

# 基于 TDR 的特性阻抗测量的数据处理

朱江森<sup>1</sup> 曲玲玲<sup>1</sup> 缪京元<sup>2</sup> 李超明<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124; 2. 中国计量科学研究院 北京 100013)

**摘要:** 针对特性阻抗的频域测量难以满足工业生产需求的问题,提出了一种基于 TDR 的特性阻抗的时域测量方法。文中采用 TDR 模块 Agilent54754A,测量标准件电路板的特性阻抗,并将实验测量的文本数据从示波器导入电脑,作为计算电路板特性阻抗的实测数据。然而时域测量方法得到的实测数据容易受到时基抖动和微波反射等的影响,论文采用 PDF 反卷积法有效去除了数据中的时基抖动,并根据 IPC-TM-650 规程选择最佳测量区域,有效地去除了微波反射,而且将两种方法综合应用来处理实验数据。将处理过的电压值变换成阻抗值,结论表明,测量数据处理结果十分接近被测件的标定值。

**关键词:** 时域反射计;特性阻抗;去时基抖动;数据处理

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Data processing of characteristic impedance measurement based on TDR

Zhu Jiangmiao<sup>1</sup> Qu Lingling<sup>1</sup> Miao Jingyuan<sup>2</sup> Li Chaoming<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information &amp; Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

**Abstract:** This paper proposed a time domain measurement method of characteristic impedance based on TDR, because frequency domain measurement of the characteristic impedance is difficult to meet the needs of industrial production. This paper measured characteristic impedance of the standard circuit board using the TDR module Agilent54754A, and imported the text data of the experimental measurement from the oscilloscope to the computer as the measured data of circuit board characteristic impedance calculation. However, the measured data from the time domain measurement method is susceptible to time base jitter and the microwave reflection, the paper eliminated time-base jitter of data by PDF deconvolution method effectively, and removed the microwave reflection by selecting the best measurement zone in accordance with IPC-TM-650 regulations effectively, and integrated of two methods to process the experiment data. By transforming the voltage value into the impedance value, the results showed that data processing results are very close to the calibrated value of DUT.

**Keywords:** time domain reflectometry; characteristic impedance; eliminating time-base jitter; data processing

## 1 引言

特性阻抗是描述互连线电气特性的关键参数,也是反映系统匹配情况的重要电气参数<sup>[1]</sup>。PCB 行业为了保证信号的完整性,对特性阻抗的控制越来越严格<sup>[2]</sup>;随着时钟频率和数据传输速率不断增高,其测量难度随之加大。传统的测量方法是在频域用矢量网络分析仪通过测量 S 参数来实现。这种方法显示阻抗测量结果不直观、校准复杂,而且需要具备 S 参数的相关知识,另外矢量网络分析仪的价格也比较昂贵<sup>[1]</sup>,难以满足工业生产的大量测量需求。而时域反射计显示测量结果直观、校准流程简单,还可以在直流

情况下进行测量<sup>[3]</sup>。基于以上因素,本文使用 Agilent86100C 的 TDR 模块 54754A,分别测量标准件和华为电路板传输线的特性阻抗,为提高测量的准确度,需要去除时基抖动、微波反射等因素的影响。在时域,电子科技大学研制的特性阻抗测试仪适用于工业生产,不能作为量值溯源<sup>[4]</sup>。本文选用测量准确度高的时域反射计模块是为以后的阻抗溯源奠定基础,再采用本文的数据处理方法可望有更高的测量准确度。文中较为详细地介绍了实测数据的处理方法,包括 PDF 反卷积法去除时基抖动,按照 IPC-TM-650 规程去除微波反射;而且还研究了处理次序对结果的影响。结果表明,本文获得的特性阻抗值十分接近标

定值。

## 2 基于时域反射计的阻抗测量原理

时域反射计(TDR, time domain reflectometry)测量阻抗的原理如图 1 所示。

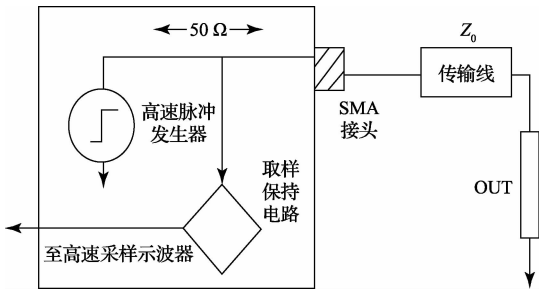


图 1 时域反射计阻抗测量原理图

高速脉冲发生器产生一个阶跃脉冲信号(视作被测件的入射波),该信号沿传输线一直传输到被测件上,如果被测件与传输线的特性阻抗不匹配,就会发生反射,采样示波器可以测得反射波的幅度。通过测得入射波和反射波的幅度,可以计算出反射系数,然后根据阻抗与反射系数之间的关系计算出被测件的阻抗值<sup>[5]</sup>。PCB 电路板的阻抗测量就基于上述原理,通常将 PCB 电路板的阻抗测量叫做特性阻抗测量。

从示波器测得的信号获得被测件特性阻抗值的方法简述如下。

由传输线的理论分析可知<sup>[6]</sup>

$$\rho = \frac{V_{\text{反}}}{V_{\text{入}}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

式中:  $Z_2$  为被测件特性阻抗值,  $Z_1$  为 TDR 源内阻,  $V_{\text{入}}$  为入射阶跃信号电压幅度值,  $V_{\text{反}}$  为反射波电压幅度值,  $\rho$  为反射系数。

由式(1)可得:

$$Z_2 = \frac{V_{\text{入}} + V_{\text{反}} Z_1}{V_{\text{入}} - V_{\text{反}}} \quad (2)$$

在有反射的情况下,从采样示波器测得的是电压的传输值,即:

$$V_{\text{传}} = V_{\text{入}} + V_{\text{反}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得:

$$Z_2 = \frac{Z_1 V_{\text{传}}}{2V_{\text{入}} - V_{\text{传}}} \quad (4)$$

将示波器测得的相应数据代入式(4),便可得到被测件的特性阻抗。实验用的 TDR 源内阻  $Z_1 = 50 \Omega$ ,  $V_{\text{入}} = 0.2 \text{ V}$ ,  $V_{\text{传}}$  由测量得到。

## 3 实验与数据获取

本文实验采用 TDR 模块 Agilent54754A,测量标准件电路板或者测量标定数据为  $50 \Omega$  的华为电路板,其实物连

接如图 2 所示,图中的支架是用来固定探头的,被称作标准连接器。



图 2 实物连接图

测量步骤为:先让仪器预热半个小时达到稳定状态;然后依次连接电缆、探头系统、空气线标准件进行校准;最后对被测件进行测量。

标准件通常有三种,其标定值分别为  $28 \Omega$ 、 $50 \Omega$ 、 $75 \Omega$ ,我们只选定了  $50 \Omega$  和  $75 \Omega$  的进行测量。图 3 是在示波器上测得的波形图,被测件是标定值为  $75 \Omega$  的标准件,可以看到,示波器上显示值是  $78.12 \Omega$ 。将每次测量的文本数据从示波器导入电脑,作为计算电路板特性阻抗的实测数据。

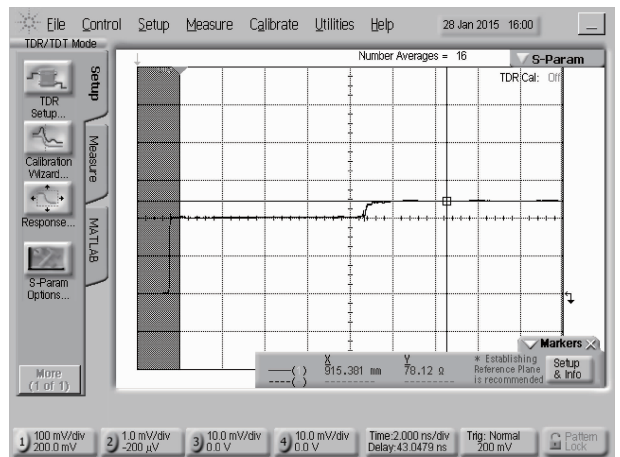


图 3 标定值  $75 \Omega$  的标准件传输线波形图

## 4 数据处理

实测数据为电压的传输值,如前所述为了获得准确度的电压值,对实测数据必须去除时基抖动和微波反射。

### 4.1 去除时基抖动

时基抖动是信号波形存在的相对于理想时间参考点的随机微小时间偏移量<sup>[7]</sup>,是造成时基误差的主要原因。去

除时基抖动的方法有:中值法、PDF 反卷积法和综合法<sup>[8]</sup>。本文采用 PDF 反卷积法。

PDF 反卷积法去除时基抖动的基本原理是:对于有时基抖动的信号,其多次测量的平均值等于真实信号与 PDF 的卷积。只要知道概率密度函数(PDF)就可通过反卷积算法求得原信号波形<sup>[9]</sup>。下面简单介绍一下这种算法:

设  $x(t)$  为理想取样信号,  $y(t)$  为实际取样信号的平均值,  $p(t)$  为时基抖动的概率密度函数,理论上可以严格证明:

$$y(t) = x(t) * p(t) \quad (5)$$

式中:  $*$  是卷积符号,对上式进行傅里叶变换得:

$$Y(\omega) = X(\omega)P(\omega) \quad (6)$$

利用反卷积算法可得理想取样信号

$$x(t) = F^{-1} \left( \frac{Y(\omega)}{P(\omega)} \right) \quad (7)$$

概率密度函数如式(8)所示:

$$p(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t-\mu}{\sigma}} \quad (8)$$

只要知道式(8)中的参数  $\sigma$  和  $\mu$  的数值,就可求得概率密度函数。幸好用取样示波器的直方图功能,可以得到  $\mu=0, \sigma=1.6$  ps。

对实验数据去除时基抖动流程如图 4 所示。

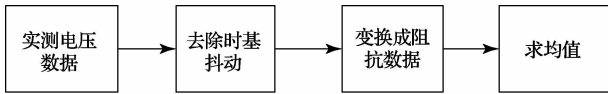


图 4 去除时基抖动数据处理流程图

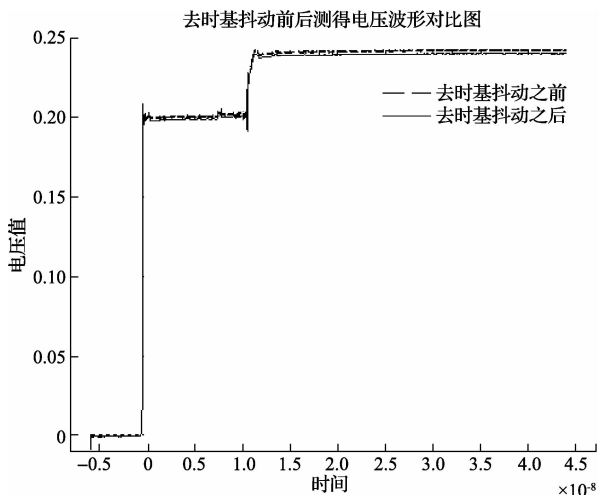


图 5 75  $\Omega$  被测件去除时基抖动前后测得的电压波形对比图

根据上述流程编写相应的处理软件,对实测数据处理。图 5 是 75  $\Omega$  的标准件传输线去除时基抖动前后测得的电压波形对比图,其中,虚线为实测电压数据波形图,即去除时基抖动前测得的电压波形,实线为去除时基抖动后测得的电压波形。从图中可以看出,去除时基抖动之后的波形平滑度更好。

去除时基抖动后的结果如表 1 所示,其中原始值表示直接选择被测件全部测量区域求均值。差值绝对值是处理数据与标定值的差的绝对值。

表 1 去除时基抖动前后的特性阻抗值对比  $\Omega$

标定值	75	50
原始值	76.650	51.085
差值绝对值	1.650	1.085
去除时基抖动	74.835	50.250
差值绝对值	0.165	0.250

从表 1 中可以看出,去除时基抖动之后的特性阻抗值更接近被测件的标定值。

### 4.2 去除微波反射

时域反射计脉冲源产生的阶跃信号本身会存在预冲、过冲、振铃等问题,信号经传输或反射后会变得更严重<sup>[10]</sup>。所以选择合适的测量区域来去除微波反射对于特性阻抗的计算结果至关重要,本文按照 IPC-TM-650 规程中选择最佳测量区域来避开微波反射。规程中的方法如图 6 所示,第一段阶跃波形是 TDR 产生的阶跃信号,第二段反射波形是标定值为 75  $\Omega$  的标准件反射得到的信号,第三段反射波形是开路端反射得到的信号。具体的流程是:

- 1) 把第二段波形的传输电压和第一段阶跃信号电压的差值记作  $A_{R1}$ , 找到  $0.5 A_{R1}$  对应的时刻,记作  $t_{1.TL}$ ;
- 2) 把第三段开路反射传输电压和第二段标准件反射电压的差值记作  $A_{R2}$ , 找到  $0.5 A_{R2}$  对应的时刻,记作  $t_{2.TL}$ ;
- 3) 把  $t_{2.TL}$  与  $t_{1.TL}$  的差值记作  $t_{n.TL}$ ;
- 4) 选取  $t_{n.TL}$  这段区间 30% 到 70% 的测量区域的数据当做计算被测件特性阻抗值的测量数据,即图 6 中  $t_{i.TL}$  和  $t_{j.TL}$  之间的区域。

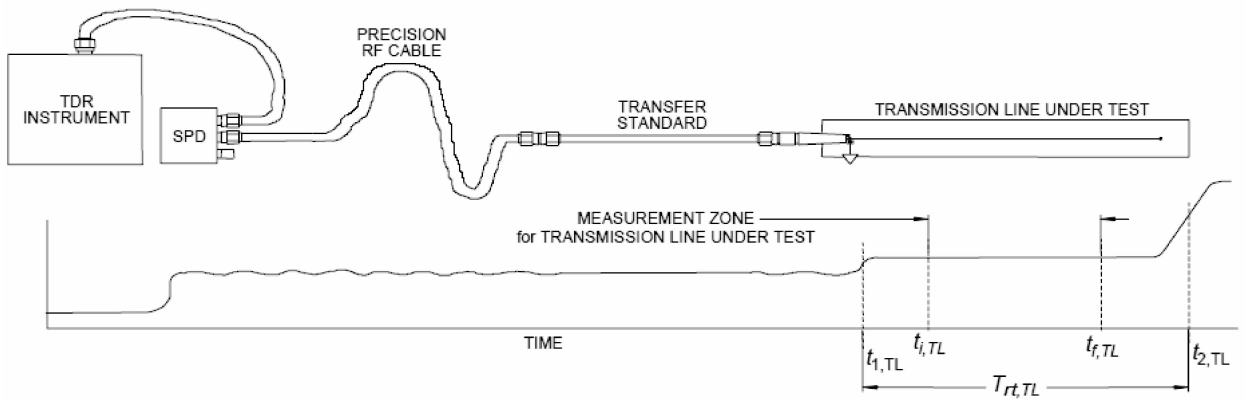


图 6 IPC-TM-650 选择测量区域图

本文按照上述方法去除微波反射的数据处理流程如图 7 所示:

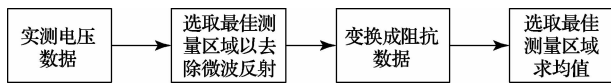


图 7 去微波反射数据处理流程图

根据上述流程编写相应的处理软件,对实测数据处理。去除微波反射后的结果如表 2 所示。

表 2 去除微波反射前后的特性阻抗值对比  $\Omega$ 

标定值	75	50
原始值	76.650	51.085
差值绝对值	1.650	1.085
去微波反射	76.502	51.042
差值绝对值	1.502	1.042

从表 2 中可以看出,按照 IPC-TM-650 规程选择测量最佳区域的效果并不太理想。下面考虑将去时基抖动和去微波反射两种方法综合研究来处理实验数据。

## 5 综合数据处理

去除时基抖动和去除微波反射两种方法的综合运用,我们称作综合处理法,即对实验数据先去时基抖动再去微波反射,记作综合 j-m 法,或者先去微波反射再去时基抖动,记作综合 m-j 法。综合 j-m 法的实验数据处理流程如图 8 所示,综合 m-j 法的流程将图 8 中去时基抖动和选取最佳测量区域以去除微波反射两个模块交换顺序即可。根据上述流程编写相应的处理软件,将获得的结果记录在表 3 中。

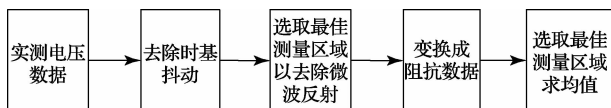


图 8 综合数据处理流程图

表 3 综合处理法前后的特性阻抗值对比  $\Omega$ 

标定数据	75	50
原始值	76.502	51.042
差值绝对值	1.502	1.042
j-m 法	74.979	50.192
差值绝对值	0.021	0.192
m-j 法	74.515	49.954
差值绝对值	0.485	0.046

从表 3 中可以看出,综合处理法效果明显,得到更接近被测件标定数据的特性阻抗值。因此,在数据处理中去除时基抖动和微波反射是非常有必要的;另外,交换次序后得到的结果相差不是太大,从这里看出,两种方法的顺序调换对实验的结果影响不大。

## 6 结论

直接用时域反射计测量 PCB 电路板的特性阻抗,因受时基抖动和微波反射的影响,导致测量结果准确度不高。采用 PDF 反卷积法去除时基抖动或者按 IPC-TM-650 规程去除微波反射,得到的特性阻抗值都更接近被测件的标定值,提高了测量准确度;将两种方法综合运用后,得到的值十分接近标定值,其测量准确度更高。研究发现,在选取合适的测量区域来去除微波反射这个方法上,还有很大的改进空间,这有待于进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 雷英俊, 秦开宇, 曹勇, 等. 基于时域反射的特性阻抗测量[J]. 电子测量技术, 2009 (4): 38-40.
- [2] 白莉萍. 矢量网络分析仪中时域测试功能的应用[J]. 科技信息, 2009, 15: 484-485.
- [3] Agilent Technologies. 网络分析仪突破 PCB 测试方

- 案[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 23-24.
- [4] 杜斌霞. 3GHz 特性阻抗测试仪软件关键技术研究  
与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 21.
- [5] 唐亮, 赵春宇. 时域反射 (TDR) 测试问题分析[J].  
电子测量技术, 2008, 31(5): 42-44.
- [6] 金晶晶. 基于等效伪差分的特性阻抗测试技术与  
实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 82.
- [7] 张定会, 左小五. 协同计算机数据处理方法研究[J].  
仪器仪表学报, 2004 (z1): 720-722.
- [8] 杨晓霞, 孟浩然. 利用加速度计的大型望远镜抖动  
测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(9):  
823-830.
- [9] 卢峰. 皮秒脉冲参数国家基准的数据采集与处理  
技术[D]. 北京: 北京工业大学, 2005: 34-36.
- [10] 周英航. 高分辨率 TDR 测试以及应用[J]. 电子设计  
技术, 2007, 14(4): 92-96.

## 作者简介

**朱江森**, 副教授, 博士, 主要从事现代时域测量, 脉冲  
信号处理等, 参与脉冲参数国家基准和时间频率参数国家  
基准的建立。

E-mail: zhujaingmiao@bjut.edu.cn

**曲玲玲**, 工学硕士研究生, 主要研究方向为特性阻抗  
计量技术的研究, 信号与信息处理等。

E-mail: quling7823@163.com

**缪京元**, 硕士, 主要从事脉冲参数国家基准的研究、维  
护和应用。

E-mail: miaojy@nim.ac.cn

**李超明**, 工学硕士研究生, 主要研究方向为特性阻抗  
计量技术的研究, 信号与信息处理等。

E-mail: lichao ming@emails.bjut.edu.cn

(上接第 106 页)

- [4] XU Y, SHI X, XU J, et al. Range-angle-dependent  
beamforming of pulsed frequency diverse array[J].  
IEEE Transactions on Antennas and  
Propagation, 2015.
- [5] WANG W Q, SHAO H. Range-angle localization of  
targets by a double-pulse frequency diverse array  
radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal  
Processing, 2014, 8(1): 106-114.
- [6] WANG W Q, SO H C. Transmit subaperturing for  
range and angle estimation in frequency diverse array  
radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,  
2014, 62(8): 2000-2011.
- [7] LI H, HIMED B. Transmit subaperturing for MIMO  
radars with co-located antennas[J]. IEEE Journal of  
Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1):  
55-65.
- [8] JONES A M, RIGLING B D. Planar frequency  
diverse array receiver architecture [C]//Radar  
Conference (RADAR), 2012 IEEE. IEEE, 2012:

0145-0150.

- [9] ZHUANG L, LIU X Z, YU W. Precisely beam  
steering for frequency diverse arrays based on  
frequency offset selection [C]//Radar Conference-  
Surveillance for a Safer World, 2009. RADAR.  
International. IEEE, 2009: 1-4.
- [10] SAMMARTINO P F, BAKER C J, GRIFFITHS H  
D. Frequency diverse MIMO techniques for radar  
[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic  
Systems, 2013, 49(1): 201-222.
- [11] WANG W Q. Phased-MIMO radar with frequency  
diversity for range-dependent beamforming [J].  
Sensors Journal, IEEE, 2013, 13(4): 1320-1328.

## 作者简介

**郭爱英**, 电子科技大学通信与信息系统工程硕士, 现  
工作于山西大学, 助教, 主要研究方向为 DSP 应用设计、光  
纤通信技术、雷达信号处理等。

E-mail: guoay@sxu.edu.cn