

PCB插损和阻抗测试方案

随着AI技术的快速兴起，服务器及计算设备对数据总线的吞吐量需求呈现指数级增长，以PCIe标准为例，为适应AI算力需求，其协议已升级至PCIe 6.0/7.0，信号频率突破64GT/s并向128GT/s迈进，通道配置从x1扩展至x16，通过倍增频率和通道数量实现大带宽传输，然而，更高的信号频率导致插入损耗呈指数级上升，引起信号幅度降低和失真，同时，PCB走线中的阻抗不连续性会引发信号反射和时序抖动，它们共同造成信号完整性的问题。

PCIe版本	发布时间	传输速度 (GT/s)	调制模式	通道数 (最大)	差分阻抗PCB设计目标值 (Ω)	阻抗公差
PCIe 1.0	2003	2.5(8b/10b)	NRZ	X16	100	$\pm 10\%$
PCIe 2.0	2007	5.0(8b/10b)	NRZ	X16	100	$\pm 10\%$
PCIe 3.0	2010	8.0(128b/130b)	NRZ	X16	85	$\pm 7\%$
PCIe 4.0	2017	16.0(128b/130b)	NRZ	X16	85	$\pm 5\%$
PCIe 5.0	2019	32.0(128b/130b)	NRZ	X16	85	$\pm 3\%$
PCIe 6.0	2022	64.0(PAM4, Fit)	PAM4	X16	85	$\pm 3\%$
PCIe 7.0	2025	128.0(PAM4, Fit)	PAM4	X16	85	$\pm 3\%$

表1：PCIe总线图表

PCIe 7.0为实现高达128GT/s的超高速数据传输，以及由此带来的严苛插入损耗和阻抗设计挑战，行业采取了多项协同措施。核心在于延续PAM4调制并结合先进的FEC技术，显著提升信号的鲁棒性和抗干扰能力。物理层设计方面，采用低损耗高频PCB材料，并精细化阻抗控制，将公差控制在 $\pm 3\%$ 以内，以减少信号衰减。此外，引入自适应均衡器动态补偿传输链路的频率响应失真，有效抵消插损的影响。封装与接口也得到优化，例如改进连接器设计以缩短信号路径、降低串扰，从而减少信号反射和损耗。

本文主要概述PCB插损和阻抗的基本认知，测试方法和介绍罗德与施瓦茨公司对应的测试方案。

应用卡片 | 01.00版

ROHDE & SCHWARZ
Make ideas real



插损与阻抗的定义及影响

插入损耗 (Insertion Loss)

指信号通过PCB传输线时因导体损耗、介质损耗等因素导致的功率衰减，通常以分贝（dB）表示。例如，PCIe 5.0要求每英寸插损不超过0.6 dB@16 GHz。

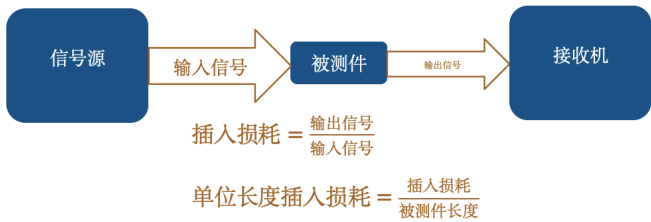


图1：信号与插入损耗的关系

特征阻抗 (Characteristic Impedance)

特征阻抗由传输线的几何结构和材料特性决定，通常推荐值为50Ω或100Ω（差分）。阻抗突变会引发信号反射，导致回波损耗（Return Loss）恶化，影响信号完整性。

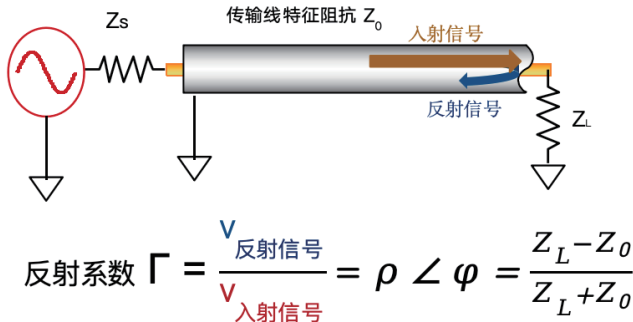


图2：阻抗失配与信号反射系数的关系

测试方法

插入损耗的测量

矢量网络分析仪（VNA）是测量插入损耗最便捷的仪表，它的每个端口内部包含信号源和接收机，我们可以通过端口1的信号源发出信号给被测件，再由端口2的接收机测量经由被测件处理后的输出信号，矢量网络分析仪可以直接比较和显示输出信号和输入信号的差异，即为直接测量S21参数（正向传输系数），从而直观的反映信号从输入到输出的损耗。



图3：插损测量

单位长度的插入损耗是PCB设计和信号完整性分析中一个非常重要的指标。它不仅可以帮助我们评估传输线的性能，还可以为电路设计提供更准确的数据支持，从而提高产品的可靠性和性能



图4：Delta-L结果显示

单位长度插入损耗直观上可以用直接除法，即插入损耗除以被测件长度，然而，如图4蓝色测试结果所示，高频下被测件阻抗不匹配导致的多重反射引发测试结果在不同频率之间存在波动，影响测试精度和稳定性。

Delta-L方法是Intel开发的，通过设计两条不同长度的传输线，测试它们的S参数后进行拟合运算和差值，从而得到单位长度的插入损耗。相比直接除法，Delta L在计算差值时自动抵消了夹具（如探针、焊盘和过孔）的影响，拟合算法移除了阻抗不匹配导致的多重反射，使得尤其在高速、高频场景下显著提升了精度和稳定性，从而成为当前PCB量产测试的主流方法。

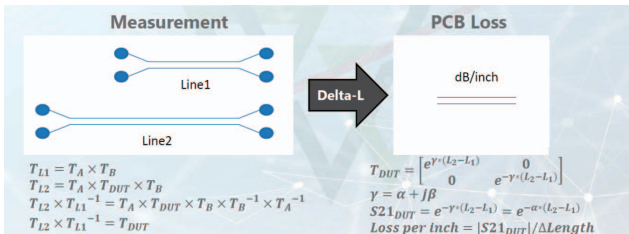


图5：Delta-L差值算法

阻抗测试

传统阻抗测试是基于示波器时域反射计 (TDR)，信号发生器产生阶跃激励或者脉冲激励，示波器对入射信号和反射信号采样，计算出时域数据。

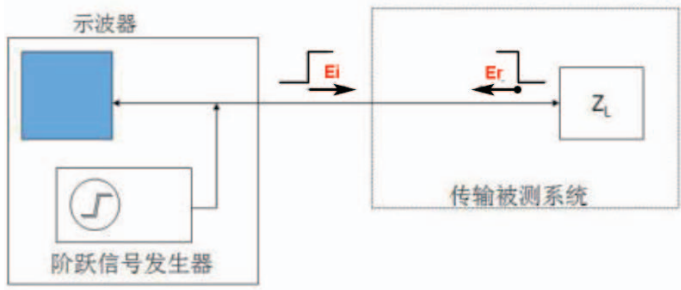


图6：传统TDR阻抗测试计

相比示波器受限于噪声，动态范围和带宽等，矢量网络分析仪因其更高的精度、测试速度以及ESD鲁棒性，随着工作频率升高，基于矢量网络分析仪的TDR阻抗测试仪成为主流；矢量网络分析仪同样采用TDR时域反射法，不同于传导的TDR阻抗分析仪以高压脉冲为激励信号，它是通过发射扫频连续波，再接收源信号与散射信号并进行比值，然后将测得的频域数据进行时域变换，得到时域阻抗结果。

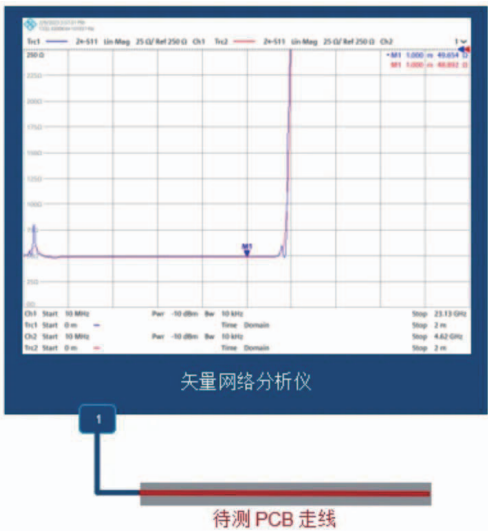


图7：基于矢网的TDR阻抗测试

罗德与施瓦茨的测试解决方案

罗德与施瓦茨（Rohde & Schwarz）作为全球测试测量领域的领导者，其矢量网络分析仪产线覆盖全面，满足从基础研发到高端应用的多样化需求。产品包括R&S®ZNA、R&S®ZNB、R&S®ZNBTR和R&S®ZNL等多个系列，频率范围涵盖9kHz至110GHz。

插损测试

罗德矢量网络分析仪内嵌Delta-L功能件，无需外部电脑，通过简易几步即可完成插入损耗测试。



图8：Delta-L测试流程

其中Delta-L设置中，可以完成矢量网络分析仪的基本设置如扫描带宽，步进等，除Delta-L算法标准设定外，罗德矢量网络分析仪支持用户可以自定义测量方法，任意设定最高工作频率（最高受限于矢量网络分析仪自身最高工作频率）和定点的频率用于结果显示。

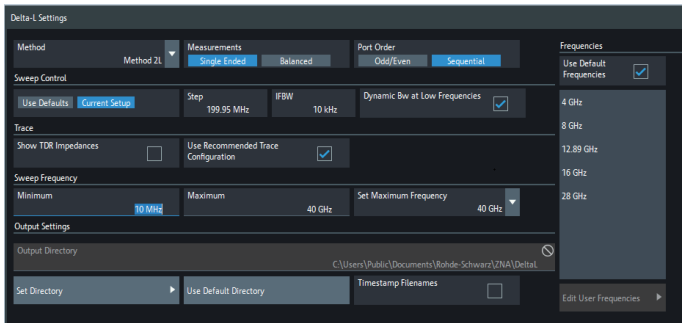


图9：Delta-L设置界面

Delta-L测量设置中内嵌校准，配属罗德自动校准件可以快速完成矢量网络分析仪自身误差和用于连接的线缆的误差校准，且除Delta-L算法标准设定被测件长度外，罗德矢量网络分析仪支持用户灵活配置被测件长度。

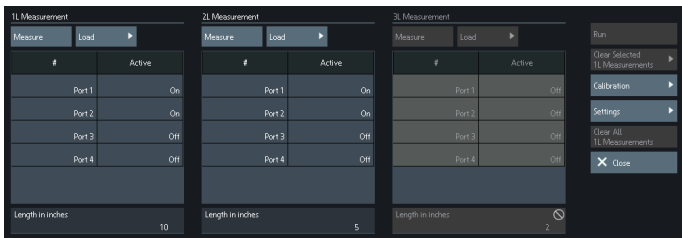


图10：Delta-L测量设置

阻抗测试

罗德矢量网络分析仪内嵌TDR功能件，无需外部电脑，通过简易几步即可完成阻抗测试。



图11：矢量网络分析仪TDR测试流程

罗德矢量网络分析仪TDR支持多种窗函数和时域精度增强算法，同时显示阻抗和频域的S参数信息，方便用户对比时频域信息和问题诊断。

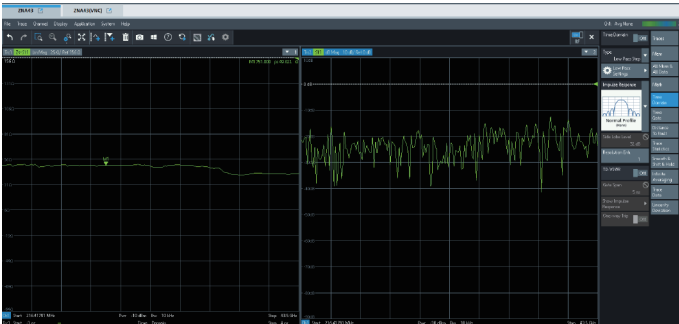


图12：矢量网络分析仪TDR阻抗结果显示

夹具去嵌：

在PCB进行插入损耗测试时，为去除诸如存在探头、通孔、引入线和引出线的夹具的影响，需要使用精准的去嵌入算法来计算并去除这些对测量的影响，只留下感兴趣区域的结果。除了要求用户通过参数化给定的某个集中电路模型或提供适合的snp文件来定义夹具，罗德与施瓦茨矢量网络分析仪现在还集成有第三方工具，这些工具可以根据测量数据建立测试夹具模型，达到优异的去嵌效果。

集成的第三方工具有AtaiTec公司的ISD，PacketMicro公司的SFD，和基于IEEE 370标准的EZD。

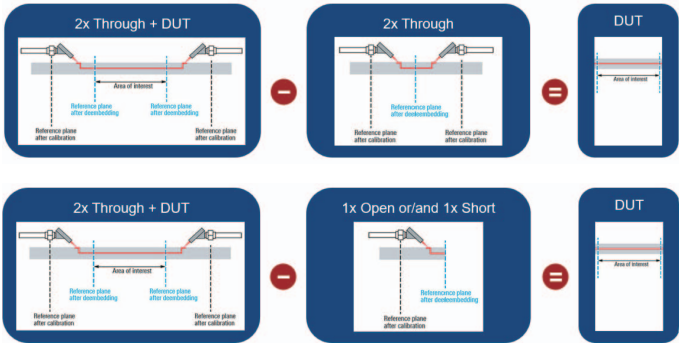


图13：2种方式进行夹具去嵌技术示意图

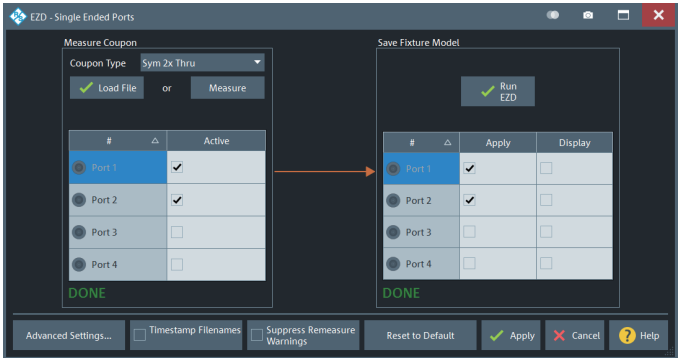
去嵌入的基本原理是：

- 第一步：得到DUT和夹具的复合S参数
- 第二步：得到夹具自身的S参数
- 第三步：将每个S参数矩阵转换为T矩阵
- 第四步：将每个夹具的T矩阵，进行变换得到逆矩阵
- 第五步：将测量得到的复合网络T矩阵和夹具的逆矩阵相乘，得到DUT自身的T矩阵
- 第六步：将DUT的T矩阵变换成S参数矩阵

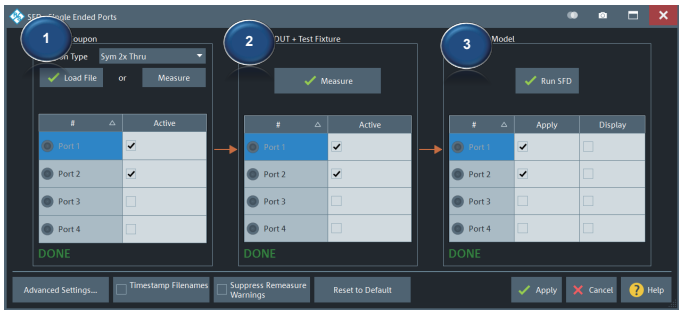
去嵌入的关键是第二步得到夹具自身的S参数，EZD仅支持对称场景的夹具去嵌，夹具是2x Through； ISD和SFD支持对称和非对称场景夹具去嵌，如果是非对称场景，需要2套对应的夹具，且支持修正夹具和DUT之间的阻抗失配问题：

特征	EZD	ISD	SFD
校准结构支持	仅对称的2x Through	对称/非对称的2x Through, 1xOpen, 1x Short, 1xOpen和 1xShort	对称/非对称的 2x Through, 1xOpen, 1x Short
夹具要求	IEEE370 Class A	IEEE370 Class B or A	IEEE370 Class C or B
阻抗修正	不支持	支持	支持

EZD的去嵌流程是：



ISD和SFD的去嵌流程是：



罗德与施瓦茨矢量网络分析仪还可以搭配第三方测试软件进行自动化测试，软件可按照用户定义好的测试内容执行测试，比如信号完整性要求的测试项：插入损耗、回波损耗、远近端串扰、TDR、Skew、Delta-L等，用户一键式执行测试，最后生产完整测试报告，非常高效。

总结

罗德与施瓦茨的ZNA/ZNB/ZNL系列配属有电子校准件，内置阻抗测试功能和Delta L 测量选件，以自动化、高精度重新定义了PCB插损与阻抗测试的标杆。面对未来6G通信与AI服务器的更高需求，该方案通过软硬件协同创新，为行业提供了从研发到量产的完整闭环工具。

罗德与施瓦茨 (中国) 科技有限公司
800-810-8228 400-650-5896
info.china@rohde-schwarz.com
www.rohde-schwarz.com.cn

官方微信



官方视频号



环境承诺

- ▶ 能效产品
- ▶ 持续改进环境现状
- ▶ 有保证的ISO 14001环境管理体系

R&S®是罗德与施瓦茨公司注册商标
商品名是所有者的商标 | 中国印制
2025年10月 | PCB插损和阻抗测试方案
文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改