



Alfred Chong

摘要

ISOUSB211DP 中继器在其接收器和发射器上嵌入了均衡器，这些均衡器在改善信号完整性方面发挥了重要作用，可以减少由频率相关的 PCB 迹线损耗特性引起的符号间干扰 (ISI)。本应用手册简要介绍了 PCB 迹线损耗、发送器预加重、接收器均衡等带来的影响，以及如何使用 ISOUSB211 预加重功能和均衡器来补偿电路板迹线和电缆损耗。

内容

1 PCB 迹线插入损耗和符号间干扰.....	3
2 发送器预加重功能和接收器均衡器.....	5
3 为您的系统选择理想的预加重设置.....	6
4 具有用于 USB 2.0 近端眼罩的所有九种预加重设置的 6 英寸至 4 英尺迹线眼图.....	7
5 具有用于 USB 2.0 远端眼罩的所有九种预加重设置的 6 英寸至 4 英尺迹线和 5m 电缆眼图.....	9
6 同时使用接收器均衡器和发送器预加重功能进行通道损耗补偿.....	10
7 总结.....	11

插图清单

图 1-1. 隔离式中继器与转接驱动器.....	3
图 1-2. 具有 USB 2.0 插座的 FR4 电路板.....	3
图 1-3. 具有 SMA 连接器的 FR4 电路板.....	3
图 1-4. 差分迹线的插入损耗.....	4
图 1-5. 理想的和实际的 USB 2.0 波形.....	4
图 1-6. 具有长运行长度的理想和实际 USB 2.0 波形.....	4
图 1-7. 6 英寸至 4 英尺迹线下的眼图.....	4
图 2-1. 补偿、实际和理想波形.....	5
图 2-2. 具有长运行长度的补偿、实际和理想波形.....	5
图 2-3. ISOUSB211 发送器预加重测量.....	5
图 3-1. NE 设置 1.....	6
图 3-2. NE 设置 2.....	6
图 4-1. NE TX_PE 6 英寸迹线.....	7
图 4-2. NE TX_PE 1 英尺迹线.....	7
图 4-3. NE TX_PE 2 英尺迹线.....	7
图 4-4. NE TX_PR 3 英尺迹线.....	7
图 4-5. NE TX_PE 4 英尺迹线.....	7
图 4-6. NE TX_PE 6 英寸至 4 英尺迹线的 EH*EW 指标汇总.....	7
图 4-7. NE RX_EQ 6 英寸迹线.....	8
图 4-8. NE RX_EQ 1 英尺迹线.....	8
图 4-9. NE RX_EQ 2 英尺迹线.....	8
图 4-10. NE RX_EQ 3 英尺迹线.....	8
图 4-11. NE RX 4 英尺迹线.....	8
图 4-12. NE RX_EQ 6 英寸至 4 英尺迹线的 EW 指标汇总.....	8
图 5-1. 远端眼图测量设置.....	9
图 5-2. FE TX_PE 6 英寸 + 5m.....	9
图 5-3. FE TX_PE 1 英尺 + 5m.....	9
图 5-4. FE TX_PE 2 英尺 + 5m.....	9

图 5-5. FE TX_PE 3 英尺 + 5m.....	9
图 5-6. FE TX_PE 4 英尺 + 5m.....	9
图 5-7. FE TX_PE 6 英寸至 4 英尺迹线的 EH*EW 指标汇总.....	9
图 6-1. 使用 RXEQ 和 RX PE 进行迹线损耗补偿.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 PCB 迹线插入损耗和符号间干扰

转接驱动器和隔离中继器是通过均衡和放大信号来增强信号完整性的器件。主要区别在于，转接驱动器作为模拟缓冲器，其输出波形与未应用均衡的输入波形形成线性比例，但隔离中继器由数字隔离器构成，该数字隔离器根据输入信号的逻辑在隔离栅上生成信号的全新副本。未经转接驱动器和隔离中继器均衡器补偿的输入抖动，将在发射器输出端反映出来。隔离中继器具有额外的开关键控电路，因此隔离中继器的总输出抖动是隔离电路产生的抖动与未补偿输入抖动的平方和根值。

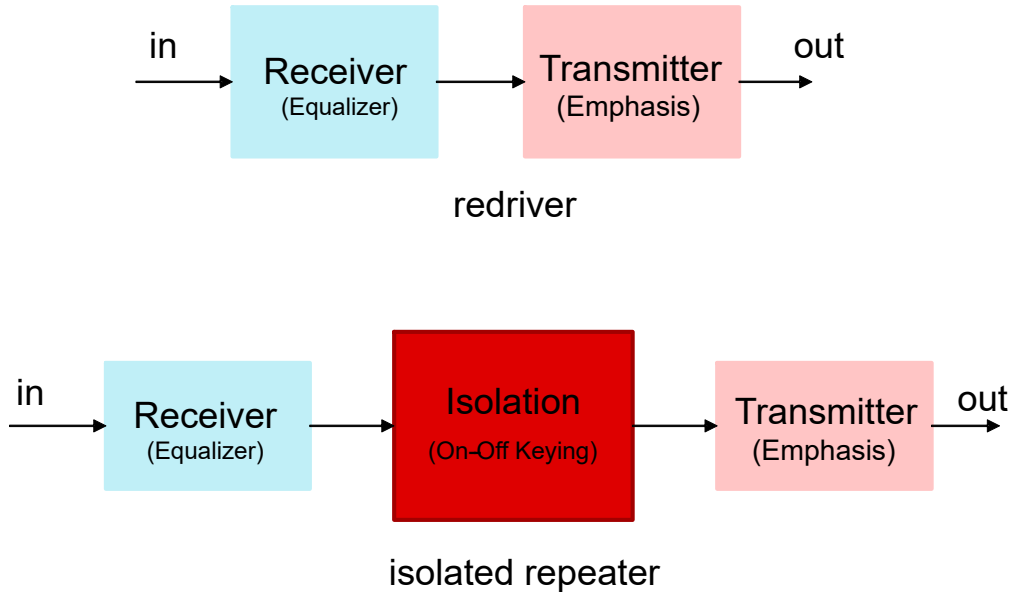


图 1-1. 隔离式中继器与转接驱动器

图 1-2 显示了由五对差分迹线组成的印刷电路板 (PCB)。位于这些迹线两端的 USB 2.0 Type-A 转 Type-B 插座通过 USB 电缆将这些迹线连接到 ISOUSB211DPEVM。通过将轨道宽度设置为 50mil，轨道间距设置为 9mil，轨道高度设置为 0.4mil，隔离高度设置为 59.2mil，介电常数设置为 4.9，这些差分迹线的差分阻抗 (ZDiff) 为 90 Ω。图 1-3 显示超小型 A 版 (SMA) 连接器取代了 USB 插座来正确连接矢量网络分析器 (VNA)，从而测量这些差分迹线的插入损耗。



图 1-2. 具有 USB 2.0 插座的 FR4 电路板



图 1-3. 具有 SMA 连接器的 FR4 电路板

图 1-4 显示了从 6 英寸到 4 英尺长度的五种差分迹线的差分插入损耗测量结果。第一个观察结果是较长的迹线长度会导致较高的直流损耗。第二个观察结果是 PCB 迹线的插入损耗与传输频率成比例增加。第三个观察结果是迹线阻抗不连续性导致曲线上出现振铃。通常，直流损耗会导致信号振幅降低，类似于电阻器的效果。高频 (工作频率) 下的插入损耗和反射会导致符号间干扰 (ISI)，从而大大减少接收器的驱动长度并使误码率 (BER) 增加。

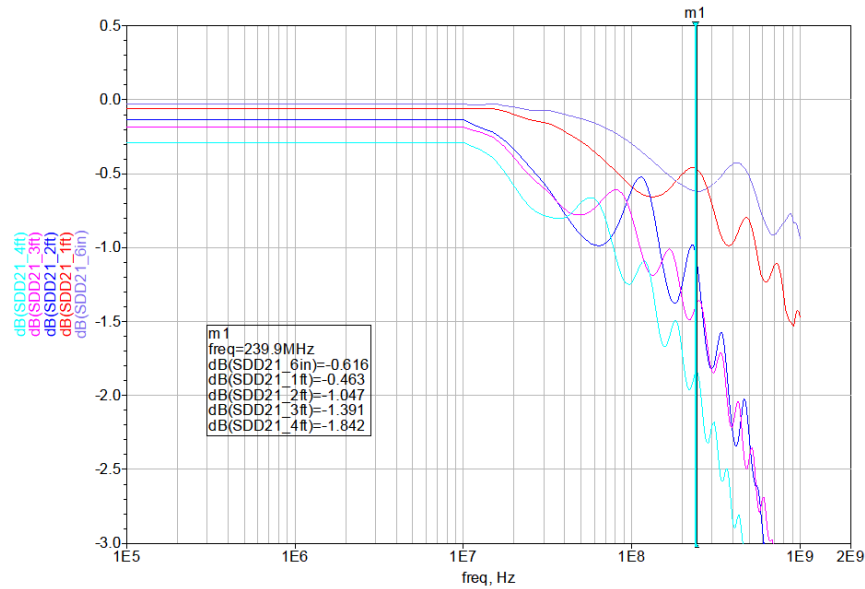


图 1-4. 差分迹线的插入损耗

通过理想传输介质（如超导体）传输的信号在符号间隔内完成转换，如图 1-5 中所示。然而，当信号通过上述有损背板时，转换扩展到相邻间隔。由此产生的影响是，在传输高活动系数数据（如时钟模式）时，信号甚至在完成转换之前就强制转换到对面的轨道，这种行为被称为 ISI。图 1-6 显示了最坏情况，即一长串“0”后跟一个“1”，或一长串“1”后跟一个“0”，此时信号有足够的时间到达其中一个轨道，但这会导致下一个相反的转变具有超低的峰值电压，并直接降低眼高。图 1-7 显示了 FR4 迹线从 6 英寸、1 英尺、2 英尺、3 英尺到 4 英尺时 ISI 对眼图的影响。眼高和眼宽与有损 FR-4 迹线的插入损耗成比例缩小。

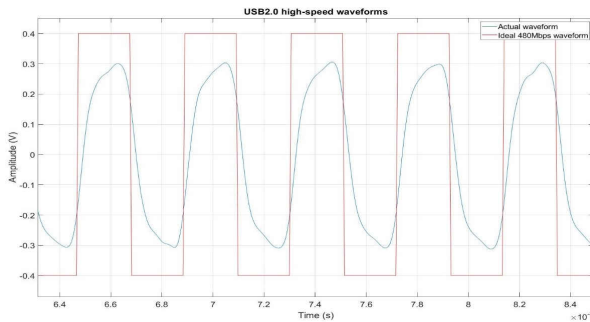


图 1-5. 理想的和实际的 USB 2.0 波形

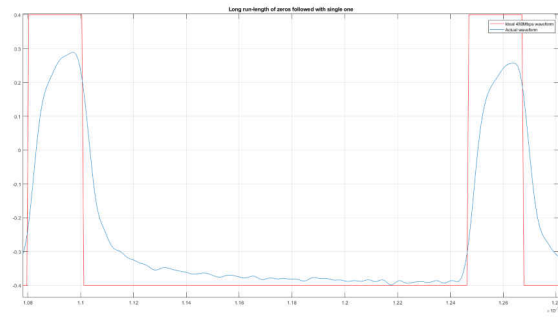


图 1-6. 具有长运行长度的理想和实际 USB 2.0 波形

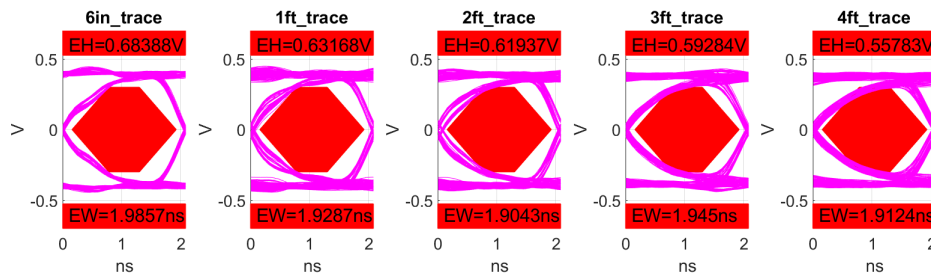


图 1-7. 6 英寸至 4 英尺迹线下的眼图

2 发送器预加重功能和接收器均衡器

ISOUSB211 发送器由九个可编程预加重设置构成，而接收器由九个可编程均衡器设置构成，均采用连续时间线性均衡器 (CTLE) 架构来实现。我们可以使用单零点双极点系统来估计这九个预加重/均衡器特性，该系统在 240MHz 时的峰值为 0.25dB 到 4dB，达到一阶近似值。CTLE 将高频信号放大 240MHz 左右，同时保持低频信号不变。预加重/均衡器可增强高频信号，这具有减少上升和下降时间的效果，从而使信号更接近电源轨，并在符号间隔内完成转换，如图 2-1 和图 2-2 中所示。

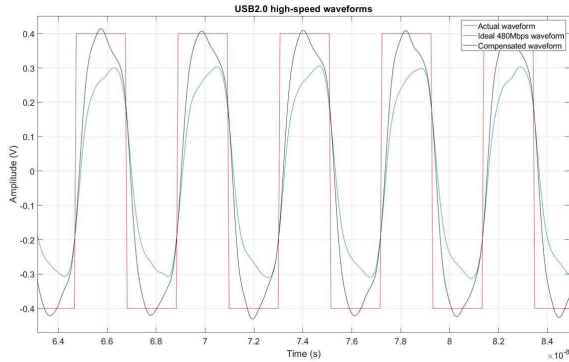


图 2-1. 补偿、实际和理想波形

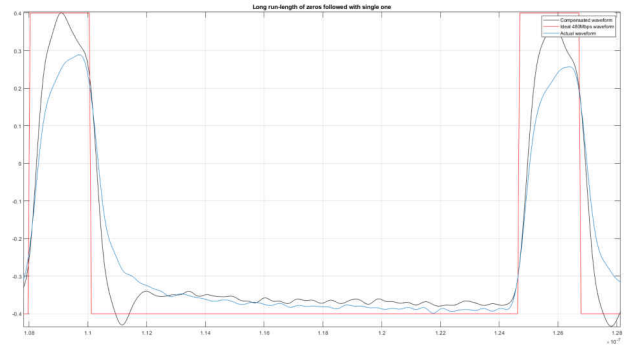


图 2-2. 具有长运行长度的补偿、实际和理想波形

图 2-3 显示了九个 ISOUSB211 发送器预加重功能的时域波形，数据模式为一长串的“1”和“0”。加重信号的固定宽度为一位 (1/480Mbps)，其强度按比例从 00 扩展到 11。通过各种预加重设置，我们可以选择理想预加重设置，以补偿迹线和电缆损耗。

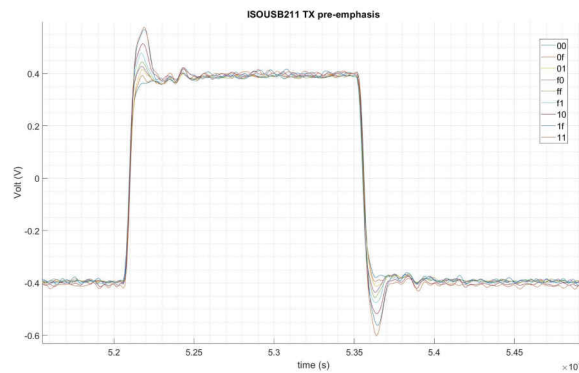


图 2-3. ISOUSB211 发送器预加重测量

3 为您的系统选择理想的预加重设置

眼图的眼高 (EH) 和眼宽 (EW) 是用于量化接口系统中信号完整性的两个指标。USB 2.0 标准要求 USB 设备适用于近端和远端眼罩。因此，选择一个理想的预加重设置来补偿系统迹线损失将提高眼宽和眼高，从而符合 USB 2.0 眼罩的要求。图 3-1 和图 3-2 显示了两种 ISOUSB211 放置方式，用于降低图 1-2 所示 FR4 差分迹线插入损耗引起的 ISI，从而符合 USB 2.0 近端眼罩的要求。这些插入损耗可以通过将迹线放置在 ISOUSB211 的上游使用发送器预加重功能来进行补偿，如图 3-1 所示，或者通过将迹线放置在 ISOUSB211 的下游使用接收器均衡器进行补偿，如图 3-2 所示。

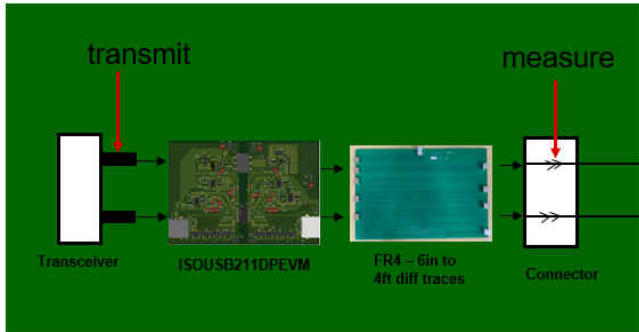


图 3-1. NE 设置 1



图 3-2. NE 设置 2

4 具有用于 USB 2.0 近端眼罩的所有九种预加重设置的 6 英寸至 4 英尺迹线眼图

图 4-1 到图 4-6 显示了使用图 3-1 设置的眼图测量结果，其中使用了发送器预加重功能来补偿迹线损失。收发器和 ISOUSB211DPEVM 之间的损耗是可忽略的，因此在整个测量过程中，接收器均衡器设置为 00。每幅图中的第一个子图显示了 FR-4 迹线的测量眼图，不包括 ISOUSB211DPEVM。很明显，即使迹线长度为 6 英寸，该系统也会使近端眼罩失效。我们使用 EH 乘以 EW 作为衡量标准来证明发送器的预加重性能，如图 4-6 所示。

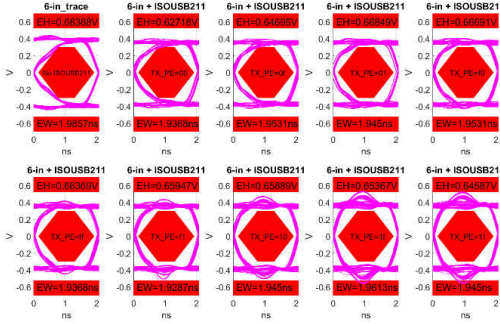


图 4-1. NE TX_PE 6 英寸迹线

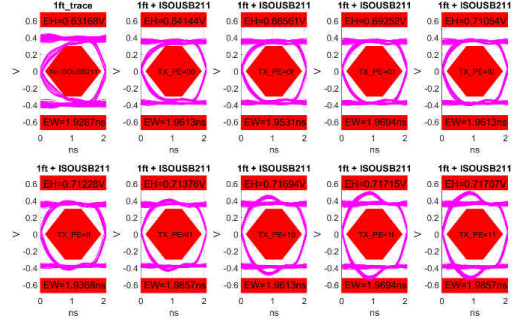


图 4-2. NE TX_PE 1 英尺迹线

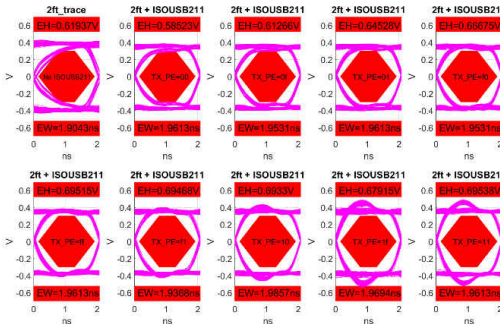


图 4-3. NE TX_PE 2 英尺迹线

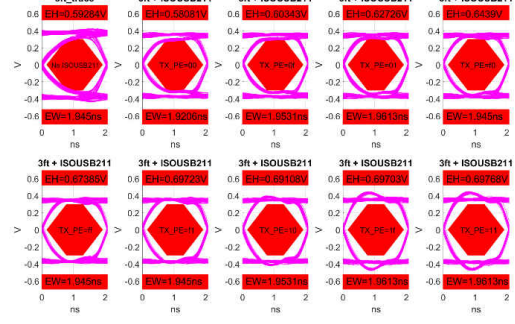


图 4-4. NE TX_PR 3 英尺迹线

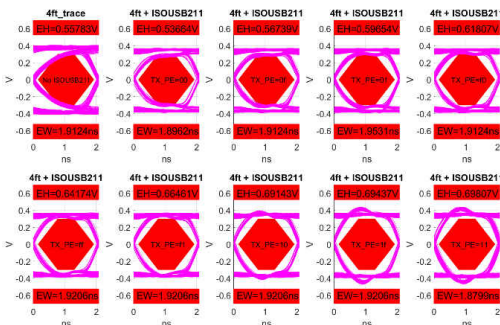


图 4-5. NE TX_PE 4 英尺迹线

	00	0f	01	f0	ff	f1	10	1f	11
6in	1.2148	1.2636	1.3002	1.3026	1.2855	1.2719	1.2815	1.2827	1.2562
1ft	1.2594	1.3	1.3639	1.3926	1.3968	1.3657	1.3613	1.3654	1.3632
2ft	1.1478	1.1966	1.2656	1.3022	1.3694	1.3455	1.3767	1.3375	1.3638
3ft	1.1155	1.1786	1.2340	1.2524	1.3106	1.3561	1.3458	1.3671	1.3688
4ft	1.0176	1.0851	1.1653	1.182	1.2225	1.2764	1.2279	1.3336	1.3121

fail = EH and/or EW violate eye-mask
marginal= EH < 5mV or EW < 0.05UI from eye-mask
pass = meet eye-mask
optimal = best performance setting

图 4-6. NE TX_PE 6 英寸至 4 英尺迹线的 EH*EW 指标汇总

图 4-7 到图 4-12 显示了使用图 3-2 设置的眼图测量结果，该设置使用接收器均衡器来补偿迹线损失。在整个测量过程中，发送器预加重设置为 00。如上所述，由于 ISOUSB211 隔离器中的开关键控电路根据输入信号的逻辑生成信号的新副本，这无法通过测量眼睛高度 (EH) 来证明接收器均衡器的性能。ISOUSB211 的输出抖动是由无补偿的输入抖动和开关键控电路产生的抖动叠加而成的。我们可以通过判断具有较宽眼宽 (EW) 或较低抖动的眼图，来确定每个迹线长度的理想接收器均衡器设置，如图 4-12 所示。

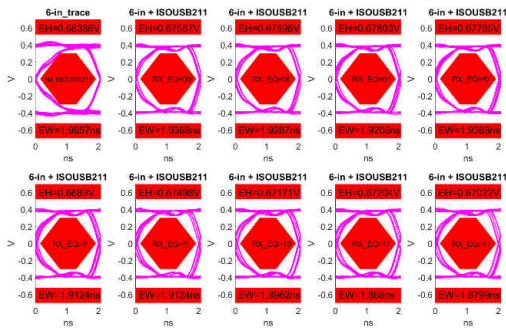


图 4-7. NE RX_EQ 6 英寸迹线

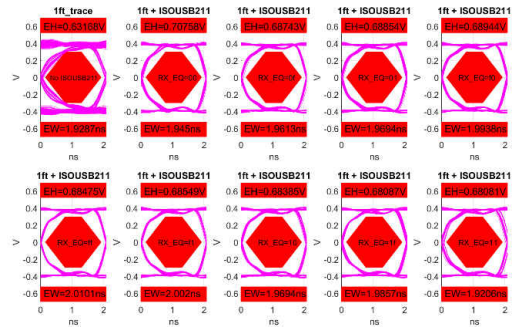


图 4-8. NE RX_EQ 1 英尺迹线

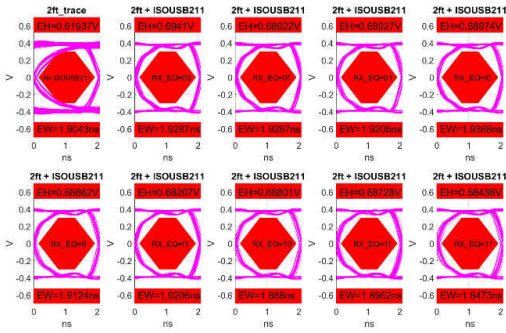


图 4-9. NE RX_EQ 2 英尺迹线

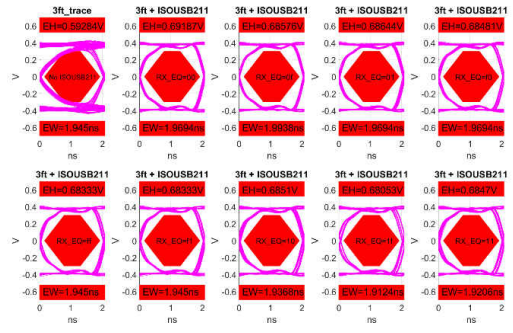


图 4-10. NE RX_EQ 3 英尺迹线

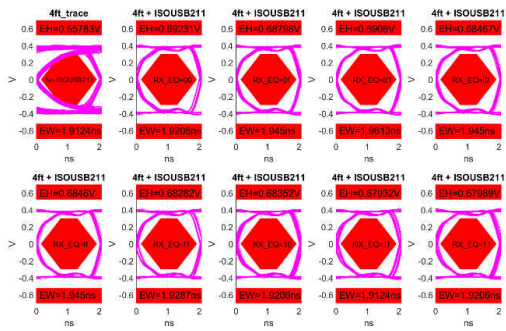


图 4-11. NE RX 4 英尺迹线

	00	0f	01	f0	ff	f1	10	1f	11
6inch	1.9366	1.9287	1.9206	1.9368	1.9124	1.9124	1.8962	1.888	1.8799
1ft	1.945	1.9613	1.9694	1.9938	2.0101	2.002	1.9694	1.9857	1.9206
2ft	1.9287	1.9287	1.9206	1.9368	1.9124	1.9206	1.888	1.8962	1.8476
3ft	1.9694	1.9938	1.9694	1.9694	1.945	1.945	1.9368	1.9124	1.9206
4ft	1.9206	1.945	1.9613	1.945	1.945	1.9287	1.9206	1.9124	1.9206

fail marginal pass optimal best performance setting

fail = EH and/or EW violate eye-mask
 marginal = EH < 5mV or EW < 0.05UI from eye-mask
 pass = meets eye-mask
 optimal = best performance setting

图 4-12. NE RX_EQ 6 英寸至 4 英尺迹线的 EW 指标汇总

5 具有用于 USB 2.0 远端眼罩的所有九种预加重设置的 6 英寸至 4 英尺迹线和 5m 电缆眼图

图 5-1 显示了 USB 2.0 标准规定的测量远端眼罩的设置。ISOUSB211 位于收发器旁边，一个 USB 插座将 FR4 迹线连接到一根 5m USB 电缆。我们使用一根 5m 长的电缆来说明 USB 2.0 标准规定的糟糕情况下的电缆损耗。该信号在 5m 电缆的另一端测量，以确定其远端眼图性能。

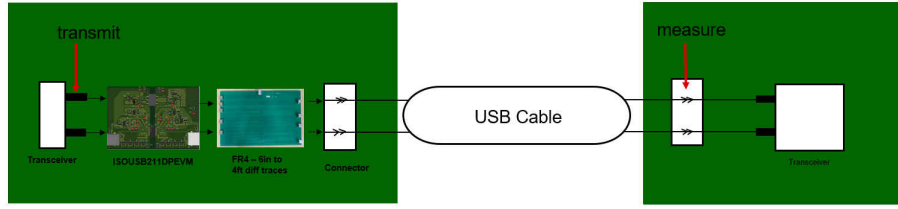


图 5-1. 远端眼图测量设置

图 5-2 到图 5-7 显示了使用图 5-1 设置的眼图测量结果，该设置使用发送器预加重功能来补偿迹线和电缆损失。在整个测量过程中，接收器均衡器设置为 00。通过将 EW 乘以 EH 来评估发送器预加重性能，如图 5-7 所示。

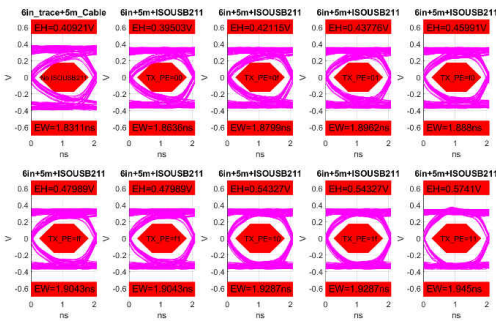


图 5-2. FE TX_PE 6 英寸 + 5m

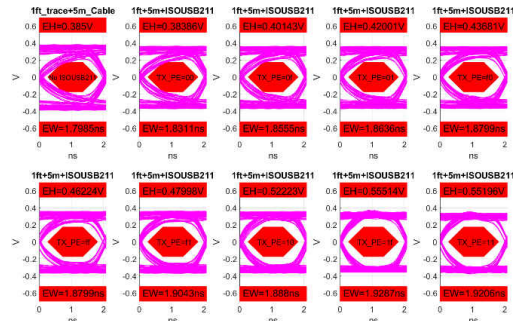


图 5-3. FE TX_PE 1 英尺 + 5m

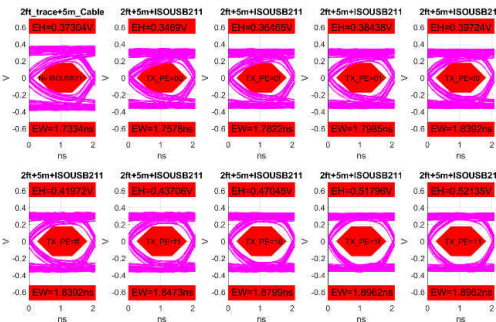


图 5-4. FE TX_PE 2 英尺 + 5m

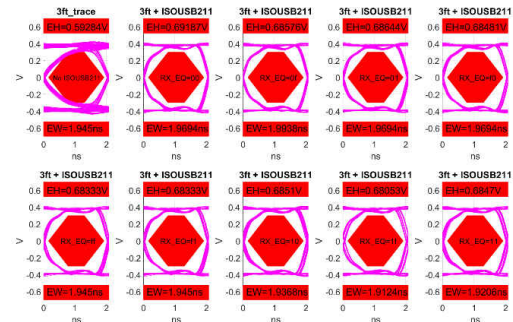


图 5-5. FE TX_PE 3 英尺 + 5m

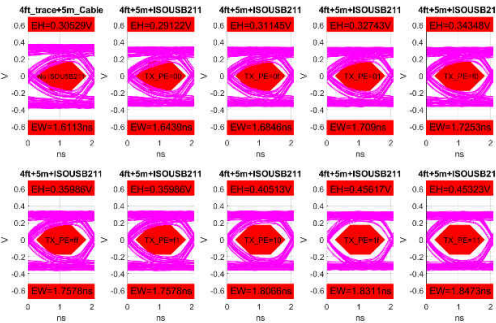


图 5-6. FE TX_PE 4 英尺 + 5m

	00	0f	01	10	1f	10	1f	11
6inch	0.736f	0.7917f	0.8588f	0.8686f	0.91386f	0.91386f	1.0478f	1.1166f
1ft	0.7028f	0.7448f	0.7827f	0.82115f	0.86889f	0.914f	0.9859f	1.0832f
3ft	0.577f	0.618f	0.6334f	0.6583f	0.7398f	0.7719f	0.8077f	0.8843f
4ft	0.4787f	0.5246f	0.5595f	0.59259f	0.6525f	0.6325f	0.73192f	0.8332f

fail = EH and/or EW violate eye-mask
marginal = EH < 5mV or EW < 0.05UI from eye-mask
pass = meet eye-mask
optimal = best performance setting

图 5-7. FE TX_PE 6 英寸至 4 英尺迹线的 EH*EW 指标汇总

6 同时使用接收器均衡器和发送器预加重功能进行通道损耗补偿

在前述各节中，迹线位于 ISOUSB211 隔离中继器的上游或下游。因此，我们使用接收器均衡器或发送器预加重功能来补偿迹线损耗。对于迹线差分损耗大于 2dB 的系统，建议将损耗分配到 ISOUSB211 的上游和下游，并使用接收器均衡器和发送器预加重功能同时进行迹线损耗补偿。图 6-1 显示了位于 FR-4 迹线之间的 ISOUSB211EVM。在此设置中，接收器均衡器和发送器预加重功能一同工作，以补偿总迹线损耗；接收器均衡器补偿上游迹线损耗，而发送器预加重补偿下游迹线损耗。

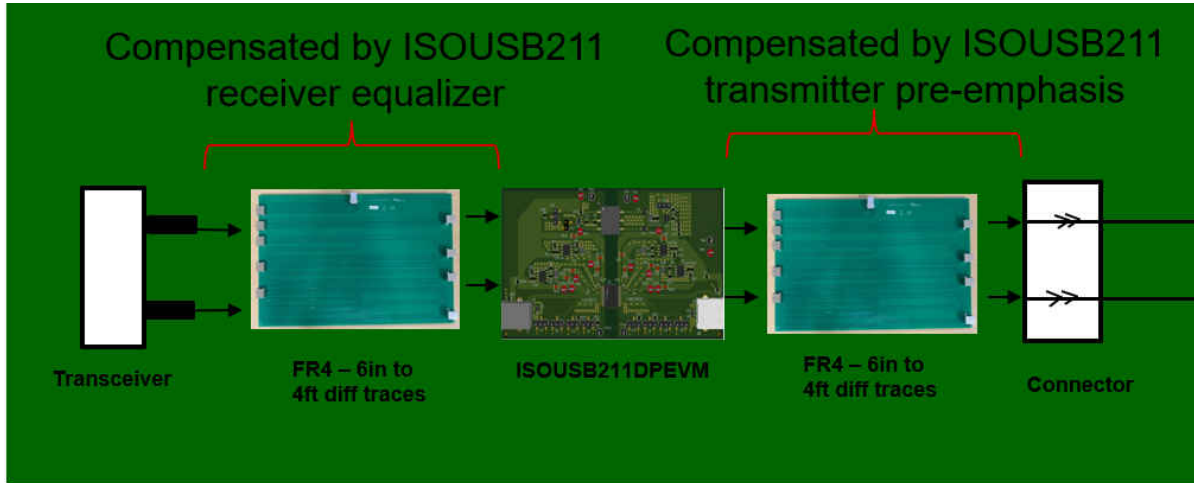


图 6-1. 使用 RXEQ 和 RX PE 进行迹线损耗补偿

7 总结

ISOUSB211DP 包括九个发送器预加重设置和九个均衡器设置，以补偿不同的迹线和电缆损耗，从而增强系统信号完整性。需要隔离且难以应对 ISI 的 USB 2.0 系统可使用 ISOUSB211DP 均衡器和预加重功能来改善 EH 和 EW，从而满足 USB 2.0 近端眼罩和远端眼罩的要求。我们已经看到，ISOUSB211 发送器预加重功能和接收器均衡器能够分别补偿长达 4 英尺或小于 2dB 差分损耗的 FR4 差分迹线。对于损耗较高的系统，您可以在发送器和接收器两侧分配损耗，并依靠发送器预加重功能和接收器均衡器来补偿较高的损耗。

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司