UNI-T

车载以太网一致性分析解决方案

SOLUTION FOR COMPLIANCE TESTS OF AUTOMOTIVE ETHERNET

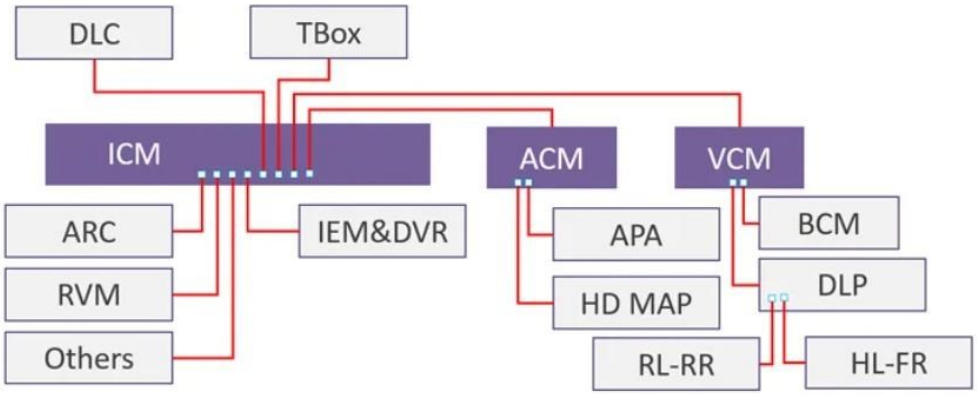


认识车载以太网

新一轮汽车技术创新浪潮催生了海量测试需求。尽管将所有测试精力聚焦于更新迭代、面向用户的应用程序颇具吸引力，但车载以太网的测试才是重中之重。就像电视、洗衣机、冰箱这些我们习以为常的现代电器，一旦断电便形同虚设；同理，即便车载应用程序经过最严苛的测试，脱离以太网也无法正常运行。

OPEN 联盟最初为车载以太网划定了三大应用场景：360° 环视、车辆诊断与车载娱乐。这三类场景的核心共性在于**数据传输量**巨大。早年间宝马率先研发以太网技术，正是由于传统 CAN 总线在车辆诊断时面对海量数据传输力不从心，哪怕是一次规模稍大的系统更新，都可能耗时一到两个小时。而以太网的落地，恰好攻克了数据传输带宽不足的行业痛点。如今，先进驾驶辅助系统（ADAS）、智能网联汽车与自动驾驶汽车（AV）正在重塑商用车与乘用车的交通格局。每一次性能的跃升，都离不开更大数据量、更快传输速度的支撑，这也直接推动了车载网络向车载以太网的全面转型。

当下大部分车型应用的三大功能域架构（Domain：整车域、智驾域、座舱域），也有很多公司开始预研中央处理+位置域（Zonal）的架构。我们将高端车中经常用到的以太网节点进行汇总来思考哪些场景会用到车载以太网技术。



场景汇总：

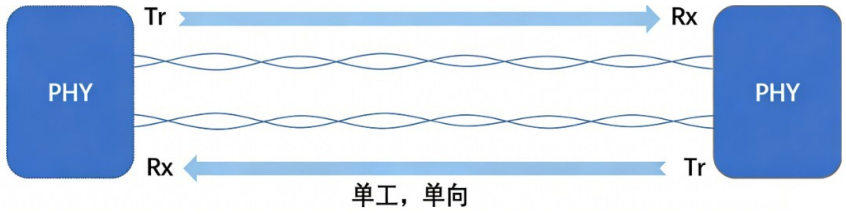
Tbox	Telematics Box	Tbox	**ARC**	AR Creator	AR 发生器
DLC	Diagnostic Link Connector	诊断连接器	**RVM**	Rear Seat Entertainment	后座娱乐
ICM	Infotainment Control Module	娱乐域控制器	**IEM**	Interior E-Mirror	电子内后视镜
ACM	Auto-driving Control Module	智驾域控制器	**DVR**	Digital Video Recorder	行车记录仪
VCM	Vehicle Control Module	整车域控制器	**DLP**	Digital Lighting Process	数字灯光处理单元
BCM	Body Control Module	车身域控制器	**HL-FR**	Head Lamp-Front Right	前大灯，右前
HD Map	High Precision Map	高精度地图	**RL-RR**	Rear Lamp-Rear Right	后尾灯，右后
APA	Auto Parking Assist	自动泊车辅助		...	

- **网联类：**TBox、诊断控制器、中央网关等。
- **智驾类：**智驾域控制、高精地图、泊车辅助、激光雷达、摄像头、驾驶员监测等。
- **整车与车身：**整车域控制、车身控制、前后大灯、数字灯光、车内氛围灯等。
- **娱乐类：**娱乐域控制、记录仪、内外电子后视镜、HUD、AR-HUD、音响系统、乘客监测等。

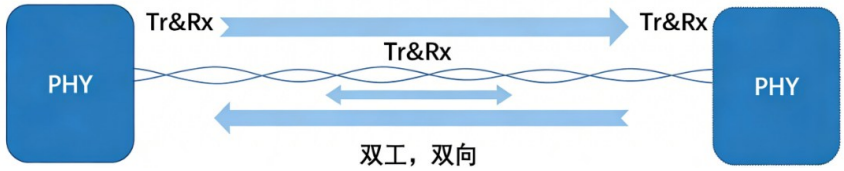
了解车载以太网技术

车载以太网 100Base-T1 和 1000Base-T1 主要基于单对双绞线来进行数据传输，同时采用 PAM-3 编码方式来提高传输速率和可靠性。它与常规的 100Base-Tx 工业以太网不同，工业以太网采用两对双绞线，物理层接收到 MAC 发来的数据后先进行 4B/5B 编码，再通过 MLT-3 的编码方式发送出去。

常规以太网 100Base-Tx



汽车以太网 100Base-T1

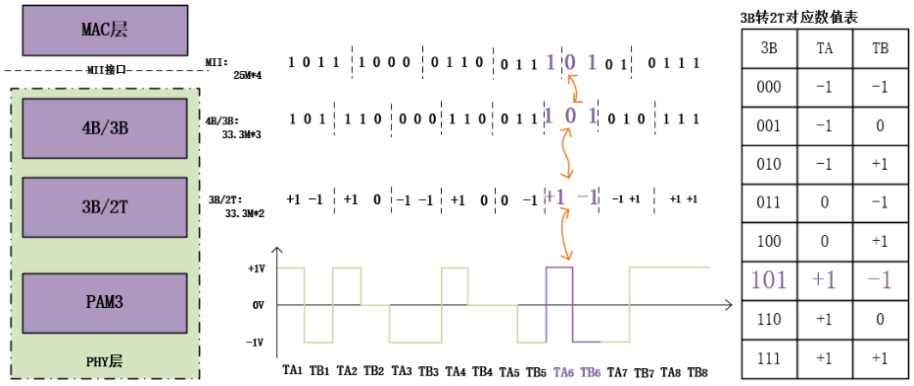


工业以太网 100Base-Tx 和车载以太网 100Base-T1 信号传输区别

但车载以太网则不同，100Base-T1 物理层接收到 MAC 发来的数据后，经过了 3 步的过程。

MAC 层数据通过 MII 接口，以 25MHz 速率将 4bit 并行传输至 PHY 层，数据速率：4bit×25M=100Mbps；

- **4B/3B 转换**：PHY 层接受到数据后进行 4B/3B 转换，同时完成时钟转换，将 25MHz 传输的 4bit 数据转换成时钟频率为 33.33MHz 的 3bit 数据块，数据速率为 33.33×3bit≈100Mbps；
- **3B/2T 编组**：再进行 3B/2T 编组，每 3bit 数据（3B）编组成一对三进制符号（2T），并以 66.66Msymbol/s 的符号传输速率进行传输。
- **PAM-3 调制**：最后进行 PAM-3 调制和物理传输，由于每个三进制符号携带 Log_2(3)≈1.5bit 信息，66.66Msymbol/s×1.5bit/symbol≈100Mbps。最终实现 100Mbps 传输速度。



3B转2T对应数值表

3B	TA	TB
000	-1	-1
001	-1	0
010	-1	+1
011	0	-1
100	0	+1
101	+1	-1
110	+1	0
111	+1	+1

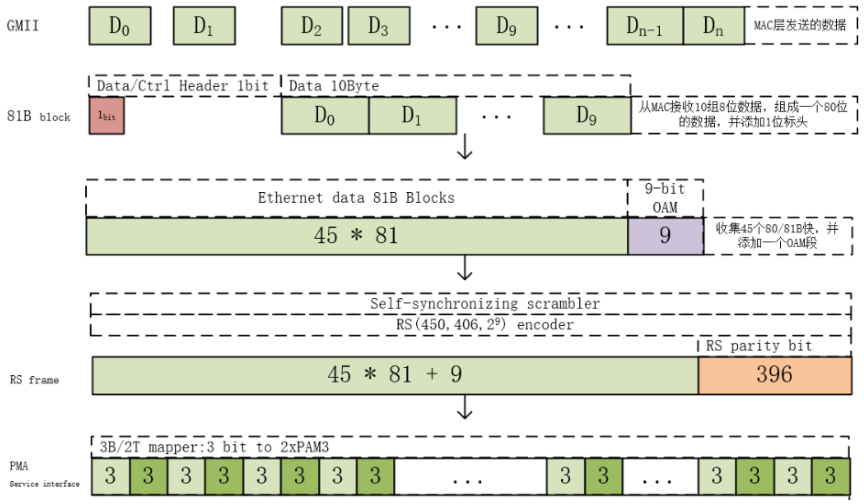
100Base-T1 编码和传输过程

1000Base-T1 则更为复杂，经历 4 个步骤：

- **80B/81B 编码**：从 MAC 接收到 8 位数据后，通过 80B/81B 转码将 10 个 8bit 数据转换成 81B，剩下 1bit 填充为标头，用于区分数据块还是控制块，这个过程需要 10 个时钟周期。
- 收集 45 个 80B/81B 数据块并为其添加 9bit 的 OAM 字段，用于链路的操作管理和维护。
- **RS-FEC 编码**：进行加扰，RS-FEC 编码和添加 396bit 的 RS-FEC 奇偶校验位进行纠错。
- 3B/2T：通过 3B/2T 进行波形调制成 PAM-3 格式输出到网络中。

1000MBase-T1 符号速率为 750MHz，经过 3B/2T 编码可以得到 1.5 倍的比特率，但又因为 80B/81B 转码以及添加了 OAM 字段和

RS-FEC 校验位，因此有效数据的比特率为：750*1.5*(45*80)*(45*81+9+396)=1000Mbps。



1000Base-T1 编码和传输过程

PAM-3【三电平脉冲幅度调制】技术：

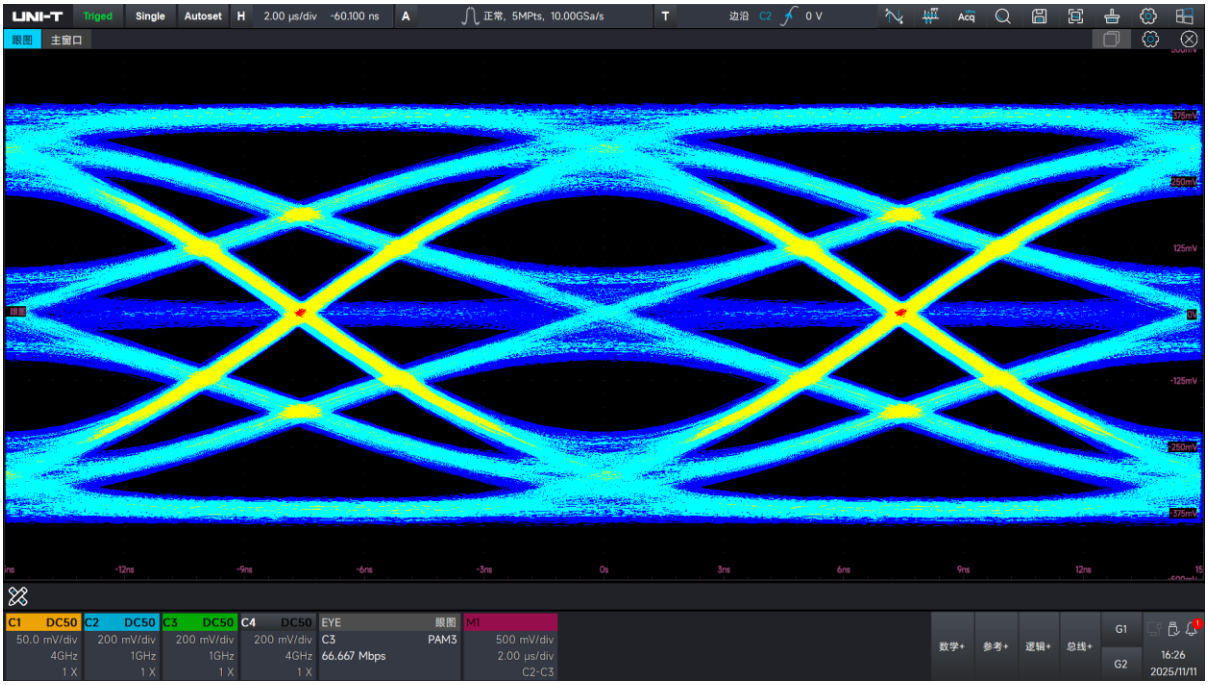
PAM3（3-Level Pulse Amplitude Modulation）是一种多电平调制技术，通过三个不同的信号电平（例如+1、0、-1）传输数据。每个符号周期可携带约 1.5 比特信息，与其它 PAM 类似，通过增加电平数量来提升数据传输效率。在 PAM-N 的选择上，一是需要提升数据传输效率，以满足越来越高的数据速率需要；二是需要平衡信号完整性问题与实现复杂带来的挑战。

PAM3 通过三个电平（如+1、0、-1）编码数据，每两个码元周期传输 3bit 数据；相较于 NRZ 信号，带宽提升 50%，相较于 PAM-4，信噪比要求更低，并且设计和制造上的成本、复杂度适中

	Transmit1	Transmit2
000	-1	-1
001	-1	0
010	-1	1
011	0	-1
100	0	1
101	1	-1
110	1	0
111	1	1
000	0	0

使用 PAM-3 的协议（常见）：

- GDDR7：每两个周期传输 3 位数据，单通道速率可达 32Gbps，应用与高性能显卡 AI 计算和车载 GPU。
- 车载以太网：在车载短距离通信中，PAM-3 通过降低信号摆幅减少电磁干扰。适用与自动驾驶等场景。
- USB4 v2：与 PAM-4 相比，适用于 USB4 v2 的 PAM-3 可以提供更大的眼图开度。



车载以太网 100Base-T1 的 Master 眼图

使用自动化一致性解决方案更深入地了解车载网络

业界【两大标准机构 IEEE 和 OPEN 联盟】制定了关于车载以太网物理层一致性测试标准，以保证不同设计和不同硬件厂商之间的互通性。优利德车载以太网一致性分析解决方案覆盖 100Base-T1（802.3bw）和 1000Base-T1（802.3bp）。对于物理层测试，首先关注的是发射机。示波器是上述测试的主要工具。发射机失真、MDI 回波损耗、MDI 模式转换还需要使用其他仪器，1000Base-T1 车载以太网要求示波器带宽至少 2GHz。

优利德支持的车载以太网测试，提供 802.3bw、802.3bp 标准的测试，OPEN 联盟规范可以按照下面的描述找到对应的 IEEE 规范。

100Base-T1:

测试标准				
IEEE802.3bw	OPEN 联盟 TC8	测试项目	测试模式	仪器
96.5.4.1	OABR_PMA_TX_01	发射机输出正/负压降	Test Mode1	1GHz 示波器
96.5.4.2	OABR_PMA_TX_08	发射机失真	Test Mode4	1GHz 示波器和 AWG
96.5.4.3	OABR_PMA_TX_02	发射机时序抖动测试（主）	Test Mode2	1GHz 示波器
96.5.4.5	OABR_PMA_TX_03	发射机时钟频率测试（主）	Test Mode2	1GHz 示波器
96.5.4.3	-	TX_TCLK 时序抖动测试（从）	Test Mode3	1GHz 示波器
96.5.4.5	-	TX_TCLK 时钟频率测试（从）	Test Mode3	1GHz 示波器
96.5.4.4	OABR_PMA_TX_04	发射机功率谱密度（PSD）	Test Mode5	1GHz 示波器
96.5.6	-	发射机峰值差分输出测试	Test Mode5	1GHz 示波器
96.8.2.1	OABR_PMA_TX_05	MDI 回波损耗测试	Slave	1GHz 示波器和 VNA
96.8.2.2	OABR_PMA_TX_06	MDI 模式转换损耗测试	Slave	1GHz 示波器和 VNA
-	OABR_PMA_TX_07	MDI 共模发射测试	Test Mode5	1GHz 示波器

1000Base-T1:

测试标准			
IEEE802.3bp	测试项目	测试模式	仪器
Section 97.5.3.6	发射时钟 TX_TCLK125 频率（主/从）	Test Mode1	2GHz 示波器
Section 97.5.3.3	发射时钟 TX_TCLK125 时序抖动（主/从）	Test Mode1	2GHz 示波器
Section 97.5.3.6	传输时钟频率	Test Mode2	2GHz 示波器
Section 97.5.3.3	发射机时序抖动	Test Mode2	2GHz 示波器
Section 97.5.3.2	发射机失真	Test Mode4	2GHz 示波器和 AWG
Section 97.5.3.4	发射机功率谱密度（PSD）	Test Mode5	2GHz 示波器
Section 97.5.3.5	发射机峰值差分输出电压	Test Mode5	2GHz 示波器
Section 97.5.3.1	发射机输出压降	Test Mode6	2GHz 示波器
Section 97.7.2.1	MDI 回波损耗	Slave	2GHz 示波器和 VNA
Section 97.7.2.2	MDI 模式转换损耗	Slave	2GHz 示波器和 VNA

车载以太网一致性分析软件:

优利德 CTS100T1/1000T1 车载以太网一致性分析解决方案为 100Base-T1 和 1000Base-T1 标准提供了全自动化执行的一致性测试分析软件。测试套件支持优利德发布的新款示波器，除了一致性分析之外，您还可以利用新款示波器的 PAM-N 分析软件在真实世界条件下验证 ECU 的全双工通信链条。

一致性分析软件可以全部测试/选择性测试任何发射机指标，包括示波器全面控制要求的设置，测试完毕后，将生成完善的测试报告以及测试通过/失败的结果，显示波形和数据视图。

一致性分析主要功能：

- 测试时间：通过设置向导实现全面自动化，可根据车载以太网 100Base-T1 和 1000Base-T1 标准执行测试。软件根据测试要求自动配置测试仪器，极大缩短整体测试时间。
- 测试范围覆盖：基于 IEEE 和 OPEN Alliance 规范设计。测试覆盖 OPEN Alliance TC8 ECU 测试要求。
- 验证和调试：配套工具(PAM-N 分析)可以帮助您进一步验证或找到故障，并提供高级抖动分析工具。
- 全方位报告：自动生成报告，包括波形测试通过/失败结果，详细测试结果，屏幕截图或分析视图等。



支持车载以太网一致性分析的仪器：

测试要求	最低仪器要求	支持的型号
基本的一致性测试	1 GHz 示波器，2 通道 (100BASE-T1) 2 GHz 示波器，2 通道 (1000BASE-T1)	UPO70000 系列、MSO8000HDP 系列、MSO8000HD 系列、MSO7000HD 系列、MSO6000HD 系列
发射机失真测试	2 通道函数/任意波形发生器， 最小带宽为 12MHz（100Base-T1） 2 通道函数/任意波形发生器， 最小带宽为 125MHz（1000Base-T1）	UTG9000T 系列
回波损耗测试	2 端口网络分析仪	VNA4092，VNA4094
一致性测试夹具	车载以太网时钟同步夹具	UT-AESF-10M
	车载以太网一致性测试夹具	推荐厂家：WILDER ，部件号： 640-1025-000：ETH-TPA-AW-M50（Mini50 Probe Card）、 640-1026-000：ETH-TPA-AW-MN（(MateNet Probe Card） 640-1027-000：ETH-TPA-AW-HMTD（Rosenberger Probe Card)） 640-1028-000：ETH-TPA-AW-CBL （Open Solder Cable Probe Card） 640-1031-000：ETH-TPA-AW-DCMK（Kit, Automotive Ethernet, Distortion） 包含 Freight and others，以上是整套夹具，共 6 个，购买时视接口形式和测试要求选择。详情请查看：www.wilder-tech.com

示波器：

优利德示波器覆盖 1GHz~13GHz 带宽范围，提供 12bitADC 分辨率，助力您深入理解车载以太网的设计。



UPO70000 系列示波器：

- 每通道 13GHz/10GHz
- 每通道 40GSa/s
- 每通道 4Gpts



MSO8000HDP 系列示波器：

- 每通道 8GHz/6GHz
- 每通道 20GSa/s
- 每通道 4Gpts
- 12bit



MSO8000HD 系列示波器：

- 8GHz/6GHz/5GHz
- 20GSa/s
- 2Gpts
- 12bit



MSO7000HD 系列示波器：

- 3GHz/2GHz
- 10GSa/s
- 1Gpts
- 12bit



MSO6000HD 系列示波器：

- 2GHz/1GHz
- 10GSa/s
- 1Gpts
- 12bit

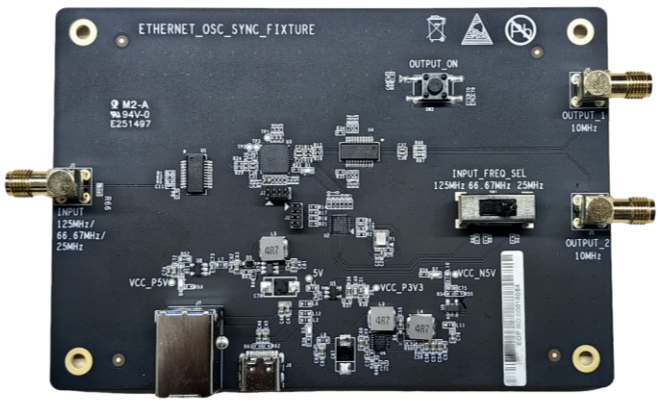


UTG9000T 系列信号源：

- 600/500/350MHz
- 2.5GSa/s
- 4 通道

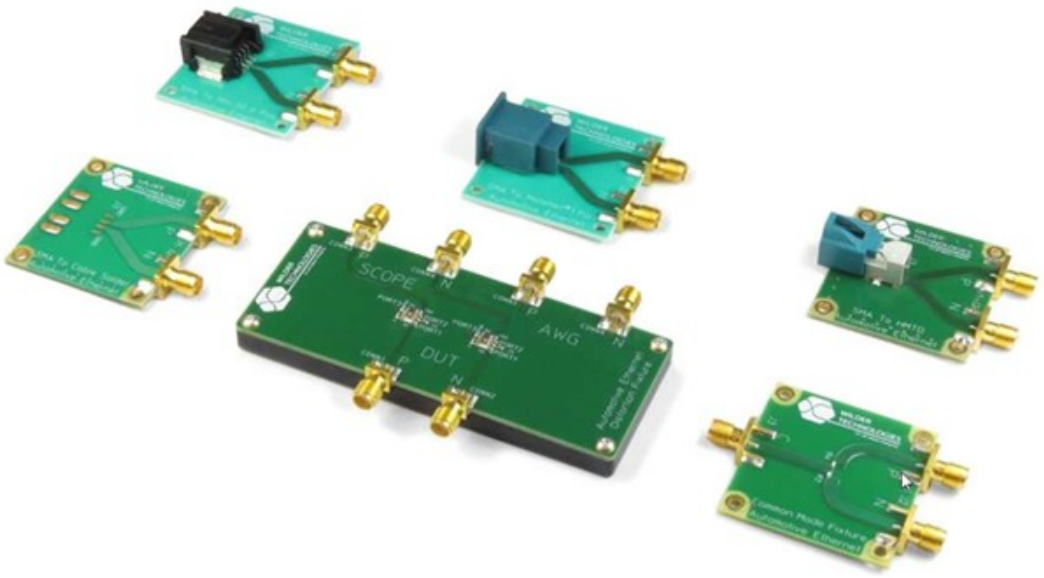
时钟同步夹具：

同步时钟夹具可将车载以太网 25MHz/66.66MHz/125MHz 时钟转换为示波器和信号源所需要的 10M 时钟，以保证在传输失真测试时示波器和加扰信号的同源。部件号：UT-AESF-10M



车载以太网一致性分析夹具：

Wilder 推出的车载以太网一致性分析夹具，可用于验证车载以太网标准 100Base-T1 和 1000Base-T1 的物理层一致性。除一般的一致性测试外，还支持测量 ECU 的 MDI 共模发射测试、以及发射机失真测试。



车载以太网测试实例

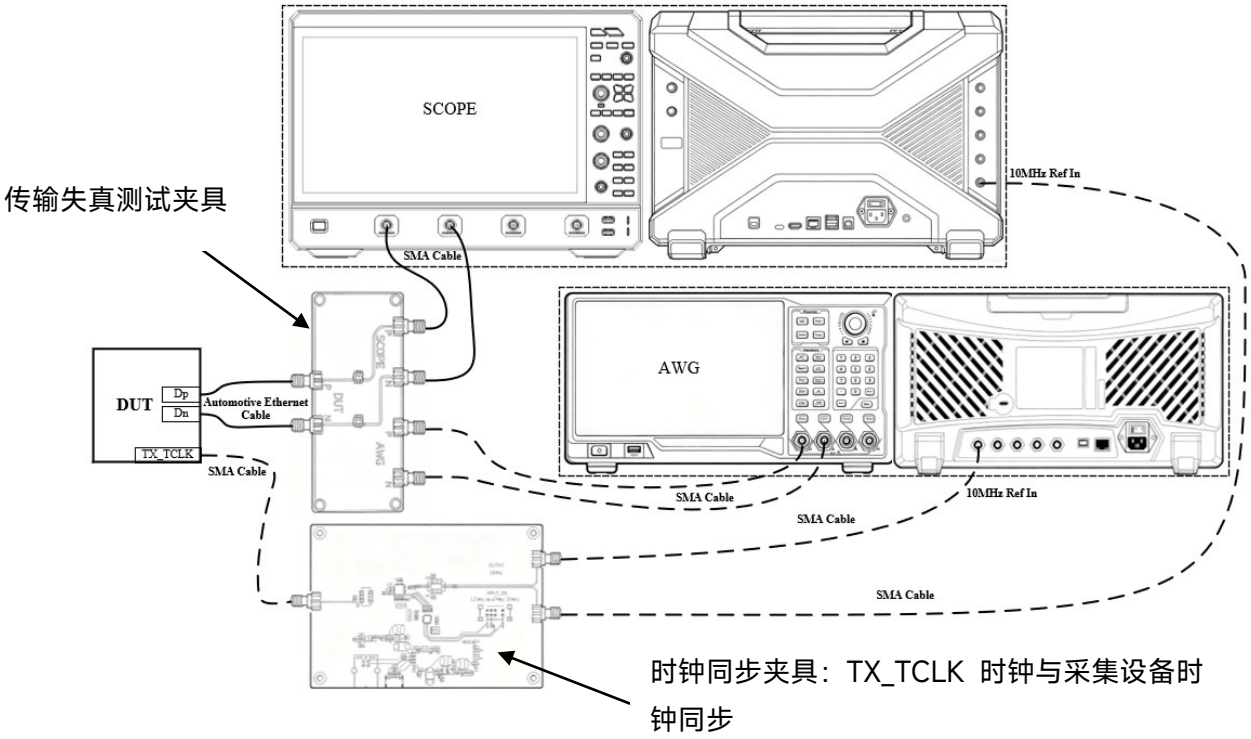
CTS100/1000T1 一致性分析软件全面实现信号质量测试过程自动化，允许设计人员快捷简便地执行测试。仅需为以太网信号选择要执行的测量，然后根据提示连接框图配置测试连接，测试软件消除了麻烦耗时的手动示波器设置、光标放置及与协议规范比较测试结果的过程。



上图实测一个车载网关转换器的 1000M 车载以太网接口，该转换器可将 1000M 车载以太网转化为工业以太网

传输失真测试

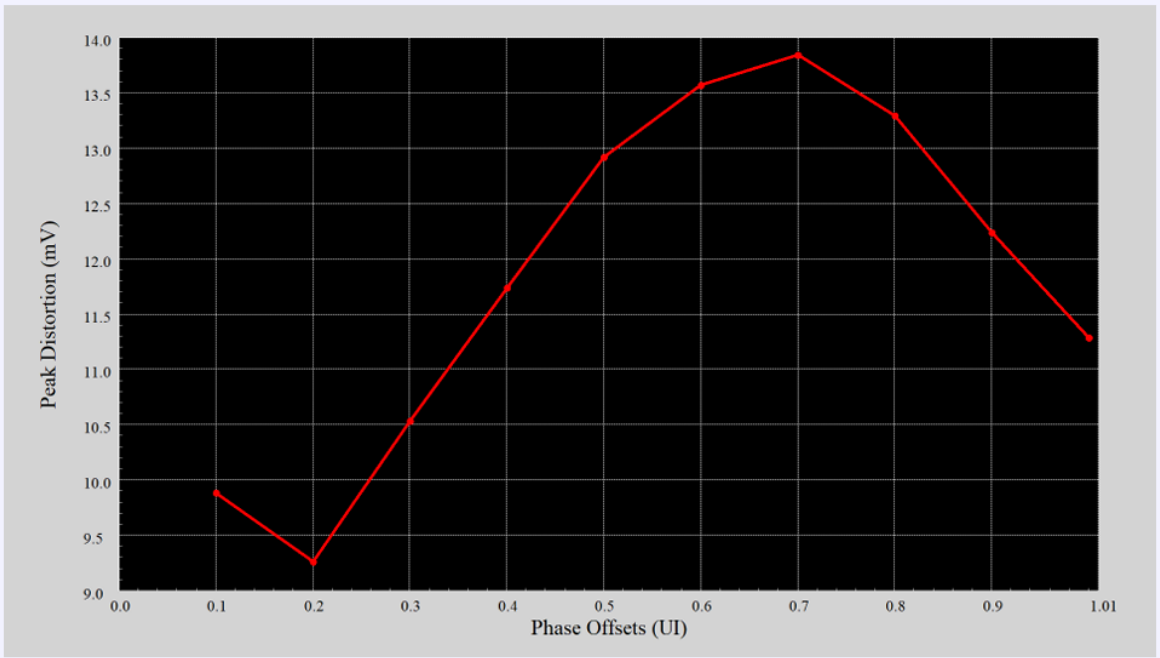
失真测试需要使用干扰信号，并且示波器的数据采集时钟是锁定到 DUT TX_TCLK 的频率，优利德推出的以“硬件时钟分路器”方法支持此测试，该项测试需要使用信号源和时钟同步夹具，TX_TCLK 时钟经过时钟分路器转化为示波器和信号源所需要的 10M 时钟，从而达到采集和干扰设备之间的同源。



传输失真测试连接图

失真测试需配置 100/1000Base-T1 测试表中指明的测试模式，测试允许的最大发射机失真。100Base-T1 测试需要信号源发出 11.111MHz，峰值幅度为 5.4V 的正弦波。

注：若 DUT 的 TX_TCLK 不可引出或测试设备无法将 DUT 内部时钟采样时钟同步，将进而引发相位偏移，造成实测失真值显著增加【相较于接入 TX_TCLK】。



发射机时序抖动和发射机时钟频率测试

物理层有一个符号的时钟，使用支持的 100Base-T1 和 1000Base-T1 需要的测试模式得到，此项测试需要借助 JITTER（高级抖动分析和眼图）选件进行主（从）RMS 抖动和 TX 时钟频率测量。



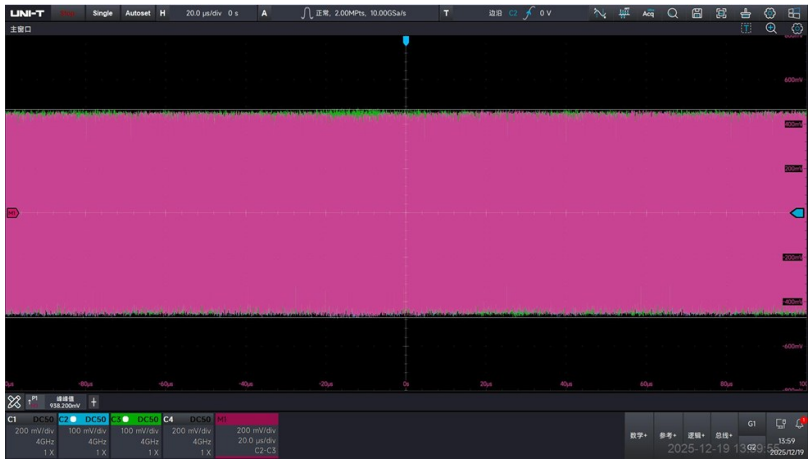
传输抖动和传输时钟频率测试

DUT 在测试模式 2 下，发射机在主模式交替发出 3 个“+1”和 3 个“-1”符号，测试数据信号的频率和抖动，此项测试需要借助 JITTER（高级抖动分析和眼图）选件进行抖动峰峰值和 RMS 值以及时钟频率测量。



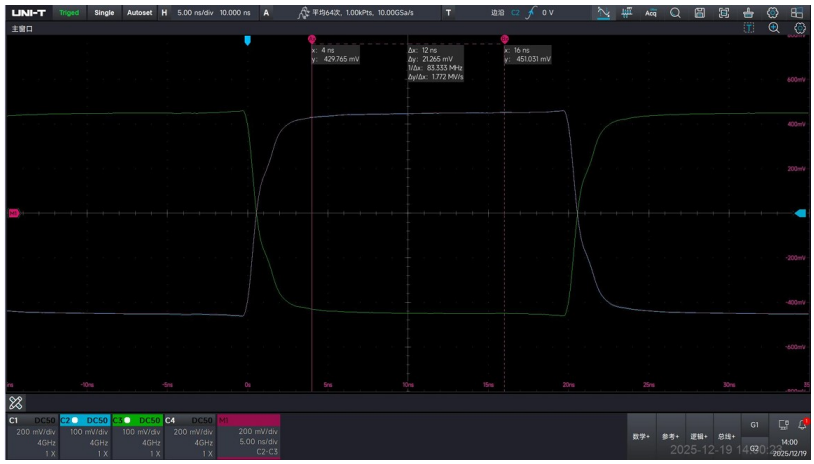
发射机峰值差分输出电压测试

以 100Ω的终端进行测量 MDI 输出差分信号的峰峰值电压



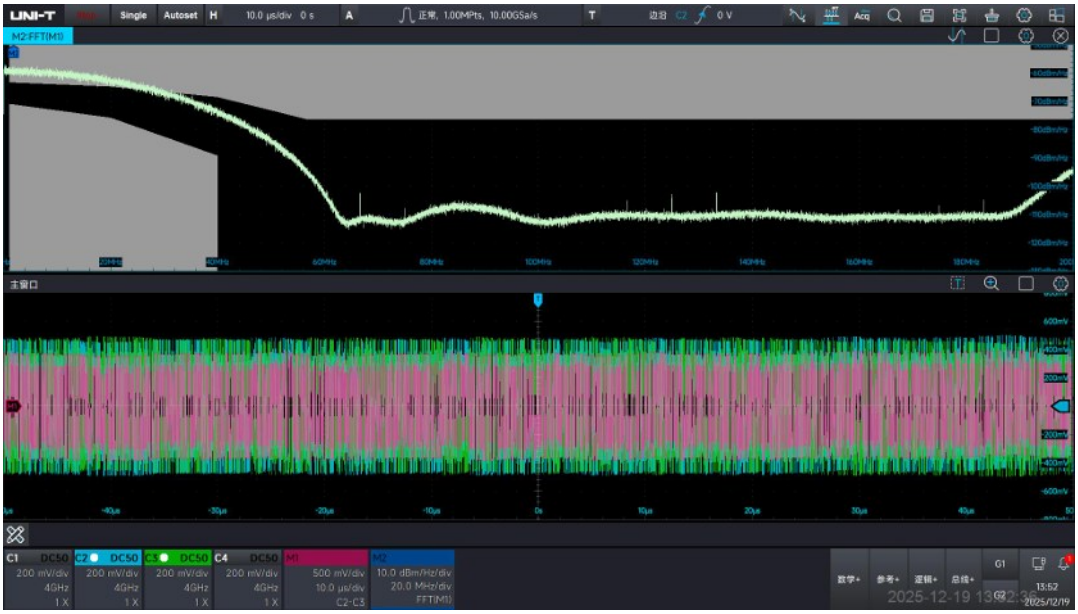
发射机输出正/负压降测试

使用支持的 100/1000Base-T1 测试表中的测试模式配置物理层。通过确定正/负波形的峰值电压来执行压降测试。



功率谱密度测试

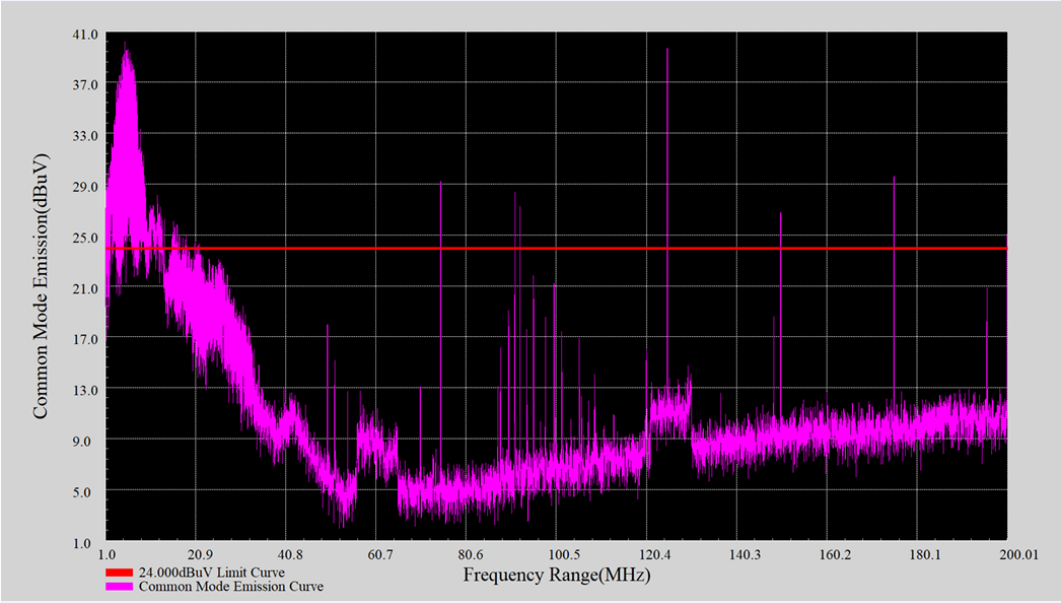
将 DUT 经过 100Ω的巴伦将单端信号转换为差分【测试夹具实现】，使用示波器的高级数学算法，计算输入信号频谱，再经过示波器后处理得到 PSD。使用上/下限模版，把计算的 PSD 谱线与规范进行对比，得到最终结果。



功率谱密度测试，将 PSD 谱线与模版进行对比

共模发射测试

使用示波器的高级数学算法，对被测设备 DUT 的 MDI 端口出的射频共模发射量镜像测量，规范要求：MDI 的共模发射量在 1MHz~200MHz 内不能超过 24dBμV。



共模发射测试，计算的频谱与限制线比较，规范要求小于 24dBμV

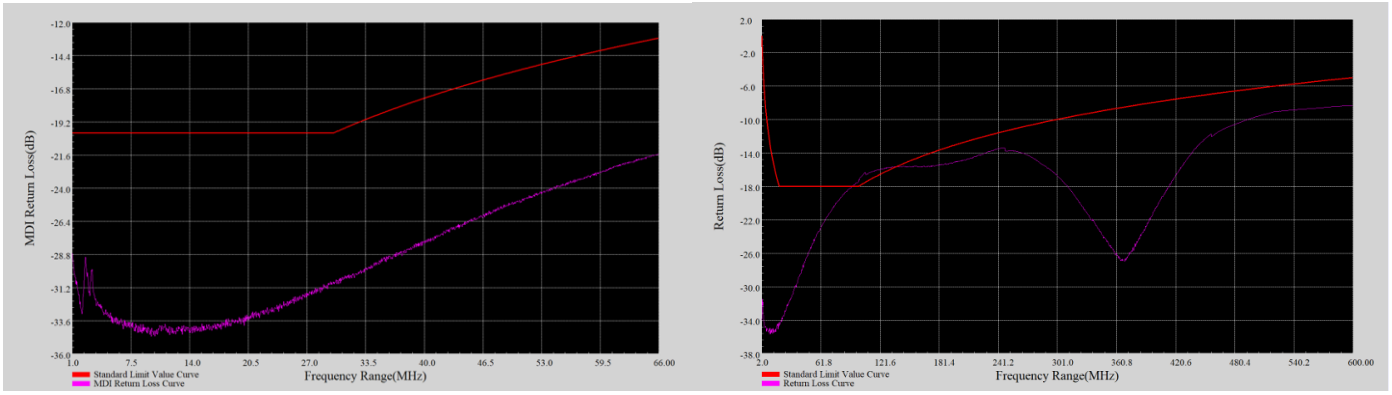
MDI 回波损耗测试

100Base-T1：参考标准：IEEE Std 802.3bw-2015（第 96.8.2.1 节）。

当通过特性阻抗为 100Ω ±15%的平衡电缆将差分信号注入 MDI 接口时，测量 MDI 接口相对于入射信号的回波损耗。标准规定 MDI 接口的回波损耗必须在所有频率点上连续地达到或超过规定的限值。

1000Base-T1：参考 IEEE Std 802.3bp, Section 97.7.2.1 标准。

每个收发通道在 MDI 处的差分阻抗应使得任何反射相对于入射信号按指定的方程衰减。

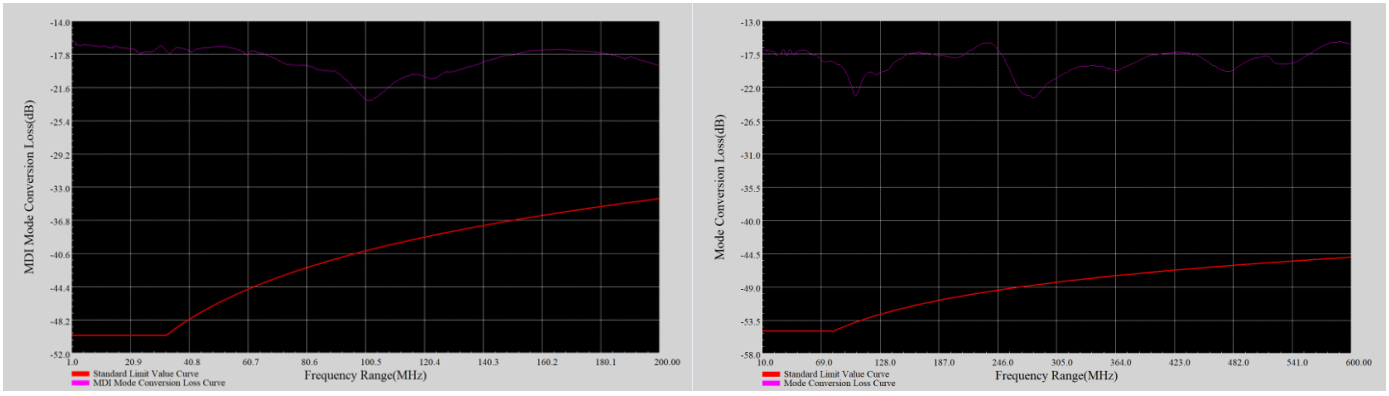


100Base-T1 MDI 回波损耗（左）和 1000BASE-T1 MDI 回波损耗（右）

MDI 模式转换损耗测试

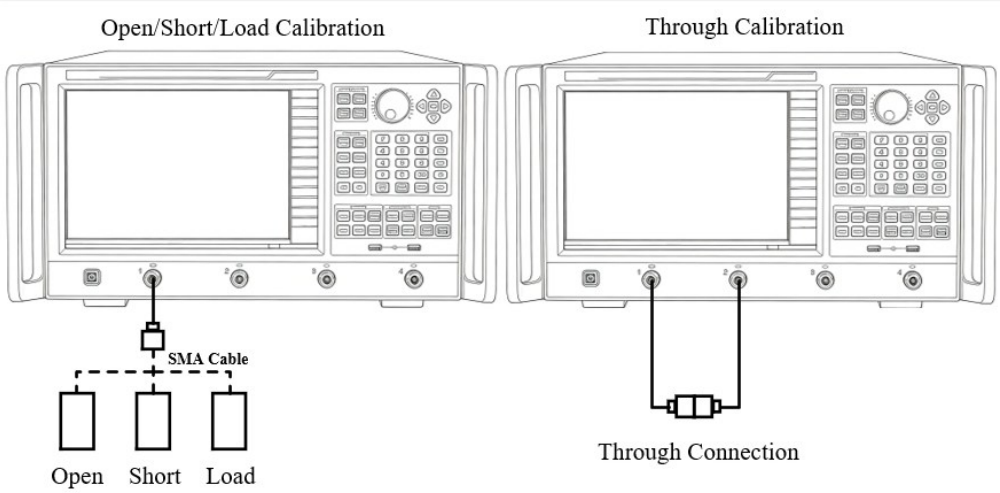
100Base-T1：参考 IEEE Std 802.3bw-2015（第 96.8.2.2 节）标准。在 MDI 接口处，测量模式转换损耗，该损耗定义为差分信号输入功率与转换的共模输出功率的比值。标准规定，该参数必须在整个频率范围 1 MHz 至 200 MHz 内符合规定的限值。

1000Base-T1：在 MDI 处测量的 PHY 的模式转换 Sdc11 或 Scd11 应在 10 MHz 到 600 MHz 的所有频率下满足规定值。



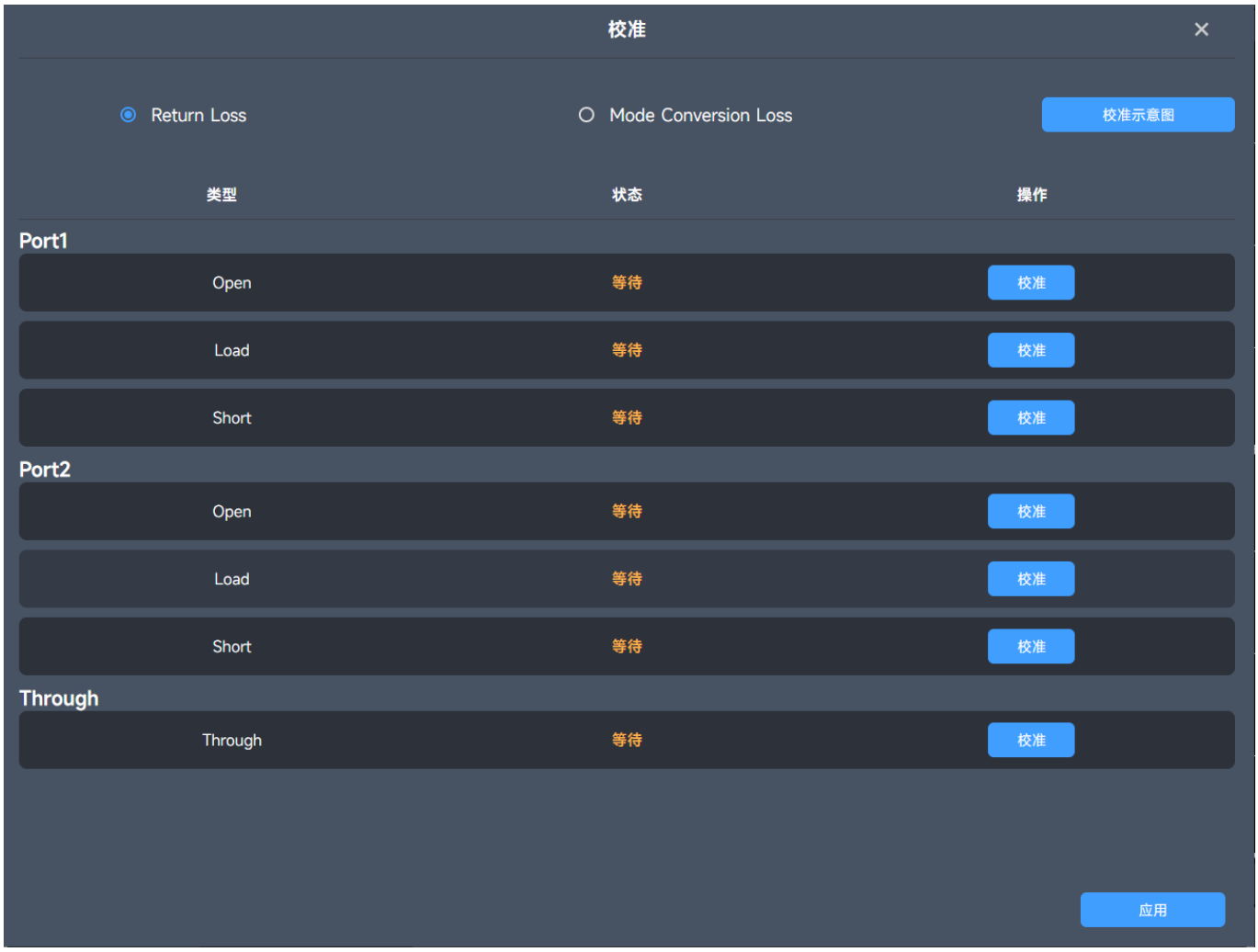
100Base-T1 MDI 模式转换损耗（左）和 1000BASE-T1 MDI 模式转换损耗（右）

回波损耗校准



校准连接示意图

在进行回波损耗测试前，需要先进行 VNA 校准，使用双端口矢量网络分析仪进行测试，按上图所示的要求连接校准件，并连接到示波器，一致性分析软件连接到网络分析仪后，自动控制网络分析仪完成校准。



测试报告：

车载以太网一致性分析支持 PDF 或 HTML 格式的一致性分析报告，报告在软件测试完成后自动生成，包括测试通过/失败状态，测试报告摘要迅速分析测试结果。报告还包含测试配置细节、波形图、示波器截图以及测试裕量分析，可以深入了解您的车载以太网设计特点。

UNI-T **Automotive Ethernet 100Base-T1 Compliance Test Report**

Overall Information

Application Info	
Application Name	CTS Automotive Ethernet
Application Version	1.02.0000
Device Info	
Scope Model Number	MSO8000HD
Scope Software Version	3.01.0000
Scope Serial Number	AHD8225010002
Test Info	
DUT ID	DUT_1
Overall Test Result	Fail
Compliance Limits	IEEE Std. 802.3bw Specification
Test Time	2025-12-19 13:49:04.739
Excute Time	00:04:37.623
Acquisition Mode	Live

Result Summary

Test Name	Result	Measure Value	Pass Limit
Transmitter Output Droop	Pass	5.72%	Value <= 45.000
		6.76%	Value <= 45.000
Master Mode Transmitter Timing Jitter	Pass	19.132ps	Value <= 50.000
Master Mode Transmitter Frequency	Pass	66.666MHz	66.660 < Value < 66.674
Transmitter Distortion	Pass	13.84mV	Value <= 15.000
Transmitter Peak Differential Output	Pass	2.00V	Value <= 2.200
Transmitter Power Spectral Density	Fail	7195hits	0.000 <= Value <= 0.000
MDI Common Mode Emission	Fail	40.221dBuV	Value <= 24.000

Pass:5 Fail:2 Skipped:0

Transmitter Output Droop — Pass

Standard : IEEE Std 802.3bw-2015(Section 96.5.4.1).
The measured value of the initial peak Vpk following the zero crossing and the measured value of Vd obtained 500 ns after the initial peak are used to calculate the positive and negative voltage drop amplitude via 100*(Vd / Vpk)%, which must be less than 45%.

Sub Name	Result	Measure Value	Unit	Lower Limit	Upper Limit	Margin	Comments
Positive Droop	Pass	5.72	%	N.A.	45.000	High:39.275	N.A.
Negitive Droop	Pass	6.76	%	N.A.	45.000	High:38.243	N.A.

Master Mode Transmitter Timing Jitter — Pass

Standard : IEEE Std 802.3bw-2015(Section 96.5.4.3).
Under Master mode, test the RMS value of the MDI output jitter (JTXOUT) relative to the jitter-free reference signal, and compare it with the standard. The standard specifies that the RMS value must be less than 50 ps.

Measure Value	Unit	Lower Limit	Upper Limit	Margin	Comments
19.132	ps	N.A.	50.000	High:30.868	N.A.

订购信息

优利德推出的 100/1000BASE-T1 一致性分析方案具备高度自动化的测试控制流程，以直观的 UI 界面引导用户完成各项设置和操作，生成测试报告。您可以根据自己所需的测试场景配置您的测试方案。

*必选：先选择示波器，支持 100/1000BASE-T1 一致性分析的示波器

UPO71304	13GHz（每通道），40GSa/s（每通道），4Gpts（每通道）
UPO71004	10GHz（每通道），40GSa/s（每通道），4Gpts（每通道）
MSO8804HDP	8GHz（每通道），20GSa/s（每通道），4Gpts（每通道）
MSO8604HDP	6GHz（每通道），20GSa/s（每通道），4Gpts（每通道）
MSO8804HD	8GHz，20GSa/s，2Gpts
MSO8604HD	6GHz，20GSa/s，2Gpts
MSO8504HD	5GHz，20GSa/s，2Gpts
MSO7308HD	3GHz，10GSa/s，1Gpts，8CH
MSO7208HD	2GHz，10GSa/s，1Gpts，8CH
MSO6204HDP	2GHz，10GSa/s，1Gpts
MSO6104HDP	1GHz，10GSa/s，1Gpts

*必选：选择 100/1000BASE-T1 分析软件

JITTER	抖动分析和眼图选件
CTS100T1	100BASE-T1 车载以太网一致性分析选件（需选择抖动分析和眼图选件）
CTS1000T1	1000BASE-T1 车载以太网一致性分析选件（需选择抖动分析和眼图选件）

†可选：100/1000BASE-T1 测试夹具

Wilder 一致性夹具	支持 100/1000M 车载以太网一致性分析夹具【需要在 Wilder 官网购买】

†可选：失真测试选择

UTG9604T	4 通道 600MHz 函数/任意波形发生器
UTG9504T	4 通道 500MHz 函数/任意波形发生器
UTG9354T	4 通道 350MHz 函数/任意波形发生器
UT-AESF-10M	时钟同步夹具【失真测试必须】

†可选：回波损耗测试选择

VNA4092	2 端口，100kHz~9GHz
VNA4094	4 端口，100kHz~9GHz

用户自配

相位匹配 SMA 线缆×2/×6，连接示波器和测试夹具以及失真测试使用
BNC 转 SMA 适配器×2/×6，连接示波器和测试线缆以及失真测试使用
射频线缆×2，用作回波损耗测试使用

若需要选件和测试方案详情请咨询优利德销售或代理商