

USB4: 用户期望推动设计复杂度日益提高

作者

Morten Christiansen
技术营销经理
新思科技

摘要

本白皮书简要介绍USB4主机、集线器、扩展坞和设备的能力,并且重点介绍最终用户的期望是如何推动USB4产品复杂性不断提高的。USB4是迄今为止最复杂的USB规范,它要求设计人员了解USB4、USB 3.2、USB 2.0、USB Type-C®和USB Power Delivery等规范。在很多USB4设计中,设计人员还必须了解PCIe®和DisplayPort规范,以及高清内容保护协议(HDCP)。因此,在设计满足用户期望的USB4产品时,我们必须实现“一如既往地好用的USB!”这个目标。

USB4命名法

USB4宣传指南简化了以前的USB 3.2命名法。USB 3.2 Gen XxY命名法(偏技术,经常让用户感到困惑)已被SuperSpeed 5 Gbps、SuperSpeed 10 Gbps和SuperSpeed 20 Gbps取代,并增加了USB4 20 Gbps和USB4 40 Gbps的标识。

USB4与USB 3.2的主要区别在于,除了在同一链路和USB-C连接器上传输USB数据外,USB4还可实现主机到主机、(可选的)PCIe以及DisplayPort音频/视频隧道式传输。主机到主机的隧道传输使IP数据包能够在两个USB4主机之间交换。

DisplayPort和USB的隧道传输使得音频、视频、数据和电力可以在同一个连接器上进行传送,其速度可比USB 3.2和DisplayPort替换模式更高。PCIe隧道传输可以支持高吞吐量的大容量外部存储器、AI加速等应用。USB4向后兼容Thunderbolt,可连接主机到主机、PCIe和DisplayPort。当然,Thunderbolt模式仍然支持USB数据传输 - 用户期望用USB Type-C连接器支持USB。

USB4的20Gbps和40Gbps速率通过USB-C连接器上的两个TX和RX通道结合在一起而实现,每条通道的数据速率是“取整的”10Gbps或20Gbps。虽然用户通常不关心,但设计师应该知道,Thunderbolt模式下每条TX和RX通道的数据速率是10.3125 Gbps或20.625 Gbps。

USB4电缆和连接器

与USB 3.2一样,USB4使用USB Type-C连接器。USB4可以使用相同的无源Type-C到Type-C电缆。USB 3.2支持SuperSpeed 5 Gbps,电缆长度最长2米。同样的电缆也支持USB4 20 Gbps。USB 3.2支持SuperSpeed 10 Gbps和SuperSpeed 20 Gbps,电缆长度最长1米。该电缆也支持USB4 20 Gbps。将电缆长度减少到0.8米就可以支持USB4 40 Gbps。USB 3.2的1米电缆将逐渐淘汰,取而代之的是使用新USB4标志的0.8米电缆。这些电缆将同时适用于USB 3.2和USB4,此外还可用于DisplayPort交替模式。USB4主机的USB Type-C连接器也可以支持DisplayPort 2.0。

如果USB4 40 Gbps的电缆长度超过0.8米, 或USB4 20 Gbps的电缆长度超过2米, 则需要使用设计复杂的有源电缆。USB4宣传指南包括了新的端口和电缆图标, 指示对USB4的支持。

USB4主机、集线器、扩展坞和设备

USB4 规范描述了不同USB4 产品类型的特性和功能。图 1 显示了 USB4 双总线系统架构, 其中 USB 2.0 (用于实现向后兼容) 与 USB4 分开路由。USB 主机“下游端口”连接到 USB4 集线器、USB 扩展坞(图 1 中未显示) 和 USB4 设备“上游端口”。其他 USB4 集线器、USB4 扩展坞和/或 USB4 设备的连接与 USB 2.0 和 USB 3.2 规范中已知的标准 USB 拓扑和设备树相同。

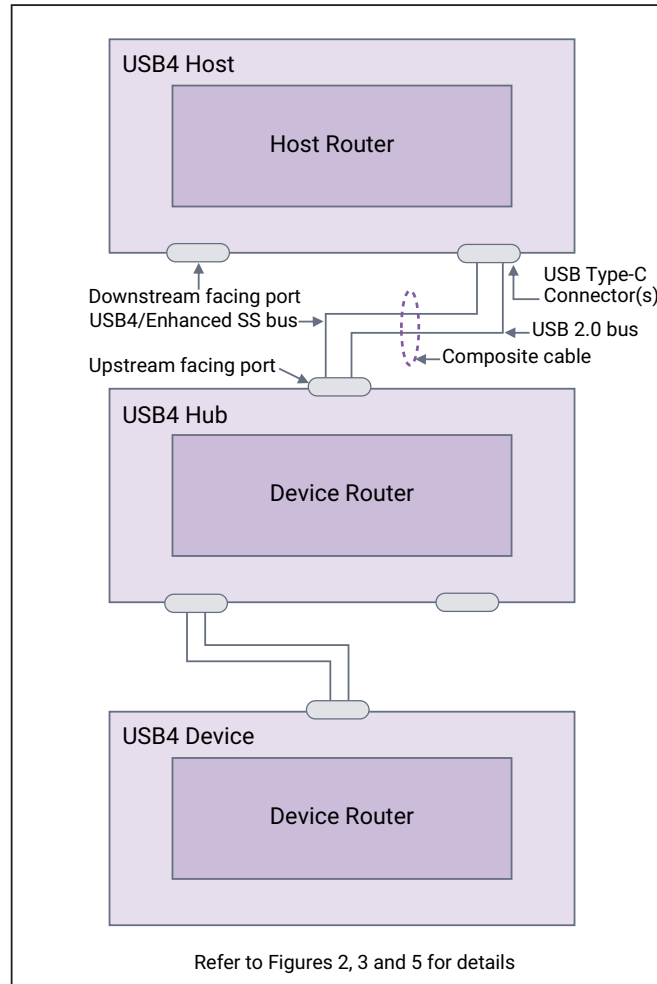


图1:连接 USB4 主机、集线器和设备
(来源:USB4 规范 图 2-1)

USB4主机

USB4主机(图2)有一个主机接口、DisplayPort Source(又称DP TX控制器)和增强型SuperSpeed USB主机控制器, 在USB4模式下与主机路由器连接。支持隧道式PCIe的PCIe Root Complex控制器对于USB4主机来说是可选的, 但对于Thunderbolt向后兼容能力则是必须配备的。

主机路由器将包含主机到主机、PCIe、DisplayPort和USB流量的复用USB4数据包进行路由并通过隧道传输到一个或多个下游端口(DFP)。USB4 DFP通过一个或多个集成PCIe、USB或DisplayPort功能连接USB4 集线器、USB4 扩展坞或USB4设备的USB4上游端口(UFP)。

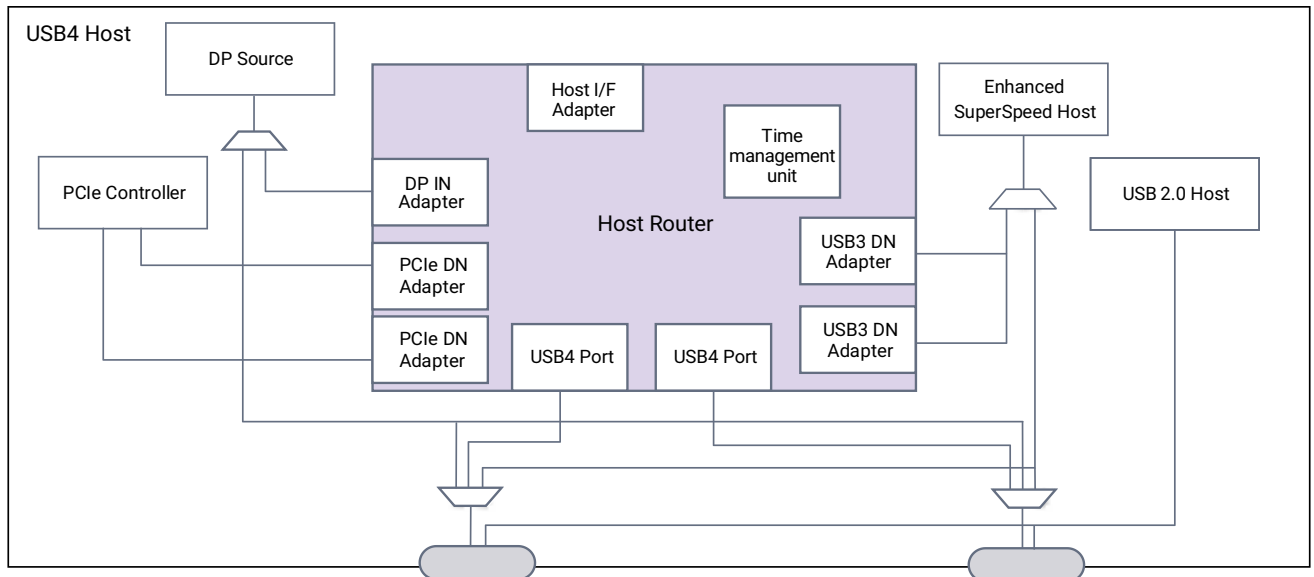


图2: USB4主机
来源:修改自USB4规范图2-13)

为了实现向后兼容, 强烈建议USB4主机支持Thunderbolt。在Thunderbolt模式下, USB流量不通过隧道传输。然而, Thunderbolt模式需要PCle控制器 (PCle RC) 和隧道传输的PCle数据包, 原因可见关于USB4 Hub和USB4 Dock部分的描述。DP Source可以有不止一个端口, 而且主机路由器上可以有不止一个DP IN适配器。例如, Thunderbolt4强制要求支持多个DP源。这样就可以支持一个以上的显示器, 而无需使用DisplayPort MultiStream Transport (MST)。

用户希望USB4主机端口能够支持USB 3.2主机端口支持的“任何功能”。这意味着任何USB 3.2设备必须仍然可以使用, 例如超高速U盘。图2显示了从增强型SuperSpeed 主机到直接位于下游端口前面的多路复用器的另一种数据路径。在连接SuperSpeed 设备时, 增强型SuperSpeed 主机控制器通过多路复用器连接USB4 PHY, PHY从USB4模式转变为USB3.2模式, 而该端口的USB4主机路由器被绕过。其他端口仍可以处于USB4或Thunderbolt模式。

同样, 如果用户连接Type-C显示器或DisplayPort适配器, DisplayPort 替换模式则启用。DisplayPort Source通过多路复用器被路由到下游端口PHY, USB4 PHY进入DisplayPort模式, 而该端口的主机路由器被绕过。USB4主机DFP也应同时支持USB和DisplayPort, 因为这通常用于简单的Type-C扩展坞、AV适配器等。

USB4集线器

USB4集线器 (图3) 有一个UFP和一个或多个DFP, 允许进一步连接USB4集线器、USB4扩展坞和USB4设备。因此, USB4拓扑可以支持多个UFP, 甚至是动态配置的UFP或DFP, 这取决于用户如何连接USB4产品。然而, 这进一步提高了复杂性, 并可能使用户感到困惑。因此, USB4规范将一个UFP和一个或多个DFP定义为USB4集线器唯一支持的配置。

当USB4 集线器处于USB4模式的情况下, 隧道PCle和USB流量通过USB4 集线器, 从UPF传输到DFP。需要注意的是, PCle和USB流量必须“定向”; USB4集线器并不是简单地将隧道PCle和USB流量从上游端口(UFP) 复制到所有DFP。图3显示了USB4集线器的框图, 比USB 2.0或USB 3.2集线器复杂得多。USB4集线器包括USB 3.2和USB 2.0集线器, 另外还包括PCle交换机和USB4设备路由器 DeviceRouter。

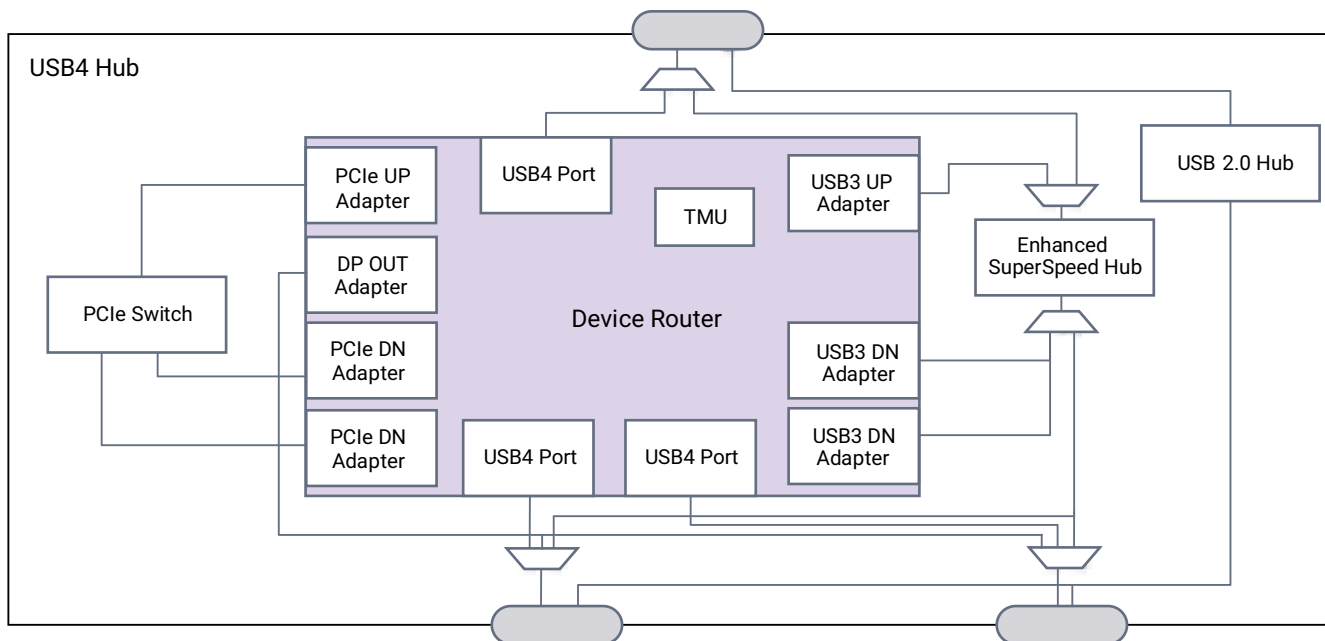


图3:USB4集线器
(来源:修改自USB4规范图2-14)

PCIe和USB流量必须被“分割”成多个数据流,这取决于每个DFP连接哪些PCIe或USB设备。PCIe交换机和增强型超高速集线器的开关/路由规则很复杂,包括速度转换。USB4集线器利用现有的PCIe开关和USB集线器设计来处理这个问题。隧道PCIe和USB流量提取自USB4传输流程,并分别传送到PCIe UP和USB UP适配器。来自PCIe UP适配器的流量被PCIe开关转到适当的PCIe DN适配器。设备路由器将PCIe流量输出到适当DFP上。与此类似,USB流量由增强型超高速USB集线器进行路由,通过适当的USB DN适配器再次进入设备路由器,并输出到适当的DFP上。

当用户将USB 3.x设备连接到一个USB4集线器DFP时,适当的USB流量将由连接到PHY复用器的增强型超高速集线器提取,而DFP进入USB 3.x模式。这与USB 3.x设备与USB4主机连接时的情况类似。细微区别在于:在USB4主机中,增强型超高速主机控制器的根集线器将USB流量路由到适当的DFP。

需要注意的是,DisplayPort流量不在设备路由器外部路由。DisplayPort是点对点的连接,不需要分割为多个数据流。设备路由器可以很容易地将隧道式DisplayPort流量从UFP定向传输到适当的DFP。同样,主机到主机的流量也是点对点的,可以由设备路由器在UFP和适当的DFP之间直接路由。

在用户连接DisplayPort Type-C显示器或适配器时,DisplayPort流量通过与DFP上PHY复用器连接的DP OUT适配器输出。与USB4主机一样,DFP进入DisplayPort替换模式。USB4 Hub也应同时支持USB和DisplayPort,就像USB4主机一样。如果一个设备只能插入某处才能运行,而在别处无法使用,用户就会不满意。

为了实现向后兼容,USB4集线器必须支持Thunderbolt模式。当用户将Thunderbolt设备连接到USB4 Hub DFP时,USB4集线器将在USB4隧道和Thunderbolt隧道之间转换。由于Thunderbolt中没有隧道式传输的USB流量,因此,只有主机到主机、PCIe和/或DisplayPort流量被路由到DFP。同样,如果用户将USB4集线器与Thunderbolt主机连接,USB4集线器进入Thunderbolt模式,仅处理UFP和DFP之间的Thunderbolt数据包。

当用户在Thunderbolt模式下将USB3.x设备与USB4 Hub DFP连接时,不存在隧道式USB3.x流量。Thunderbolt如何支持USB 3.x设备?解决方案很简单,即使用隧道式PCIe连接USB4集线器的xHCI控制器。需要注意的是,在Thunderbolt模式下使用的“远程”xHCI控制器未在图3中显示。该xHCI控制器可以通过一个额外的复用层连接到USB2.0集线器和增强型超高速集线器,或者使用一个与PHY复用器连接的多端口xHCI控制器。这与USB4主机中支持USB3.2设备的解决方案相同。

USB4扩展坞

与USB4集线器一样,USB4扩展坞(图4)包含一个UFP和一个或多个DFP。此外,USB4扩展坞还提供一项或多项集成功能,如DP Out与Legacy DP连接器、以太网适配器、USB音频功能和/或用于连接USB键盘、鼠标、大容量存储器、网络摄像头等的Legacy-A连接器

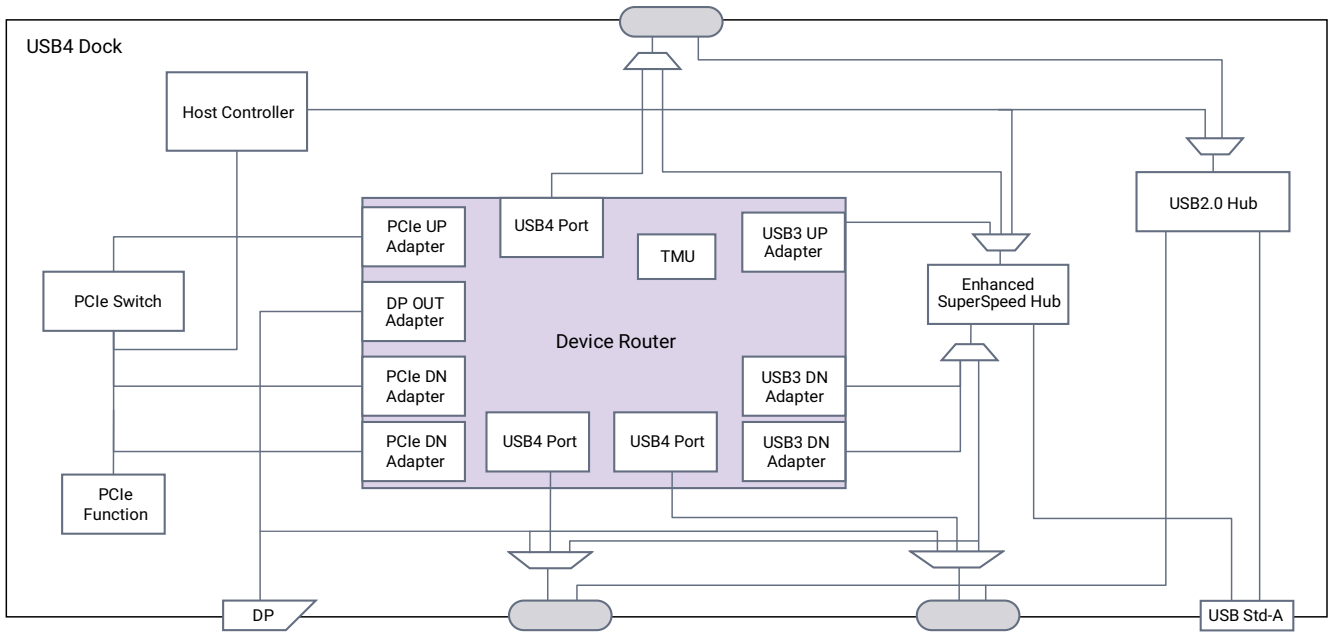


图4:USB4扩展坞
(来源:USB4规范图2-4)

USB4扩展坞的一个典型例子如图4所示。图4显示了UFP与USB 2.0和增强型超高速集线器之间的额外USB数据路径。这样，USB4扩展坞就可以作为标准USB 3.x集线器，在通过Type-C或Legacy-A to Type-C转接线连接USB 3.x主机时支持传统的USB通信。这些数据通路在USB4集线器上也存在，允许USB4集线器成为USB 3.x集线器。

USB4设备

最简单的USB4产品可能是USB4设备，只有一个USB4 UFP，而没有USB4 DFP。这意味着USB4设备将“终止”USB4设备树，因为没有更多的USB4集线器、坞站或设备可以连接USB4设备

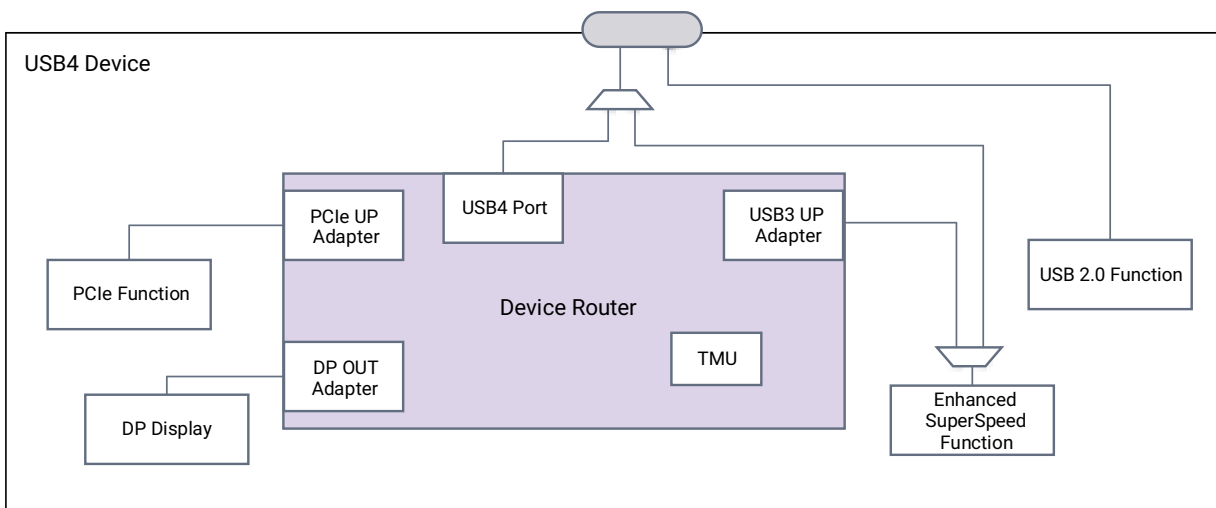


图5:USB4设备
(来源:修改自USB4规范图2-15)

图5显示了典型USB4设备的实施图，初看起来，这比USB4主机、集线器或扩展坞更简单。与USB4扩展坞类似，USB4设备有一项或多项集成功能。USB4设备也可以通过额外的(未显示)增强型超高速集线器和USB 2.0集线器支持Legacy-A连接器，如图4中的USB4扩展坞所示。如果包含一个以上的USB功能和/或任何数量的旧有USB端口，那么，USB 2.0和/或增强型超高速功能将连接USB 2.0或增强型超高速集线器，而不直接连接USB4 UFP。USB4设备也可以包含不止一项PCle功能，这需要配备额外的PCle开关。

图5显示了数据路径, 允许USB4设备像USB4集线器和USB4扩展坞一样, 在连接USB3.x主机时成为USB3.x设备。这保证了在系统中混合使用USB3.x和USB4时, 某些功能仍然存在。USB3.x模式下的USB4设备可能不支持DisplayPort和PCIe功能。这取决于USB4设备的PCIe功能是否有同等的USB功能。例如, 集成式以太网适配器可以在USB4和Thunderbolt模式下与PCIe同时使用, 或者在USB 3.x模式下与USB同时使用。这种设计选项保证了良好的用户体验。

通过USB支持同等的DisplayPort功能是可以实现的, 而且非常有意义。一种实现方式是使用由主机中的“软”图形处理单元 (GPU) 管理的远程帧缓冲器和DisplayPort TX控制器。另一种实现方式是让USB4设备支持DisplayPort RX 替换模式, 以便具有DisplayPort功能的USB4设备能够与支持DisplayPort (TX) 替换模式的USB 3.x主机一同使用。在与USB4主机一同使用时, 功能不变。

以上对USB4设备的描述表明USB4设备可能非常复杂, 这取决于所需要和/或预期的功能。本白皮书介绍了USB 3.x和DisplayPort设备如何在USB4设备树中无缝运行。因此, USB4设备的设计人员必须仔细分析哪些附加功能和实用特征不仅有用, 而且会增加产品价值。对于功能与 USB 3.x 设备相似、但复杂性和成本却高出很多的USB4设备, 即使是新产品, 用户也不会考虑。

USB4构件

USB4主机、集线器、扩展坞和设备的描述表明, 设计USB4产品需要许多不同的构件。新思科技提供了设计USB4产品所需的多种IP。

USB4 PHY和USB4 PHY通道的使用

新思科技USB4 PHY可在面向USB4主机、USB4集线器DFP、USB4扩展坞DFP和某些USB4设备的高级工艺节点中使用。新思科技USB4 PHY可以根据图6中的表格定制Type-C Assist (TCA) 数字交叉开关, 以实现主机应用的通道多路复用。数字交叉开关保证了尽可能最佳的信号质量, 这对于保证10 Gbps和20 Gbps的数据速率至关重要。新思科技还计划提供适合某些USB4设备的低成本本工艺节点的 USB4 PHY。

用于USB4主机、集线器和扩展坞上DFP的USB4 PHY必须能够以多种模式运行: USB4、Thunderbolt3、USB3.x和DisplayPort TX 交替模式, 如图6所示。

| Type-C Pin Name | TX1 +/- | RX1 +/- | TX2 +/- | RX2 +/- | PHY Lane Configuration |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| PHY Lane Configuration | USB TX | USB RX | USB TX | USB RX | PHY Lane Configuration |
| | DP TX | or DP TX | DP TX | or DP TX | |
| USB 3.1 5G/10G | SS/SS+ | SS/SS+ | Not used | Not used | Type-C Normal |
| | Not used | Not used | SS/SS+ | SS/SS+ | Type-C Flipped |
| USB 3.2 5G/10Gx2 | SS/SS+ Lane 0 | SS/SS+ Lane 0 | SS/SS+ Lane 1 | SS/SS+ Lane 1 | Type-C Normal |
| | SS/SS+ Lane 1 | SS/SS+ Lane 1 | SS/SS+ Lane 0 | SS/SS+ Lane 0 | Type-C Flipped |
| USB 4.0 10Gx2/20Gx2 | Lane 0 | Lane 0 | Lane 1 | Lane 1 | Type-C Normal |
| | Lane 1 | Lane 1 | Lane 0 | Lane 0 | Type-C Flipped |
| TB3 10.3125G /20.625G x1 | Lane 0 | Lane 0 | Not used | Not used | Type-C Normal |
| | Not used | Not used | Lane 0 | Lane 0 | Type-C Flipped |
| TB3 10.3125G /20.625G x2 | Lane 0 | Lane 0 | Lane 1 | Lane 1 | Type-C Normal |
| | Lane 1 | Lane 1 | Lane 0 | Lane 0 | Type-C Flipped |
| USB & DP 1.4 (1,2 lanes) | SS/SS+ | SS/SS+ | HBR ML1 | HBR ML0 | Type-C Normal |
| | HBR ML1 | HBR ML0 | SS/SS+ | SS/SS+ | Type-C Flipped |
| DP 1.4/eDP (1,2,4 lanes) | HBR ML2 | HBR ML3 | HBR ML1 | HBR ML0 | Type-C Normal |
| | HBR ML1 | HBR ML0 | HBR ML2 | HBR ML3 | Type-C Flipped |

Mode
Connector orientation

Key: TX RX TX

图6: USB4、USB 3.x和DisplayPort (DP) 替换模式通道在Type-C连接器上的使用

USB4 PHY和DisplayPort 2.0

DisplayPort 2.0流量不会通过 USB4 或 Thunderbolt 进行隧道传输。USB4规范仅定义了DisplayPort 1.4a隧道传输。新思科技USB4 PHY支持DisplayPort 1.4 TX交替模式,可以根据新发布的DisplayPort 2.0交替模式规范进行定制,以支持DisplayPort 2.0 TX。在通过DP 2.0 TX进行定制后,USB4 PHY支持UHBR10、UHBR13.5和UHBR20数据速率。UHBR20的四条通道提供 80 Gbps 的原始数据速率,能够支持 8K 或甚至 16k 显示器和电视、高刷新率游戏、高级 AR/VR 和其他高级显示应用。

USB4设备路由器

新思科技提供USB4设备路由器IP,最初的定位是面向边缘和大容量存储应用的人工智能加速器。

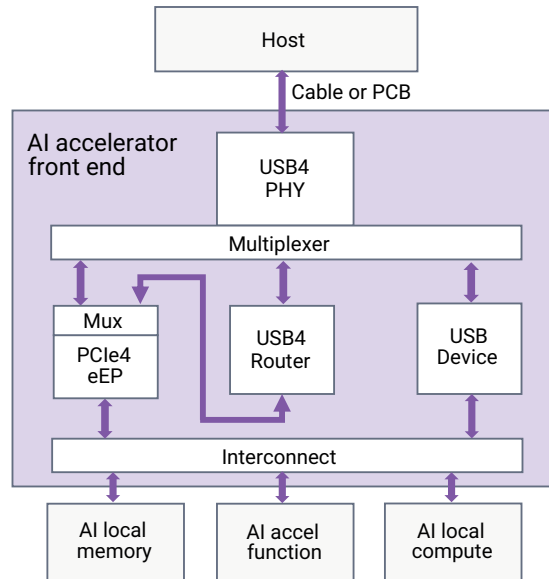


图7: PCIe4/USB4/USB 3.x边缘AI加速器设备

图7显示了概念性框图。AI加速器与本地计算和存储器相关的具体功能取决于实现方法。在USB4模式下, AI加速器使用隧道式PCIe与PCIe 4.0嵌入式端点连接。这种模式使AI加速器可以利用与主机系统存储器的低延迟连接。在USB 3.x模式下, AI加速器使用旧有等时USB传输流或批量数据传输与USB主机通讯。图7还显示了支持PCIe 4.0的定制USB4 PHY。这允许AI加速器作为PCB安装在嵌入式主机中, 或者安装在PCIe扩展卡上。

将PCIe、USB4和旧有USB能力集成到一个芯片中的理念使AI 加速器可适配不同的主机能力和多种用例。有些AI 加速器的用例甚至适用于USB 2.0主机;例如, 当AI 加速器经过训练, 以独立模式运行时。主机不负责处理工作。主机仅配置AI 加速器, 在检测到某些情况时, 它会 "ping" 主机。

同样的理念, 即支持将隧道式PCIe或旧有USB 3.2用作有效连接, 可用于设计高吞吐量、广泛兼容的外部固态硬盘设备。

其他USB4构件

除了USB4 PHY和USB4设备路由器之外, 新思科技还提供可在USB4主机、USB4集线器和USB4扩展坞产品中使用的xHCI增强型超高速控制器IP。此外, 新思科技还提供可在USB4扩展坞和USB4设备产品中使用的USB 2.0和USB 3.2设备控制器IP, 以及可在USB4扩展坞和USB4设备产品中使用的USB 2.0和USB 3.2 PHY IP。

对于显示应用, 新思科技提供了使用新思科技HDCP 2.3嵌入式安全模块支持高清内容保护的DP 1.4 TX (源) 控制器IP。这种IP组合可用于USB4主机、USB4扩展坞和USB4设备产品。新思科技还提供USB/DP 1.4 PHY, 可供USB4扩展坞和USB4设备产品的旧有 DP连接器使用。设计人员如果想要实现USB4扩展坞设计的差异化, 可以将新思科技HDMI控制器和PHY IP与适用于旧有HDMI端口的HDCP 2.3 ESM集成到USB4扩展坞或USB4设备上。

新思科技还提供用于USB4主机的PCIe控制器 (PCIe Root Complex), 用于USB4集线器、USB4扩展坞和复杂USB4设备的PCIe交换机, 以及可用于USB4扩展坞和USB4设备产品的PCIe设备控制器 (PCIe嵌入式端点)。

总结

本白皮书并未涉及到USB4的某些重要内容,如USB4连接管理器、边带信令、链路初始化和训练、USB4数据包格式、带宽分配、USB和PCIe的数据流反压、计时器重置及有源电缆等。本白皮书的主要目的是表明用户期望是如何推动USB4的复杂性不断提高的;USB4产品被强烈建议支持所有可能的USB4、Thunderbolt、USB和DisplayPort运行模式以及现有产品。

根据现有规范精心设计的USB4产品也可以支持未来产品。此外,2019年发布的USB4规范是不是最后一个USB规范,USB4的发展是否会放缓,以及/或者设计者有朝一日是否必须要面对USB5,这都要根据未来发展情况来决定。无论如何,USB4要想获得成功,必须要有符合用户期望的USB4产品设计。USB4设计人员也必须确保“USB4就是好用”!

新思科技是USB技术和标准的主要贡献者。新思科技的员工对几乎所有已发布的USB标准都做出了贡献。对于从USB 1.1到USB4的所有USB标准,新思科技是世界上最受欢迎且使用最广泛的USB IP供应商。欢迎联系新思科技,了解我们如何帮助您的下一个设计支持最新USB4规范,或启动需要支持PCIe、USB和/或DisplayPort w/HDCP的项目。

USB4 资源:

新思科技USB4网站: <https://www.synopsys.com/usb4>

USB4规范: <https://www.usb.org/document-library/usb4tm-specification>

USB4开发者日演示: https://www.usb.org/documents?search=usb4&items_per_page=50