

使用网络分析仪进行时域分析

接军

(工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610)

摘要: 在测量一条传输线上各处的阻抗值以及在时间域或距离域中对被测器件中所存在的问题, 例如: 对器件特性的不连续性进行检查时, 矢量网络分析仪的时域测试功能是非常有用的。时域测试结果的显示形式更为直观, 直接就可以看到被测器件的特性; 在测量传输线系统的宽带响应特性方面, 与其它测试技术相比, 时域测试技术通过把被测器件特性的不连续性显示为时间或距离的函数而能给出更富有含义的信息。主要讨论如何使用矢量网络分析仪进行时域测试分析, 希望让具有频域测试知识背景的工程师们能深入了解如何根据频域测试数据 (S 参数) 来得到时域测试结果, 并将时域测试结果应用到对射频系统中常见问题的分析上。

关键词: 时域; 时域反射; 矢量网络分析仪

中图分类号: TM935.23 文献标识码: A 文章编号: 1672-5468 (2010) 06-0060-06

Time Domain Analysis Using a Network Analyzer

JIE Jun

(CEPREI, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Time domain analysis is useful for measuring impedance values along a transmission line and for identifying a device problem in time or distance such as discontinuity. The time domain testing result provides a more intuitive and direct look about the characteristics of the device-under-test (DUT). Compared with other measuring techniques, it gives more meaningful information concerning the broadband response of a transmission system by showing the effect of each discontinuity as a function of time or distance. This paper will focus on the time domain analysis using the vector network analyzers (VNAs). The intent is to provide engineers with frequency domain background and an in-depth view of how a time domain display is created from the frequency domain data (S-parameters) and how to apply the time domain display to common problems in RF systems.

Key words: time domain; time domain reflectometry; vector network analyzer

1 引言

时域 (TDR) 分析是一种有效的工具, 并有着广泛的应用, 包括故障定位、识别连接器中的阻抗变化、有选择地消除不希望要响应以及在生产测

试中简化滤波器的调谐过程等。

传统 TDR 的测量方法是先把冲击或阶跃激励信号发送至被测器件并用宽带接收机, 如示波器, 观察其信号在时域上的响应。TDR 示波器作为定

收稿日期: 2010-08-05 修回日期: 2010-08-06

作者简介: 接军 (1978-), 男, 黑龙江安达人, 工业和信息化部电子第五研究所计量检测中心助理工程师, 从事电子产品的计量检测工作。

性测试工具一直非常有用，但存在一些影响其测试精度和有效性的限制因素：1) TDR 输出的阶跃信号的上升时间——测量结果在空间上的分辨率取决于阶跃信号上升时间的快慢；2) 不是特别理想的信噪比——这是由于示波器宽带接收机的结构引起的。

随后，在 20 世纪 70 年代，研究表明频域与时域之间的关系可以用傅立叶变换进行描述。这样就可以先在频域范围内测量被测器件的响应特性，然后用数学方法对这些频域数据进行傅立叶逆变换计算从而给出时域响应。

虽然矢量网络分析仪的测试数据经过变换之后的时域结果显示与传统的 TDR 测量的结果显示相似，但是矢量网络分析仪进行的是扫频响应测量，是用数学方法把数据变换成像 TDR 一样的显示。

在低通模式下，矢量网络分析仪测量各个离散的正频率点，并把测试结果外推到直流分量，并假定负频率响应是正频率响应的共轭，亦即响应为厄米特式 (Hermitian) 响应^[1]。

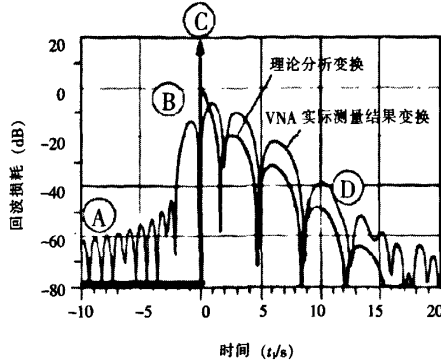
在带通模式下，矢量网络分析仪测量处在起始频率和终止频率中间的几个离散的频率点 (这种工作模式适用于任意指定的测试频率范围)。

利用窄带接收机 (在接收机中设计了进行下变频和滤波工作的部分，以便获得中频 (IF) 信号)，矢量网络分析仪可以大大降低系统的噪声电平，这样就使得矢量网络分析仪的信噪比大为改善，因而较之 TDR 有更好的动态范围。这对测试以每秒数千兆比特甚至更高速率工作的器件中非常小的串扰信号具有重要的意义。

本文主要讨论如何把矢量网络分析仪所测到的 S 参数变换成时域测试结果。

2 时域的理论问题^[3]

图 1 显示的是用理论分析方式得到的一个 3 级巴特沃斯滤波器的回波损耗的时域变换和实际上用矢量网络分析仪对同样的测试任务所做的时域变换的比较。图中显示的差别是由离散数据取样、频率截断以及使用窗口功能和再归一化的影响造成的。



- A 纹波由频率截断引起；
- B 宽度差别由开窗功能引起 (灰色迹线与黑色迹线之间)；
- C 有限脉冲由 VNA 的频率范围决定；
- D 幅度差别由再归一化引起 (灰色迹线与黑色迹线之间)。

图 1 同一测试任务用 IFT 计算 (理论变换) 方法得到的时域变换结果和 VNA 实际测得的时域变换结果的比较

2.1 离散取样的影响

矢量网络分析仪的时域变换应用于离散数据，离散频率取样会产生许多和原函数图象一样的、被称为假象的图象，假象以 1/频率步长的重复间隔出现。如图 2 所示。

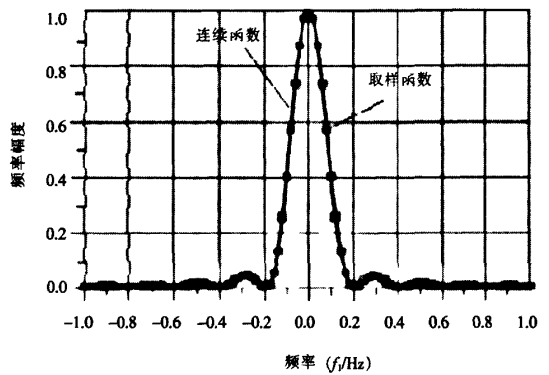


图 2 (a) 连续函数和离散 (取样) 函数

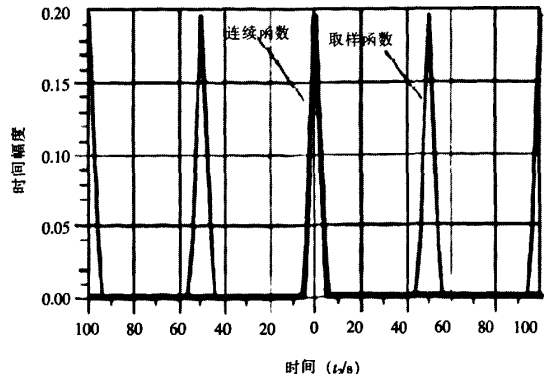


图 2 (b) 由离散取样引起的假象响应

2.2 截断频率的影响

矢量网络分析仪是有特定频率范围而非无限大范围的仪器，故数据在数据样本的末端被截断，如图 3 (a) 所示（对原函数与矩形窗口的乘积进行傅立叶逆变换 (IFT) 可以代表矢量网络分析仪在进行时域变换时截断数据所产生的影响）。截断效应在时域中会引起纹波并具有 $\text{Sin}(x)/x$ 形式的响应，如图 3 (b) 所示。图 3 (c) 中将截断时间响应与单位阶跃函数进行了比较。

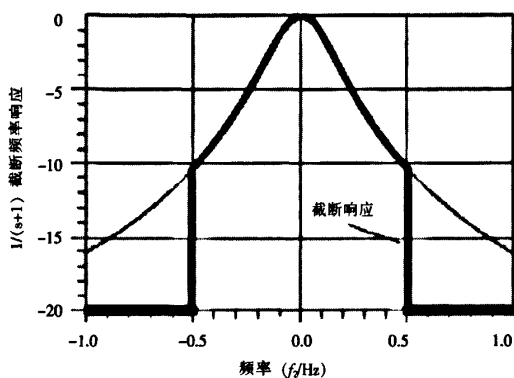


图 3 (a) 频域中截断响应的样本

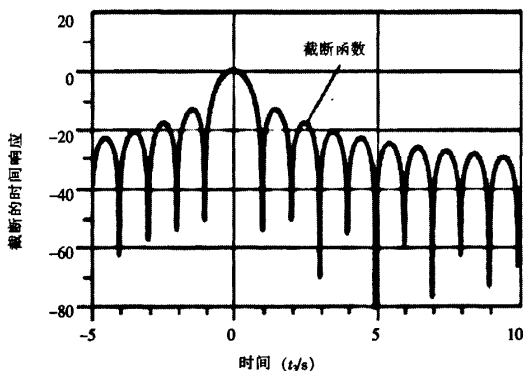


图 3 (b) 截断在时域中引起振铃

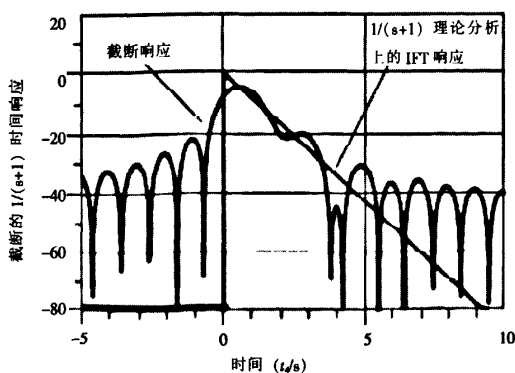


图 3 (c) 截断时间响应与单位阶跃函数的比较

2.3 使用窗口功能以减小截断的影响

数据截断效应会把纹波加到到域数据上，所形成的旁瓣有时高到足以使它们能遮蔽被测器件的某些响应。可以应用窗函数，它逐步减小频率响应并控制在截断过程中形成的旁瓣。然而，窗函数也有降低响应的鲜明性、展宽冲击和拉平曲线斜度的作用，从而会降低变换的分辨率并使频率响应的过渡部分产生失真。在确定窗函数时，在选择旁瓣的高度与响应的分辨率之间要考虑某种程度的折衷。图 4 (a) 显示的是具有不同 β 值的窗口。图 4 (b) 显示的是应用于 1 极滤波器响应的这些窗口。而图 4 (c) 则显示了窗函数的时间响应以及单位阶跃函数（灰色迹线）。

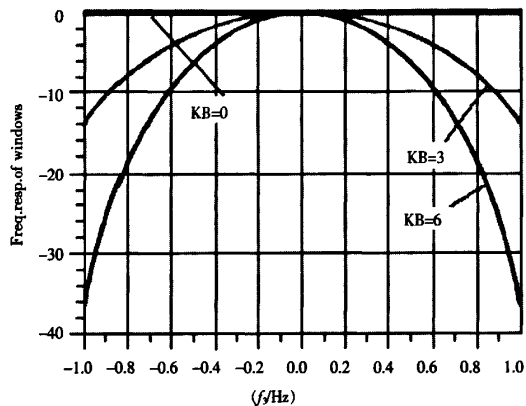


图 4 (a) 应用不同 β 值的窗函数，较大的 β 值会减小旁瓣高度 (KB 代表凯塞-贝塞尔函数，是经常用到的窗函数)

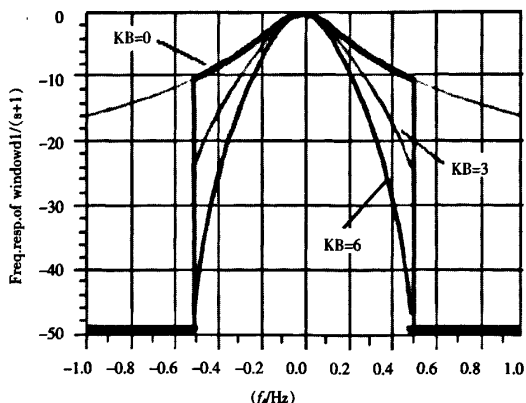


图 4 (b) 应用于 1 级滤波器响应的窗函数

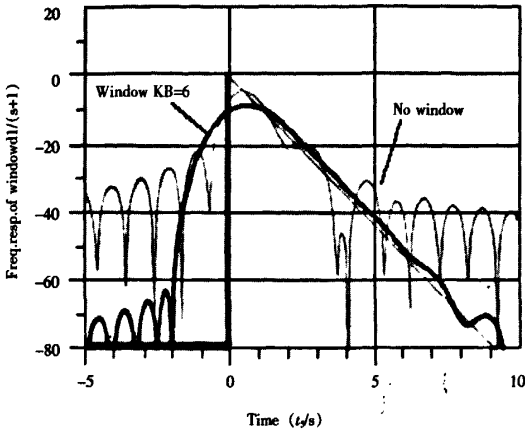


图 4(c) 窗函数的时间响应和单位阶跃函数

2.4 定标和再归一化

为了确保时域变换的值保留其物理意义，还要进行某种定标和再归一化。例如：无延迟的理想开路电路的 S11 的频率响应对所有的频率其值都应该为 1。它的逆变换是一个三角函数。然而，当数据被取样和施加了窗口处理以后，开路电路响应的时域变换将被窗函数展宽，而不返回原来单位高度（高度为 1）的冲击。因此，必须进行再归一化，以保证开路电路的时域响应具有为 1 的值。

3 使用矢量网络分析仪的时域模式

矢量网络分析仪测量器件的频率响应，并用数学方法把测得的数据进行时域变换，以便将频域信息变换到时域，响应值（纵轴所表示的测试结果）分别可以相对于时间或距离的关系显示出来，这样就超越了简单的频率特性范围，对被测器件的行为特征作更深入的观察。矢量网络分析仪采用线性调频-Z 快速傅立叶变换技术进行这一数学计算^[4]。

图 5 (a) 和图 5 (b) 说明同一电缆的频域和时域响应，频域反射测量（图 5 (a)）是在整个被测频率范围内由电缆中存在的非连续性反射的所有信号的组合。估计那些失配的位置是困难的。然而，时域测量（图 5 (b)）示出作为时间（或距离）函数的每个非连续性的影响，且很容易确定失配的位置和大小。

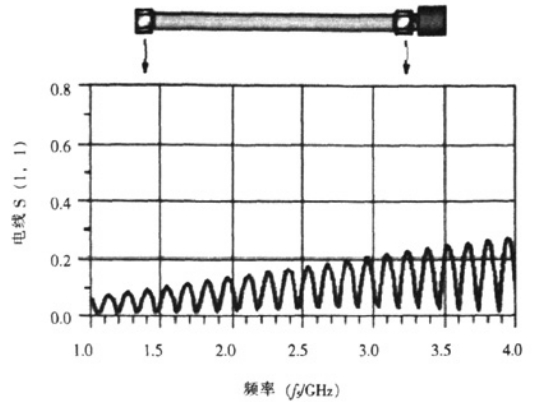


图 5 (a) 频域中电缆的反射响应

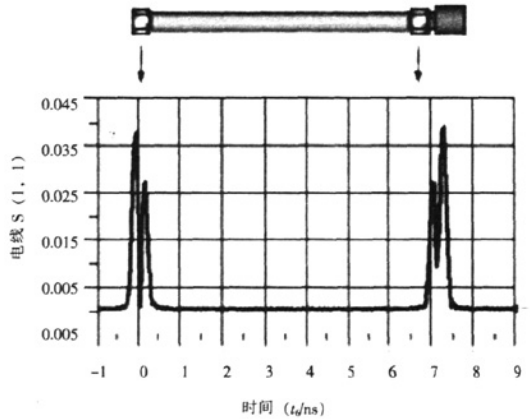


图 5 (b) 时域中同一电缆的反射响应

3.1 时域低通模式

矢量网络分析仪的时域低通测试模式是对传统 TDR 测量方式的模拟，并提供阶跃信号和冲击信号两种激励方式。在这种测量模式下对测量的频率范围有一些特殊的限制。它要求测试所得到的正数据点要均匀地隔开，这样这些数据点就可以从直流到测试的终止频率都是谐波相关的。从这里可以看到，上升时间由被测最高频率的最大斜率决定，可是上升时间也会随着窗口系数的大小而变化。此外，由于傅立叶变换包括直流值对频率响应的的影响，而矢量网络分析仪是不能测量直流响应的，因此直流值必须用外推的方法得到。在生成阶跃激励时这个直流值是必须的。在传统的 TDR 测量方法中也存在这一限制。数据的其余部分可以由原始被测响应的镜像数据算出，这里假定响应为厄米特响应^[1]，即负频率响应是正频率响应的共轭，因此，

时域响应必须是纯粹的实数值（非复数）响应。

矢量网络分析仪时域低通测量模式功能真正强大的地方在于它在其阶跃和冲击激励响应的结果中既描述了阻抗不连续性所在的位置，又能告诉你你在这些阻抗不连续性的地方阻抗发生了哪种类型的变化。

图6说明了使用真实格式的已知不连续性的各种低通响应，图中把每种电路单元都模拟了出来以显示对应的低通时域S11响应波形。

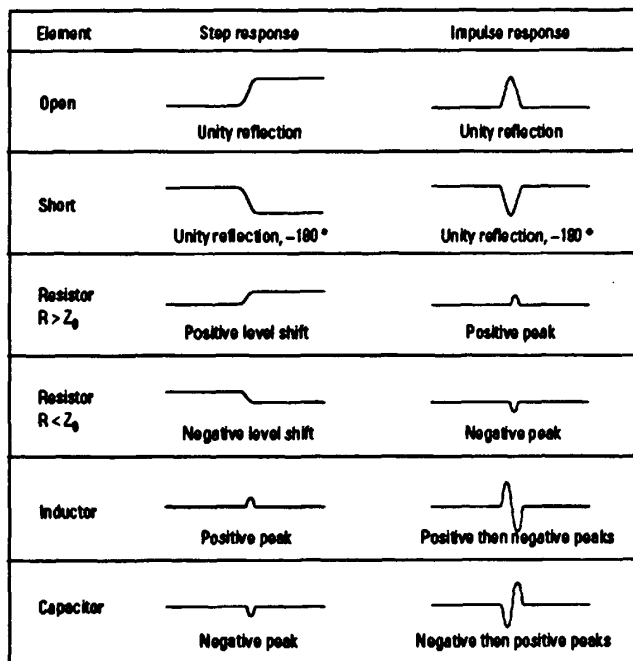


图6 已知的不连续性的低通响应-阶跃响应和冲击响应

3.2 时域带通模式

时域带通模式是矢量网络分析仪进行时域测试的更通用的工作模式，它对器件的冲击响应特性进行测试，带通模式未包含直流值。它特别有利于测量带宽有一定限制的器件和进行故障定位测量，可以帮助识别发生阻抗失配的位置，但不能指出失配是电容型、电感型还是电阻型的。

在时域带通测试模式中，傅立叶逆变换（IFT）只对测得的数据点进行计算，而不像低通模式中那样将负频率响应视为被测数据的共轭部分。这种计算给出的结果是时域响应的复数值（包括实部和虚部），响应的幅度（线性幅度或对数幅度）是最常见的显示方式。在带通模式下，窗口设置在测试的

起始频率和终止频率的中心，IFT的应用范围从中心频率左侧的起始测试频率开始一直到中心频率右侧的终止测试频率为止，包括了整个测试频率的跨度——这样就把中心频率两侧的数据都包括在窗口之内，从而增加了冲击宽度并减小了有效的带宽。这种以矢量网络分析仪的中心频率为中心的响应产生了一种让正常的时域响应与“调制”函数相乘的效果，因而在正常响应的顶部产生了正弦波形。这在带通工作模式测试结果的实部或虚部格式中十分明显，但在对数幅度或线性幅度格式中则不存在。

3.3 反射响应（低通和带通）

在带通反射测量中，横轴代表从测试端口发出的冲击到达不连续性处并返回测试仪的端口的双向行进时间。

纵轴表示的信息取决于所选择的格式。线性幅度格式显示的是反射系数 ρ 的响应，它是在整个测量频率范围内不连续性产生的反射系数的平均值，这在观察幅度非常接近的几个事件的响应时非常有用。对数幅度格式显示的是以 dB 为单位的回波损耗，所显示的值代表在整个测量频率范围内不连续性的平均回波损耗，这在观察幅度相差较大的几个事件的响应时特别有用。

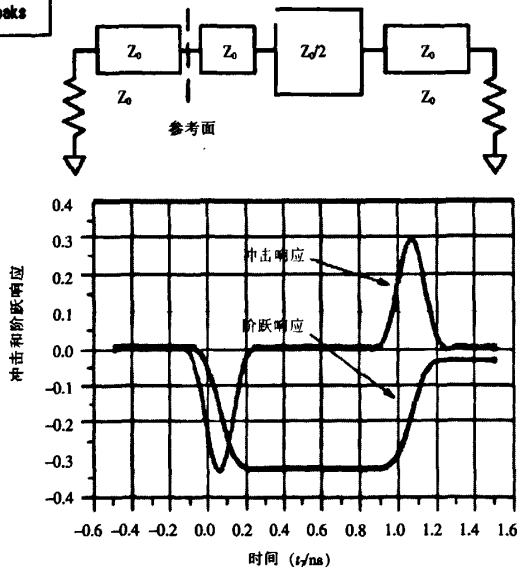


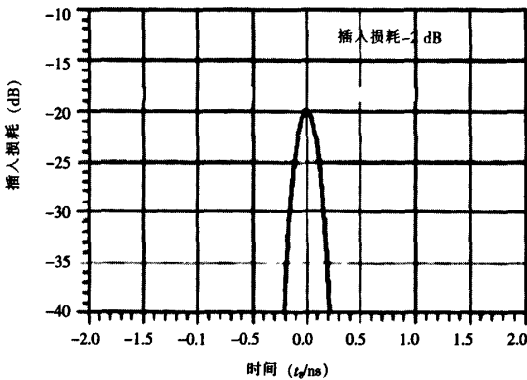
图7 示意电路及其低通测试模式下阻抗的变化在阶跃响应和冲击响应中的显示

3.4 传输响应 (低通和带通)

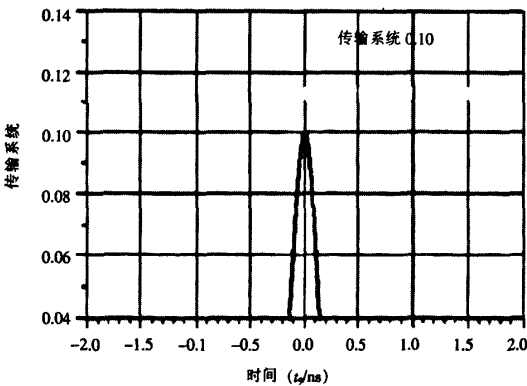
在时域传输测量结果中，矢量网络分析仪屏幕上横轴上显示的值是实际电长度，而不是像反射测量中的双向传播时间。

以一个 20 dB 的衰减器为例，带通模式测试得到的响应是幅度为 -20 dB 的插入损耗 (如图 8 (a) 所示) 和数值为 0.10 的传输系数，如图 8 (b) 所示。

图 8 20 dB 衰减器的带通响应：1) 对数幅度格式，以 dB 为单位显示插入损耗；2) 线性幅度格式，显示传输系数。



(a)



(b)

4 结束语

低通冲击响应模式具有比带通模式更高的分辨率，最适用于观察让低频信号通过的器件 (如电缆) 中的微弱响应，很容易识别不连续性的位置以

及不连续性的类型。

带通冲击响应模式是最通用的矢量网络分析仪时域响应测试模式，可以应用于任何任意频率范围，非常适用于测量带宽有限的器件，如滤波器。

表 1 是对模式的小结。

表 1 映射模式

激励方式	模式
低通	带通
模拟传统 TDR 的测试方式	与窄带时域测试相同
外推得到直流值	最常用的模式
在整个测试频率跨度内起始频率呈谐波相关	任何任意频率范围
阶跃激励	特别适用于识别在低通器件中的不连续性 (位置和类型)
冲击激励	特别适用于观察在低通器件 (如电缆) 中的微弱响应
反射	横轴显示双向传播时间
传输	横轴显示单向 (实际) 传播时间
	特别适用于测量带宽有限的器件，如滤波器，也适用于故障定位 (但不会说明故障的类型)，特别是当系统不是低通器件时尤其如此

参考文献:

[1] BRACEWELL. The fourier transform and its applications [M]. New York: Mcgraw-Hill, 1886.

[2] OPPENHEIM, SCHAFER. Discrete-time signal processing, englewood cliffs [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1989.

[3] PHILLIP D J. The time-domain response of coupled-resonator filters with applications to tuning [D]. Leeds: PhD Thesis, University of Leeds, 2004.

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,推出多套微波射频以及天线设计培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频,不会仪器操作怎么行!对于射频工程师和硬件工程师来说,日常电路设计调试工作中,经常需要使用各种测试仪器测量各种电信号来发现问题、解决问题。因此,熟悉各种测量仪器原理,正确地使用这些测试仪器,是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能,该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟练掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器;该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装,包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材,能够帮助微波、射频工程师快速地熟练掌握矢量网络分析仪使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器,因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解,也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解,能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>