

摘要

外围组件快速互连 (PCIe®) 作为可满足下一代分布式汽车架构关键性高带宽和超低延迟计算需求的解决方案，在汽车行业中日益受到青睐，但其广泛应用仍然面临诸多挑战。为了让汽车处理器充分利用此接口标准进行共享处理，必须定义汽车布线互连以使 PCIe 从电子控制单元 (ECU) 内接口转换为 ECU 间接口。为了在汽车电缆通道（本文中定义为汽车电缆和连接器的组合）上实现原生 PCIe，需要仔细考虑物理互连。作为重要的汽车行业供应商，TI、Rosenberger 和 GG Group 为汽车电缆通道拟定了 PCIe 规范，目的是在车辆中可靠实施并实现该接口标准的标准化应用。本白皮书将概述该拟定规范的重要内容，并介绍与通过电缆通道来定义 PCIe 相关的重要注意事项和挑战。

内容

1 引言 - 汽车行业在 ADAS 和车辆连接方面的趋势.....	2
2 通过汽车电缆通道实现 PCIe.....	3
2.1 PCIe 技术重要注意事项.....	3
2.2 通道规范重要注意事项.....	3
2.3 汽车布线重要注意事项.....	4
2.4 连接器和组件重要注意事项.....	5
2.5 信号调节重要注意事项.....	6
3 结论.....	8
4 主要撰稿人.....	8

插图清单

图 1-1. 域架构与区域架构.....	2
图 2-1. GG 2Speed® 251 STP 电缆结构横截面.....	4
图 2-2. GG 2Speed® 251 - 插入损耗与拟定的汽车 PCIe 3.0 原始电缆限制.....	5
图 2-3. 带有电缆组件和 PCB 接头的 H-MTD® 产品系列选型.....	5
图 2-4. 电缆组件两端的 H-MTD® 连接器的门控回波损耗.....	6
图 2-5. PCIe 汽车电缆应用中的信号调节目标用例.....	7

表格清单

表 2-1. 拟定的汽车 PCIe 3.0 电缆通道限值.....	4
表 2-2. 线性转接驱动器与重定时器的比较.....	6

商标

PCIe® is a registered trademark of Texas Instruments.

GG 2Speed® is a registered trademark of GG Group.

H-MTD® and HFM® are registered trademarks of Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言 - 汽车行业在 ADAS 和车辆连接方面的趋势

随着原始设备制造商 (OEM) 和一级供应商准备革新高级驾驶辅助系统 (ADAS) 和车辆连接方面的技术, 他们正在重新思考汽车的数据主干架构。未来的汽车数据主干网将不再依赖于基于域 (例如 ADAS 域) 来实现的计算, 而是从域架构转向区域架构, 即整合本地计算节点 (或区域控制器), 根据其区域内的位置连接电子控制单元 (ECU) 和接口, 而无需考虑它们各自的域。然后, 这些区域控制器连接到一个可相应处理数据的强大的中央计算节点。

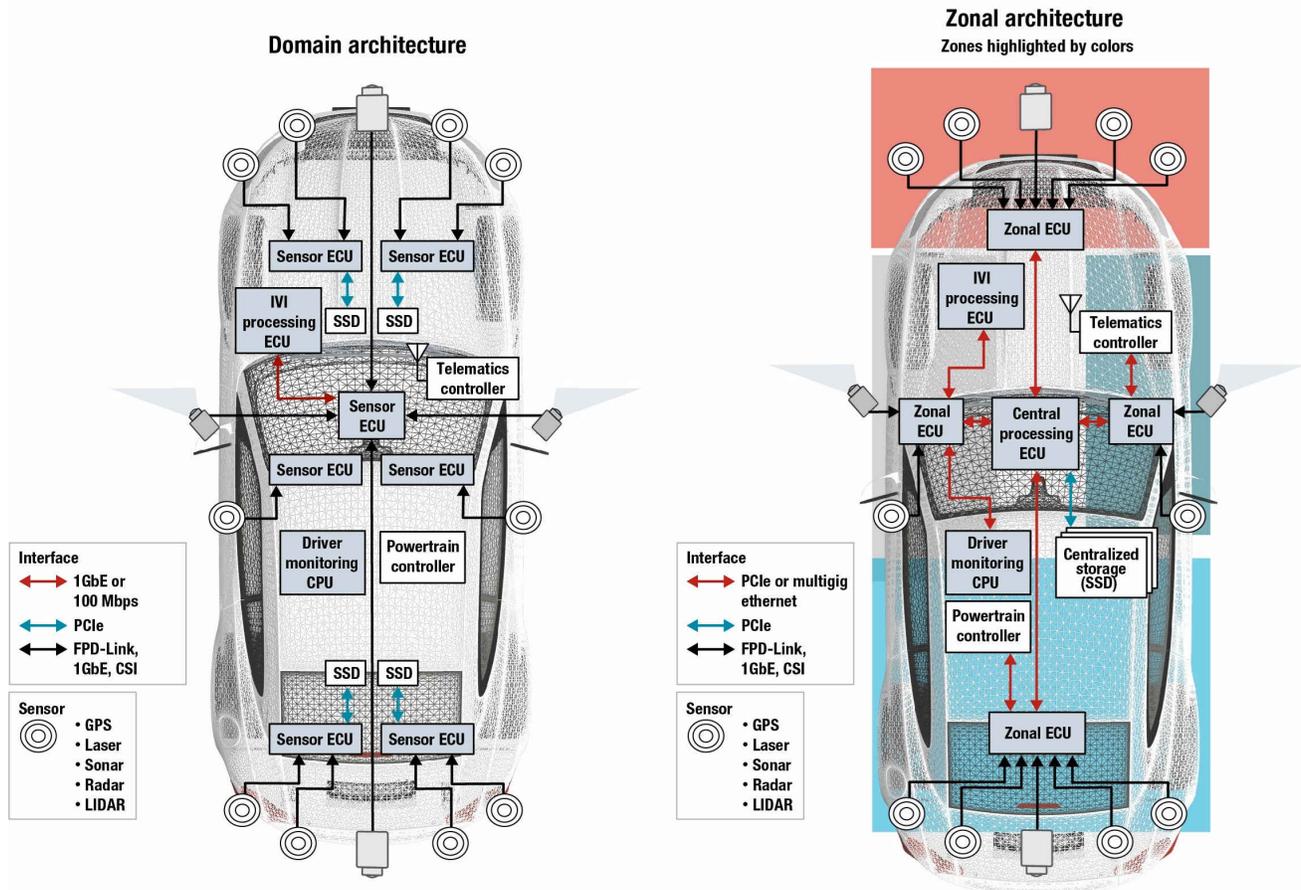


图 1-1. 域架构与区域架构

为了在区域架构中实现分布式处理, 汽车数据主干网必须采用支持高带宽和低延迟的高速接口。特别是, 当将共享数据用于安全性至关重要的实时处理时, 必须仔细考虑超低延迟。外围组件快速互连 (PCIe) 生态系统已经满足了工业数据中心的高带宽、超低延迟等性能需求, 并准备好以同样的方式服务于汽车行业!

2 通过汽车电缆通道实现 PCIe

通过汽车通道实现 PCIe 时需要仔细考虑整个物理互连。完整的端到端通道（或 TX-RX 链路）由汽车电缆通道两端的两个 PCB 通道组成。PCB 通道包括从 TX/RX PHY 到相应 PCB 接头的部分。汽车电缆通道可能包含单个电缆组件（例如带有两个组装连接器的散装电缆）或多个电缆组件。如果是多个电缆组件的情况，则电缆通道包括内联连接。根据针对所需带宽的通道限制，对电缆通道长度的限制取决于高速特性，例如插入损耗和回波损耗。

本技术白皮书专门说明通过汽车电缆通道实现原生 PCIe 时面临的挑战以及注意事项。

2.1 PCIe 技术重要注意事项

为了满足 OEM 对通用电缆通道解决方案以及尽可能降低电缆成本和重量的需求，同时保留原生 PCIe 连接的优势，需要从多方面进行权衡。

1. **保持与其他高速接口相似的电缆通道类型：**用于 PCIe 的电缆组件解决方案应尽可能与其他高速接口技术相似，例如 2.5/5/10GBASE-T1 以太网。这样，OEM 只需要针对整个车辆的各种高速接口验证单个连接器接口和电缆类型组合是否合格。
2. **仅连接必要的 PCIe 信号：**为了降低电缆数量和重量，只有必要的高速带内 PCIe 信号才需要通过汽车电缆进行连接。本地 PCB 上的低速边带信号可保持未连接状态。为了降低 EMI 谐振的风险，可忽略电缆互连中的 100MHz PCIe 参考时钟。PCIe 规范支持使用 SRNS (Separate Reference Non-Spread) 和 SRIS (Separate Reference Independent Spread) 在电缆任一侧提供独立时钟。
3. **以电缆数量换取原生 PCIe 性能：**原生 PCIe 传输需要用到专用 TX 和 RX 通道。因此，每条物理通道都需要两根 STP 电缆（每条物理通道一个 TX 和一个 RX），与其他高速接口（如 Multigig 以太网）使用的单根电缆相比有所增加。需要注意的是，这种电缆数量妥协的价值在于，可以在利用完整生态系统的同时保留原生 PCIe 性能和电缆上的一个非专有 PHY 接口。
4. **保持类似的 PHY 层要求：**原生 PCIe 可实现具有专用 TX 和 RX 方向的 NRZ 信令，并具备满足 EMC 要求的能力。与 PAM-4 或 PAM-16 调制方案相比，NRZ 信令可使垂直眼图余量最大化。由于具有专用的 TX 和 RX 通道，也无需采用单独的汽车 PCIe PHY 来支持全双工双向信令接口，进而也不需要用于消除噪声和回声的复杂 DSP。

2.2 通道规范重要注意事项

为了在数以百万计的车辆中建立可靠连接，必须确定它们之间链路的 PHY 高速要求，并且电缆和连接器提供的性能要能满足相关要求，这一点很重要。因此，需要使用通道规范来根据限制要求测试高速通道参数。高速通道规范描述了基于 S 参数的电缆和 PCB 通道要求。

主要参数包括所需的频率带宽，主要是插入损耗和回波损耗。考虑到 EMC 行为，指定屏蔽和耦合衰减会很有用。此外，需要详细描述测量设置和程序以便比较不同的结果。

TI、GG Group 和 Rosenberger 已合作拟定了汽车 PCIe 通道规范以及测量设置和程序说明，为未来汽车应用实现 PCI-SIG 标准化奠定了基础。表 2-1 列出了针对汽车 PCIe 3.0 电缆通道限值提出的重要要求：

表 2-1. 拟定的汽车 PCIe 3.0 电缆通道限值

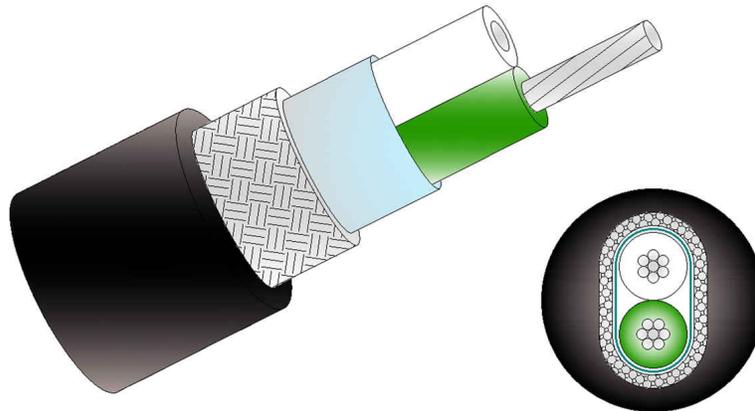
参数/指标	拟定的限值
带宽	4.4GHz ⁽¹⁾
插入损耗预算	26.4dB @ 4GHz
回波损耗预算	6dB @ 4GHz
屏蔽/耦合衰减	45dB @ 4GHz / 55.5dB @ 4GHz

(1) 电缆通道必须支持无吸出、骤降或陷波的插入损耗，比最高传输速率的奈奎斯特频率高出至少 10%，从而在各种温度、老化和制造工艺条件下实现安全裕度。

2.3 汽车布线重要注意事项

电缆只在正常室温环境下能满足性能需求这是不够的。汽车认证需要通过不同的老化测试，例如在高温下长期老化达到 3000 小时，从而表征电缆的性能稳定性。在所有老化测试之后，预期应保持预先定义的临界高频限值。为了满足接口性能方面的要求，还必须考虑不同的电缆设计参数，例如绞线长度、芯线介电常数和绝缘材料选择。

GG Group 为千兆位速度的同轴和差分应用提供了大量高质量汽车电缆。例如，如果需要适用于 PCIe 3.0 的汽车电缆，可以考虑 GG 2Speed[®] 251 STP 电缆（由 GG Group 设计和制造）。电缆的屏蔽层由缠绕在两根绞合芯线上的铝塑箔组成，如图 2-1 所示。铜编织物作为外加的一个屏蔽层，有助于满足高达 4.4GHz 的 EMC 性能需求（屏蔽和耦合衰减）。


图 2-1. GG 2Speed[®] 251 STP 电缆结构横截面

GG 2Speed[®] 251 STP 无吸出现象，速度高达 5GHz，由于电缆结构的原因，在 5.2GHz 附近会出现陷波。陷波主要受到白线和绿线的捻距的影响。GG 2Speed[®] 251 STP 电缆根据拟定的汽车 PCIe 3.0 原始电缆限制公式，也表现出良好性能，如方程式 1 和图 2-2 所示。

$$IL [dB/10m] = - (0.69f^{0.45} + 0.0027f) / 15 \quad (1)$$

其中

- f = 以 MHz 为单位的频率，高达 4400MHz

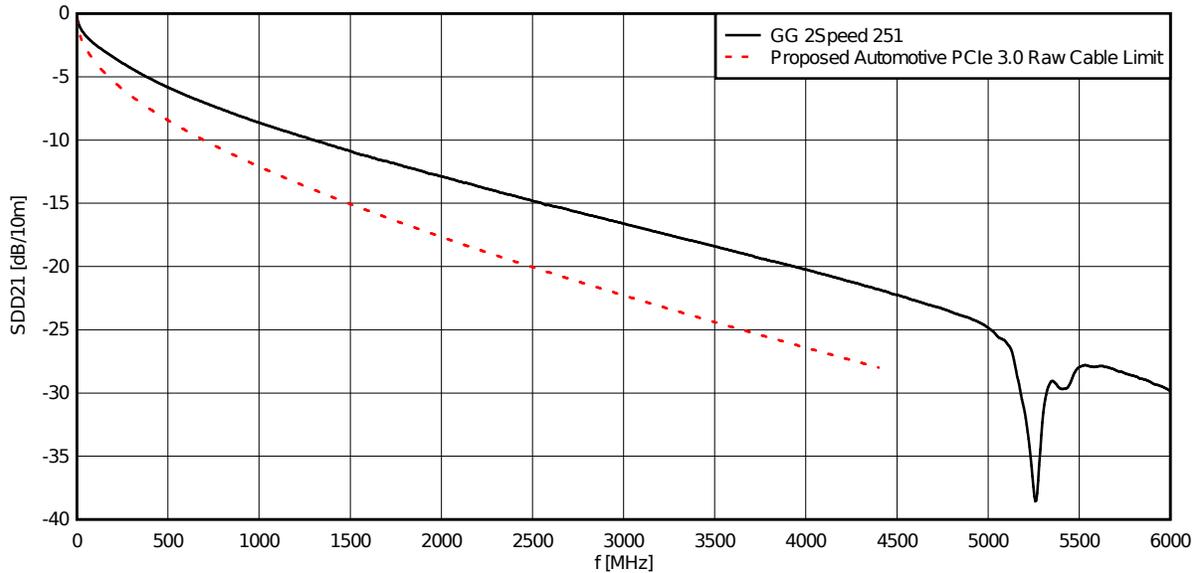


图 2-2. GG 2Speed® 251 - 插入损耗与拟定的汽车 PCIe 3.0 原始电缆限制

支持的频率比 GG 2Speed® 251 更高的电缆也在开发中，将用于扩充 GG 2Speed® 产品系列。例如，GG 2Speed® 256 的第一个原型满足 PCIe 4.0 增加的频率需求，其带宽可支持高达 10GHz 的线性插入损耗。

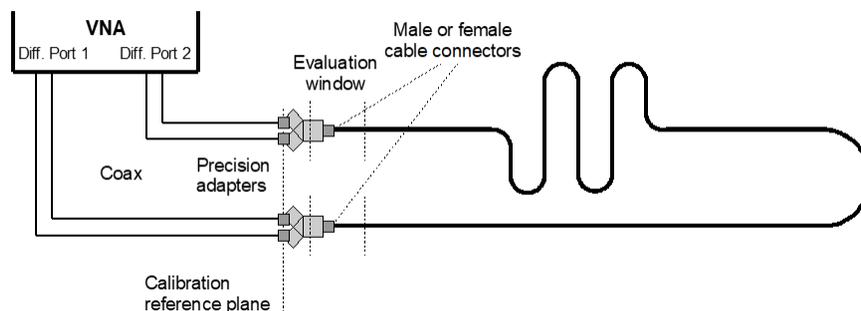
2.4 连接器和组件重要注意事项

为满足通道要求，Rosenberger 提供了 H-MTD® (用于差分信号传输) 和 HFM® (在偏好同轴传输时使用) 的高速连接器组合。为达到理想的屏蔽衰减效果，两个系统都提供 360° 屏蔽以使散装电缆维持出色的屏蔽性能。



图 2-3. 带有电缆组件和 PCB 接头的 H-MTD® 产品系列选型

回波损耗 (RL) 主要由连接器决定，因此 H-MTD® 和 HFM® 附带的阻抗分别与 100 和 50 欧姆的基准阻抗精确匹配。图 2-4 所示为电缆组件两端的 H-MTD® 连接器的相应门控 RL。



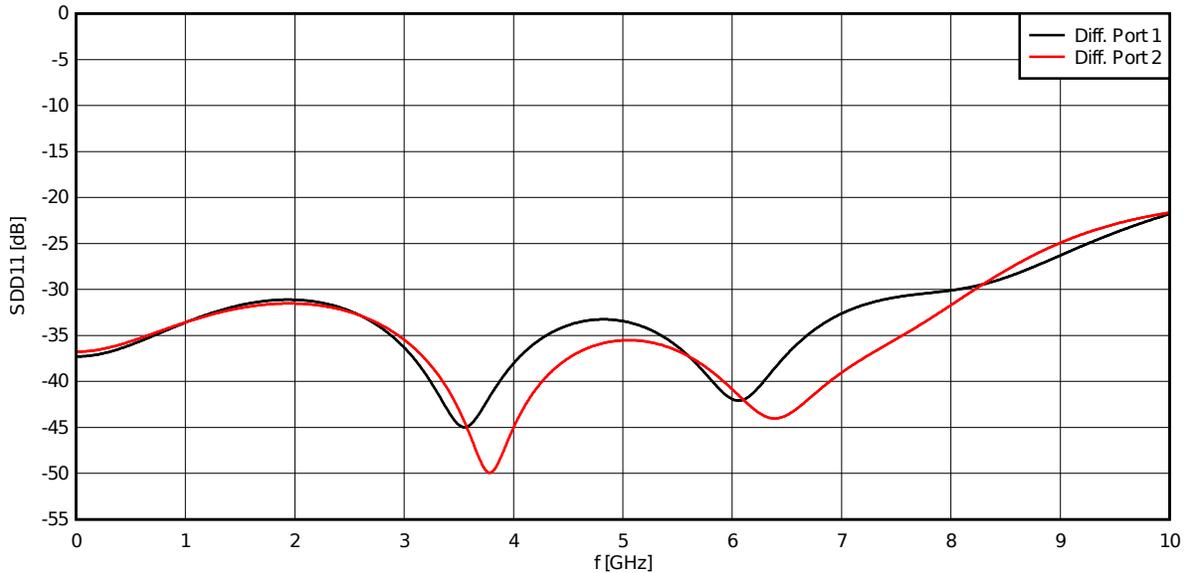


图 2-4. 电缆组件两端的 H-MTD® 连接器的门控回波损耗

Rosenberger 的 H-MTD® 电缆组件标配了新的 GG 2Speed® 251 布线解决方案。这种组合涉及大量协议，其中已包括 100/1000BASE-T1 以太网、2/5/10GBASE-T1 以太网、FPD-Link 和其他下一代 SerDes。鉴于这种多功能性，GG 2Speed® 251 电缆和 H-MTD® 连接器系统也可直接用于未来的汽车 PCIe 系统。

2.5 信号调节重要注意事项

在通过有损介质传输 PCIe 时会产生额外的插入损耗和信噪比下降问题，此时需要使用转接驱动器和重定时器来解决。转接驱动器和重定时器在 PCIe 生态系统中均有着悠久的历史。自 PCIe 2.0 以来，转接驱动器就纳入了已认证组件的 PCI-SIG 集成商列表中。同时，自 PCIe 4.0 起，重定时器正式成为 PCIe 基本规范的一部分。作为信号调节技术的半导体厂商，TI 提供广泛的 PCIe 转接驱动器、重定时器和无源开关产品系列，旨在满足众多工业和汽车应用需求。

表 2-2. 线性转接驱动器与重定时器的比较

PCIe 线性转接驱动器 ⁽¹⁾	PCIe 重定时器
低功耗解决方案 (无需散热器)	高功耗解决方案 (大部分情况下需要散热器)
超低延迟 (100ps)	中等延迟 (根据 PCIe 4.0 规范要求, 小于或等于 64ns)
不参与链路训练, 但对根复合体 (CPU) 和端点 (EP) 之间的协商透明 (与协议无关)	通过根复合体 (CPU) 和端点 (EP) 全面参与链路训练 (协议感知)
不需要 100MHz 参考时钟	需要 100MHz 参考时钟
有助于降低插入损耗	有助于降低插入损耗、抖动、串扰、反射和通道间偏斜
使用的典型均衡电路为 CTLE	使用的典型均衡电路为 CTLE、DFE 和发送器 FIR
解决方案总成本为 ~X	解决方案总成本为 ~(1.3X - 1.5X)

(1) 更多比较详情, 请参阅技术文章《信号调节功能成为 PCI Express Gen 4 的主流》。

对于 ECU 内和短电缆应用, 线性转接驱动器是合适的选择。对于原生 PCIe 3.0 传输, TI 转接驱动器瞄准的是使用 GG 2Speed® 251 STP 电缆、基于 Rosenberger H-MTD® 连接器系统且长达 5m 的应用。

对于更长的电缆应用, 重定时器对于提高信号余量至关重要。与转接驱动器相比, PCIe 重定时器提供更复杂的功能, 包括自适应 EQ、DFE 和 CDR。重定时器还提供多种链路监控诊断特性来帮助实现系统级功能安全, 其中包括 RX 链路裕度、内部眼图监视器和电缆故障检测。对于原生 PCIe 3.0 传输, TI 重定时器瞄准的是使用 GG 2Speed® 251 STP 电缆、基于 Rosenberger H-MTD® 连接器系统且长达 10m 的应用。

图 2-5 所示为根据预期总通道插入损耗而定的 PCIe 转接驱动器和重定时器的目标用例。根据以下假设条件来估算最大目标电缆长度。

- 针对 PCIe 3.0 的 PCIe 规范插入损耗 Rx 限值：22dB @ 4GHz
- 在 4GHz 时，假设链路通道具有以下插入损耗 (IL) 特征：
 - IL_{cable_m} = GG 2Speed® 251 STP 电缆：2.75dB/m
 - IL_{PCB} = FR4 PCB 布线：对于 6" (152.4mm) 为 4dB
 - IL_{conn} = 连接器和其他 PCB 组件：1.5dB
- 估计的最大电缆长度 (m) = $(IL_{Total} - 2 \times IL_{PCB} - 2 \times IL_{conn}) / IL_{cable_m}$

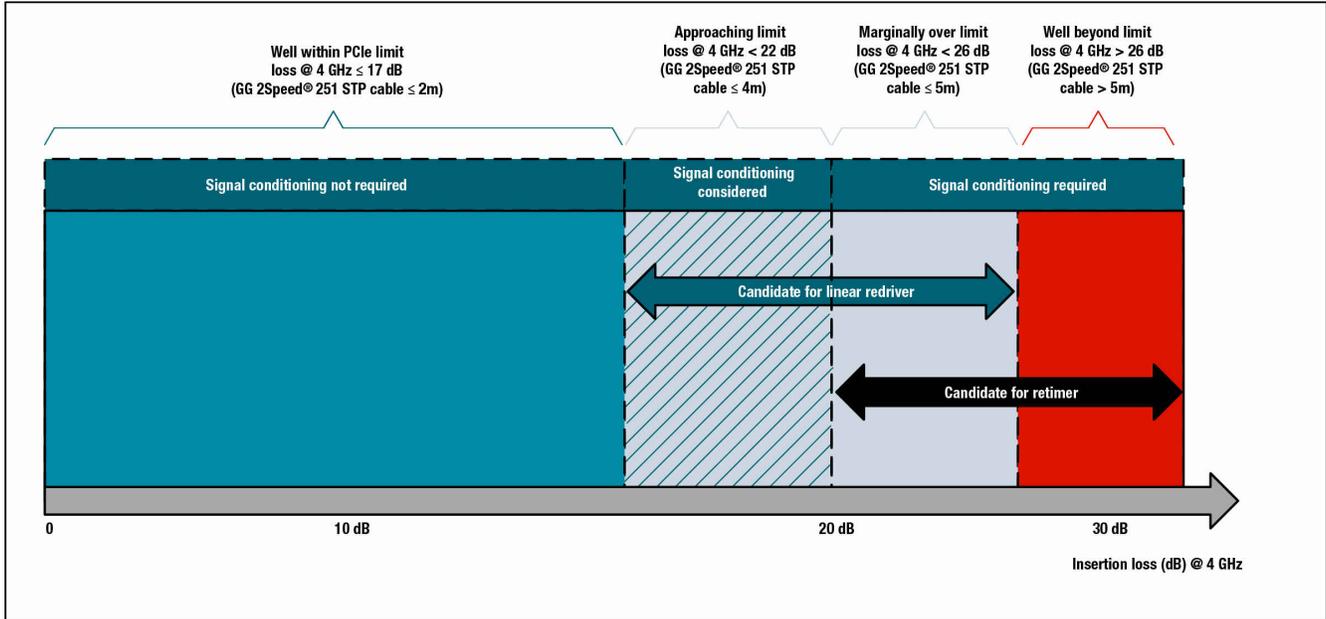


图 2-5. PCIe 汽车电缆应用中的信号调节目标用例

3 结论

PCIe 作为一种极具吸引力的接口，可满足下一代分布式汽车架构关键性的高带宽和超低延迟计算需求。为了让处理器充分利用 PCIe 接口进行共享处理，本白皮书定义了汽车布线互连以使 PCIe 从 ECU 内接口转变为 ECU 间接口。TI、Rosenberger 和 GG Group 等汽车行业的顶尖供应商一直在开发创新的解决方案，意图基于 H-MTD[®] 连接器和 GG 2Speed[®] 电缆通过汽车电缆通道实现本地 PCIe 传输。总之，这些物理层解决方案将使汽车处理器能够充分发挥出它们在计算、效率和连接方面的潜能。

4 主要撰稿人

德州仪器 (TI) :

- Michael Lu，高速信号调节系统和应用工程师

GG Group :

- Stefan Gianordoli，全球战略产品管理主管
- Tobias Kupka，汽车线缆应用工程团队负责人

Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG :

- Gunnar Armbrrecht，汽车研发主管
- Stephan Kunz，汽车研发系统工程师

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

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

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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