

Application Note

# 10 BASE-T1L 以太网 EMI 和 EMC 测试结果



Steffen Graf, Quirin Hauf

摘要

本文档描述了在 TIDA-010261 电路板上执行的一系列电磁干扰 (EMI)/电磁兼容性 (EMC) 测量，该电路板是一款面向 DP83TD510E 单线对以太网 PHY 的基于 Sitara 的微控制器开发平台。测试目的在于确定 EMI 和 EMC 问题的来源。测试结果显示，100MHz 至 300MHz 频段存在过量发射，其主要成因可能包括电源噪声、SD 卡时钟以及二极管产生的内部电荷泵噪声。为缓解此问题，我们对 PCB 设计进行了调整，包括屏蔽、布线长度匹配，以及改用内部 EMMC。最终结果表明发射水平显著降低，符合 CISPR 32 标准。

内容

1 简介.....	2
2 系统说明.....	3
3 分类.....	4
4 EMI 和 EMC 概述.....	5
4.1 EMI.....	5
4.2 EMC.....	5
4.3 EMI 与 EMC 测试.....	5
5 测试说明.....	6
6 测试细节和结果.....	7
6.1 突发：IEC 61000-4-4.....	7
6.2 ESD：IEC 61000-4-2.....	9
6.3 浪涌：IEC 61000-4-5.....	10
6.4 Cond-EMS：IEC 61000-4-6.....	12
6.5 Rad-EMS：IEC 61000-4-3.....	13
6.6 传导发射 EN 61000-6-3 EMCL DC (LISN).....	15
6.7 CISPR 32.....	16
6.8 传导发射 CISPR 32 信号.....	17
6.9 辐射发射 CISPR 32 FAR.....	19
7 摘要.....	24
8 参考资料.....	24

商标

Sitara™ is a trademark of Texas Instruments.  
所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

本文档是有关 10 BASE-T1L 以太网参考设计 TIDA-010261 的电磁干扰 (EMI) 和电磁兼容性 (EMC) 测试结果的详细技术报告。本报告涵盖 EMI/EMC 测试的各个方面，包括：

1. **引言：**概述 EMI/EMC 测试概念及其在产品开发中的重要性。
2. **测试设置：**说明符合 CISPR 32 和 IEC 标准的辐射发射 (RE)、传导发射 (CE) 和电磁敏感性 (EMS) 测试的测试设置。
3. **辐射发射测试结果：**
  - 图 6-15 至 6-25 展示了 A 类和 B 类器件在与天线不同距离处的辐射发射结果图。
  - 表 6-6 列出了屏蔽 SPE 电缆和非屏蔽双绞线频率的 CISPR 32 FAR 测试结果数据，包括最小和最大测量值。
4. **传导发射测试结果：**图 6-16 至 6-18 描绘了使用 CISPR 32 测量标准的 A 类和 B 类器件在 50kHz 至 30MHz 频率范围的传导发射结果。
5. **电磁敏感性 (EMPS) 测试：**
  - 图 9-36 展示了用于研究 TIDA-010261 对电磁源的敏感性的辐射抗扰度测试设置。
6. **结果分析：**讨论 EMI/EMC 测试数据，表明所有传导和辐射发射测试均成功通过，但可能存在改进的空间（例如，使用内部 SD 卡或匹配电路布线）。
7. **总结：**概述 EMI/EMC 测试结果，重点介绍取得的成就和工艺增强途径。

本文档的一些要点如下：

- 10 BASE-T1L 以太网参考设计成功通过了大多数 EMI/EMC 测试。
- 存在降低内部高速元件（如 SD 卡）引起的噪声辐射的空间。
- 优化电子电路设计中的布线长度和阻抗有助于减轻 EMI 行为。

本技术报告对各行各业从事产品开发的工程师非常有用，尤其是处理复杂电子产品且在对系统应用电磁敏感性测试方面需要指导的工程师。

## 2 系统说明

此设计实现了传感器和传动器的数字后端。为了与上面的各层通信，该设计利用 10BASE-T1L SPE，允许长达 1km 的电缆长度以及 10Mbps 的数据吞吐量。该设计有两个供电选项：

1. 充当由以太网线路供电的 PoDL PD
2. 通过连接 24V 电源在独立模式下运行

板载 Sitara™ AM2434 处理器支持实施功能强大的传感器或传动器，并能够执行数据处理，例如，直接在边缘进行快速傅里叶变换 (FFT) 计算。利用配有 PHI 和 BoosterPack 连接器的接口选项，该设计可以连接到实现四通道集成式电子压电式 (IEPE) 振动传感器前端的 [四通道同步 IEPE 震动传感器接口参考设计](#) 设计指南。在本设计指南所示的示例中，振动传感器不仅可用于捕获四个模拟通道的振动数据，还可处理这些数据，例如计算 FFT 和根据结果做出决策。



图 2-1. PCB TIDA-010261

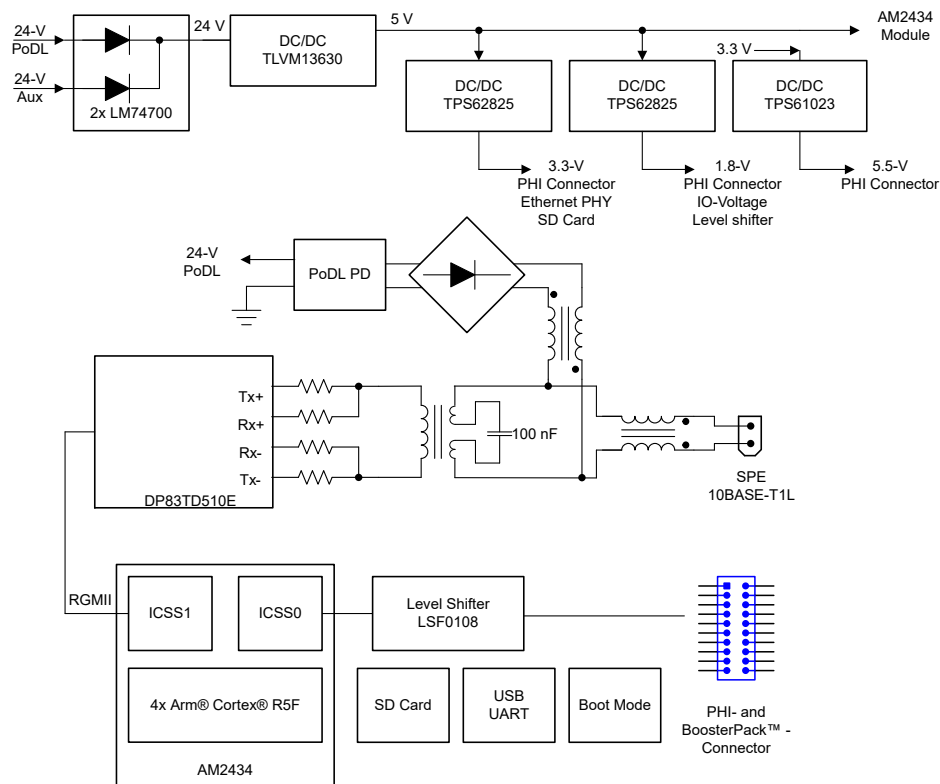


图 2-2. TIDA-010261 方框图

### 3 分类

TIDA-010263 测试板可以满足工业应用的 EMC 和 EMI 测试标准及准则。根据该标准，选择了以下测试：

- IEC 61000-4-2：静电放电 (ESD)
- IEC 61000-4-3：辐射抗扰度 (RI)
- IEC 61000-4-4：电快速瞬变 (EFT)
- IEC 61000-4-5：浪涌抗扰度 (SI)
- IEC 61000-4-6：传导抗扰度 (CI)
- IEC 61000-6-3 EMCL 直流传导电压发射
- CISPR 32：工业、科技和医疗 (ISM) 设备的 EMI 辐射发射

**表 3-1. 分类矩阵**

性能 (验收标准)	说明
A	模块应按预期连续工作。即便在测试期间，所有功能与性能均无异常，且以太网数据包未出现任何损坏
B	可接受在测试期间出现性能暂时下降。测试完成后，模块在无人工干预的情况下按预期继续工作
B*	模块应按预期连续工作。甚至测试过程中无功能或性能损失。某些数据包可能丢失，但通信未完全中断
C	在测试期间，允许出现功能丧失，但不得损坏硬件或软件。测试完成后，模块经手动重启、断电或上电后应自动按预期继续工作。无法自行恢复

**标准 A** 的定义取决于客户：

- 对于通信接口，通常少于三个连续错误仍视为符合标准 A。
- 客户通常会测试**两倍的标准电压**。
- 达到**标准 A (尤其是通过 EFT)** 是一项竞争优势。

-> 这意味着在严苛的工业环境中，系统将更稳健，具有更优异的性能以及更短的停机时间

## 4 EMI 和 EMC 概述

EMI ( 电磁干扰 ) 和 EMC ( 电磁兼容性 ) 测试是电子和电气工程领域必不可少的步骤。

### 4.1 EMI

电磁干扰 (EMI) 指电气或电子设备发出的有害电磁扰动，可能影响附近器件或通信系统的性能。例如，屏蔽不足的器件会产生干扰附近电子设备的射频扰动 ([What's the Difference Between EMI and EMC?](#))。

### 4.2 EMC

电磁兼容性 (EMC) 是指电子器件在环境中正常工作而不发射有害干扰或不受其他器件电磁辐射影响的能力。本质上讲，*EMC 可确保器件可与其他设备共存，而不会导致或发生中断* ([What are EMC and EMI?](#))。

### 4.3 EMI 与 EMC 测试

EMI/EMC 测试旨在确保产品符合法规标准且工作正常，而不会干扰其他设备或受其影响。这些测试通常包括：

#### 发射测试

- 该测试测量器件产生的电磁发射，以确保发射水平处于可接受的限值内 ( 合规性测试 )

#### 抗扰度测试

- 评估器件在不降低性能的情况下承受外部电磁干扰的能力 ([Electromagnetic Compatibility \(EMC\) Testing](#))

这些测试对于确保电子器件在实际环境中的安全性、可靠性和监管合规性至关重要。

## 5 测试说明

在测试期间，两个 TIDA-010261 PCB 分别采用屏蔽与非屏蔽双绞线单线对以太网电缆进行连接。这些电路板由外部 24V 电源供电。

为在抗扰度测试期间测试数据完整性，从 eMMC 启动 Linux：一块电路板运行 iperf3 服务器，另一块则连接 iperf3 服务器并在抗扰度测试全程执行 TCP 吞吐量测试。通过 iperf3 的输出，监测数据速率和重试计数器，同时通过硬件监测链路 LED

```
Connecting to host 192.168.1.11, port 5201
[ 6] local 192.168.1.10 port 43962 connected to 192.168.1.11 port 5201
[ ID] Interval      Transfer    Bitrate    Retr  Cwnd
[ 6]  0.00-1.00  sec  1.24 MBytes  10.4 Mbits/sec  0  33.9 KBytes
[ 6]  1.00-2.00  sec  1.14 MBytes  9.56 Mbits/sec  0  33.9 KBytes
[ 6]  2.00-3.00  sec  1.14 MBytes  9.56 Mbits/sec  0  33.9 KBytes
[ 6]  3.00-4.00  sec  1.14 MBytes  9.56 Mbits/sec  0  33.9 KBytes
[ 6]  4.00-5.00  sec  1.14 MBytes  9.56 Mbits/sec  0  33.9 KBytes
```

图 5-1. Iperf3 EFT 数据记录开始

```
[ 6] 595.00-596.00 sec  1.24 MBytes  10.4 Mbits/sec  6  21.2 KBytes
[ 6] 596.00-597.00 sec  1018 KBytes  8.34 Mbits/sec  5  24.0 KBytes
[ 6] 597.00-598.00 sec  1.24 MBytes  10.4 Mbits/sec  5  28.3 KBytes
[ 6] 598.00-599.00 sec  1018 KBytes  8.34 Mbits/sec  6  21.2 KBytes
[ 6] 599.00-600.00 sec  1.24 MBytes  10.4 Mbits/sec  4  24.0 KBytes
[ ID] Interval      Transfer    Bitrate    Retr  sender
[ 6]  0.00-600.00  sec  657 MBytes  9.19 Mbits/sec  10835 receiver
[ 6]  0.00-600.01  sec  657 MBytes  9.18 Mbits/sec
iperf Done.
```

图 5-2. Iperf3 EFT 数据记录结束



图 5-3. 采用单线对以太网的两块 TIDA-010261 进行连接

## 6 测试细节和结果

### 6.1 突发 : IEC 61000-4-4

是一项标准，规定了对电气和电子设备抵抗电快速瞬变 (EFT, 通常称为突发脉冲) 的测试要求和方法。这些突发脉冲短而快速，具有高频特性，用于模拟由感性负载、继电器触点开关或电源线路中的其他快速变化所产生的开关瞬变。该标准的目的是确保设备在暴露于此类干扰时仍能正常工作，不会丢失数据或发生硬件故障。

测试设置包括一个突发脉冲发生器，能够产生具有指定电压电平、脉冲持续时间和重复频率的脉冲。该脉冲通过直接注入电源线或使用容性耦合钳 (CCC) 耦合到信号和控制线的方式耦合到 EUT。可使用该器件向 EUT 注入 EFT/突发脉冲扰动，而无需直接电气连接。标准突发脉冲测试设置包括 0.5kV 至几 kV 的 kV 级电平以及 5kHz 或 100kHz 的频率，具体取决于所测试的严重等级。耦合和去耦网络 (CDN) 是测试设置的重要部分，可确保在不干扰电路不相关部分的情况下正确施加突发能量。在 EUT 工作状态下对其进行响应测试，并监测是否存在任何故障、中断或损坏的迹象。评估标准包括确定设备是否出现暂时性能下降、数据丢失或完全失效 (EMC Standards)。

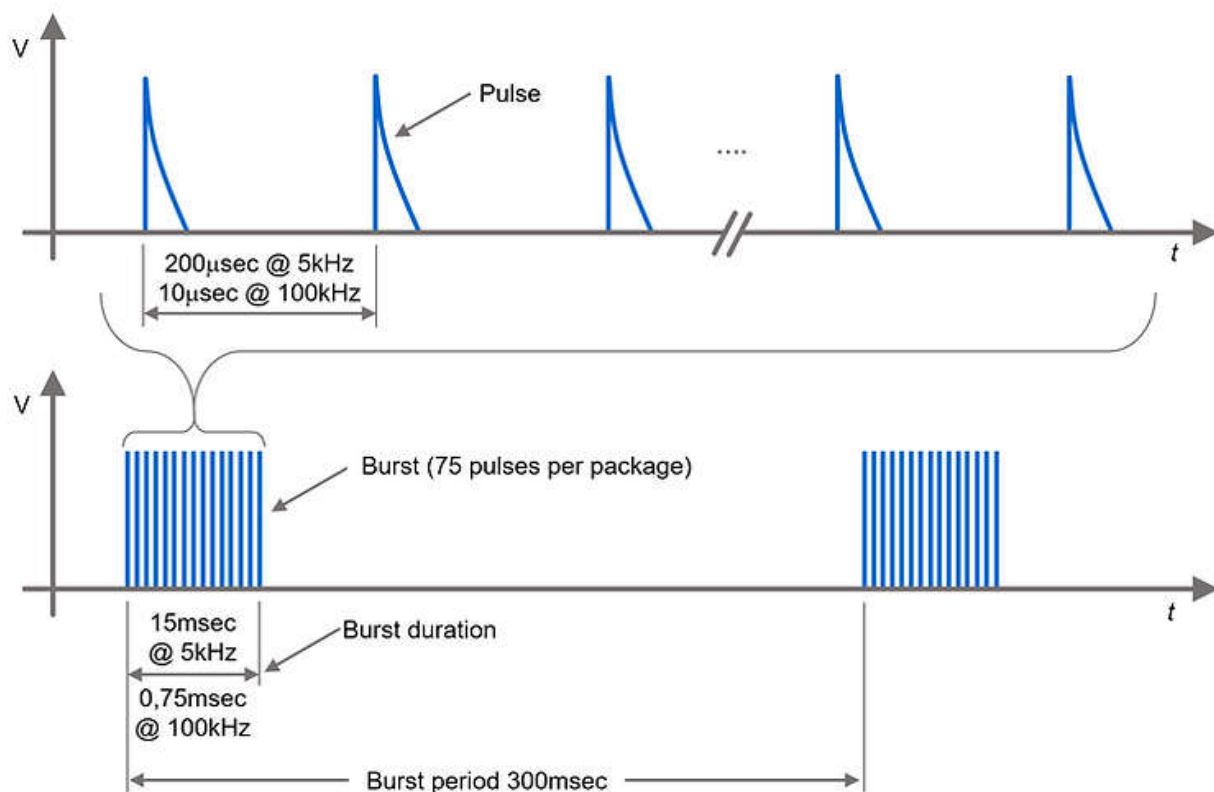


图 6-1. 突发脉冲 61000-4-4 发生器输出信号





图 6-2. 突发测试设置下的 TIDA-0101261

表 6-1. TIDA-010261 EFT 结果

测试	IEC 标准	电缆	测试信号		测试说明	标准	测试结果
			电压	频率			
EFT	IEC 61000-4-4	屏蔽 SPE	$\pm 2\text{kV}$	5kHz	直流输入 CDN 耦合时的突发脉冲	A	通过
				100kHz		A	通过
	IEC 61000-4-4	屏蔽 SPE	$\pm 2\text{kV}$	5kHz	SPE CCC 耦合时的突发脉冲	A	通过
				100kHz		A	通过



表 6-1. TIDA-010261 EFT 结果 (续)

测试	IEC 标准	电缆	测试信号		测试说明	标准	测试结果
			电压	频率			
EFT	IEC 61000-4-4	非屏蔽双绞线	±2kV	5kHz	直流输入上的突发脉冲	B*	通过
				100kHz		B*	通过
	IEC 61000-4-4	非屏蔽双绞线	±2kV	5kHz	SPE CCC 耦合时的突发脉冲	B*	通过
				100kHz		B*	通过

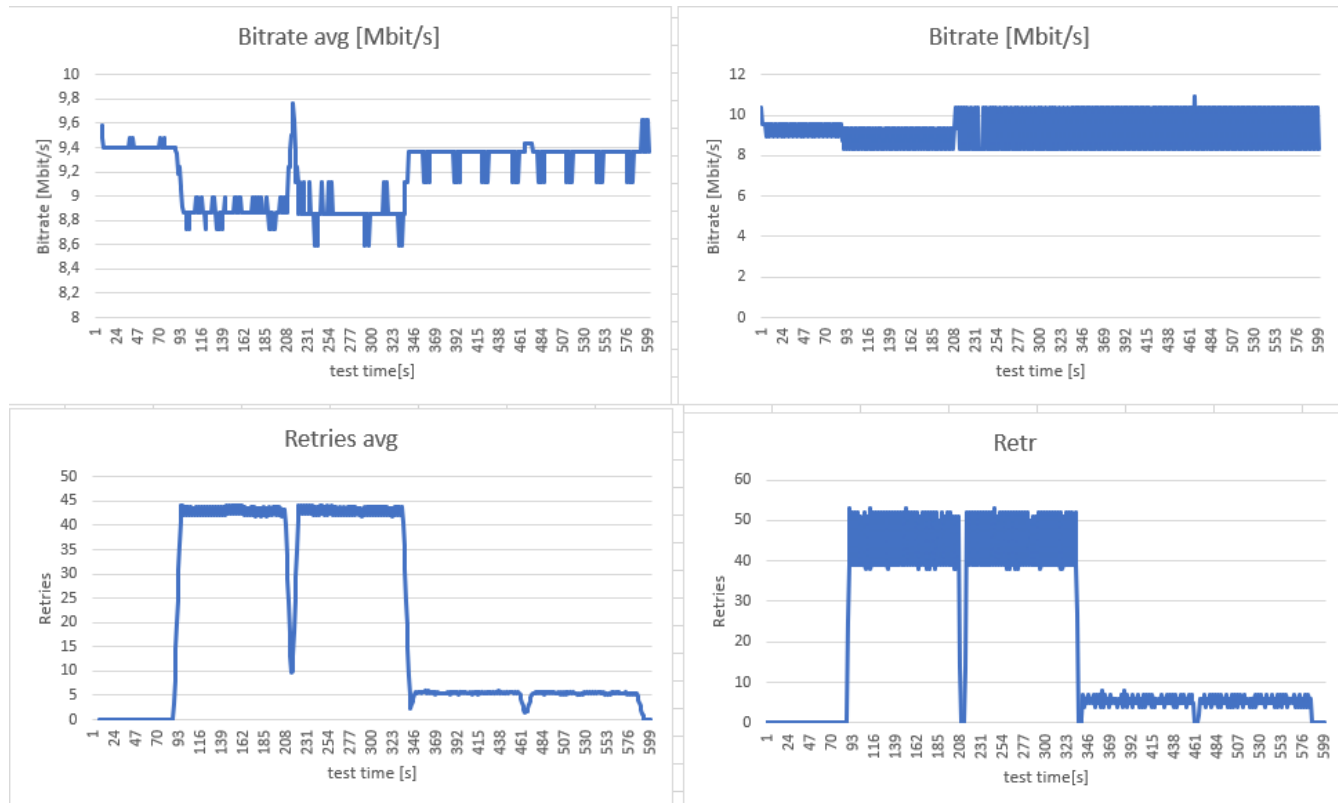


图 6-3. 屏蔽电缆 lperf 3 结果图

## 6.2 ESD : IEC 61000-4-2

静电放电是一项技术标准，为电气和电子设备对静电放电 (ESD) 的抗扰度测试提供框架。

该标准规定了对测试设置与程序的要求，确保通过一致且可重复的测试来评估器件对 ESD 事件的响应特性。

从技术上讲，该标准涵盖两种主要放电类型：接触放电与空气放电。接触放电通过导电探针将静电荷直接施加至受测器件 (DUT)，这种方法能提供更可控、更具重复性的测试结果。空气放电模拟静电荷通过空气跃迁至 DUT 的情景，反映了无法完全通过导电接触实现的真实场景。

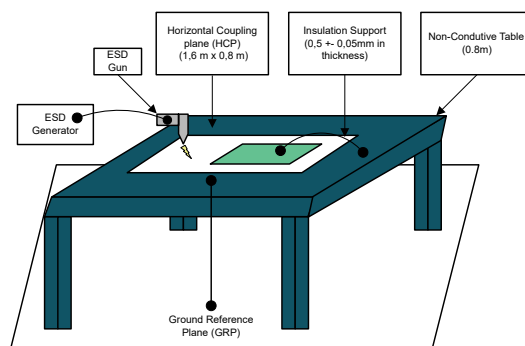


图 6-4. 测试台的基本 ESD 设置示例

该标准定义了多个测试电压电平，通常以千伏 (kV) 为计量单位。从低电平 (2kV) 到高水平 (15kV 或更高)。IEC 61000-4-2 的核心要素包括使用能产生精确电压脉冲的 ESD 仿真器 (ESD 枪) 电缆，以及提供验证放电波形的规范要求，确保其符合严格的时序与振幅标准。该测试标准的目的在于确保器件能够承受在搬运、运行或环境变化期间可能发生的静电放电，而不会发生故障或损坏。



图 6-5. TIDA-010261 上的 ESD 注入

对于 ESD 测试，在每个额定值下，对 EUT 至少进行了 20 次放电测试，正极和负极各放电 10 次。表 6-2 显示了 ESD 测试的结果。

表 6-2. TIDA-010261 的 ESD 测试结果

测试	IEC 标准	电缆	测试信号		电压电平/极性	注入次数	结果
			注入位置	模式			
ESD	IEC 61000-4-2	屏蔽 SPE	HCP/VCP	CD	± 8kV	每次注入 10 次	通过标准 A
			SPE 屏蔽	CD	± 8kV	每次注入 10 次	通过标准 B*
ESD	IEC 61000-4-2	非屏蔽双绞线	HCP/VCP	CD	± 8kV	每次注入 10 次	通过标准 A
			SPE 屏蔽	CD	± 8kV	每次注入 10 次	通过标准 B*
			双绞线端子	CD	± 4kV	每次注入 10 次	通过标准 B*

### 6.3 浪涌：IEC 61000-4-5

是一项标准，规定了电气和电子设备对浪涌电压（由雷击和电源开关等事件引起的高能瞬变）的抗扰度的测试指南。此类浪涌可能对电子系统与元件造成严重损坏，因此器件设计必须能承受此类事件而不发生故障。浪涌测试需使用能产生明确的波形特性的浪涌发生器，典型波形包括 1.2/50μs 电压波形或 8/20μs 电流波形。这些参数指定了浪涌脉冲的上升时间与持续时间。

EUT 与浪涌发生器之间通过耦合和去耦网络 (CND) 连接，该连接有助于将浪涌引导至预期点，例如电源线、信号线或通信端口。浪涌可应用于差模（线路之间）和共模（线路与接地之间）两种模式，从而模拟现实场景。标准测试电平通常为 0.5kV 至几千伏，并伴随高电流，具体取决于测试的严重程度。在本例中，最大额定值为 1kV 和 24A 电流。这些测试的目的是评估 EUT 能否在规定条件下承受浪涌事件，而不造成损坏、数据丢失或故障 ([EMC Standards](#))。

**Test setup for unshielded connection lines. Line-to-line/earth coupling via capacitors.**

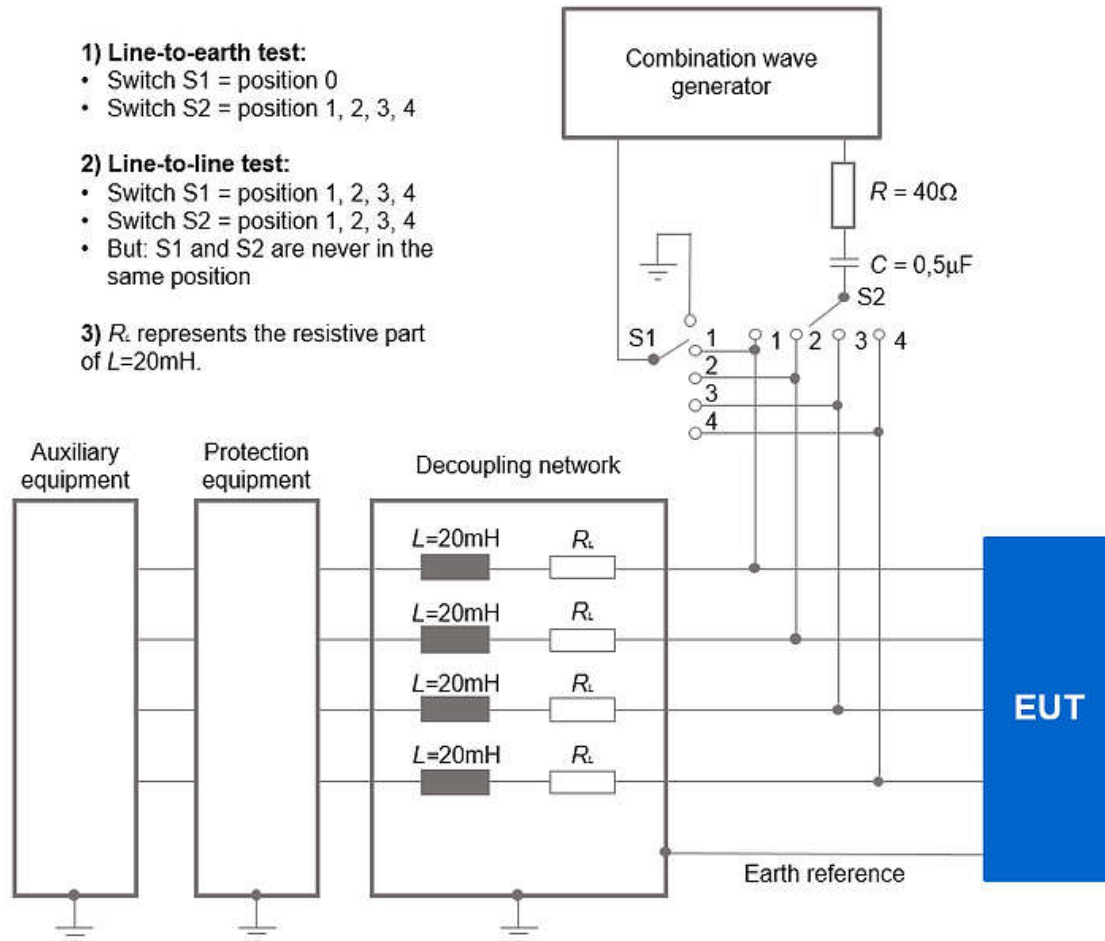


图 6-6. 去耦网络浪涌



图 6-7. 浪涌测试设置



图 6-8. 浪涌测试设置

表 6-3. TIDA-010261 浪涌测试结果

测试	IEC 标准	电缆	阻抗	测试电压	测试说明	标准	测试结果
浪涌	IEC 61000-4-5	屏蔽 SPE	41 $\Omega$ ( 2 $\Omega$ 源阻抗 + 来自耦合网络的 40 $\Omega$ )	500V	非屏蔽双绞线上的浪涌	B	通过
	IEC 61000-4-5	屏蔽 SPE	42 $\Omega$ ( 2 $\Omega$ 源阻抗 + 来自耦合网络的 40 $\Omega$ )		屏蔽电缆直接注入时的浪涌	B	通过
浪涌	IEC 61000-4-5	非屏蔽双绞线	43 $\Omega$ ( 2 $\Omega$ 源阻抗 + 来自耦合网络的 40 $\Omega$ )	1kV	非屏蔽双绞线上的浪涌	B	通过
	IEC 61000-4-5	非屏蔽双绞线	44 $\Omega$ ( 2 $\Omega$ 源阻抗 + 来自耦合网络的 40 $\Omega$ )		屏蔽电缆直接注入时的浪涌	B	通过

## 6.4 Cond-EMS : IEC 61000-4-6

该标准主要规定电气和电子设备在 150kHz 至 80MHz 频率范围内对传导射频 (RF) 干扰的抗扰度要求，该频率范围采用 1kHz 正弦波进行 80% 调幅 (AM)。该标准适用于设备可能暴露于沿电缆（例如电源线或通信线）传导的 RF 信号的环境，这些射频信号可能会感应产生不必要的电流并影响器件性能。

该标准定义了对可能通过这些传导路径进入设备的实际 RF 干扰的仿真方法。该标准规定使用 RF 发生器和功率放大器创建干扰信号，然后通过耦合和去耦网络或电流注入探头将这些信号注入 EUT。耦合器件可确保 RF 能量一致地施加到 PCB 的相关部分，而去耦器件可隔离测试信号，以防止干扰其他部分设置。测试的目的在于评估设备在存在 RF 干扰的情况下能否持续正常运行，而不出现性能下降、数据丢失或运行故障。

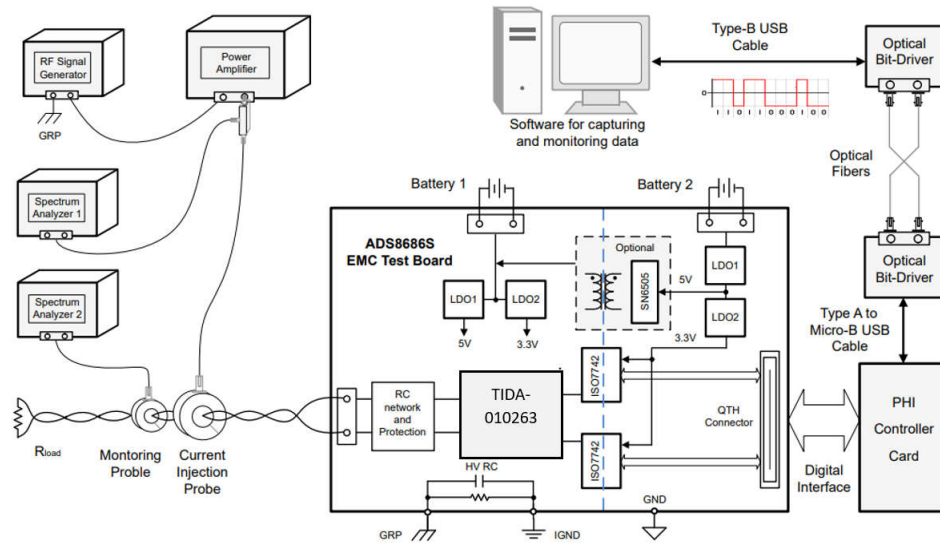


图 6-9. 传导发射测试设置方框图 (示例)

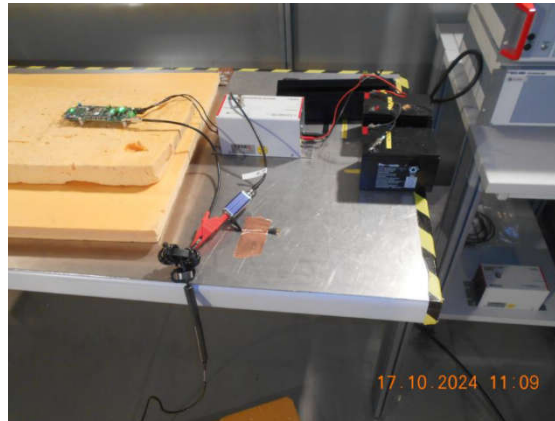


图 6-10. TIDA-010261 传导发射测试设置

表 6-4. TIDA-010261 上的传导发射结果

测试	IEC 标准	电缆	测试信号		测试说明	标准	测试结果
			场强	频率			
传导抗扰度	IEC 61000-4-6	屏蔽 SPE 电缆	20V	150kHz-80MHz	直流输入中的传导抗扰度	A	通过
	IEC 61000-4-6	屏蔽 SPE 电缆	20V	150kHz-80MHz	SPE 上的传导抗扰度	A	通过
传导抗扰度	IEC 61000-4-6	非屏蔽双绞线	20V	150kHz-80MHz	直流输入中的传导抗扰度	A	通过
	IEC 61000-4-6	非屏蔽双绞线	20V	150kHz-80MHz	SPE 上的传导抗扰度	A	通过

## 6.5 Rad-EMS : IEC 61000-4-3

这是一项技术标准，规定了测试电气和电子设备对辐射射频 (RF) 电磁场的抗扰度的程序。该标准提供了详细的框架来评估器件在暴露于连续 RF 场时的性能，模拟设备可能面临无线电发射器、手机或其他无线通信器件干扰的实际工况。



从技术上讲，该标准要求使用能够在定义的频率范围（通常为 80MHz 到 6GHz 内）内产生均匀场的 RF 发生器、放大器和天线。该频率范围采用 1kHz 正弦波进行 80% 调幅 (AM)。测试设置必须确保在受测设备 (EUT) 所在区域内测得的电磁场强度（以伏每米 (V/m) 为单位）一致。该标准规定，EUT 需要在消声室或半消声室中进行测试，以最大限度地减少反射并确保准确施加电磁场。

IEC 61000-4-3 列出了各种场强测试级别，对于更严格的测试，标准级别通常介于 1V/m 至 10V/m 甚至更高。需在多个方向对 EUT 进行测试，以考虑暴露于电磁场的所有可能角度。在测试期间，需要监测 EUT 是否存在任何性能下降、数据错误或故障迹象。

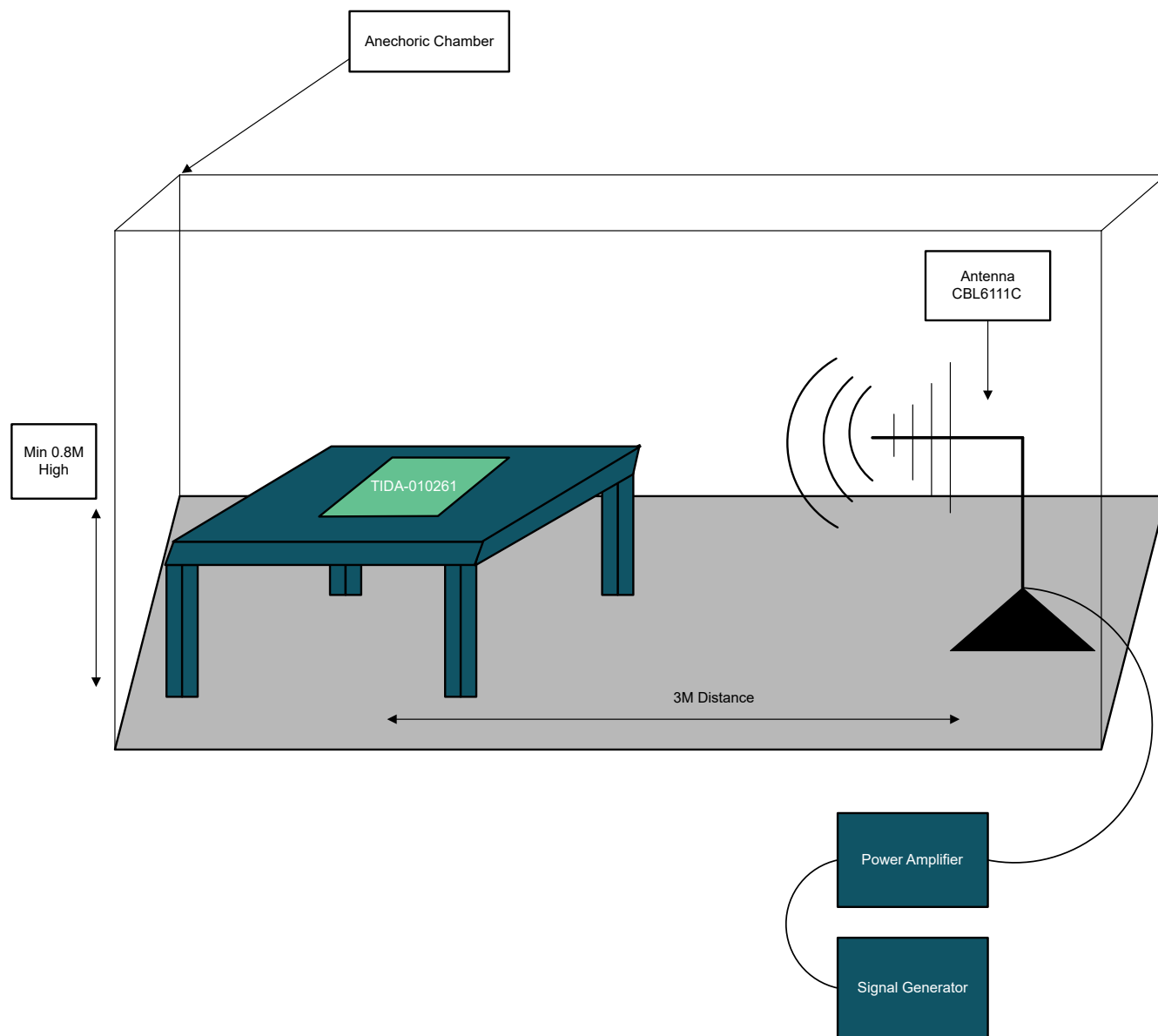


图 6-11. 辐射抗扰度测试设置 (示例)

表 6-5. TIDA-010261 辐射抗扰度测试结果

测试	IEC 标准	电缆	测试信号		天线极化	标准	测试结果
			场强 V/m	频率			
辐射抗扰度 (RI)	IEC 61000-4-3	屏蔽 SPE 电缆	20V/m	80MHz-1GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
	IEC 61000-4-3	屏蔽 SPE 电缆	10V/m	1GHz 至 6GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
辐射抗扰度 (RI)	IEC 61000-4-2	非屏蔽双绞线	20V/m	80MHz-1GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
	IEC 61000-4-3	非屏蔽双绞线	10V/m	1GHz 至 6GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过

## 6.6 传导发射 EN 61000-6-3 EMCL DC (LISN)

该标准规定了控制住宅、办公室和轻工业环境中所用器件电磁发射的要求。该标准旨在确保电子设备不会在 0.15MHz 至 30MHz 频率范围发射过量电磁干扰。

为验证合规性，定义了针对两类发射的测试程序。传导发射使用线路阻抗稳定网络 (LISN) 进行测量，而辐射发射则使用天线和频谱分析仪通常在半消声室或开阔测试场中进行评估。EUT 必须配置为典型工作状态（包括所有连接的电缆和外设），因为这可能会影响发射结果。基于此，我们对直流输入端的传导发射进行了测量。

### Global Graph:

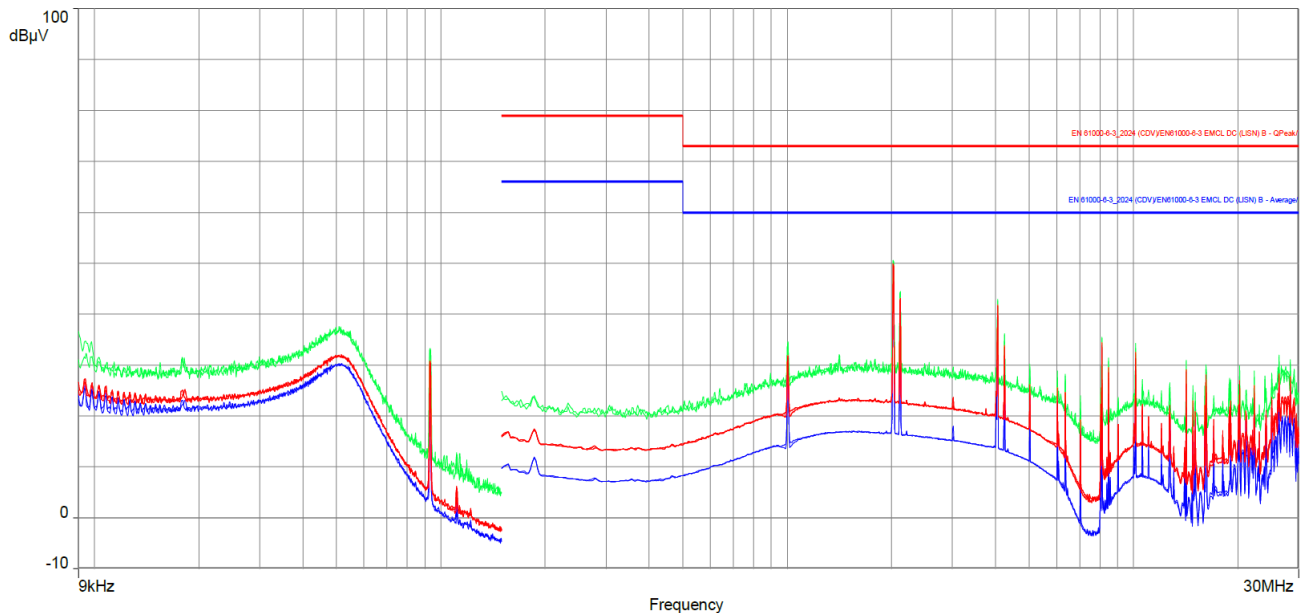


图 6-12. (全局图表) 屏蔽 SPE 传导发射 EN 61000-6-3 EMCL DC (LISN)



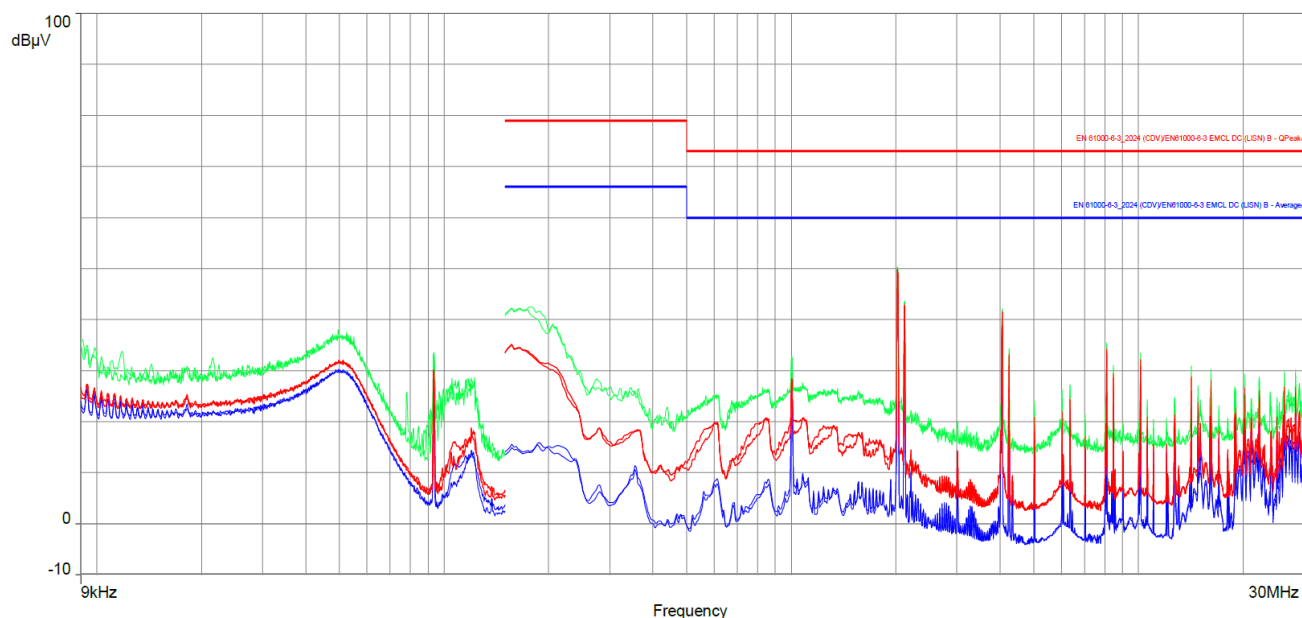


图 6-13. ( 全局图表 ) 非屏蔽双绞线传导发射 EN 61000-6-3 EMCL DC (LISN)

## 6.7 CISPR 32

这是一项国际标准，规定了多媒体设备电磁辐射的限值和测量方法。这包括执行各种功能（如信息技术，音频，视频和广播接收）的器件。**CISPR 32** 的主要目标是确保多媒体设备发射的电磁干扰 (EMI) 水平不会干扰附近设备和系统的运行。**CISPR 32** 定义了传导发射和辐射发射限值。传导发射指沿电源线或信号电缆传输的无用 RF 信号，而辐射发射则指设备直接辐射到空气中的电磁能量。

合规测试需要将 PCB 放置在受控环境（例如消声或半消声室）中，并使用标准化测试设备（包括天线，频谱分析仪 [GS1] 和线路阻抗稳定网络）测量发射。这些设置有助于确保发射水平保持在规定的限值以下，不会干扰其他器件。

在实际中会使用特殊的接收器、更敏感的不同滤波器、不同的检测器。但如今一些频谱分析仪已集成这些功能。

## 6.8 传导发射 CISPR 32 信号

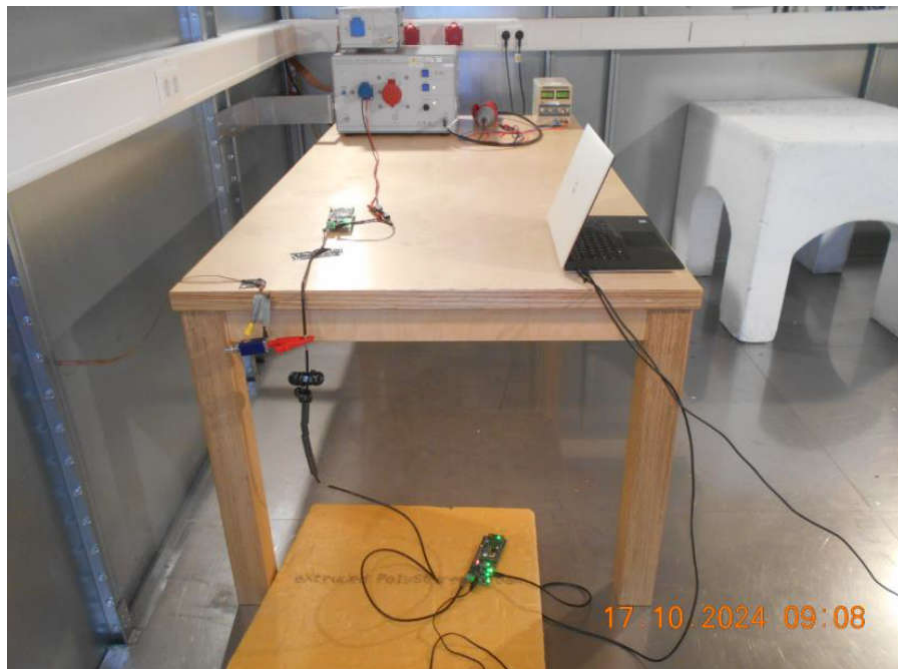


图 6-14. 传导发射 CISPR 32 TIDA-010261

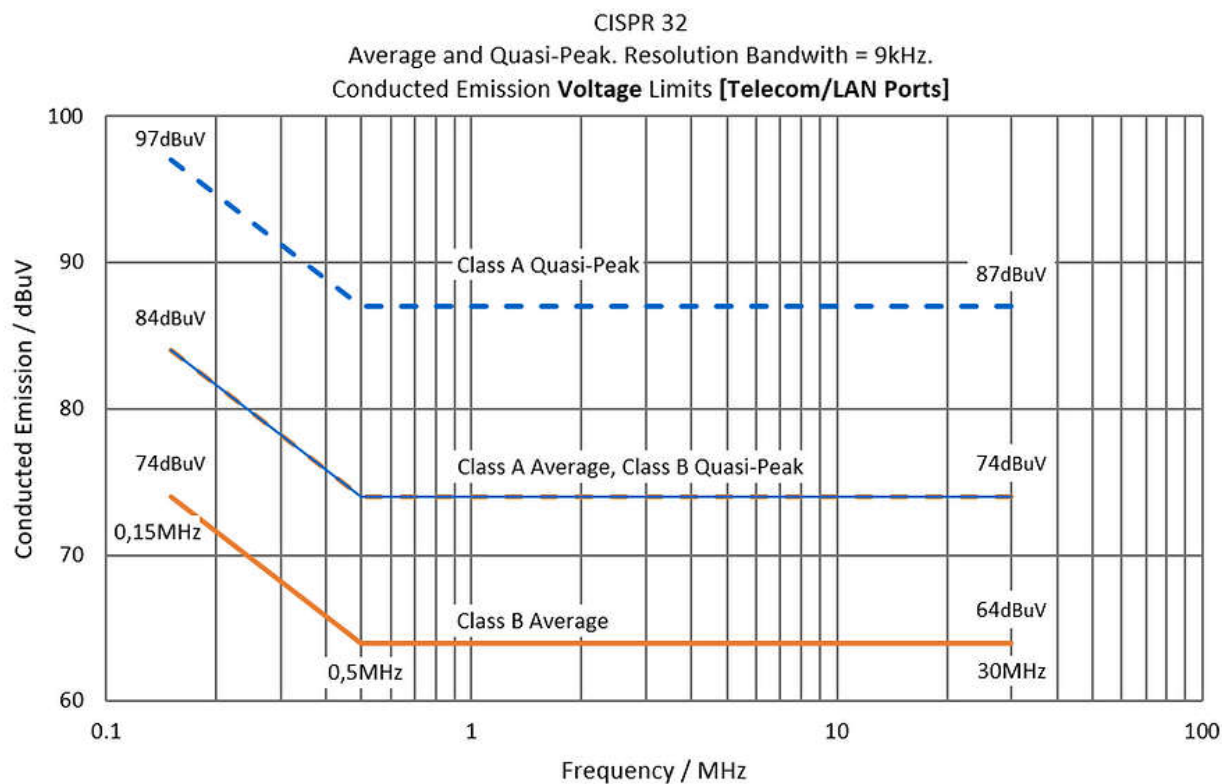


图 6-15. 传导发射 CISPR 32 信号限制

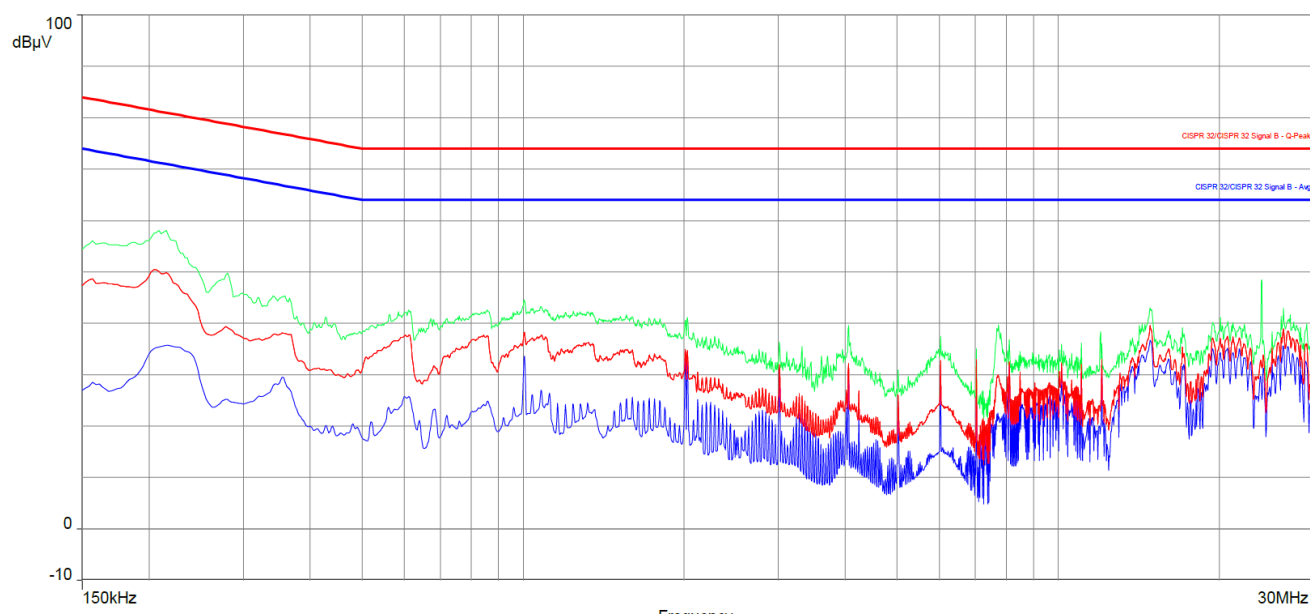


图 6-16. 传导发射 CISPR 32 信号屏蔽 SPE 电缆

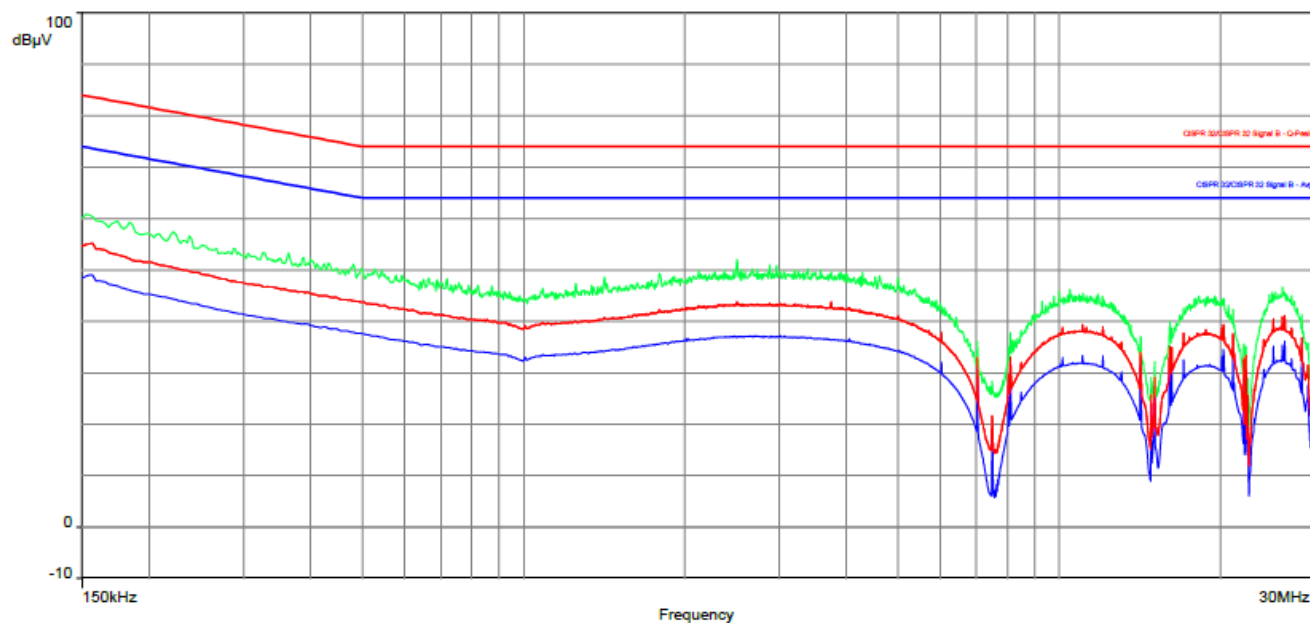


图 6-17. 传导发射 CISPR 32 信号非屏蔽双绞线

## 6.9 辐射发射 CISPR 32 FAR

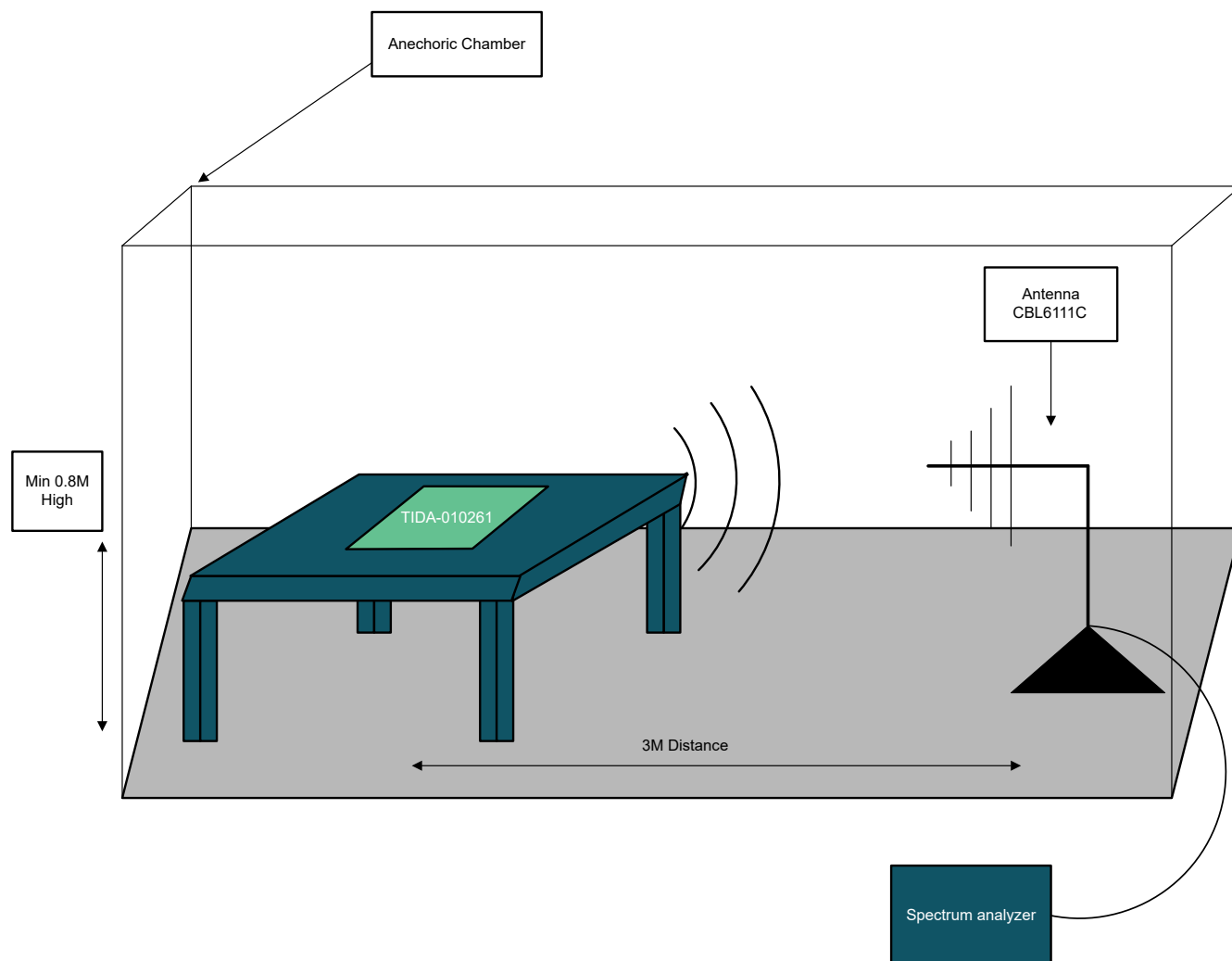


图 6-18. CISPR 32 FAR 测试设置 ( 示例 )

图 6-19 绘制了使用 QP 检波器时，天线与 EUT 距离 3m 和 10m 位置的 A 类和 B 类相关限值线 (EMC Standards)。

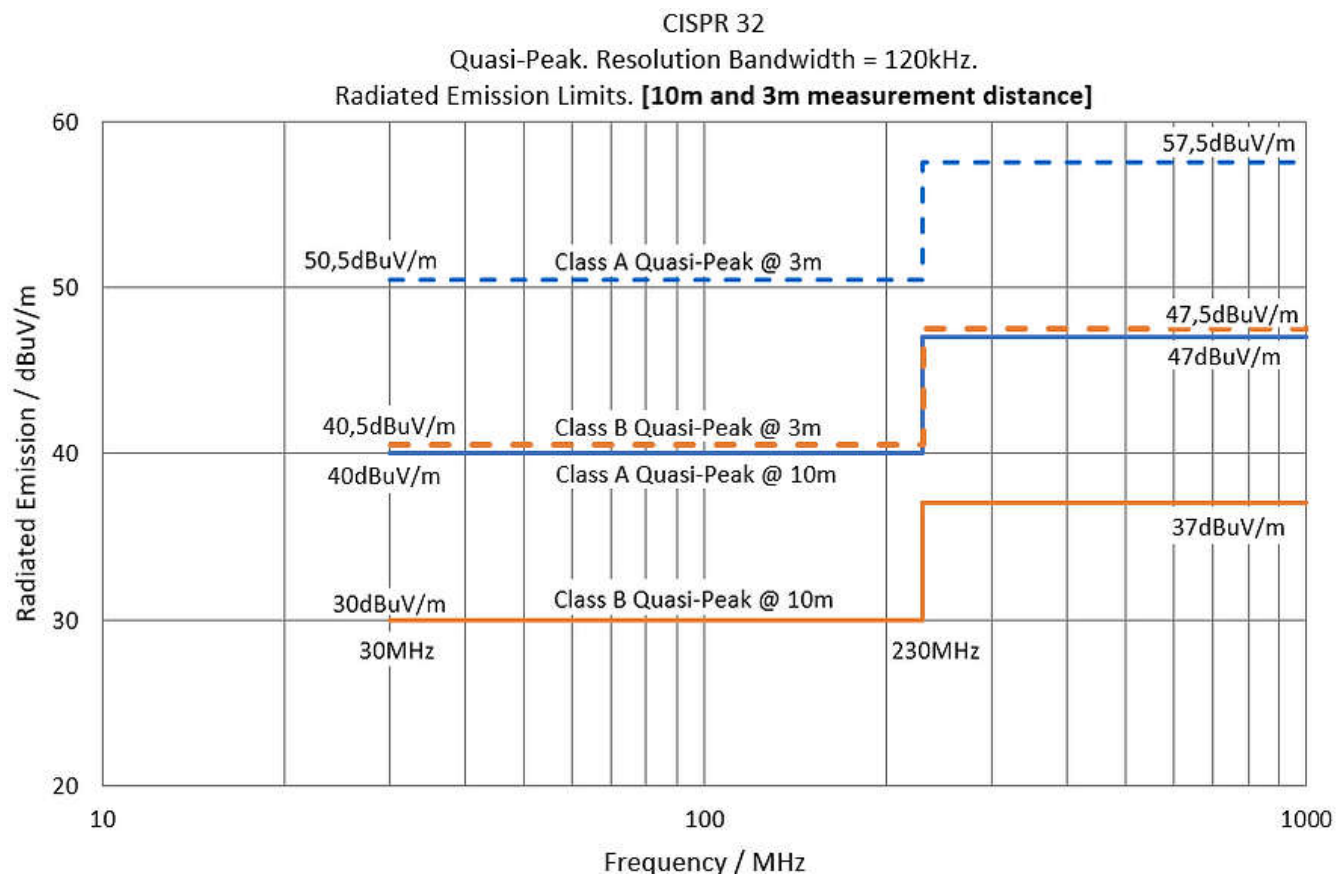


图 6-19. 辐射发射 CISPR 32 限值

表 6-6. TIDA-010261 CISPR 32 FAR 测试结果

IEC 标准	电缆	频率范围 (MHz)	3m 距离	
			A 类 (dBμV/m)	B 类 (dBμV/m)
CISPR 32	屏蔽 SPE 电缆和非屏蔽双绞线	150kHz - 30MHz	43	30
		30MHz 至 230MHz	50.5	40.5
		230MHz 至 1GHz	57.5	47.5
		1GHz 至 3GHz	76	70
		3GHz 至 6GHz	80	74

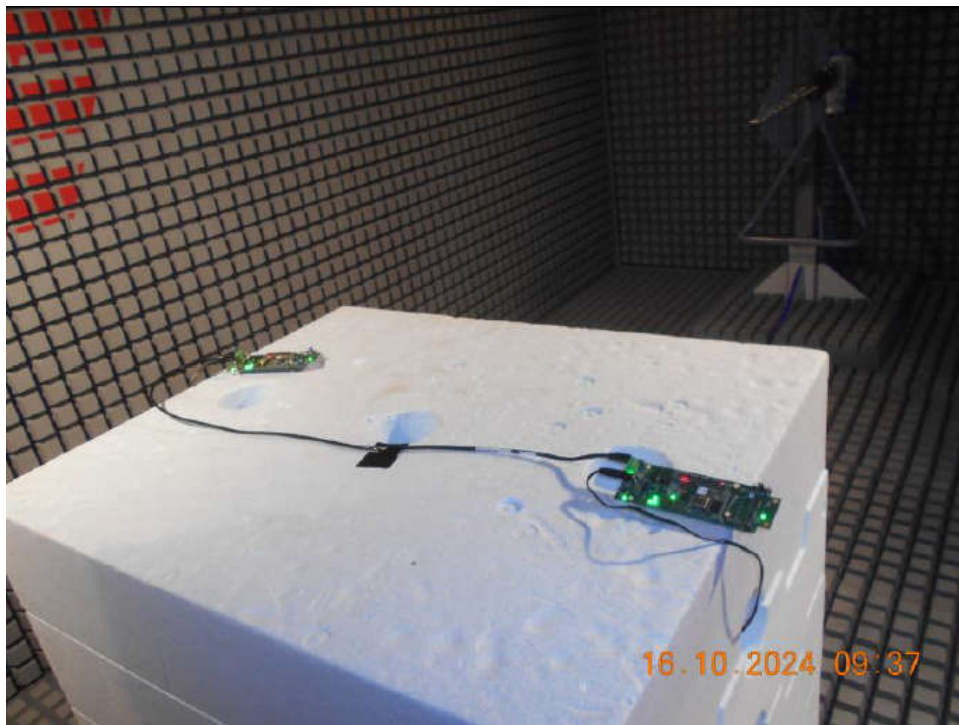


图 6-20. TIDA-010261 屏蔽 SPE 辐射发射测试设置



图 6-21. TIDA-010261 非屏蔽单线对双绞线辐射发射测试设置

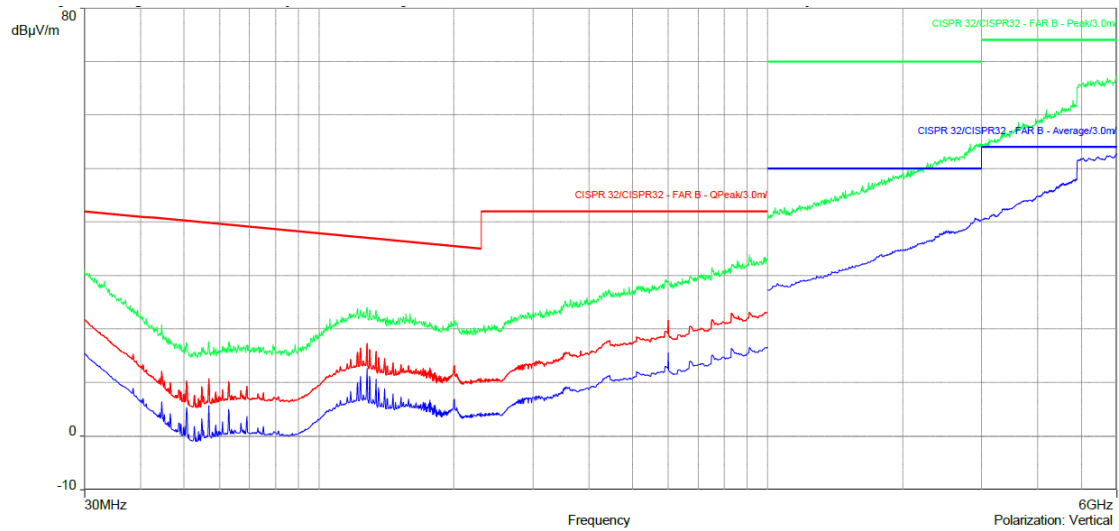


图 6-22. CISPR 32 FAR 信号、辐射发射屏蔽电缆，垂直

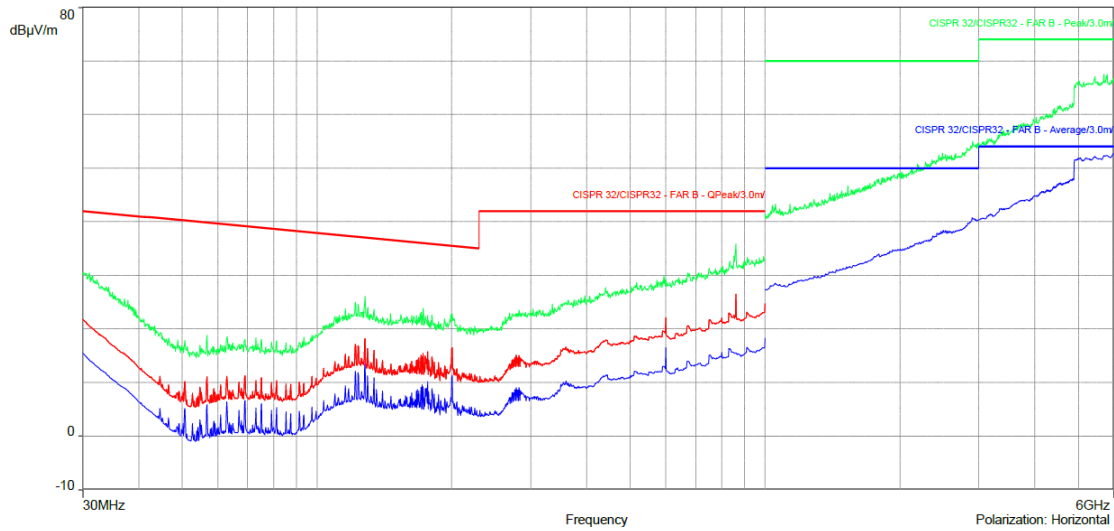


图 6-23. CISPR 32 FAR 信号、辐射发射屏蔽电缆，水平



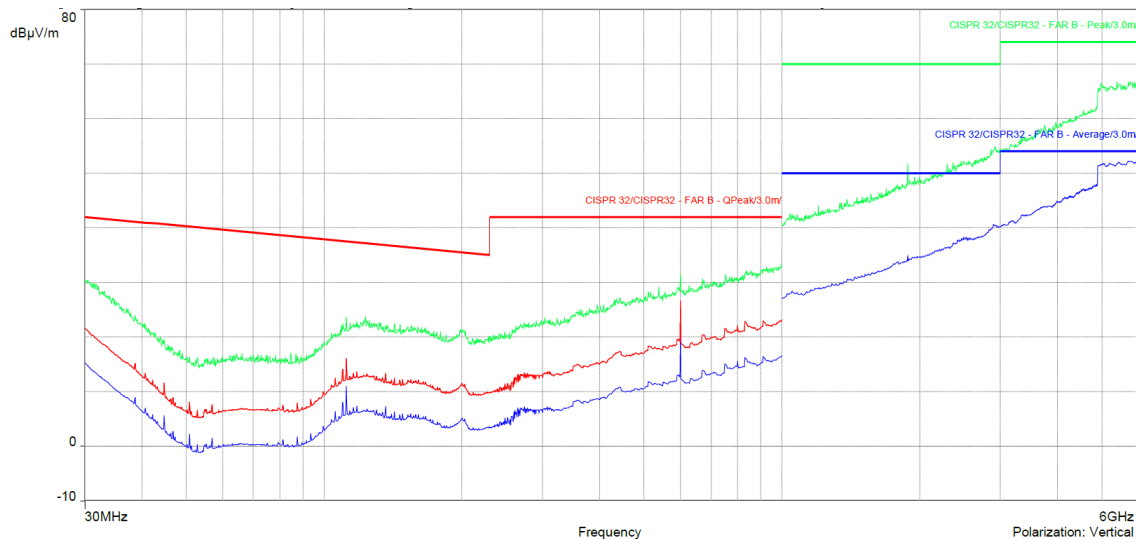


图 6-24. CISPR 32 FAR 非屏蔽电缆，垂直

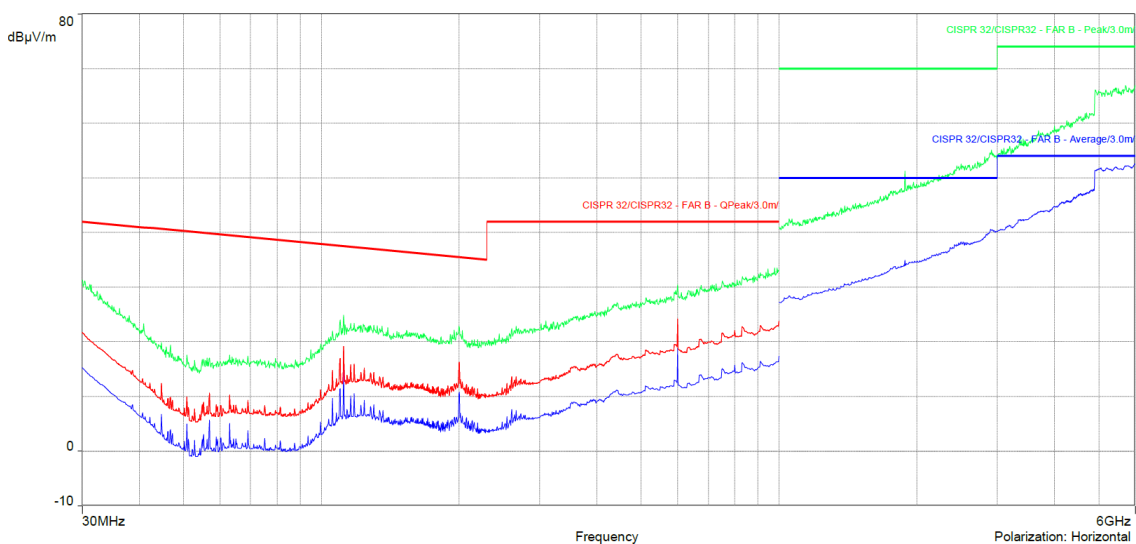


图 6-25. CISPR 32 FAR 非屏蔽电缆，水平

## 7 摘要

所有测试均顺利通过，TIDA-010261 的 EMI/EMC 能力已得到充分验证。

但仍存在进一步改进的空间。例如，SD 卡以 200MHz 的时钟频率运行且上升时间为 1ns。为了减少这些发射，可采用内部 EMMC。为了减轻 EMI 行为，让设计中的布线长度与阻抗匹配至关重要。

## 8 参考资料

1. 德州仪器 (TI) [四通道同步 IEPE 振动传感器接口参考设计](#)，设计指南。
2. Com-Power，[What's the Difference Between EMI and EMC?](#)
3. Digi-Key，[What are EMC and EMI?](#)
4. Compliance Testing，[EMI and EMC Testing Basics Guide](#)。
5. TÜV SÜD，[Electromagnetic Compatibility \(EMC\) Testing](#)。
6. Silicon Labs，[IEC 61000-4-2 ESD System Level Protection](#)。
7. IEC System of Conformity Assessment，[Standard IEC 61000-4-3:2020](#)。
8. Ametek Compliance Test Solutions，[IEC 61000-4-4 EFT/Burst](#)。
9. EMC Standards，[Handbook on EN 6100-4-4: Electrical fast transients and the EN 61000-4-4 test method](#)。
10. Academy of EMC，[EMC Standards](#)。
11. 德州仪器 (TI)，[精密 ADC 系统 EMC 合规性测试](#)，用户指南。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月