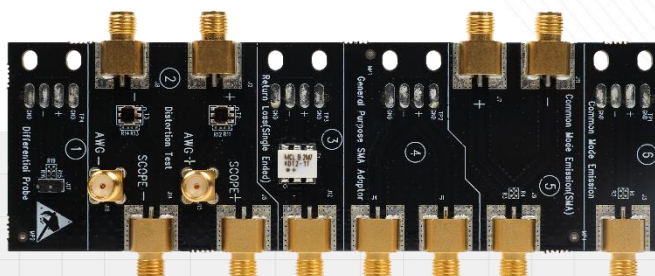
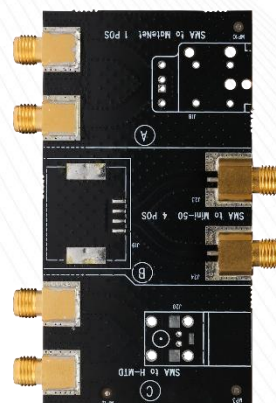


车载以太网 电气一致性测试

用户手册

CN01B



深圳市鼎阳科技股份有限公司
SIGLENT TECHNOLOGIES CO., LTD.

目录

1 引言	5
2 测试项目和引用标准	6
2.1 10BASE-T1S	6
2.1.1 测试项目	6
2.1.2 引用标准	6
2.2 100BASE-T1	6
2.2.1 测试项目	6
2.2.2 引用标准	7
2.3 1000BASE-T1	7
2.3.1 测试项目	7
2.3.2 引用标准	8
3 测试设备	9
3.1 测试设备	9
3.2 装箱清单	9
3.3 测试夹具介绍	10
3.3.1 车载以太网测试夹具	10
3.3.2 时钟同步夹具	10
3.3.3 转接板夹具	13
4 一致性测试软件	14
4.1 测试项配置	15
4.2 结果查看	18
4.3 报告生成设置	19
5 10BASE-T1S 测试步骤及结果参考	21
5.1 发射机输出电压和时序抖动	21
5.1.1 测试环境搭建	21
5.1.2 测试步骤	22
5.1.3 计算方法	22
5.1.4 测试结果参考	23
5.2 发射机输出正/负压降	24

5.2.1	测试环境搭建	24
5.2.2	测试步骤	24
5.2.3	计算方法	25
5.2.4	测试结果参考	25
5.3	发射机功率谱密度	26
5.3.1	测试环境搭建	26
5.3.2	测试步骤	27
5.3.3	计算方法	28
5.3.4	测试结果参考	29
6	100BASE-T1 测试步骤及结果参考	30
6.1	发射机输出正/负压降	30
6.1.1	测试环境搭建	30
6.1.2	测试步骤	31
6.1.3	计算方法	32
6.1.4	测试结果参考	32
6.2	发射时钟频率和发射机时序抖动（主模式）	34
6.2.1	测试环境搭建	34
6.2.2	测试步骤	34
6.2.3	计算方法	34
6.2.4	测试结果参考	35
6.3	TX_TCLK 频率和时序抖动	36
6.3.1	测试环境搭建	36
6.3.2	测试步骤	37
6.3.3	计算方法	37
6.3.4	测试结果参考	38
6.4	发射机失真	39
6.4.1	测试环境搭建	39
6.4.2	测试步骤	47
6.4.3	计算方法	47
6.4.4	测试结果参考	48
6.5	发射机功率谱密度和峰值差分输出	49

6.5.1	测试环境搭建	49
6.5.2	测试步骤	50
6.5.3	计算方法	51
6.5.4	测试结果参考	52
6.6	MDI 回波损耗	53
6.6.1	测试环境搭建	53
6.6.2	测试步骤	56
6.6.3	计算方法	57
6.6.4	测试结果参考	57
6.7	MDI 模式转换损耗	60
6.7.1	测试环境搭建	60
6.7.2	测试步骤	62
6.7.3	计算方法	62
6.7.4	测试结果参考	63
6.8	MDI 共模辐射	66
6.8.1	测试环境搭建	66
6.8.2	测试步骤	68
6.8.3	计算方法	68
6.8.4	测试结果参考	68
7	1000BASE-T1 测试步骤及结果参考	70
7.1	发射时钟 TX_TCLK125 频率和时序抖动	70
7.1.1	测试环境搭建	70
7.1.2	测试步骤	71
7.1.3	计算方法	71
7.1.4	测试结果参考	72
7.2	发射时钟频率和 MDI 时序抖动	73
7.2.1	测试环境搭建	73
7.2.2	测试步骤	74
7.2.3	计算方法	74
7.2.4	测试结果参考	75
7.3	发射机失真	76

7.3.1	测试环境搭建	76
7.3.2	测试步骤	84
7.3.3	计算方法	84
7.3.4	测试结果参考	85
7.4	MDI 回波损耗	86
7.4.1	测试环境搭建	86
7.4.2	测试步骤	88
7.4.3	计算方法	88
7.4.4	测试结果参考	89
7.5	MDI 模式转换损耗	90
7.5.1	测试环境搭建	90
7.5.2	测试步骤	91
7.5.3	计算方法	91
7.5.4	测试结果参考	91
7.6	发射机功率谱密度和峰值差分输出	93
7.6.1	测试环境搭建	93
7.6.2	测试步骤	94
7.6.3	计算方法	95
7.6.4	测试结果参考	96
7.7	发射机输出正/负压降	97
7.7.1	测试环境搭建	97
7.7.2	测试步骤	97
7.7.3	计算方法	97
7.7.4	测试结果参考	98
附录 1 名词缩写		100

1 引言

近年来,随着汽车的电气系统越来越复杂,主要受信息娱乐系统,先进的驾驶员辅助系统(ADAS),动力传动系统和车身电子设备的推动。由于当今车辆中的各种电子控制单元(ECU)之间共享大量的实时数据,这些系统需要更快的通信网络。

鼎阳科技推出的车载以太网电气一致性测试解决方案,提供符合 IEEE 标准的 10BASE-T1S、100BASE-T1、1000BASE-T1 的电气一致性测试和验证;以及符合 OPEN 联盟 TC8 ECU 标准的电气一致性测试和验证。

本用户手册介绍了符合 IEEE 标准的 10BASE-T1S、100BASE-T1、1000BASE-T1 和 OPEN 联盟 TC8 ECU 的车载以太网一致性测试的测试夹具、测试方法和测试环境。

鼎阳科技推出的车载以太网电气一致性分析方案,包括:

- 用户可以执行单项或多项测试;
- 向用户展示如何将示波器和被测设备(DUT: Device under test 的缩写)连接;
- 为每个测试项目自动设置示波器;
- 显示已执行测试的每个项目的详细信息和通过标准;
- 可创建 HTML、PDF 或 XML 测试报告。

本文的车载以太网的参考标准如下:

- 10BASE-T1S: IEEE 802.3cg 标准。
- 100BASE-T1: IEEE 802.3bw 标准, 和 TC8: OPEN Alliance, Automotive Ethernet ECU Test Specification, v3.0 标准。
- 1000BASE-T1: IEEE 802.3bp 标准。

2 测试项目和引用标准

2.1 10BASE-T1S

2.1.1 测试项目

鼎阳科技推出的 10BASE-T1S 车载以太网电气一致性测试解决方案，包含符合 IEEE802.3cg 规范的测试项目，配合 FX-AMETH 测试夹具，支持以下测试项目：

- Test mode 1：发射机输出电压和时序抖动；
- Test mode 2：发射机输出正/负压降；
- Test mode 3：发射机功率谱密度。

2.1.2 引用标准

鼎阳科技推出的 10BASE-T1S 车载以太网电气一致性测试方案，遵循 IEEE802.3cg 标准。

表 2-1 详述了 10BASE-T1S 各个测试项目所参考的标准。

表 2-1 10BASE-T1S 测试参考标准

参考标准	测试模式	描述
IEEE Std 802.3cg, Section 147.5.4.1	1	发射机输出电压
IEEE Std 802.3cg, Section 147.5.4.3	1	发射机时序抖动
IEEE Std 802.3cg, Section 147.5.4.2	2	发射机输出正压降
IEEE Std 802.3cg, Section 147.5.4.2	2	发射机输出负压降
IEEE Std 802.3cg, Section 147.5.4.4	3	发射机功率谱密度

2.2 100BASE-T1

2.2.1 测试项目

鼎阳科技推出的 100BASE-T1 一致性测试解决方案，包含符合 IEEE802.3bw 和 OPEN 联盟的 TC8 规范的测试项目，配合 FX-AMETH 测试夹具，支持以下测试项目：

- 测试模式 1：发射机输出正/负压降；
- 测试模式 2：发射时钟频率和发射机时序抖动（主模式）；
- 测试模式 3：TX_TCLK 频率和时序抖动（从模式）；
- 测试模式 4：发射机失真；
- 测试模式 5：发射机功率谱密度、峰值差分输出、MDI 共模辐射；
- Slave 模式：MDI 回波损耗、MDI 模式转换损耗。

2.2.2 引用标准

鼎阳科技推出的 100BASE-T1 车载以太网电气一致性测试方案，遵循 IEEE802.3bw 标准和 OPEN 联盟 TC8 《OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification》标准。

表 2-2 详述了 100BASE-T1 各个测试项目所参考的标准。

表 2-2 100BASE-T1 测试参考标准

引用标准		测试模式	描述
IEEE Std 802.3bw	OPEN Alliance TC8		
Section 96.5.4.1	OABR_PMA_TX_01	1	发射机输出正/负压降测试
Section 96.5.4.3	OABR_PMA_TX_02	2	发射机时序抖动测试（主模式）
Section 96.5.4.5	OABR_PMA_TX_03	2	发射时钟频率测试（主模式）
Section 96.5.4.3		Slave	TX_TCLK 时序抖动测试（从模式）
Section 96.5.4.5		Slave	TX_TCLK 时钟频率测试（从模式）
Section 96.5.4.2	OABR_PMA_TX_08	4	发射机失真测试
Section 96.5.4.4	OABR_PMA_TX_04	5	发射机功率谱密度（PSD）测试
Section 96.5.6		5	发射机峰值差分输出测试
Section 96.8.2.1	OABR_PMA_TX_05	Slave	MDI 回波损耗测试
Section 96.8.2.2	OABR_PMA_TX_06	Slave	MDI 模式转换损耗测试
	OABR_PMA_TX_07	5	MDI 共模辐射测试

2.3 1000BASE-T1

2.3.1 测试项目

鼎阳科技推出的 1000BASE-T1 车载以太网电气一致性测试解决方案，包含符合 IEEE802.3bp 规范的测试项目，配合 FX-AMETH 测试夹具，支持以下测试项目：

- Test mode 1: TX_TCLK125 频率和时序抖动（Master 和 Slave 模式）；
- Test mode 2: 发射时钟频率和发射机 MDI 时序抖动；
- Test mode 4: 发射机失真；
- Test mode 5: 发射机功率谱密度和峰值差分输出；
- Test mode 6: 发射机输出正/负压降；
- Slave 模式: MDI 回波损耗、MDI 模式转换损耗。

2.3.2 引用标准

鼎阳科技推出的 1000BASE-T1 车载以太网电气一致性测试方案，遵循 IEEE802.3bp 标准。

表 2-3 详述了 1000BASE-T1 各个测试项目所参考的标准。

表 2-3 1000BASE-T1 测试参考标准

参考标准	测试模式	描述
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.6	1	TX_TCLK125 时钟频率测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.3	1	发射机时序抖动测试（主模式）
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.3	1	发射机时序抖动测试（从模式）
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.6	2	发射时钟频率测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.3	2	发射机 MDI 时序抖动测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.2	4	发射机失真测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.4	5	发射机功率谱密度（PSD）测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.5	5	发射机峰值差分输出测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.5.3.1	6	发射机输出正/负压降测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.7.2.1	Slave	MDI 回波损耗测试
IEEE Std 802.3bp, Section 97.7.2.2	Slave	MDI 模式转换损耗测试

3 测试设备

3.1 测试设备

10BASE-T1S、100BASE-T1 和 1000BASE-T1 车载以太网电气一致性分析需要用到下述的设备：

- 示波器 (SDS7000A)：带宽大于 2GHz，并开通一致性分析选件（10BASE-T1S 的选件为 SDS7000A-CT-10BASE-T1S，100BASE-T1 的选件为 SDS7000A-CT-100BASE-T1，1000BASE-T1 的选件为 SDS7000A-CT-1000BASE-T1）。
- 测试夹具套件 (FX-AMETH)：FX-AMETH 为车载以太网电气一致性测试夹具套件，在被测试设备 (DUT) 进入测试状态后提供物理连接和测试点。
- 有源差分探头或者 SMA 线缆：
 - 有源差分探头（如 SAP2500D 或 SAP5000D）：带宽大于 2GHz，用于探测信号；
 - SMA 线缆：连接示波器和测试夹具，用于探测信号。
- 网络分析仪：用于 MDI 回波损耗测试、MDI 模式转换损耗测试。
- 频谱分析仪（可选）：用于测试发射机功率谱密度和 MDI 共模辐射。
- 任意波形发生器：输出两路正弦波信号，用于在带干扰信号下测试发射机失真项目。
- USB 连接线：用于连接示波器的 USB Host 接口和网络分析仪或者频谱分析仪的 USB Device 接口，实现示波器对外部仪器的控制和测试数据的获取。

3.2 装箱清单

以太网电气一致性测试夹具 FX-ETH 的装箱清单如表 3-1 所示，装箱清单上列明的物品都已经交付，为确保您的权益，请您在签收后 48 小时内核对箱内物品与清单是否一致。如发现物品缺失、遗漏或损坏，请及时联系鼎阳客户服务中心或全国经销商，我们将第一时间为您处理。如未在时效内反馈遗漏、损坏情况，鼎阳科技后续将无法再次受理您的售后需求，敬请谅解。

表 3-1 装箱清单

物品名称	数量
用户手册	1
车载以太网测试夹具	1
时钟同步夹具	1
转接板夹具 (MateNet、Mini-50、H-MTD 至 SMA 连接器转接)	1
50Ω 端接器 (SMA)	2
SMA 线缆 (长度: 1000mm)	7
SMA 线缆 (长度: 300mm)	2
BNC-SMA 转接头	6
跳线帽	2

3.3 测试夹具介绍

3.3.1 车载以太网测试夹具

车载以太网测试夹具，支持 10BASE-T1S、100BASE-T1 和 1000BASE-T1 的电气一致性测试，给信号提供测试点，测试夹具如图 3-1 所示。

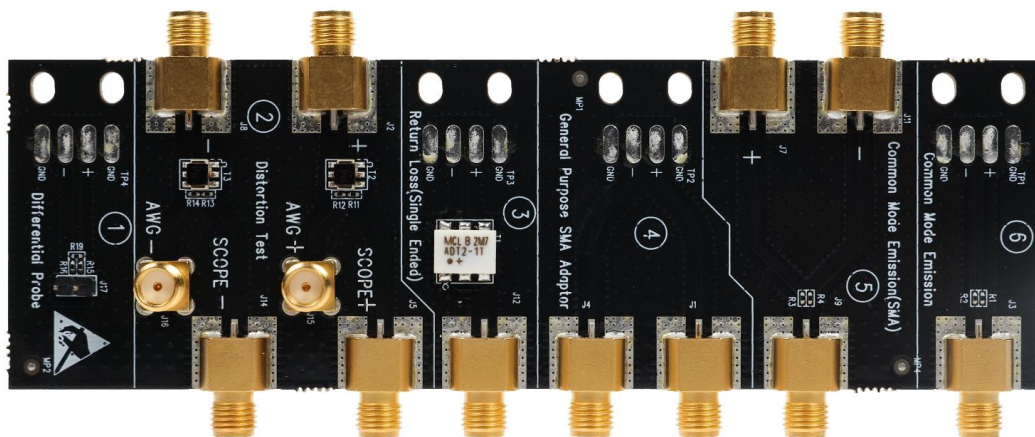


图 3-1 车载以太网测试夹具

车载以太网测试夹具的各个功能区介绍如下:

区域①：支持将 DUT 的测试线缆直接焊接到测试夹具上，支持使用有源差分探头对车载以太网电气一致性测试中的大部分项目进行测试，支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

区域②：支持使用 SMA 线缆和添加干扰信号下对 DUT 进行发射机失真测试。

区域③：支持将 DUT 的测试线缆直接焊接到测试夹具上，可执行发射机功率谱密度测试，支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

区域④：支持将 DUT 的测试线缆直接焊接到测试夹具上，支持使用 SMA 线缆对车载以太网电气一致性测试中的大部分项目进行测试，支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

区域⑤：支持通过 SMA 线缆转接方式来进行 100BASE-T1 的共模辐射测试。

区域⑥：支持 DUT 的线缆直接焊接到测试夹具上来进行 100BASE-T1 的共模辐射测试，支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

3.3.2 时钟同步夹具

在 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 车载以太网的发射机失真测试项目中，为了达到更高的测试准确度，需要使用时钟同步夹具，将 DUT 上的 TX_TCLK (100BASE-T1) 或者 TX_TCLK125 (1000BASE-T1) 时钟转换为 10MHz 的时钟，分别输到示波器和任意波形发生器的外部时钟基准源 10MHz in 输入端上，实现 DUT 和示波器、任意波形发生器的时钟域同步。

时钟同步夹具如图 3-2 所示。



图 3-2 时钟同步夹具

时钟同步夹具上各个功能点的介绍如下：

(1) J6, J9: 分别为 USB type-C 和 USB type-B 接口连接器，输入 DC5V 电源给时钟同步夹具供电，供电正常后 HL3 和 HL5 指示灯点亮。

(2) J5: 通过短路帽连接在 J5 上选通时钟源的输入通道，当短路帽连接在 J5 (pin1,2) 时选通 CH2 (J2 连接器，输入阻抗为 50Ω)，当短路帽连接在 J5 (pin2,3) 时选通 CH1 (J1 连接器，输入阻抗为 10kΩ)。

(3) J1: SMA 连接器，CH1 时钟源输入端，输入阻抗为 10kΩ，通过短路帽连接在 J5 (pin2,3) 引脚选通，时钟电平输入范围为 0.2V~3.3V。

(4) J2: SMA 连接器，CH2 时钟源输入端，输入阻抗为 50Ω，通过短路帽连接在 J5 (pin1,2) 引脚选通，时钟电平输入范围为 0.4V~3.3V。

(5) J7: 输入时钟源频率选择，如下：

- 短路帽连接在 J7 (pin1,2) 表示 CH1 或 CH2 输入的时钟频率为 66.667MHz；
- 短路帽连接在 J7 (pin2,3) 表示 CH1 或 CH2 输入的时钟频率为 125MHz。

(6) J3 (Clock Output: CH1): 输出阻抗为 50Ω，输出信号的电平为 0V~3.3V (无 50Ω端接负载) 的方波信号，输出时钟频率为 10MHz。

(7) J12 (Clock Output: CH2): 输出阻抗为 50Ω，输出信号的电平为 0V~3.3V (无 50Ω端接负载) 的方波信号，输出时钟频率为 10MHz。

(8) LED 指示灯指示如下：

- HL5: 输入的 5V 电源指示；

- HL3: 板上的 5V 转 3.3V 电源指示;
- HL1: 点亮表示将 66.667MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟, 电路正常工作且锁相环时钟芯片锁定;
- HL2: 点亮表示将 125MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟, 电路正常工作且锁相环时钟芯片锁定。

(9) S1: 复位开关, 可对夹具板上的锁相环芯片进行复位和重新配置操作。

时钟同步夹具的指标如表 3-2 所示。

表 3-2 时钟同步夹具的指标

供电电压	规格
输入电压	5V
供电电流 (最大值)	100mA
连接器类型	Type-B 和 Type-C 插座
输入时钟	规格
输入时钟通道数 (通过安装跳线帽在 J5 上选择)	2
输入时钟连接器类型	SMA
输入阻抗	CH1: 10k Ω CH2: 50 Ω
输入耦合	AC
输入电压范围	CH1: 0.2V~3.3V CH2: 0.4V~3.3V
输入时钟频率 (通过安装跳线帽在 J7 上选择)	66.667MHz or 125MHz
输入时钟占空比要求	40%~60%
输出时钟	规格
输出时钟数量	2
输出时钟连接器类型	SMA
输出阻抗 (LVCMOS)	45 Ω (min), 50 Ω (typ), 75 Ω (max)
输出电压范围	3.3V(无端接) 1.65V(50 Ω 端接)
输出时钟频率	10MHz
输出时钟上升时间 (50 Ω 端接)	<1ns

3.3.3 转接板夹具

为了方便用户使用 MateNet (TE)、Mini-50 (Molex)、H-MTD (Rosenberger) 等不同标准接口的连接器，鼎阳科技还提供了一块转接板夹具。该转接板上面已经焊接了 SMA 连接器，用户根据测试需求，可以焊接不同标准的连接器，并且配合车载以太网测试夹具和时钟同步夹具进行车载以太网的一致性测试。

针对鼎阳提供的转接板夹具，如果不能覆盖用户的测试需求，用户也可以自制转接板夹具来满足一致性测试需求。

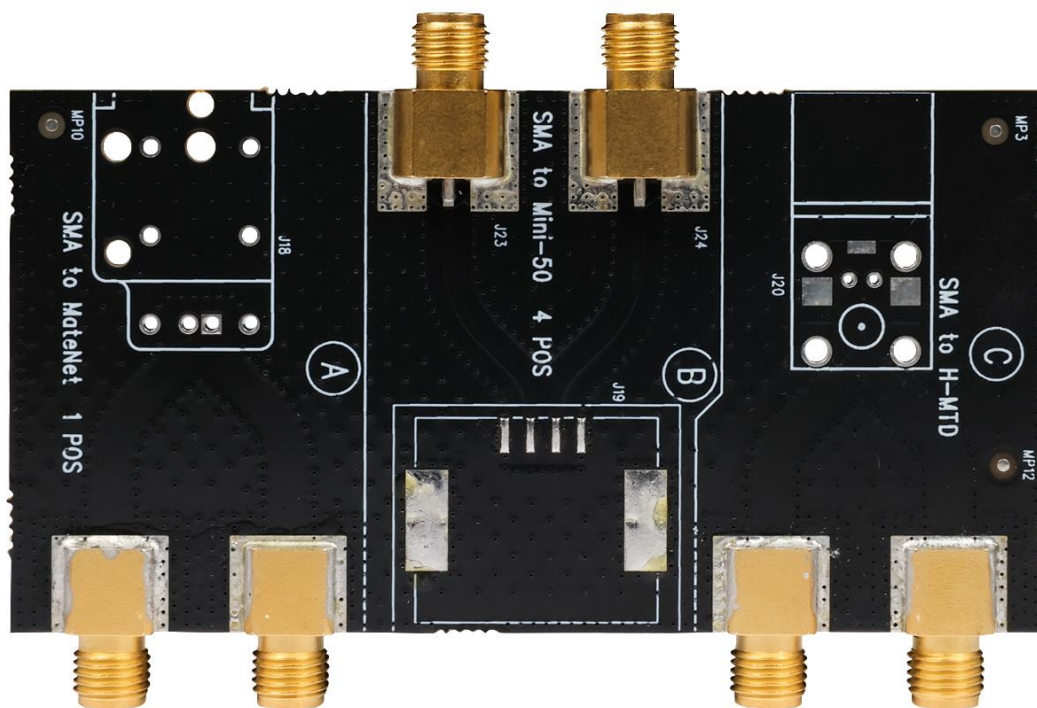


图 3-3 转接板夹具

4 一致性测试软件

鼎阳科技的以太网一致性分析软件是依据 IEEE802.3cg、IEEE802.3bw、IEEE802.3bp 和 OPEN Alliance 的 TC8 规范而推出的解决方案，该分析软件可控制示波器自动完成测试，图形化操作指导简化了测量过程，可灵活配置测试项目，测试报告记录了整个测量结果，包括测试数值及测试波形的截图。

SDS7000A 提供 10BASE-T1S、100BASE-T1 和 1000BASE-T1 一致性测试功能，按照 **分析** -> **一致性测试** -> **协议类型** 选择 **10BASE-T1S** 或 **100BASE-T1** 或 **1000BASE-T1**，点击 **ON**，即可打开一致性测试功能，如图 4-1 所示。一致性测试功能分为三大部分：**测试项配置**、**结果查看**、**报告生成设置**。

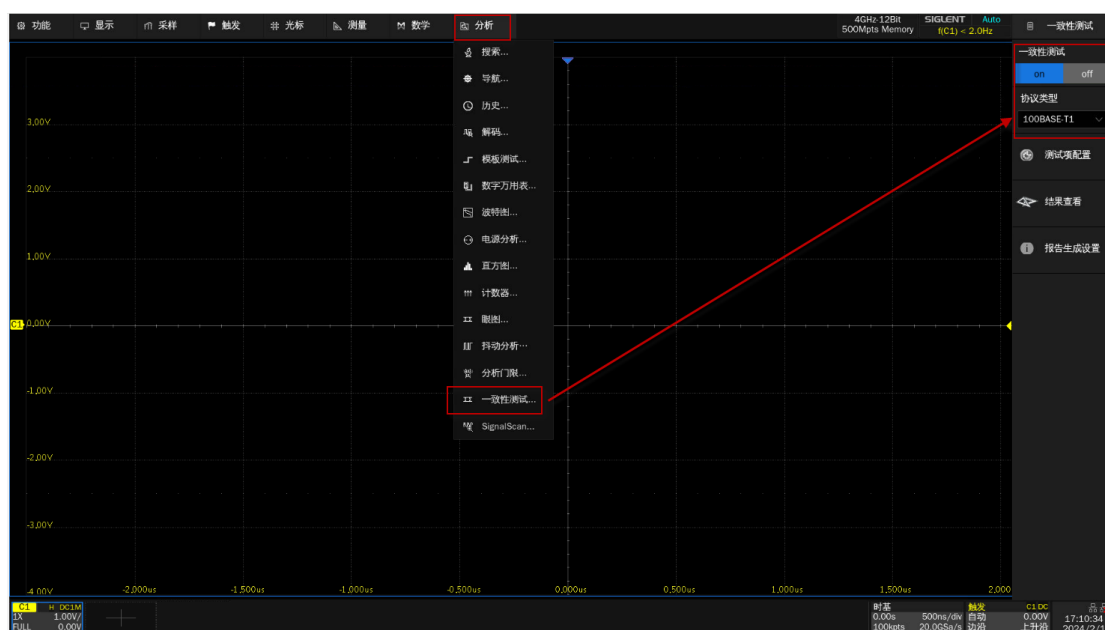


图 4-1 启动车载以太网电气一致性分析软件

4.1 测试项配置

点击测试项配置会弹出具体的测试配置窗口，如图 4-2 所示，根据测试流程分为：设置、测试项选择、配置、连接、启动测试、结果六个步骤。

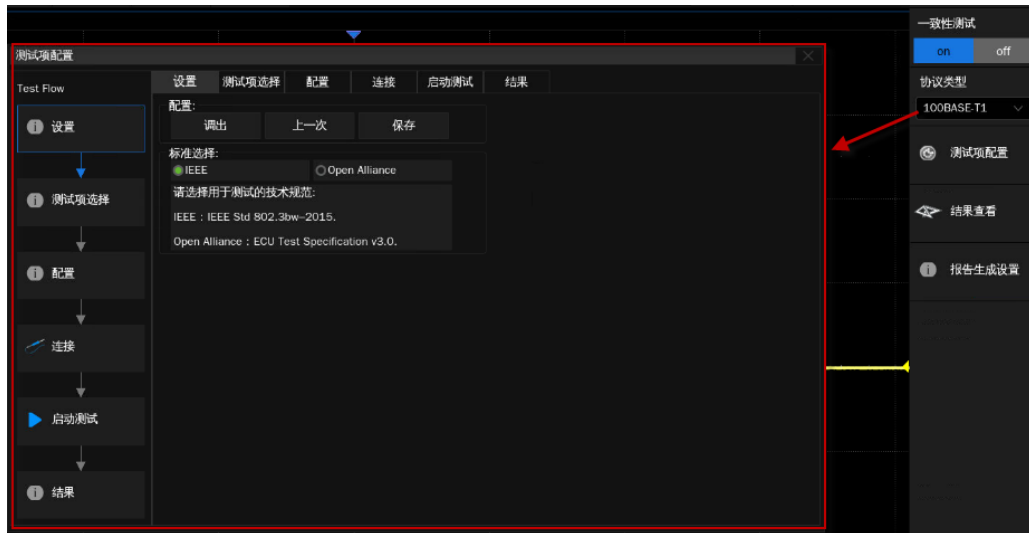


图 4-2 测试配置窗口

- 设置：提供配置的 **调出**、**上一次**、**保存** 三个功能。在 100BASE-T1 的测试中还提供了 **IEEE** 和 **Open Alliance** 两种标准选择。
- 测试项选择：在本栏目中选择需要测试的项目，如图 4-3 所示。



图 4-3 测试项选择窗口

- 配置：测试项选择中所选的测试项目在本栏目会高亮提示，点击即可对相应的测试项进行配置，设置好示波器测量使用的探头类型、信源以及平均次数等，如图 4-4 所示。在不同的测

试项中可能需要进行不同的配置。



图 4-4 配置窗口

- 连接：本栏目显示测试的接线图，如图 4-5 所示，若一次性选择了多个测试项目，只会显示第一个待测项的信息，其他测试项，如果接线图不一样会在上一个测试项结束后有单独的页面弹窗提示。

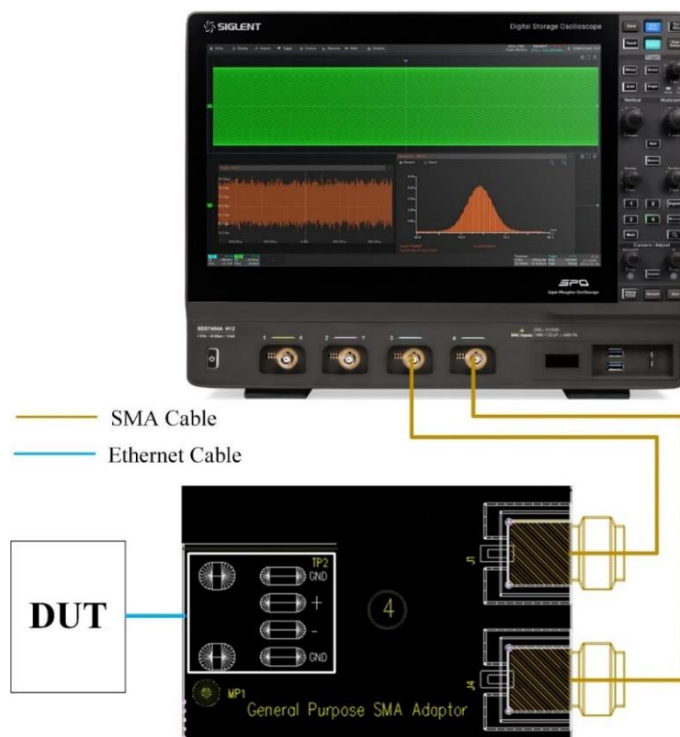


图 4-5 连接窗口显示的接线图

- 启动测试：启动测试窗口如图 4-6 所示，测试失败时，支持 **继续** 和 **中止** 两种选择。



图 4-6 启动测试窗口

在接下来的测试过程中，根据页面弹窗提示，完成对应项目的测试，所选的测试项全部完成后会弹出测试结果。

若一轮测试中选择了多个测试项目，如果有不同的接线方式，则进行到个项目时会有页面弹窗，提示该项目的连接方式，根据提示搭建测试环境后，点击弹窗中的 **启动测试** 即可继续测试。

4.2 结果查看

点击 **结果查看**，查看对应的测试结果。

测试结果窗口的上半部分是测试项目，概要提供各个测试项目的结果，以及官方要求的参考门限值，如图 4-7 所示。

测试结果窗口的下半部分是对应的细节图，在测试结果窗口的上半部分点击感兴趣的项目，下半部分即可显示对应的细节，点击图片可以查看测试波形的细节，如图 4-8 所示。

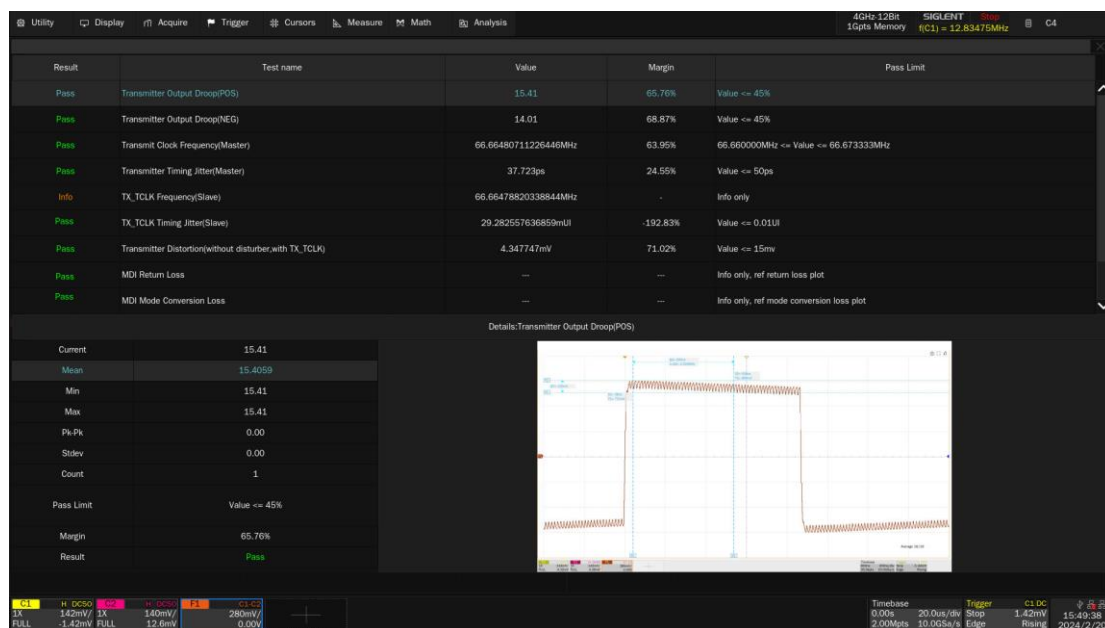


图 4-7 测试项目列表

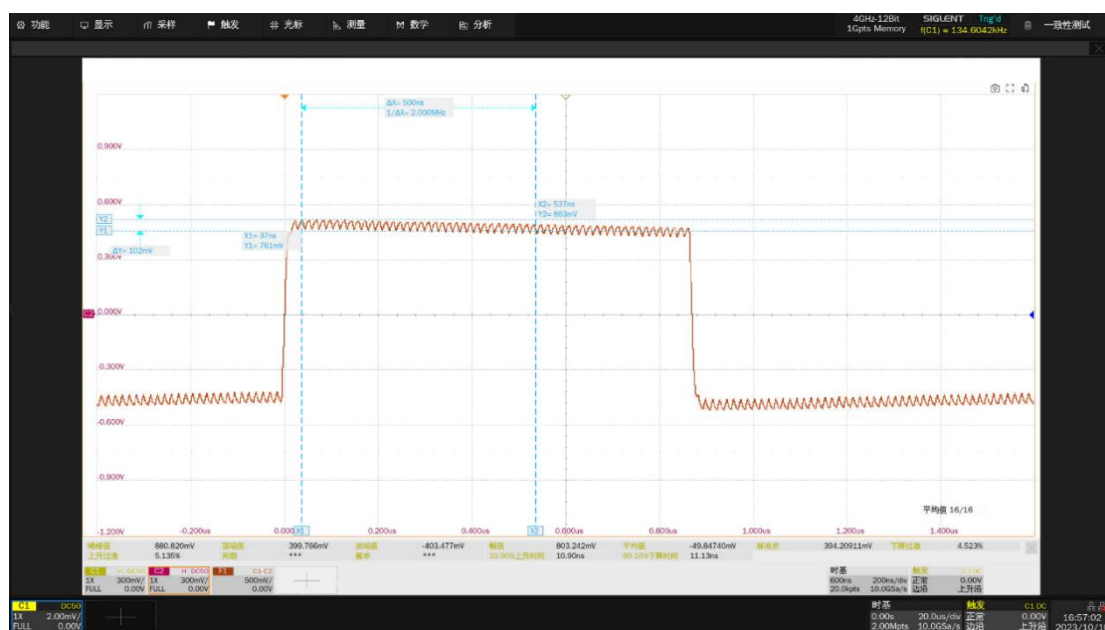


图 4-8 波形细节图

4.3 报告生成设置

点击 **报告生成设置**，填入有关的测试信息，选择报告类型；**预览报告** 可以提前查看生成报告的效果；**文件管理** 中选择保存的路径，点击 **保存** 即可保存测试结果，如图 4-9 所示。

【注意】：保存成 HTML 格式时，会生成一个文件夹与 HTML 文件，两者的文件名相同（后缀名不同），如需拷贝，需要把两者都拷走，并且两者放置在同一路径下。

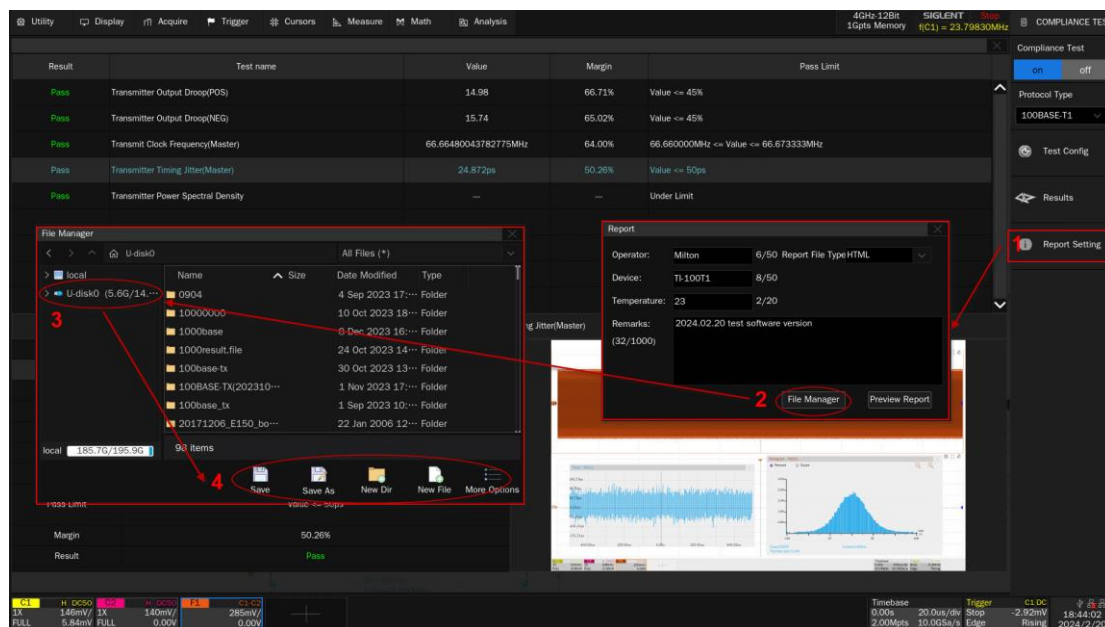


图 4-9 生成报告设置

测试报告包括所有测试结果的摘要表，其中具有到详细信息页面的超链接，详细信息页面包括一个相关测试波形的屏幕截图，如图 4-10 所示。

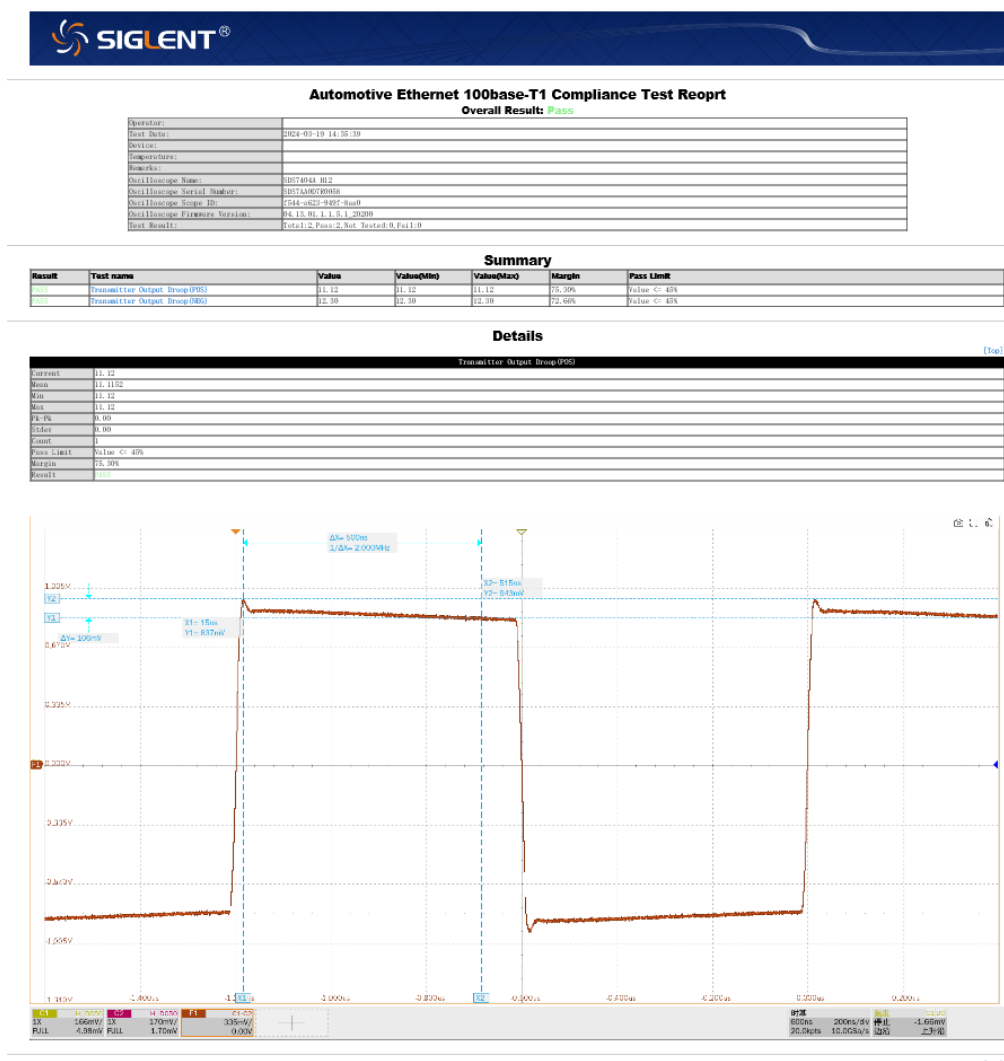


图 4-10 测试报告

5 10BASE-T1S 测试步骤及结果参考

5.1 发射机输出电压和时序抖动

IEEE Std 802.3cg 标准中的 Section 147.5.4.1 和 147.5.4.3 规定，在测试模式 1 下，发射机的差分输出电压应在 $1\text{ V} \pm 20\%$ 范围内，发射机的输出时序抖动应小于 5 ns 。

5.1.1 测试环境搭建

测试发射机输出电压和时序抖动，使用 SMA 线缆的连接方式如图 5-1 所示。

- 1) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到示波器上的两个输入通道。
- 2) TP2 上焊接被测设备 (DUT) 的测试线缆。
- 3) 支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

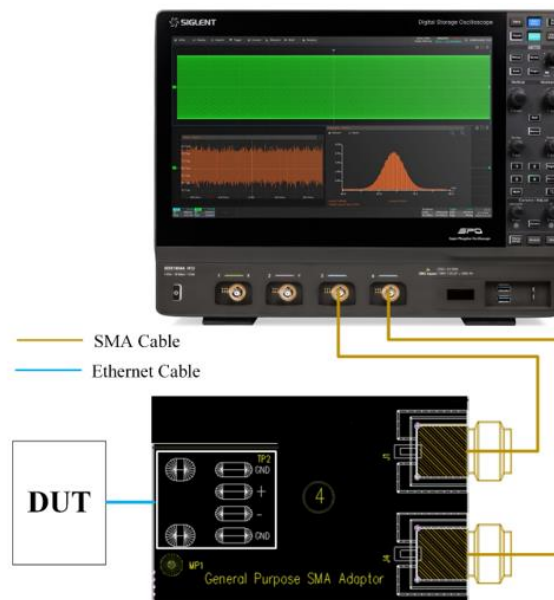


图 5-1 发射机输出电压和时序抖动使用 SMA 线缆连接示意图

发射机输出正/负压降，使用有源差分探头的连接方式如图 5-2 所示。

- 1) 一根差分探头的一端连接到测试夹具区域①上的测试点 J17，另一端连接到示波器上的任意一个输入通道。
- 2) TP4 上焊接被测设备 (DUT) 的测试线缆。
- 3) 确保差分探头探测信号极性的准确性。
- 4) 支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

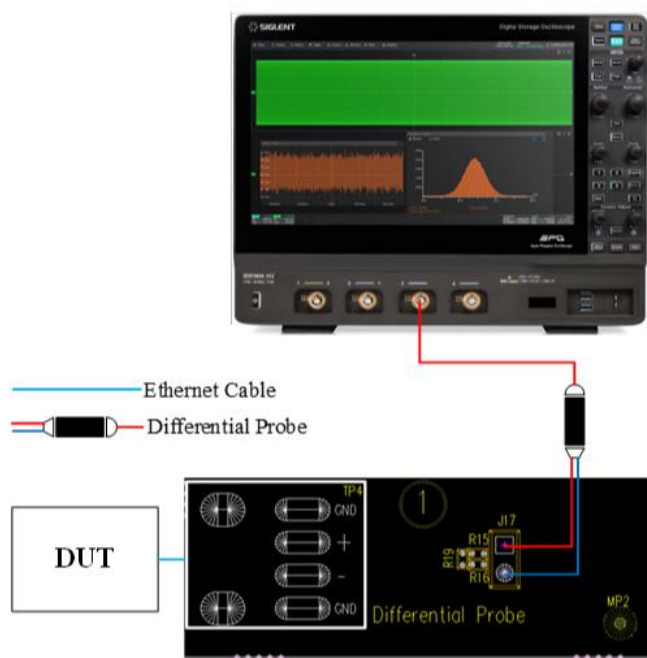


图 5-2 发射机输出电压和时序抖动使用有源差分探头连接示意图

5.1.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 1 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机输出电压和时序抖动**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数，边沿类型。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

5.1.3 计算方法

IEEE Std 802.3cg 标准的 Section 147.5.4.1 规定了符合一致性要求的发射机输出电压要满足 $1\text{ V} \pm 20\%$ 的要求。

IEEE Std 802.3cg 标准的 Section 147.5.4.3 规定了符合一致性要求的发射机时序抖动要满足小于 5 ns 的要求。

5.1.4 测试结果参考

发射机输出电压和时序抖动测试结果如图 5-3 所示，波形细节如图 5-4 所示。

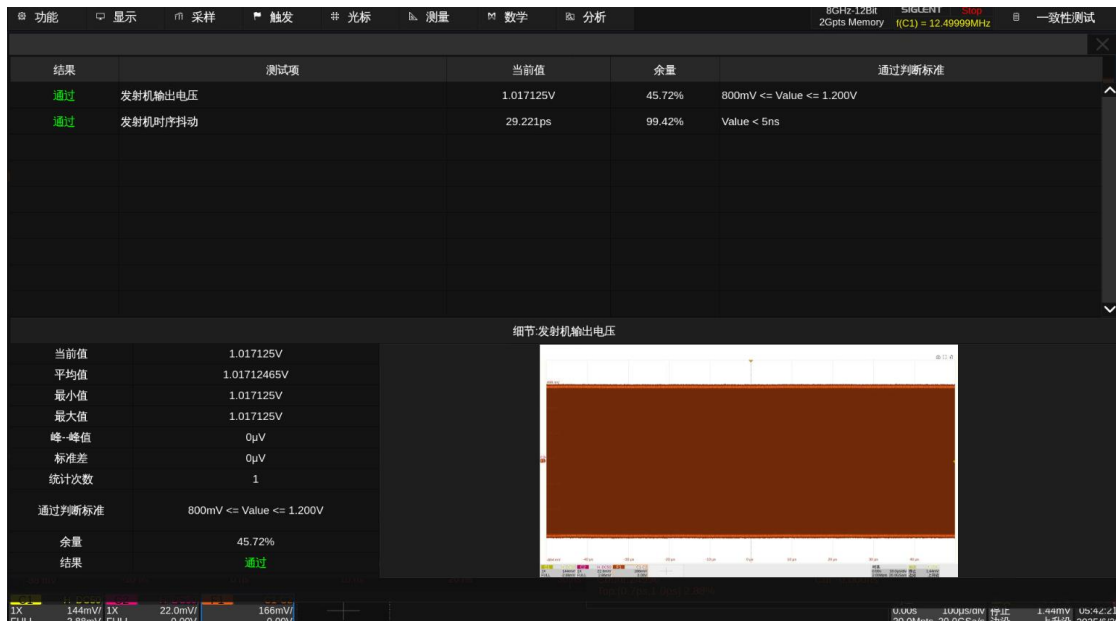


图 5-3 发射机输出电压和时序抖动结果

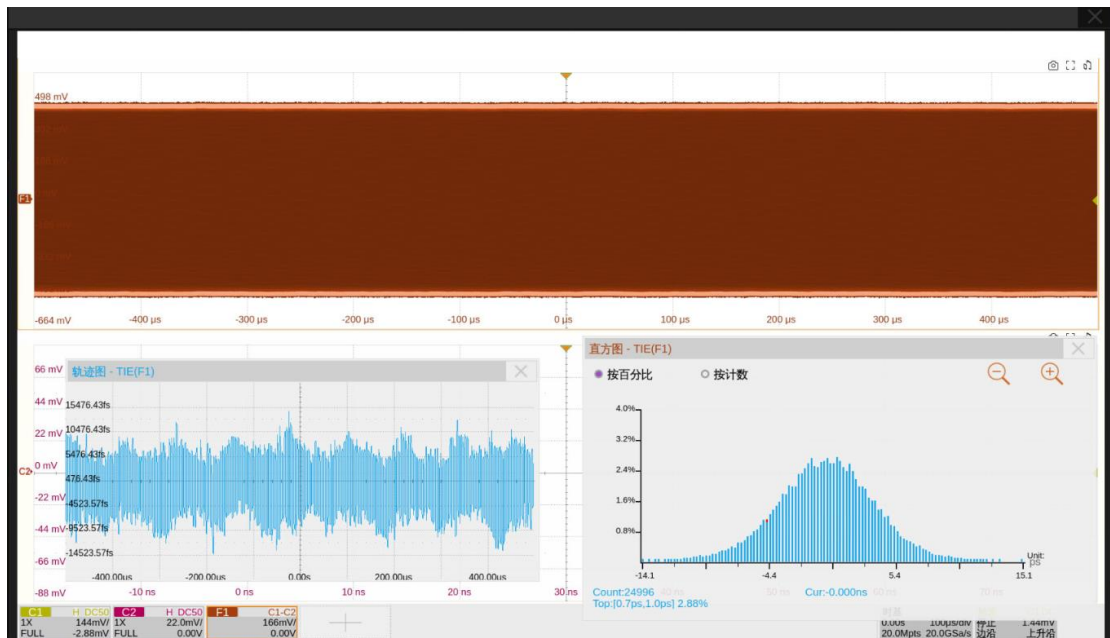


图 5-4 发射机时序抖动波形细节

5.2 发射机输出正/负压降

DUT 发出的测试模式 2 的典型波形如 所示，DUT 发出交替的 1.6us 差分正电压和 1.6us 差分负电压，发射机输出正/负压降可以使用该波形进行测试。

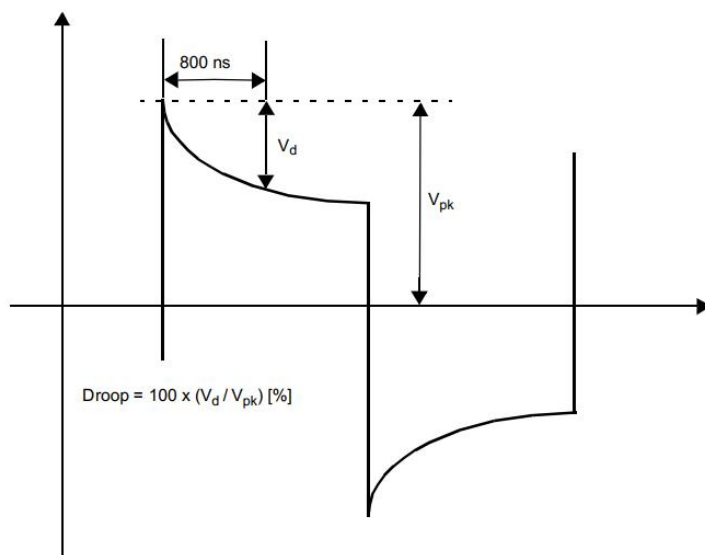


图 5-5 测试模式 2 输出波形

5.2.1 测试环境搭建

发射机输出正/负压降的测试环境，和《5.1.1 测试环境搭建》章节的相同。

使用 SMA 线缆的连接方式如图 5-1 所示。

使用有源差分探头的连接方式如图 5-2 所示。

5.2.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 2 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机输出正/负压降**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

5.2.3 计算方法

物理层一致性测试，发射机输出压降根据 IEEE Std 802.3cg 标准的 147.5.4.2 标准进行测试，信号经过零点之后的初始峰值和初始峰值后 800ns 处测量到的电压衰落应小于 30%。

该测试中，DUT 发出测试模式 2 的信号，对该信号分别进行上升沿/下降沿触发，可以确定峰值发生的时间和峰值电平，然后测量峰值 800ns 之后的电平压降幅度值。压降的计算方法如下：

$$\text{Droop} = 100 \% \times (\text{Vd}/\text{Vpk})$$

其中 Vpk 为峰值电平幅度，Vd 为峰值电平后 800ns 后的信号电平压降的幅度。

5.2.4 测试结果参考

测试结果参考如图 5-6 所示。

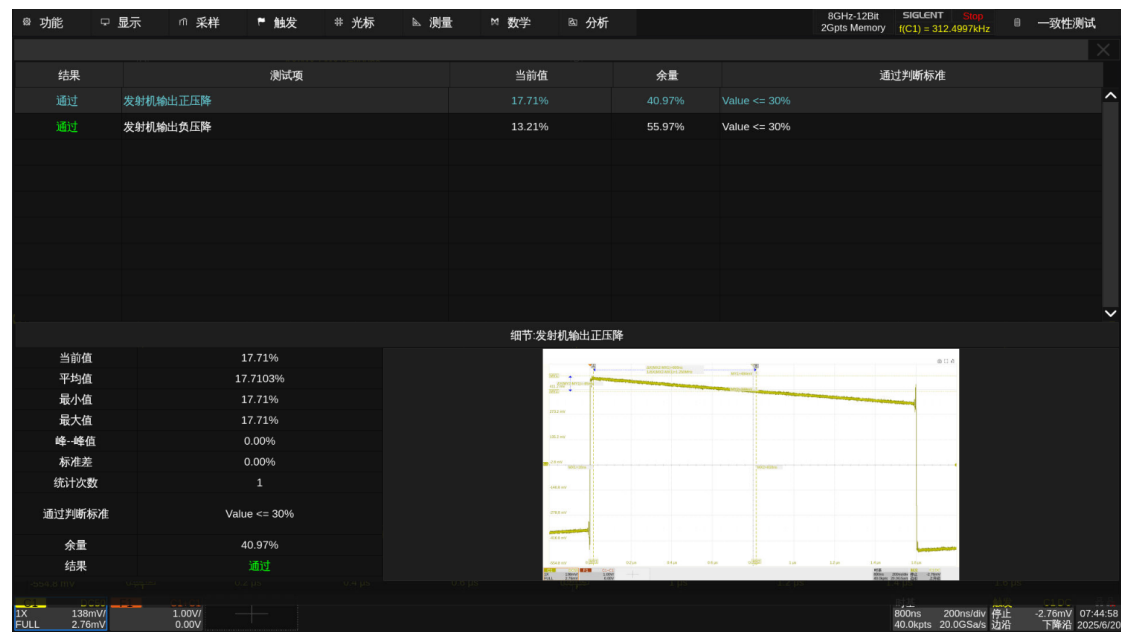


图 5-6 发射机输出正/负压降测试结果

波形展开的细节如图 5-7 所示。

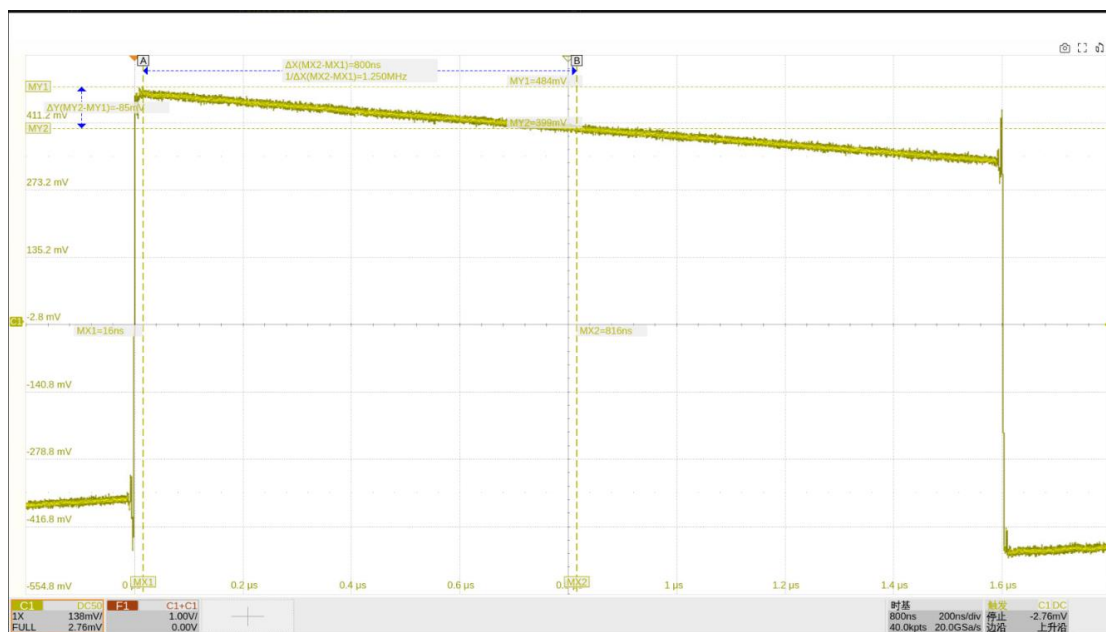


图 5-7 发射机输出正压降测试结果的波形展开细节

5.3 发射机功率谱密度

IEEE Std 802.3cg 标准中的 Section 147.5.4.4 规定,在测试模式 3 下发射机发出伪随机序列信号,发射机的功率谱密度 (PSD: Power spectral density) 应在规定的范围内。

5.3.1 测试环境搭建

5.3.1.1 使用示波器测试

发射机输出正/负压降的测试环境, 和《5.1.1 测试环境搭建》章节的相同。

使用 SMA 线缆的连接方式如图 5-1 所示。

使用有源差分探头的连接方式如图 5-2 所示。

5.3.1.2 使用频谱仪测试 PSD

发射机功率谱密度, 由于示波器底噪的影响, 因此采用频谱仪测试可以达到更高的精度。连接方式如图 5-8 所示, 测试步骤如下所示:

- 1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 3。
- 2) 测试夹具区域③上的 TP3 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆。
- 3) 使用 SMA 线缆将测试夹具的 J12 连接器和频谱仪的 RF INPUT 端口相连。
- 4) 一根 USB 连接线分别连接示波器的 USB Host 接口和频谱仪的 USB Device 接口。
- 5) 在示波器弹窗上, 在 **测试项选择** 中点击 **发射机功率谱密度**, 点击 **配置** -> **发射**

机功率谱密度 -> **频谱分析仪** -> **测试连接**，示波器自动检测频谱仪连接状态，连接成功后，会提示连接成功信息并且返回频谱仪的型号，并且示波器会自动配置频谱仪的一些测试参数（自动配置仅支持鼎阳仪器）。频谱仪的配置如下：

- 测量类型：频谱分析；
- 测量单位：dBm；
- 起始频率：300KHz；
- 终止频率：40MHz；
- RBW：10kHz；
- VBW：30kHz；
- RMS 平均检波器；
- 扫描时间大于 60s。

6) 如需进行巴伦补偿，请点击 **设置** 进入巴伦补偿界面，设置相关参数。

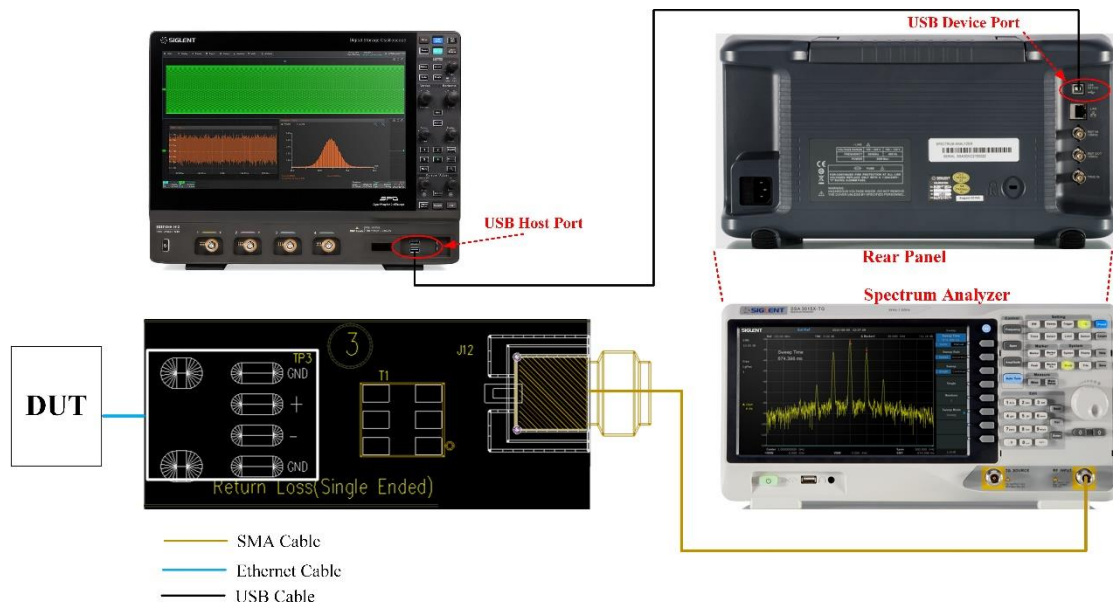


图 5-8 使用频谱仪测试功率谱密度连接示意

5.3.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 3 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机功率谱密度**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数，选择是否使用频谱仪来测试发射机功率谱密度。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。

如果选择使用频谱仪，点击 **测试连接** 来确保可以使用示波器来控制频谱仪，并对频谱仪

做测量的基础配置。

- 5) 点击 **启动测试** 。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

如果选择使用频谱仪测量发射机功率谱密度，示波器则会控制频谱仪进行测量，并且根据频谱仪的测量结果来绘制曲线，输出测试结果。

5.3.3 计算方法

功率谱密度测试依据 IEEE Std 802.3cg 标准中的 Section 147.5.4.4 的规定，在测试模式 3 下，发射机的功率谱密度 (PSD) 应在规定的范围中，通过门限标准如图 5-9 所示。

147.5.4.4.1 Upper PSD

$$\text{UpperPSD}(f) = \left\{ \begin{array}{ll} -61 & 0.3 \leq f < 15 \\ -40 - 1.4f & 15 \leq f < 25 \\ -75 & 25 \leq f \leq 40 \end{array} \right\} \text{ dBm/Hz}$$

where

f is the frequency in MHz; $0.3 \leq f \leq 40$

Lower PSD

$$\text{LowerPSD}(f) = \left\{ \begin{array}{ll} -87 + 2f & 5 \leq f < 10 \\ -47 - 2f & 10 \leq f \leq 15 \end{array} \right\} \text{ dBm/Hz}$$

where

f is the frequency in MHz; $5 \leq f \leq 15$

147.5.4.4.2 PSD mask

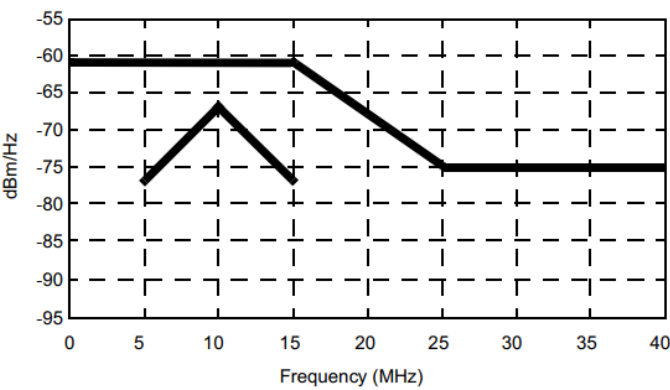


Figure 147-18—PSD upper and lower limits

图 5-9 PSD 的门限

5.3.4 测试结果参考

发射机功率谱密度和峰值差分输出的测试结果如图 5-10 所示

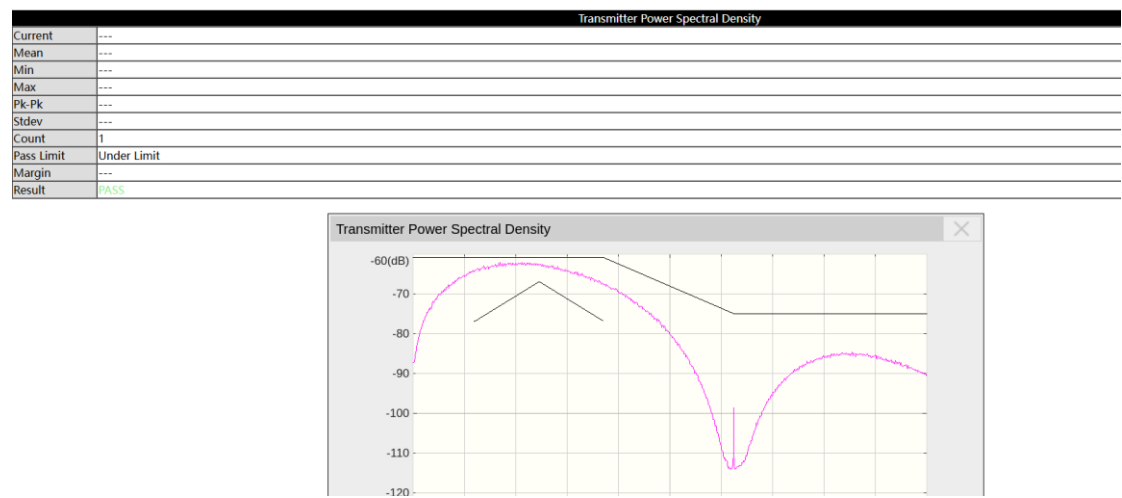


图 5-10 PSD 测量结果

6 100BASE-T1 测试步骤及结果参考

6.1 发射机输出正/负压降

DUT 发出的测试模式 1 的典型波形如图 6-1 所示，DUT 发出周期性的连续 N 个“+1”和连续 N 个“-1”符号（ $N \geq 34$ ）。发射机输出正/负压降可以使用该波形进行测试。

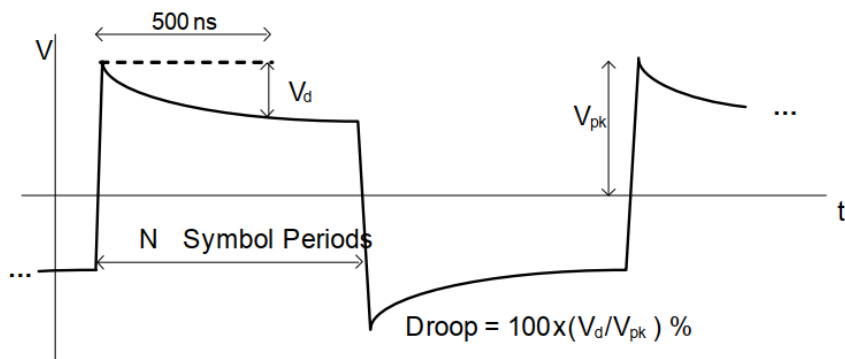


图 6-1 测试模式 1 输出波形

6.1.1 测试环境搭建

发射机输出正/负压降，使用 SMA 线缆的连接方式如图 6-2 所示。

- 1) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到示波器上的两个输入通道。
- 2) TP2 上焊接被测设备（DUT）的测试线缆。
- 3) 支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

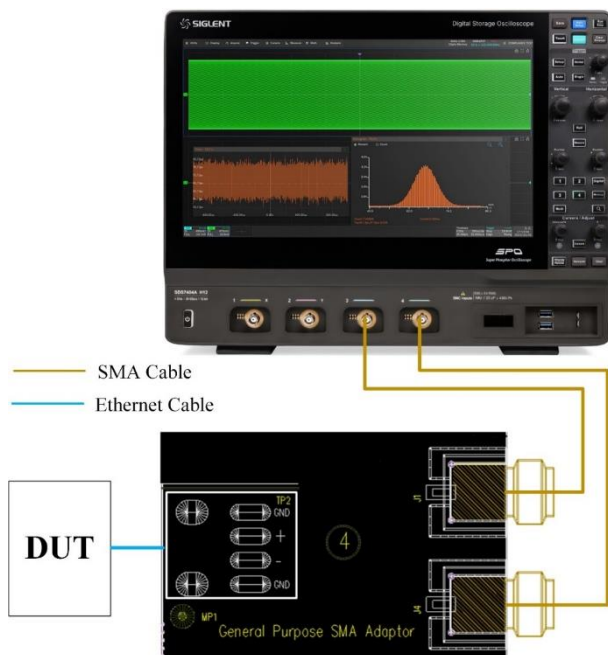


图 6-2 发射机输出正/负压降使用 SMA 线缆连接示意图

发射机输出正/负压降，使用有源差分探头的连接方式如图 6-3 所示。

- 1) 一根差分探头的一端连接到测试夹具区域①上的测试点 J17，另一端连接到示波器上的任意一个输入通道。
- 2) TP4 上焊接被测设备（DUT）的测试线缆。
- 3) 确保差分探头探测信号极性的准确性。
- 4) 支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

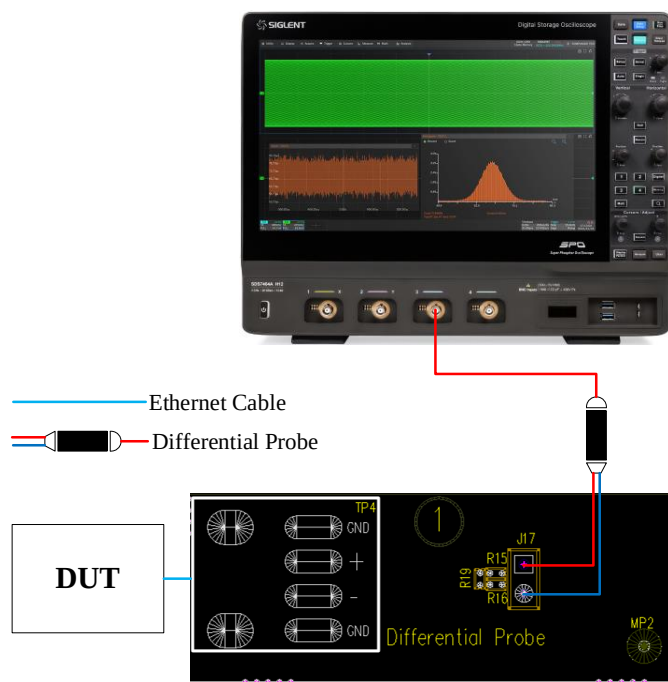


图 6-3 发射机输出正/负压降使用有源差分探头连接示意图

6.1.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 1 的信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机输出正/负压降**。
- 4) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

6.1.3 计算方法

物理层一致性测试, 发射机输出压降根据 IEEE Std 802.3bw 标准的 96.5.4.1 部分和 Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_01 标准进行测试。信号经过零点之后的初始峰值和初始峰值后 500ns 处测量到的电压衰落应小于 45%。

该测试中, DUT 发出测试模式 1 的信号, 对该信号分别进行上升沿/下降沿触发, 可以确定峰值发生的时间和峰值电平, 然后测量峰值 500ns 之后的电平压降幅度值。压降的计算方法如下:

$$\text{Droop} = 100 \% \times (\text{Vd}/\text{Vpk})$$

其中 Vpk 为峰值电平幅度, Vd 为峰值电平后 500ns 后的信号电平压降的幅度。

6.1.4 测试结果参考

测试结果参考如图 6-4 所示。

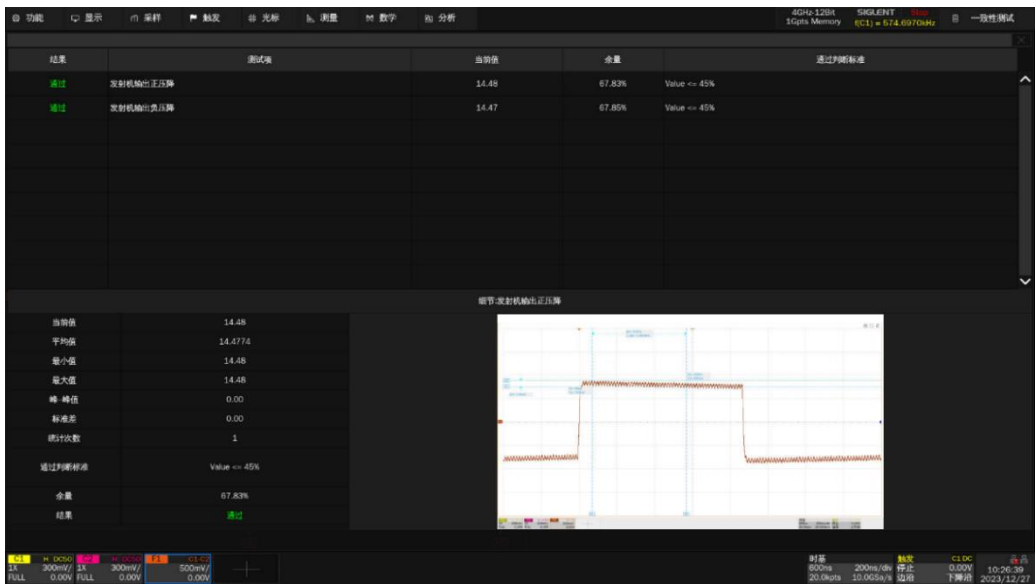


图 6-4 发射机输出正/负压降测试结果

图 6-5 是波形展开的细节。

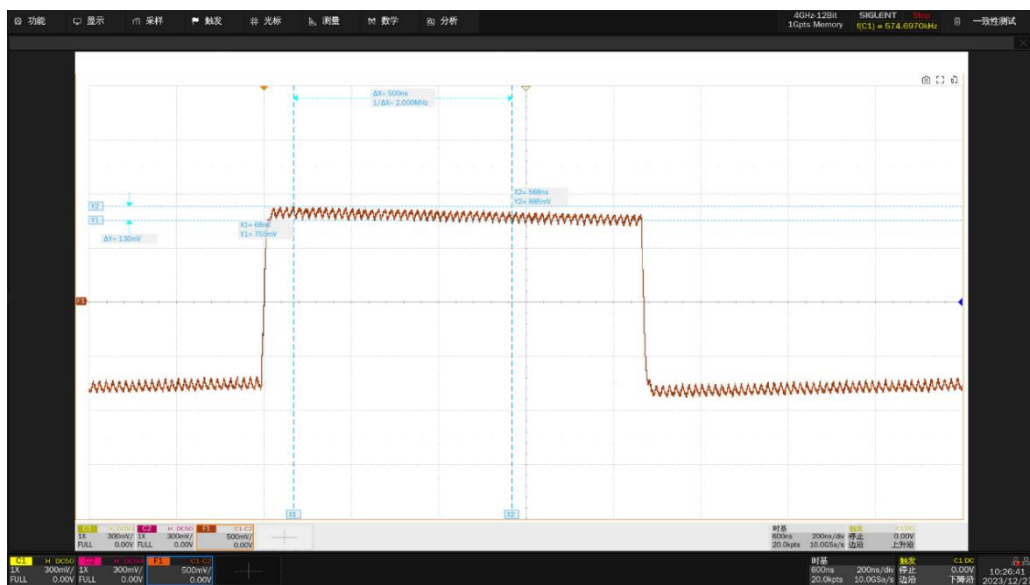


图 6-5 发射机输出正压降测试结果的波形展开细节

6.2 发射时钟频率和发射机时序抖动（主模式）

该测试项目为测量物理层在主模式下发射时钟频率和发射机时序抖动。

DUT 发出的测试模式 2 的测试波形，IEEE802.3bw 和 Open Alliance 规范中，发射机在主模式下使用 $66\frac{2}{3}\text{MHz}\pm 100\text{ppm}$ （即 $66.6603\text{ MHz} \sim 66.6736\text{ MHz}$ ）的时钟周期性发出+1 和-1 符号，即符号传输率为 $66\frac{2}{3}\text{MHz}\pm 100\text{ppm}$ 。

6.2.1 测试环境搭建

发射时钟频率和发射机时序抖动的测试环境，和《6.1.1 测试环境搭建》章节的相同。

使用 SMA 线缆的连接方式如图 6-2 所示。

使用有源差分探头的连接方式如图 6-3 所示。

6.2.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 2 的信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **发射时钟频率和发射机时序抖动（主模式）**。
- 4) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

6.2.3 计算方法

IEEE Std 802.3bw 标准的 Section 96.5.4.5 和 Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_03 规定了符合物理层一致性测试的符号传输速率。主机（Master）PHY 的符号传输频率应在 $66\frac{2}{3}\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$ 的范围内。

IEEE Std 802.3bw 标准的 Section 96.5.2 指定 DUT 在测试模式 2 下需重复传输 {+1, -1} 数据符号序列。发射机应根据主模式下的符号速率时钟来发送 {+1, -1} 数据符号。因此，测量到测试模式 2 的数据符号速率等于 PHY 在主模式下发射时钟频率。

IEEE Std 802.3bw 标准的 Section 96.5.4.3 和 Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_02 指定 DUT 在测试模式 2 时，DUT 的 MDI 输出抖动 JTXOUT 相对于无抖动参考的均方根值（RMS，Root Mean Square）应小于 50ps。发射机时序抖动测量 MDI 上的测试模式 2 信号的数据时间间隔误

差 (TIE)。示波器自动选择理想的数据传输参考频率，并与原始信号进行比较，以确定时间间隔误差。

6.2.4 测试结果参考

发射时钟频率和发射机时序抖动测试结果如图 6-6 所示。

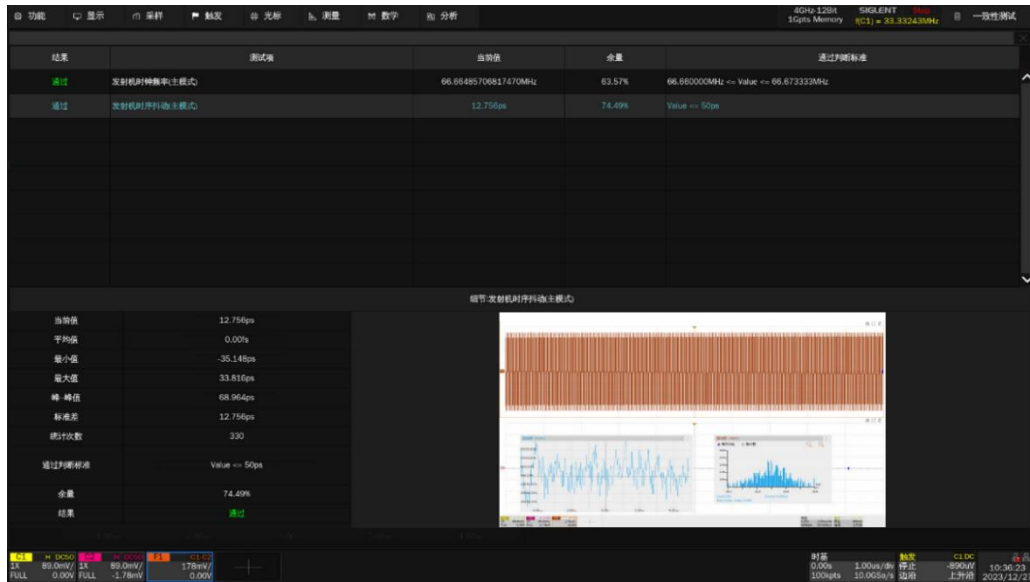


图 6-6 发射时钟频率和发射机时序抖动测试结果

图 6-7 是发射时钟频率和发射机时序抖动波形展开的细节。



图 6-7 发射时钟频率和发射机时序抖动测试结果波形细节

6.3 TX_TCLK 频率和时序抖动

IEEE Std 802.3bw 标准的 Section 96.5.4.5 规定了符合物理层一致性测试的符号传输速率。主机 (Master) PHY 的符号传输频率应在 $66 \frac{2}{3} \text{MHz} \pm 100 \text{ppm}$ 的范围内。

虽然说 IEEE Std 802.3bw 标准没有规定当 DUT 处于从模式 (Slave) 下符号传输频率，但是从模式 (Slave) 下符号传输频率也应和主模式的一样，均为 $66 \frac{2}{3} \text{MHz}$ 。DUT 需要提供 TX_TCLK 来进行一致性测试。

IEEE Std 802.3bw 标准的 Section 96.5.4.3 描述了 DUT 的 TX_TCLK 能反应接收处的抖动，DUT 的 TX_TCLK 的抖动应该小于 0.01UI 。

6.3.1 测试环境搭建

依据 IEEE Std 802.3bw 标准的 Section 96.5.4.3 上的 Figure 96-24，如图 6-8 所示，将 DUT (Slave) 和 Link Partner (Master) 连接且两者处于正常的工作模式 (Link Normal Operation)，将 DUT 的 TX_TCLK 时钟信号与示波器直接相连。

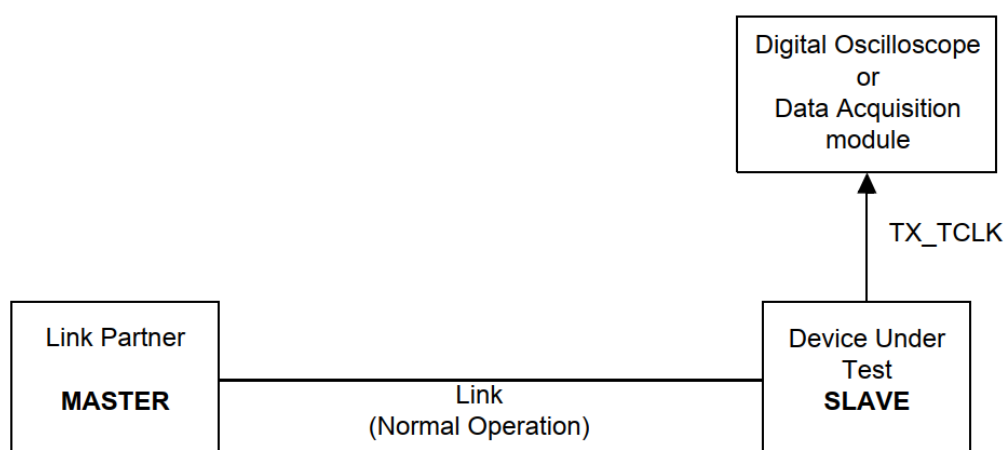


Figure 96-24—Setup for slave transmit timing jitter in normal mode

图 6-8 DUT 处于从模式 (Slave) 下 TX_TCLK 的测试环境

SDS7000A 上，测试 DUT (Slave) 的 TX_TCLK 连接方式如图 6-9 所示。

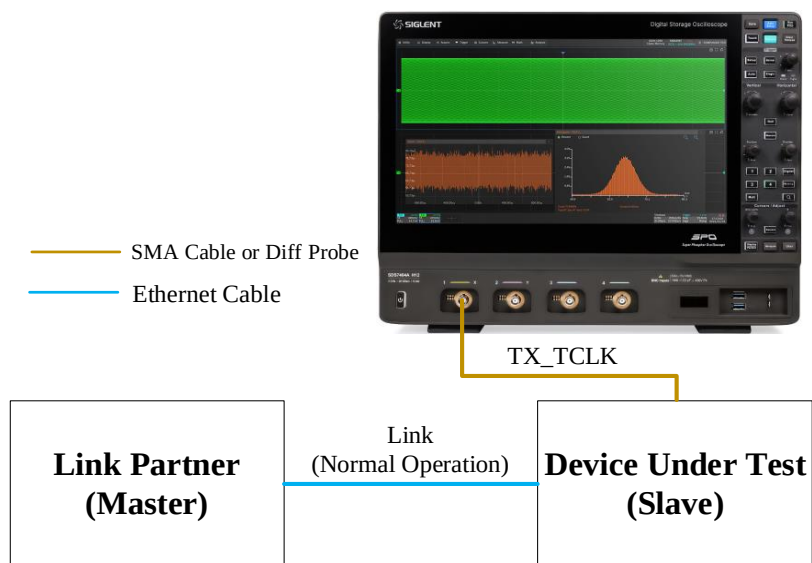


图 6-9 DUT (Slave) 的 TX_TCLK 连接示意图

6.3.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 进入 Slave 模式，Link Partner 为 Master，DUT 能正常接收 Link Partner 的有效信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **TX_TCLK 频率和时序抖动（从模式）**。
- 4) 在 **配置** 中设置使用的信源，平均次数、抖动边沿类型。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

6.3.3 计算方法

IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.5.4.5 规定了符合物理层一致性测试的符号传输速率。主 PHY 的符号传输速率应在 $66.666 \text{ MHz} \pm 100 \text{ ppm}$ 的范围内。

IEEE Std 802.3bw 规范中没有规定 DUT 在从模式下物理层一致性测试条件，但是从模式应该具有与主模式物理层相等的符号时钟速率。DUT 处于 Slave 模式下，DUT 应根据符号速率时钟重复发送 $\{+1, -1\}$ 数据符号序列。因此，测量到测试模式 3 的数据符号速率等于 PHY 在从模式下发射时钟频率。

IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.5.4.3，指定接收端正确接收数据后，相对于无抖动参考的

抖动，从模式下 DUT 的 TX_TCLK 抖动的 RMS 值应小于 0.01 UI，即要小于 150ps，该测量能反应 MDI 上数据的时间间隔误差抖动。

6.3.4 测试结果参考

TX_TCLK 发射时钟频率和时序抖动测试结果如图 6-10 所示。

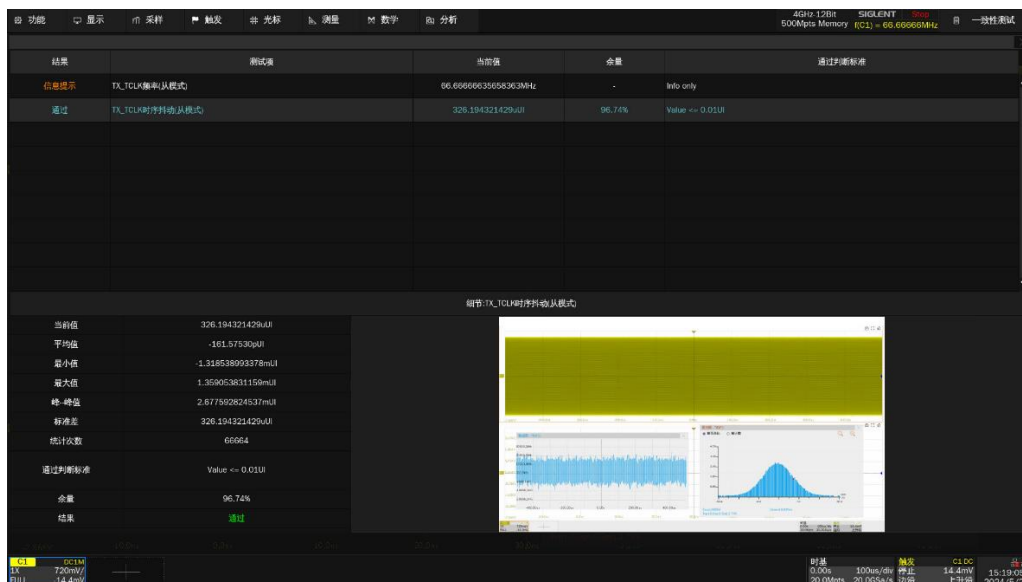


图 6-10 TX_TCLK 频率和时序抖动测试结果

TX_TCLK 时序抖动的波形展开的细节如图 6-11 所示。



图 6-11 TX_TCLK 时序抖动波形展开细节

6.4 发射机失真

依据 IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.5.4.2 章节和 Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_08 章节, DUT 进入测试模式 4 后, 发出数个周期的 2047 个已定义符号。IEEE std 802.3bw 的 Section 96.5.4.2 提供了 MATLAB 代码来对发射机失真进行分析。

6.4.1 测试环境搭建

发射机失真, 在 SDS7000A 示波器上的用户界面的配置如图 6-12 所示。

鼎阳科技推出的发射机失真测试项目, 支持使用任意波形发生器输出干扰信号给 DUT 进行失真测试。此外, 为了简化测试环境, 可以不勾选 **干扰信号**, 不添加干扰信号下进行发射机失真测试, 该项测试由于不满足 IEEE Std 802.3bw 和 Open Alliance 标准推荐的测试环境, 因此测试结果仅供参考。

在发射机失真测试项目中, 为了提高测试的准确度, 需要在一致性测试的用户界面, 勾选 **TX_TCLK**, DUT 的 TX_TCLK 连接到时钟同步夹具的输入端, 时钟同步夹具的输出端输出两路 10MHz 信号, 分别输给示波器和任意波形发生器的 10MHz In 输入端上, 实现 DUT 和示波器、任意波形发生器的时钟域同步。

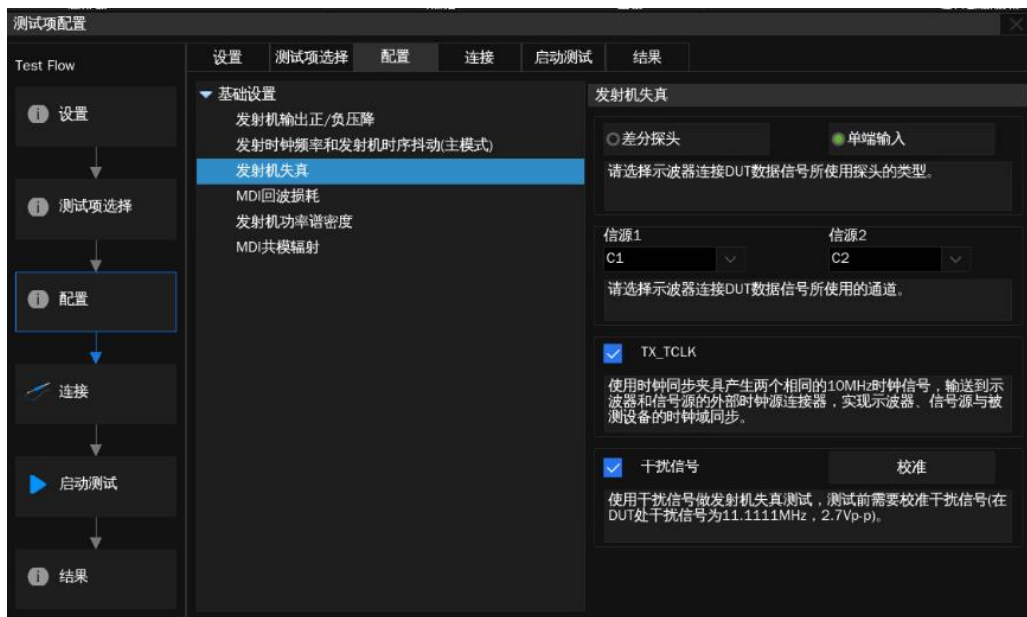


图 6-12 发射机失真的配置界面

6.4.1.1 干扰源校准

A. 有 TX_TCLK 时钟

在勾选 **TX_TCLK** 和 **干扰信号** 后, 在进行发射机失真测试前, 需要对干扰信号进行校准, 校准环境如图 6-13 所示。对干扰信号校准步骤如下:

(1) 时钟同步夹具的连接步骤如下:

a) 通过 J6 或 J9 给时钟同步夹具输入 5V 供电电源, HL3 和 HL5 指示灯点亮代表电源正常。

- b) 将 DUT 上的 TX_TCLK 和时钟同步夹具上的 J1 (CH1) 或者 J2 (CH2) 输入通道相连。当短路帽安装在 J5 (pin1,2) 时选通 CH2 为输入通道 (CH2 输入阻抗为 50Ω); 当短路帽安装在 J5 (pin2,3) 时选通 CH1 为输入通道 (CH1 输入阻抗为 10kΩ)。
 - c) 输入时钟频率选择: 短路帽安装在 J7 (pin1,2) 表示 TX_TCLK 的时钟频率为 66.667MHz。
 - d) 检查频率锁定指示灯: HL1 点亮, 表示将 66.667MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟正常。
 - e) 当 HL1 熄灭, 表示输入时钟没有被锁定, 需要检查输入时钟频率、J5、J7 的配置是否正确, 当配置正确后点击复位开关 S1 或者重新上电即可。
 - f) 将 J3 (Clock Output: CH1) 和 J12 (Clock Output: CH2) 分别连接到示波器和任意波形发生器的外部时钟源输入端口。
 - g) 将示波器、任意波形发生器的时钟源设置为外部输入。
- (2) 在测试夹具上, 校准干扰源使用到区域②, 连接如下:
- a) J5, J14 连接器分别安装 50Ω端接器。
 - b) 示波器的任意两路输入通道连接到测试夹具上的 J2, J8 连接器。
 - c) 信号源的两路输出通道分别连接到测试夹具上的 J15, J16 连接器。
 - d) 设置任意波形发生器输出两路 11.1111MHz (1/6 的符号传输频率)、相位差为 180°的正弦波信号。
 - e) 示波器的输入阻抗为 50Ω, 示波器测量两路输入信号并相减; 不断调整任意波形发生器的输出信号幅度直到示波器测量到的信号峰峰值为 2.7Vp-p。该信号作为后续发射机失真测试的干扰信号。记录和保存任意波形发生器的配置。

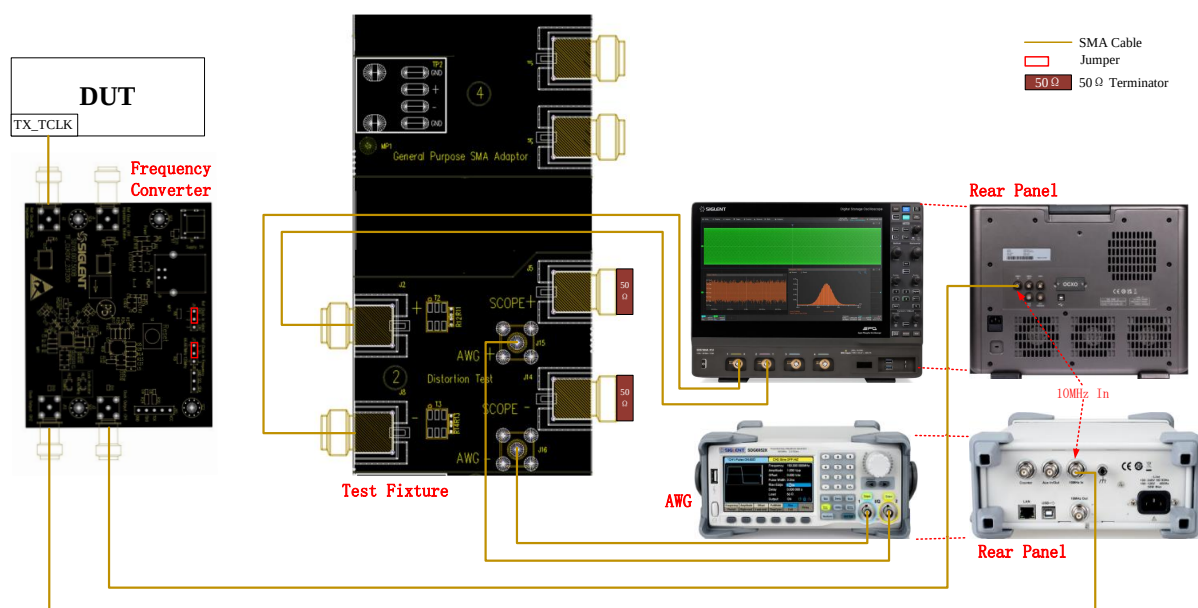


图 6-13 发射机失真的干扰源校准环境

B. 无 TX_TCLK 时钟

在无时钟信号可引出的条件下，进行发射机失真测试前也需要对干扰信号进行校准，校准环境如图 6-14 发射机失真的干扰源校准环境所示。对干扰信号校准步骤如下：

- (1) 在测试夹具上，校准干扰源使用到区域②，连接如下：
 - a) J5, J14 连接器分别安装 50Ω 端接器。
 - b) 示波器的任意两路输入通道连接到测试夹具上的 J2, J8 连接器。
 - c) 信号源的两路输出通道分别连接到测试夹具上的 J15, J16 连接器。
 - d) 设置任意波形发生器输出两路 11.1111MHz (1/6 的符号传输频率)、相位差为 180° 的正弦波信号。
 - e) 示波器的输入阻抗为 50Ω，示波器测量两路输入信号并相减；不断调整任意波形发生器的输出信号幅度直到示波器测量到的信号峰峰值为 2.7Vp-p。该信号作为后续发射机失真测试的干扰信号。记录和保存任意波形发生器的配置。

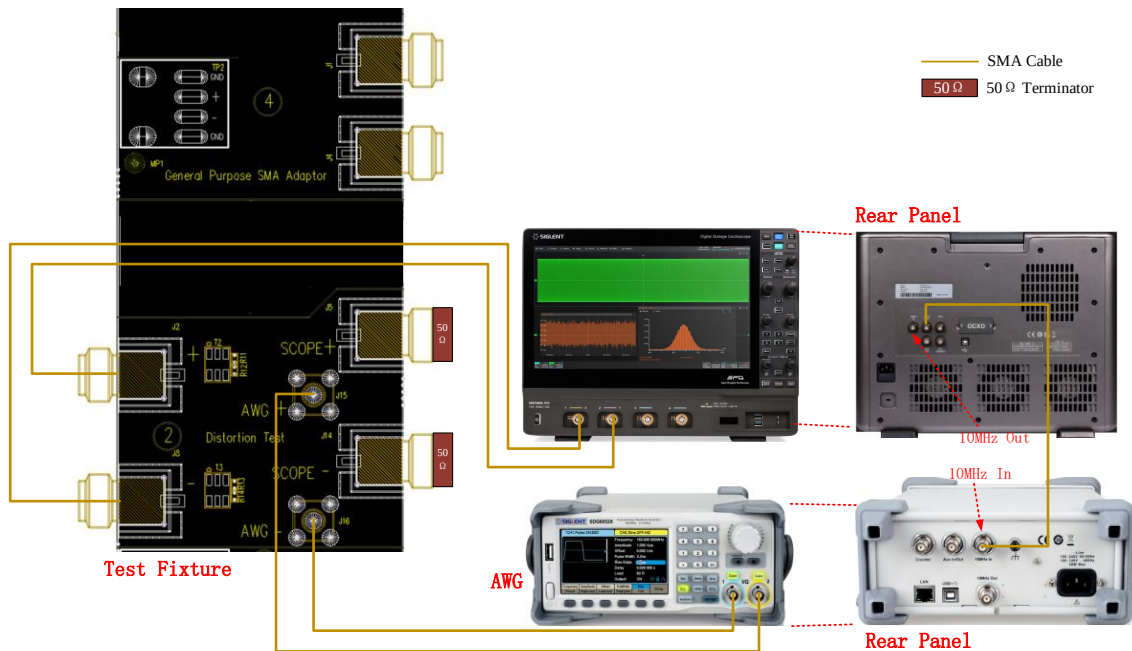


图 6-14 发射机失真的干扰源校准环境（无时钟）

6.4.1.2 测试环境

发射机失真测试，可以在有干扰信号或者没有干扰信号下进行测试，用户可以根据测试需求搭建相应的测试环境。但是无干扰信号下进行的发射机失真测试，由于不满足协议规范上要求的测试环境，因此测试结果仅供参考。

A. 使用 TX_TCLK 时钟和有干扰信号

在发射机失真测试项目中，用户可以选择是否添加干扰信号来进行测试，使用加扰信号的应用环境如图 6-15 所示。测试步骤如下所示：

- (1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 4。
- (2) 时钟同步夹具的连接步骤如下：
 - a) 通过 J6 或 J9 给时钟同步夹具输入一个 5V 的供电电源，HL3 和 HL5 指示灯点亮代表电源正常。
 - b) 将 DUT 上的 TX_TCLK 和时钟同步夹具上的 J1 (CH1) 或者 J2 (CH2) 输入通道相连。当短路帽安装在 J5 (pin1,2) 时选通 CH2 为输入通道 (CH2 输入阻抗为 50Ω)；当短路帽安装在 J5 (pin2,3) 时选通 CH1 为输入通道 (CH1 输入阻抗为 10kΩ)。
 - c) 输入时钟频率选择:短路帽安装在 J7 (pin1,2) 表示 TX_TCLK 的时钟频率为 66.667MHz。
 - d) 检查频率锁定指示灯：HL1 点亮，表示将 66.667MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟正常。
 - e) 当 HL1 熄灭，表示输入时钟没有被锁定，需要检查输入时钟频率、J5、J7 的配置是否正确，当配置正确后点击复位开关 S1 或者重新上电即可。
 - f) 将 J3 (Clock Output: CH1) 和 J12 (Clock Output: CH2) 分别连接到示波器和任意波形发生器的外部时钟源输入端口。
 - g) 将示波器、任意波形发生器的时钟源设置为外部输入。
- (3) 在测试夹具上，使用到区域②和区域④，连接如下：
 - a) 区域④上的 TP2 焊接被测设备(DUT)的测试线缆
 - b) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到测试夹具区域②上的 J2 (+)、J8 (-) 连接器。
 - c) 将已经完成校准的干扰源的两路输出通道分别连接到测试夹具区域②上的 J15, J16 连接器。
 - d) 示波器的两路输入通道分别连接到测试夹具区域②上的 J5, J14 连接器。

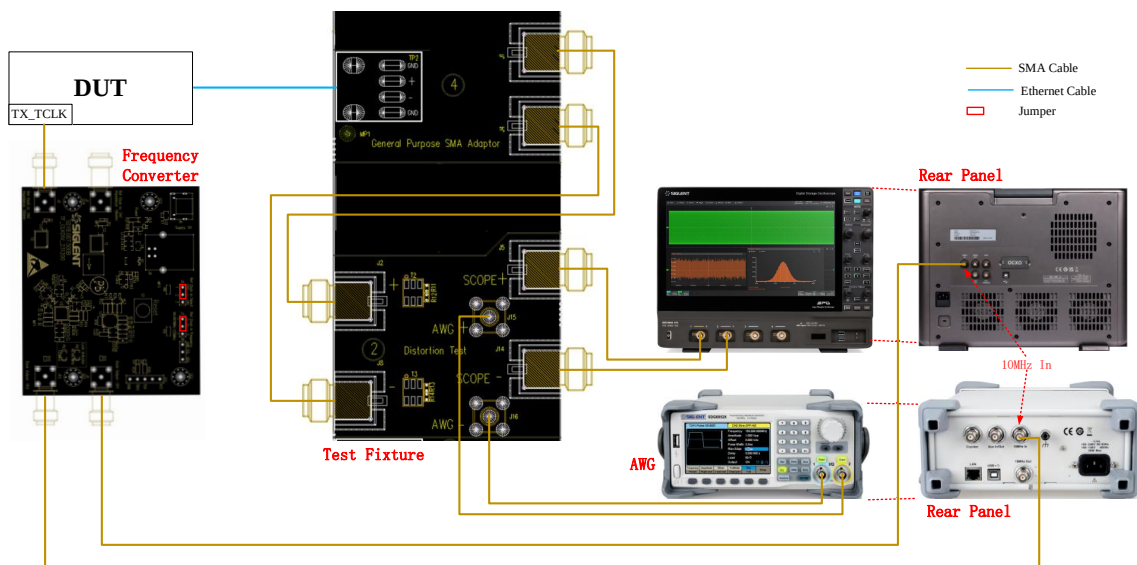


图 6-15 发射机失真测试环境（有干扰信号源）

B. 有 TX_TCLK 时钟和无干扰信号

在发射机失真测试项目中，使用到时钟同步夹具和 SMA 线缆，并且没有干扰源的应用环境如图 6-16 所示。测试步骤如下所示：

- (1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 4。
- (2) 时钟同步夹具的连接步骤如下：
 - a) 通过 J6 或 J9 给时钟同步夹具输入一个 5V 的供电电源，HL3 和 HL5 指示灯点亮代表电源正常。
 - b) 将 DUT 上的 TX_TCLK 和时钟同步夹具上的 J1 (CH1) 或者 J2 (CH2) 输入通道相连。当短路帽安装在 J5 (pin1,2) 时选通 CH2 为输入通道 (CH2 输入阻抗为 50Ω)；当短路帽安装在 J5 (pin2,3) 时选通 CH1 为输入通道 (CH1 输入阻抗为 10kΩ)。
 - c) 输入时钟频率选择:短路帽安装在 J7 (pin1,2) 表示 TX_TCLK 的时钟频率为 66.667MHz。
 - d) 检查频率锁定指示灯：HL1 点亮，表示将 66.667MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟正常。
 - e) 当 HL1 熄灭，表示输入时钟没有被锁定，需要检查输入时钟频率、J5、J7 的配置是否正确，当配置正确后点击复位开关 S1 或者重新上电即可。
 - f) 将 J3 (Clock Output: CH1) 或 J12 (Clock Output: CH2) 连接到示波器的外部时钟源输入端口。
 - g) 将示波器的时钟源设置为外部输入。
- (3) 在测试夹具上，使用到区域④，连接如下：
 - a) 区域④上的 TP2 焊接被测设备(DUT)的测试线缆。
 - b) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到示波器的任意两个输入通道。

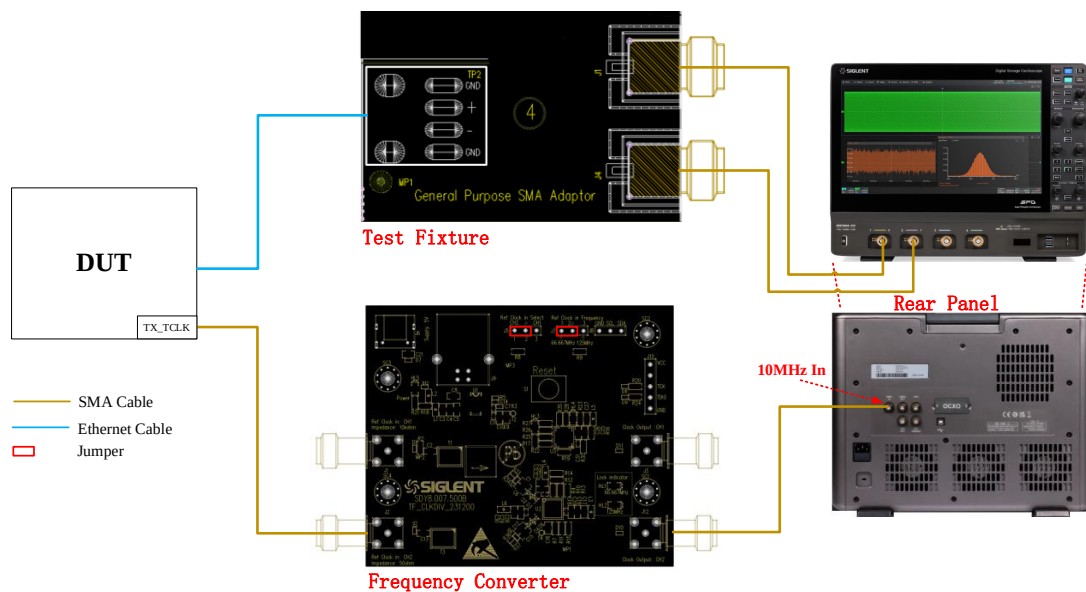


图 6-16 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（有时钟无干扰信号源）

C. 无 TX_TCLK 时钟和有干扰信号

在发射机失真测试项目中，当无时钟信号可引出时，并且使用加扰信号的应用环境如图 6-17 所示。测试步骤如下所示：

- (1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 4。
- (2) 连接示波器的外部时钟源输出端口至任意波形发生器外部时钟源输入端口，任意波形发生器的时钟源设置为外部输入。
- (3) 在测试夹具上，使用到区域②和区域④，连接如下：
 - a) 区域④上的 TP2 焊接被测设备(DUT)的测试线缆。
 - b) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到测试夹具区域②上的 J2 (+)、J8 (-) 连接器。
 - c) 将已经完成校准的干扰源的两路输出通道分别连接到测试夹具区域②上的 J15, J16 连接器。
 - d) 示波器的两路输入通道分别连接到测试夹具区域②上的 J5, J14 连接器。

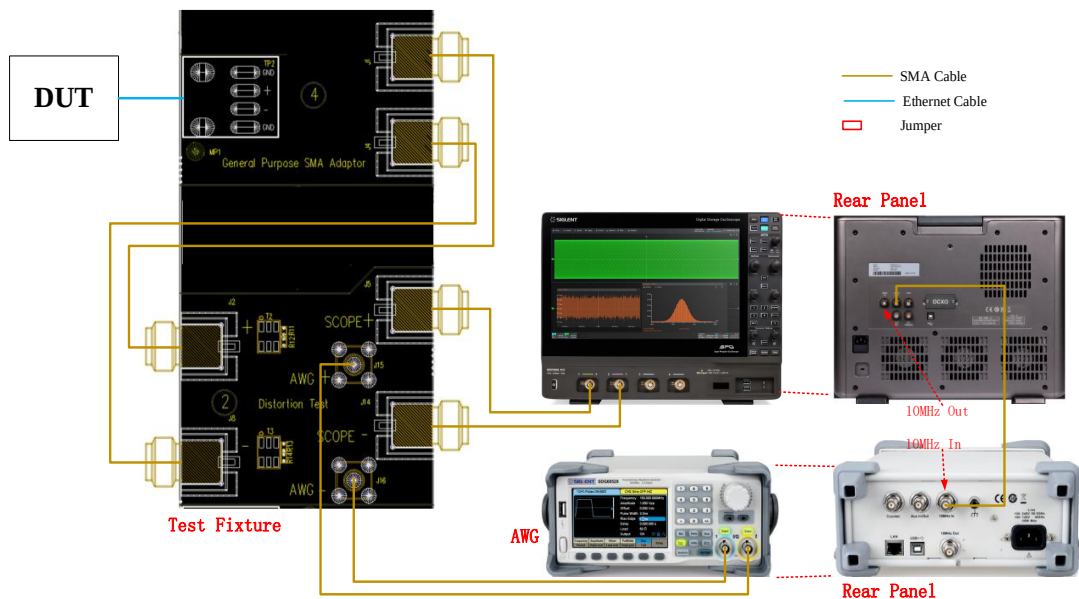


图 6-17 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（无时钟有干扰信号源）

D. 无 TX_TCLK 时钟和无干扰信号

在发射机失真测试项目中，当无时钟信号可引出时，并且没有干扰源的应用环境如图 6-18 所示。测试步骤如下所示：

- (1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 4。
- (2) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到示波器上的两个输入通道。
- (3) TP2 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆。

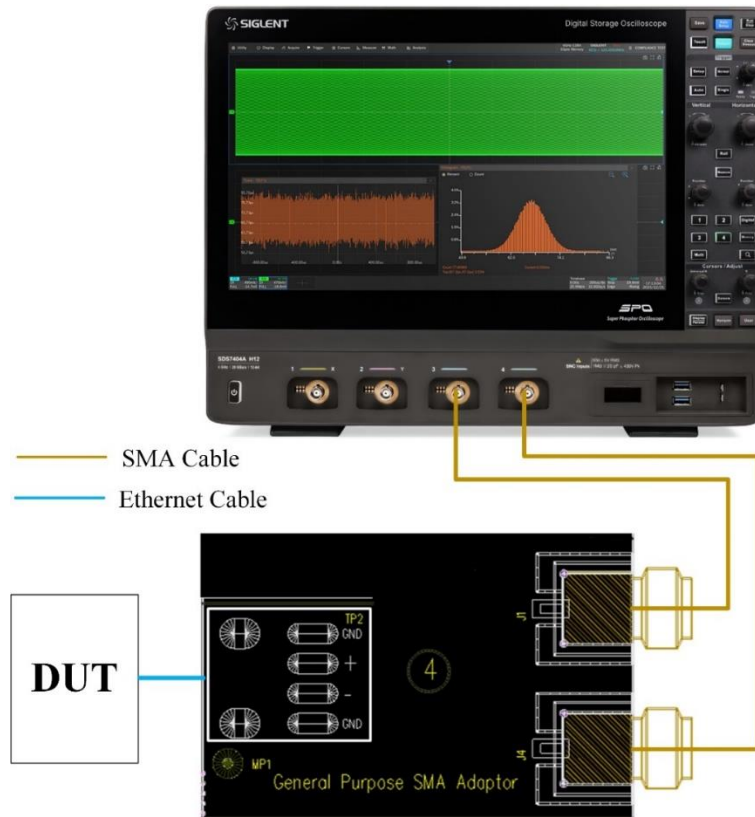


图 6-18 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（无时钟无干扰信号源）

在发射机失真测试项目中，使用有源差分探头的测试步骤和使用 SMA 线缆进行发射机失真测试的方法类似，测试连接参考下图。

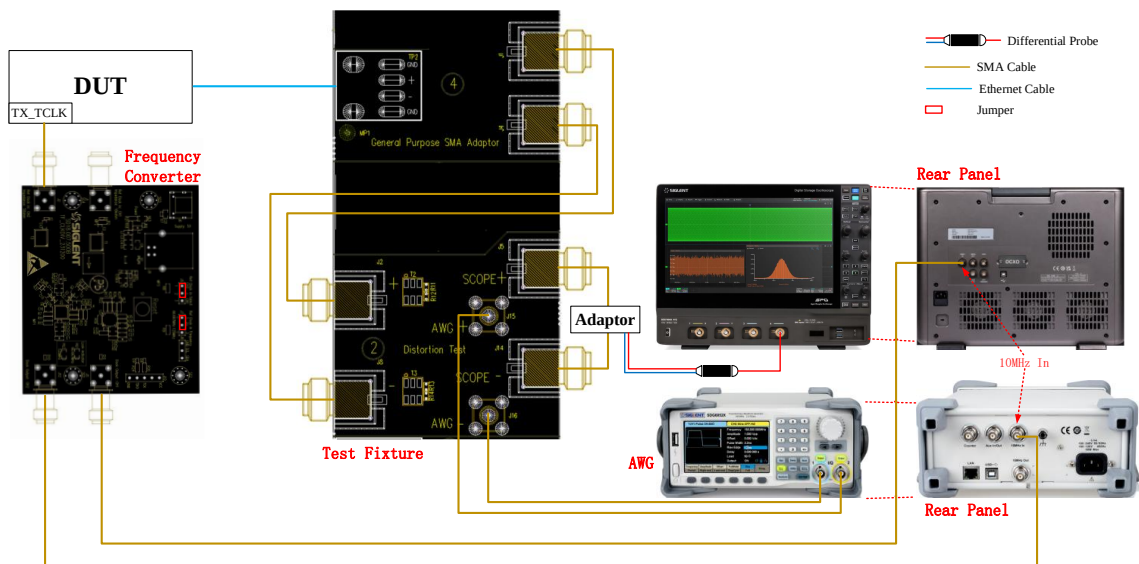


图 6-19 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（有时钟有干扰信号源）

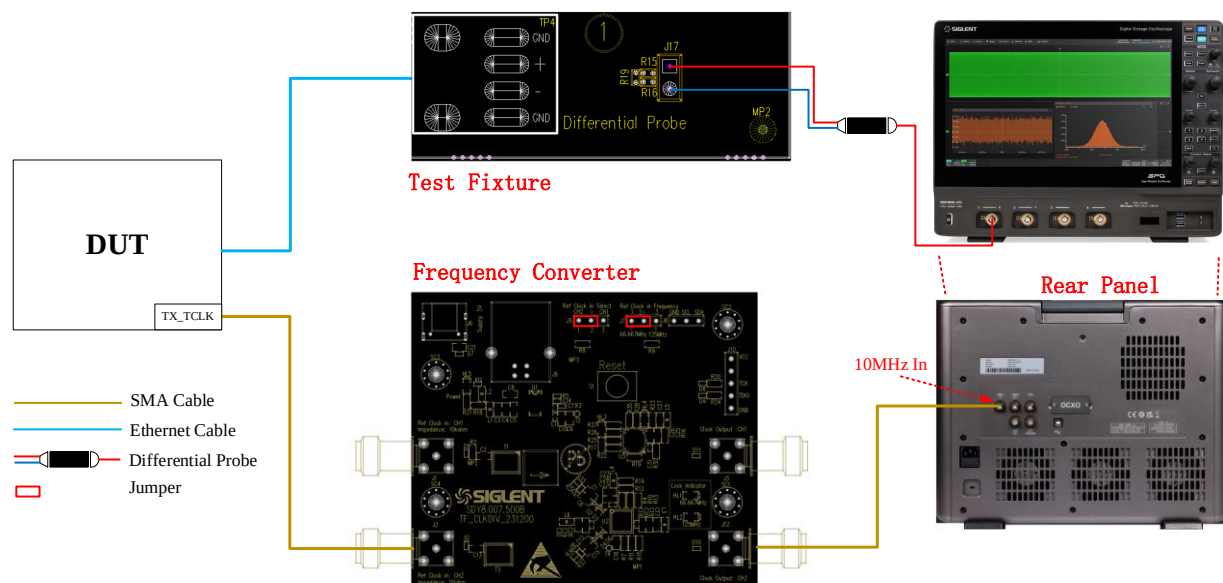


图 6-20 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（有时钟无干扰信号源）

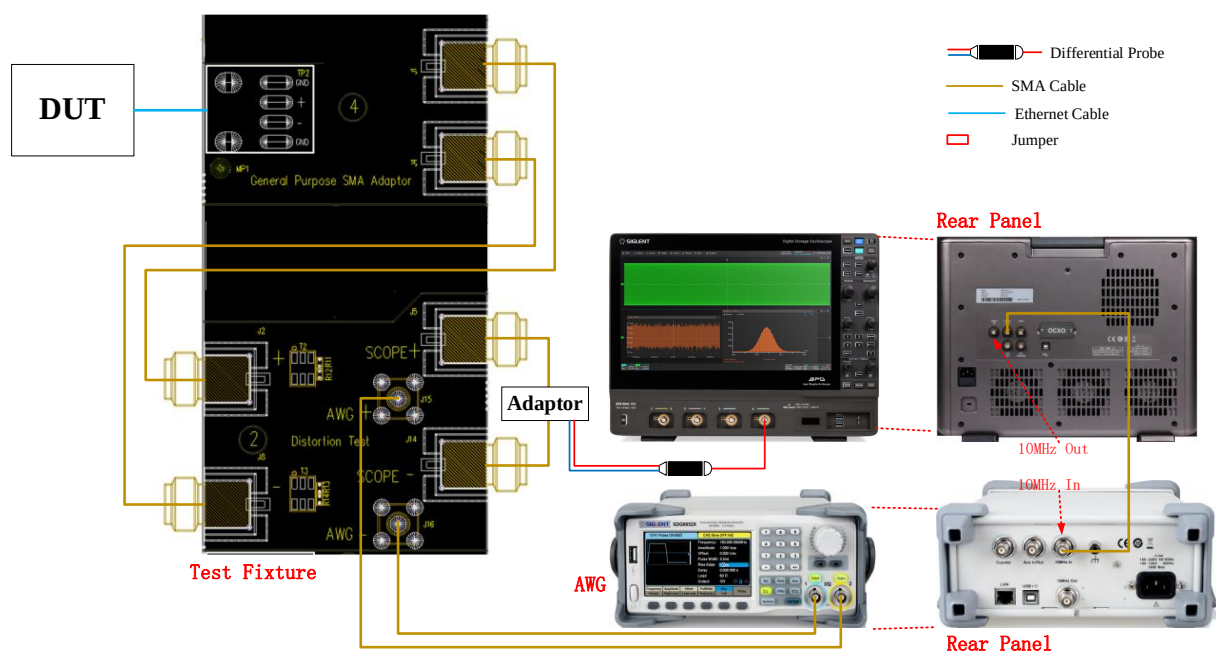


图 6-21 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（无时钟有干扰信号源）

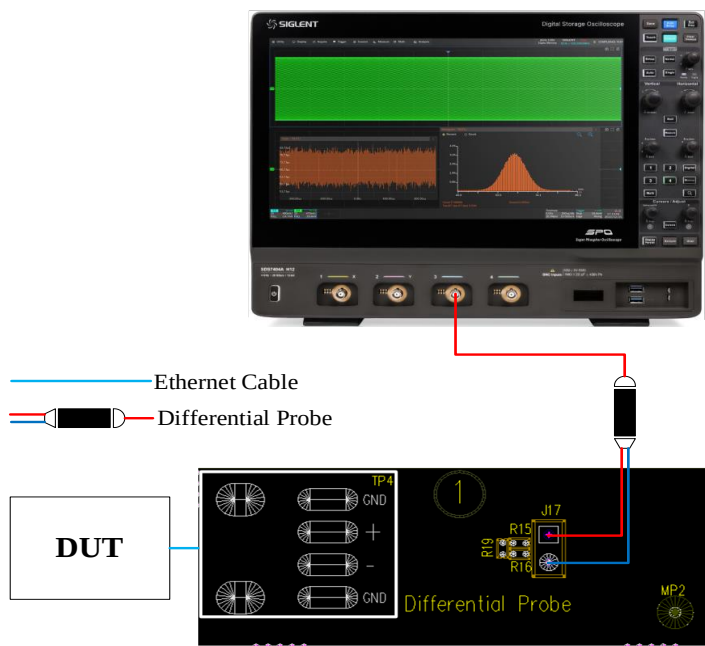


图 6-22 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（无时钟无干扰信号源）

6.4.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 4 的信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机失真**。
- 4) 在 **配置** 中设置使用的连接方式（差分探头或者单端输入），信源，勾选 TX_TCLK（默认），是否添加干扰信号。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

6.4.3 计算方法

IEEE Std 802.3bw-2015, Section 96.5.4.2 和 Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_08 章节中指出，示波器和任意波形发生器在 DUT 的 TX_TCLK 时钟的同步下，通过用 DUT 的符号速率时钟，示波器对差分输出信号用任意相位进行采样，并使用标准参考中提供的 MATLAB 代码处理任意连续 6 个周期，每个周期 2047 个符号，将一个传输符号划分为至少 10 个相等时间间隔进行采样，以计算发射机失真。发射机失真的峰值，需要小于 15mV。

此外，也可以在没有干扰信号下来执行发射机失真测试，但是该项测试结果仅供参考，不能作为 DUT 是否通过发射机失真的依据。

6.4.4 测试结果参考

发射机失真测试结果如图 6-23 所示，波形细节如图 6-24 所示。

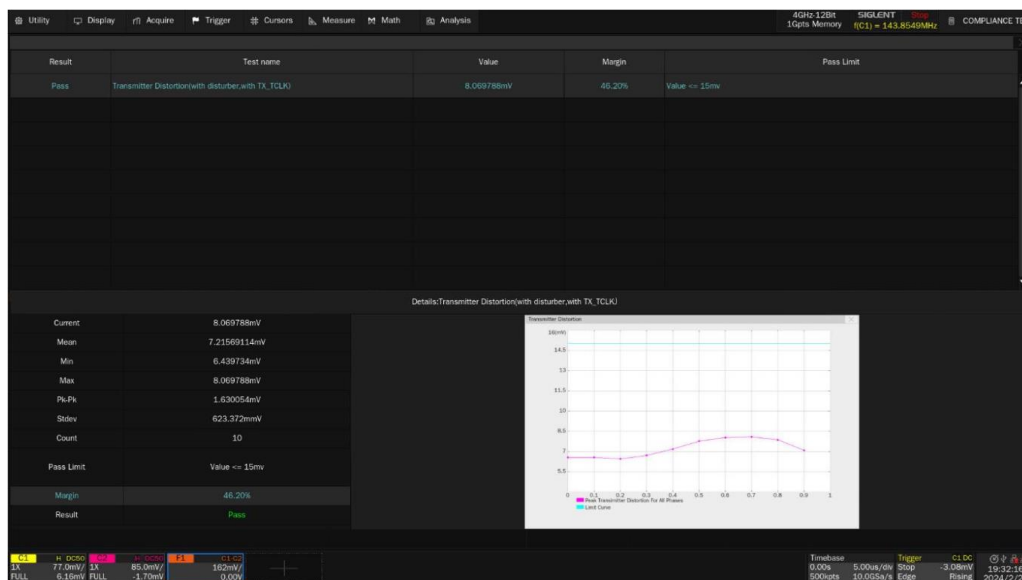


图 6-23 发射机失真测试参考结果

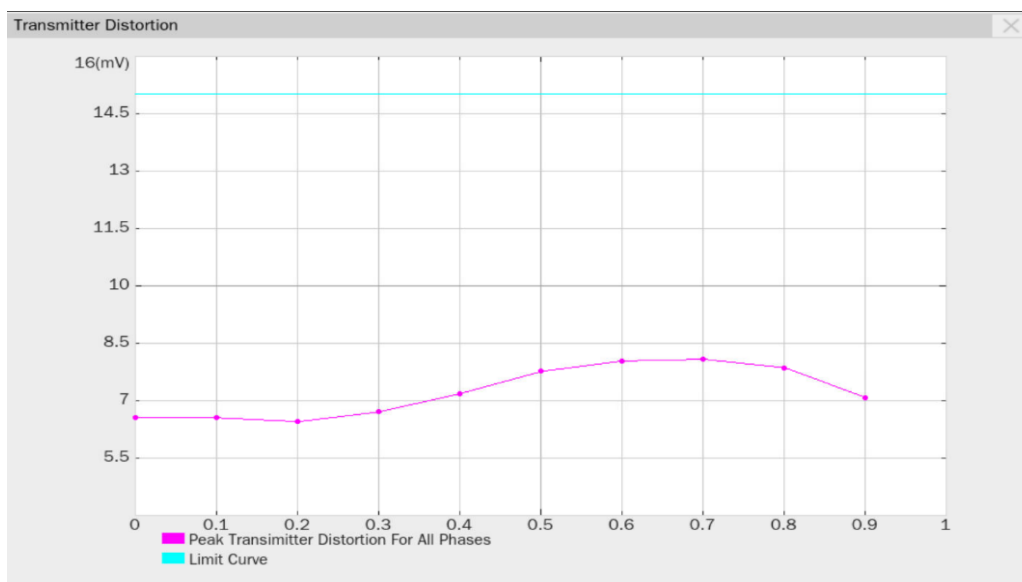


图 6-24 发射机失真测试结果的波形细节图

6.5 发射机功率谱密度和峰值差分输出

IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.5.4.4.规定，在测试模式 5 下，发射机发出随机的三元码 {-1,0,1}，发射机的功率谱密度（PSD：Power spectral density）和峰值差分输出电压应在规定的范围内。

在 Open Alliance 的 TC8 标准中，没有发射机峰值差分输出的测试项目，只有 PSD 的测试项目。

6.5.1 测试环境搭建

6.5.1.1 使用示波器测试

发射机功率谱密度和峰值差分输出的测试环境，和《6.1.1 测试环境搭建》章节的相同。

使用 SMA 线缆的连接方式如图 6-2 所示。

使用有源差分探头的连接方式如图 6-3 所示。

6.5.1.2 使用频谱仪测试 PSD

发射机功率谱密度，由于示波器底噪的影响，因此采用频谱仪测试可以达到更高的精度。连接方式如图 6-25 所示，测试步骤如下所示：

- 1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 5。
- 2) 测试夹具区域③上的 TP3 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆。
- 3) 使用 SMA 线缆将测试夹具的 J12 连接器和频谱仪的 RF INPUT 端口相连。
- 4) 一根 USB 连接线分别连接示波器的 USB Host 接口和频谱仪的 USB Device 接口。
- 5) 在示波器弹窗上，在 **测试项选择** 中点击 **发射机功率谱密度**，点击 **配置** -> **发射机功率谱密度** -> **频谱分析仪** -> **测试连接**，示波器自动检测频谱仪连接状态，连接成功后，会提示连接成功信息并且返回频谱仪的型号，并且示波器会自动配置频谱仪的一些测试参数（自动配置仅支持鼎阳仪器）。频谱仪的配置如下：
 - 测量类型：频谱分析；
 - 测量单位：dBm；
 - 起始频率：1MHz；
 - 终止频率：200MHz；
 - RBW：10kHz；
 - VBW：30kHz；
 - RMS 平均检波器；
 - 扫描时间大于 60s。

- 6) 如需进行巴伦补偿, 请点击 **设置** 进入巴伦补偿界面, 设置相关参数。

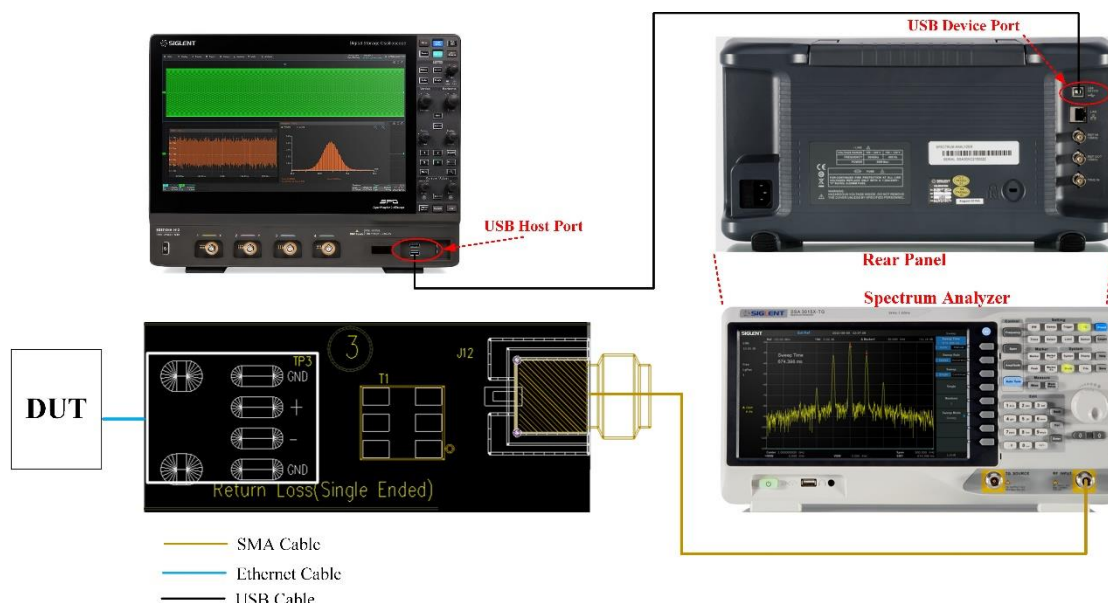


图 6-25 使用频谱仪测试功率谱密度连接示意

6.5.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 5 的信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机功率谱密度和峰值差分输出**。

【注】：如果选择 Open Alliance 标准, 则只有 PSD 测试项目。

- 4) 在 **配置** 中设置使用的探头类型 (差分探头或者单端输入), 信源, 平均次数, 选择是否使用频谱仪来测试发射机功率谱密度。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。

如果选择使用频谱仪, 点击 **测试连接** 来确保可以使用示波器来控制频谱仪, 并对频谱仪做测量的基础配置。

- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试, 应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后, 点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中, 示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号, 输出测试结果。

如果选择使用频谱仪测量发射机功率谱密度, 示波器则会控制频谱仪进行测量, 并且根据频谱仪的测量结果来绘制曲线, 输出测试结果。

6.5.3 计算方法

- (1) 功率谱密度: IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.5.4.4 和 Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_04 规定, 在测试模式 5 下, 发射机的功率谱密度(PSD)应在规定的范

$$\text{Upper PSD}(f) = \begin{cases} -63.3 - 1.5 \times \frac{f-1}{19} \text{ dBm/Hz} & \text{for } 1 \text{ MHz} \leq f < 20 \text{ MHz} \\ -64.8 - 3.7 \times \frac{f-20}{20} \text{ dBm/Hz} & \text{for } 20 \text{ MHz} \leq f < 40 \text{ MHz} \\ -68.5 - 8.0 \times \frac{f-40}{17} \text{ dBm/Hz} & \text{for } 40 \text{ MHz} \leq f < 57 \text{ MHz} \\ -76.5 \text{ dBm/Hz} & \text{for } 57 \text{ MHz} \leq f \leq 200 \text{ MHz} \end{cases} \quad (96-4)$$

$$\text{Lower PSD}(f) = \begin{cases} -70.9 - 4.9 \times \frac{f-1}{19} \text{ dBm/Hz} & \text{for } 1 \text{ MHz} \leq f < 20 \text{ MHz} \\ -75.8 - 13.4 \times \frac{f-20}{20} \text{ dBm/Hz} & \text{for } 20 \text{ MHz} \leq f < 40 \text{ MHz} \end{cases} \quad (96-5)$$

where

Upper PSD(f) is the upper limit of the PSD of the transmitted signal frequency f
 Lower PSD(f) is the lower limit of the PSD of the transmitted signal frequency f
 f is the frequency in MHz

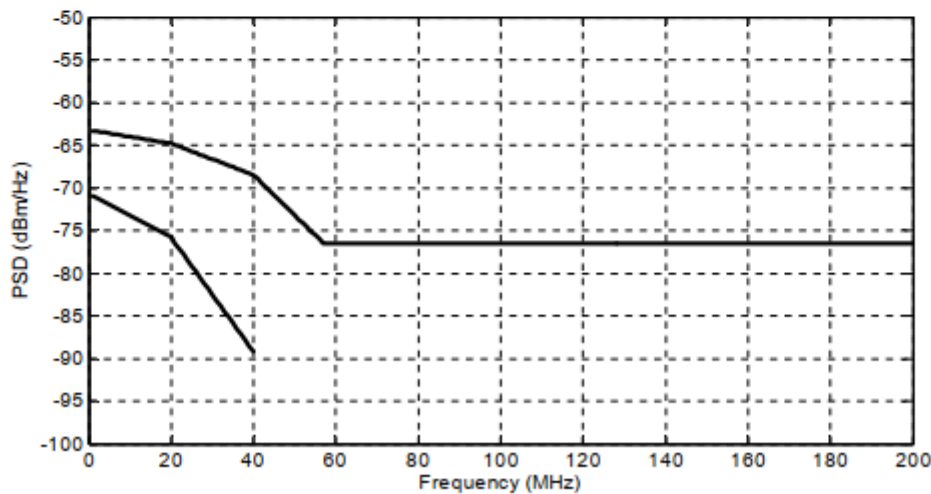


Figure 96-25—PSD upper and lower limits

图 6-26 PSD 的门限

- (2) 峰值差分输出: IEEE Std 802.3bw 标准中 Section 96.5.6 规定, 在测试模式 5 中, 当对 MDI 接口用 100Ω 终端匹配时, MDI 接口处的传输差分信号峰峰值应小于 2.2Vp-p。

6.5.4 测试结果参考

发射机功率谱密度和峰值差分输出的测试结果如图 6-27 所示，发射机功率谱密度的波形细节如图 6-28 所示。

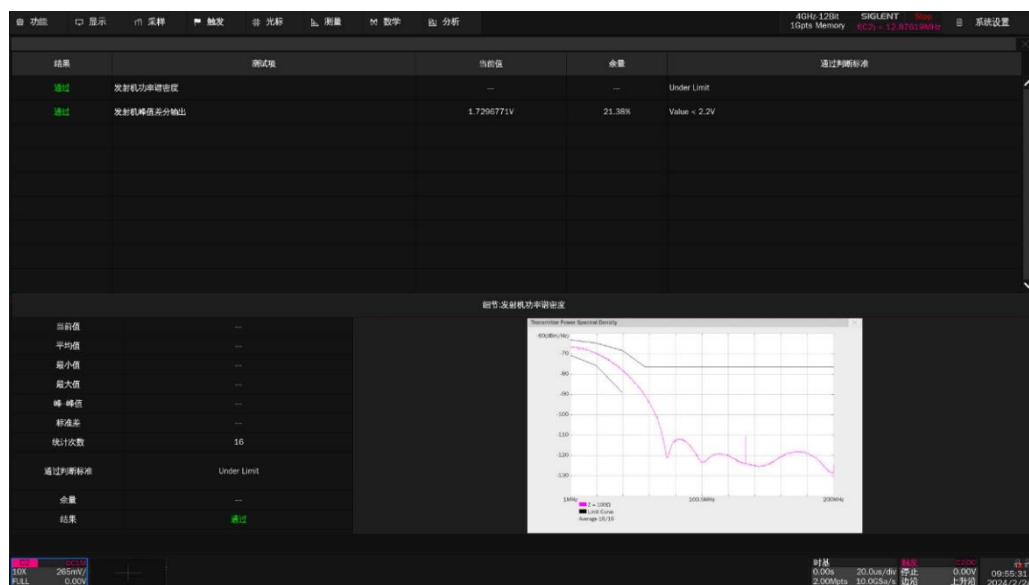


图 6-27 PSD 和峰值差分输出测量结果

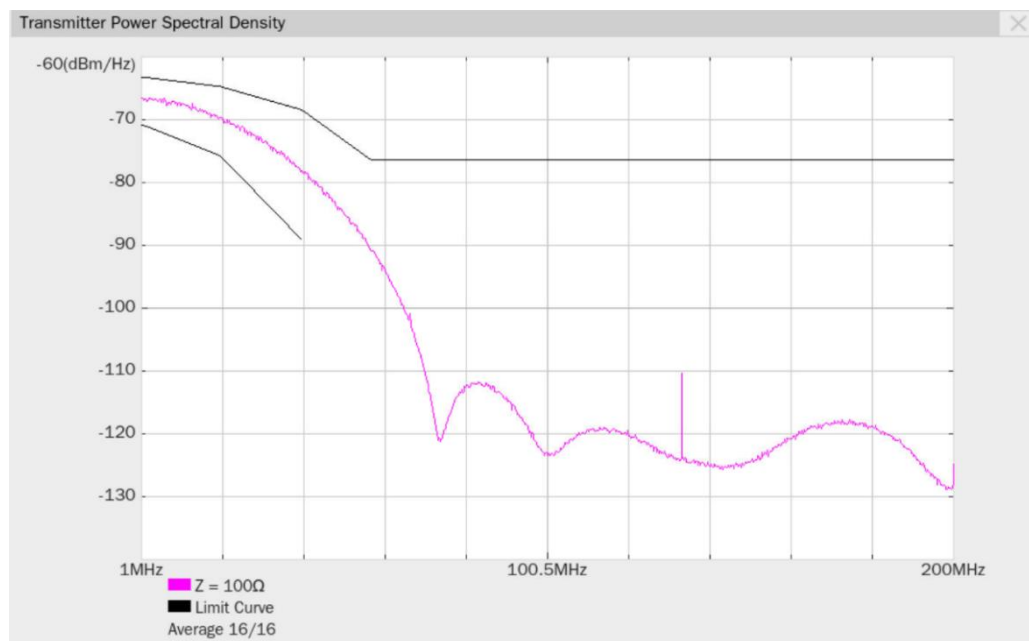


图 6-28 发射机功率谱密度波形细节图

6.6 MDI 回波损耗

IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.8.2.1 规定，DUT 配置为从模式，在 1MHz~66MHz 范围内，MDI 接口终端匹配为 100Ω 下，发射机的 MDI 回波损耗应在规定的范围中。

Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_05 规定，DUT 配置为从模式，在 0.3MHz ~ 1000MHz 范围内，MDI 接口终端匹配为 100Ω 下，发射机的 MDI 回波损耗应在规定的范围中。

6.6.1 测试环境搭建

测试 MDI 回波损耗之前,需要对 VNA 进行校准,VNA 校准完毕后可以执行 MDI 回波损耗测试。

6.6.1.1 VNA 校准

开启 MDI 回波损耗测试之前，需要先进行 VNA 的校准，使用双端口校准环境如图 6-29 所示，VNA 的校准步骤如下：

- 1) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 用两根等长的 SMA 线缆，一端分别连接 VNA 的两个 Port，另外一端连接到校准件。
- 4) 在示波器弹窗上，在 **测试项选择** 中点击 **MDI 回波损耗**。点击 **配置** -> **MDI 回波损耗**，点击 **测试连接**，示波器自动检测 VNA 连接状态，连接成功后，会提示连接成功并且返回 VNA 的型号，并对 VNA 做一些测量配置（自动配置仅支持鼎阳仪器），如下所示：
 - 测量项目：回波损耗（Sdd11）
 - 起始频率：1MHz（IEEE），300kHz（Open Alliance）
 - 终止频率：66MHz（IEEE），1GHz（Open Alliance）
 - 扫描类型：对数幅度
 - 扫描点数：1601
 - 输出功率：-10dBm (min)，0dBm(推荐值)
 - 中频带宽：100Hz
 - 差分阻抗：100Ω
 - 共模阻抗：25Ω
 - 平滑：关闭
- 5) 在 **配置** -> **MDI 回波损耗**，选择 MDI 回波损耗的测量类型为 **平衡测量**，VNA 使用双端口进行回波损耗测量。
- 6) 设置 VNA 的校准参数，对 VNA 的 Open，Load，Short，Through 进行校准。



图 6-29 双端口 VNA 校准环境

进行 MDI 接口的回波损耗测试，也可以选择单端口进行测试，在 **配置** -> **MDI 回波损耗**，选择 MDI 回波损耗的测量类型为 **S 参数测量** 类型，VNA 使用单端口进行回波损耗测量，用户需要自己制作 50Ω 到 100Ω 转换的适配器。校准环境如图 6-30 所示。

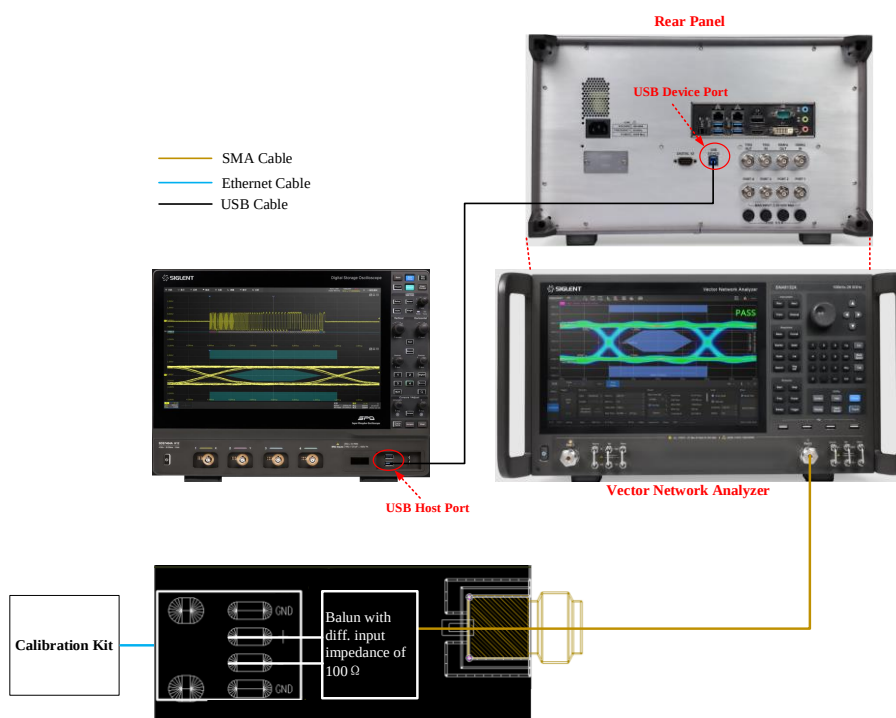


图 6-30 单端口 VNA 的校准环境

6.6.1.2 测试环境

MDI 的回波损耗使用平衡测量的测试环境如图 6-31 所示。

- 1) 配置被测设备(DUT)进入 Slave 模式且不能发送任何的信号。
- 2) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的测试点 J1 (+)、J4 (-)，另一端分别连接到 VNA 上的两个 Port。
- 3) TP2 上焊接被测设备(DUT)的测试短线缆。
- 4) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 5) 在 **配置** -> **MDI 回波损耗**，选择 MDI 回波损耗的测量类型为 **平衡测量**。
- 6) 点击示波器窗口上的 **启动测试**，在弹窗界面上检查连接的准确性后点击 **启动测试**，示波器将读取 VNA 测试到的 MDI 回波损耗数据，并且绘制测量曲线，输出测试结果。

【注】：该测试项目受到导线影响较大，要保证 DUT 到 TP2 的焊接线缆尽可能短，并且正、负端是对称的，以减小测量误差。

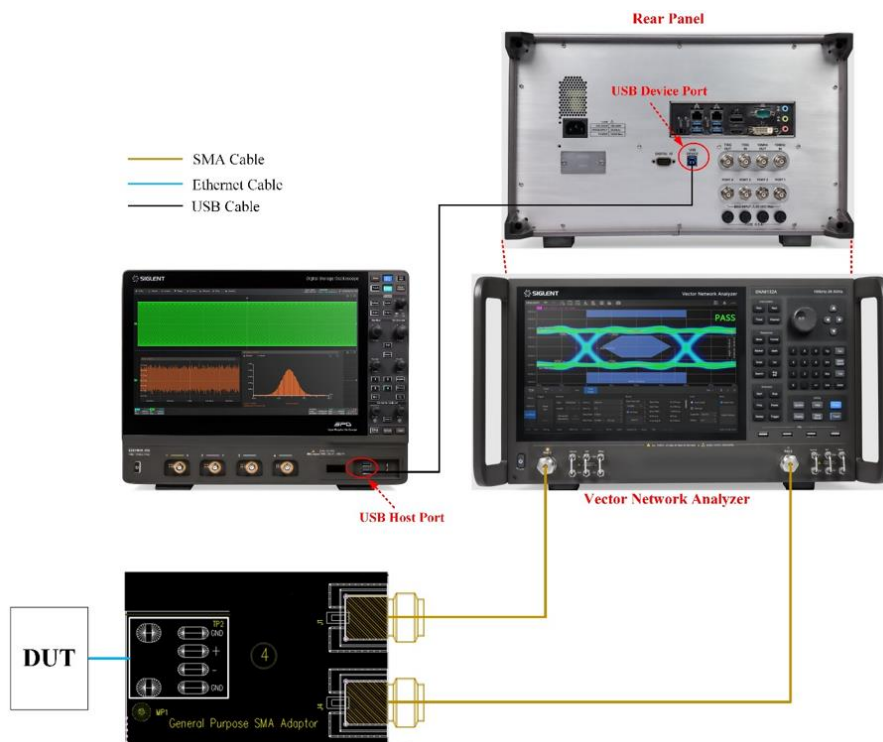


图 6-31 MDI 回波损耗使用平衡测量的连接示意图

MDI 的回波损耗使用 S 参数测量的测试环境如图 6-32 所示。

- 1) 配置被测设备(DUT)进入 Slave 模式且不能发送任何的信号。
- 2) 使用一根 SMA 线缆，一端连接到 VNA 上的一个 Port，另一端连接到单端信号转差分信号的适配板。
- 3) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 4) 在 **配置** -> **MDI 回波损耗**，选择 MDI 回波损耗的测量类型为 **S 参数测量**。
- 5) 点击示波器窗口上的 **启动测试**，在弹窗界面上检查连接的准确性后点击 **启动测试**，示波器将读取 VNA 测试到的 MDI 回波损耗数据，并且绘制测量曲线，输出测试结果。

【注】：该测试项受到导线影响较大，要保证 DUT 到适配板的焊接线缆尽可能短，并且正、负端是对称的，以减小测量误差。

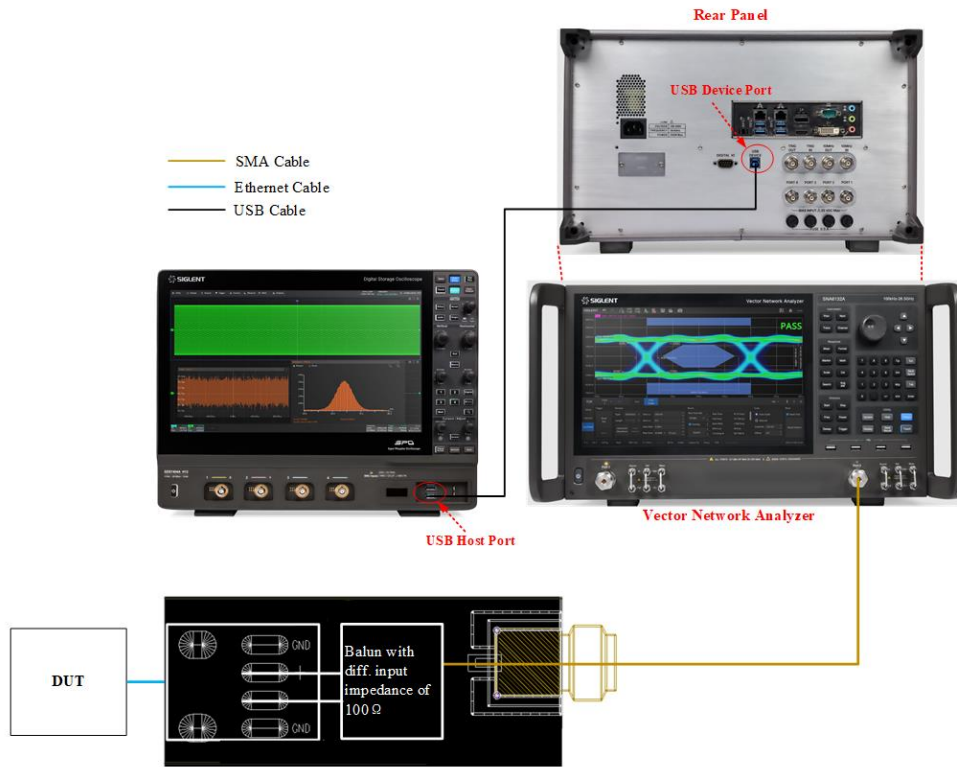


图 6-32 MDI 回波损耗使用 S 参数测量的连接示意图

6.6.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 处于 Slave 模式，且不能发出任何信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **MDI 回波损耗**。
- 4) 在 **配置** -> **MDI 回波损耗** -> **测试连接**，中点击 **测试连接**，示波器连接 VNA 成功后返回 VNA 的型号。
- 5) 在 **配置** 选择 **S 参数测量** 或者 **平衡测量**。
- 6) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。根据提示完成 VNA 的校准。
- 7) 点击 **启动测试**。
- 8) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 9) 示波器将自动获取 VNA 测试到的回波损耗数据，绘制曲线，判断测试是否通过。

6.6.3 计算方法

(1) IEEE Std 802.3bw 标准:

IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.8.2.1.规定, DUT 配置为从模式且端接电阻为 100Ω 下, DUT 不能发送任何的数据, 发射机的 MDI 回波损耗应在下述规定的范围中:

- 频率为 1~30MHz 时, MDI 回波损耗优于 -20dB 。
- 频率为 30~66MHz 时, MDI 回波损耗优于 $-(20-20\times\log_{10}(f/30))$ 。

(2) OPEN Alliance 的 TC8 标准:

Open Alliance 的 TC8 上的 2.2 OABR_PMA_TX_05 规定, DUT 配置为从模式且端接电阻为 100Ω 下, DUT 不能发送任何的数据, 发射机的 MDI 回波损耗测量频率为 0.3MHz~1GHz, 而通过门限则应在下述规定的范围中:

- 频率为 1~30MHz 时, MDI 回波损耗优于 -20dB 。
- 频率为 30~66MHz 时, MDI 回波损耗优于 $-(20-20\times\log_{10}(f/30))$ 。

6.6.4 测试结果参考

根据 IEEE 标准, MDI 回波损耗的测试结果如图 6-33 所示, 波形细节如图 6-34 所示。

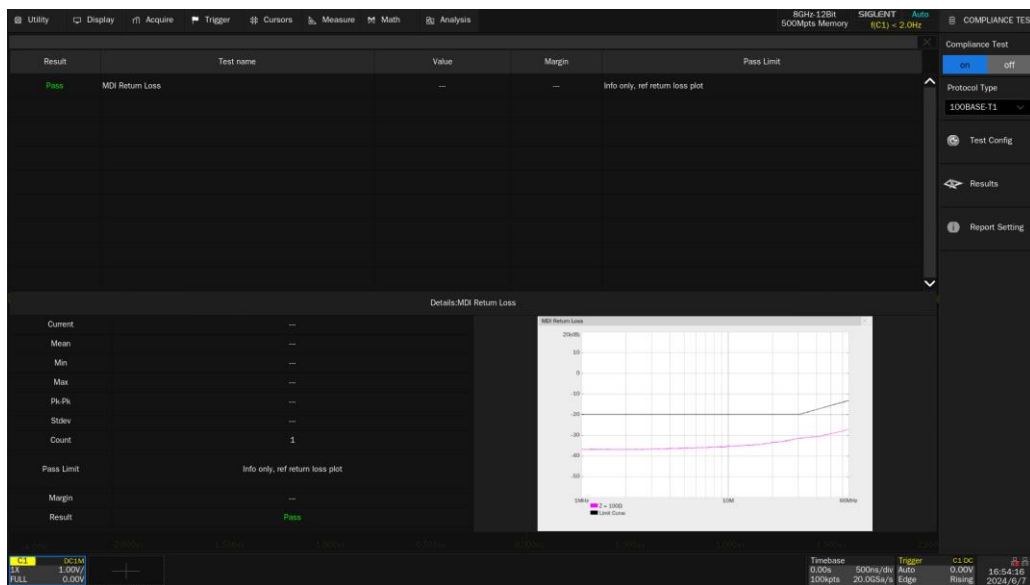


图 6-33 MDI 回波损耗测试结果参考 (IEEE 标准)

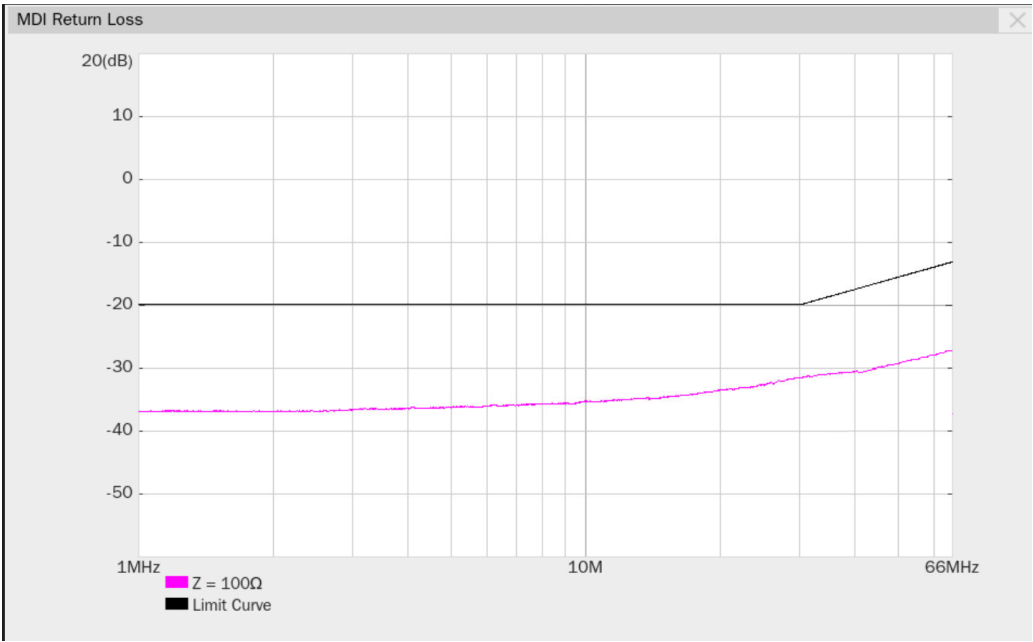


图 6-34 回波损耗波形细节图（IEEE 标准）

根据 Open Alliance 标准，MDI 回波损耗的测试结果如图 6-35 所示，波形细节如图 6-36 所示。

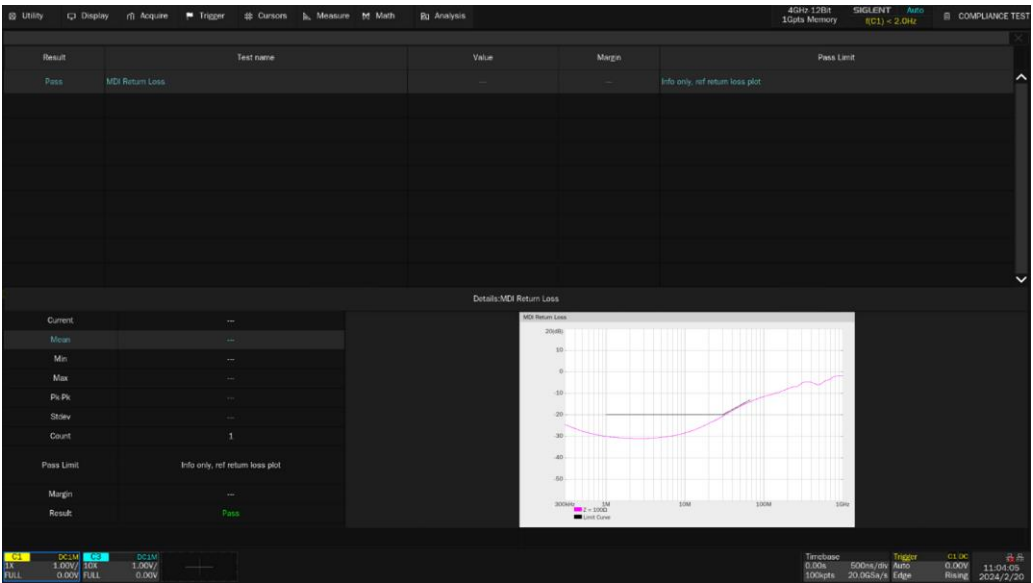


图 6-35 MDI 回波损耗测试结果参考（Open Alliance 标准）

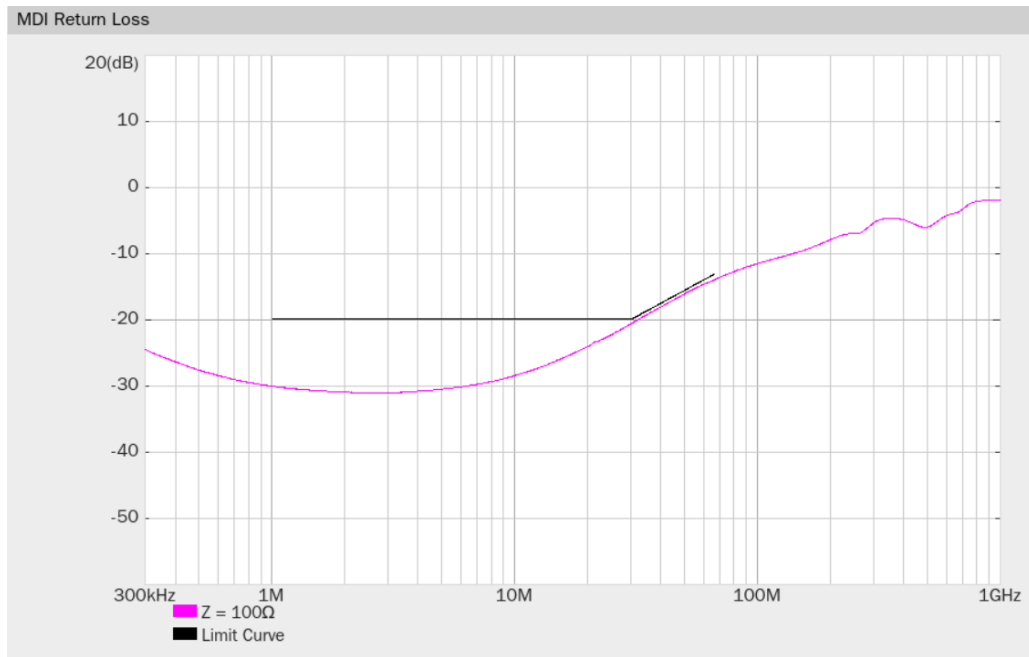


图 6-36 回波损耗波形细节图（Open Alliance 标准）

6.7 MDI 模式转换损耗

MDI 的模式转换损耗，有两个标准，分别为 IEEE 的和 OPEN Alliance。

IEEE Std 802.3bw 标准中的 Section 96.8.2.2 章节，和《OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification》标准中的《OABR_PMA_TX_06: Check MDI Mode conversion》章节规定，DUT 配置为从模式，在 1MHz~200MHz 范围内，MDI 接口终端匹配为 100Ω 下，发射机的 MDI 模式转换损耗（Sdc11: common mode to differential mode conversion）应在规定的范围中。

6.7.1 测试环境搭建

测试 MDI 模式转换损耗之前，需要对 VNA 进行校准，VNA 校准完毕后方可执行 MDI 模式转换损耗测试。

6.7.1.1 VNA 校准

VNA 校准可以使用 SOLT 或者 SOLR 的校准方式。为了达到更高的测试精度，消除测试夹具引入的校准误差，可以使用 TRL 的校准方法，两端口 TRL 校准方法不需要知道校准件的指标参数，通过 3 种简单的连接方式即可把测试装置误差模型中所有的误差项都求出来，TRL 校准方案会用到 Thru 直通校准件，反射校准件（Open 或 Short），一小段传输线（如果不能设计具有适当长度或损耗的线标样传输线，则可以使用匹配标样，即匹配电阻）。

开启 MDI 模式转换损耗测试前，需要先进行 VNA 校准，如图 6-37 所示，校准步骤如下：

- 1) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 标准或者 **OPEN Alliance** 标准。
- 2) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 3) 用两根等长的 SMA 线缆，一端分别连接 VNA 的两个 Port，另外一端连接到校准件。
- 4) 在示波器弹窗上，在 **测试项选择** 中点击 **MDI 模式转换损耗**。点击 **配置** -> **MDI 模式转换损耗**，点击 **测试连接**，示波器自动检测 VNA 连接状态，连接成功后，会提示连接成功并且返回 VNA 的型号，并且示波器会自动配置 VNA 的一些测试参数（仅支持鼎阳的 VNA 仪器），如下所示：

- 测量项目：平衡测量（Sdc11）；
- 起始频率：1MHz（IEEE），0.3MHz（Open Alliance）；
- 终止频率：200MHz（IEEE），1GHz（Open Alliance）；
- 扫描类型：对数幅度；
- 扫描点数：1601；
- 输出功率：-10dBm (min)，0dBm(推荐值)；
- 中频带宽：100Hz；
- 差分阻抗：100Ω；

- 共模阻抗：25Ω；
 - 平滑：关闭。
- 5) 设置 VNA 的校准参数，在使用 SOLT 或者 SOLR 校准方法下对 VNA 的 Open, Load, Short, Through 进行校准；或者在使用 TRL 校准方法下对 VNA 的 Reflect, Through, Line 进行校准，以达到更高的校准精度。

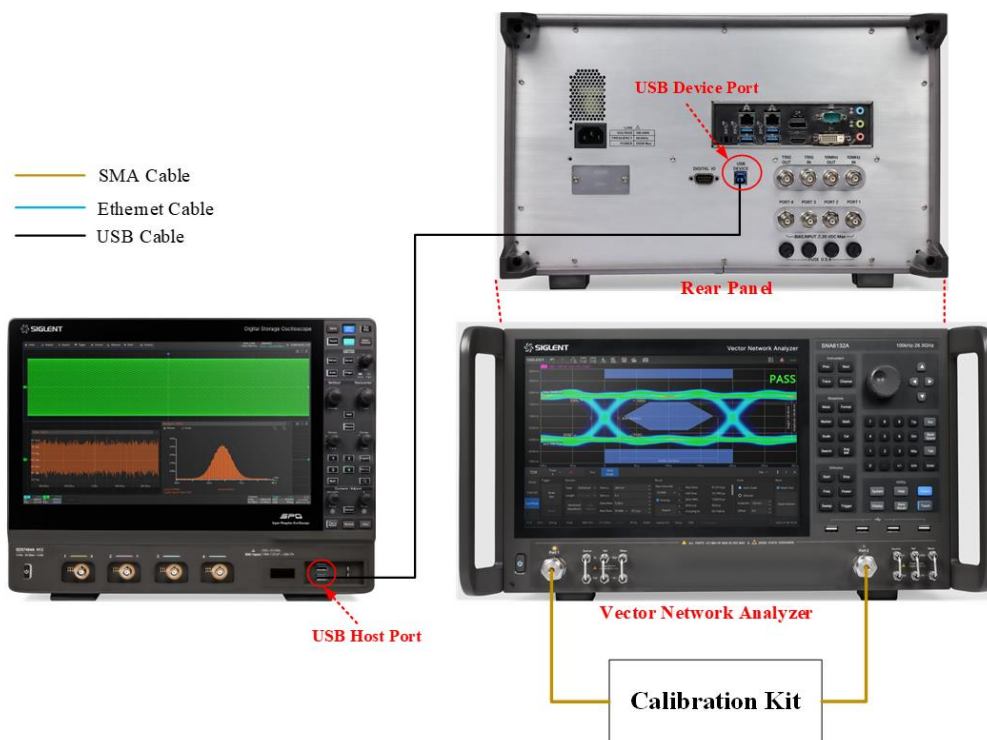


图 6-37 VNA 校准环境

6.7.1.2 测试环境

MDI 模式转换损耗的测试环境如图 6-38 所示，测试步骤如下所示：

- 1) 配置被测设备（DUT）进入 Slave 模式且不能发送任何的信号。
- 2) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的测试点 J1（+）、J4（-），另一端分别连接到 VNA 上的两个 Port。
- 3) TP2 上焊接被测设备（DUT）的测试短线缆。
- 4) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 5) 点击示波器窗口上的 **启动测试**，在弹窗界面上检查连接的准确性后点击 **启动测试**，示波器将读取 VNA 测试到的 MDI 模式转换损耗数据，并且绘制测量曲线，输出测试结果。

【注】：该测试项受到导线影响较大，要保证 DUT 到 TP2 的焊接线缆尽可能短，并且正、负端是对称的，以减小测量误差。

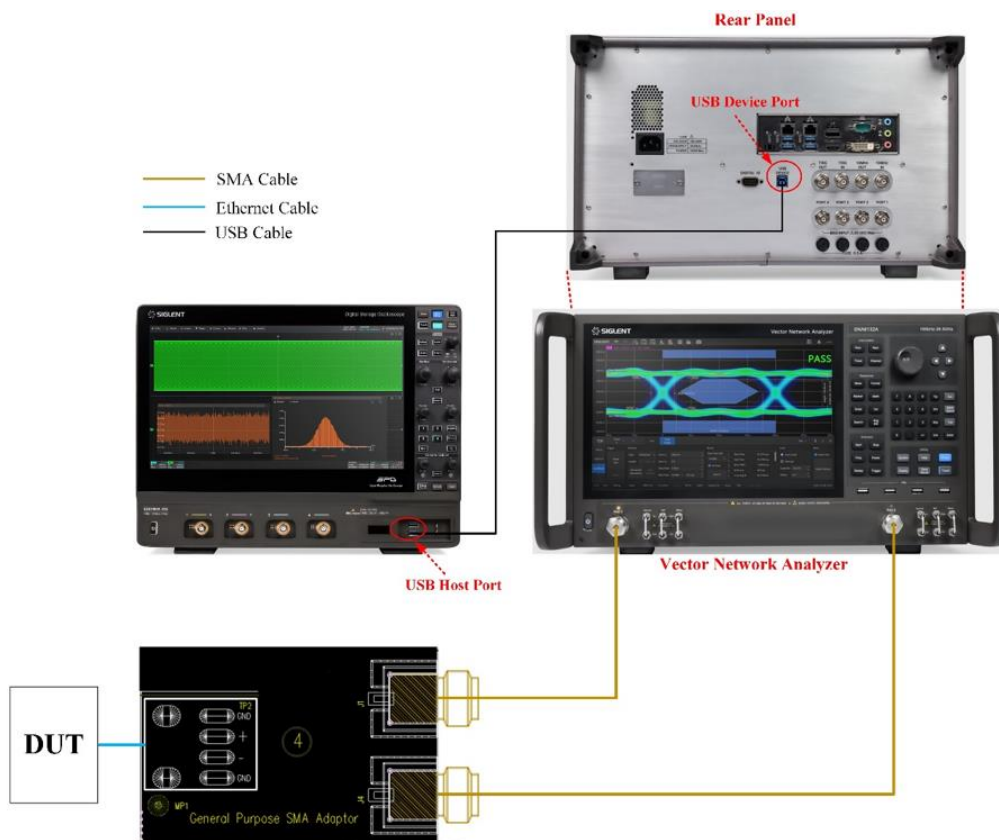


图 6-38 MDI 模式转换损耗的测试环境

6.7.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 处于 Slave 模式，且不能发出任何信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **IEEE** 或者 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **MDI 模式转换损耗**。
- 4) 在 **配置** -> **MDI 模式转换损耗** -> **测试连接**，中点击 **测试连接**，示波器连接 VNA 成功后返回 VNA 的型号。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。根据提示完成 VNA 的校准。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 示波器将自动获取 VNA 测试到的 Sdc11 数据，绘制曲线，判断测试是否通过。

6.7.3 计算方法

MDI 模式转换损耗有两个通过标准，分别是：

- (1) IEEE Std 802.3bw-2015 标准

IEEE Std 802.3bw-2015 的 Section 96.8.2.2 规定，DUT 配置为从模式且端接电阻为 100Ω 下，DUT 不能发送任何的数据，MDI 模式转换损耗应在下述规定的范围中。

- 频率为 1~33MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 -50dB 。
- 频率为 33~200MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 $-(50-20\times\log_{10}(f/33))$ 。

(2) TC8: OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification 规定，DUT 配置为从模式且端接电阻为 100Ω 下，DUT 不能发送任何的数据，MDI 模式转换损耗应在下述规定的范围中，如图 6-39 所示。

- 频率为 1~22MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 -60dB 。
- 频率为 22~100MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 $-(60-20\times\log_{10}(f/22))$ 。
- 频率为 100~200MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 $-(47-30\times\log_{10}(f/100))$ 。

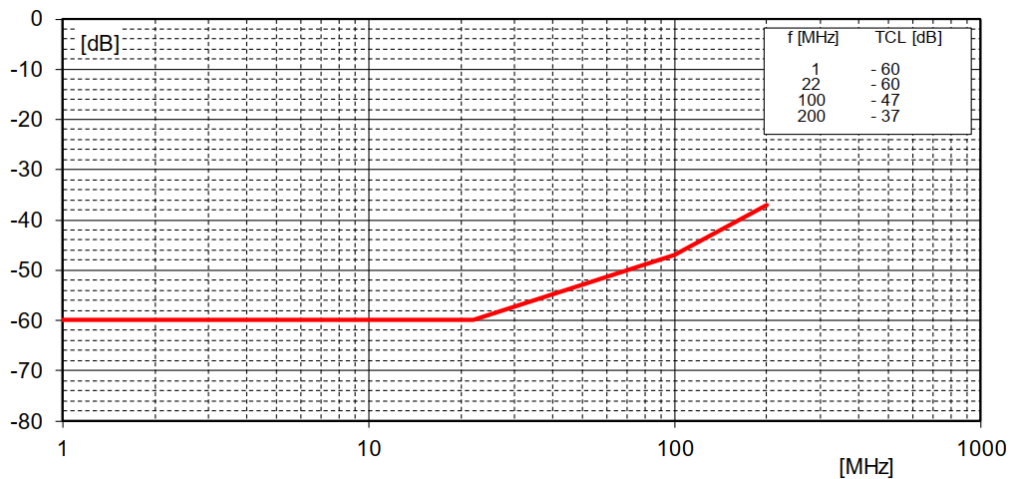


图 6-39 TC8 上 ECU 的 MDI 模式转换损耗门限

6.7.4 测试结果参考

MDI 模式转换损耗测试，采用 IEEE 标准的测试结果如图 6-40 所示，波形细节如图 6-41 所示。

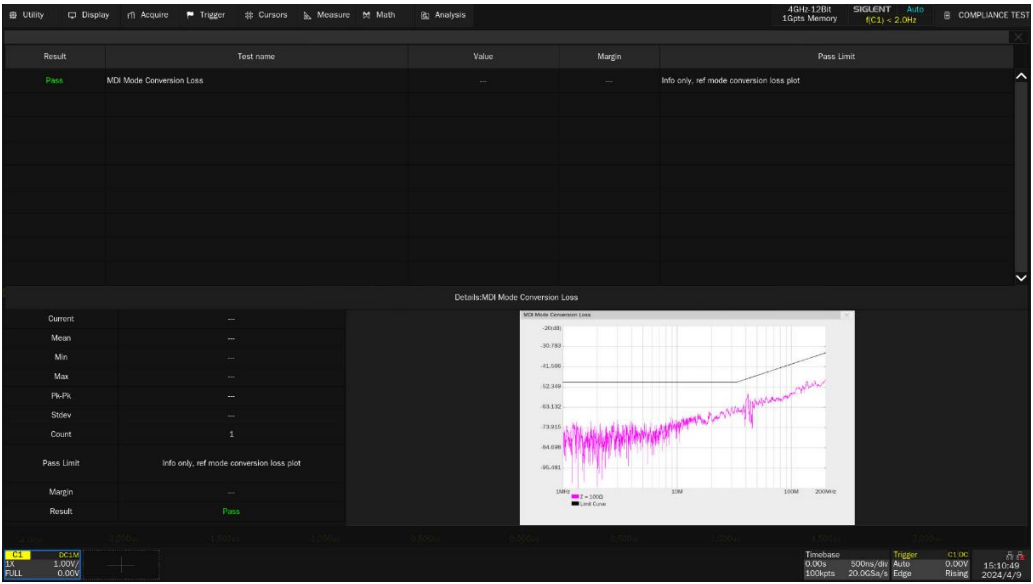


图 6-40 MDI 模式转换损耗参考结果（IEEE 标准）

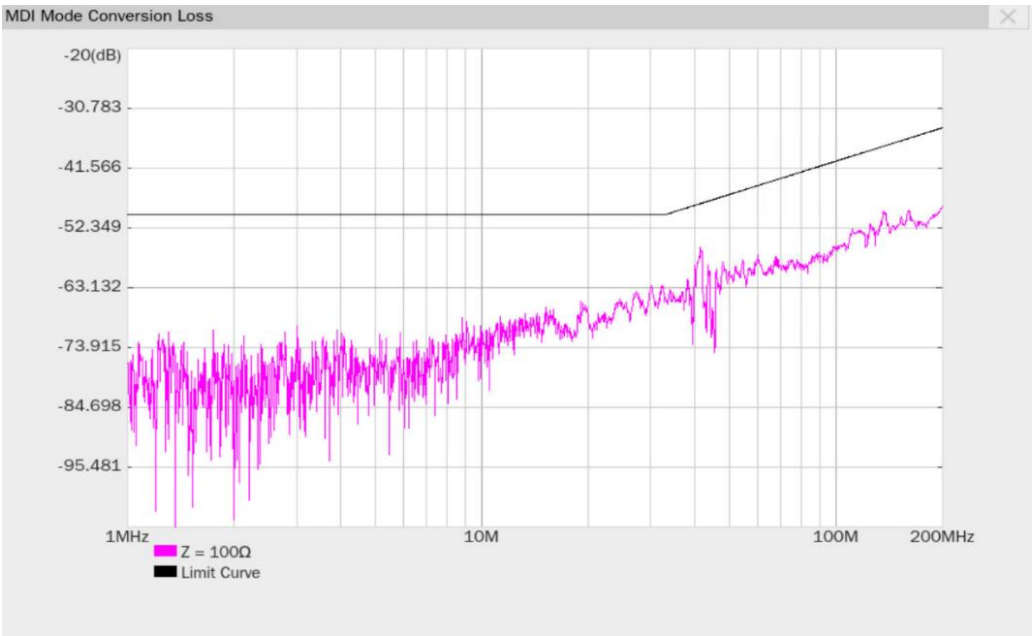


图 6-41 MDI 模式转换损耗波形细节图（IEEE 标准）

MDI 模式转换损耗测试,采用 Open Alliance 标准的测试结果如图 6-42 所示,波形细节如图 6-43 所示。

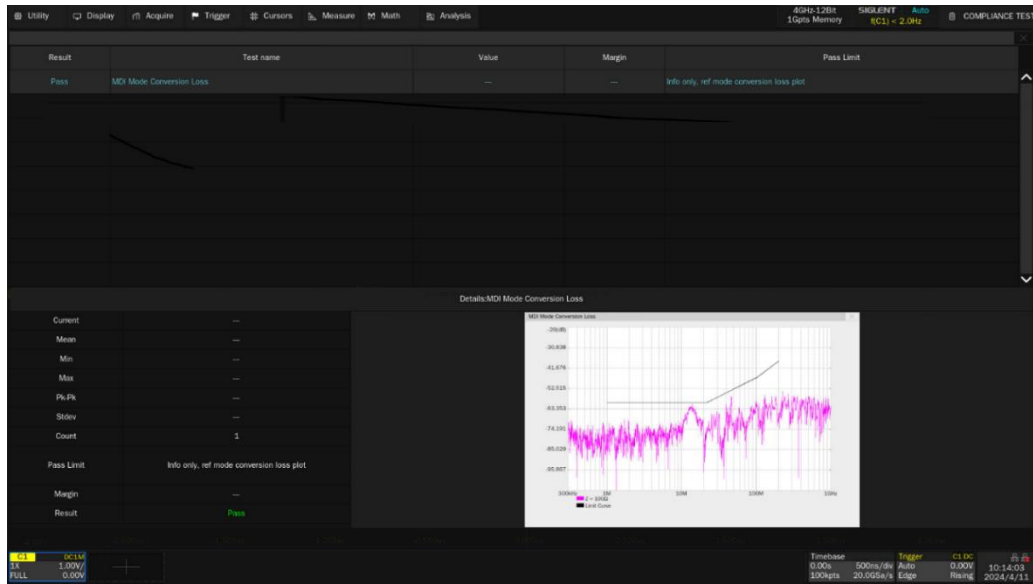


图 6-42 MDI 模式转换损耗参考结果 (Open Alliance 标准)

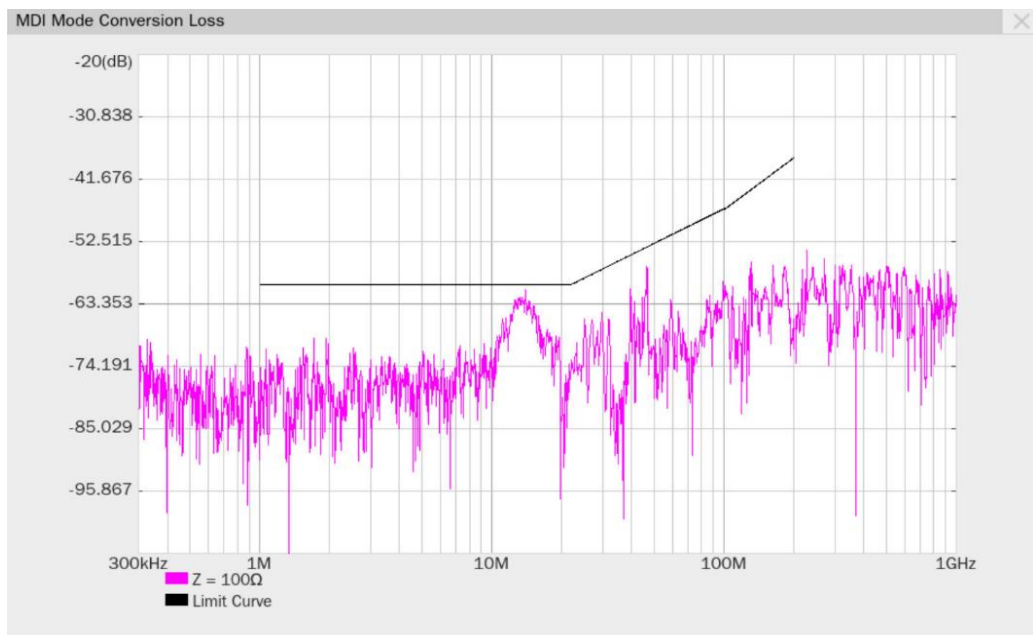


图 6-43 MDI 模式转换损耗波形细节图 (Open Alliance 标准)

6.8 MDI 共模辐射

根据 TC8 《OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification》规范上的《OABR_PMA_TX07: Check MDI Common Mode emission》章节, DUT 配置为测试模式 5, 在 1MHz~200MHz 范围内, MDI 接口终端匹配为 100Ω 下, 发射机的 MDI 共模辐射应该小于 24dBuV。该测试用以验证待测件正常工作时 PMA 输出至周围电子环境的辐射量是否超标。

6.8.1 测试环境搭建

MDI 共模辐射测试, 有两种测试环境搭建, 分别为使用示波器 (如图 6-44 所示) 和频谱分析仪 (如图 6-45 所示) 进行测试。

(1) 示波器测试 MDI 共模辐射, 如图 6-44 所示。

- 1) 一根 SMA 线缆的一端连接到测试夹具区域⑥上的测试点 J3, 另一端连接到示波器上的一个输入通道。
- 2) 区域⑥上的 TP1 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆, 确保 DUT 和测试夹具的 GND 有良好的接触。

【注】: 该测试项受到导线影响较大, 要保证 DUT 到 TP1 的线缆尽可能短, 并且正、负端是对称的, 以减小测量误差。

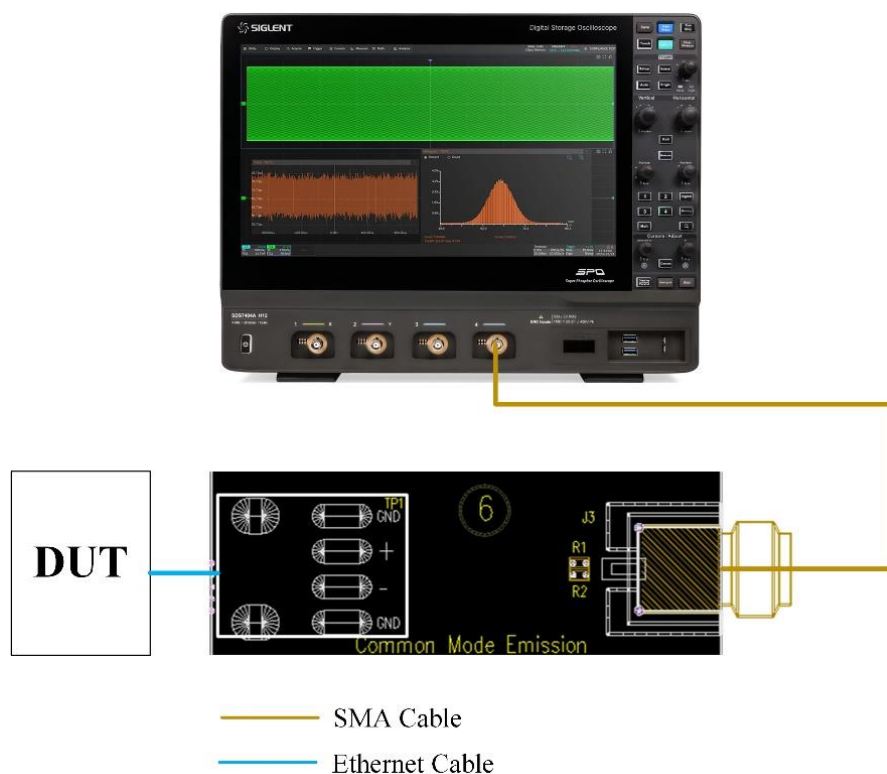


图 6-44 使用示波器测量 MDI 共模辐射连接示意图

(2) 频谱分析仪测试 MDI 共模辐射，如图 6-45 所示。

在此项测试中，由于示波器底噪的影响，采用频谱仪测试得到的结果更加准确。频谱仪的测试步骤如下：

- 1) 区域⑥上的 TP1 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆，确保 DUT 和测试夹具的 GND 有良好的接触。
- 2) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和频谱仪的 USB Device 接口。
- 3) 使用 SMA 线缆将频谱仪的 RF input 和测试夹具上区域⑥中的 J3 相连。
- 4) **测试项选择** 中点击 **MDI 共模辐射**，点击 **配置** -> **MDI 共模辐射** -> **频谱分析仪** -> **测试连接**，示波器自动检测频谱仪连接状态，频谱仪连接成功后，会提示连接成功并且返回频谱仪的型号，并且示波器会自动配置频谱仪的一些测试参数（自动配置仅支持鼎阳的频谱仪），如下所示：
 - 测量类型：频谱分析；
 - 测量单位：dBuV；
 - 检波器：Positive Peak；
 - 测试起始频率为 1MHz，终止频率为 200MHz；
 - 设置 RBW 为 10kHz；
 - 设置 VBW 为大于 3*RBW；
 - 频率扫描时间大于 20s；
 - 预放：打开。

【注】：该测试项受到导线影响较大，要保证 DUT 到 TP1 的线缆尽可能短，以减小测量误差。

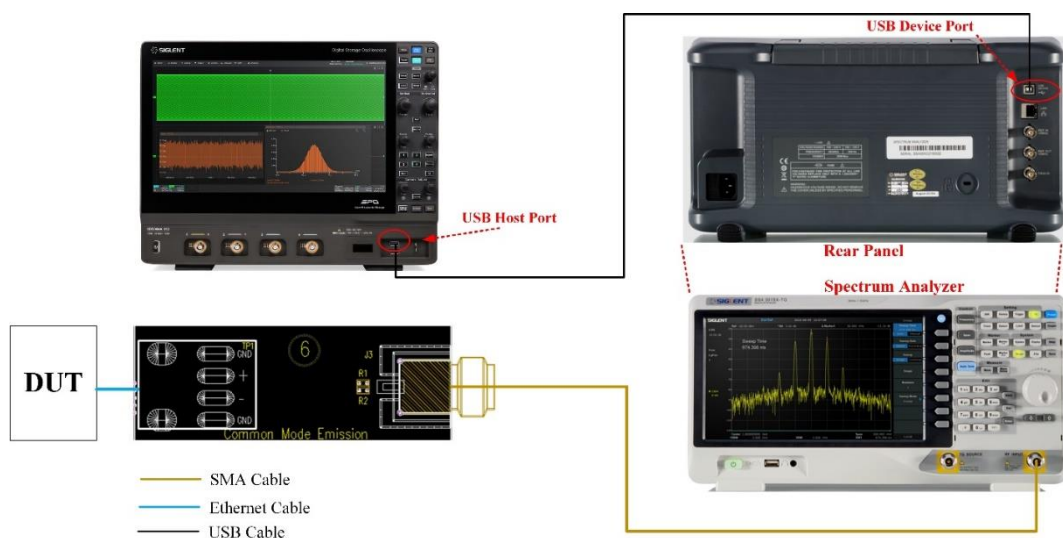


图 6-45 使用频谱仪测量 MDI 共模辐射连接示意图

6.8.2 测试步骤

使用示波器进行 MDI 共模辐射的测试流程如下：

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 5 的信号。
- 2) 在 **设置** 中选择 **Open Alliance** 标准。
- 3) 在 **测试项选择** 中选择 **MDI 共模辐射**。
- 4) 在 **配置** 中选择 **示波器** 或者 **频谱分析仪**，门限值（默认是 24dBuV）等。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中，如果使用示波器，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

在测试过程中，如果使用频谱分析仪，示波器将自动获取频谱仪上的测试结果，绘制曲线，判断测试是否通过。

6.8.3 计算方法

根据《OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification》规范中的《OABR_PMA_TX07》小节，在 1MHz~200MHz 的频率范围内，共模发射的门限是 24dBuV，当 DUT 的共模辐射电压小于 24dBuV 时，则测试通过。

示波器或者频谱仪通过对采集到的信号进行 FFT 计算，得到共模辐射频谱，测量频率在 1MHz~200MHz 之间，并与定义的 limit value 进行比较，当测试结果低于定义的极限值时，则 MDI 共模辐射通过了测试。

6.8.4 测试结果参考

MDI 共模辐射的测试结果如图 6-46 所示，波形细节如图 6-47 所示。

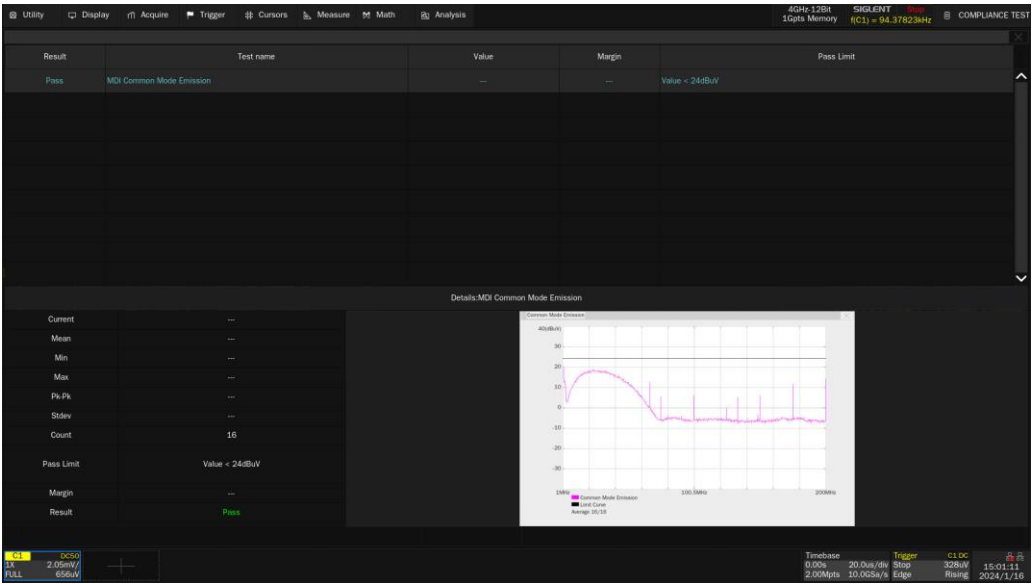


图 6-46 MDI 共模辐射参考结果

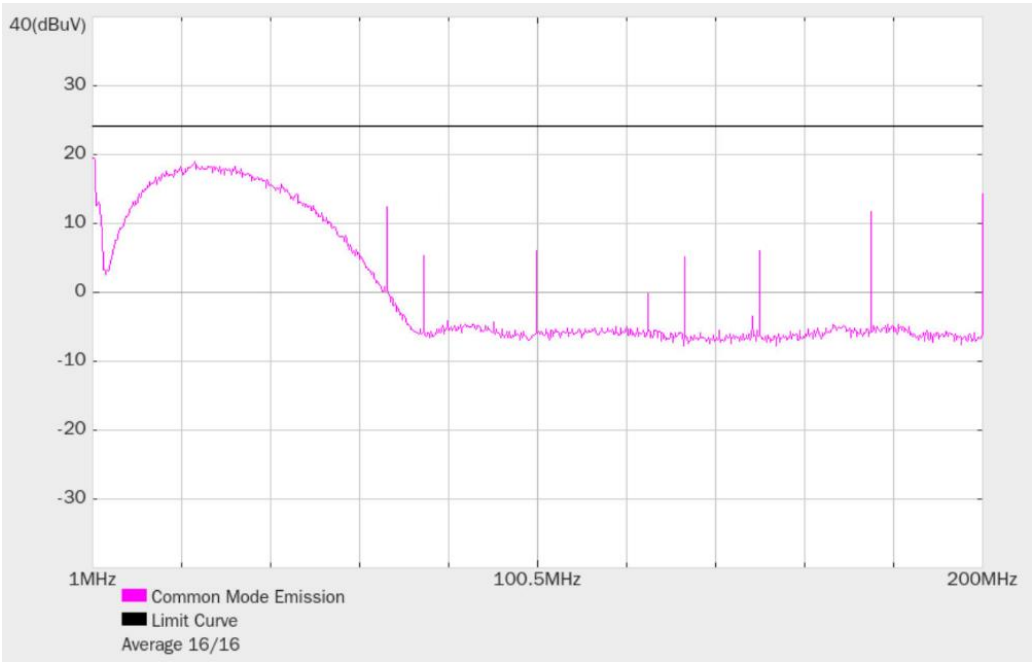


图 6-47 MDI 共模辐射波形细节图

7 1000BASE-T1 测试步骤及结果参考

7.1 发射时钟 TX_TCLK125 频率和时序抖动

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.2 规定了 DUT 在测试模式 1 下，需要提供与发射符号时钟的 $1/6$ 频率或者 TX_TCLK125 时钟信号来进行一致性测试。由于 DUT 在 1000BASE-T1 工作模式下，符号传输速率为 $750\text{ MHz}\pm 100\text{ppm}$ ，因此要求测量的 $1/6$ 的符号传输时钟频率，要在 $125\text{MHz}\pm 100\text{ppm}$ 的范围内。

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.3.6 规定了符合物理层一致性测试的符号传输速率。主机 (Master) PHY 的符号传输频率应在 $750\text{ MHz}\pm 100\text{ppm}$ 的范围内。

虽然说 IEEE Std 802.3bp 标准没有规定当 DUT 处于从模式 (Slave) 下符号传输频率，但是从模式 (Slave) 下符号传输频率也应和主模式的一样，均为 750 MHz 。

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.3.3 规定了 DUT 的 TX_TCLK125 的抖动。DUT 为 Master 下，TX_TCLK125 的相对于无抖动参考的 RMS (Root Mean Square) 抖动应该低于 5ps ，Master 的 TX_TCLK125 相对于无抖动参考的峰峰值抖动应该低于 50ps 。DUT 处于 Slave 模式下 TX_TCLK125 相对于无抖动参考的 RMS 抖动应该低于 10ps ，TX_TCLK125 相对于无抖动参考的峰峰值抖动应该低于 100ps 。

7.1.1 测试环境搭建

依据 IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.2.1 上的 Figure 97-31，如图 7-1 所示，将 DUT 和 Link Partner 连接且两者处于正常的工作模式 (Link-Normal Operation)，将 DUT 的 TX_TCLK125 时钟信号与示波器直接相连，测试 DUT 处于主或从模式下 TX_TCLK125 的频率和抖动。

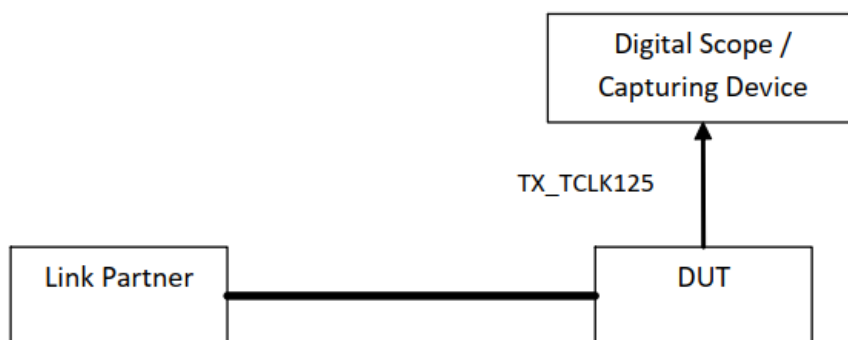


Figure 97-31—Transmitter test fixture 3 for MASTER and SLAVE clock jitter measurement

图 7-1 DUT 处在主模式或者从模式下测试 TX_TCLK125 的环境

SDS7000A 上，测试 DUT 的 TX_TCLK125 连接方式如图 7-2 所示。

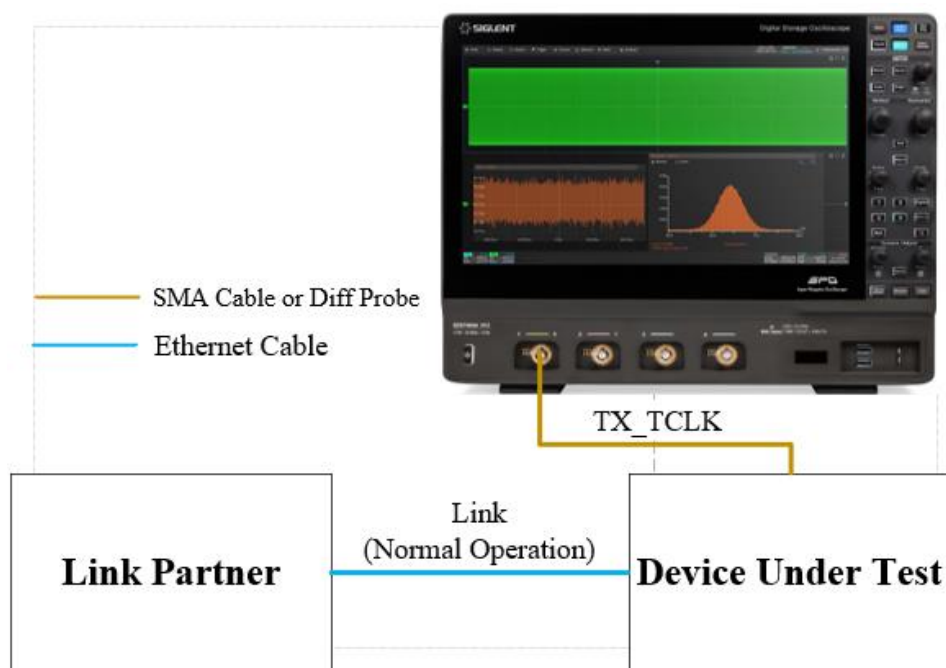


图 7-2 测试 DUT 的 TX_TCLK125 连接示意图

7.1.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 进入测试模式 1 状态，且和 Link Partner 之间的通信正常。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射时钟 TX_TCLK125 频率和时序抖动**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的信源，平均次数，测量抖动使用的边沿，带通滤波器的带宽。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 在测试过程中，根据测试项目的需要，配置 DUT 进入 Master 或 Slave 模式。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

7.1.3 计算方法

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.3.6 规定了符合一致性要求的 PHY 的符号传输速率要满足 $750\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$ 的要求。

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.2 规定了测试模式 1 需要提供与符号传输时钟的 1/6 信号或者 TX_TCLK125 的信号来进行一致性测试，即要满足 $125\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$ 的要求。

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.3.3, 指定符合一致性要求的 PHY, 当 DUT 处于主模式下, 相对于无抖动参考的抖动, TX_TCLK125 抖动的 RMS 值应小于 5ps, 抖动的峰峰值应小于 50ps; DUT 处于从模式下, TX_TCLK125 抖动的 RMS 值应小于 10ps, 峰峰值抖动应小于 100ps。

7.1.4 测试结果参考

测试结果如图 7-3 所示, 波形细节如图 7-4 所示。

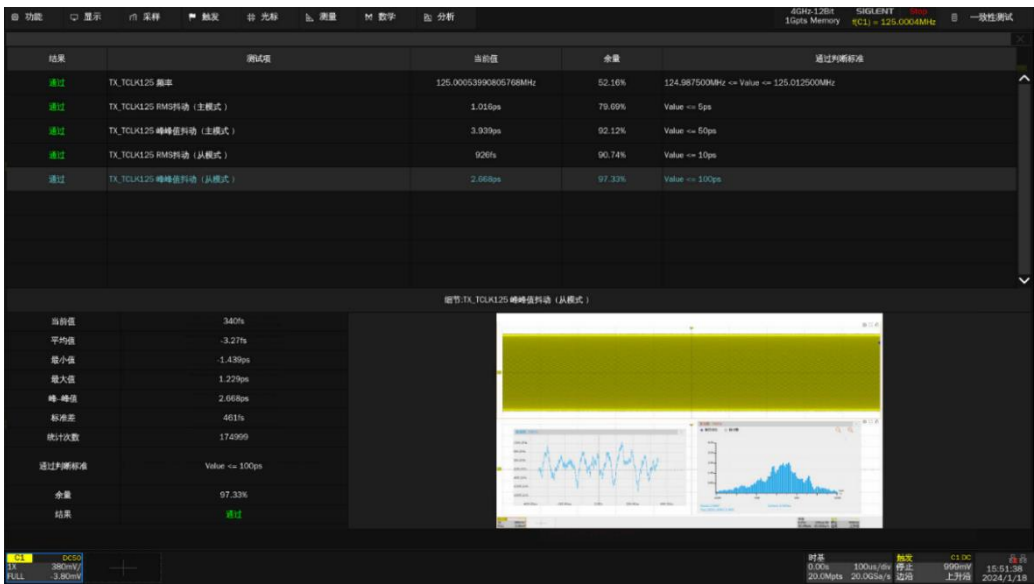


图 7-3 TX_TCLK125 测试结果



图 7-4 TX_TCLK125 波形细节

7.2 发射时钟频率和 MDI 时序抖动

该测试测量符合 1000BASE-T1 的 DUT 的物理层在主模式下发射时钟频率和 MDI 时序抖动。

DUT 发出测试模式 2 的测试波形, IEEE802.3bp 规范中, 发射机在主模式下使用 $750\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$ (即 $749.925\text{MHz} \sim 750.075\text{MHz}$) 的时钟周期性发出 3 个“+1”和 3 个“-1”符号。因此在 MDI 接口测试到的信号频率为 $125\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$, 并且要求相对于无抖动参考, 信号的 RMS 抖动小于 5ps, 峰峰值抖动要小于 50ps。

7.2.1 测试环境搭建

发射时钟频率和 MDI 时序抖动, 使用 SMA 线缆的连接方式如图 7-5 所示。

- 1) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器, 另一端分别连接到示波器上的两个输入通道。
- 2) TP2 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆。
- 3) 支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

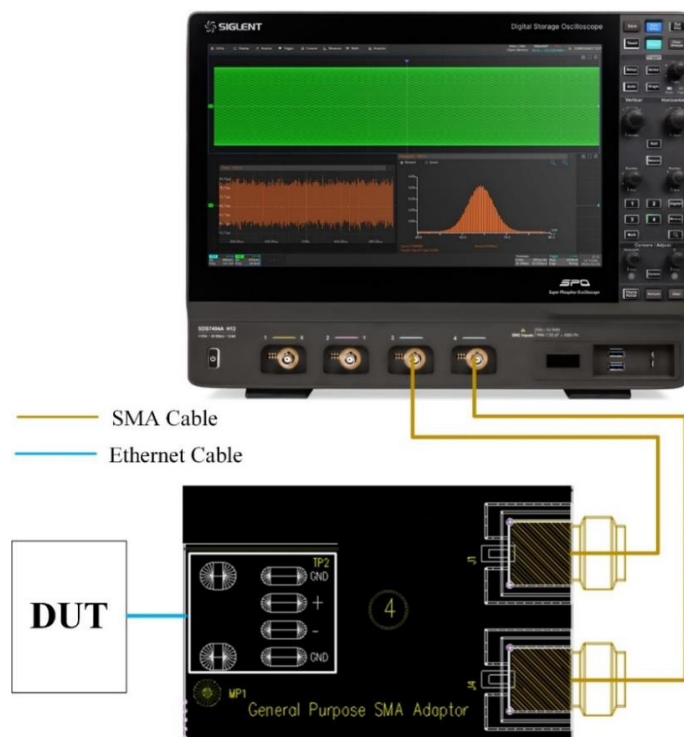


图 7-5 发射时钟频率和 MDI 时序抖动的使用 SMA 线缆连接示意图

发射时钟频率和 MDI 时序抖动, 使用有源差分探头的连接方式如图 7-6 所示。

- 1) 一根差分探头的一端连接到测试夹具区域①上的测试点 J17, 另一端连接到示波器上的任意一个输入通道。
- 2) TP4 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆。

- 3) 确保差分探头探测信号极性的准确性。
- 4) 支持使用绑带将测试线缆绑扎固定到通孔上。

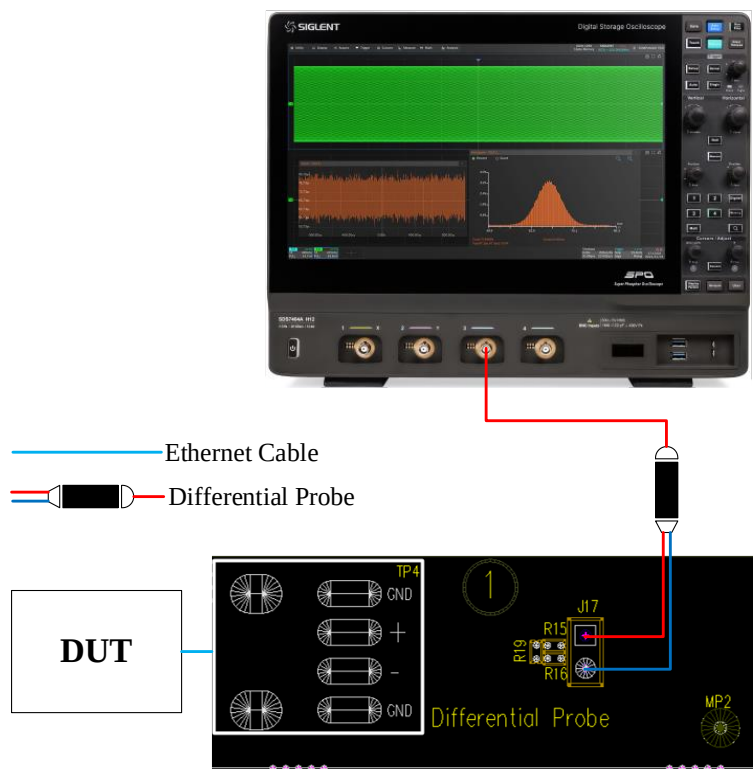


图 7-6 发射时钟频率和 MDI 时序抖动的使用有源差分探头连接示意图

7.2.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 2 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射时钟频率和 MDI 时序抖动**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数，测量抖动使用边沿类型，带通滤波器的带宽。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

7.2.3 计算方法

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.3.6 规定了符合物理层一致性测试 PHY 的符号传输速率。主机（Master）PHY 的符号传输频率应在 $750\text{ MHz} \pm 100\text{ ppm}$ 的范围内。

IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.5.2 规定了测试模式 2 下，DUT 的物理层应根据本地的 750MHz 时钟，周期性发出 3 个“+1”和 3 个“-1”符号。因此在 MDI 接口测试到的信号频率为 $125\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$ 。

IEEE Std 802.3bp 标准的 Section 97.5.3.3 规定了 DUT 在测试模式 2 下，相对于无抖动参考，发射机 MDI 接口抖动的 RMS 值应小于 5ps，抖动的峰峰值应小于 50ps。该测量能反应 MDI 上数据的时间间隔误差（TIE），示波器根据所测数据计算理想的参考并与原始信号进行比较以确定数据时间间隔误差。

7.2.4 测试结果参考

发射时钟频率和 MDI 抖动测试结果如图 7-7 所示，波形细节如图 7-8 所示。

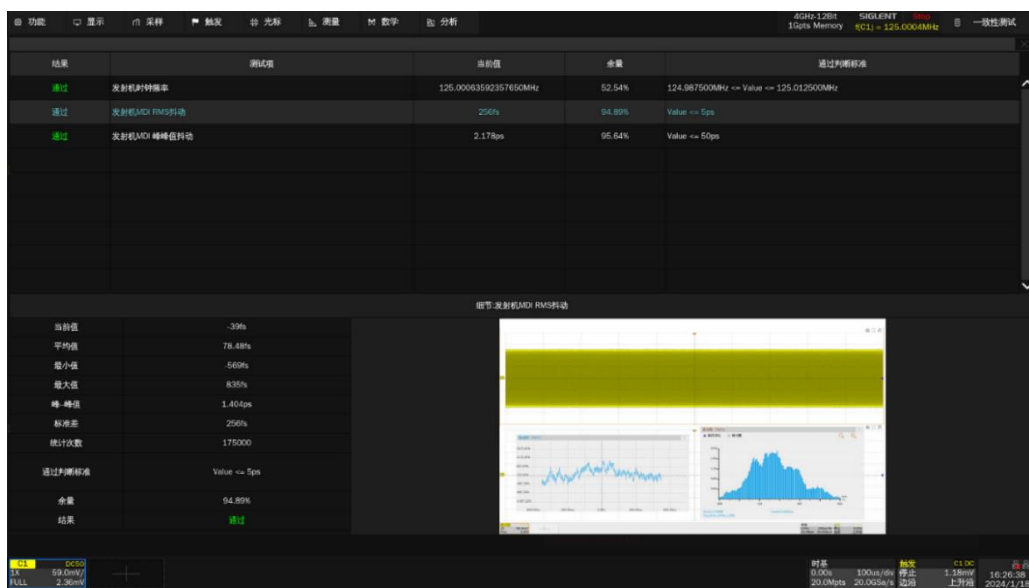


图 7-7 发射时钟频率和 MDI 抖动测试参考结果

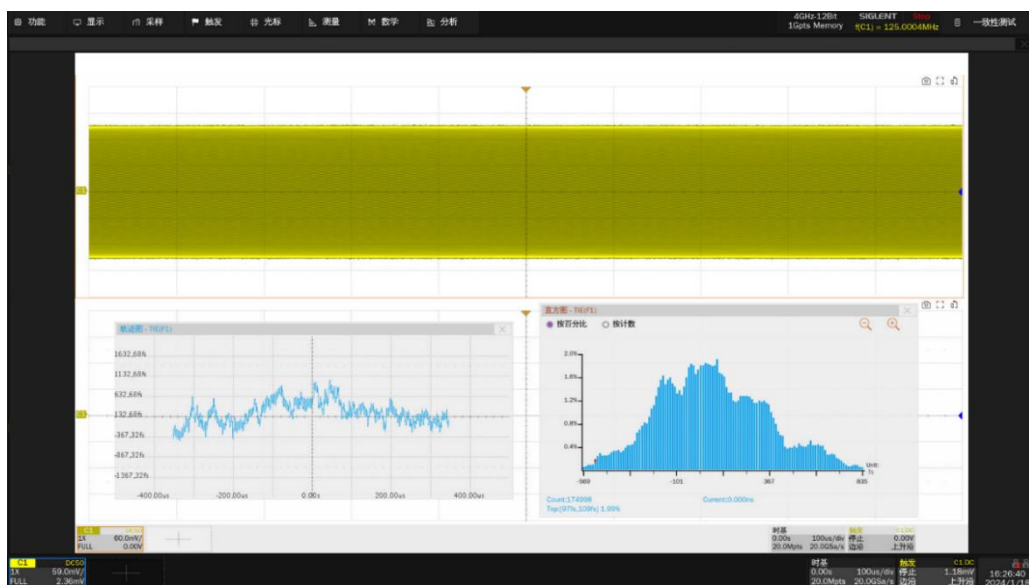


图 7-8 发射时钟频率和 MDI 抖动测试波形细节

7.3 发射机失真

依据 IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.5.3.2, DUT 进入测试模式 4 后, 发出数个周期的 2047 个已定义符号。Section 97.5.3.2 提供了 MATLAB 代码来对发射机失真进行分析, 要求测量的结果小于 15mV。

7.3.1 测试环境搭建

发射机失真, 在 SDS7000A 示波器上的用户界面的配置如图 7-9 所示。

鼎阳科技推出的发射机失真测试项目, 支持使用任意波形发生器输出干扰信号给 DUT 进行失真测试。此外, 为了简化测试环境, 也可以不勾选 **干扰信号**, 在不添加干扰信号下进行发射机失真测试, 该项测试由于不满足 IEEE Std 802.3bp 标准推荐的测试环境, 因此测试结果仅供参考。

在发射机失真测试项目中, 为了提高测试的准确度, 需要在一致性测试的用户界面, 勾选 **TX_TCLK125**, DUT 的 TX_TCLK125 连接到时钟同步夹具的输入端, 时钟同步夹具的输出端输出两路 10MHz 信号, 分别输给示波器和任意波形发生器的 10MHz In 输入端上, 实现 DUT 和示波器、任意波形发生器的时钟域同步。



图 7-9 发射机失真的配置界面

7.3.1.1 干扰信号校准

A. 有 TX_TCLK125 时钟

在勾选 **TX_TCLK125** 和 **干扰信号** 后, 在进行发射机失真测试前, 需要对干扰信号进行校准, 校准环境如图 7-10 所示。对干扰信号校准步骤如下:

(1) 时钟同步夹具的连接步骤如下:

- a) 通过 J6 或 J9 给时钟同步夹具输入一个 5V 的供电电源，HL3 和 HL5 指示灯点亮代表电源正常。
 - b) 将 DUT 上的 TX_TCLK125 和时钟同步夹具上的 J1 (CH1) 或者 J2 (CH2) 输入通道相连。当短路帽安装在 J5 (pin1,2) 时选通 CH2 为输入通道 (CH2 输入阻抗为 50Ω)；当短路帽安装在 J5 (pin2,3) 时选通 CH1 为输入通道 (CH1 输入阻抗为 $10k\Omega$)。
 - c) 输入时钟频率选择: 短路帽安装在 J7 (pin2,3) 表示 TX_TCLK125 的时钟频率为 125MHz。
 - d) 检查频率锁定指示灯: HL2 点亮，表示将 125MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟正常。
 - e) 当 HL2 熄灭，表示输入时钟没有被锁定，需要检查输入时钟频率、J5、J7 的配置是否正确，当配置正确后点击复位开关 S1 或者重新上电即可。
 - f) 将 J3 (Clock Output: CH1) 和 J12 (Clock Output: CH2) 分别连接到示波器和任意波形发生器的外部时钟源输入端口。
 - g) 将示波器、任意波形发生器的时钟源设置为外部输入。
- (2) 在测试夹具上，校准干扰源使用到区域②，连接如下：
- a) J5, J14 连接器分别安装 50Ω 端接器。
 - b) 示波器的任意两路输入通道连接到测试夹具上的 J2, J8 连接器。
 - c) 信号源的两路输出通道分别连接到测试夹具上的 J15, J16 连接器。
 - d) 设置任意波形发生器输出两路 125MHz (1/6 的符号传输频率)、相位差为 180° 的正弦波信号。
 - e) 示波器的输入阻抗为 50Ω ，示波器测量两路输入信号并相减；不断调整任意波形发生器的输出信号幅度直到示波器测量到的信号峰峰值为 1.8Vp-p。该信号作为后续发射机失真测试的干扰信号。记录和保存任意波形发生器的配置。

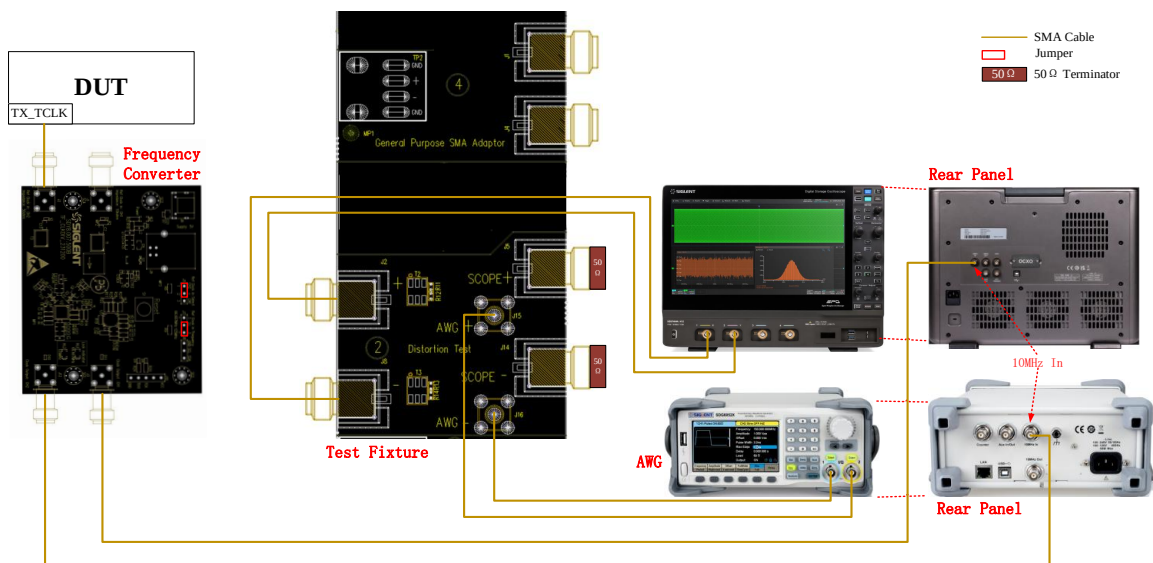


图 7-10 发射机失真的干扰源校准环境（有时钟）

B. 无 TX_TCLK125 时钟

在无时钟信号可引出的条件下，进行发射机失真测试前也需要对干扰信号进行校准，校准环境如图 6-14 发射机失真的干扰源校准环境所示。对干扰信号校准步骤如下：

- (1) 在测试夹具上，校准干扰源使用到区域②，连接如下：
 - a) J5, J14 连接器分别安装 50Ω 端接器。
 - b) 示波器的任意两路输入通道连接到测试夹具上的 J2, J8 连接器。
 - c) 信号源的两路输出通道分别连接到测试夹具上的 J15, J16 连接器。
 - d) 设置任意波形发生器输出两路 125MHz (1/6 的符号传输频率)、相位差为 180° 的正弦波信号。
 - e) 示波器的输入阻抗为 50Ω，示波器测量两路输入信号并相减；不断调整任意波形发生器的输出信号幅度直到示波器测量到的信号峰峰值为 1.8Vp-p。该信号作为后续发射机失真测试的干扰信号。记录和保存任意波形发生器的配置。

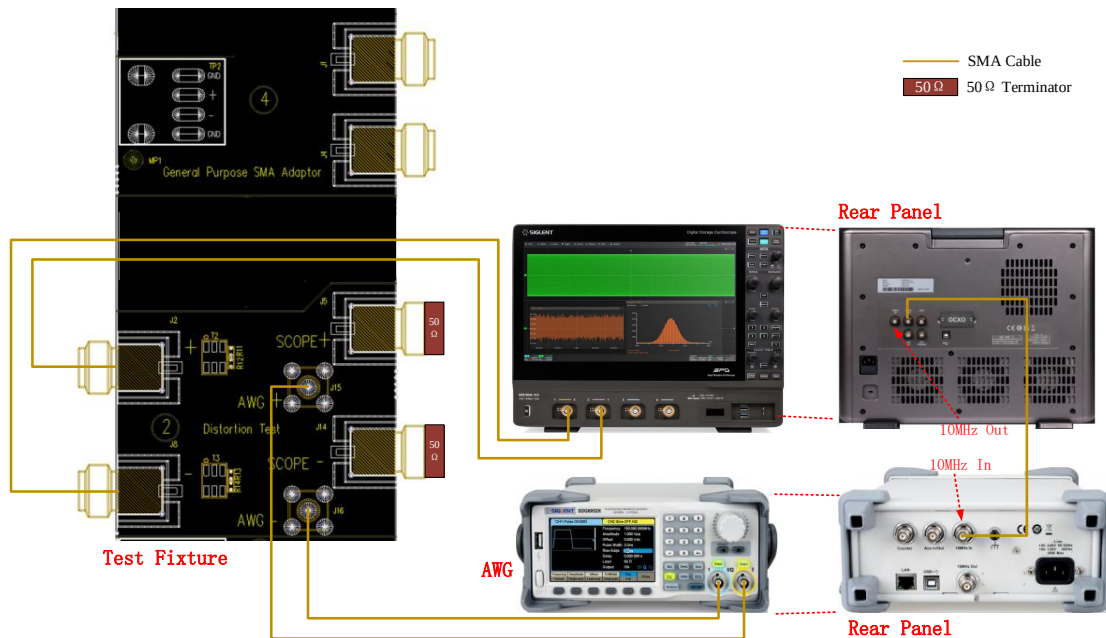


图 7-11 发射机失真的干扰源校准环境（无时钟）

7.3.1.2 测试环境

在发射机失真测试项目中，可以在有时钟信号引出和无时钟信号引出的条件下进行测试，有时钟信号引出时需要使用到时钟同步夹具；同时也可以选择是否添加干扰信号来进行测试。用户可以根据测试需求搭建相应的测试环境。但是无干扰信号下进行的发射机失真测试，由于不满足协议规范上要求的测试环境，因此测试结果仅供参考。

A. 使用 TX_TCLK125 时钟和有干扰信号

在发射机失真测试项目中，当时钟信号可引出时，使用加扰信号的应用环境如错误!未找到引用源。所示。测试步骤如下所示：

- (1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 4。
- (2) 时钟同步夹具的连接步骤如下：
 - a) 通过 J6 或 J9 给时钟同步夹具输入一个 5V 的供电电源，HL3 和 HL5 指示灯点亮代表电源正常。
 - b) 将 DUT 上的 TX_TCLK125 和时钟同步夹具上的 J1 (CH1) 或者 J2 (CH2) 输入通道相连。当短路帽安装在 J5 (pin1,2) 时选通 CH2 为输入通道 (CH2 输入阻抗为 50Ω)；当短路帽安装在 J5 (pin2,3) 时选通 CH1 为输入通道 (CH1 输入阻抗为 10kΩ)。
 - c) 输入时钟频率选择:短路帽安装在 J7 (pin2,3) 表示 TX_TCLK125 的时钟频率为 125MHz。
 - d) 检查频率锁定指示灯：HL2 点亮，表示将 125MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟正常。
 - e) 当 HL2 熄灭，表示输入时钟没有被锁定，需要检查输入时钟频率、J5、J7 的配置是否正确，当配置正确后点击复位开关 S1 或者重新上电即可。
 - f) 将 J3 (Clock Output: CH1) 和 J12 (Clock Output: CH2) 分别连接到示波器和任意波形发生器的外部时钟源输入端口。
 - g) 将示波器、任意波形发生器的时钟源设置为外部输入。
- (3) 在测试夹具上，使用到区域②和区域④，连接如下：
 - a) 区域④上的 TP2 焊接被测设备 (DUT) 的测试线缆
 - b) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器，另一端分别连接到测试夹具区域②上的 J2 (+)、J8 (-) 连接器。
 - c) 将已经完成校准的干扰源的两路输出通道分别连接到测试夹具区域②上的 J15, J16 连接器。
 - d) 示波器的两路输入通道分别连接到测试夹具区域②上的 J5, J14 连接器。

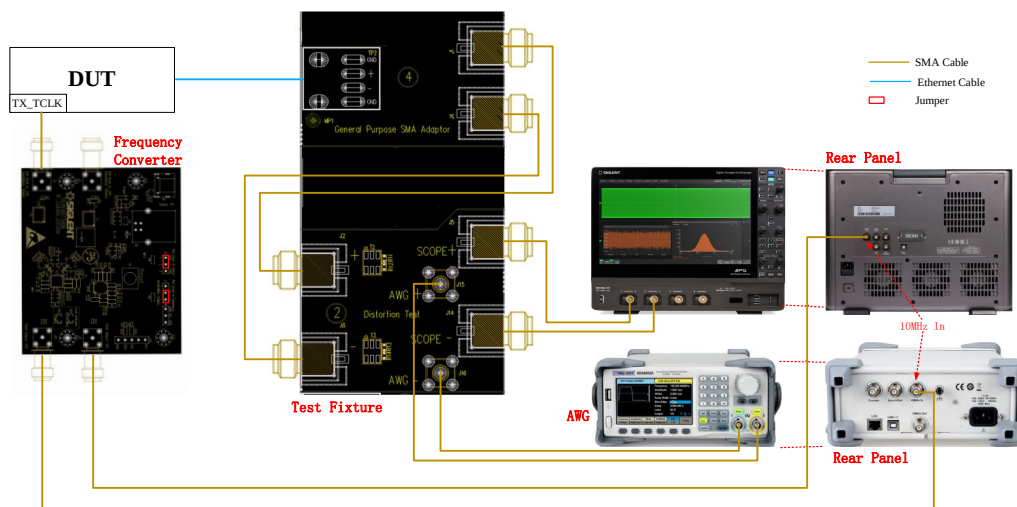


图 7-12 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（有时钟有干扰信号）

B. 使用 TX_TCLK125 时钟和无干扰信号

在发射机失真测试项目中，使用到时钟同步夹具和 SMA 线缆，并且没有干扰源的应用环境如**错误!未找到引用源。**所图 7-13 示。测试步骤如下所示：

- (1) 配置被测设备（DUT）进入测试模式 4。
- (2) 时钟同步夹具的连接步骤如下：
 - a) 通过 J6 或 J9 给时钟同步夹具输入一个 5V 的供电电源，HL3 和 HL5 指示灯点亮代表电源正常。
 - b) 将 DUT 上的 TX_TCLK125 和时钟同步夹具上的 J1（CH1）或者 J2（CH2）输入通道相连。当短路帽安装在 J5（pin1,2）时选通 CH2 为输入通道（CH2 输入阻抗为 50Ω）；当短路帽安装在 J5（pin2,3）时选通 CH1 为输入通道（CH1 输入阻抗为 10kΩ）。
 - c) 输入时钟频率选择：短路帽安装在 J7（pin2,3）表示 TX_TCLK125 的时钟频率为 125MHz。
 - d) 检查频率锁定指示灯：HL2 点亮，表示将 125MHz 输入时钟转换为 10MHz 输出时钟正常。
 - e) 当 HL2 熄灭，表示输入时钟没有被锁定，需要检查输入时钟频率、J5、J7 的配置是否正确，当配置正确后点击复位开关 S1 或者重新上电即可。
 - f) 将 J3（Clock Output: CH1）或 J12（Clock Output: CH2）连接到示波器的外部时钟源输入端口。
 - g) 将示波器的时钟源设置为外部输入。
- (3) 在测试夹具上，使用到区域④，连接如下：
 - a) 区域④上的 TP2 焊接被测设备（DUT）的测试线缆。
 - b) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1（+）、J4（-）连接器，另一端分别连接到示波器的任意两个输入通道。

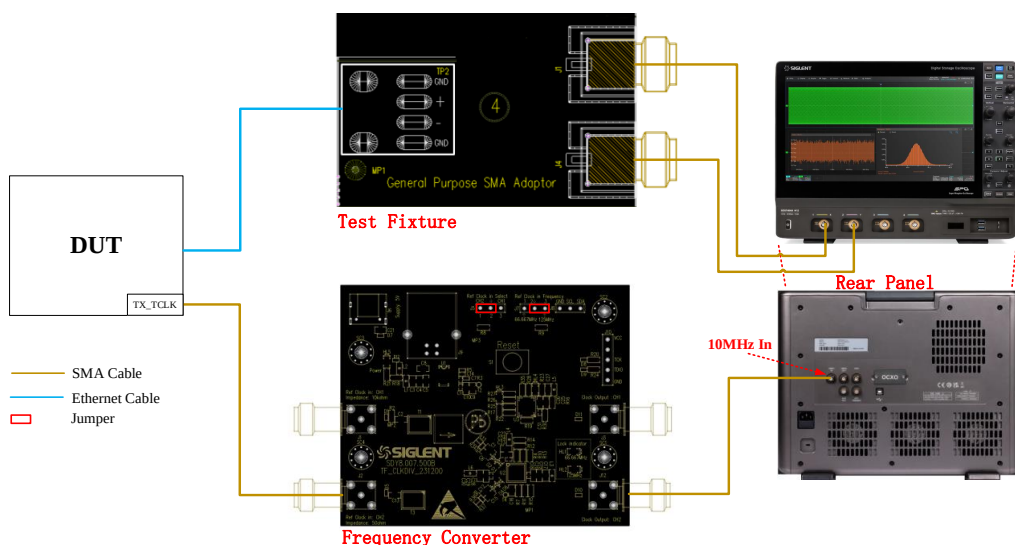


图 7-13 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（有时钟无干扰信号源）

C. 无 TX_TCLK125 时钟和有干扰信号

在发射机失真测试项目中, 当无时钟信号可引出时, 并且使用加扰信号的应用环境如图 7-14 错误!未找到引用源。所示。测试步骤如下所示:

- (1) 配置被测设备(DUT)进入测试模式 4。
- (2) 连接示波器的外部时钟源输出端口至任意波形发生器外部时钟源输入端口, 任意波形发生器的时钟源设置为外部输入。
- (3) 在测试夹具上, 使用到区域②和区域④, 连接如下:
 - a) 区域④上的 TP2 焊接被测设备(DUT)的测试线缆。
 - b) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器, 另一端分别连接到测试夹具区域②上的 J2 (+)、J8 (-) 连接器。
 - c) 将已经完成校准的干扰源的两路输出通道分别连接到测试夹具区域②上的 J15, J16 连接器。
 - d) 示波器的两路输入通道分别连接到测试夹具区域②上的 J5, J14 连接器。

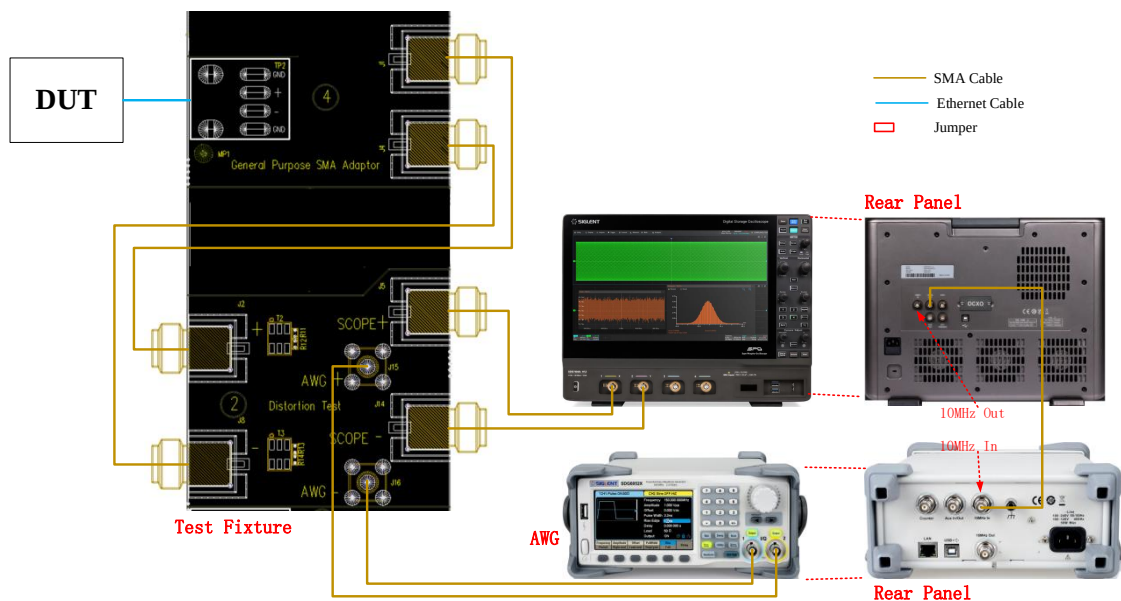


图 7-14 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（无时钟有干扰信号源）

D. 无 TX_TCLK125 时钟和无干扰信号

在发射机失真测试项目中, 当无时钟信号可引出时, 并且没有干扰源的应用环境如图 7-15 所示。测试步骤如下所示:

- (1) 配置被测设备 (DUT) 进入测试模式 4。
- (2) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的 J1 (+)、J4 (-) 连接器, 另一端分别连接到示波器上的两个输入通道。
- (3) TP2 上焊接被测设备(DUT)的测试线缆。

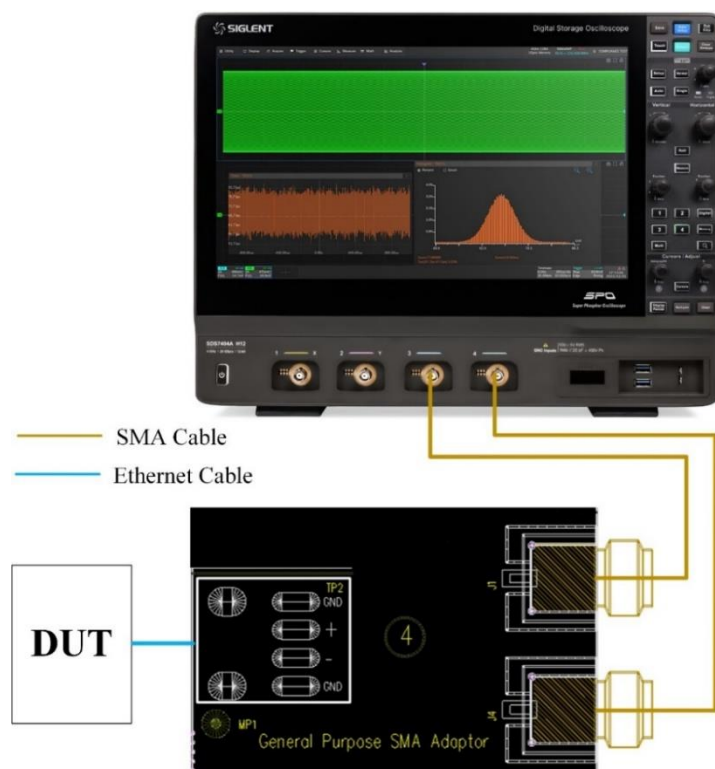


图 7-15 发射机失真使用 SMA 线缆的测试环境（无时钟无干扰信号源）

在发射机失真测试项目中，使用有源差分探头的测试步骤和使用 SMA 线缆进行发射机失真测试的方法类似，测试连接参考下图。

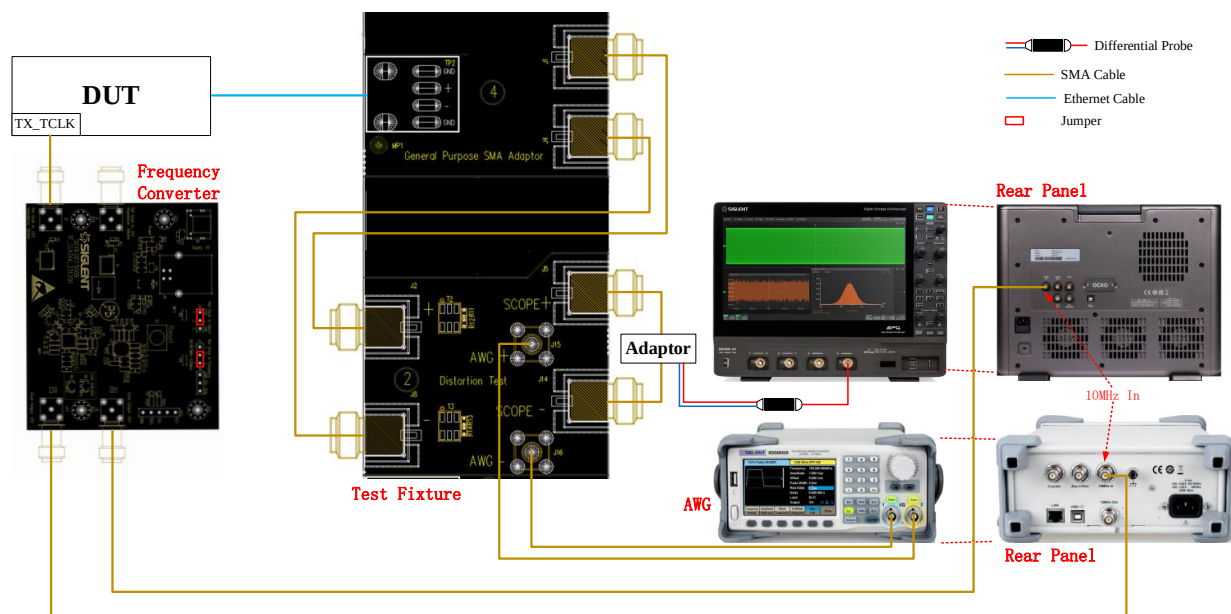


图 7-16 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（有时钟有干扰信号源）

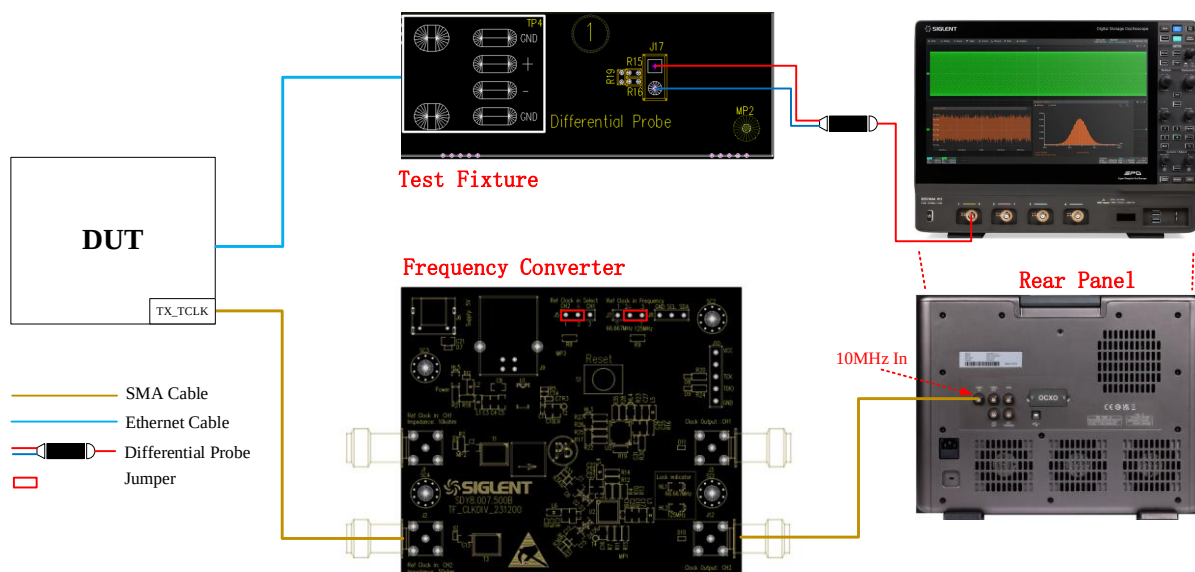


图 7-17 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（有时钟无干扰信号源）

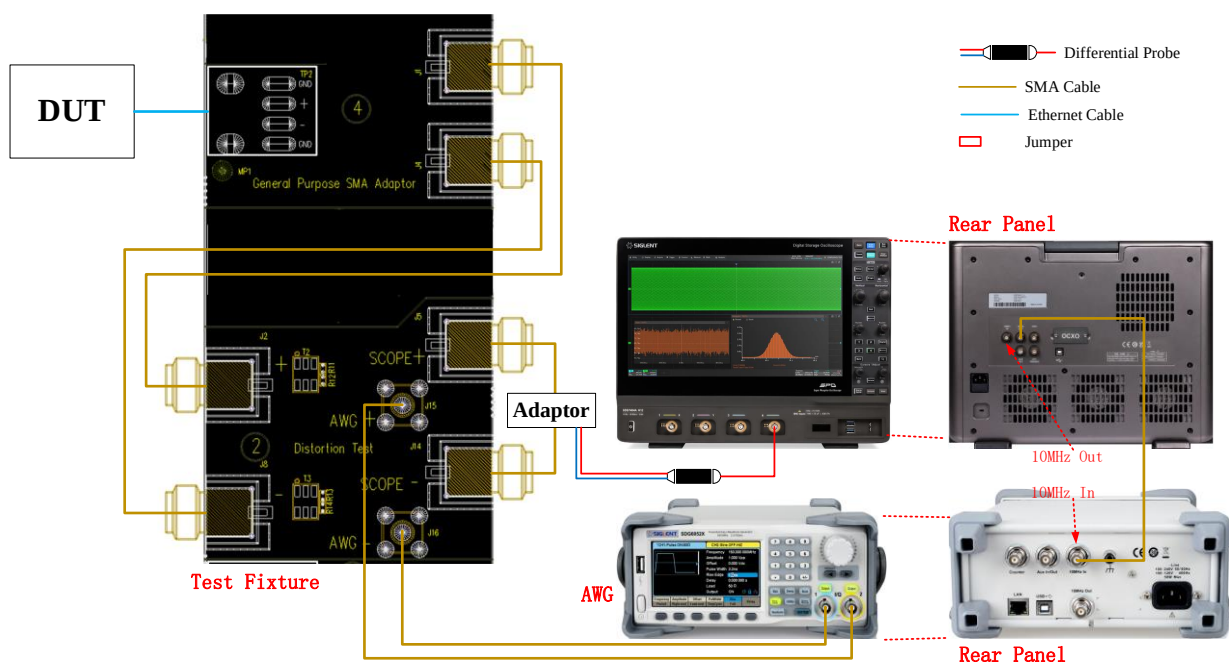


图 7-18 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（无时钟有干扰信号源）

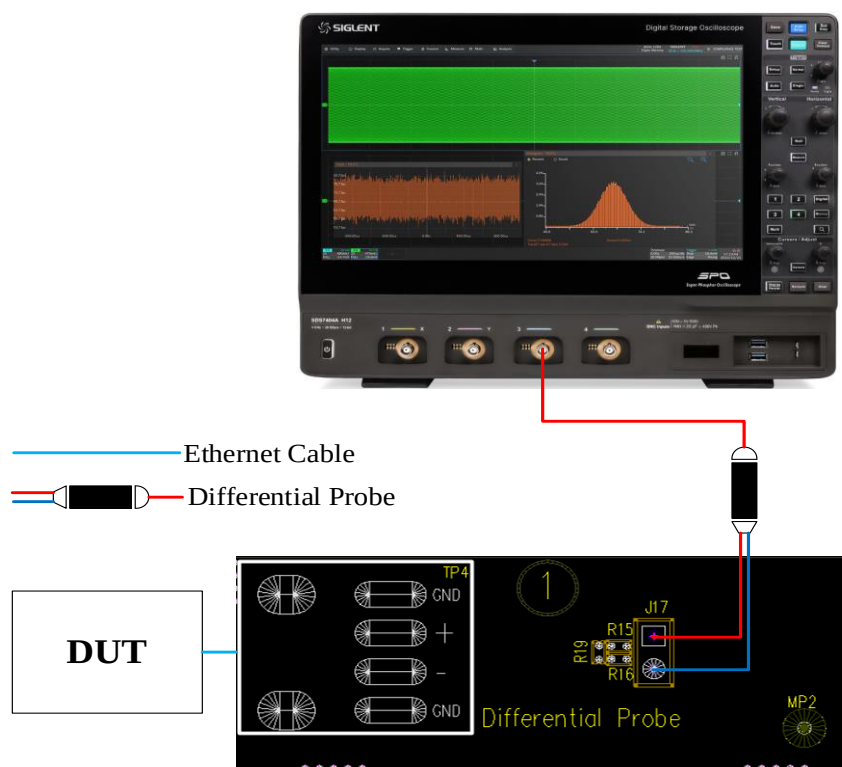


图 7-19 发射机失真使用有源差分探头的测试环境（无时钟无干扰信号源）

7.3.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 4 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机失真**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，勾选 TX_TCLK125（默认），是否加干扰信号。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

7.3.3 计算方法

IEEE Std 802.3bp-2016, Section 97.5.3.2 中指出，示波器和任意波形发生器在 DUT 的 TX_TCLK125 时钟的同步下，通过用 DUT 的符号速率时钟，示波器对 DUT 差分输出信号用任意相位进行采样，并使用标准参考中提供的 MATLAB 代码处理任意连续 6 个周期，每个周期 2047 个符号，将一个传输符号划分为至少 10 个相等时间间隔进行采样，以计算发射机失真。发射机失真的峰值，需

要小于 15mV。

此外，也可以在没有干扰信号下来执行发射机失真测试，但是该项测试结果仅供参考，不能作为 DUT 是否通过发射机失真的依据。

7.3.4 测试结果参考

发射机失真测试结果如图 7-20 所示，波形细节如图 7-21 所示。

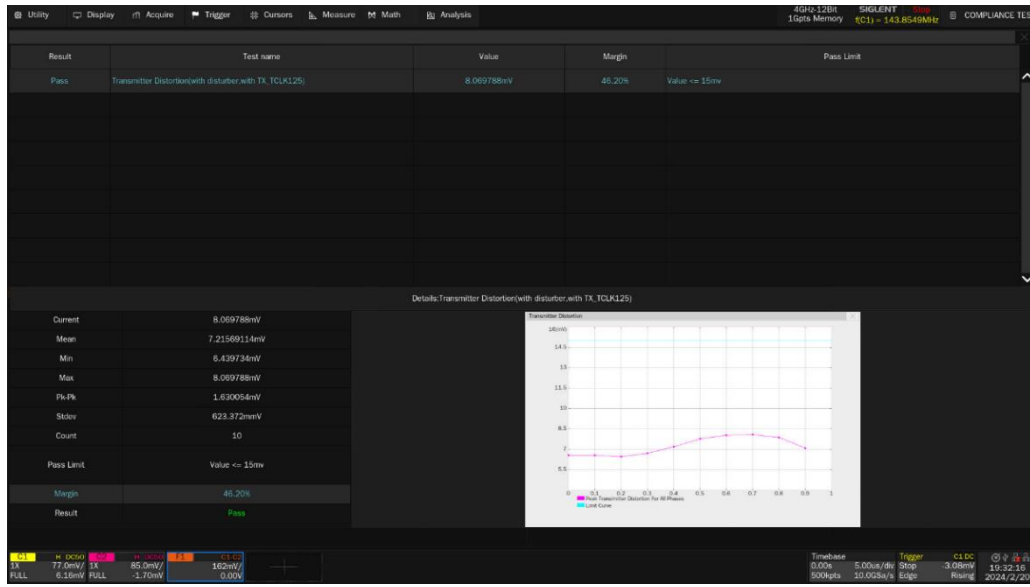


图 7-20 发射机失真测试结果

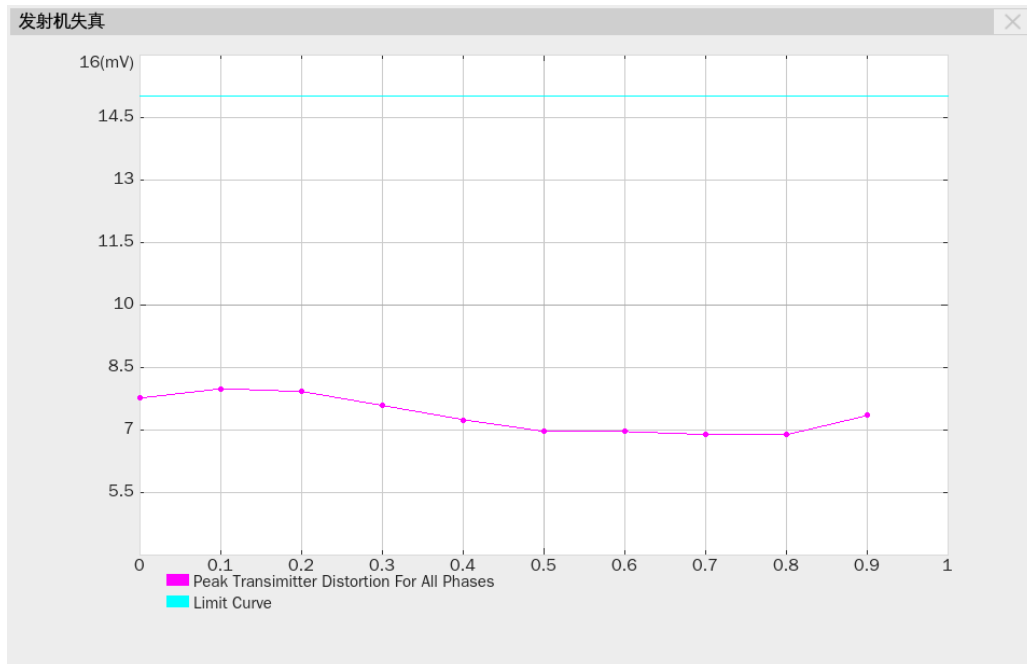


图 7-21 发射机失真的波形细节

7.4 MDI 回波损耗

IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.7.2.1 规定，DUT 配置为从模式，在 2MHz~600MHz 范围内，MDI 接口终端匹配为 100Ω 下，发射机的 MDI 回波损耗应在规定的范围中。

7.4.1 测试环境搭建

测试 MDI 回波损耗之前，需要对 VNA 进行校准，VNA 校准完毕后可以执行 MDI 回波损耗测试。

7.4.1.1 VNA 校准

开启 MDI 回波损耗测试之前，需要先进行 VNA 的校准，使用双端口校准环境如图 7-22 所示，VNA 的校准步骤如下：

- 1) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 2) 用两根等长的 SMA 线缆，一端分别连接 VNA 的两个 Port，另外一端连接到校准件。
- 3) 在示波器弹窗上，在 **测试项选择** 中点击 **MDI 回波损耗**。点击 **配置** -> **MDI 回波损耗**，点击 **测试连接**，示波器自动检测 VNA 连接状态，连接成功后，会提示连接成功信息并且返回 VNA 的型号，并对 VNA 做一些测量配置（自动配置仅支持鼎阳仪器），如下所示：
 - 测量项目：回波损耗（Sdd11）；
 - 起始频率：2MHz；
 - 终止频率：600MHz；
 - 扫描类型：对数幅度；
 - 扫描点数：1601；
 - 输出功率：-10dBm (min)，0dBm(推荐值)；
 - 中频带宽：100Hz；
 - 差分阻抗：100Ω；
 - 共模阻抗：25Ω；
 - 平滑：关闭。
- 4) 在 **配置** -> **MDI 回波损耗**，选择 MDI 回波损耗的测量类型为 **平衡测量**，VNA 使用双端口进行回波损耗测量。
- 5) 设置 VNA 的校准参数，对 VNA 的 Open，Load，Short，Through 进行校准。



图 7-22 双端口 VNA 校准环境

7.4.1.2 测试环境

MDI 的回波损耗使用平衡测量的测试环境如图 7-23 所示。

- 1) 配置被测设备 (DUT) 进入 Slave 模式且不能发送任何的信号。
- 2) 两根等长的 SMA 线缆的一端分别连接到测试夹具区域④上的测试点 J1 (+)、J4 (-)，另一端分别连接到 VNA 上的两个 Port。
- 3) TP2 上焊接被测设备 (DUT) 的测试短线缆。
- 4) 用一根 USB 线缆，分别连接到示波器的 USB Host 接口和 VNA 的 USB Device 接口。
- 5) 在 **配置** -> **MDI 回波损耗**，选择 MDI 回波损耗的测量类型为 **平衡测量**。
- 6) 点击示波器窗口上的 **启动测试**，在弹窗界面上检查连接的准确性后点击 **启动测试**，示波器将读取 VNA 测试到的 MDI 回波损耗数据，并且绘制测量曲线，输出测试结果。

【注】：该测试项目受到导线影响较大，要保证 DUT 到 TP2 的焊接线缆尽可能短，并且正、负端是对称的，以减小测量误差。

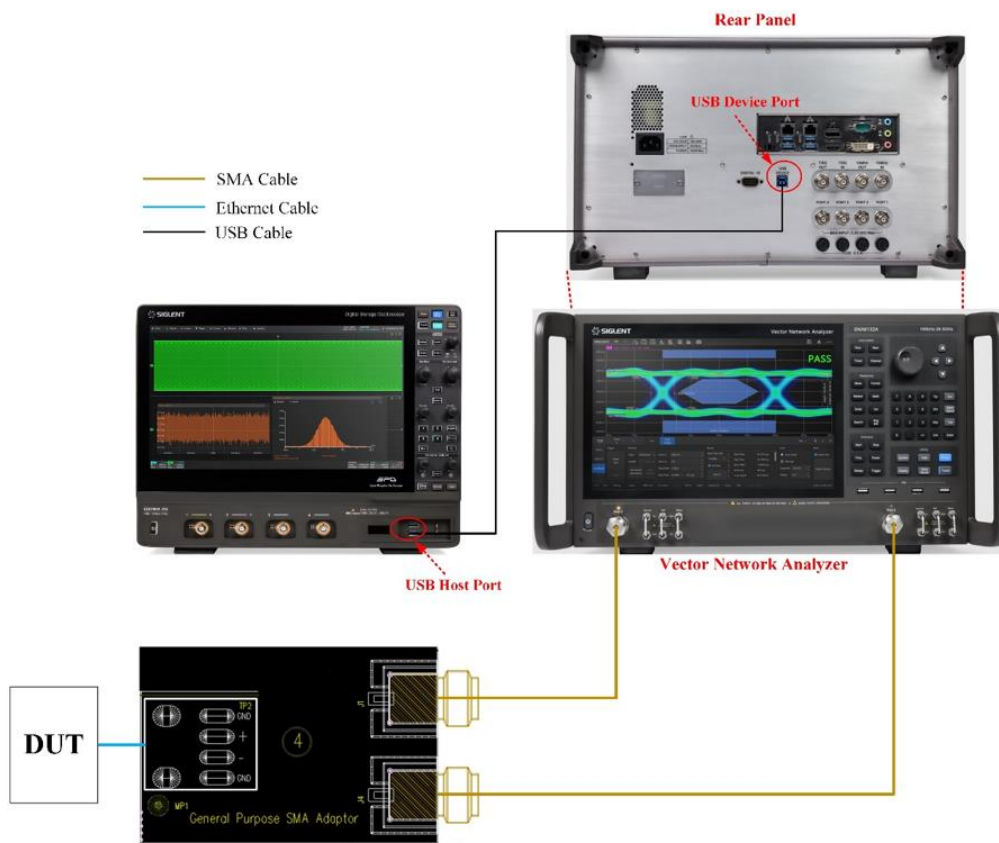


图 7-23 MDI 回波损耗使用平衡测量的连接示意图

7.4.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 处于 Slave 模式，且不能发出任何信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **MDI 回波损耗**。
- 3) 在 **配置** -> **MDI 模式转换损耗** -> **测试连接**，中点击 **测试连接**，示波器连接 VNA 成功后返回 VNA 的型号。
- 4) 在 **配置** 选择 **平衡测量**。
- 5) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 6) 点击 **启动测试**。
- 7) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 8) 示波器将自动获取 VNA 测试到的回波损耗数据，绘制曲线，判断测试是否通过。

7.4.3 计算方法

IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.7.2.1.规定，DUT 配置为从模式且端接电阻为 100Ω 下，DUT 不能发送任何的数据，发射机的 MDI 回波损耗应在下述规定的范围中。

- 频率为 2~20MHz 时，MDI 回波损耗优于 $-(18-18\times\log_{10}(20/f))\text{dB}$ 。
- 频率为 20~100MHz 时，MDI 回波损耗优于 -18dB 。
- 频率为 100~600MHz 时，MDI 回波损耗优于 $-(18-16.7\times\log_{10}(f/100))\text{dB}$ 。

7.4.4 测试结果参考

MDI 回波损耗测试结果如图 7-24 所示，波形细节图如图 7-25 所示。

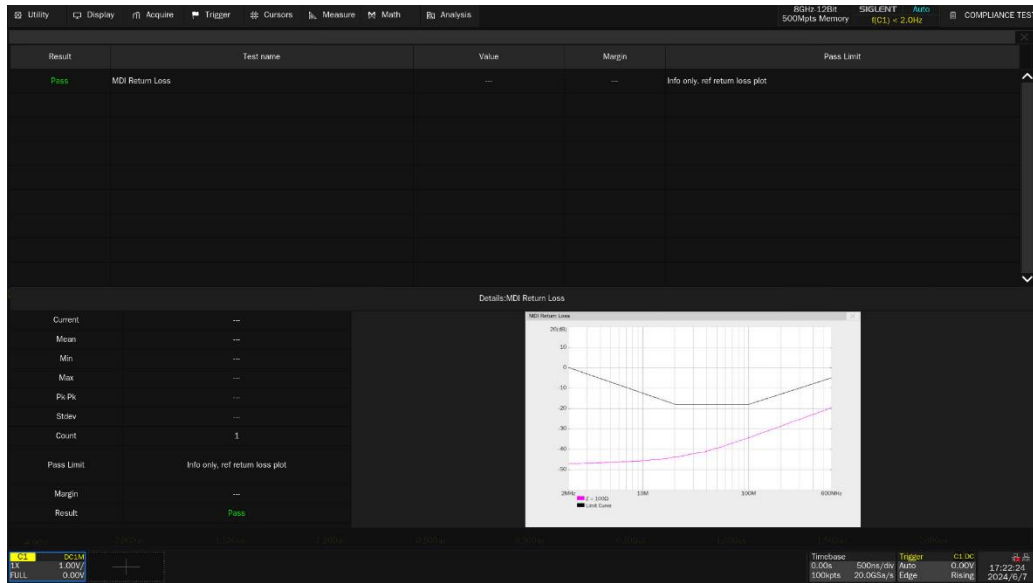


图 7-24 MDI 回波损耗测试结果

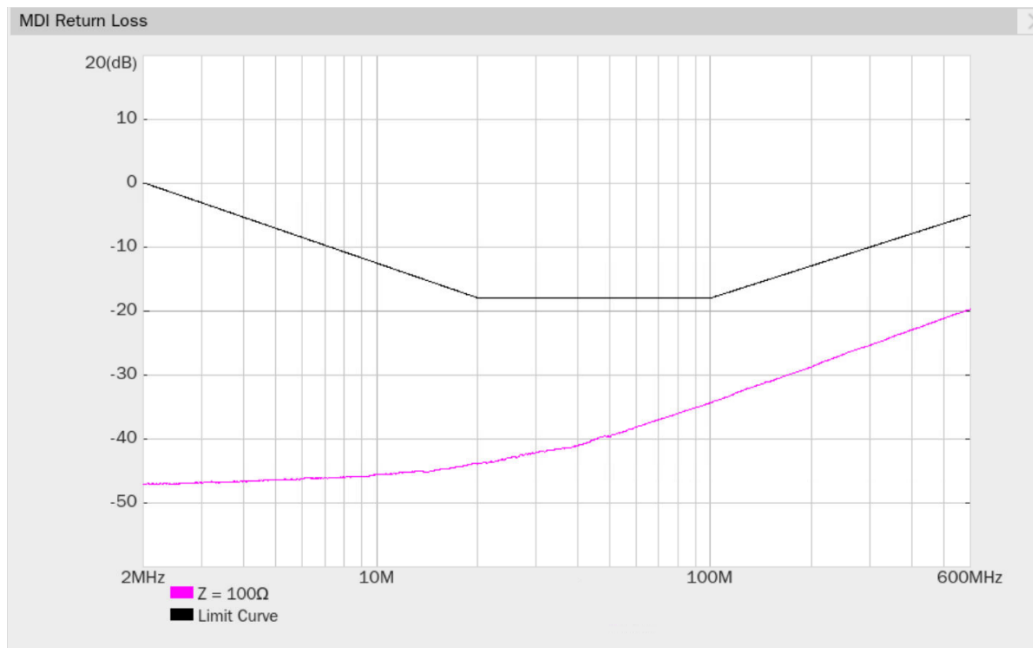


图 7-25 MDI 回波损耗波形细节图

7.5 MDI 模式转换损耗

IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.7.2.2 章节规定，DUT 配置为从模式，在 10MHz~600MHz 范围内，MDI 接口终端匹配为 100Ω 下，发射机的 MDI 模式转换损耗（Sdc11: common mode to differential mode conversion）应在规定的范围中。

7.5.1 测试环境搭建

测试 MDI 模式转换损耗之前，需要对 VNA 进行校准，VNA 校准完毕后才可执行 MDI 模式转换损耗测试。

1000 BASE-T1 的 MDI 模式转换的校准和测试环境和 MDI 回波损耗章节的《7.4.1 测试环境搭建》相同，均需要 VNA 上的两个 Port 进行测试。

VNA 校准可以使用 SOLT 或者 SOLR 的校准方式。为了达到更高的测试精度，消除测试夹具引入的校准误差，可以使用 TRL 的校准方法，两端口 TRL 校准方法不需要知道校准件的指标参数，通过 3 种简单的连接方式即可把测试装置误差模型中所有的误差项都求出来，TRL 校准方案会用到 Thru 直通校准件，反射校准件（Open 或 Short），一小段传输线（如果不能设计具有适当长度或损耗的线标样传输线，则可以使用匹配标样，即匹配电阻）。

用户可以设置 VNA 的校准参数，在使用 SOLT 或者 SOLR 校准方法下对 VNA 的 Open, Load, Short, Through 进行校准；或者在使用 TRL 校准方法下对 VNA 的 Reflect, Through, Line 进行校准，以达到更高的校准精度。

使用双端口的 VNA 进行校准和 MDI 模式转换损耗测量的设置如下：

- 测量项目：模式转换损耗（Sdc11）；
- 起始频率：10MHz；
- 终止频率：600MHz；
- 扫描类型：对数幅度；
- 扫描点数：1601；
- 输出功率：-10dBm (min), 0dBm(推荐值)；
- 中频带宽：100Hz；
- 差分阻抗： 100Ω ；
- 共模阻抗： 25Ω ；
- 平滑：关闭。

【注】：该测试项受到导线影响较大，要保证 DUT 到测试夹具区域④上的 TP2 的焊接线缆尽可能短，并且正、负端是对称的，以减小测量误差。

7.5.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 处于 Slave 模式，且不能发出任何信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **MDI 模式转换损耗**。
- 3) 在 **配置** -> **MDI 模式转换损耗** -> **测试连接**，中点击 **测试连接**，示波器连接 VNA 成功后返回 VNA 的型号。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。根据提示完成 VNA 的校准。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 示波器将自动获取 VNA 测试到的 Sdc11 数据，绘制曲线，判断测试是否通过。

7.5.3 计算方法

IEEE Std 802.3bp-2016 的 Section 97.7.2.2 规定，DUT 配置为从模式且端接电阻为 100Ω 下，DUT 不能发送任何的数据，MDI 模式转换损耗应在下述规定的范围中，如图 7-26 所示。

- 频率为 10~80MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 -55dB 。
- 频率为 80~600MHz 时，MDI 模式转换损耗优于 $-(77-11.51\times\log_{10}(f))$ 。

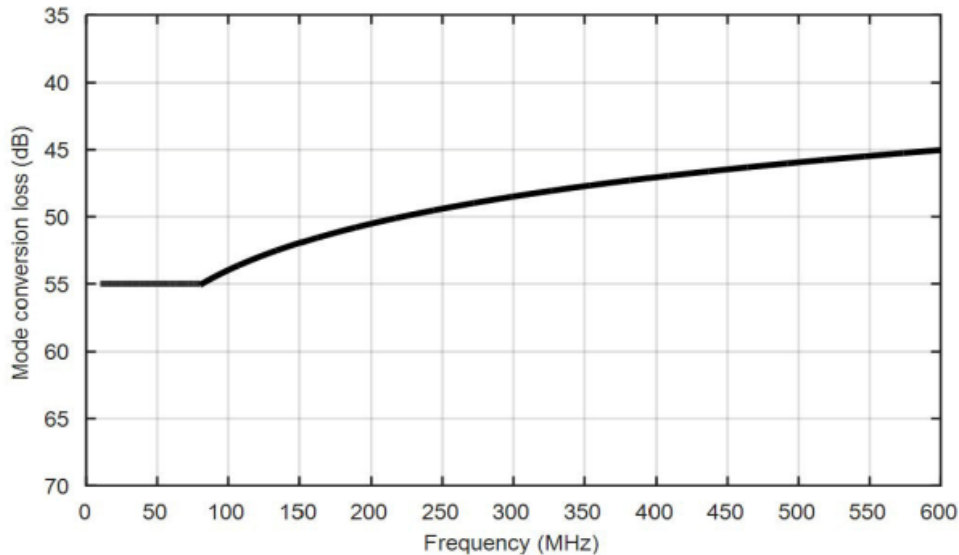


Figure 97-44—MDI mode conversion loss calculated using Equation (97-30)

图 7-26 MDI 模式转换损耗门限

7.5.4 测试结果参考

MDI 模式转换损耗的测试结果如图 7-27 所示，波形细节图如图 7-28 所示。

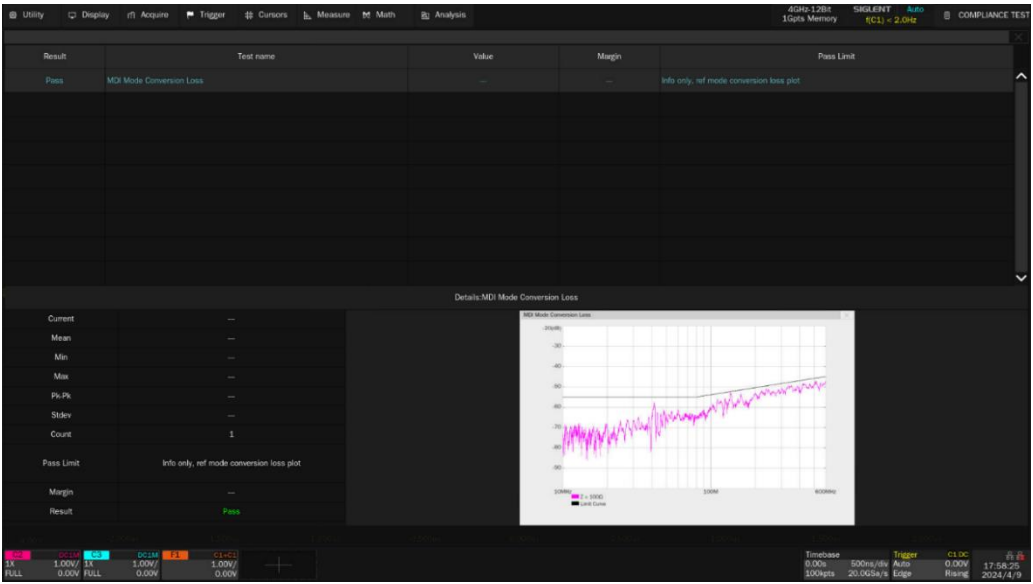


图 7-27 MDI 模式转换损耗测试结果

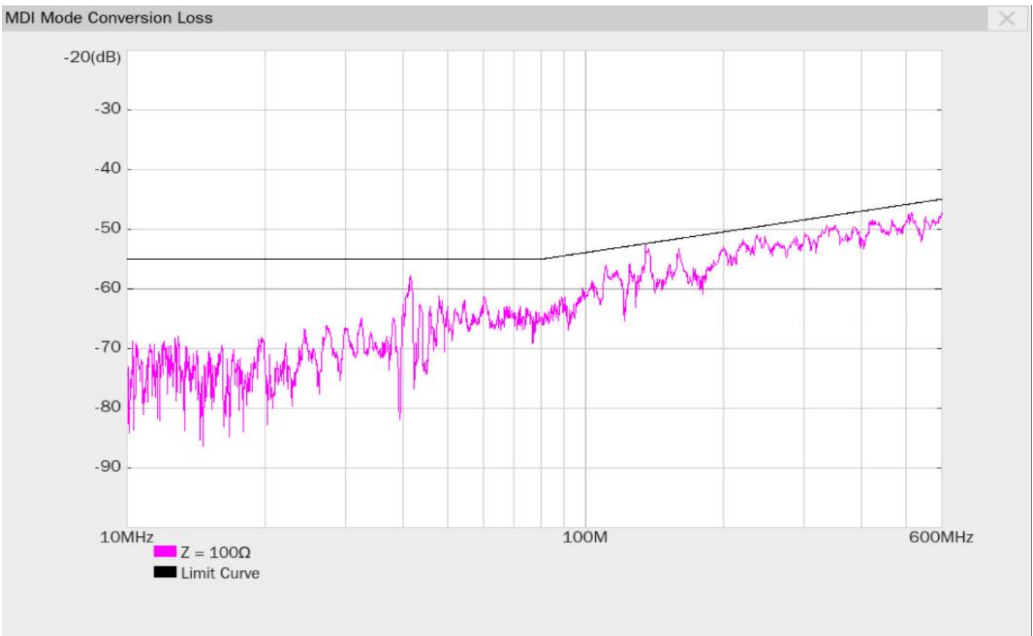


图 7-28 MDI 模式转换损耗的波形细节图

7.6 发射机功率谱密度和峰值差分输出

IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.5.3.4 和 97.5.3.5 规定，在测试模式 5 下，发射机功率应小于 5dBm，发射机的功率谱密度（PSD：Power spectral density）和峰值差分输出电压应在规定的范围内。

7.6.1 测试环境搭建

7.6.1.1 使用示波器测试

发射机功率谱密度和峰值差分输出的测试环境，和《7.2.1 测试环境搭建》章节的相同。

使用 SMA 线缆的连接方式如图 7-5 所示。

使用有源差分探头的连接方式如图 7-6 所示。

7.6.1.2 使用频谱分析仪测试 PSD

发射机功率谱密度，由于示波器底噪的影响，采用频谱仪测试可以达到更高的精度。连接方式如图 7-29 所示，测试步骤如下所示：

- 1) 配置被测设备（DUT）进入测试模式 5。
- 2) 测试夹具区域③上的 TP3 上焊接被测设备（DUT）的测试线缆。
- 3) 使用 SMA 线缆将测试夹具的 J12 连接器和频谱仪的 RF INPUT 端口相连。
- 4) 一根 USB 连接线分别连接示波器的 USB Host 接口和频谱仪的 USB Device 接口。
- 5) 在示波器弹窗上，在 **测试项选择** 中点击 **发射机功率谱密度和峰值差分输出** -> **发射机功率谱密度**，点击 **配置** -> **发射机功率谱密度** -> **频谱分析仪** -> **测试连接**，示波器自动检测频谱仪连接状态，连接成功后，会提示连接成功信息并且返回频谱仪的型号，并且示波器会自动配置频谱仪的一些测试参数（自动配置仅支持鼎阳仪器）。频谱仪的配置如下：

- 测量类型：频谱分析；
- 测量单位：dBm；
- 起始频率：0.3MHz（标准中规定为从 0Hz 开始，但是频谱分析仪在 0Hz 附近有本振的影响，因此本方案选择从 0.3MHz 开始）；
- 终止频率：600MHz；
- RBW：100kHz；
- VBW：300kHz；
- RMS 平均检波器；
- 扫描时间大于 1s。

- 6) 如需进行巴伦补偿, 请点击 **设置** 进入巴伦补偿界面, 设置相关参数。

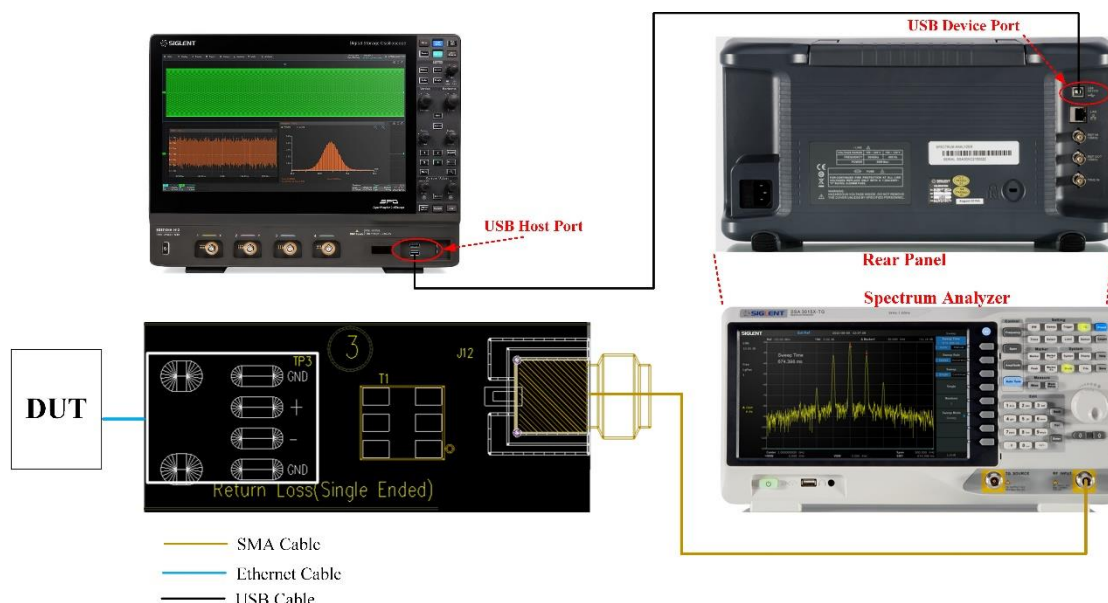


图 7-29 使用频谱仪的功率谱密度连接示意

7.6.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 5 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机功率谱密度和峰值差分输出**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的连接方式（差分探头或者单端输入），信源，平均次数，选择是否使用频谱仪来测试发射机功率谱密度。
如果选择使用频谱仪，点击 **测试连接** 来确保可以使用示波器来控制频谱仪，并对频谱仪做测量的基础配置。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

如果选择使用频谱仪测量发射机功率谱密度，示波器则会控制频谱仪进行测量，并且根据频谱仪的测量结果来绘制曲线，输出测试结果。

7.6.3 计算方法

- (1) 功率谱密度：IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.5.3.4.规定，在测试模式 5 下，对 MDI 接口使用 100Ω端接后，发射机的传输功率应该要小于 5dBm，功率谱密度（PSD）应在规定的范围中，通过门限标准如图 7-30 所示。

$$UpperPSD(f) = \begin{cases} -80 & \text{dBm/Hz} & 0 < f \leq 100 \\ -76 - \frac{f}{25} & \text{dBm/Hz} & 100 < f \leq 400 \\ -85.6 - \frac{f}{62.5} & \text{dBm/Hz} & 400 < f \leq 600 \end{cases} \quad (97-14)$$

$$LowerPSD(f) = \begin{cases} -86 & \text{dBm/Hz} & 40 < f \leq 100 \\ -82 - \frac{f}{25} & \text{dBm/Hz} & 100 < f \leq 400 \end{cases} \quad (97-15)$$

where

f is the frequency in MHz

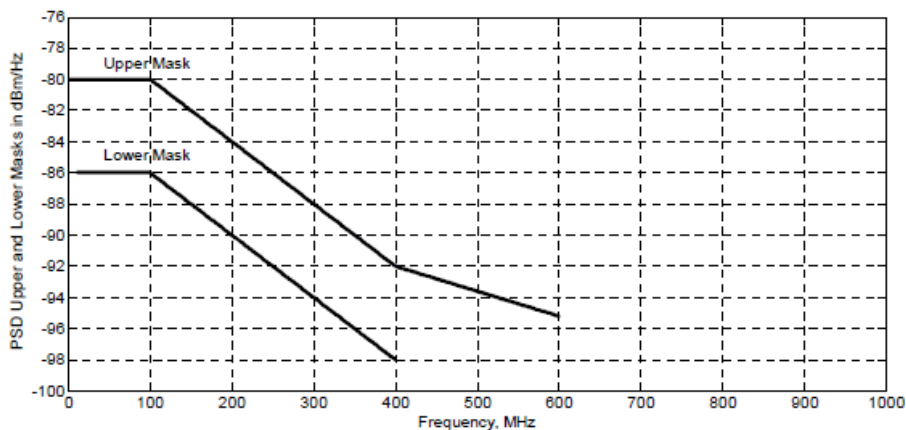


Figure 97-34—Transmitter Power Spectral Density, upper and lower masks

图 7-30 PSD 的门限

- (2) 峰值差分输出：IEEE Std 802.3bp 标准中 Section 97.5.3.5 规定，DUT 在测试模式 5 中，当对 MDI 接口用 100Ω 终端匹配时，MDI 接口处的发射机峰值差分输出应小于 1.3Vp-p。

7.6.4 测试结果参考

发射机功率谱密度测试结果如图 7-31 所示。

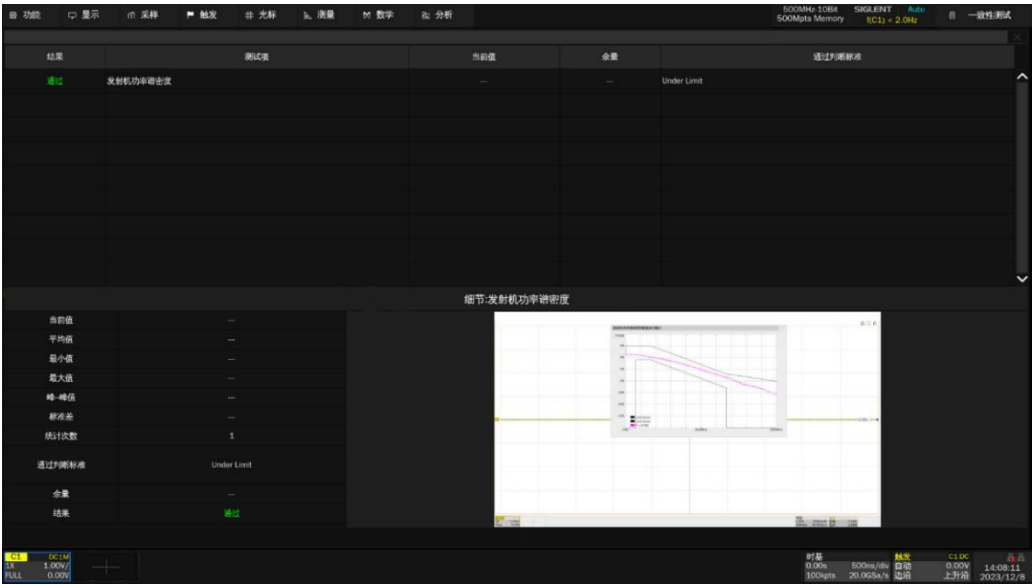


图 7-31 发射机 PSD 测试结果参考

发射机峰值差分输出测试结果如图 7-32 所示。

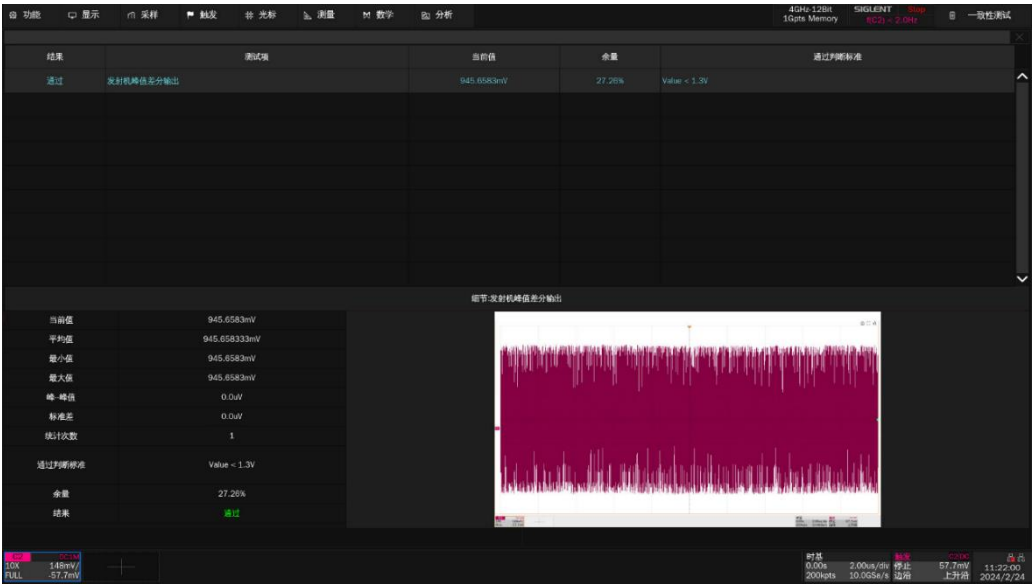


图 7-32 发射机峰值差分输出测试结果参考

7.7 发射机输出正/负压降

IEEE Std 802.3bp 标准中的 Section 97.5.3.1 规定，DUT 在测试模式 6 下，测量过零点后 4ns 处的初始值和过零点后 16ns 处的最终值，正压降、负压降都应该小于 10%。

7.7.1 测试环境搭建

发射机输出正压降和负压降的测试环境，和《7.2.1 测试环境搭建》章节的相同。

使用 SMA 线缆的连接方式如图 7-5 所示。

使用有源差分探头的连接方式如图 7-6 所示。

7.7.2 测试步骤

- 1) 配置 DUT 发出测试模式 6 的信号。
- 2) 在 **测试项选择** 中选择 **发射机输出正/负压降**。
- 3) 在 **配置** 中设置使用的探头类型（差分探头或者单端输入），信源，平均次数。
- 4) 在 **连接** 中检查测试环境搭建的准确性。
- 5) 点击 **启动测试**。
- 6) 如果系统没有正确的连接来执行这个测试，应用程序将会回到 **连接** 步骤提示您更改物理配置。当您完成连接指引后，点击 **启动测试** 按钮来继续测试。
- 7) 在测试过程中，示波器将自动验证信源上是否存在正确的测试信号并配置示波器的触发信号，输出测试结果。

7.7.3 计算方法

物理层一致性测试的发射机输出压降根据 IEEE Std 802.3bp 标准的 97.5.3.1 部分的限值进行。信号经过零点之后 4ns 的初始峰值和过零点后 16ns 处测量到的电压衰落应小于 10%，如图 7-33 所示。

该测试中，DUT 发出测试模式 6 的信号，对该信号分别进行上升沿/下降沿触发，可以确定信号经过零点之后 4ns 的初始峰值和过零点后 16ns 处测量到的电平衰落幅度值。衰落的计算方法如下：

$$\text{Droop} = 100 \% \times (V_d/V_{pk})$$

其中 V_{pk} 为过零点后 4ns 处峰值电平幅度， V_d 为峰值电平后 16ns 后的信号电平衰落幅度。

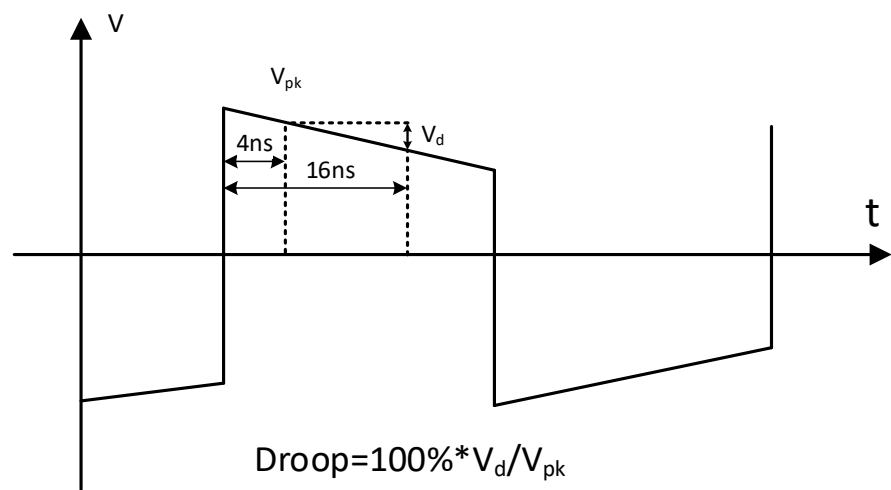


图 7-33 Droop 电压测试示意图

7.7.4 测试结果参考

发射机输出正/负压降测试结果如图 7-34 所示，波形细节如图 7-35 所示。



图 7-34 发射机输出正/负压降参考结果

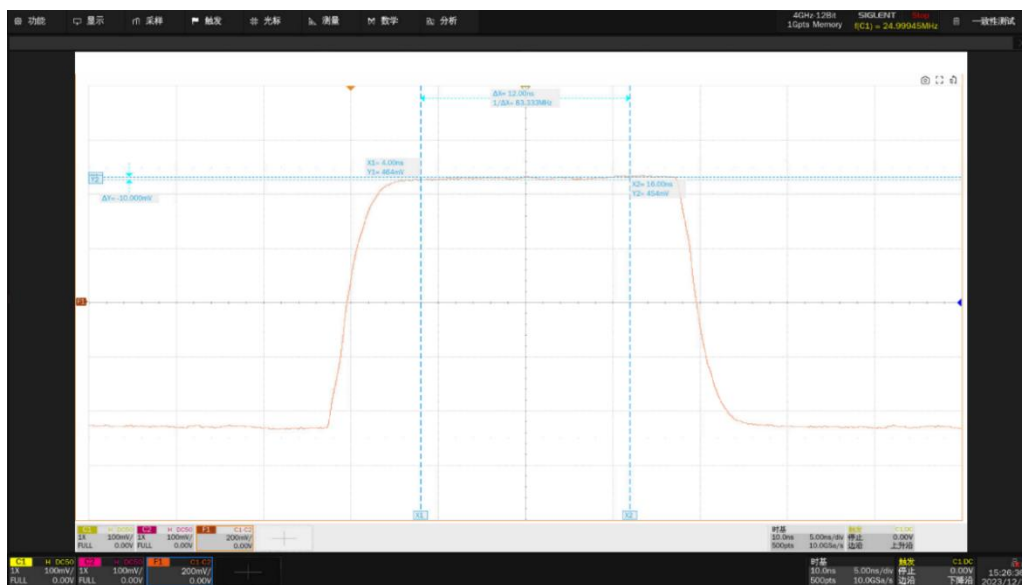


图 7-35 发射机输出正压降波形细节

附录 1 名词缩写

- AWG: Arbitrary Waveform Generator
- CME: Common-mode Emission
- DUT: Device Under Test
- ECU: Electronic/ Engine Control Unit
- EMI: Electromagnetic Interference
- H-MTD: High-speed Modular Twisted-pair Data
- IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers
- MDI: Medium Dependent Interface
- OPEN Alliance: One-Pair Ethernet Alliance
- OABR: Open Alliance BroadR-Reach
- PSD: Power Spectral Density
- RBW: Resolution Bandwidth
- RMS: Root Mean Square
- SMA: SubMiniature version A
- TX_TCLK: Transmit System Clock
- VBW: VBW Video Bandwidth



关于鼎阳

鼎阳科技 (SIGLENT) 是通用电子测试测量仪器领域的行业领军企业, A 股上市公司。

2002 年, 鼎阳科技创始人开始专注于示波器研发, 2005 年成功研制出鼎阳第一款数字示波器。历经多年发展, 鼎阳产品已扩展到数字示波器、手持示波表、频谱分析仪、函数/任意波形发生器、矢量网络分析仪、射频/微波信号源、台式万用表、直流电源、电子负载、精密源表等基础测试测量仪器产品, 是全球极少数能够同时研发、生产、销售数字示波器、信号发生器、频谱分析仪和矢量网络分析仪四大通用电子测试测量仪器主力产品的厂家之一, 国家重点“小巨人”企业。同时也是国内主要竞争对手中极少数同时拥有这四大主力产品并且四大主力产品全线进入高端领域的厂家。公司总部位于深圳, 在马来西亚槟城州设有生产基地, 在美国克利夫兰、德国奥格斯堡、日本东京成立了子公司, 在成都成立了分公司, 产品远销全球 80 多个国家和地区, SIGLENT 已经成为全球知名的测试测量仪器品牌。

联系我们

深圳市鼎阳科技股份有限公司

全国免费服务热线: 400-878-0807

网址: www.siglent.com

声明

 是深圳市鼎阳科技股份有限公司的注册商标, 事先未经过允许, 不得以任何形式或通过任何方式复制本手册中的任何内容。

本资料中的信息代替原先的此前所有版本。技术数据如有变更, 恕不另行通告。

技术许可

对于本文档中描述的硬件和软件, 仅在得到许可的情况下才会提供, 并且只能根据许可进行使用或复制。

