

224Gbps高速线缆测试方案

高速传输速率发展历程

标准演进

IEEE 802.3系列标准作为以太网技术的基础，近年来不断推动着数据传输速率的提升。从2010年代的100 Gbps (802.3bj) 和200 Gbps (802.3cd)，到2020年代的400 Gbps (802.3ck) 乃至当今的1.6Tbps (802.3dj)，以太网技术经历了飞速的发展，目前IEEE 802.3dj单通道支持的最大速率超过200 Gbps。与此同时，调制技术也从传统的NRZ (非归零码) 向PAM4 (四电平脉冲幅度调制) 转变，这一转变使频谱效率提升了一倍，为未来实现更高的速率传输提供了可能。

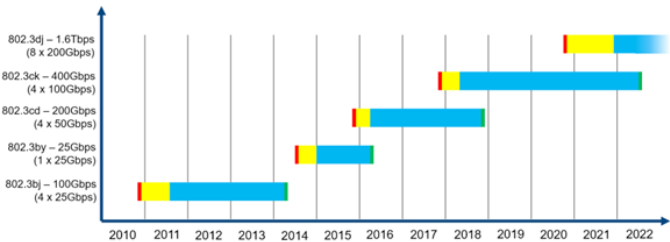


图1：高速以太网标准的发展历程

OIF (Optical Internetworking Forum) 的CEI框架同样在推动着高速互连技术的发展。从CEI-56G到CEI-112G，再到CEI-224G，这些标准不仅支持了单通道224Gbps的速率，还面向芯片至光引擎 (D2OE)、背板及铜缆互连等多种应用场景，为高速互连技术的发展提供了有力的支撑。

名称	数成速率/Pair	信号类型	年份
CEI-224G	224Gbps	PAM4/PAM6	202X
CEI-112G	112Gbps	PAM4	2022
CEI-56G	56Gbps	NRZ/PAM4	2017

表1：OIF-CEI框架的发展历程

InfiniBand (无限带宽，缩写为IB) 是另一个用于高性能计算的电脑网络通信标准，它具有极高的吞吐量和极低的延迟，用于电脑与电脑之间的数据互连，也用作高速存储系统之间的互连。最新推出的Infiniband XDR互连产品的单通道速率高达200Gbps，同样也采用PAM4编码调制技术。

技术驱动因素

AI与5G/6G技术的快速发展，对数据传输速率提出了更高的要求。AI大模型的训练与推理、5G基站回传等场景，都需要高速、稳定的数据传输支持。此外，随着数据中心规模的扩大，对800G/1.6T以太网的支持也成为必然。同时，高密度SerDes设计在追求更高传输速率的同时，也需要兼顾功耗效率，以实现绿色、节能的数据中心运营。

224Gbps技术背景与应用场景

技术背景

由于PAM4调制技术的引入，高速信道在112 GBd波特率下实现了224Gbps的传输速率。然而，这一转变也对传输信号的信噪比 (SNR) 提出了更高的要求。相较于NRZ调制，PAM4的SNR需求提升了9.5 dB。为了提升纠错能力，低密度奇偶校验码 (LDPC) 与级联编码 (如RS+Hamming编码) 等技术被广泛应用。

在材料与工艺方面，高频低损耗PCB基材 (如 $Dk \leq 3.5$ ， $Df \leq 0.003$) 的推出以及高频连接器 (如1.85 mm同轴接口) 的广泛应用，为224Gbps传输速率的实现提供了有力的保障。

典型应用场景

224Gbps高速互连的应用场景非常广泛，包括但不限于芯片至光引擎 (D2OE) 封装基板走线、背板互连高速PCB和高速无源铜缆、机架内互连高速有源铜缆 (AEC) 以及数据中心光模块 (如OSFP可插拔模块)。在这些场景中，对传输介质的性能、传输距离以及关键要求都有着严格的规定，以确保数据传输的稳定性和可靠性。

场景	传输介质	典型距离
背板互连	高速PCB走线+高速无源铜缆	$\leq 1m$
机架内互连	高速有源铜缆 (AEC)	$\leq 3m$

表2：224Gbps高速互连的典型应用场景

应用卡片 | 01.00版

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



224Gbps高速线缆测试关键指标

高速线缆的测试指标主要由常规指标和部分后处理指标组成。常规指标分为频域指标和时域指标，其结果可由VNA直接测量得到。后处理指标，通过对VNA测量数据进行算法处理后得到。

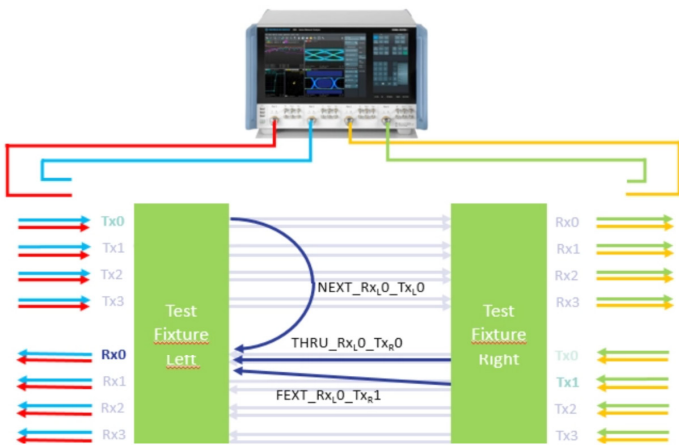


图2：224Gbps高速线缆测试连接示意

频域指标

频域指标是衡量高速线缆性能的重要参数。差分插入损耗 (如S_{dd21}) 反映了信号在传输过程中的衰减情况，是评估通道性能的关键指标。差分回波损耗 (如S_{dd11}) 则表征了线缆的阻抗匹配程度，降低S_{dd11}对于减少反射干扰具有重要意义。模式转换 (如S_{cd21}) 反映了差分信号转为共模噪声的能力，近/远端串扰 (NEXT/FEXT) 分别反映了近端Tx信号 (或远端Tx信号)对此条Lane接收端 (Rx位置) 的耦合噪声情况。224Gbps高速线缆的典型频域指标如下所示。

指标	定义	测试方法
差分插入损耗 (S _{dd21})	信号传输效率，表征通道衰减	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
差分回波损耗 (S _{dd11})	阻抗匹配程度，减少反射干扰	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
共模回波损耗 (S _{cc11})	共模信号激励后的共模回波损耗	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
模式转换 (S _{cd11})	差模信号激励后的共模回波损耗	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
模式转换 (S _{cd21})	差分信号转为共模噪声的能力	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
S _{cd21} -S _{dd21}	差模到共模损耗减差分插入损耗	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
近端串扰 (NEXT)	近端Tx在此Lane接收端的耦合噪声	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz
远端串扰 (FEXT)	远端Tx在此Lane接收端的耦合噪声	VNA频域扫描，10 MHz-56 GHz

表3：224Gbps高速线缆的常规频域指标

时域指标

时域指标同样对高速线缆的性能评估至关重要。时域阻抗分布，反映了高速线缆的阻抗随长度分布的均匀性。时延差 (Skew) 反映了差分对内或差分对间传输延迟的差异，对于保持信号同步具有重要意义。224Gbps高速线缆的典型时域指标如下所示。

指标	定义	测试方法
对内时延差 (Intra-Pair Skew)	差分对内传输延迟差异	VNA时域传输，阶跃响应
对间时延差 (Inter-Pair Skew)	差分对间传输延迟差异	VNA时域传输，阶跃响应
时域阻抗 (TD Impedance)	差分线随时间的阻抗分布	VNA时域反射，阶跃响应

表4：224Gbps高速线缆的常规时域指标

后处理测试指标

高速线缆的测试指标还有一些后处理测试指标。以IEEE802.3dj为例，其后处理指标包括信道工作裕量、有效回波损耗和插入损耗偏差等。

指标	定义	测试方法
信道工作裕量 (COM)	综合插入损耗、串扰与均衡能力的信噪比指标	MATLAB脚本计算 (IEEE官网提供)
有效回波损耗 (ERL)	结合均衡与噪声影响的反射抑制能力	MATLAB脚本计算 (IEEE官网提供)
插入损耗偏差 (ILD)	插损测量值与插损拟合值的差值	插损拟合值通过多项式线性预测得到

表5：224Gbps高速线缆的典型后处理指标

► **信道工作裕量 (COM)**：COM是品质因数，基本上是插入损耗和隔离度之间的差值，可粗略地描述为信噪比。它综合了插入损耗、串扰与均衡能力的信噪比指标，是评估通道性能的综合指标。在分析每条Lane的信道裕量时，需要用到对应该条Lane所有的NEXT/FEXT测试数据。

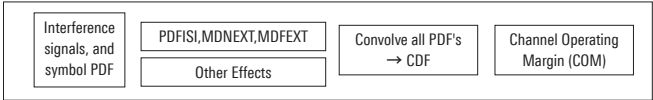


图3：信道工作裕量 (COM) 的计算流程

► **有效回波损耗 (ERL)**：ERL 则将回波损耗与均衡效果以及发射器噪声和接收器频率响应结合到类似信噪比的品质因数中。它结合了均衡与噪声影响的反射抑制能力，对于提升信号质量具有重要意义。ERL是时域计算的结果，通过PTDR 时域响应计算而来。

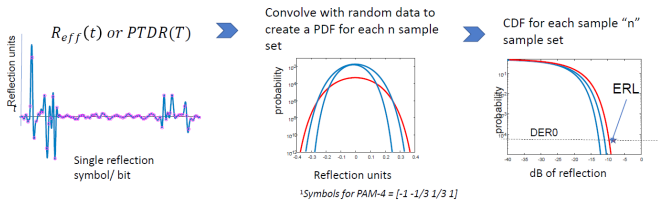


图4：有效回波损耗 (ERL) 的计算流程

► **插入损耗偏差 (ILD):** 插入损耗偏差 $ILD(f)$ 是插入损耗测量值 $IL(f)$ 与插入损耗拟合值 $IL_{fitted}(f)$ 之间的差值, $IL_{fitted}(f)$ 是通过多项式线性预测的结果。

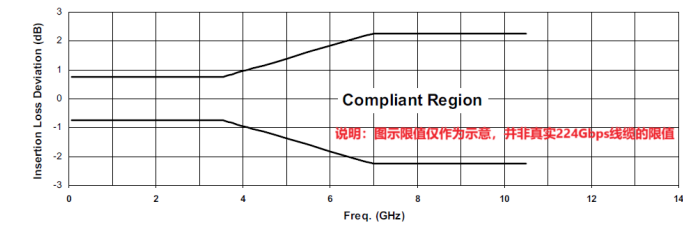


图5：插入损耗偏差(ILD)的计算流程

除了上述指标，CEI-224G和Infiniband XDR 200Gbps高速线缆各自还有一些特有的后处理测试指标。CEI-224G还有 FOM_{ILD} (又叫 ILD_{RMS}) 和ICN (综合串扰噪声) 等指标，Infiniband XDR还有 ILD_{RMS} (有效插损偏差)、ICN(综合串扰噪声) 和ICMCN (综合共模转换噪声)等指标。 FOM_{ILD} (ILD_{RMS}) 是对 $ILD(f)$ 数学加权后的运算结果，ICMCN是对Scd21数学加权后的运算结果，ICN则是由MDNEXT和MDFEXT运算而成。若需了解更深入的含义解释，请见各自的产品规范，在此不再赘述。

夹具去嵌的应用和典型去嵌方法

夹具去嵌的必要性

网络分析仪在测试高速线缆时，经常需要对夹具进行去嵌。通过去嵌可消除夹具对DUT测试结果的影响，从而获得更加准确的测试结果。对于IEEE 802.3dj、CEI-224G和Infiniband XDR高速线缆的测试，当前产品标准不强制要求对夹具进行去嵌，线缆测试结果通常会包含夹具的影响。但终端用户有时会要求线缆制造商对夹具进行去嵌后再进行测试，因此有必要介绍一些与去嵌相关的知识。

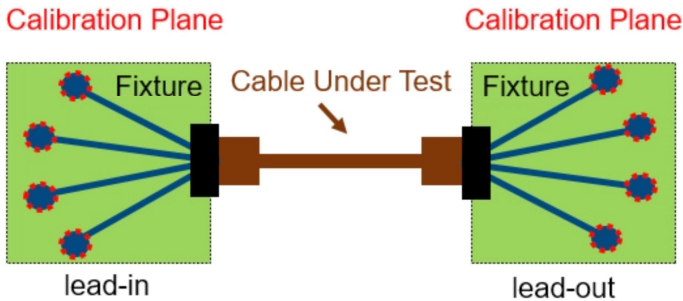


图6：高速线缆的测试夹具连接示意

典型去嵌方法

VNA常见的去嵌方法包括基本去嵌方法、高级时域去嵌方法。

基本去嵌方法是网络分析仪的基本功能，包括Auto length and Loss、Time Gate、Direct Compensation等。这类方法只适合于低频应用，不适合于高速线缆的夹具去嵌。

适合于高速线缆去嵌的是高级去嵌方法，这类方法本质上是时域算法软件。R&S VNA提供了三种高级去嵌选项：R&S ISD、R&S SFD、R&S EZD。使用这些高级去嵌方法，用户可对夹具的影响进行精确去除。

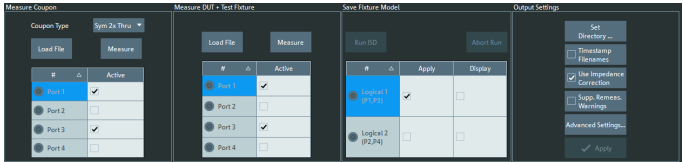


图7：R&S ISD的去嵌流程

测试夹具设计

测试夹具的设计对于确保去嵌精度同样至关重要。IEEE P370标准规范了夹具设计、去嵌方法与S参数验证流程，以确保去嵌测试结果的准确性和可靠性。

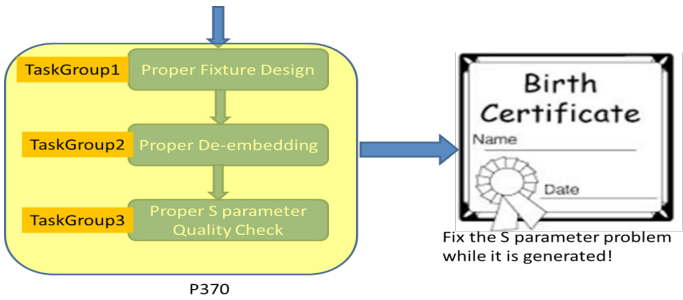


图8：IEEE P370标准所规定的夹具设计流程

R&S公司测试方案

针对IEEE 802.3dj、CEI-224Gbps和Infiniband XDR高速线缆的测试，R&S公司可提供全套软硬件测试解决方案。该方案可实现对CR4 (4 lanes)/CR8 (8 lanes) 高速线缆的自动化测试。

► 方案硬件部分：

由矢量网络分析仪 (R&S®ZNA67)、矩阵开关系统 (R&S®OSP320 + OSP-B121VL + OSP-B122VL) 和自动校准单元 (R&S ZN-Z156) 等组成。这些硬件共同构成了高精度、多端口的测试平台。该系统支持从10MHz到67 GHz的宽频带测量，性能指标完全满足224Gbps高速线缆的测试需求。

针对224Gbps高速线缆的测试，R&S提供两种OSP开关方案：24端口方案和48端口方案。其中24端口方案用作CR4线缆的测试，而48端口方案用作CR8线缆的测试。以CR8线缆测试为例，R&S测试方案由2台OSP320矩阵开关 (内含2x OSP-B121VL+8x OSP-B122VL开关模块) 以及1台R&S® ZNA67高端矢量网络分析仪组成。

Software		Solution vendor		R&S	
R&S®Znrun option	R&S®Znrun-K412	Test ports	48-port		
R&S®Znrun core software	R&S®Znrun-K1	Test setup			
License dongle	R&S®ZNPC				
Hardware					
Vector network analyzer	R&S®ZNA67				
Calibration unit	R&S®ZN-Z156 Var.03	Software	R&S®Znrun		
R&S®OSP switch		Crossbar	None		
48 ports	2 x R&S®OSP320 2 x R&S®OSP-B121VL and 8x R&S®OSP-B122VL 1 x R&S®ZV-Z67CR8 ¹⁾	Calibration steps	47		
24 ports	2 x R&S®OSP320 2 x R&S®OSP-B121VL and 4x R&S®OSP-B122VL 1 x R&S®ZV-Z67CR4 ¹⁾	Measurement re-connection steps for DUT with identical connectors on each end	1		
		2-lane	1		
		4-lane	1		
		8-lane	2 (re-connection of 1 time DUT cable flipping)		

图9：R&S 224Gbps高速线缆测试方案的构成

► 方案软件部分：

R&S®ZNrun矢网自动化测试平台软件支持IEEE 802.3dj、OIF CEI-224G等标准，可一键生成COM、ERL等关键指标报告。同时，该软件内部还可集成MATLAB脚本，便于对其进行二次开发，从而对测试数据的处理和分析更加高效、便捷。

R&S®ZNrun软件套件采用了包含多个客户端的服务器架构。测试开发人员可以使用R&S®ZNrun Workbench工具配置和控制测试装置。R&S®ZNrun为测量客户端提供控制面板，便于测试操作员一键开始测量并验证结果。R&S®ZNrun提供全自动一致性测试解决方案，能够准确、快速地对高速线缆组件等执行自动化测试。

R&S®ZNrun以其高度集成化、多客户端控制与同步测量、全自动一致性测试解决方案以及灵活定制与扩展性等技术特点，为用户提供了高效、准确、便捷的测试解决方案。

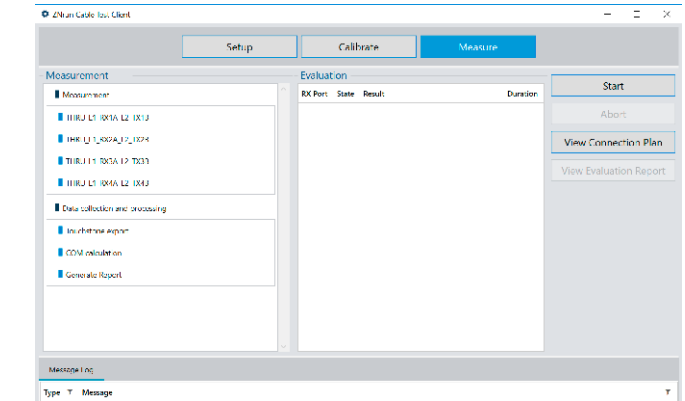


图10：R&S®Znrun软件界面

总结

224Gbps高速互连系统是支撑下一代数据中心与通信网络的核心技术之一。基于R&S高精度矢量网络分析仪和高性能多端口开关矩阵的R&S ZNrun自动化软件平台，可以全面评估各类高速互连线缆的插入损耗、串扰、时延差等关键指标。该软件平台还内置了后处理算法，可以轻松实现COM、ERL和ICN等指标的计算。

未来，随着数据传输速率的不断提升与光电融合技术的发展，高速线缆测试技术将不断向更高带宽、更高集成度和智能化方向演进。随着PAM6/PAM8等调制技术的引入，传输速率将进一步提升至448Gbps乃至更高。

罗德与施瓦茨 (中国) 科技有限公司
800-810-8228 400-650-5896
info.china@rohde-schwarz.cn
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
版本01.00 | 2025年5月
224Gbps高速线缆测试方案
文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改