

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 5.0/6.0，信号频率突破32GT/s并向64GT/s迈进，通道配置从x1扩展至x32，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	传输速率 (GT/s)	调制模式	通道数 (最大)	插损要求 (典型值)	阻抗要求 (Ω)	阻抗公差
PCIe 1.0	2003	2.5	NRZ	x16	-3 dB (2.5 GHz)	100	$\pm 10\%$
PCIe 2.0	2007	5.0	NRZ	x16	-6 dB (5 GHz)	100	$\pm 10\%$
PCIe 3.0	2010	8.0	NRZ	x16	-8 dB (8 GHz)	85	$\pm 7\%$
PCIe 4.0	2017	16.0	NRZ	x16	-8 dB (16 GHz)	85	$\pm 5\%$
PCIe 5.0	2019	32.0	NRZ	x16	-9.5 dB (32 GHz)	85	$\pm 5\%$
PCIe 6.0	2022	64.0	PAM4	x16	-12 dB (64 GHz)	85	$\pm 3\%$

表1：PCIe总线图表

为应对这些挑战，PCIe阻抗测试需严格控制 $100\Omega \pm 10\%$ 的差分阻抗（PCB走线），并通过预加重、均衡技术补偿损耗，插入损耗达-12dB@9GHz时，需+6dB的均衡增益才能恢复有效信号。此外，PCIe 5.0要求使用超低损耗（ $Df \leq 0.002$ ）覆铜板，并增加板层数以优化布线，但这也使阻抗控制成为核心难点。因此，从设计仿真到量产测试，阻抗一致性和损耗补偿能力已成为保障PCIe高带宽稳定传输的关键技术，准确、高效且便捷地测试插入损耗和阻抗成为市场的紧迫需求。

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。

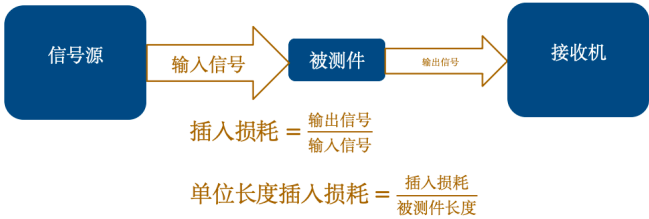


图1：信号与插入损耗的关系

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。

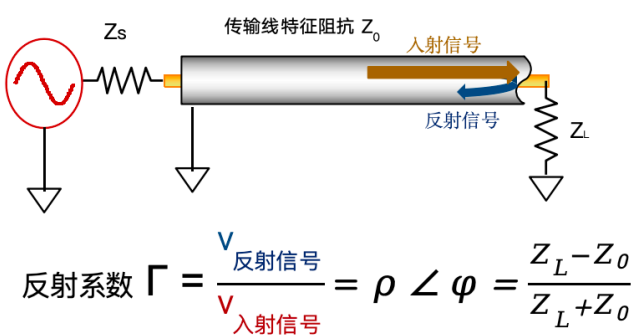


图2：阻抗失配与信号反射系数的关系

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，矢网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

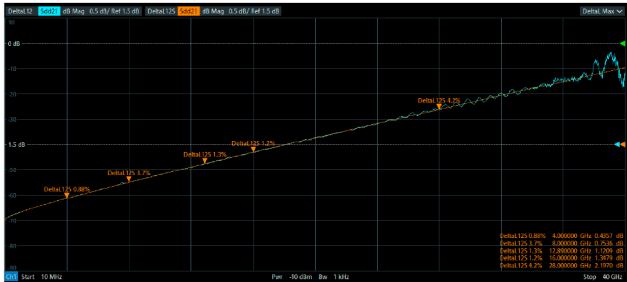


图4：Delta L 结果显示

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，使得其尤其在高速、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。

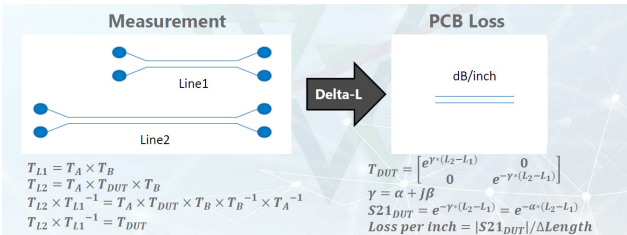


图5：Delta L 差值算法

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。

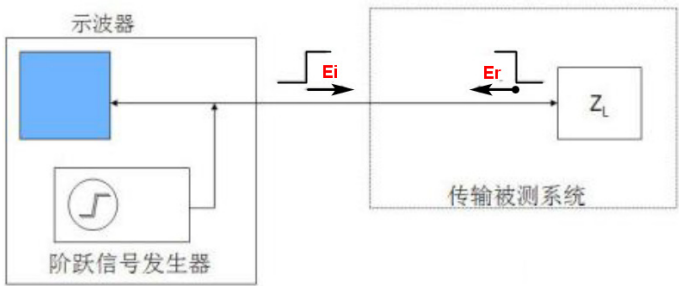


图6: 传统TDR阻抗测试计

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。

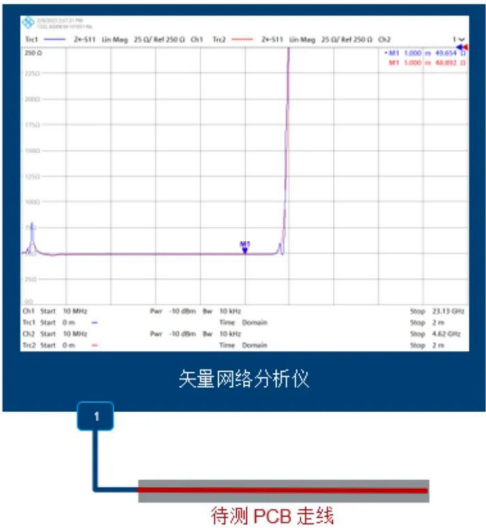


图7: 基于矢网的TDR阻抗测试

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®ZNB-T和 R&S®ZNL等多个系列，频率范围涵盖9 kHz至110 GHz。

插损测

试罗德矢网内嵌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，可以完成矢网的基本设置如扫描带宽，步进等，除Delta L算法标准设定外，罗德矢网支持用户可以自定义测量方法，任意设定最高工作频率（最高受限于矢网自身最高工作频率）和定点的频率用于结果显示。

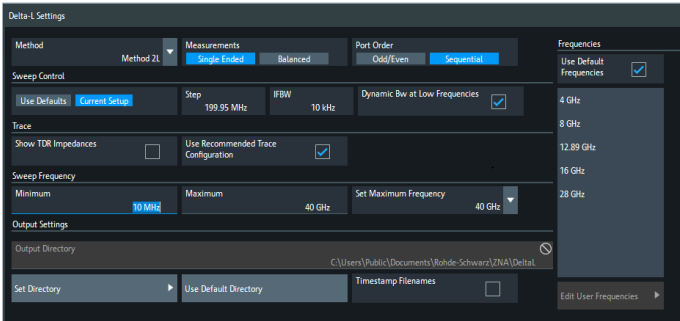


图9: Delta L 设置界面

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网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，罗德矢网支持用户灵活配置被测件长度。

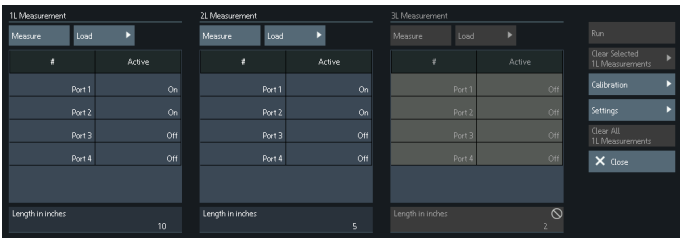


图10: Delta L 测量设置

阻抗测试

罗德矢网内嵌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: 矢网TDR测试流程

罗德矢网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。

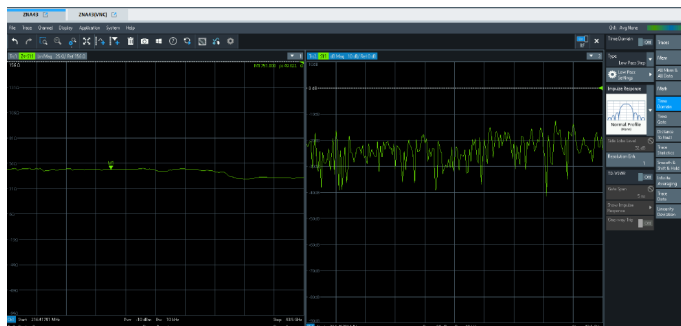


图12: 矢网TDR阻抗结果显示

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5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