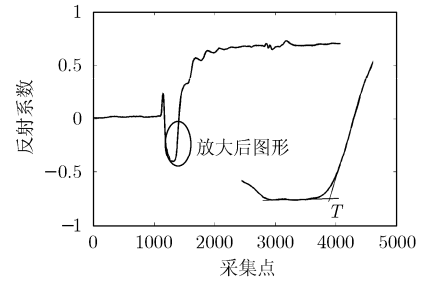


图 3 利用双切线法判断反射时间

射时间 t 。

2 倒谱域滤波

多次回波系统框图如图 4 所示, 多次反射主要有两部分, 一部分是由探针引起, 另一部分由电缆引起。 $x(n)$ 是 TDR 测试回波; $h(n)$ 是多次回波的系统函数, 如图 4, $y(n)$ 是经过多次回波干扰后的 TDR 波形。 $h_p(n)$ 是探头多次反射系统函数, $h_l(n)$ 是电缆多次反射系统函数。

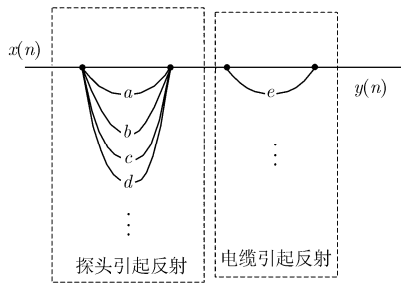


图 4 多次回波系统框图

$$y(n) = x(n) * h(n)$$

$$h(n) = h_p(n) * h_l(n)$$

$$h_p(n) = \delta(n) + a \cdot \delta(n - n_0) + b \cdot \delta(n - 2n_0) + c \cdot \delta(n - 3n_0) + d \cdot \delta(n - 4n_0) + \dots \quad (3)$$

$$h_l(n) = \delta(n) + e \cdot \delta(n - n_l) + \dots$$

$$Y(z) = X(z) \cdot H(z) = X(z) \cdot H_p(z) \cdot H_l(z) \quad (4)$$

由多次反射的性质知: $a, b, c, d, e < 1$ 。图 5 是基于倒谱域滤波的实现原理框图^[7], 利用倒谱域滤波的方法可以将 TDR 测试回波和多次反射回波分离。

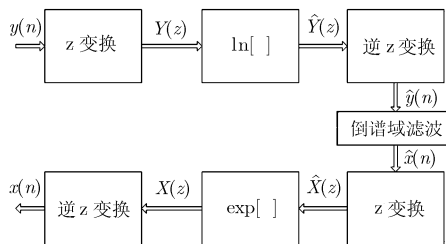


图 5 同态滤波框图

$$\ln Y(z) = \ln X(z) + \ln H_p(z) + \ln H_l(z) \quad (5)$$

将式(5)中 $\ln H_p(z)$ 和 $\ln H_l(z)$ 级数展开^[7]:

$$\ln H_p(z) = 0 + az^{-n_0} + (b - a^2/2 + \dots)z^{-2n_0} + (c - ab + \dots)z^{-3n_0} + (d - b^2/2 - ac + \dots)z^{-4n_0} - (ad + bc + \dots)z^{-5n_0} + \dots$$

$$\ln H_l(z) = 0 + e \cdot z^{-n_l} - (e^2/2)z^{-2n_l} + \dots$$

将式(5)逆 z 变换:

$\hat{x}(n) = Z^{-1}(\ln X(z))$, $\hat{h}_p(n) = Z^{-1}(\ln(H_p(z)))$, $\hat{h}_l(n) = Z^{-1}(\ln(H_l(z)))$ 。 Z^{-1} 是逆 z 变换算符, 得到伪时域内的复倒谱。

$$\hat{y}(n) = \hat{x}(n) + \hat{h}(n) = \hat{x}(n) + \hat{h}_p(n) + \hat{h}_l(n) \quad (6)$$

其中

$$\hat{h}_p(n) = a \cdot \delta(n - n_0) + (b - a^2/2 + \dots) \cdot \delta(n - 2n_0) + (c - ab + \dots) \cdot \delta(n - 3n_0) + (d - b^2/2 - ac + \dots) \cdot \delta(n - 4n_0) + (ad + bc + \dots) \delta(n - 5n_0) \dots$$

$$\hat{h}_l(n) = e \cdot \delta(n - n_l) - (e^2/2) \cdot \delta(n - 2n_l) + \dots$$

复倒谱在伪时域内表现为多个 δ 函数的序列。通过适当的处理方法, 可以将多次回波加以滤除, 图 6 是倒谱域应用的典型滤波器模型^[7]。

通常采用离散傅里叶变换方法代替 z 变换, 根据 z 变换和傅里叶变换的关系, 要求 $\hat{X}(z)$ 在单位圆上解析。利用离散傅里叶变换计算有限长序列 $x(n)$ 复倒谱的计算步骤如下:

- (1) $X(k) = \text{DFT}[x(n)]$;
- (2) $\hat{X}(k) = \ln[X(k)]$;
- (3) $\hat{x}_a(n) = \text{IDFT}[\hat{X}(k)]$ 。

式中 $\hat{x}_a(n)$ 是复倒谱 $\hat{x}(n)$ 的以 N 为周期的混叠信号, 但当 N 足够大, 并且 $\hat{x}(n)$ 衰减足够快时: $\hat{x}_a(n) \approx$

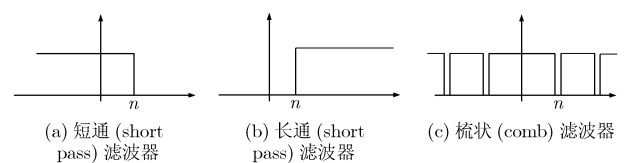


图 6 倒谱域滤波器

$\hat{x}(n)$ 。在实际测试中,为了克服混叠,需要补零增长 $x(n)$ 的尺寸。

图 7 是利用 3 cm 探头采集 15°C 水的处理图形。图 7(a)是倒谱域滤波后波形,滤波后波形去除了多次反射造成的影响。图 7(b)实线是根据多次反射模型系统函数式(3)反演的多次反射波形,图中虚线是实际测量波形,实现是仿真波形;图 7(b)虚线是实际测量的波形,反演波形和实际测量波形接近。15 °C 水的表观介电常数理论值是 82.23;根据倒谱域滤波后的波形图 7 (a)计算表观介电常数 $K = 81.2$ [8]。

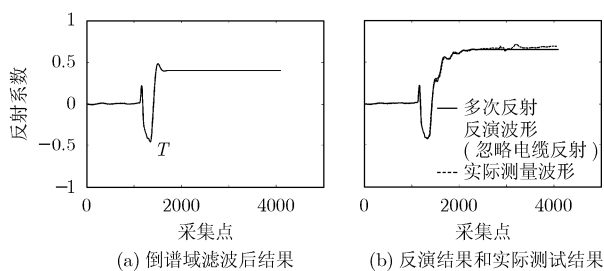


图 7 3 cm 探头采集 15°C 水波形

3 实验结果

实验仪器是由中国科学院电子学研究所研制的 TDR-I 土壤水分测试仪,该仪器能够应用于土壤水分探测,其特性指标见表 1。

表 1 TDR 系统性能指标

参数	数值
脉冲幅度(mV)	300
脉冲上升沿(ps)	140
脉冲宽度(μs)	30
最小等效采样步进(ps)	8.69
最大采集点数	4096
ADC 位数	16

图 8 是利用 3 cm TDR 测试探针对两种不同土壤样本的测量和反演结果,图中给出了原始测量波形和利用倒谱域滤波滤除多次回波后的波形。

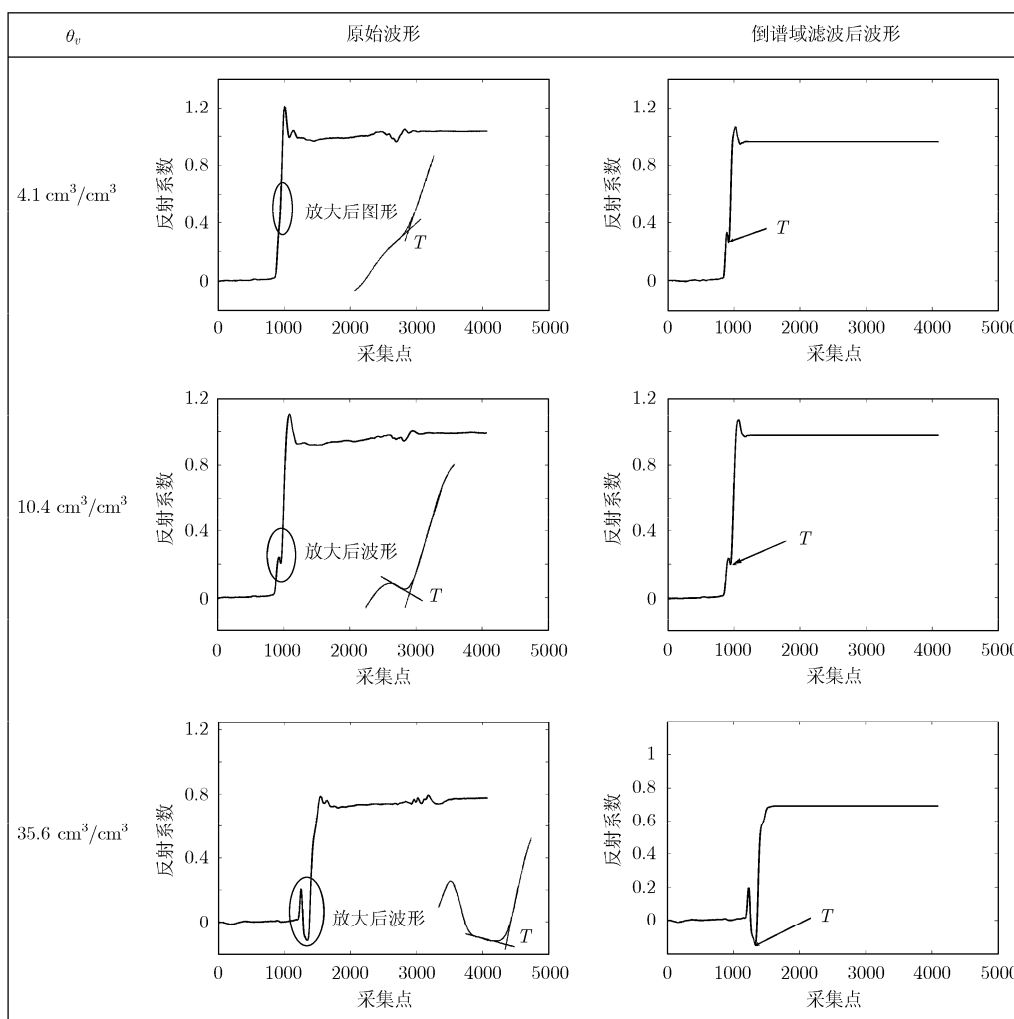


图 8 3 cm 探头采集砂质土壤波形

cm^3/cm^3 是土壤体积含水量单位, $1\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 表示在 1cm^3 土壤样品中含有 1cm^3 水^[8]。

图 8 是利用 3 cm 探头采集砂质土壤波形。滤波后波形消除了多次回波影响, 快速准确的判断出回波到达时刻。在低介电常数时, 由于多次反射回波引起波形失真, 双切线法不能准确判定回波到达时刻。倒谱域滤波法能够滤除多次回波影响, 准确测量脉冲回波到达时刻, 计算表观介电常数。

表 2 是利用双切线法和倒谱域滤波法的反演土壤体积含水量结果比较。两种方法均通过公式(1), 式(2)计算的土壤表观介电常数和体积含水量, 并与烘干法测定的土壤体积含水量比较。在低介电常数情况, 由于多次反射回波影响, 切线交点常常出现前移, 引起较大误差, 测试最大相对误差为 9.33% (实际误差为 $0.35\text{ cm}^3/\text{cm}^3$); 应用倒谱域滤波法处理后, 同等条件下, 反演体积含水量最大误差 5.02% (实际误差 $0.09\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。应用倒谱域滤波方法可以改善图形质量, 滤除多次反射回波影响, 测试结果更加贴近真实值。

表 2 3 cm 双切线法和倒谱域滤波法测试结果

烘干法测量的体积含水量 (cm^3/cm^3)	4.1	10.4	35.6
双切线法			
表观介电常数 K	3.3	5.8	18.8
Topp 法反演体积含水量 (cm^3/cm^3)	3.75	9.87	33.03
倒谱滤波法			
表观介电常数 K	3.4	5.9	20.3
Topp 法反演体积含水量 (cm^3/cm^3)	4.01	10.10	34.9

4 结论

倒谱域滤波方法能够应用于 TDR 波形的时域分析中, 利用倒谱域滤波的方法能够滤除多次回波, 消除多次回波的干扰, 快速准确判断 TDR 反射脉冲的到达时刻。在短探针, 低介电常数情况下,

双切线法判断有较大误差, 倒谱域滤波法可以改善图形质量, 滤除多次反射回波影响, 准确判断反射波到达时刻, 进而计算出表观介电常数 K , 更加准确反演土壤体积含水量。

参考文献

- [1] Oppenheim A V and Schafer R W. Homomorphic analysis of speech. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1968, AU-16(2): 221-226.
- [2] 邹谋炎. 反卷积和信号复原. 第一版, 北京: 国防工业出版社, 2004: 93-101.
- [3] Lin C P, Chun C C, and Tang S H. Accurate time domain reflectometry measurement of electrical conductivity accounting for cable resistance and recording time. *Soil Physics SAJ*, 2007, 71(4): 1278-1287.
- [4] Topp G C, Davis J L, and Annan A P. The early development of TDR for soil measurements. *Vadose Zone Journal Soil Science Society of America*, 2003, (2): 492-499.
- [5] Thomas A M, Chapman D N, and Rogers C D F, *et al.*. Broadband apparent permittivity measurement in dispersive soils using quarter-wavelength analysis. *Soil Physics SAJ*, 2008, 72(5): 1401-1408.
- [6] Huisman J A, Lin C P, and Weihermueller L, *et al.*. Accuracy of bulk electrical conductivity measurements with time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2008, (5): 426-433.
- [7] Childers D G, Skinner D P, and Kemerait R C. The cepstrum: A guide to processing. *Proceedings of the IEEE*, 1977, 65(10): 1428-1443.
- [8] Campbell Scientific Inc. TDR Probes CS605, CS610, CS630, CS635, CS640, CS645 Instruction Manual. 2006.

冯 炜: 男, 1983 年生, 博士生, 从事超宽带时域脉冲信号产生与信号处理的研究工作。

纪奕才: 男, 1974 年生, 副研究员, 从事超宽带电磁学理论及应用、超宽带天线设计工作。

方广有: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 从事超宽带电磁学理论及其应用、损耗介质中隐蔽目标的电磁探测、超宽带成像雷达技术、微波成像新方法和新技术等方面的研究工作。