

Application Note

了解 TI PCIe 转接驱动器均衡



Evan Su

摘要

PCIe 线性转接驱动器用于补偿由 PCIe 信号路径中布线和其他元件的插入损耗引起的信号失真。补偿通过特殊的 CTLE 放大器来完成，该放大器可以提升输入信号的高频成分。此均衡 (EQ) 过程是跨不同产品类别进行 PCIe 信号调节的基本工具之一。尽管从理论层面来看，这比 PCIe 重定时器提供的额外数字处理功能更简单，但均衡的模拟属性已经颇为复杂，这可能会令不熟悉信号完整性领域的工程师感到困惑。本应用手册以直观且详细的方式介绍 PCIe 转接驱动器均衡的背景和操作，帮助工程师在设计中规划和使用 TI PCIe 转接驱动器。

内容

1 引言.....	2
2 插入损耗和均衡.....	2
3 EQ 放大器和 EQ 指数.....	5
4 过均衡和转接驱动器放置.....	8
5 总结.....	10
6 参考资料.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

外设组件快速互连 (*Peripheral Component Interconnect Express, PCIe*) 是一种高速数据传输标准，常用于计算机和企业系统，用于连接 CPU 和各种类型的端点 (如 GPU 和 SSD)。此外，它也在汽车应用等新领域引起了人们的关注。PCIe 是一种十分普遍的协议，具有许多优势：它使用简单的 NRZ (非归零码) 差分信令方案，并且基于多个独立通道的结构允许它根据需要支持小型和大型应用。

在 PCIe 经历的各代发展中，行业趋势对其数据速率要求越来越高。2003 年的 PCIe Gen 1 允许每个通道 2.5GT/s 的数据传输速率。2017 年的 PCIe Gen 5 提供高达 32GT/s 的速率，提高了近 13 倍。从 Gen 1 到 Gen 5，原始的 NRZ 信令方案并未修改，数据速率提高是通过提高符号速率来实现的，这在信号完整性方面带来了新的挑战。转接驱动器和重定时器信号调节器件旨在通过在更高的数据速率和更长的传输距离上保持信号质量来解决这些问题。虽然许多方法可用于调节信号，但均衡是最基本的方法之一，并且与信号传播所经过的材料属性密切相关。

2 插入损耗和均衡

为了理解均衡，首先讨论插入损耗会有所帮助。电磁波的物理性质在高频下会变得复杂。电磁波在通过有损耗介质时会出现衰减，但衰减量 (称为插入损耗) 同时取决于介质的特性和波的频率。高频数据信号必须包含重要的高频分量。例如，在通过铜线或布线时，高频分量可能比低频分量发生更多的衰减，从而导致频谱不平衡，导致时域中的信号形状失真。

图 2-1 展示了长度为 5 英寸的 FR4 布线仿真模型的插入损耗示例：损耗从直流时为 0dB 开始，随着频率的增加而稳定增大。

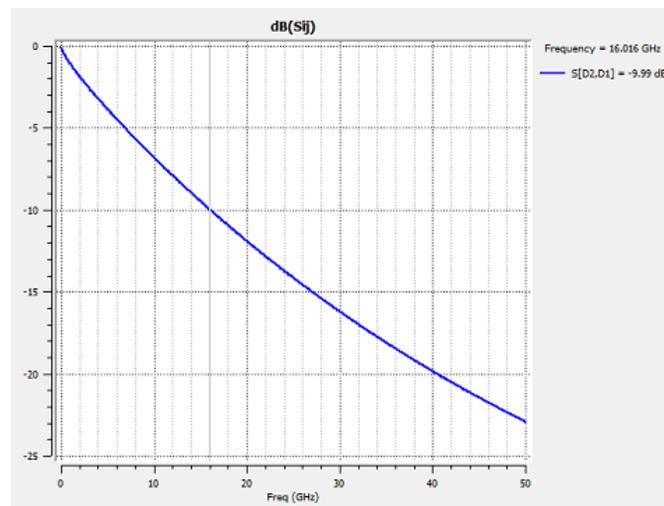


图 2-1. 5 英寸 FR4 布线的插入损耗示例

这种失真的主要特征之一是一种称为符号间干扰 (*ISI*) 的现象。通常情况下，信号边沿和急剧、快速转换由高频分量形成。当这些信号在一个符号序列中发生性能下降时，符号开始相互渗透，导致信号成形中的显著失真。如果接收器采样这些衰减的符号并且如果严重程度足以使得接收器根本无法理解输入，这可能会导致位错误——眼图可能会显示闭上的眼睛、只开了一道没有意义的缝隙来区分和解释信号，如图 2-2 所示。

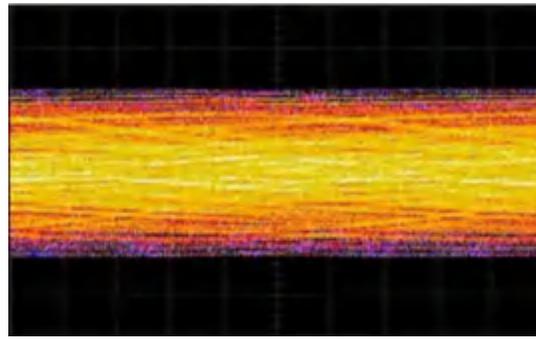


图 2-2. ISI 严重的信号的眼图

通常，通过延长长度或增加数据速率来增加信号发送器和接收器之间的损耗会导致信号质量越来越低，直到出现某些无法保持可靠、无差错运行的限值为止。

由于数据通道中的损耗量是一个重要因素，因此必须能够方便地在系统级别测量或量化损耗。在信号完整性领域，元件的损耗通常是根特定奈奎斯特频率下的特定 dB 插入损耗来测量的，该频率是符号速率的一半。原因是对于特定速率下的 PRBS 数据，绝大多数（超过 90%）信号能量集中在奈奎斯特频率或以下，因此，可将奈奎斯特频率用作必须认真考虑衰减问题的区域的上限。高于奈奎斯特频率的衰减仍会对信号产生负面影响，但影响的程度较小。

在 PCIe 中，PCIe Gen 5 (32GT/s 数据传输速率) 的奈奎斯特频率为 $32\text{GHz} \div 2 = 16\text{GHz}$ 。对于 Gen 4 (16GT/s 数据传输速率) 为 $16\text{GHz} \div 2 = 8\text{GHz}$ 。信号路径上元件在 16GHz 下的插入损耗数据示例为 -4dB，这意味着 16GHz 纯正弦波在通过元件后衰减了 4dB，该信息与 PCIe Gen 5 操作密切相关。对于诸如 PCIe 之类的差分协议，插入损耗可通过双端口 S 参数 S[D2, D1] 差模到差模增益计算得出。

虽然这种损耗引起的信号衰减对系统设计人员而言可能是一个主要问题，但这种衰减是可以修复的。理论上，频率响应为所施加损耗的数学倒数的元件能够恢复原始信号。损耗和元件的级联响应可以在所有频率上保持一致，从而保留原始信号的特性。这就是均衡的基本思想：有源器件可以执行频率选择性放大以抵消频率选择性损耗的影响。

图 2-3 显示了 DS320PR810 PCIe Gen 5 转接驱动器的 EQ 增强：正幅度和正斜率高达并超过 16GHz 意味着此类频率存在增益或放大，并且较强的 EQ 设置会增加斜率以补偿更多损耗。

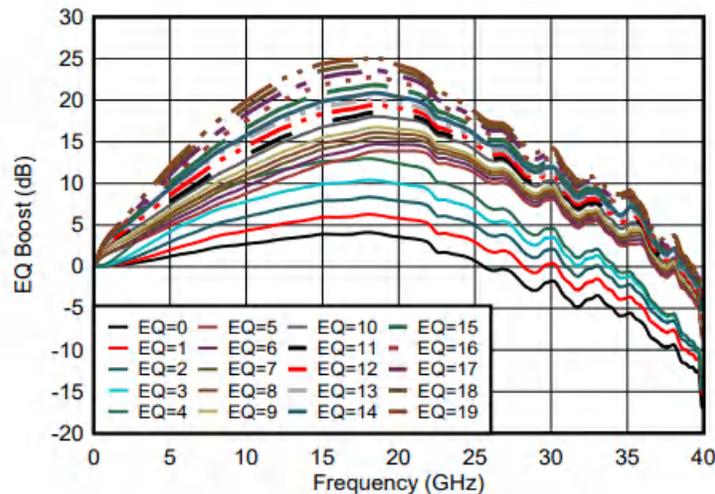


图 2-3. DS320PR810 的 EQ 增强曲线

在实践中，这种恢复不可能完全完美，因为实际系统的介质和实际有源器件的行为都可能不理想。因此，均衡可补偿插入损耗。经过处理的信号与原始预衰减信号可能存在一些不可避免的频谱和成形差异，但成功补偿会产生一个张开的眼图，表明信号接收器可以无错误地解读信号。

图 2-4 显示了通过转接驱动器后来自 图 2-2 的相同信号。

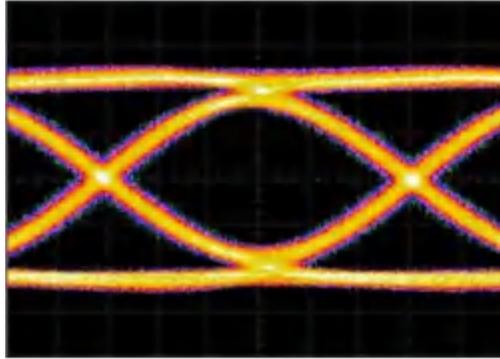


图 2-4. 通过转接驱动器校正 ISI

因此，均衡是一种可恢复信号质量并实现更长 PCIe 链路的强大工具。

3 EQ 放大器和 EQ 指数

在 PCIe 转接驱动器中，均衡由包含多个放大器的特殊模拟滤波器来执行。总的来说，它们构成了一个连续时间线性均衡器 (CTLE) 级。滤波器的总体频率响应设计用于补偿特定类型信号介质 (通常为铜 PCB 布线) 的插入损耗，并且具有各种可调节的增强强度，以便器件能够准确补偿一定范围的损耗 (固定升压可能不灵活，因为相对于系统中的实际损耗应用过多或过少的增强会对信号质量产生负面影响)。

以 TI PCIe Gen 5 转接驱动器为例，每个通道的均衡系统由三个放大器组成：

- EQ 增强 1
- EQ 增强 2
- EQ 增强 1 (二阶)

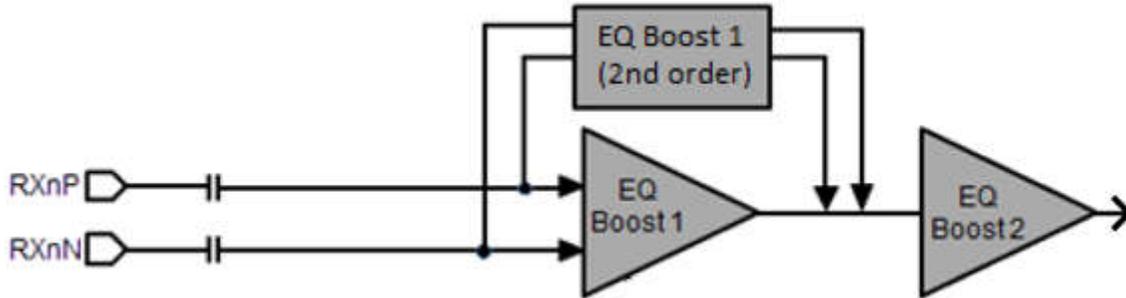


图 3-1. TI PCIe Gen 5 转接驱动器的 EQ 放大器

为了更好地控制整个滤波器形状，其中每个放大器侧重于一个稍微不同的频率区域。EQ 增强 1 往往运行在接近奈奎斯特频率的地方，EQ 增强 2 往往运行在高于奈奎斯特频率的地方，而 EQ 增强 1 (二阶) 往往运行在中频到低频。但是，整体活动仍然重叠，例如，更改 EQ 增强 1 (二阶) 也会影响高频区域。

以下几幅图像展示了网络分析器基准测试设置中单个放大器设置的一些行为；请注意，方法和趋势与前面所示的 EQ 曲线稍有不同。“EQ 指数默认值”用作比较的基线，数据以浅粉色迹线的形式保存在存储器中。品红色波形是来自自定义设置的数据，通过将其中一个放大器设置更改为最大值或最小值，从“EQ 指数默认值”更改而来。

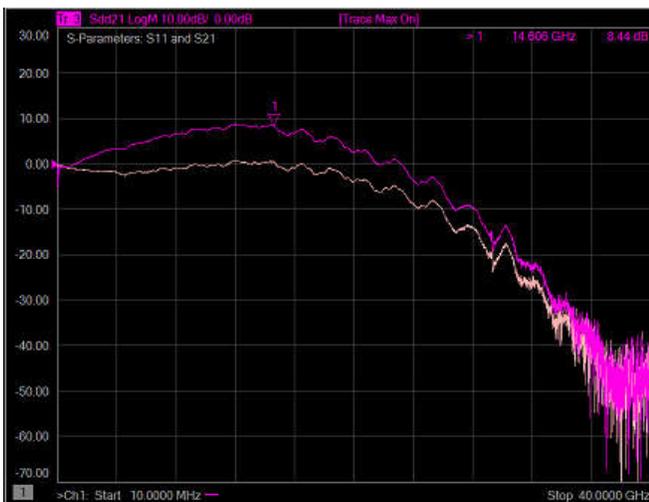


图 3-2. EQ 指数默认值与最大 EQ 增强 1 之间的关系

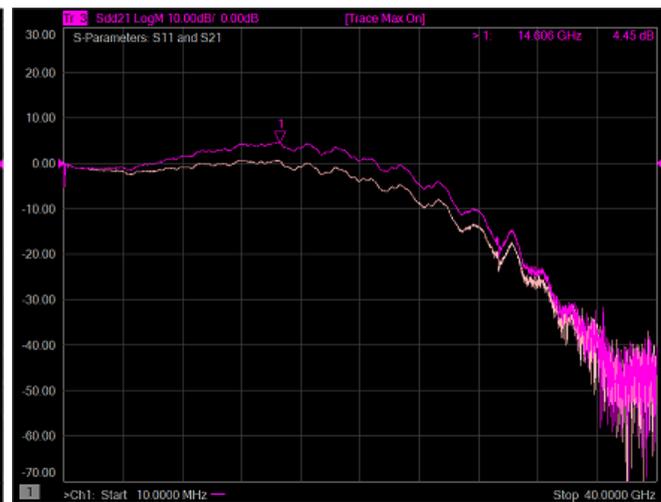


图 3-3. EQ 指数默认值与最大 EQ 增强 2 之间的关系

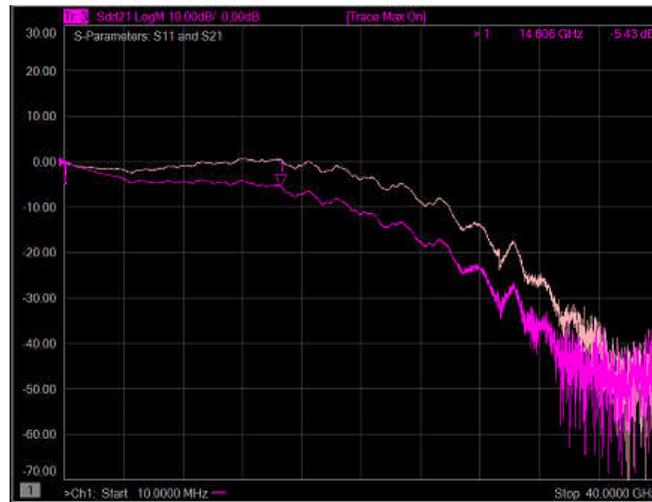


图 3-4. EQ 指数默认值与最小 EQ 增强 1 (二阶) 之间的关系

由于调整各个放大器设置可能很复杂，TI Gen 5 和 Gen 4 转接驱动器会将三个放大器设置的组合组织到 *EQ 指数* 系统中，其中，EQ 指数 0 是转接驱动器可能达到的最低均衡设置，较高指数具有连续较高的增强强度，这是在奈奎斯特频率下应用的增强测量结果。

表 3-1 摘自 [如何调整 TI PCIe Gen5 转接驱动器](#) 应用手册，可估算 Gen 5 转接驱动器架构中每个 EQ 指数的增强。请注意，各个转接驱动器产品在每个设置的确切增强量方面各不相同，此表仅用于说明，可在工程设计期间查阅产品数据表。

表 3-1. TI PCIe Gen5 转接驱动器的通用 EQ 指数增强

均衡选择 EQ 索引	典型 EQ 增强	
	8GHz 时的增益 (dB)	16GHz 时的增益 (dB)
0	2.0	3.0
1	3.5	5.0
2	5.0	7.0
3	7.0	9.0
4	8.0	12.0
5	9.0	16.0
6	9.8	17.0
7	10.2	18.0
8	10.8	18.5
9	11.2	19.0
10	11.8	19.5
11	12.2	20.0
12	12.8	20.5
13	13.2	21.0
14	13.8	21.5
15	14.2	22.0
16	14.8	22.5
17	15.2	23.0
18	15.6	23.5
19	16.0	24.0

如前所述，插入损耗通常在奈奎斯特频率下测量。基本的直觉是，在奈奎斯特频率下低 EQ 指数与低增强旨在补偿少量的插入损耗，而较高 EQ 指数与较高增强可以补偿较高的插入损耗。在大多数应用中，此简化视图足以支持转接驱动器的使用和调优。

在某些情况下，损耗曲线的电磁特性与简单 PCB 布线大相径庭，或者信号性能裕量很小，需要进行微调以进行优化，那么还可以考虑非奈奎斯特频率下的滤波器活动。即使是连续的 EQ 指数，在放大器设置的组合中也可能存在重大差异，导致滤波器活动的差异超出奈奎斯特数据所显示的范围。

例如，在 Gen 5 器件中，EQ 指数 4 和 EQ 指数 5 是连续的，在奈奎斯特频率下具有类似的增强 (DS320PR810 在 16GHz 时分别约为 8dB 和 10dB)，但放大器的配置并不相同，如图 3-5 中 TI SigCon Architect GUI 软件的图像所示：

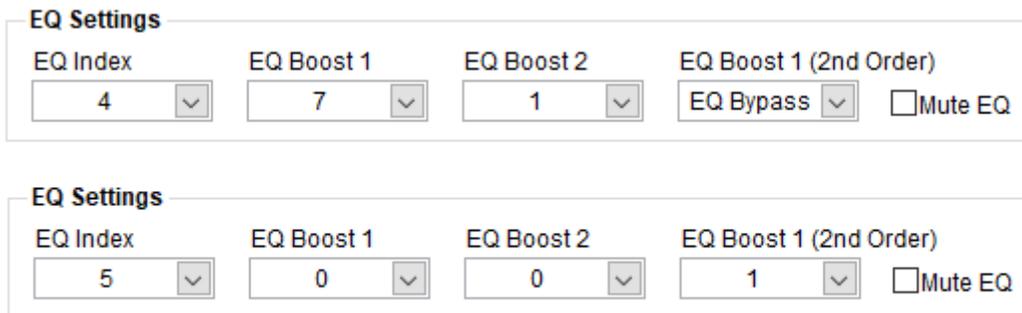


图 3-5. EQ 指数 4 和 EQ 指数 5 比较

由于 EQ 增强 1 和 EQ 增强 2 值的存在，EQ 指数 4 提供了以奈奎斯特频率和略高于奈奎斯特频率的高水平升压，而 EQ 增强 1 (二阶) 被绕过。EQ 指数 5 依赖于 EQ 增强 1 (二阶)，因此除了奈奎斯特频率下的增强之外，在中低频率范围内具有更多的活动。

出于这些原因，为应用选择适当的 EQ 指数可能并不总是计算 PCIe 链路中所需的扩展量，然后根据器件数据表中的值选择最接近的 EQ 指数这么简单。上述过程可为进一步调整提供一个起点，但有可能在其他附近的设置中实现更好的性能，在这些设置中，滤波器成形的精细细节与系统的实际损耗分布的匹配度更高。这可以在电路板设计过程中通过信号完整性仿真进行探索，并在制造电路板后调整转接驱动器时进行测试。

4 过均衡和转接驱动器放置

如果对传入信号进入转接驱动器的 RX 输入时已发生的衰减进行补偿，则转接驱动器表现最佳。在这种情况下，转接驱动器只需将衰减的频率内容增强到正常水平。如果转接驱动器后面没有太多损耗，则最终接收器可以收到质量良好的信号。

有时，可能会在输入信号衰减极小的情况下放置转接驱动器，而是转接驱动器后有相对较大的损耗仍需要进行补偿。在这种情况下，转接驱动器可以通过过均衡信号来尝试抢先补偿转接驱动器后的损耗（这意味着高频成分被增强到正常水平以上），以期在信号到达最终接收器时，转接驱动器后的通道损耗可以自然地滚降超出的部分。

过均衡会产生明显的信号失真，通常表现为夸张的边沿，可在示波器或 TI Gen 5 转接驱动器的眼图扫描功能中看到。图 4-1 显示了如何在眼图扫描中看到过均衡的示例：左侧面板上的过均衡信号在峰值两侧具有特征“角”，并且与右侧面板上提供较正常均衡量的信号相比，平坦区域更小。有关眼图扫描的更多详细信息，请参阅 [使用 TI PCI-Express Gen5.0 转接驱动器进行眼图扫描](#) 应用手册。

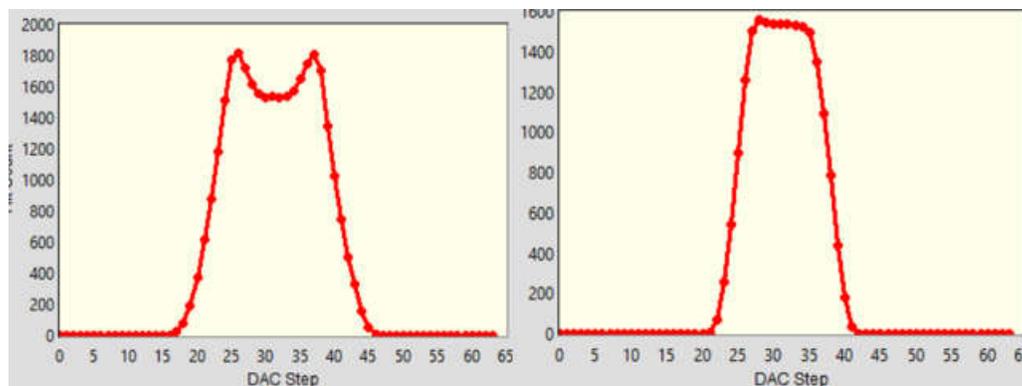


图 4-1. 过均衡和正常信号的眼图扫描

这种先占式补偿方法通常可以通过少量过均衡成功使用，但需要谨慎使用：出于多种原因，对信号进行过均衡并不像对衰减的信号应用正常程度的均衡那样纯粹。当应用过量的均衡时，器件中的放大器可能很难在线性区域内工作，从而产生类似于过度驱动音频信号中看到的那些压缩或削波效应。因此，大量的过均衡会导致不能正确滚降的失真，从而降低最终接收器的信号质量。

由于与过均衡相比，均衡性能上存在这种不对称性，因此谨慎放置转接驱动器有助于在系统中成功使用转接驱动器。可将使用独立的器件处理上行和下行方向的单向转接驱动器放置在不同的位置；可将下行转接驱动器放置在更靠近端点的位置，将上行转接驱动器放置在更靠近根复合体的位置。这样，两个方向的转接驱动器都具有大部分的前置负载损耗，以实现出色性能。

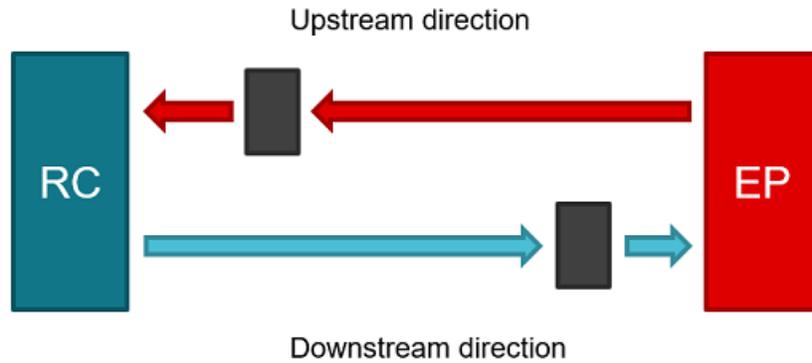


图 4-2. 单向转接驱动器放置

可将在一个器件中处理上行和下行方向的双向转接驱动器放置在损耗通道的中间，以便两个方向都可以具有相似的性能。否则，一个方向上发生的过均衡问题可能会比另一个方向多。由于根复合体和端点的 TX 和 RX 性能变化，一些系统在上行和下行方向上可能具有固有的不同性能；在这种情况下，如果仿真结果和过去的经验支持，双向转接驱动器偏离中心放置会很有用。请注意，在双向转接驱动器中，仍可根据需要为每个方向单独配置 EQ 设置。

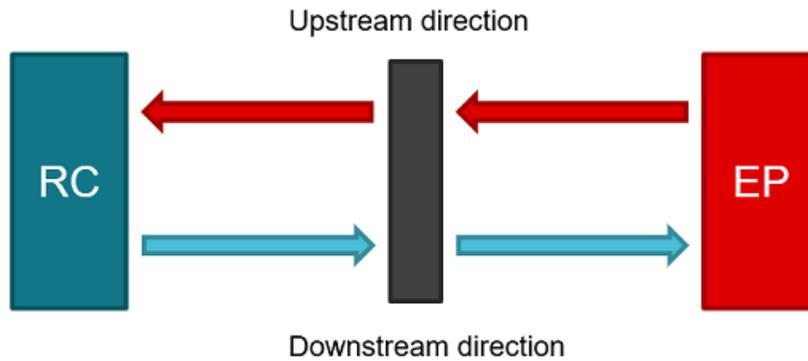


图 4-3. 双向转接驱动器放置

在电路板布局布线设计的早期阶段，使用器件 IBIS-AMI 或 S 参数模型的信号完整性仿真可用于帮助评估转接驱动器的放置情况，方法是在转接驱动器之前和之后分配不同量的总链路损耗，并检查两个方向的行为。考虑架构和空间限制并选择最终放置位置后，下一步是仔细设计 PCB 布局，以减少信号损失并为转接驱动器提供尽可能多的性能裕度。有关更多详细信息，请参阅 [PCIe Gen 5 的高速 PCB 布局](#) 应用手册。

5 总结

均衡是一种强大的模拟功能，几乎用于所有 PCIe 信号调节器件。通过补偿信号路径中的插入损耗，可以扩展整个链路的覆盖范围，专注于均衡的线性转接驱动器可以在毫无察觉的情况下执行此功能，而不会中断根复合体和端点的活动。滤波器整形和器件放置等一些更细微的因素仍会影响转接驱动器的性能。因此，从电路板设计的最初阶段到系统测试和验证的最终阶段，加深对均衡的基本理解有助于成功实施 PCIe 转接驱动器。有关特定于器件的更多信息、资源和支持，请访问 [TI.com](https://www.ti.com) 上的转接驱动器产品页面。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [DS320PR810 用于 PCIe 5.0、CXL 1.1 的八通道线性转接驱动器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [如何进行 TI PCIe Gen5 转接驱动器调优](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [使用 TI PCI-Express Gen5.0 转接驱动器进行眼图扫描](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [PCIe Gen 5 的高速 PCB 布局](#) 应用手册。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司