

应用指南

ANP116 | 从EMC的角度看千兆以太网接口



Adrian Stirn

01. 引言

在以太网接口的设计中，通常会遇到有关电缆的屏蔽连接和前端设计的问题，特别是有关接地连接的问题。

在互联网上搜索找到的各种有关屏蔽连接的建议，其中常见的建议是使用1nF的Y型电容器。然而，接口对性能和EMC的影响并未说明。本应用文档对使用不同屏蔽连接和配置的以太网接口的EMC性能进行了详细研究，并基于硬件测试提出了设计建议。

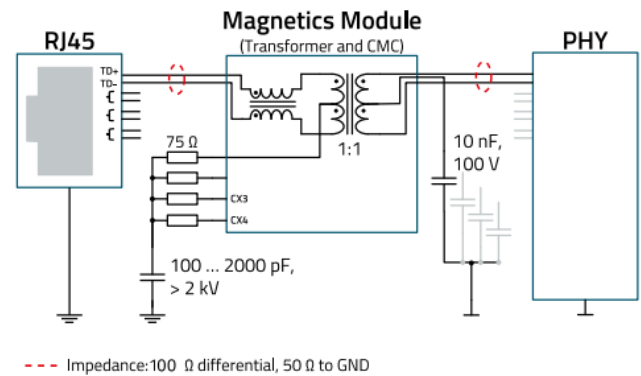


图1：四通道之一的千兆以太网接口示意图

02. 两种千兆以太网总线设计的简要概述

本篇应用文档中用于EMC分析的电子板有两个接口，一个是USB Type-C™ (USB 3.1) 接口，另一个是千兆比特 RJ45/以太网接口。千兆以太网 USB 适配器是基于 Microchip 的 EVB-LAN7800LC 评估板开发的。电路敷设在4层印刷电路板上，在本设计中电路通过USB接口供电。如下文所述，该电路板有两种不同的变体。参考设计说明 RD016 简要介绍了这两种设计。

图1中的元件均为RJ45连接器与物理层 (OSI 模型中的 PHY) 之间的以太网接口运行所必需的。在图2的分立式设计中，变压器和共模扼流圈 (共模电感) 位于网络变压器元件749020310中，而模块化插座 (RJ45) 中不包含图1中的电路元件。

2.1 千兆以太网板的分立式设计

下文对分立式设计进行了简单的解释，概括了以太网总线前端电路所涉及的元件。

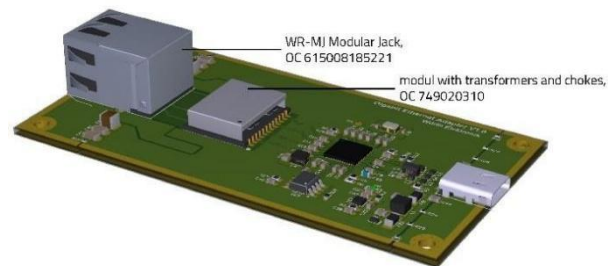


图2：分立式V1.0版千兆以太网USB适配器的图示；带有变压器和共模扼流圈的模块元件位于RJ45插孔旁边

2.2 千兆以太网板的集成设计

在集成设计中，图1中的接口组件和图2中的分立式设计都集成在RJ45内。这样可以节省电路板上的空间，但前端设计的灵活性受到了限制。

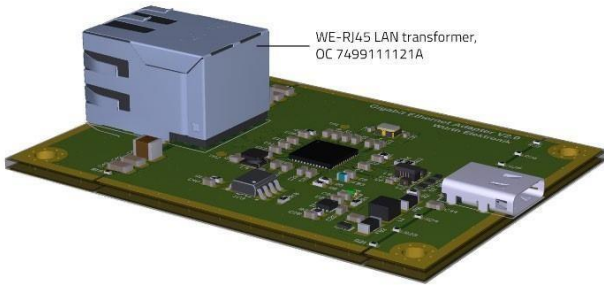


图3: 集成 V2.0 版的千兆以太网 USB 适配器图示。图2 所示模块集成在 RJ4 中

03. 时域测量

以太网信号在时域中是用示波器进行测量的。首先显示分立方案板 (图2) 上的PHY和变压器之间的信号。为此使用了带宽高于4GHz 的低电容差分探头。

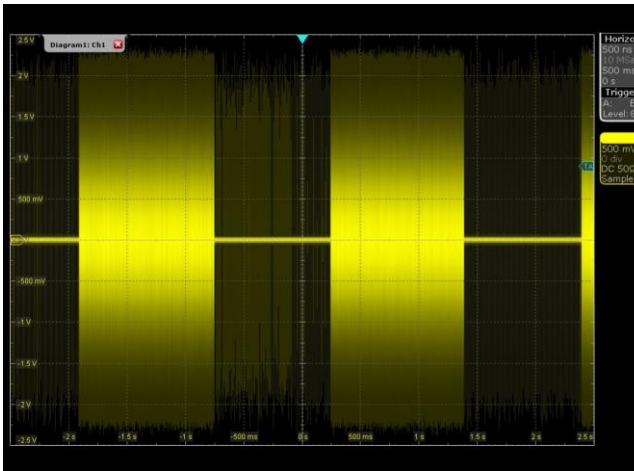


图4: 使用示波器和差分射频探头在时域中测量以太网差分信号对之间的电压

在几个巨型帧上测试信号的测量结果如图4所示。数据的传输大约耗时1秒，所传输的信号由高幅值以及低幅值两部分构成，且它们具有相同的周期，使用这种特殊的测试信号，是为了方便后续对其EMC特性进行分析。

如果缩短测试中扫描的时间跨度，就可以看到单独传输的编码状态。然而，从图5中可以看出，实际无法清晰的识别到预期的PAM-5编码。此外，测量到的信号似乎明显多于5个电压电平。

由于测量技术的原因，此时清晰地识别线路编码是不可能的。为了实现完美的通信和信号检测，需要在 PHY 中对信号进行校正。

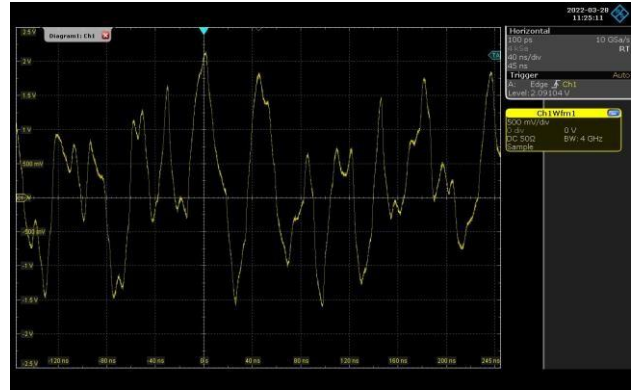


图5: 变压器和 PHY 之间的以太网信号

因此，只有在变压器下游的以太网线缆上进行检测，才能对线路代码进行分析。下图 6 简要解释了变压器下游处 PAM-5 编码的运行情况。反射明显减少，且信号只有5个电压电平，符合预期。

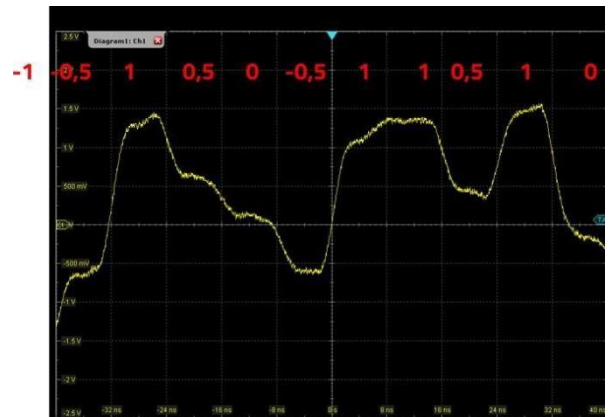


图6: 上图: 变压器和 RJ45 之间以太网信号的线路代码; 下图: 测量设置

分析图6 (上) 中波形的中间上升沿的上升时间可以发现，从 -0.5 状态到 1 状态的上升时间为 3ns。图7展示了变压器和 PHY 之间以太网信号的 FFT。得到的结果是一个包含信号成分的频谱，且信号频率高达 500 至 600 MHz。但由于在高频时，信号处于示波器背景噪声范围内。因此信号在超过 100MHz 以后出现了明显的幅值下降，并且上升时间与衰减在频谱上呈现的关系为每十倍频下降 40 dB，参照 $f=1/(\pi*tr)$ 。

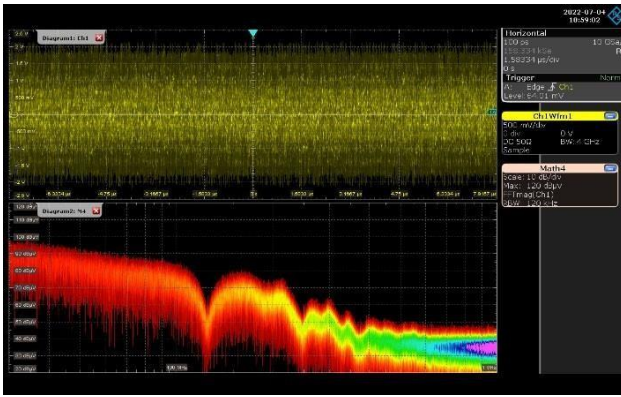


图 7: 变压器和 PHY 之间以太网信号的 FFT (频域) 分析

04. 参考设计的EMC评估

对参考设计的EMC特性调查如下。其中对参考设计所做的大量EMC测试将在下文以简明扼要的形式进行介绍。主要研究结果、应用指南和设计建议将在之后的第05节中再次总结。

4.1 通过使用必要的辅助设备减少EMI影响

用于操作测试板所需的辅助设备 (AE) 可能在抗干扰测试过程中受到干扰, 或者可能会篡改干扰发射的结果。

在EMC性能测试过程中, 存在着一些必须被消除以确保整个测试规范且有意义的干扰效应。本文将介绍这些效应以及消除它们所需的解决方案。本小节旨在为测试方法的优化提供一些建议。

在初始状态下进行干扰发射测试

为了初步了解基板的EMC性能, 将测试设备放入暗室中, 并测量了辐射干扰频谱。图8显示, 该基板的潜在干扰很高。而此时出现的干扰并非由参考设计电路本身产生。

进一步对第一次测量的结果分析表明, 主要的两个干扰源是来自与测试中所使用的笔记本电脑, 并通过与基板连接的线路进行辐射:

1. 屏蔽不良的USB线缆导致120MHz的辐射: 预装USB线缆的电缆屏蔽层与插头的屏蔽层之间的连接通常不够紧密。根据电缆屏蔽的质量和屏蔽连接的类型, 实验装置的干扰辐射会发生变化。
2. 由实验装置中的一台笔记本电脑引起的 4 MHz 辐射: 干扰似乎是由电池充电控制器或其他电压控制器产生的。

在测量设置中, 由于使用屏蔽欠佳的USB线缆与存在干扰信号的笔记本电脑, 导致环境中存在辐射干扰, 使得参考设计的干扰被掩盖在更强的环境干扰中。

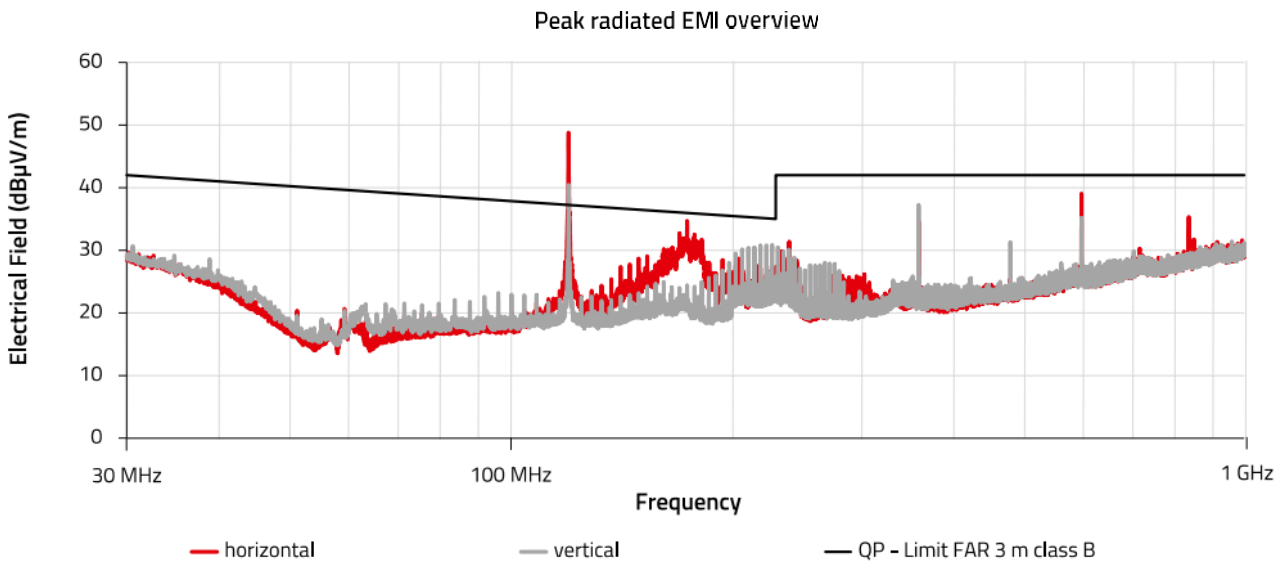


图 8: 第一次快速扫描中的辐射干扰发射

因此，必须考虑到上述测试设置中的这两点，并采取适当措施减少外来干扰。

减少辅助设备的干扰

测试需要两台笔记本电脑来操作和分析接口数据；但这些设备必须在屏蔽箱内操作，以屏蔽其射频辐射。图9中的屏蔽箱就是以此为目的而制作的。



图9: 用于减少辅助设备干扰的屏蔽箱。230V 交流电源通过馈入口的两级滤波器进入屏蔽箱。屏蔽电缆通过屏蔽馈入件连接到封装接地，箱盖采用射频密封，防止电磁辐射通过开口进入。

使用梳状波频谱发生器对屏蔽箱的屏蔽效果进行了测试，该频谱发生器可发出频率步进为20MHz的连续线谱。屏蔽箱可将干扰发生器的辐射最多降低70dB，因此适用于降低笔记本电脑的干扰发射。

此外，屏蔽箱中的笔记本电脑在抗干扰测试期间也不会受到测试干扰的影响。并且使用导电屏蔽胶带 (WE-TS) 可改善USB电缆屏蔽层与USB插头之间的连接缺陷(图 10)。

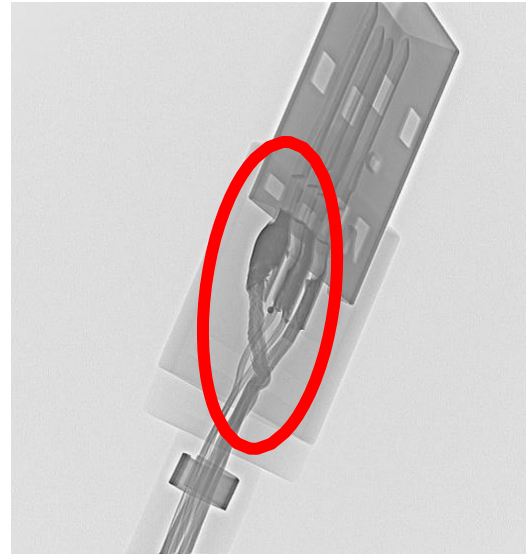


图10: 上图: 采用“猪尾巴设计”的USB 插头屏蔽连接缺陷的X射线图。这种连接方式降低了屏蔽编织的效果; 下图: 使用屏蔽带连接USB电缆屏蔽层, 改善USB 插头的猪尾巴设计。

以上这些措施可显著减少外来干扰。这样就可以对不同测试基板的EMC性能进行分析和比较。

4.2 干扰发射测量的干扰暴露时间、误差标准和观测时间

为了能够可重复地执行EMC测试，必须对以下内容做出定义：

1. 干扰发射时测量接收机的测量时间
2. 干扰在测试设备上的暴露时间
3. 在抗干扰测试中评估测试设备响应的标准

受到干扰的时间和干扰发射的测量时间

要从EMC测试中获得有意义的结果，必须分析被测设备的所有工作状态。图4 显示，沿差分对的数据传输在一秒钟内密度更为密集，而在另一秒钟内较为稀疏。

实验证明，按照这种周期性，干扰会以一秒的时间间隔交替升高或降低。为了测量或测试这两种状态，所有辐射测量和抗干扰测试都在测量或保持时间至少三秒的情况下进行。

抗干扰性评估标准

如前文所述，被测设备是通过两台笔记本电脑操作的。一台笔记本通过USB接口控制被测设备，并向USB-PHY发送数据。这些数据在被测设备中进行转换，并通过以太网接口发送出去。第二台笔记本在被测设备的以太网接口上运行，其中回波软件将接收到的数据发回测试设备。因此，可以检查接口可能存在的数据丢失、以及数据的错误率和传输速率。这些信息可通过控制软件在第一台笔记本电脑（测试设备的USB接口）上读取。

在此过程中我们注意到，数据传输速率在很大程度上取决于辅助设备的外部影响。例如，当一台笔记本电脑进入节能模式，Windows操作系统会降低处理器（CPU）的工作频率，接口速度也会相应降低。不过，这种速度降低并不是受外部干扰影响造成的，而是由于计划外的软件状态改变所致。同样当存储的数据在操作系统中发生移动时，数据传输速率也会部分下降。

因此在评估抗干扰时必须考虑到这些因素的影响，必要时，还必须重新测试计算机操作系统对信号的影响（见图 11）。

图 11 显示了测试期间对错误和数据传输速率的监控。由于以太网协议中使用了校正和控制位，在笔记本电脑性能达到最大值的情况下，可以在不受干扰的状态下传输约850Mbps的数据。下表1列出了评估标准。

测量变量	绩效标准	技术标准
数据传输速率	A	在 850 Mbps 的范围内 (Windows 操作系统导致的错误和波动未评估)
	B	速度降至 800 Mbps 以下 (图 11 示例)
	C	连接失败
错误率	A	0 %
	B	100 %
	C	连接失败，用户需要重新启动

表 1: 测试设备的评估和性能标准

抗干扰测试表明，以太网接口要么以全速运行，要么在受到影响时立即降到20Mbps至50Mbps之间，要么通信完全失败。造成这种情况的原因是以太网协议中非常有效的纠错功能，

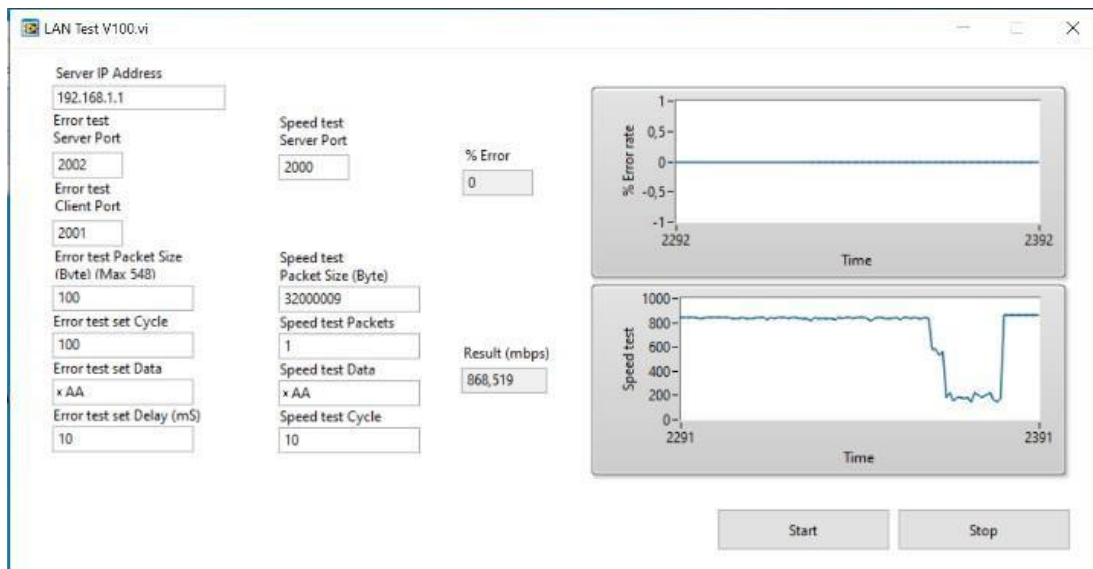


图 11: 使用笔记本电脑应用程序监控测试设备。速度下降是由外部干扰引起的。

它在不同的软件层中工作，可检测和纠正多种错误，几乎达到100%的纠错率。摄像头对准用于监控的笔记本电脑，可有效监控测试设备的性能。

4.3 用于参考设计EMC分析的测试装置和辅助设备的测试

设置

根据上文所述的对必要辅助设备的EMC要求，图12中所示的测试设置由屏蔽箱、以及其中的两台笔记本电脑、一根以太网线缆、一根USB线缆和测试基板组成。

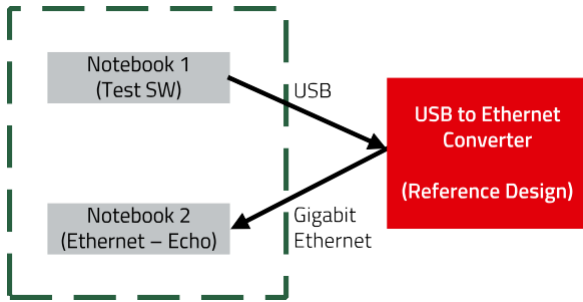


图 12: 用于分析以太网参考设计EMC性的测试装置

测量和测试的重点是以太网接口。因此，在辐射测试中，所使用的USB线缆较短，以太网线缆在测试台上的长度为一米。其他EMC测试的重点也是以太网接口，因此没有针对USB接口进行测试。测试相关设置可参考应用文档——[ANP105](#)。

4.4 电缆类型对干扰发射的影响

在一系列测量开始时考虑了不同电缆类型对于干扰辐射的影响。因为只需在测量之间简单地进行电缆的更换，无需根据电缆类型调整特殊的耦合网络，所以非常容易操作。

在使用屏蔽电缆时，可以假定电缆屏蔽层与测试设备的接地（GND平面）连接符合射频标准，因此干扰发射可被降至最低。在此基础上，为了比较不同类型的电缆，选择了一块集成式RJ45以太网接口模块（以太网插座中的变压器和共模电感）和具有直接屏蔽连接（屏蔽层和地平面之间的二维短路）的电路板，在此基础上测试不同线缆间的差异。

以下是电缆类型之间的比较：

1. 屏蔽电缆：
 - CAT8.1S/FTP：编织屏蔽作为外屏蔽。单个差分双绞线采用箔屏蔽。
 - CAT5E SF/UTP：用于商业和办公领域的标准以太网电缆。所有芯线均使用箔片和轻编织层进行简单屏蔽。差分双绞线没有屏蔽，因此线对之间可能存在耦合。
2. 非屏蔽电缆
 - CAT5E U/UTP：无屏蔽，差分线对为双绞线对

辐射测试中使用的电缆长度为3至5米，就抗干扰性而言，可能不适用于更长的以太网电缆，因为在这种情况下，每对线之间的耦合可能会更大。

辐射抗干扰能力比较

根据 IEC61000-4-3标准，对不同电缆的抗干扰能力进行了测试。结果表明，在80MHz至3GHz的频率范围内，两根屏蔽电缆在干扰期间的“性能标准 A”至少为 20V/m，而非屏蔽电缆为10 V/m。因此，这两种屏蔽电缆在辐射抗干扰测试中的性能相当。

由于线路长度仅为3至5米，当线缆越长时，干扰的耦合越强，信号的误差率可能越高。

辐射比较

以下两图显示了使用不同以太网电缆时的干扰辐射情况。

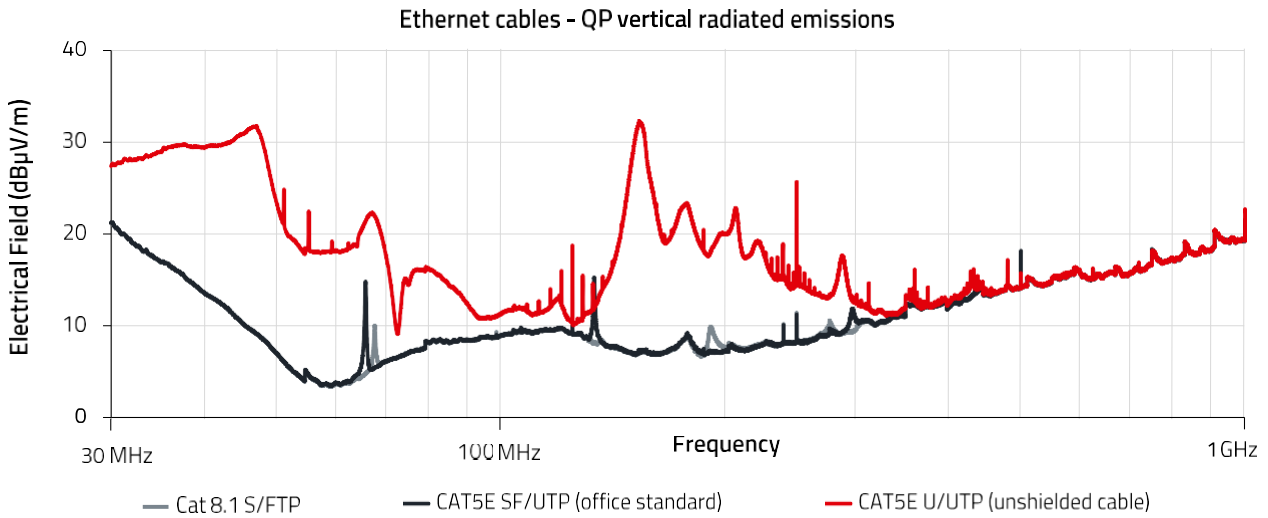


图 13: 采用集成接口设计的不同电缆的辐射干扰比较 - 垂直极化

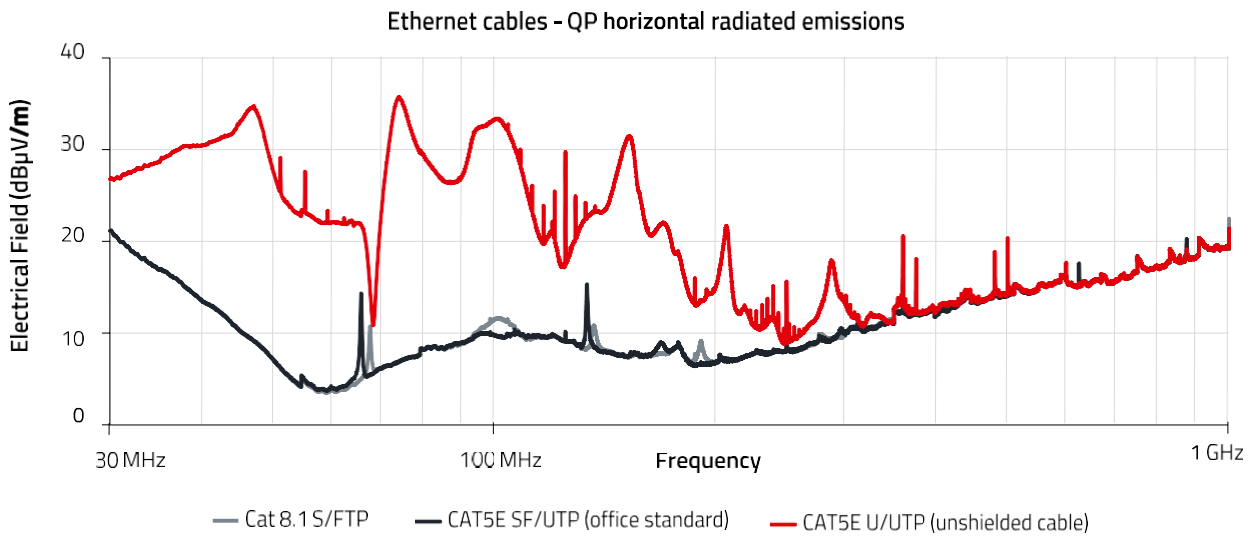


图 14: 采用集成接口设计的不同线路的辐射干扰比较 - 水平极化

图13和图14显示，非屏蔽以太网电缆的辐射干扰比另外两种屏蔽电缆高出 20dB。另一方面，CAT5E SF/UTP 和 CAT8.1 S/FTP 之间的差异较小。使用质量明显更高的CAT8.1电缆可将远场干扰发射降低5dB。使用这两种屏蔽电缆时，干扰频谱接近背景噪声。

可供进一步考虑的以太网电缆

由于两种屏蔽电缆的结果相似，因此将使用CAT5E SF/UTP (屏蔽) 和CAT5E U/UTP 电缆进行进一步的测试和测量。

4.5 屏蔽连接

如第4.4节所述，屏蔽层（以太网插座）与电子元件（接地层）的不同连接方式会影响EMC性能。这里对不同类型的接触进行了比较：

1. 完全接触：插口（底盘）的屏蔽层直接与电路板的地平面相连。
2. 1nF Y电容器：网上资料中经常提到的经典连接方案，由一个容值1nF的SMDY电容器和一个并联的1MΩ SMD电阻器组成。
3. 两个10nF的 MLCC电容器：由两个10nF的MLCC（100V型）和一个并联的SMD过压保护器组成的电容屏蔽连接。过压保护器用于保护电容器免受瞬态过压损坏。

- 4. 一个10nF的MLCC电容器：电容屏蔽连接是由一个10nF MLCC（100V型）和一个并联的SMD过压保护器组成。过压保护器可保护电容器免受瞬态过压损坏。

下面将对各种屏蔽连接方案进行比较。

使用不同屏蔽连接的屏蔽 CAT5E SF/UTP 线缆。

以太网网络采用屏蔽和非屏蔽两种基本不同的设计。图15显示了传导干扰辐射的差异。如图13和图14中的辐射所示，非屏蔽线缆的干扰比屏蔽电缆高20dB。

传导干扰发射

根据 CISPR 32，使用 CDN（耦合去耦网络）测试以太网线缆的非对称干扰。并将结果与非屏蔽 CAT5E U/UTP 电缆进行比较。

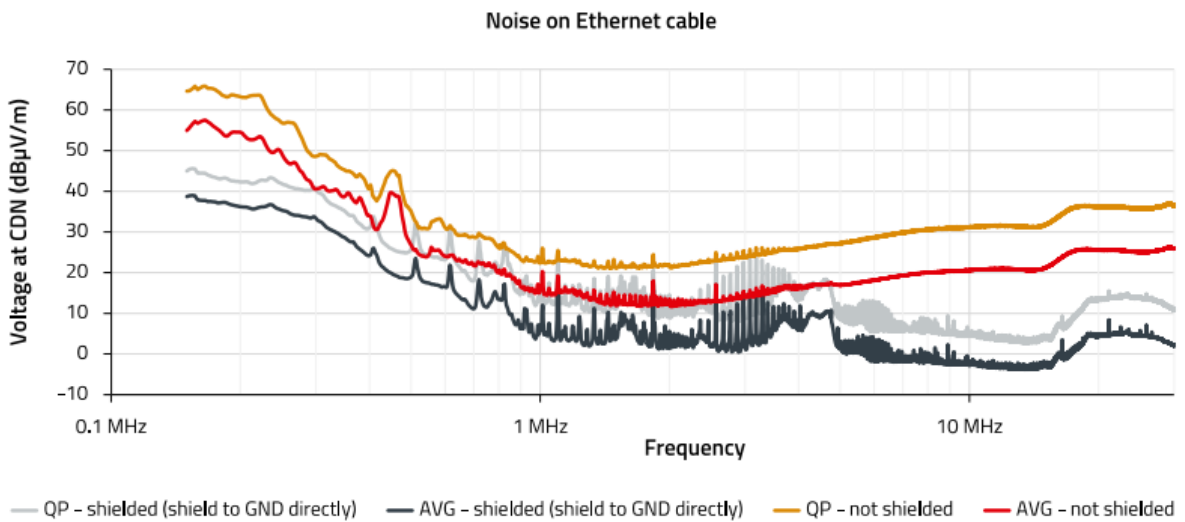


图15: 屏蔽和非屏蔽线缆上的传导干扰电压比较

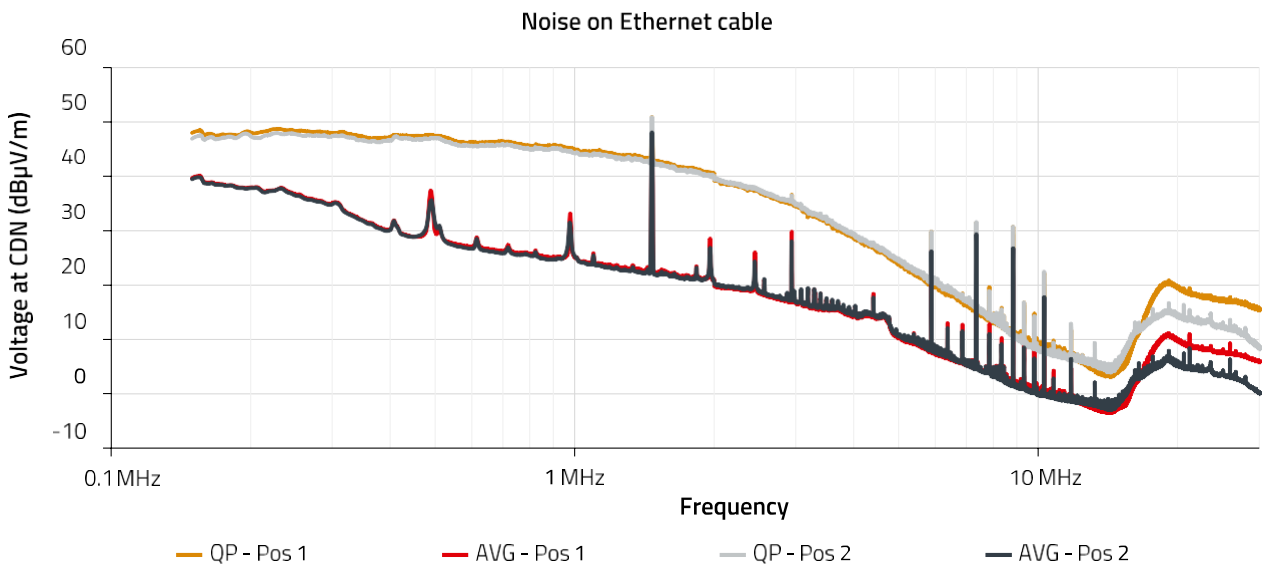


图16: 以太网电缆上的传导干扰发射。带10n的 MLCC 和过压保护器的屏蔽连接，两个元件彼此面对放置；灰色与红色曲线对比：两个元件的位置互换

如果屏蔽以太网接口仅有一个电容与模块的接地平面相连，这种设计存在不对称的风险。这会影响电路的EMC性能，因为由于耦合效应，干扰电流会在电路板中分布不均。

图 16和图 18（辐射频谱图）显示，电容器的位置（连接器的右侧或左侧）会影响干扰发射。因此，建议在两侧进行连接。

通过测量电缆屏蔽上的非对称传导干扰发射来测试不同类型的屏蔽连接

图 17显示，从EMC性能的角度来看，直接的-即低阻抗的电气连接

（图 17 中的深蓝色曲线）更为理想。虽然使用1nFY型电容器的连接方案经常被提及，但在30MHz以下的频率范围内，该方案却具有最高的干扰发射。实际上如果需要屏蔽层和地平面（即接地）之间的电容隔离，从EMC性能角度考虑，建议使用两个10nF电容器和一个过压保护器的配置。

辐射干扰发射

目前还在射频干扰领域检查了针对传导发射测量的配置。图13和图 14展示了这些结果。非屏蔽电缆的干扰发射比屏蔽电缆高 20 dB。

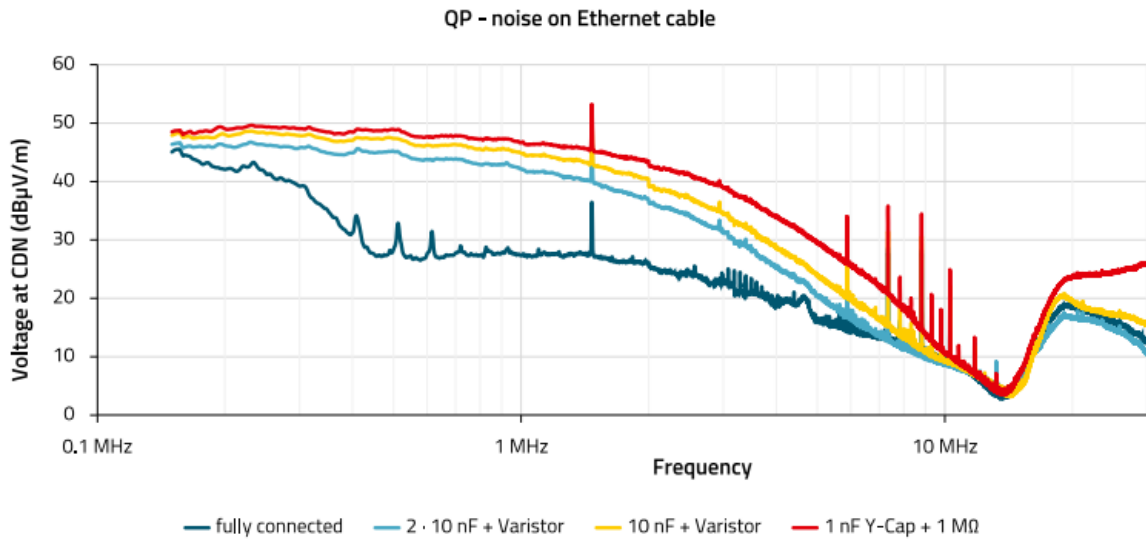


图 17: 不同屏蔽连接处的传导干扰（准峰值检波器）

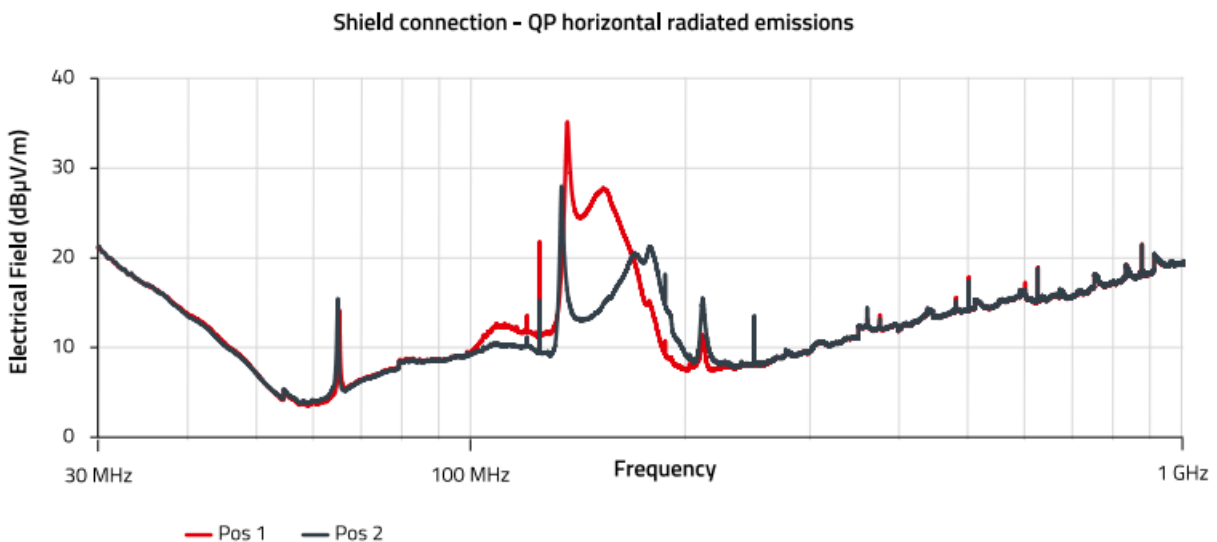


图 18: 使用 10nFMLCC电容器和过压保护器连接以太网线路屏蔽时的水平极化辐射干扰发射。两个元件的位置对调（红色对灰色）的情况

Shield connection - QP horizontal radiated emissions

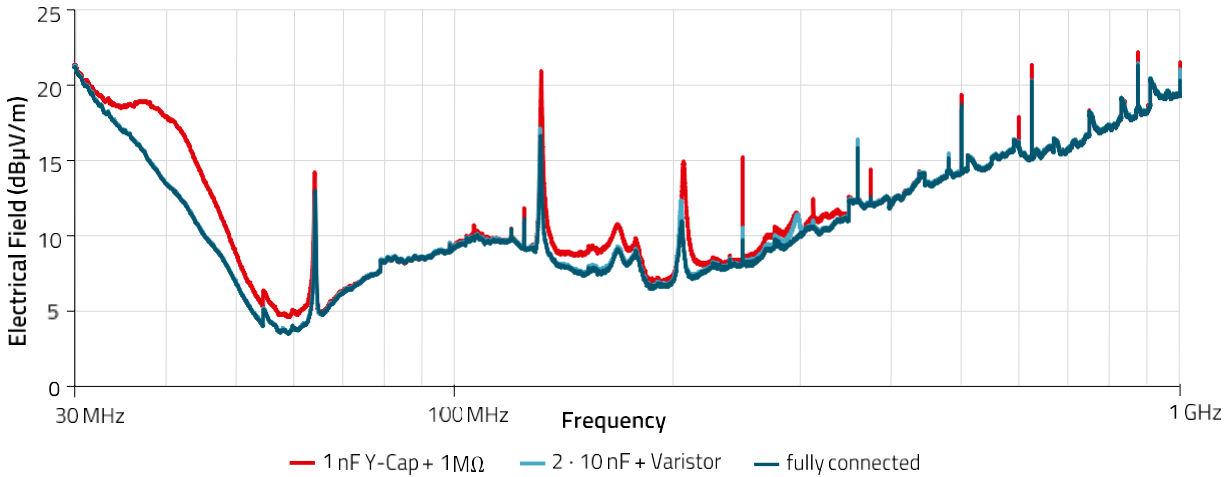


图 19: 水平天线极化时不同屏蔽连接的辐射干扰发射

单个电容器的位置也通过在射频干扰场中的测试进行了比较。与图16中的传导发射相比，图18中的辐射发射差异更为明显。根据电容器位置的不同，辐射发射可相差10dB。如果在印刷电路板布局过程中无法预测到这一点，例如事先进行实验，那么屏蔽连接在应用中的有效性将充满偶然性，不再可靠。

与传导干扰发射测试类似，在辐射干扰发射测试中也需要比较不同的屏蔽连接。上文已经展示，电容器的位置可能会对测试结果产生影响。从图19中可以看到：对直接的电气屏蔽连接、与两个10nF电容器连接以及只有一个1nF Y型电容器，以上三者进行了比较。

从图19可以看出，使用两个10nF电容的屏蔽连接所产生的干扰发射与屏蔽直接与地平面电气连接所产生的干扰发射相当。但只使用1nF Y电容器的屏蔽连接相比其他两种方案差5dB的噪音抑制。

4.6 辐射干扰发射

图中显示了辐射干扰发射的结果，并对分立式设计和集成式设计进行了比较。

集成以太网变压器的参考设计的许多结果已在第4.4和4.5节中展示。以下各小节将在适当的地方提及已经展示的结果。

集成以太网接口设置的测量结果

结果如图7、图8、图9和图13所示。

分立式以太网接口设计的测量结果

在分立式设计中，使用非屏蔽电缆和屏蔽 CAT5E SF/UTP 电缆对参考设计进行了测试，屏蔽连接有两种类型：两个10nF电容、过压保护器和1nF Y电容。如下图所示，与分立设计类似，如果无法直接连接屏蔽层，最好采用两个10 nF电容器的屏蔽连接更为理想。

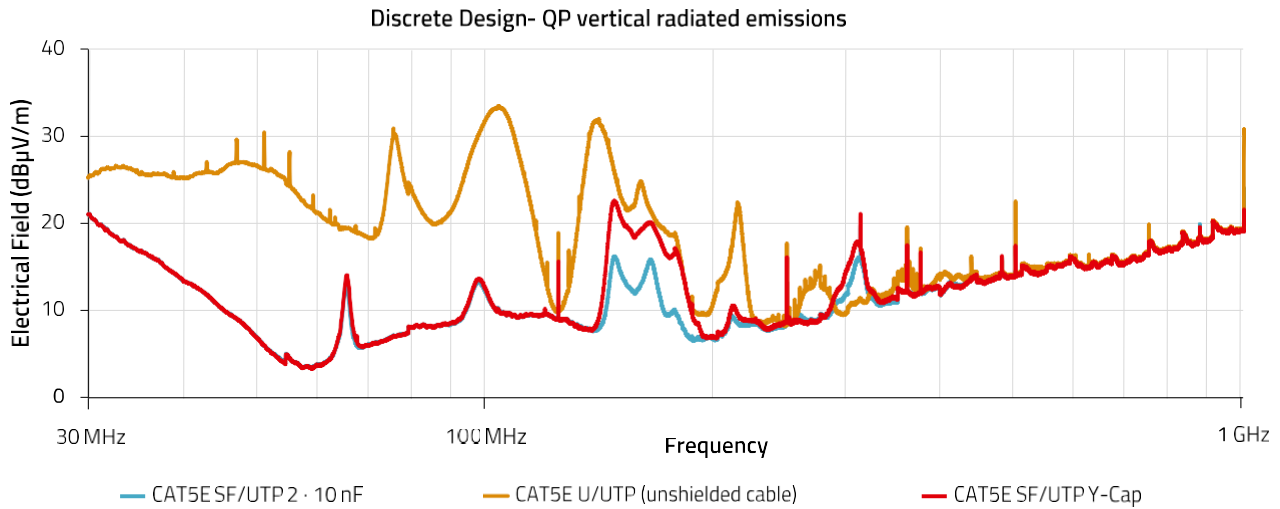


图 20: 水平极化时非屏蔽电缆的辐射干扰发射

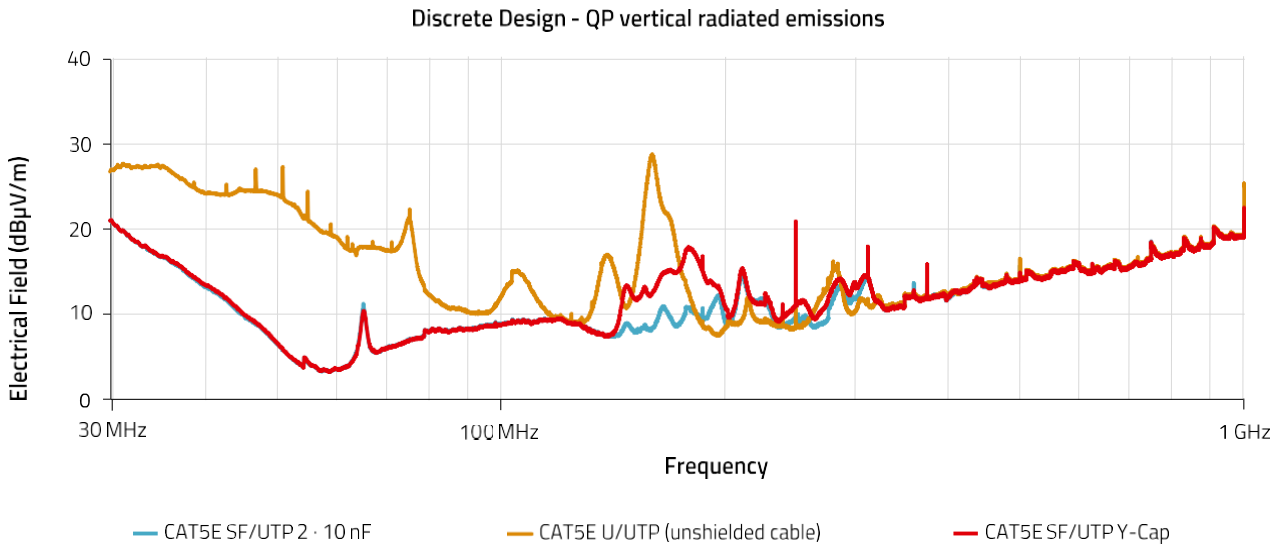


图 21: 垂直极化时非屏蔽电缆的辐射干扰发射

集成接口设计与分立接口设计的直接比较

下面直接比较了两种具有不同屏蔽连接的设计。辐射干扰发射的测量结果与适用的CISPR32标准B类限值进行了比较。

下面两张图显示，如果使用非屏蔽电缆，两种设计的干扰发射程度大体相当。甚至集成式以太网端口的电路板在某些频率范围内的辐射量略高。

这两种设计在使用非屏蔽电缆时都低于住宅用B类限值，并通过了测试。不过，如果使用非屏蔽电缆，与限值的差值很小。使用屏蔽电缆可显著降低辐射干扰噪声。

使用分立式元件的测试板发射率较低的原因各有不同。首先使用机器绕制的变压器确实可以提高对称接口的对称性。

然而，不可否认的是在集成以太网变压器模块中集成元件会导致元件封装密度较高，从而提高元件之间的电场和磁场耦合，增加以太网线缆的辐射。

但毫无疑问的是，在这两种设计中使用屏蔽电缆可降低辐射干扰频谱的幅度。

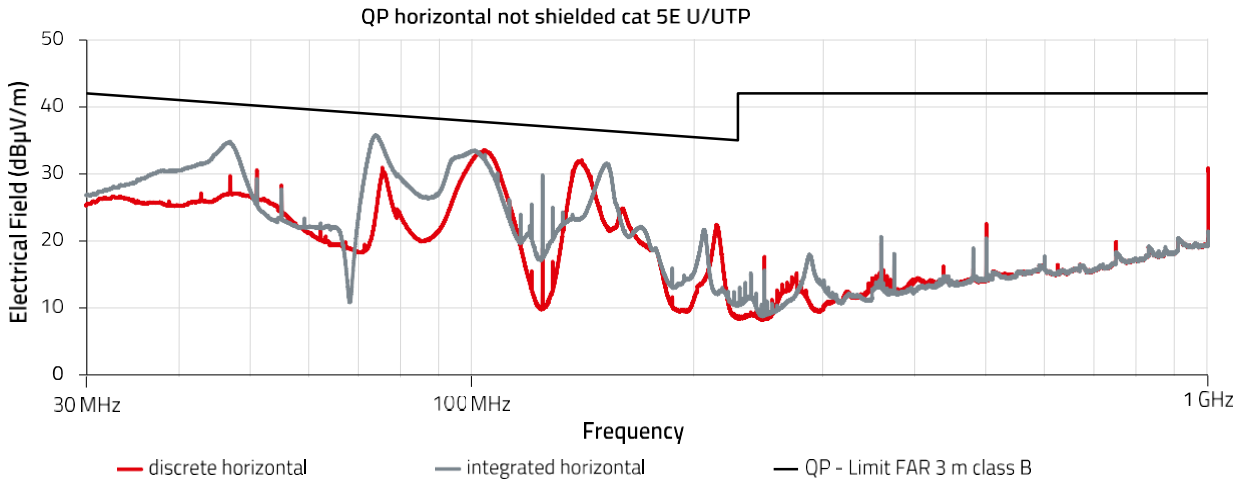


图 22: 水平极化时非屏蔽电缆的辐射干扰发射

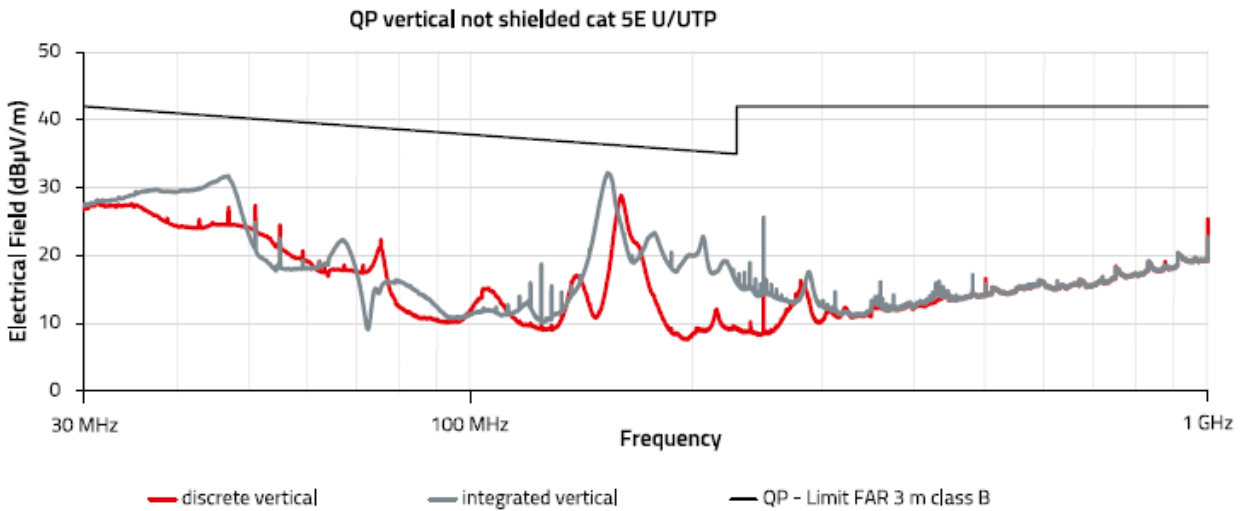


图 23: 垂直极化时非屏蔽电缆的辐射干扰发射

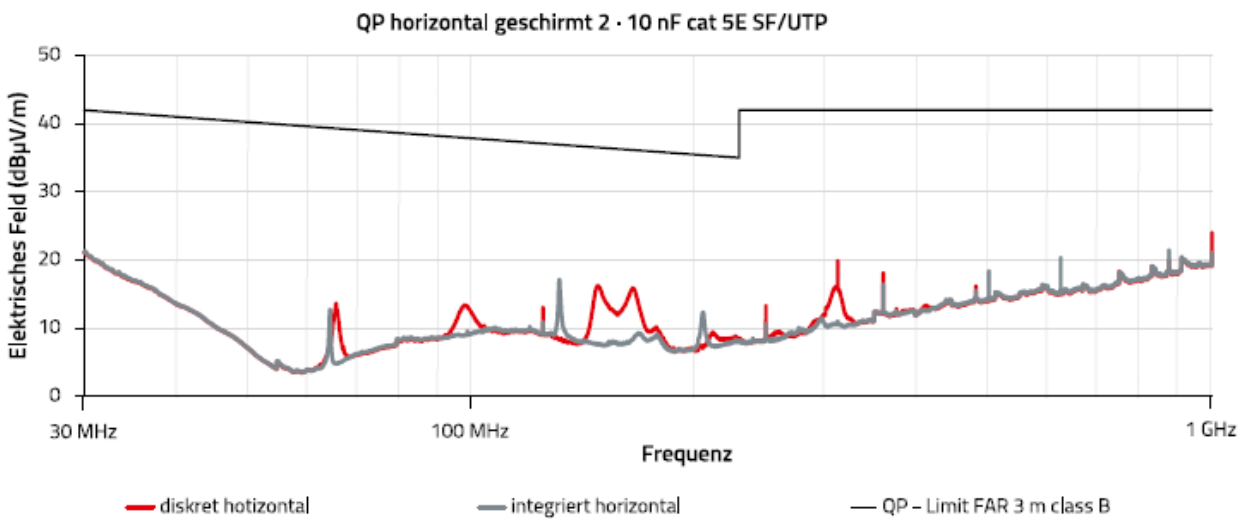


图 24: 在水平极化情况下, 使用两个10nF电容器连接屏蔽时的辐射干扰发射

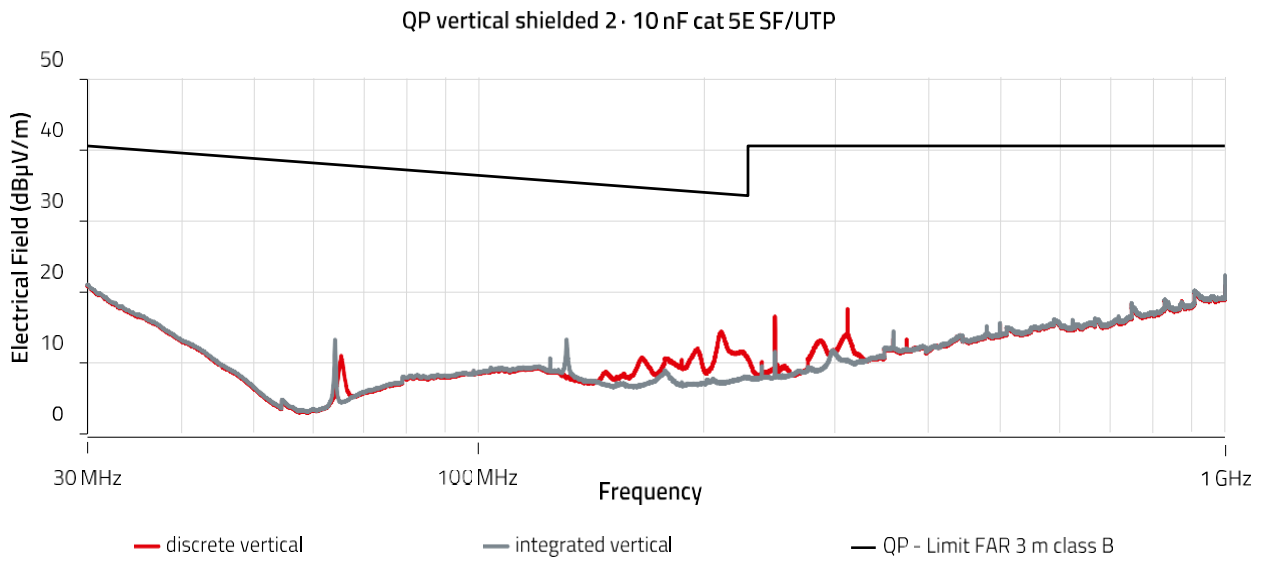


图 25: 垂直极化时, 屏蔽层与两个10nF Y型电容器连接时的辐射干扰发射情况

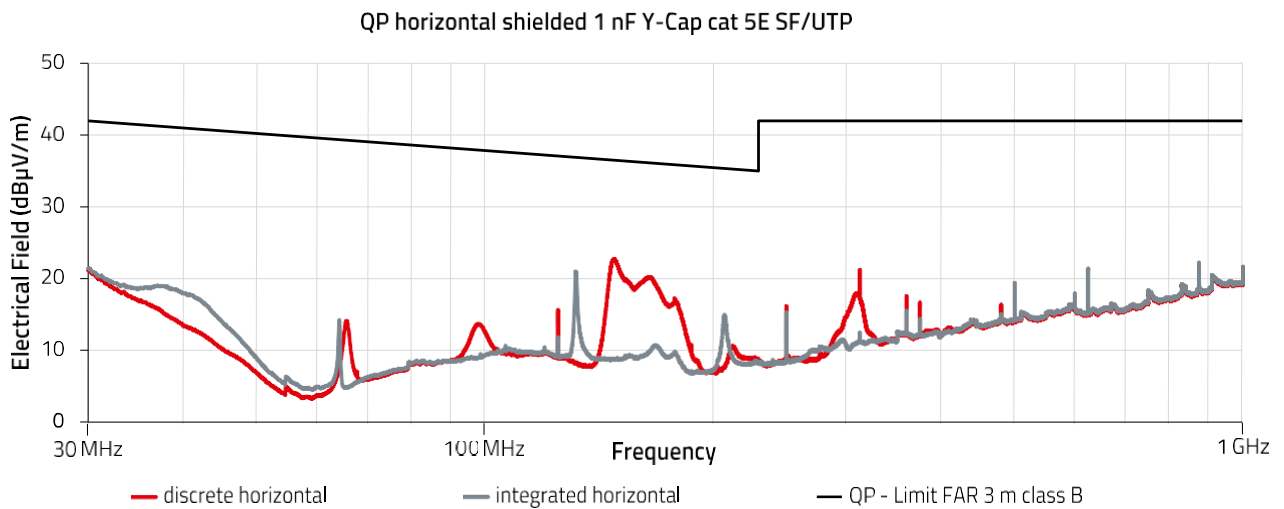


图 26: 辐射干扰发射, 在水平极化情况下使用一个1nF Y型电容器进行屏蔽连接

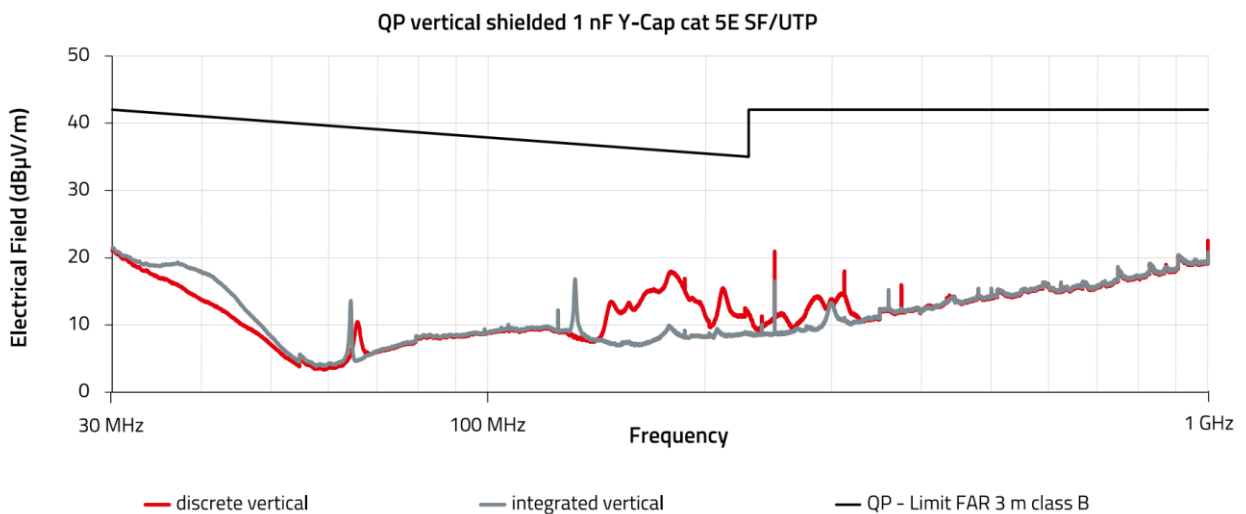


图 27: 辐射干扰发射, 在垂直极化情况下使用一个1nF Y型电容器进行屏蔽连接

如上文所述，线缆方面最好使用带有两个10nF电容器的屏蔽连接。关于网络变压器的集成与分立设计，这两种设计虽在辐射方面各有不同，但在其与限制的余量方面则不相上下。通常，分立式设计所发出的干扰带更宽一些。

4.7 传导干扰发射

图中显示了传导干扰发射的结果，并对分立式设计和集成式设计进行了比较。

集成以太网变压器的参考设计的许多结果已在第4.4和4.5节中展示。以下各小节将酌情引用已展示的结果。

集成以太网接口设计的测量结果

结果如图9、图10和图11所示。

分立式以太网接口设计的测量结果

正如前面的结果所预期的那样，屏蔽电缆的干扰发射较低，分立式设计也是如此。在图28中，我们将一个具有电气直接屏蔽连接和CAT5E SF/UTP电缆的接口与一个使用非屏蔽 CAT5E U/UTP电缆的接口进行对比。

很明显，带屏蔽和电气直接连接电缆屏蔽层的接口在整个频率范围内的干扰水平都较低。

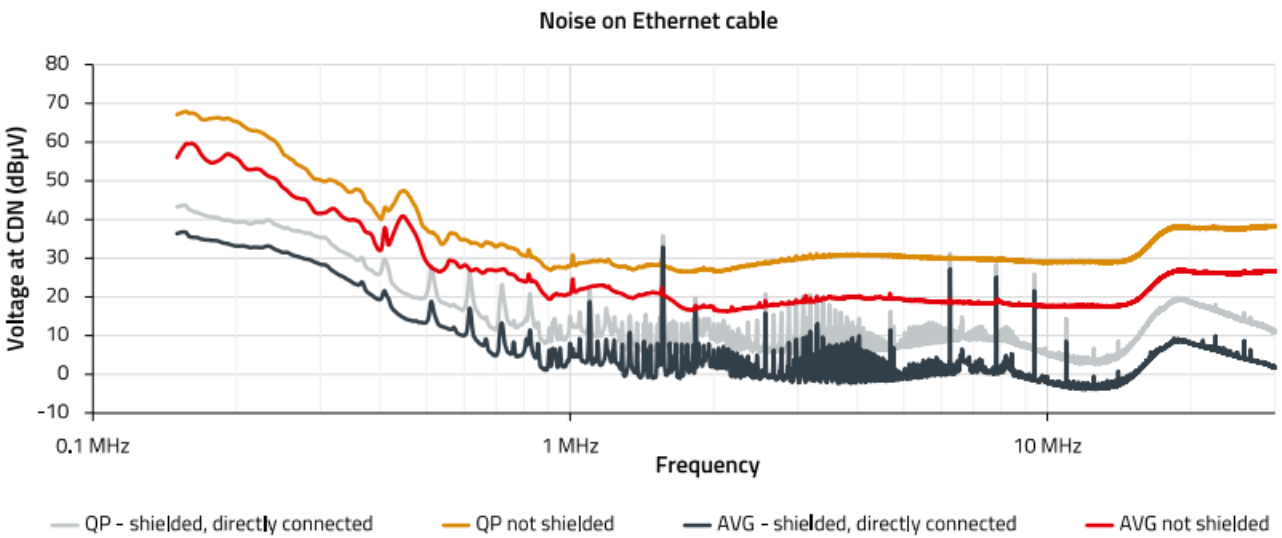


图 28: 屏蔽、直接电气连接与非屏蔽电缆的比较

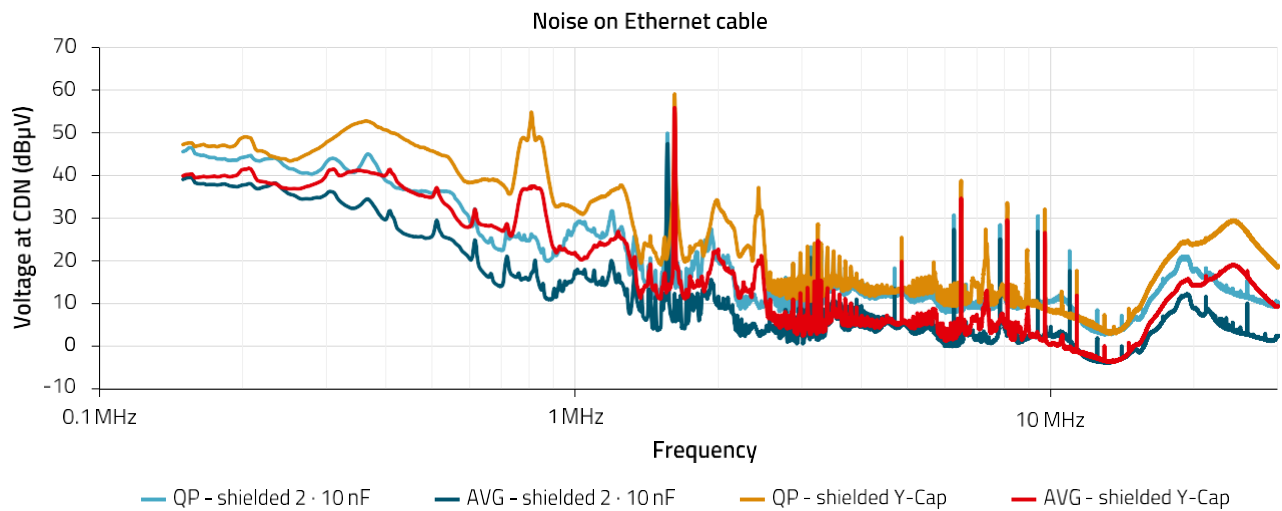


图 29: 不同屏蔽连接时的传导干扰

图29比较了之前提出的两种屏蔽连接的传导干扰发射。同样在分立式设计中，屏蔽连接有一个1nF Y型电容器的方案干扰发射更高，而使用两个10 nF 电容器和一个过压保护器的屏蔽连接更为理想。

使用非屏蔽线时，两种设计的发射情况基本相似（图24）。分立式设计的干扰发射在某些情况下略高。

两种设计都始终低于B类限值至少10dB。

集成接口设计与分立接口设计的比较

现在对两种设计的不同屏蔽连接类型进行比较。网络线路传导干扰发射的测量结果与适用的B类限值进行了比较。

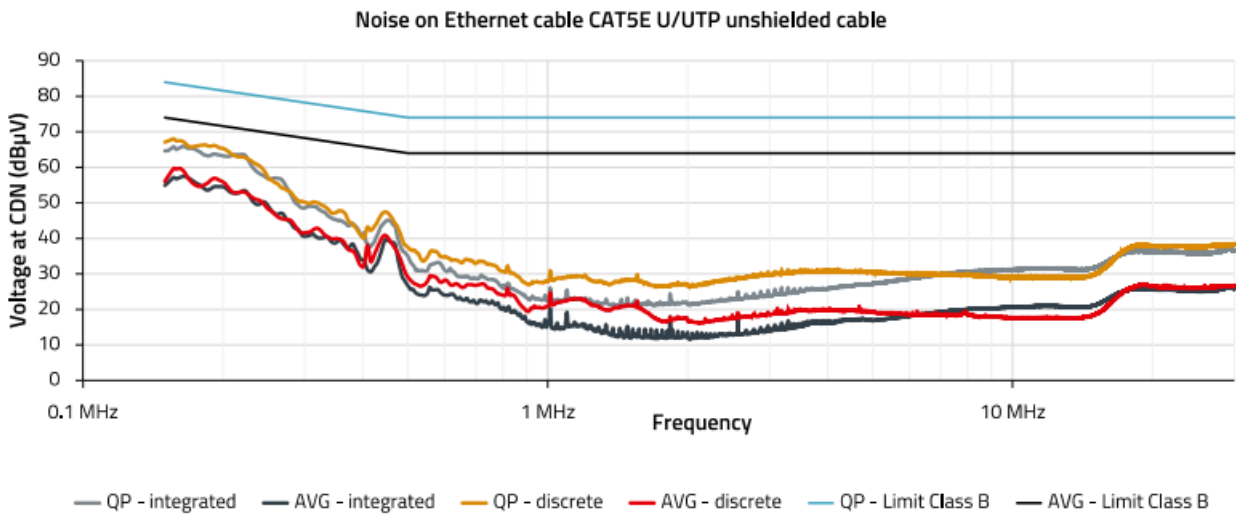


图30: 非屏蔽电缆的传导干扰发射，分立式设计 with 集成式设计的比较

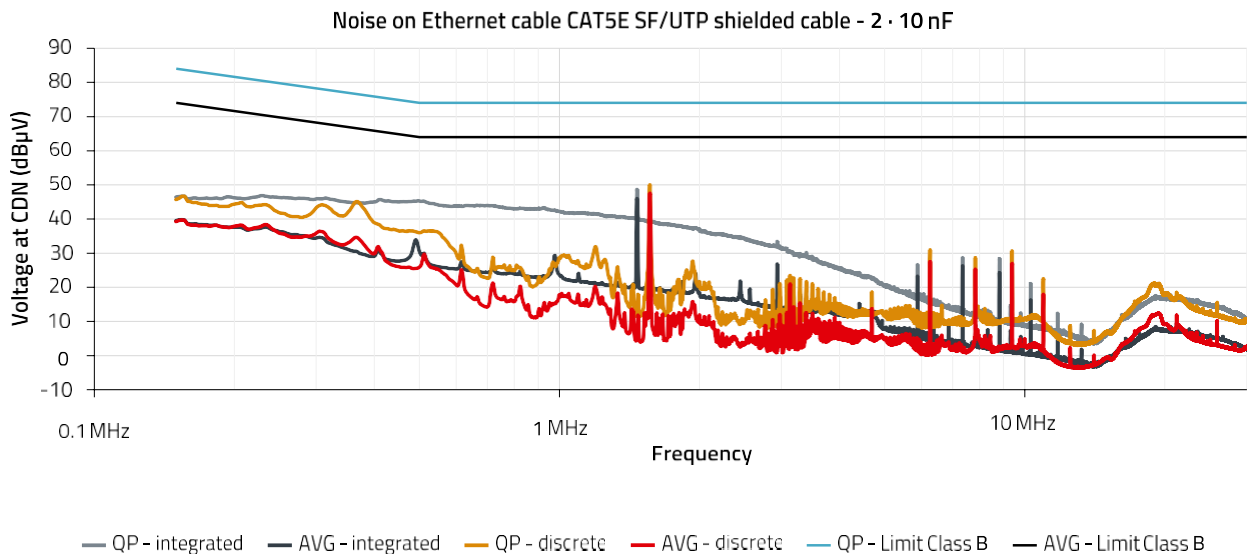


图31: 屏蔽 CAT5E SF/UTP 电缆的传导干扰发射。使用两个 10 nF 电容器和一个过压保护器进行屏蔽连接

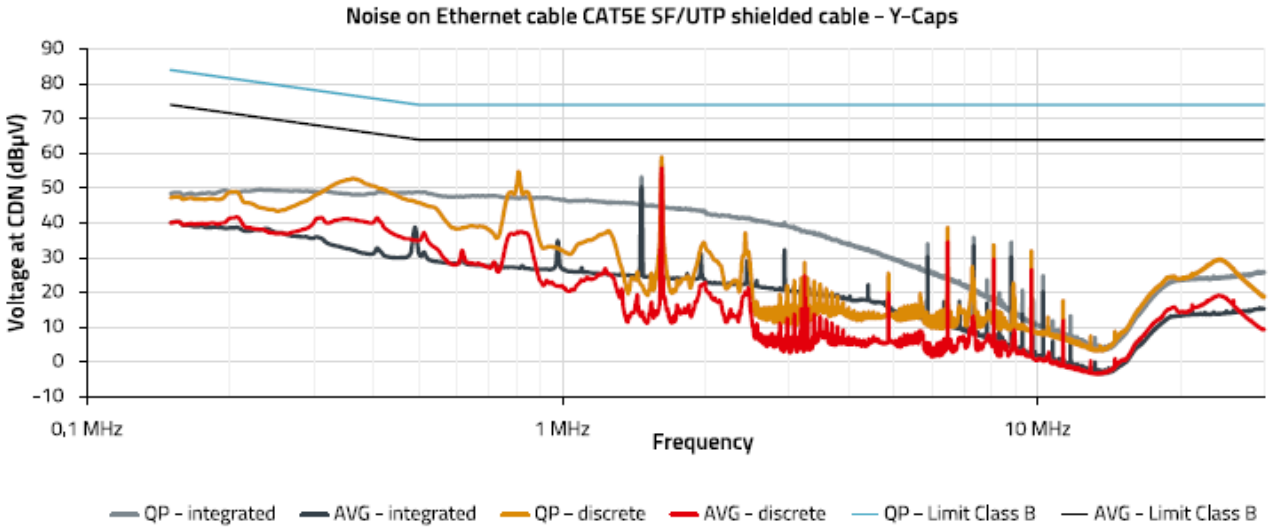


图 32: 屏蔽 CAT5E SF/UTP 电缆的传导干扰发射。使用一个 1 nF Y 型电容器和一个 1 MΩ 电阻器进行屏蔽连接

图 31 中所比较的屏蔽连接类型在传导干扰在频谱上有所不同。但各个峰值处的水平相似。

两种设计都低于 B 类限值 10 dB 以上。图 31 中使用两个 10nF 电容进行屏蔽连接时，两种类型的 RJ45 端口(集成/非集成)的发射频谱都比图 32 中使用一个 Y 型电容进行屏蔽连接时低。

图 32 展示了分立式/集成式网变端口在使用 Y 电容进行屏蔽连接时的噪音情况，可见，集成式网变端口在抑制噪音方面更具优势，然而使用了 Y 电容进行屏蔽连接的方案与使用 2 个 10nF 的屏蔽方案 (图 31) 相比，图 32 测试的 Y 电容的两种方案辐射水平有所提高，首先是电容容值过小，其次此方案的屏蔽层和地线之间的寄生电感较高，导致传导干扰与限值之间的余量进一步减小，此时，屏蔽的优势丧失。因此在考虑传导干扰时，带 Y 电容的屏蔽连接的缺点尤为明显。在 1.6MHz 处，分立式网变的传导干扰平均值仅比限值要求低 8dB。

4.8 辐射干扰

辐射抗干扰能力根据 IEC61000-4-3 标准进行测试。辐射场的曝光时间选择为三秒，以测试一个完整的通信周期。采用表 1 中的评估标准。由于 IEC61000-4-3 模拟的是无线电发射机和其他无线电设备发出的连续干扰，因此采用评估标准 A。其背景是这些无线电发射机连续发射信号。因此，如果在受到这种干扰时发生功能发生错误，这一情况可能会导致接下来无法在现场使用应用。

这两种设计在测试过程中表现相同，因此下文只区分有屏蔽和非屏蔽以太网电缆。

非屏蔽以太网电缆

这两种设计在表 2 中规定的水平上通过了测试，因此符合工业应用的干扰抗扰度要求。

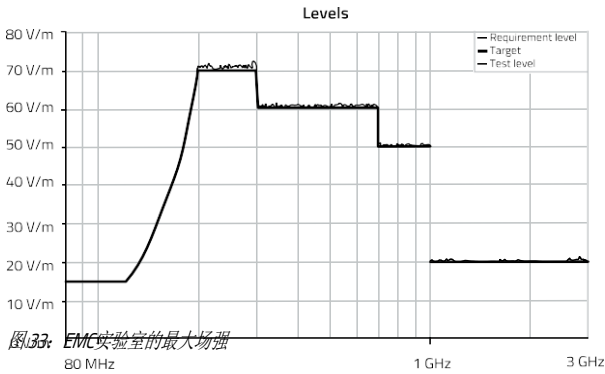
频率范围 (MHz)	抗干扰水平 (V/M)
80 - 1000	10
1000 - 3000	20

表 2: 非屏蔽 CAT5E U/UTP 电缆的辐射抗干扰水平

在较高的测试水平下，数据传输速率会急剧下降，可能导致连接失败。由于在工业应用中不常见非屏蔽以太网电缆，因此对于常用非屏蔽以太网电缆的住宅应用提供了很好的安全余量。

屏蔽以太网电缆

无论是带两个 10nF 电容器还是一个 1nF Y 型电容器的电缆屏蔽连接均可在 EMC 实验室的最大测试场强下运行 (参见图 33)，符合评估标准 A。



由于工业环境在高达1 GHz的频率范围内只需要10 V/m的干扰抗扰度，因此屏蔽设计提供了明显超过要求的更高干扰抗扰度，为在工业环境中可靠运行提供了充足的安全余量。

4.9 传导抗干扰能力

传导抗干扰能力根据IEC61000-4-6标准进行测试。传导抗干扰能力扩展了80MHz以下频率范围的连续干扰测试，并会模拟通过连接线缆耦合到设备中的情况。这里假设150kHz至80MHz频率范围内的干扰主要通过被视为天线的连接线缆耦合。由于直接耦合到接口在物理上比生成高均匀电场要简单，因此采用CDN方法来实现这一目的。由于假定干扰是连续的，因此评估标准与前一节4.8相同。尽管USB线缆的长度可能超过3米，但由于本篇应用文档的重点是以太网接口，因此，此处不对USB接口进行传导抗干扰测试。

非屏蔽以太网电缆

在传导抗扰度测试中，两种设计的可能测试级别有所不同。

设计	测试频率 150 kHz - 80 MHz
集成式以太网端口	10 V
分立式以太网设计	3 V

表3: 评估标准 A 中非屏蔽电缆的传导干扰抗扰度等级

两种设计的传导抗干扰能力不同。集成设计可满足工业应用所需较高测试级别的性能标准A。而分立参考设计则符合民用要求。由于非屏蔽以太网电缆不常见于工业环境中，这种性能已经足够常规应用。

屏蔽以太网电缆

当使用两个10nF电容器和一个过压保护器进行屏蔽连接时，两种设计的抗干扰性能相似。干扰抗扰度测试在20 V的等级进行，两种设计都能够满足A级性能标准。对于使用1nF Y电容器进行屏蔽连接，集成设计在10 V的等级下通过了A级性能标准。分立式电路在20 V的水平下通过了A级标准。因此，在所有配置中，至少满足了10 V的工业噪声抗扰度要求。

设计	测试频率 150 kHz - 80 MHz	
	屏蔽连接 1nF Y型电容器	屏蔽连接 2 10 nF MLCC
集成式以太网端口	10 V	20 V
分立式以太网设计	20 V	20 V

表4: 评估标准A中屏蔽CAT5E SF/UTP 电缆的传导干扰抗扰度等级

4.10 瞬态抗干扰能力，脉冲/突波

通常，在开关连接处，当开关切换至感性电路时，环路会产生脉冲电流，因为在感性电路被导通的一瞬间，会导致开关连接处的电压升高，甚至产生火花。脉冲电流引发的干扰会强烈地耦合到导体结构中，例如平行导体。由于脉冲电流是在切换感性负载时发生的，而不是连续干扰，因此采用评估标准B。在此需要指出的是，从规范的角度来看，标准 B 可能是足够的，但在实际日常运行中可能会导致重大问题。例如，传感器可能在脉冲串期间短暂失灵（例如光电传感器），但在测试完成后又完全正常。对于传感器来说，这可能是可以接受的（评估标准B），但如果将其安装在更高级别的系统中，则可能导致系统紧急停机（评估标准C+线路停机）。因此，对于子系统来说，重要的是确保它们应对脉冲/突波的能力也能满足整个系统的要求。

在以太网设计中也必须考虑到这一点，参考设计的用户必须判断标准B对于自己的应用是否足够可靠。在这种情况下，EMC风险分析可能会有所帮助。但需要注意的是，脉冲/浪涌电流在实际应用中非常常见。

IEC61000-4-4 标准规定了两种不同的测试信号，每个脉冲的重复率各不相同：

1. 5kHz重复频率：历史悠久的测试信号，在大多数产品标准中仍是首选。
2. 100kHz 重复频率波形更逼真

EMC实验室的工作经验表明，测试设备很少只对一种信号做出反应。因此建议同时使用两种信号进行测试。基于上述经验，以下测试在5kHz和100kHz 两种重复频率下进行。

同样，尽管 USB 电缆的长度可能超过3米，但由于本篇应用文档的重点是以太网接口，因此这里不进行USB端口的抗扰度测试。

非屏蔽以太网电缆

在抗干扰测试期间，两种参考设计在使用非屏蔽CAT5E U/UTP电缆时的表现类似。在使用非屏蔽线缆的电容耦合夹进行突发耦合时，无法按照评估标准A运行。不过，这两种设计都能满足评估标准B，最高可达5.5kV。因此，在使用非屏蔽线缆时，虽然设计符合产品抗干扰标准的要求，但在最终用户的实际应用中是否足够，还是个问题。一般，在住宅应用中，非屏蔽以太网线缆的使用居多，参考评估标准B便足够了，因为此类应用中发生脉冲/浪涌的频率较低，而且，不良脉冲对家庭网络的影响，也只是使其数据传输速率在短时间内降低。

屏蔽以太网电缆

使用屏蔽以太网线缆会导致两个接口设计(集成/分立)之间性能差异明显。如表5所示，分立式设计在评估标准A中允许更高的测试电平。用于工业环境中干扰免疫的IEC 61000-6-2通用标准要求对信号和控制连接的评估标准B中进行+/- 1 kV的测试电平。

设计	在评估标准 A 中为 "通过" 的爆破测试等级		
	屏蔽连接 1nF Y-电容	屏蔽连接 两个 10 nF MLCC	电气屏蔽触点
集成式以太网 端口	失败	1kV	2kV
分立式以太网 设计	1kV	5kV	5kV

表 5: 使用 5kHz 和 100kHz 突发数据包进行抗干扰测试的性能

结果表明，与直接连接或连接两个电容器和一个过压保护器相比，使用Y电容器进行屏蔽连接在两种设计中都表现欠佳。

分立接口的布局具有直接的电镀屏蔽连接，可在不降低性能的情况下进行高突发测试。因此，在瞬态环境干扰较大的EMC环境中，建议使用这种端口设计。而性能提高则归功于此处使用了WE的全机械化生产网络变压器749020310，如已经在干扰发射中解释的那样，纯机械化的生产，不同于传统的手工绕制，具有极高的产品一致性。这有助于提高端口设备的对称性，结合分立式设计能够降低电场和磁场之间的组件耦合。对于性能要求高、脉冲负载大的应用而言，分立式设计或许更为理想。尽管如此，两个设计均通过了工业干扰免疫的评估标准A要求，因此如果选择正确的屏蔽连接，它们均可以用于标准应用。

4.11 瞬态浪涌抗扰度

浪涌测试根据IEC61000-4-5标准在以太网接口上进行。这里必须区分耦合到屏蔽线和非屏蔽线的区别。IEC61000-4-5对屏蔽电缆的定义是，屏蔽层两侧均接地。因此，在最终应用中，两个设备都必须将屏蔽接地。否则，接口将被视为非屏蔽，干扰将不对称地耦合到电缆中。由于设备制造商无法确保在随后的使用中所有配置都覆盖这一点，因此建议同时测试两种配置。

USB 接口是本地点对点接口，且线缆长度明显小于30米，因此同样不对USB 接口进行测试。

非屏蔽以太网电缆

两种设计都对非屏蔽线路进行了高达3kV的浪涌测试。与USB接口连接的笔记本电脑由电池供电。通过使用高速CDN，浪涌以非对称方式耦合。



图 34: 使用CNI 508N2 CDN对非屏蔽以太网电缆进行浪涌耦合

CDN将浪涌耦合到测试设备，并在以太网线缆上为笔记本电脑提供去耦。受CDN限制，测试电压最高可达3kV。以上测试设置旨在模拟无PE连接的非屏蔽设备的接口设置，如IP电话或专为住宅用途设计的商用路由器。

屏蔽以太网电缆

用图 35中的配置测试了抗浪涌能力。

这两种设计都通过了评估标准 A 的测试，使用屏蔽的 20m CAT5ESF/UTP 电缆，测试电压为 5 kV，屏蔽连接类型如下：

1. 两个 10 nF 电容器和一个过压保护器
2. 直接电屏蔽连接
3. 1 nF Y型电容器



图 35: 浪涌直接耦合到电缆屏蔽的测试装置，发生器阻抗为 2Ω。通过鳄鱼夹和以太网插座上的金属螺栓进行浪涌去耦--如上左图

图35中的装置假定后端的最终应用将有一个与地相连的金属底盘。因此，浪涌不是在PCB地线上去耦，而是在屏蔽GND平面上去耦。因此，高测试电流不会流经电路板，而是在与底盘的连接点处去耦。

05. 结论

本篇应用文档介绍参考设计具有极高的抗干扰能力、低噪声干扰和高数据传输速率等优点。表6概述了所进行的所有测试以及参考设计所对应的千兆以太网设计的EMC性能。

HW-Version	cable	emission class B		radiated immunity 61000-4-3						conducted immunity 6100-4-6			Burst 61000-4-4					Surge 61000-4-5			
		radiated	conducted	3 V/m	10 V/m	20 V/m	30 V/m	max	10 V/m	20 V/m	3 V	10 V	20 V	1 kV	2 kV	4kV	5.5 kV	crit. B lvl	1	2	3
integrated V2.1 4 caps	cat5E U/UTP	pass	pass	nt	pass	fail	fail	nt	pass	pass	nt	pass	fail	nt	nt	200	nt	nt	nt	nt	nt
integrated V2.1 10 nF cap	cat5E SF/UTP	pass	pass	nt	nt	nt	pass	pass	nt	pass	nt	pass	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt
integrated V2.1 10 nF cap (2 Stück)	cat5E SF/UTP	pass	pass	nt	nt	nt	nt	pass	nt	pass	nt	pass	pass	nt	nt	1700	nt	nt	nt	nt	nt
integrated V2.1 shorted	cat5E SF/UTP	pass	pass	nt	nt	nt	nt	pass	nt	pass	nt	pass	nt	pass	nt	2300	nt	nt	nt	nt	nt
integrated V2.1 1nF y-Cap	cat5E SF/UTP	pass	pass	nt	nt	nt	nt	pass	nt	pass	nt	pass	fail	nt	nt	200	nt	nt	nt	nt	nt
discrete	cat5E U/UTP	pass	pass	nt	x	x	nt	nt	nt	pass	pass	fail	fail	na	na	300	nt	nt	nt	nt	nt
	cat5E SF/UTP (2 x 10 nF)	pass	pass	nt	nt	nt	nt	pass	nt	pass	nt	nt	pass	pass	pass	pass	nA	nt	nt	nt	nt
	cat5E SF/UTP (full connection)	nt	pass	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	pass	nt	nt	nt	nt	nt
	cat5E SF/UTP (Y-Cap 2 pcs)	nt	pass	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	2 kV	nt	nt	nt	nt	nt
	cat5E SF/UTP (Y-Cap)	pass	pass	nt	nt	nt	nt	pass	nt	pass	nt	pass	pass	nt	nt	1.5 kV	nt	nt	nt	nt	nt

表 6: 测试的参考设计的EMC性能概览

经过上述一系列广泛测试的后，最重要结果简述如下。测试结果表明，线缆类型并不一定会影响EMC性能。但屏蔽和非屏蔽以太网接口之间的差异尤为明显。当线缆长度在3米和5米之间时，不同的屏蔽电缆对电磁兼容性没有明显影响。只不过在使用非屏蔽电缆进行的测试中，测得的干扰发射水平明显较高，抗干扰水平较低。

从EMC的角度来看，以太网端口与接地平面之间的直接屏蔽连接是最为理想的方案，所需遵循的原则是：尽可能的让端口与地之间的连接更直接、路线更短且线路阻抗更低。由于以太网端口此类设计与电气安全或功能方面的要求（50Hz均衡电流）存在部分冲突，因此为了规避可能存在的风险，通常需要使用电容进行隔离连接。在使用电容器的屏蔽连接中，将电容连接至以太网端口的右侧或左侧会对EMC性能产生不同的影响。因此如果需要电容连接，建议在以太网端口两次对称连接布局。

基于本篇应用文档的实验、对比，推荐使用两个10nF的电容器作为低阻抗解决方案进行连接，这样即使在较低的频率范围内也能实现连接。这种电路类型最接近直接连接。另外建议搭配使用并联SMD过压保护器来保护电容器免受瞬态干扰的损害。

关于连接线缆，推荐使用屏蔽线缆，以提高连续抗干扰能力。在这种情况下，使用3米至5米长的CAT5E SF/UTP 短电缆就足够了。尽管干扰耦合较高，但仍可实现无差错的快速数据传输。

关于分立式与集成式以太网端口方案，这两种参考设计在EMC性能方面存在差异，主要体现在对高突波的耐受性上。如果需要在突发浪涌（突波）非常高的EMC环境中提高性能，建议采用分立以太网接口设计，因为干扰耦合较低。除此之外，两种电路板类型的 EMC 性能基本相当。

06. 更多信息

参考设计说明 [RD016](#) 中详细介绍了本应用文档中使用的设计。设计数据可在 Würth Elektronik 主页上自由使用。

重要提示:

本应用指南基于我们对这些领域典型要求积累的知识 and 经验。仅作为一般性指导，不应被视为伍尔特电子集团对客户应用适用性的承诺。本文中的信息如有更改，恕不另行通知。未经书面许可，不得翻印或复制本文档及其部分内容，不得将其内容透露给第三方，未经授权不得使用。

伍尔特电子集团及其子公司和附属公司不对任何形式的应用支持承担责任。客户可以在其应用和设计中使用伍尔特电子的帮助和产品建议。伍尔特电子产品在特定客户设计中的适用性和使用责任始终完全由客户自己承担。基于这一事实，客户应在适当情况下，自行评估和研究，判断具有产品规格中描述的特定产品特性的设备是否适合于的客户应用。

技术规格见产品最新规格书。顾客应使用规格书，并注意确认规格书是否最新版本。最新版规格书可以从 www.we-online.com 下载。客户应严格遵守所有产品的说明、注意事项和警告。我们保留对产品和服务进行更正、修改、增强、改进和其他变更的权利。伍尔特电子不保证或代表任何基于与伍尔特电子产品或服务使用的任何组合、机器或过程有关的任何专利权、版权、屏蔽作品或其他知识产权。

以及以明示或暗示的方式授予的许可。伍尔特电子发布的有关第三方产品或服务的信息并不代表伍尔特电子授予使用此类产品或服务的许可证、保修书或认证。

伍尔特电子产品不可用于对安全有严格要求的应用，或合理预期产品故障会导致严重的人身伤害或死亡的用途。此外，伍尔特电子产品不应用于军事、航天、航空、核控制、潜艇、运输

(汽车控制，火车控制，船舶控制)、交通信号、防灾、医疗、公共信息网络等领域。客户应在设计阶段之前告知伍尔特电子有关此类用途的意图。在某些要求高安全性的客户应用中，电子元器件的故障或失效可能危及人类生命或健康

，客户必须确保他们在应用安全和法规方面具备所有必要的专业知识。客户承认并同意，无论伍尔特电子提供与应用程序相关的任何信息或支持，他们将对与其产品以及在对安全有严格要求的应用中使用伍尔特电子产品有关的所有法律

、法规和安全性要求承担全部责任。客户应就在对安全有严格要求的应用中使用伍尔特电子产品造成的损害，对伍尔特电子进行赔偿。

相关链接



应用指南

www.we-online.com/appnotes



REDEXPERT 设计工具

www.we-online.com/redexpert



工具箱

www.we-online.com/toolbox



产品目录

www.we-online.com/products

联系方式



appnotes@we-online.com

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co.

KG Max-Eyth-Str. 1 74638

Waldenburg Germany

www.we-online.com

伍尔特（天津）电子有限公司

苏州在线服务中心: +86-512-65128813

电话: +86 22 2385 8666

邮箱: eiSos-china@we-online.com