



Davor Glisic

摘要

PCI-Express (或 PCIe) 4.0 链路在 8GHz 时提供 28dB 的总损耗预算。通常情况下,很多系统的 PCIe 链路会超出损耗预算,要么虽然能减少可用损耗预算但实现方案不甚理想,要么找不到可减少损耗预算的理想方案。

DS160PR410 是一款四通道 PCI-Express 4.0 PCI-SIG 兼容线性转接驱动器,具有集成的信号调节功能,可减少通道损耗引起的确定性抖动,增加损耗预算,最终将 PCIe 4.0 链路的覆盖范围提高多达 50%。本应用报告提供了有关使用 DS160PR410 实现出色信号完整性和最大限度地扩展 PCIe 4.0 链路的指南。

内容

1 引言.....	2
2 器件概述.....	2
2.1 接收器均衡.....	3
2.2 转接驱动器线性度.....	3
3 带有线性转接驱动器的 PCIe 链路.....	6
4 转接驱动器调优.....	9
5 性能矩阵.....	11
5.1 转接驱动器放置.....	13
6 调优示例.....	14
7 总结.....	16
8 参考文献.....	16
9 修订历史记录.....	16

插图清单

图 2-1. DS160PR410 简化方框图.....	2
图 2-2. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P0 (-6dB 去加重功能)	4
图 2-3. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P0 (-6dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)	4
图 2-4. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P1 (-3.5dB 去加重功能)	4
图 2-5. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P1 (-3.5dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)	4
图 2-6. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P4 (0dB 预设)	5
图 2-7. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P4 (0dB 预设) (EQ 指数 1 = 1.3dB)	5
图 2-8. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P7 (3.5dB 预冲, -6dB 去加重功能)	5
图 2-9. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P7 (3.5dB 预冲, -6dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)	5
图 2-10. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P8 (3.5dB 预冲, -3.5dB 去加重功能)	5
图 2-11. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P8 (3.5dB 预冲, -3.5dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)	5
图 2-12. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P9 (3.5dB 预冲)	6
图 2-13. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P9 (3.5dB 预冲) (EQ 指数 1 = 1.3dB)	6
图 3-1. 带有线性转接驱动器的单个 PCIe 通道.....	6
图 3-2. PCIe TX 均衡和 DS160PR410 CTLE 共同提供前置通道损耗补偿.....	7
图 3-3. DS160PR410 将 PCIe TX 均衡波形传递到后置通道.....	8
图 4-1. 在 18dB 前置通道损耗和 18dB 后置通道损耗下眼宽和眼高与 PCIe TX 预设和转接驱动器 CTLE 设置之间的函数关系	9
图 4-2. 在 24dB 前置通道损耗和 18dB 后置通道损耗下眼宽和眼高与 PCIe TX 预设和转接驱动器 CTLE 设置之间的函数关系	9
图 4-3. 面向 18dB 和 22dB 前置通道损耗的转接驱动器 CTLE 的可能设置.....	10
图 5-1. 转接驱动器放置选项: 处于同一位置的上游和下游转接驱动器.....	13

图 5-2. 转接驱动器放置选项：处于不同位置的上游和下游转接驱动器.....	14
图 6-1. 系统级测试设置示例.....	14
图 6-2. 下游和上游前置通道的可能的转接驱动器 CTLE 设置.....	15

表格清单

表 2-1. DS160PR410 均衡设置.....	3
表 2-2. 各种 PCIe TX 预设的 DS160PR410 性能.....	3
表 5-1. DS160PR410 性能矩阵.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

使用 DS160PR410 PCIe 4.0 线性转接驱动器进行设计时，转接驱动器调优是其中必不可少的一项任务。使用本应用报告中的信息，可轻松理解和实施转接驱动器调优。本应用报告简要概述了 DS160PR410 关键的信号调节特性，介绍了与转接驱动器调优相关的 PCIe 链路元件，提供了有用的 DS160PR410 系统级验证结果和根据这些结果推荐的理想转接驱动器布局，此外还概述了可能实现的 PCIe 链路扩展，以及使用真实系统示例的转接驱动器分步调优说明。全面了解转接驱动器的功能、限制和转接驱动器调优步骤后，系统设计人员可更好地使用线性转接驱动器来扩展 PCIe 4.0 链路的覆盖范围。

2 器件概述

DS160PR410 是一款四通道 PCI-Express 4.0 PCI-SIG 兼容线性转接驱动器，具有集成信号调节功能。如图 2-1 所示，每个通道都包括一个连续时间线性均衡器 (CTLE) 和一个线性驱动器，将它们搭配使用可显著扩展 PCIe 链路。

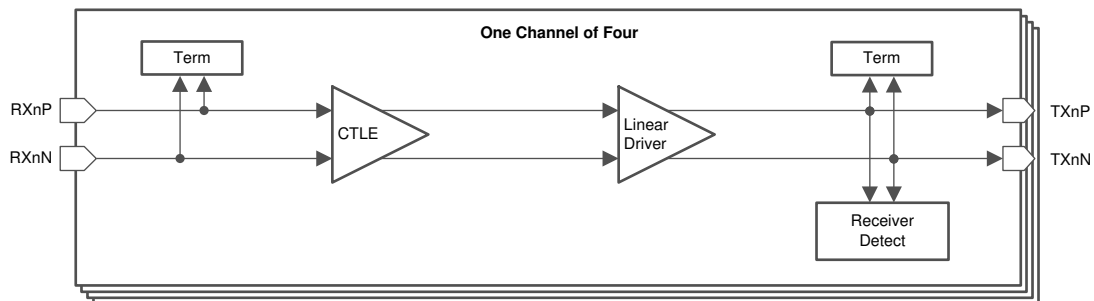


图 2-1. DS160PR410 简化方框图

DS160PR410 具有非常低的附加随机抖动 (60fs rms)、延迟 (70ps) 和功耗，适用于许多需要链路扩展器件的 PCIe 3.0 和 4.0 系统。

2.1 接收器均衡

DS160PR410 CTLE 可将 PCIe 4.0 数据流的 8GHz 频率分量增强高达 18dB。如表 2-1 所示，共有 16 个可编程均衡步骤 (EQ 指数)，可将均衡增强设置为与传输通道的插入损耗非常匹配的水平。在引脚模式下运行时，可通过器件引脚设置均衡增强，或在某一 SMBus/I2C 模式下运行时以编程方式设置 (有关更多详情，请参阅《DS160PR410 编程指南》)。

表 2-1. DS160PR410 均衡设置

EQ 指数	典型 CTLE 增强 (dB)	
	@ 4GHz	@ 8GHz
0	-0.3	-0.8
1	0.4	1.3
2	3.3	5.7
3	3.8	7.1
4	4.9	8.4
5	5.2	9.1
6	5.4	9.8
7	6.5	10.7
8	6.7	11.3
9	7.7	12.6
10	8.7	13.6
11	9.1	14.4
12	9.4	15.0
13	10.3	15.9
14	10.6	16.5
15	11.8	17.8

2.2 转接驱动器线性度

数据路径的线性度经过专门设计，可在保持接收器均衡有效的同时保留任何传输均衡。它能够实现无障碍的 PCIe 3.0 和 4.0 链路训练，可自动优化链路根复合体和端点侧的 PCIe TX 和 RX 均衡功能。表 2-2 所示为在通过 DS160PR410 转接驱动器传递预设之前和 PCIe TX 预设被重新驱动之后的典型 PCIe TX 预设值 (预冲和去加重等级)。该数据是在遵循 PCI-Express 4.0 Base 规范第 8.3.3.5 节的情况下测得的。请注意，转接驱动器后的预设值与初始值的偏差小于 1dB。

表 2-2. 各种 PCIe TX 预设的 DS160PR410 性能

PCIe TX 预设	PCIe 预设限值		通过转接驱动器之前的典型 PCIe 预设		通过转接驱动器之后的典型 PCIe 预设	
	理想预冲	理想去加重功能	预冲 (dB)	去加重功能 (dB)	预冲 (dB)	去加重功能 (dB)
P0	0	-6.0 ±1.5dB	0	-6.7	0	-5.9
P1	0	-3.5 ±1.0dB	0	-3.9	0	-3.3
P2	0	-4.4 ±1.5dB	0	-4.8	0	-4.2
P3	0	-2.5 ±1.0dB	0	-2.9	0	-2.4
P4	0	0	0	0	0	0
P5	1.9 ±1.0dB	0	2.0	0	1.7	0
P6	2.5 ±1.5dB	0	2.9	0	2.4	0
P7	3.5 ±1.0dB	-6.0 ±1.5dB	3.9	-6.7	3.6	-6.1
P8	3.5 ±1.0dB	-3.5 ±1.0dB	3.9	-4.0	3.6	-3.6
P9	3.5 ±1.0dB	0	3.9	0	3.3	0
P10	0	-9.5 ±1.5dB	0	-10.6	0	-9.8

图 2-2 至图 2-13 中的眼图进一步说明了转接驱动器的线性度，以及将转接驱动器放置在非常靠近 PCIe 发送器 (< -3dB) 的地方时，转接驱动器在 PCIe 4.0 速率下通过 PCIe 发送器均衡进行传递的能力 (预冲和去加重波形或 TX 预设)。为简洁起见，仅显示了 PCIe TX 预设 P0、P1、P4、P8 和 P9。下面显示的所有眼图都是使用 50GHz 示波器以 200mV/div 垂直刻度和 10ps/div 水平刻度捕获的。

请注意，此测试用例是病理性用例，在任何真实系统中都不大可能遇到。来自 PCIe 发送器的至少为 -8dB 或更多的转接驱动器放置是一个更典型的用例。

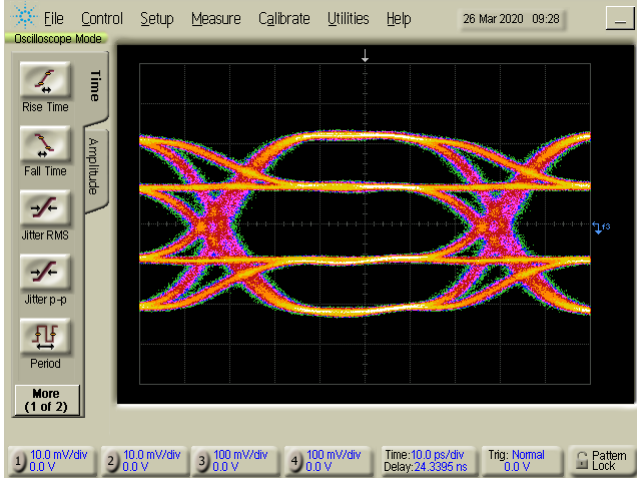


图 2-2. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P0 (-6dB 去加重功能)

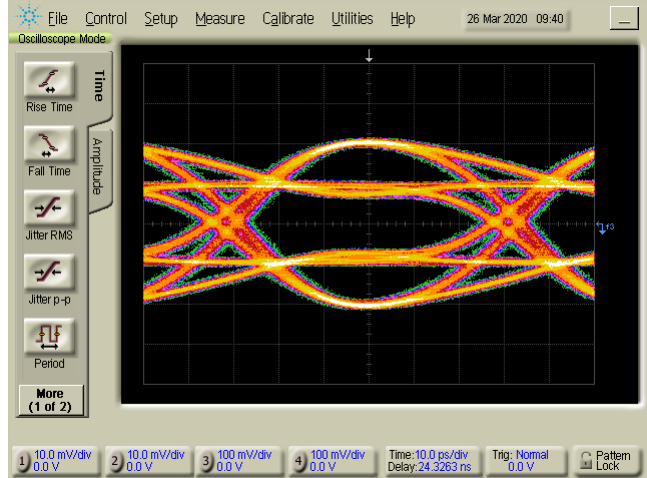


图 2-3. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P0 (-6dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)

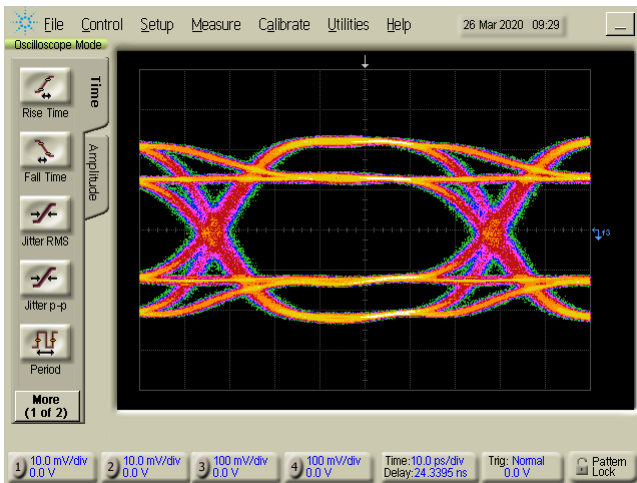


图 2-4. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P1 (-3.5dB 去加重功能)

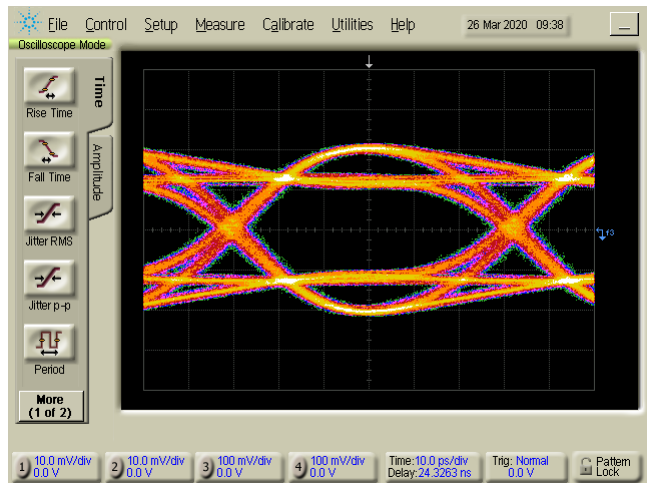


图 2-5. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P1 (-3.5dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)

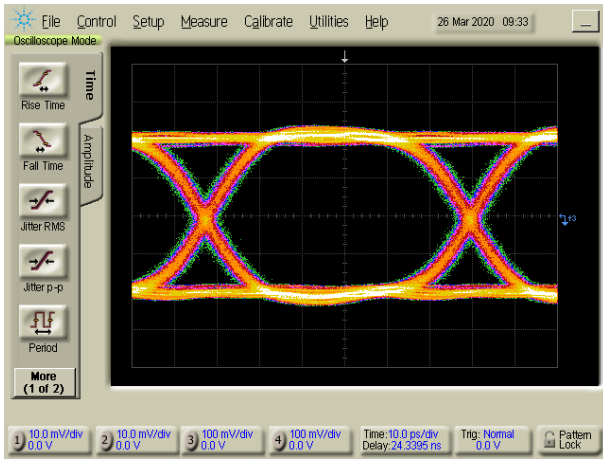


图 2-6. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P4 (0dB 预设)

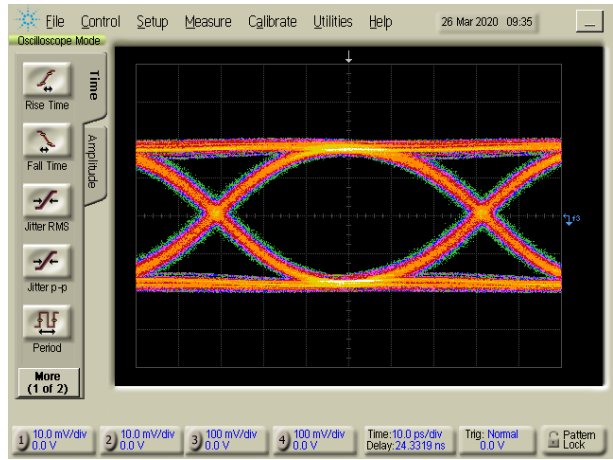


图 2-7. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P4 (0dB 预设) (EQ 指数 1 = 1.3dB)

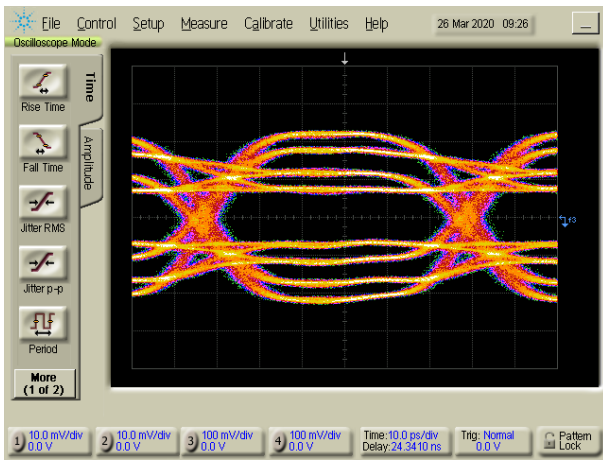


图 2-8. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P7 (3.5dB 预冲, -6dB 去加重功能)

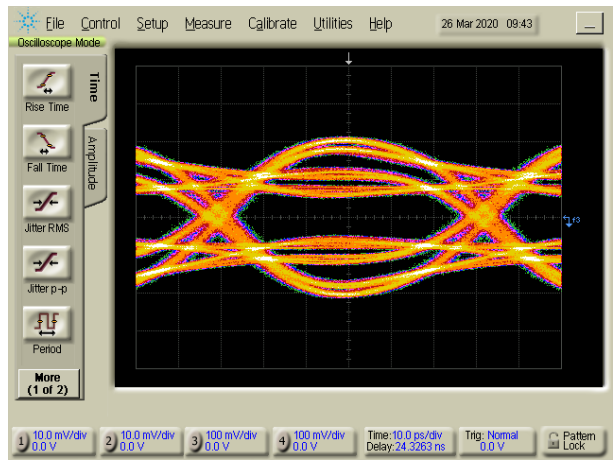


图 2-9. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P7 (3.5dB 预冲, -6dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)

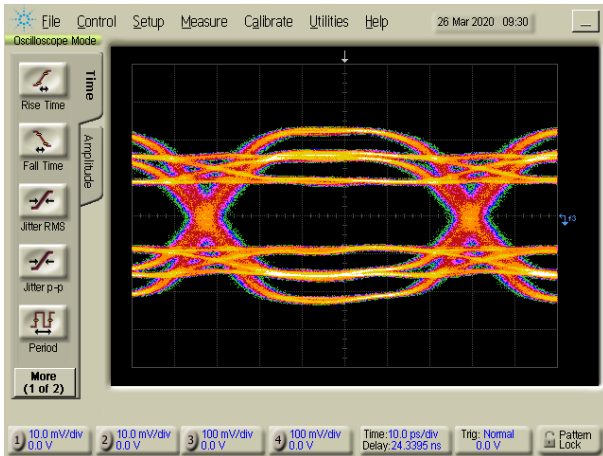


图 2-10. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P8 (3.5dB 预冲, -3.5dB 去加重功能)

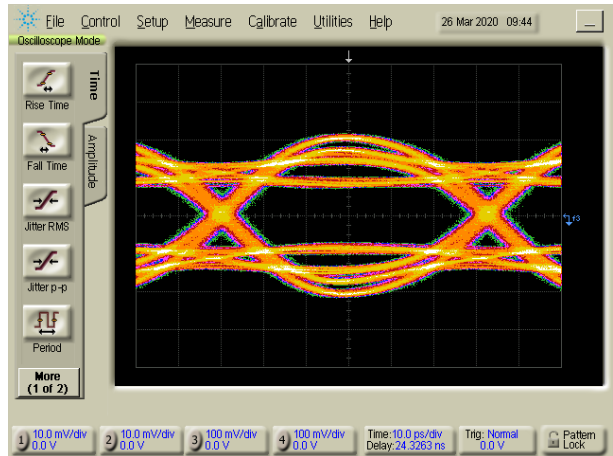


图 2-11. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P8 (3.5dB 预冲, -3.5dB 去加重功能) (EQ 指数 1 = 1.3dB)

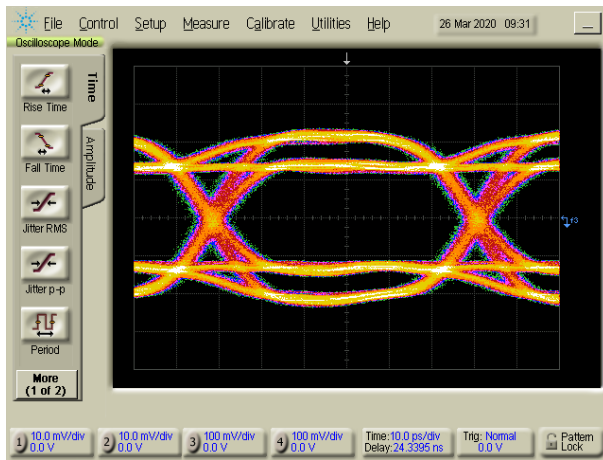


图 2-12. 通过转接驱动器之前的 PCIe TX 预设 P9 (3.5dB 预冲)

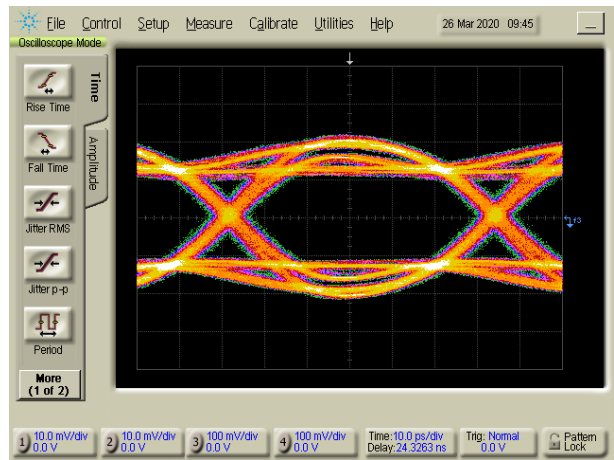


图 2-13. 通过转接驱动器之后的 PCIe TX 预设 P9 (3.5dB 预冲) (EQ 指数 1 = 1.3dB)

根据图 2-2 至图 2-13 中的眼图，很明显，PCIe 预设 P0、P1 和 P4 波形在被 DS160PR410 重新驱动后得到了很好的保留，而 P7 等 TX 预设显示了一些波形下降，但在它们通过转接驱动器进行传递之后保留了大部分 PCIe 均衡增强。将转接驱动器放置在离 PCIe 发送器太近的位置时，应考虑这种下降。

3 带有线性转接驱动器的 PCIe 链路

PCI-Express (PCIe) 链路通常具有 4 通道 (x4)、8 通道 (x8) 和 16 通道 (x16) 等宽度类型。为实现转接驱动器调优，熟悉包含线性转接驱动器的 PCIe 通道的相关元件很有用。如图 3-1 中所示，PCIe 根复合体 (RC) 和 PCIe 端点 (EP) 之间的双向通信通过下游 (从 RC 到 EP) 和上游 (从 EP 到 RC) 通道进行。

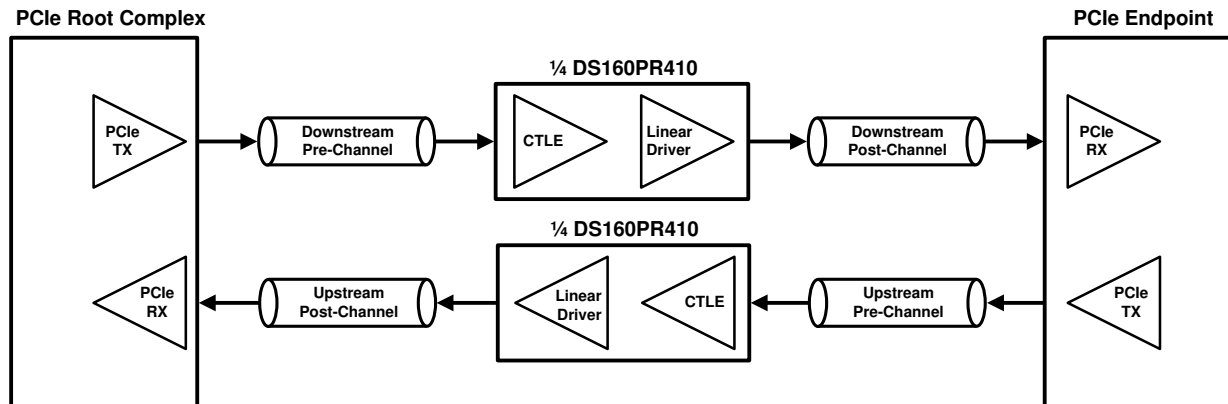


图 3-1. 带有线性转接驱动器的单个 PCIe 通道

PCIe 发送器 (TX) 和转接驱动器之间的通道是前置通道，而转接驱动器和 PCIe 接收器 (RX) 之间的通道是后置通道，这说明了通道相对于转接驱动器的位置。

需要注意的是，前置通道损耗补偿通过 PCIe TX 均衡（例如，有限脉冲响应 (FIR) 功能）和转接驱动器 CTLE 实现。如图 3-2 所示，DS160PR410 CTLE 连同 8GHz 下的 18dB 增强，可补偿 -20dB 的传输通道损耗，并以宽裕度打开完全闭合的眼图。借助具有预设 P7（约 8dB 额外增强）的 PCIe TX，-30dB 通道也具有足够的裕量。

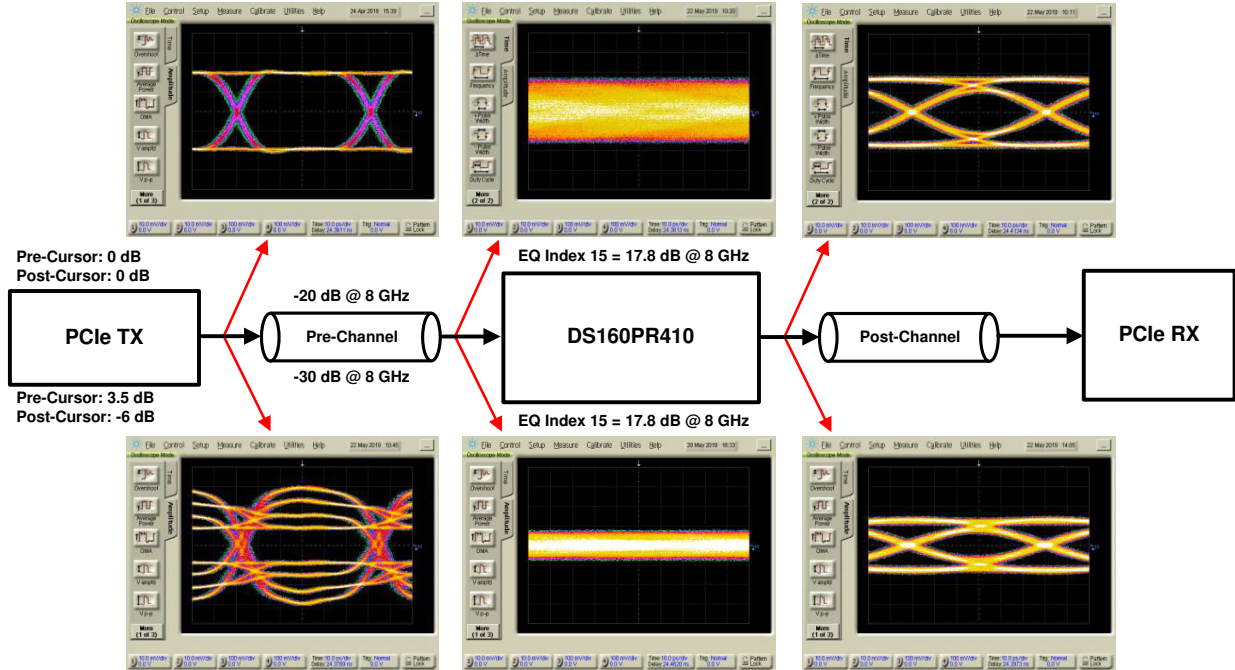


图 3-2. PCIe TX 均衡和 DS160PR410 CTLE 共同提供前置通道损耗补偿

后置通道损耗补偿由 PCIe 接收器均衡功能提供，例如自适应 CTLE 和 DFE (决策反馈均衡器)，以及通过线性转接驱动器传递的任何过度 PCIe TX 均衡。如图 3-3 所示，仅使用一个 PCIe TX 对在 8GHz 下具有 -10dB 插入损耗的较短通道进行补偿，并使用 DS160PR410 以最小的 CTLE 增益重新驱动信号。在这种情况下，后置通道损耗必须由 PCIe RX 单独补偿。或者，DS160PR410 CTLE 可配置为完全补偿前置通道损耗，如图 3-3 所示，PCIe TX 均衡波形通过转接驱动器传递，与 PCIe RX 均衡功能一同补偿后置通道损耗。

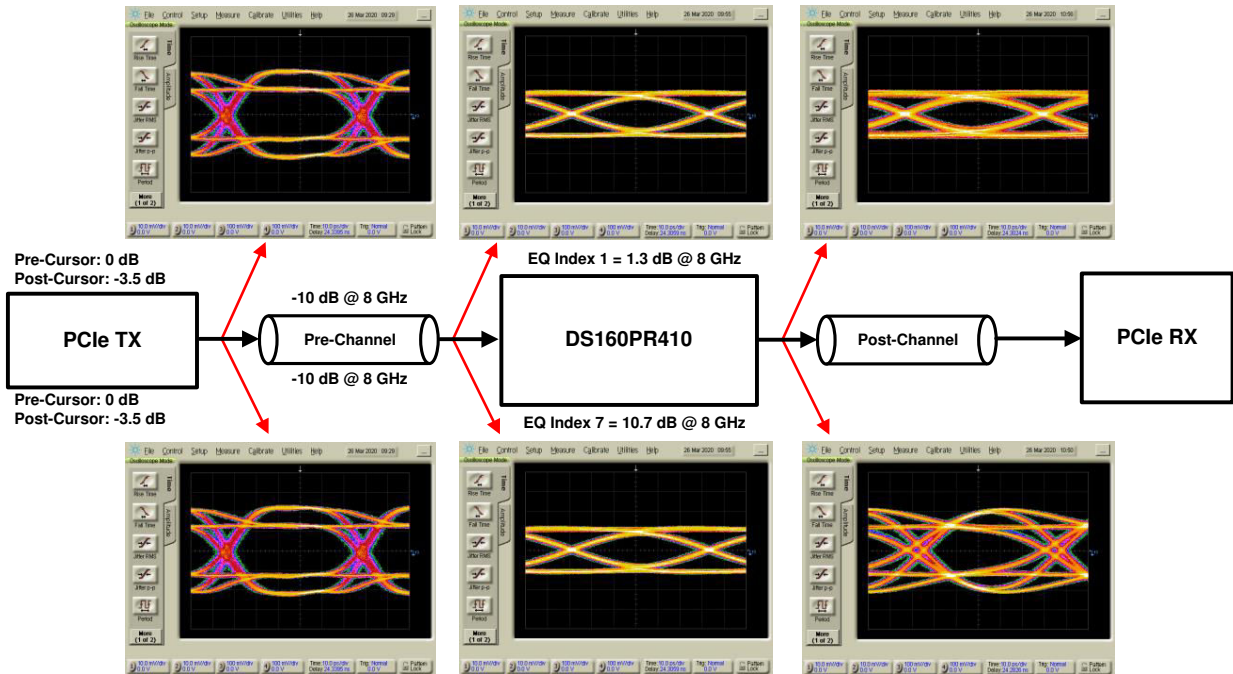


图 3-3. DS160PR410 将 PCIe TX 均衡波形传递到后置通道

4 转接驱动器调优

对于 DS160PR410，只需对其 CTLE 设置进行调优即可使其在 PCIe 链路中实现最优运行状态。对于大多数应用，其他转接驱动器设置（例如 VOD 和 DC 增益设置）应保持默认值。

调优 CTLE 通常意味着调整其增益曲线以匹配给定通道损耗曲线的倒数。但是，对于 DS160PR410 等 PCIe 转接驱动器而言，CTLE 调优意味着选择适用于大多数 PCIe TX 预设的 CTLE 设置，以确保实现具有足够时序和噪声裕度的稳健 PCIe 链路训练。如图 4-1 和图 4-2 中所示，有多个转接驱动器 CTLE 设置和 PCIe TX 预设，有助于在使用符合 PCIe 的接收器均衡技术进行调节后产生可接受的眼图张开度。这些图显示了 PCIe 一致性测试码型的眼高 (EH) 和眼宽 (EW)，该一致性测试码型使用示波器捕捉，然后由 PCI-SIG 的 SigTest v4.0.48 软件进行后处理，该软件根据 PCIe 4.0 Base 规范对 PCIe 接收器的自适应 CTLE 和 DFE 功能进行建模。

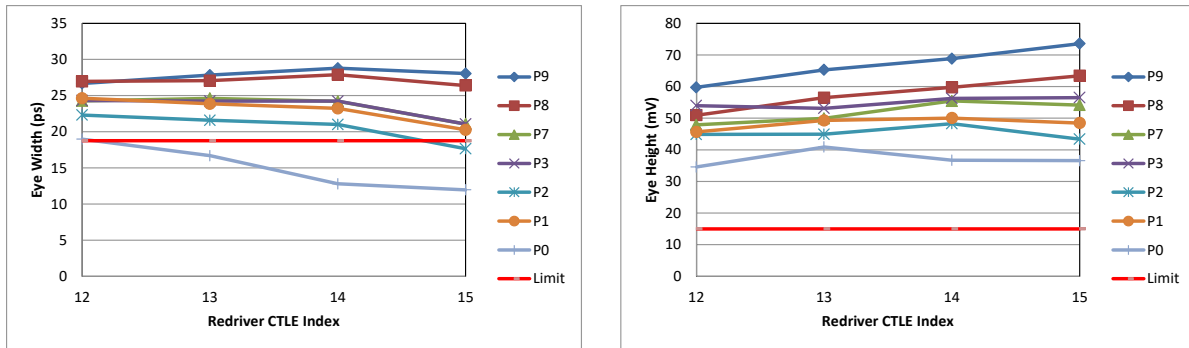


图 4-1. 在 18dB 前置通道损耗和 18dB 后置通道损耗下眼宽和眼高与 PCIe TX 预设和转接驱动器 CTLE 设置之间的函数关系

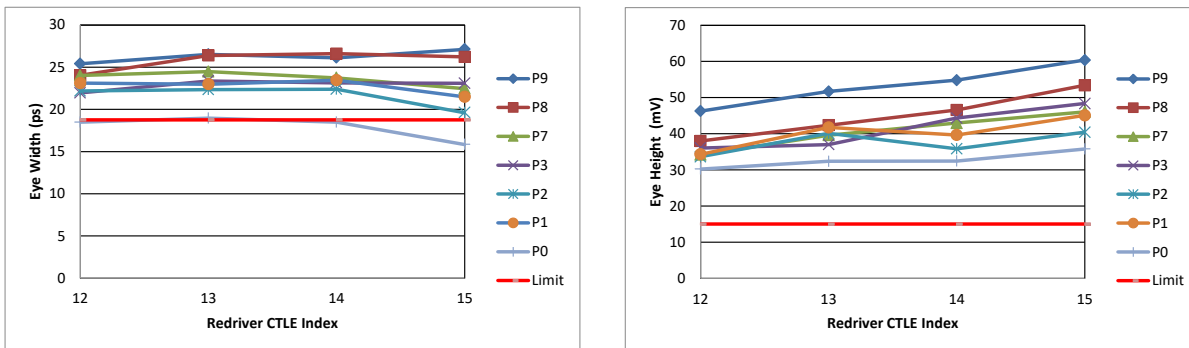


图 4-2. 在 24dB 前置通道损耗和 18dB 后置通道损耗下眼宽和眼高与 PCIe TX 预设和转接驱动器 CTLE 设置之间的函数关系

如前所述，前置通道损耗补偿由 PCIe TX 均衡和转接驱动器 CTLE 实现，而后置通道损耗由 PCIe RX 均衡和通过转接驱动器传递的任何过度 PCIe TX 均衡来提供。理论上，对于给定的前置通道损耗而言，可接受的转接驱动器 CTLE 设置范围至少与 PCIe TX EQ 增强范围 (0 - 9.5dB) 一样宽。图 4-3 所示为针对 18dB 和 22dB 前置通道损耗的可能设置。例如，对于 18dB 前置通道损耗，9.5dB (预设 P10) 的最大 PCIe TX EQ 和 8.4dB (CTLE 指数 4) 的转接驱动器 CTLE 增强可提供 17.9dB 的组合均衡增强，与 -18dB 前置通道损耗非常接近。同样，如果选择了 17.8dB 的转接驱动器 CTLE 增强 (CTLE 指数 15)，即使结合使用 PCIe TX 预设 P4 (0dB 的 TX EQ 增强)，18dB 前置通道损耗也有足够的均衡增强。选择转接驱动器 CTLE 指数 15 的优势在于，它可与任意 PCIe 预设组合来补偿 18dB 的前置通道损耗。任何过度 PCIe TX EQ 增强都将通过转接驱动器来传递，帮助补偿后置通道损耗。图 4-3 说明了这一点，其中突出显示了包含 (PCIe TX EQ + 转接驱动器 CTLE) 组合均衡增强可接受值的单元格。

PCIe TX Presets		PCIe TX EQ Boost (dB)							
		P4	P5	P3 P6	P1 P9	P2	P0 P8	P7	P10
Redriver CTLE Index	Redriver CTLE Boost (dB)	0.00	1.90	2.50	3.50	4.40	6.00	8.00	9.50
0	-0.8	-0.8	1.1	1.7	2.7	3.6	5.2	7.2	8.7
1	1.3	1.3	3.2	3.8	4.8	5.7	7.3	9.3	10.8
2	5.7	5.7	7.6	8.2	9.2	10.1	11.7	13.7	15.2
3	7.1	7.1	9.0	9.6	10.6	11.5	13.1	15.1	16.6
4	8.4	8.4	10.3	10.9	11.9	12.8	14.4	16.4	17.9
5	9.1	9.1	11.0	11.6	12.6	13.5	15.1	17.1	18.6
6	9.8	9.8	11.7	12.3	13.3	14.2	15.8	17.8	19.3
7	10.7	10.7	12.6	13.2	14.2	15.1	16.7	18.7	20.2
8	11.3	11.3	13.2	13.8	14.8	15.7	17.3	19.3	20.8
9	12.6	12.6	14.5	15.1	16.1	17.0	18.6	20.6	22.1
10	13.6	13.6	15.5	16.1	17.1	18.0	19.6	21.6	23.1
11	14.4	14.4	16.3	16.9	17.9	18.8	20.4	22.4	23.9
12	15.0	15.0	16.9	17.5	18.5	19.4	21.0	23.0	24.5
13	15.9	15.9	17.8	18.4	19.4	20.3	21.9	23.9	25.4
14	16.5	16.5	18.4	19.0	20.0	20.9	22.5	24.5	26.0
15	17.8	17.8	19.7	20.3	21.3	22.2	23.8	25.8	27.3

Pre-Channel Loss: -18 dB

PCIe TX Presets		PCIe TX EQ Boost (dB)							
		P4	P5	P3 P6	P1 P9	P2	P0 P8	P7	P10
Redriver CTLE Index	Redriver CTLE Boost (dB)	0.00	1.90	2.50	3.50	4.40	6.00	8.00	9.50
0	-0.8	-0.8	1.1	1.7	2.7	3.6	5.2	7.2	8.7
1	1.3	1.3	3.2	3.8	4.8	5.7	7.3	9.3	10.8
2	5.7	5.7	7.6	8.2	9.2	10.1	11.7	13.7	15.2
3	7.1	7.1	9.0	9.6	10.6	11.5	13.1	15.1	16.6
4	8.4	8.4	10.3	10.9	11.9	12.8	14.4	16.4	17.9
5	9.1	9.1	11.0	11.6	12.6	13.5	15.1	17.1	18.6
6	9.8	9.8	11.7	12.3	13.3	14.2	15.8	17.8	19.3
7	10.7	10.7	12.6	13.2	14.2	15.1	16.7	18.7	20.2
8	11.3	11.3	13.2	13.8	14.8	15.7	17.3	19.3	20.8
9	12.6	12.6	14.5	15.1	16.1	17.0	18.6	20.6	22.1
10	13.6	13.6	15.5	16.1	17.1	18.0	19.6	21.6	23.1
11	14.4	14.4	16.3	16.9	17.9	18.8	20.4	22.4	23.9
12	15.0	15.0	16.9	17.5	18.5	19.4	21.0	23.0	24.5
13	15.9	15.9	17.8	18.4	19.4	20.3	21.9	23.9	25.4
14	16.5	16.5	18.4	19.0	20.0	20.9	22.5	24.5	26.0
15	17.8	17.8	19.7	20.3	21.3	22.2	23.8	25.8	27.3

Pre-Channel Loss: -22 dB

图 4-3. 面向 18dB 和 22dB 前置通道损耗的转接驱动器 CTLE 的可能设置

图 4-3 所示内容可帮助调优转接驱动器，或者更准确地说，可帮助选择适合大多数 PCIe TX 预设的转接驱动器 CTLE 设置。例如，对于 18dB 前置通道损耗，转接驱动器 CTLE 指数 10-15 可与七个或更多个 PCIe TX 预设搭配使用。表 5-1 中后面所示的经验数据表明，当 PCIe TX 预设的 EQ 增强在 1.9dB - 4.4dB 范围内时，DS160PR410 表现更佳。如果排除此范围之外的 PCIe TX 预设，则适用于大多数 PCIe TX 预设的转接驱动器 CTLE 设置可缩小到转接器 CTLE 指数 12 到 15。这在图 4-3 中以红色框突出显示。如果后置通道损耗可通过 PCIe TX 接收器均衡得到完全补偿，则应选择此范围内较低的转接驱动器设置 (例如，CTLE 指数 12 或 13)。但是，如果后置通道损耗很大并且需要 PCIe TX 均衡来帮助进行后置通道补偿，则应从此范围中选择更高的转接驱动器 CTLE 设置 (例如，CTLE 指数 14 或 15)。

以下步骤提供了有关选择最优转接驱动器 CTLE 设置的一般指导：

1. 了解链路中配套 PCIe 发送器和接收器的信号调节能力。虽然所有 PCIe 发送器和接收器都应满足 PCIe.4.0 Base 规范中定义的最低要求，但各个端点和 CPU 之间的性能可能有很大差异。
2. 确定或估计所有下行和上行通道的前置通道、后置通道和总通道损耗。
3. 确定每个转接驱动器的最优 CTLE 设置。根据前置通道损耗估算，在 PCIe 发送器和 DS160PR410 CTLE 之间分担损耗补偿任务。使用图 4-3 中所示的表选择适合大多数 PCIe TX 预设的 CTLE 指数。如果每个转接驱动器具有明显不同的前置通道损耗曲线，则应对每个转接驱动器重复此步骤。通常，下游和上游转接驱动器的前置通道损耗曲线不同。
4. 验证下游转接驱动器的最优 CTLE 设置。如果测试实际系统，从最初选择的 CTLE 设置（同时保持最初选择的上游转接器的 CTLE 设置）上下扫描下游转接驱动器的 CTLE 设置，以确定允许系统成功连接的 CTLE 设置范围，或者在执行系统仿真或测量眼图时满足预定义的最低眼图波罩标准。
5. 验证上游转接驱动器的最优 CTLE 设置。从最初选择的 CTLE 设置（同时保持下游转接器的最优 CTLE 设置）上下扫描上游转接驱动器的 CTLE 设置，以确定允许系统成功连接的 CTLE 设置范围，或者满足预定义的最低眼图波罩标准。

5 性能矩阵

表 5-1 中的 DS160PR410 性能矩阵使用 Intel 广泛接受的 PCI Express 4.0 线性转接驱动器表征方法，展示了涉及各种前置通道和后置通道组合的器件性能。

表 5-1. DS160PR410 性能矩阵

前置通道 损耗	后置通道损耗				
	-10dB	-14dB	-18dB	-22dB	-26dB
-10dB	EH = 145.93mV EW = 33.08ps TX EQ = P5 (1.9dB) ReDrv EQ 指数 = 8, 9, 10 ReDrv EQ = 12.6dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 14.2mV Tap2 = -10.7mV	EH = 113.98mV EW = 32.84ps TX EQ = P5 (1.9dB) ReDrv EQ 指数 = 8, 9, 10 ReDrv EQ = 12.6dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 28.8mV Tap2 = -5.4mV	EH = 79.8mV EW = 31.38ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 11, 12, 13 ReDrv EQ = 15dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 27.8mV Tap2 = -3.4mV	EH = 53.92mV EW = 30.6ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 10, 11, 12 ReDrv EQ = 14.4dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 2.9mV	EH = 33.9mV EW = 25.0ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 11, 12, 13 ReDrv EQ = 15dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 5.4mV
-14dB	EH = 139.58mV EW = 31.0ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 11, 12, 13 ReDrv EQ = 15dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 8.8mV Tap2 = -13.2mV	EH = 103.56mV EW = 30.5ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 11, 12, 13 ReDrv EQ = 15dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 22.9mV Tap2 = -8.3mV	EH = 76.4mV EW = 29.33ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 13, 14, 15 ReDrv EQ = 16.5dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : DFE Tap1 = 30mV DFE Tap2 = -5.4mV	EH = 51.39mV EW = 28.15ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = -1.5mV	EH = 31.04mV EW = 24.65ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 2mV
-18dB	EH = 129.15mV EW = 30.4ps TX EQ = P5 (1.9dB) ReDrv EQ 指数 = 12, 13, 14 ReDrv EQ = 15.9dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 25.4mV Tap2 = -11.2mV	EH = 95.87mV EW = 29.5ps TX EQ = P5 (1.9dB) ReDrv EQ 指数 = 13, 14, 15 ReDrv EQ = 16.5dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = -6.3mV	EH = 67.51mV EW = 27.22ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = -3.4mV	EH = 44.48mV EW = 26.09ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 13, 14, 15 ReDrv EQ = 16.5dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 2mV	EH = 22.48mV EW = 20.04ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 5.4mV

表 5-1. DS160PR410 性能矩阵 (continued)

前置通道	后置通道损耗				
-22dB	EH = 110.76mV EW = 30.9ps TX EQ = P5 (1.9dB) ReDrv EQ 指数 = 13, 14, 15 ReDrv EQ = 16.5dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE Tap1 = 30mV RX DFE Tap2 = -6.3mV	EH = 74.42mV EW = 29.68ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 13, 14, 15 ReDrv EQ = 16.5dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE Tap1 = 30mV RX DFE Tap2 = -0.5mV	EH = 53.47mV EW = 27.9ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE Tap1 = 30mV RX DFE Tap2 = 1.5mV	EH = 37.65mV EW = 25.74ps TX EQ = P9 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE Tap1 = 30mV RX DFE Tap2 = 3.4mV	
-26dB	EH = 81.77mV EW = 29.19ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = -4.4mV	EH = 57.47mV EW = 27.39ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 0.5mV	EH = 40.59mV EW = 23.81ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 2mV		
-30dB	EH = 48.66mV EW = 26.84ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 1 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 1mV	EH = 33.45mV EW = 23.82ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 2.9mV			
-32dB	EH = 33.49mV EW = 24.84ps TX EQ = P6 (2.5dB) ReDrv EQ 指数 = 13, 14, 15 ReDrv EQ = 16.5dB RX CTLE 指数 = 3 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 2.9mV	EH = 23.37mV EW = 21.21ps TX EQ = P9 (3.5dB) ReDrv EQ 指数 = 14, 15 ReDrv EQ = 17.8dB RX CTLE 指数 = 2 RX DFE : Tap1 = 30mV Tap2 = 5.9mV			

与图 3-2 中所示设置等效的测试设置用于收集性能矩阵中的数据。在此测试设置中，图形发生器模拟 PCIe TX，而带有 PCI-SIG SigTest v4.0.48 软件的示波器模拟 PCIe RX，两者一同连接至 DS160PR410 的一个通道，而最坏情况下的串扰则出现在相邻通道上。该数据集考虑到了器件电压、环境温度和工艺的不同。

图 4-1 中的每个条目都显示了 PCIe 一致性测试码型的眼高 (EH) 和眼宽 (EW)，该一致性测试码型使用示波器捕捉，然后由 PCI-SIG 的 SigTest v4.0.48 软件进行后处理，该软件根据 PCIe 4.0 Base 规范对 PCIe 接收器的自适应 CTLE 和 DFE 功能进行建模。它还显示了选定的理想 PCIe TX 预设 (如表 2-2 规定)、DS160PR410 转接驱动器 CTLE 设置或 EQ 指数 (如表 2-1 规定) 以及面向给定前置通道和后置通道损耗的 PCIe RX 均衡 (CTLE 和 DFE) 设置。

背景色为绿色的条目显示了满足 PCIe 4.0 接收器 (EH ≥ 15mV 和 EW ≥ 18.75ps) 的最低眼图张开要求的前置通道和后置通道组合，而橙色条目显示了不满足最低眼图张开要求的前置通道和后置通道组合。背景色为深绿色的条目显示了产生的总通道损耗为 -40dB 或更多的前置通道和后置通道组合。

5.1 转接驱动器放置

性能矩阵还以转接驱动器放置的函数形式表明 PCIe 4.0 链路可能的覆盖范围。对性能矩阵的详细检查可得出以下关于转接驱动器放置的结论：

- 位于 PCIe 链路中间的转接驱动器实现了链路的最大扩展，如图 5-1 的第一个框图中所提示。
- 当上游和下游转接驱动器的前置通道损耗至少为 -14dB 时，总通道损耗（前置通道 + 后置通道）可达到 -40dB 或更多（图 4-1）。换言之，将 PCIe 链路扩展到 -40dB 或更高需要将 DS160PR410 转接驱动器放置在距离 PCIe 发送器至少 -14dB 的位置。
- 将转接驱动器放置在距离上游或下游 PCIe 发送器小于 -14dB 的位置会线性地减少链路的最大覆盖范围。如图 5-1 的第 2 个和第 3 个框图中所示，放置在与 PCIe 根复合体或端点相距 -14dB 处的转接驱动器可达到 -40dB 的覆盖范围。但是，将转接驱动器放置在与 PCIe 根复合体或端点相距 -8dB 处会将链路最大覆盖范围限制在 -34dB。
- 也可将上游和下游转接驱动器放置在不同的位置，如图 5-2 所示，但对于大多数系统来说这可能不切实际。

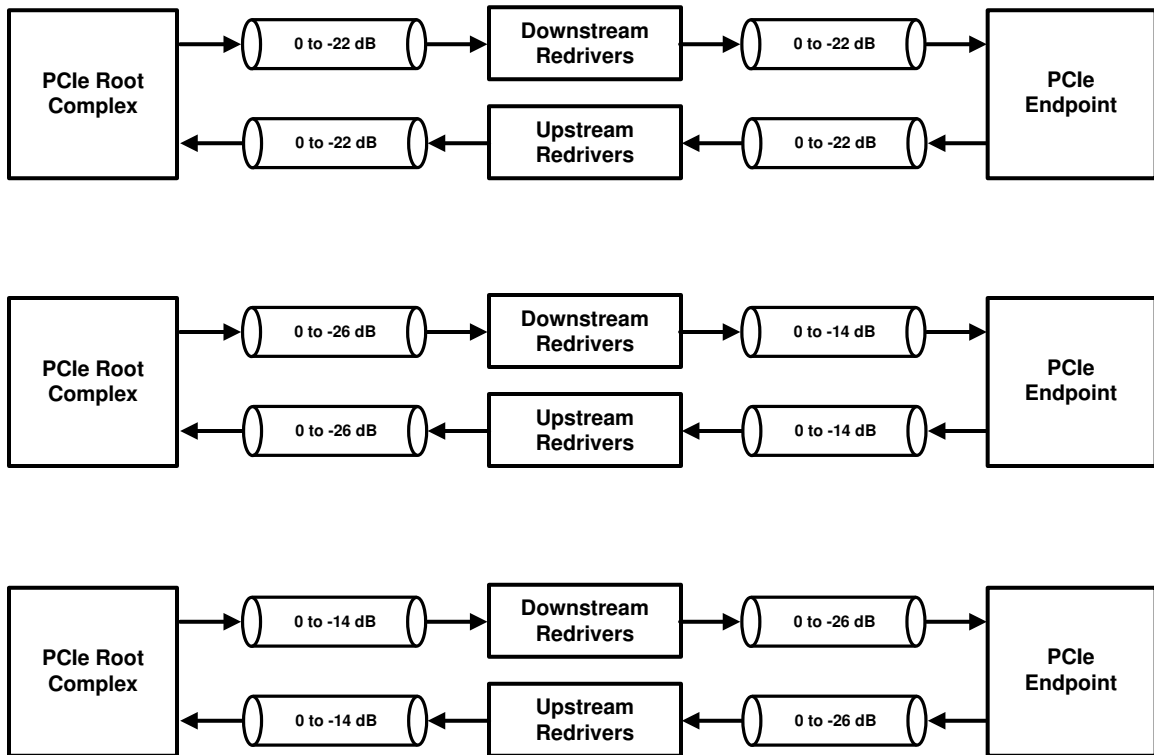


图 5-1. 转接驱动器放置选项：处于同一位置的上游和下游转接驱动器

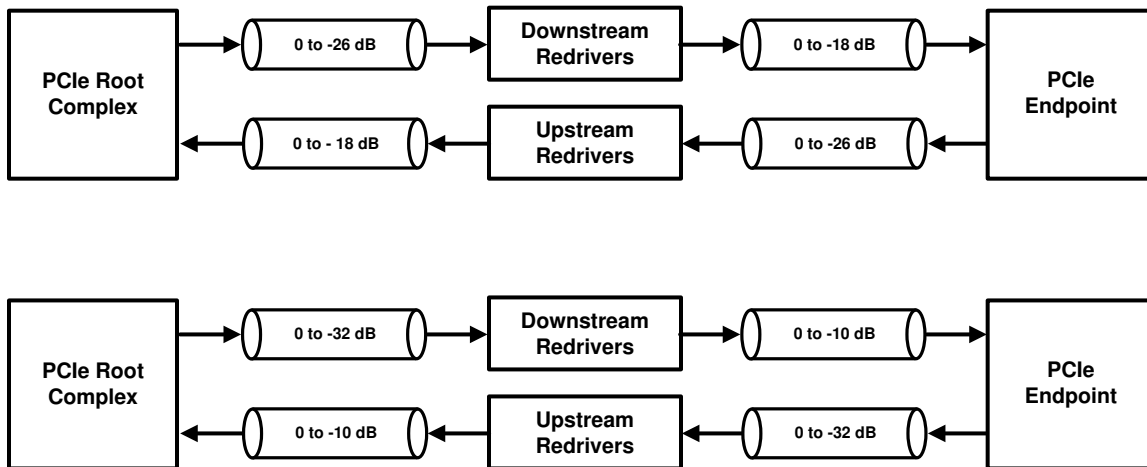


图 5-2. 转接驱动器放置选项：处于不同位置的上游和下游转接驱动器

6 调优示例

考虑图 6-1 中所示的系统。DS160PR410EVM-RSC 是一个转接卡式 TI 评估模块，具有八个 DS160PR410 器件并能够扩展 x16 PCIe 4.0 链路，位于服务器主板上的 CPU 和 PCIe 端点（网络接口卡，即 NIC）之间。插入了额外的“扩展器”卡（Intel PCIe 链路扩展卡，即 PLEC），以增加通道损耗并展示转接驱动器扩展链路覆盖范围的能力。

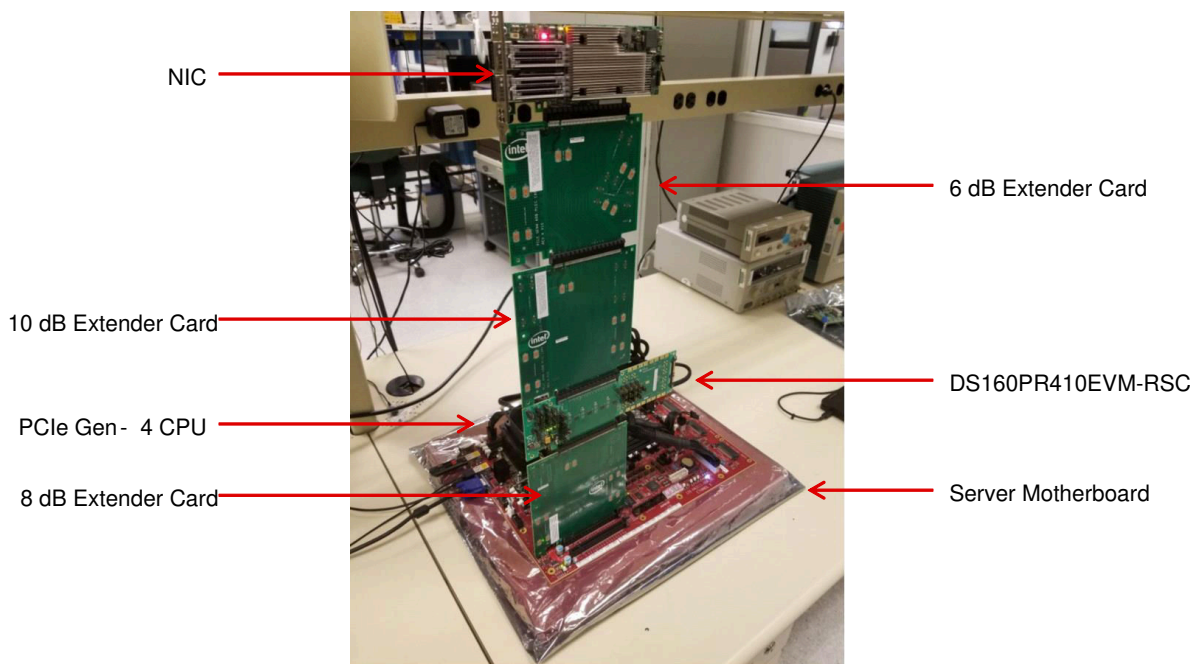


图 6-1. 系统级测试设置示例

针对此示例的转接驱动器调优步骤概述如下：

- 了解配套 PCIe TX 和 RX 的功能：CPU 和网络接口卡 (NIC) 均具有 PCIe 4.0 I/O，并且已确认可在不使用转接驱动器的情况下补偿至少 -28dB 的通道损耗。
- 确定或评估通道损耗：
 - 下游前置通道和上游后置通道 (CPU 和转接驱动器之间的通道)：CPU 封装 (约 5dB)、主板差分布线 (约 10dB)、8dB 扩展卡 (8dB)、DS160PR410EVM-RSC 差分布线 (约 0.5dB)、两个 CEM 连接器 (2 x 0.5dB)，总计 24.5dB。
 - 下游后置通道和上游前置通道 (转接驱动器和端点之间的通道)：DS160PR410EVM-RSC 差分布线 (约 0.5dB)、10dB 和 6dB 扩展卡 (16dB)、包括 SoC 封装的 NIC (约 2.5dB) 和三个 CEM 连接器 (3 x 0.5dB)，总计 20.5dB。
- 确定转接驱动器的最优 CTLE 设置：
 - 下游转接驱动器：下游前置通道损耗为 -24.5dB，并使用图 6-2 中所示的二维阵列，因此 CTLE 指数 15 可视为适用于大多数 PCIe TX 预设的最优设置。
 - 上游转接驱动器：上游前置通道损耗为 -20.5dB，并使用图 6-2 中所示的二维阵列，因此 CTLE 指数 15 也可视为适用于大多数 PCIe TX 预设的最优设置。

PCIe TX Presets		PCIe TX EQ Boost (dB)							
		P4	P5	P3 P6	P1 P9	P2	P0 P8	P7	P10
Redriver CTLE Index	Redriver CTLE Boost (dB)	0.00	1.90	2.50	3.50	4.40	6.00	8.00	9.50
	0	-0.8	-0.8	1.1	1.7	2.7	3.6	5.2	7.2
1	1.3	1.3	3.2	3.8	4.8	5.7	7.3	9.3	10.8
2	5.7	5.7	7.6	8.2	9.2	10.1	11.7	13.7	15.2
3	7.1	7.1	9.0	9.6	10.6	11.5	13.1	15.1	16.6
4	8.4	8.4	10.3	10.9	11.9	12.8	14.4	16.4	17.9
5	9.1	9.1	11.0	11.6	12.6	13.5	15.1	17.1	18.6
6	9.8	9.8	11.7	12.3	13.3	14.2	15.8	17.8	19.3
7	10.7	10.7	12.6	13.2	14.2	15.1	16.7	18.7	20.2
8	11.3	11.3	13.2	13.8	14.8	15.7	17.3	19.3	20.8
9	12.6	12.6	14.5	15.1	16.1	17.0	18.6	20.6	22.1
10	13.6	13.6	15.5	16.1	17.1	18.0	19.6	21.6	23.1
11	14.4	14.4	16.3	16.9	17.9	18.8	20.4	22.4	23.9
12	15.0	15.0	16.9	17.5	18.5	19.4	21.0	23.0	24.5
13	15.9	15.9	17.8	18.4	19.4	20.3	21.9	23.9	25.4
14	16.5	16.5	18.4	19.0	20.0	20.9	22.5	24.5	26.0
15	17.8	17.8	19.7	20.3	21.3	22.2	23.8	25.8	27.3

Downstream Pre-Channel Loss: -24.5 dB

PCIe TX Presets		PCIe TX EQ Boost (dB)							
		P4	P5	P3 P6	P1 P9	P2	P0 P8	P7	P10
Redriver CTLE Index	Redriver CTLE Boost (dB)	0.00	1.90	2.50	3.50	4.40	6.00	8.00	9.50
	0	-0.8	-0.8	1.1	1.7	2.7	3.6	5.2	7.2
1	1.3	1.3	3.2	3.8	4.8	5.7	7.3	9.3	10.8
2	5.7	5.7	7.6	8.2	9.2	10.1	11.7	13.7	15.2
3	7.1	7.1	9.0	9.6	10.6	11.5	13.1	15.1	16.6
4	8.4	8.4	10.3	10.9	11.9	12.8	14.4	16.4	17.9
5	9.1	9.1	11.0	11.6	12.6	13.5	15.1	17.1	18.6
6	9.8	9.8	11.7	12.3	13.3	14.2	15.8	17.8	19.3
7	10.7	10.7	12.6	13.2	14.2	15.1	16.7	18.7	20.2
8	11.3	11.3	13.2	13.8	14.8	15.7	17.3	19.3	20.8
9	12.6	12.6	14.5	15.1	16.1	17.0	18.6	20.6	22.1
10	13.6	13.6	15.5	16.1	17.1	18.0	19.6	21.6	23.1
11	14.4	14.4	16.3	16.9	17.9	18.8	20.4	22.4	23.9
12	15.0	15.0	16.9	17.5	18.5	19.4	21.0	23.0	24.5
13	15.9	15.9	17.8	18.4	19.4	20.3	21.9	23.9	25.4
14	16.5	16.5	18.4	19.0	20.0	20.9	22.5	24.5	26.0
15	17.8	17.8	19.7	20.3	21.3	22.2	23.8	25.8	27.3

Upstream Pre-Channel Loss: -20.5 dB

图 6-2. 下游和上游前置通道的可能的转接驱动器 CTLE 设置

4. 验证下游转接驱动器的最优 CTLE 设置。扫描下游转接驱动器的 CTLE 设置，同时保持上游转接驱动器的 CTLE 指数 15 设置。下游转接驱动器设置从指数 15 的起始设置逐步降低。在每一步，链路训练都会重新开始，然后系统检查是否成功建立了 PCIe 4.0 x16 链路。对于此示例，确定指数 10 到指数 15 范围的 CTLE 设置成功产生了 PCIe 4.0 x16 链路。多种下游转接驱动器 CTLE 设置都能够成功完成链接，这表明端点 PCIe 接收器具有出色的性能。
5. 验证上游转接驱动器的最优 CTLE 设置。扫描上游转接驱动器的 CTLE 设置，同时保持下游转接驱动器的最优 CTLE 指数 15 设置。上游转接驱动器设置从指数 15 的起始设置逐步升高和降低。在每一步，链路训练都会重新开始，然后系统检查是否成功建立了 PCIe 4.0 x16 链路。对于此示例，确定指数 13 到指数 15 范围的 CTLE 设置成功产生了 PCIe 4.0 x16 链路。

7 总结

本应用报告详细介绍了 DS160PR410 PCIe 4.0 线性转接驱动器的关键信号调节特性。此外，文中还介绍了相关系统级验证测试结果，据此映射带有转接驱动器的 PCIe 链路的最大覆盖范围并推荐更优的转接驱动器布置，还提供了使用真实系统示例的分步转接驱动器调优说明。全面了解转接驱动器的功能、限制和转接驱动器调优步骤后，系统设计人员可更好地使用线性转接驱动器扩展 PCIe 4.0 链路的覆盖范围。

8 参考文献

1. 德州仪器 (TI), 《DS160PR410 四通道 PCI Express 4.0 线性转接驱动器》数据表
2. 德州仪器 (TI), 《DS160PR410 编程指南》
3. 德州仪器 (TI), 《了解 DS160PR410 PCI-Express Gen-4 转接驱动器的 EEPROM 编程》应用报告
4. Intel, *PCI Express 4.0 Linear Re-Driver Characterization Methodology*, Revision 1.0, January 2019
5. PCI-SIG, *PCI Express Base Specification*, Revision 4.0 Version 1.0, September 27, 2017

9 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (June 2020) to Revision A (July 2021)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	2

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