

面向混合关键性车载应用的 网络延迟架构设计

Lulu Chan、Bart Vermeulen、Nicola Concer 和 Philip Axer——恩智浦汽车电子半导体
2018 年 10 月

简介

日益增加的自动驾驶车辆和互联车辆要求更快的数据速度和更高的数据容量，以满足安全性和舒适性要求，受这些因素的驱动，一场汽车网络革命正在兴起。以 CAN 为中心的车载网络 (IVN) 虽然成熟可靠，但无法满足客户期待的新一代车辆中的新功能所带来的大量多样化数据需求。为了支持始终互联的远程信息处理单元、高分辨率前部本体、雷达传感器、环视摄像头，所需的带宽日益增加，更多以 CAN 为中心的 IVN 已经转变为基于域的车载架构。在这些架构中，中央网关使用汽车以太网通信技术连接到多个域电子控制单元 (ECU)。每个域 ECU 均实现特定的功能，例如驾驶辅助、信息娱乐和车身控制。

汽车以太网⁽¹⁾是这些架构通信骨干网的实际标准解决方案，因为它具有全双工和可扩展的带宽，并且可以从相近的消费类和工业市场中获取丰富的相关标准、工具和解决方案。为了满足特定的时间受限应用要求，IEEE（以太网标准化的监管机构）发布了一套时间敏感型网络 (TSN) 标准。这些标准支持网络功能，例如分布式节点同步、终端节点之间的确定性或有界网络延迟以及网络路径冗余。

本白皮书讨论 IEEE 802.1Qbv “计划流量增强”，这是一个特定的 TSN 标准，它定义了在网络端节点之间实现确定性通信延迟的机制。本文旨在面向对 IEEE 802.1Qbv 在汽车以太网网络中的应用感兴趣的专业人员。

在第 1 节中，我们介绍 TSN 任务组、IEEE 802.1Qbv 标准和 IEEE 802.1AS 标准。第 2 节介绍四个“如果……会怎样”的相关场景，以重点说明计划流量功能的影响，并介绍我们的汽车以太网实际设置。在第 3 节中，我们将进行每种场景的开销/收益分析，然后在第 4 节中给出最终结论。

目录

1. 时间敏感型网络	2
2. 评估场景和物理网络设置	4
3. 评估与结果	5
4. 结论	10
5. 参考资料	11



1. 时间敏感型网络

概述

IEEE 802.1 TSN 任务组⁽²⁾正在制定一套 IEEE 802.1 标准，以在 IEEE 802 网络中提供确定性服务，并能够以有界低延迟、低数据包延迟变化和低数据包丢失来保证正常的帧传输。该任务组从以前的 IEEE 802.1 音频/视频桥接(AVB)任务组⁽³⁾演变而来，最初仅专注于 AV 应用。TSN 任务组通过添加支持更多应用类型的支持机制，对 AVB 任务组创建的标准进行了扩展。关键的 TSN 机制包括时间同步、流预留、服务质量、冗余性和安全性。

IEEE 802.1Qbv——计划流量增强

汽车以太网交换机支持在多个用户之间共享汽车以太网物理链路，并将点对点物理链路扩展到整个网络。通常，以太网帧在进入标准的汽车以太网交换机后会经历三个后续阶段：

1. 进入阶段：收到传入的以太网帧并进行各种检查，之后可能会将其丢弃，或者对其进行可选修改后加以存储。
2. 转发阶段：存储的帧将转发到单端口或多端口出口队列。以太网帧的特定离开端口取决于其源/目标 MAC 地址和 VLAN ID。离开队列取决于帧的优先级。
3. 离开阶段：离开队列中的帧传输顺序按照严格的优先级机制进行选择，这意味着先选择位于较高优先级队列中的帧，然后选择位于较低优先级队列中的帧。

汽车以太网交换机支持 IEEE 802.1Qbv 标准中的机制，它通过使用时间感知整形器(TAS)⁽⁴⁾来处理网络中的时间计划流量。对于需要在严格的时间限制内传递报文的应用，不管在同一共享物理网络上进行通信的其他数据量有多少，都需要此整形器。此类应用的示例包括传感器间的融合数据传递和处理、SOC 与控制 MCU 之间的板载处理器间通信、特定信号的域内通信以及无竞争流量争用的控制流量传递。图 1 展示了 IEEE 802.1Qbv 标准中规定的以太网交换机离开阶段的机制。

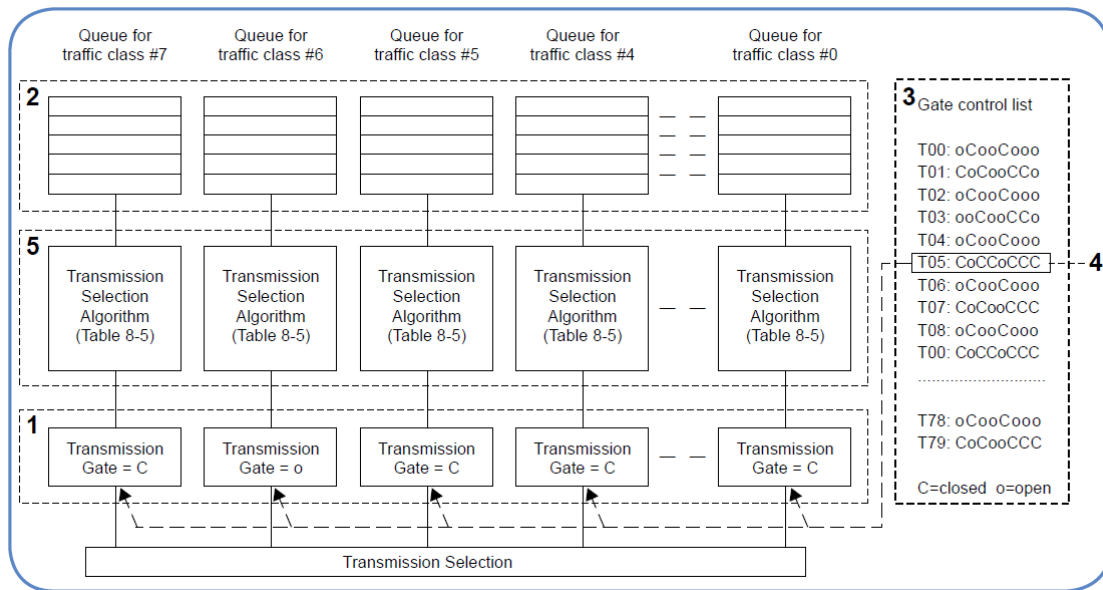


图 1：以太网交换机的离开阶段使用 IEEE 802.1Qbv 传输门进行帧选择⁽⁴⁾

将传输门(1)添加到交换机的离开队列(2)中，用来控制这些队列中的帧是否符合传输资格。这些门又由包含门控条目(4)的门控列表(3)来控制。每个条目针对每个离开队列指定该门是打开(“o”)还是关闭(“C”)及其持续时间。仅在离开队列打开且在传输帧所需时长内保持打开状态时，该队列中的帧才有资格按照其他选择算法(5)进行发送选择。这意味着，当队列的门关闭时，队列中的任何帧都不会被发送。该机制可以防止来自关闭队列任何进行中的发送可能会阻止来自另一个队列的帧在其计划打开时段内的即时发送。

当一个时间关键型的以太网帧在一个队列的门计划打开时刻到达该队列的门，而其他门均关闭时，以太网交换机可以保证其即时传输。在 IVN 的混合关键性流量场景中，拥有这种 IEEE 802.1Qbv 支持意味着我们可以保证在以太网交换机中不会因为其他流量的持续传输而引入额外的延迟。图 2 显示了两个级联以太网交换机上混合关键性流量的示例，其中的关键性流量将按计划通过，无额外延迟。在某些特殊情况下，即使支持 Qbv，也无法实现这种保证；例如，当交换机无法知道帧的传输时间时。在本文中，我们不讨论这些例外情况。

时间关键型流量源与交换机需要及时同步其操作，以使该 Qbv 机制有效，并确保最大限度地降低通过交换机的延迟。对于更大网络中的通信路径，我们需要将所有交换机与时间关键型流量源进行同步，以在整个网络中获得这种端到端最低延迟保证。为此，我们可以使用 IEEE 802.1AS 标准中描述的时钟同步机制。

IEEE 802.1AS——时钟同步

可以按照 IEEE 802.1AS 标准⁽⁶⁾中的 Avnu 汽车规范，对交换机中 IEEE 802.1Qbv 计划表的开始和执行进行同步。这为所有支持 TSN 的交换机提供了一个共同的时间基准，该基准由网络中的主时钟提供。交换机可以使用这个共同的时间基准来遍历门控列表，从而协调其离开队列中门的打开和关闭。当网络中的所有组件都拥有共同的时间基准时：

- 传感器节点对其有效载荷信息进行采样时为其帧加上时间戳，此时传感器融合应用可以感知到帧的起始时间。
- 媒体应用可以感知到帧的到达时间，其应用端节点会接收到它们到达其媒体的时间戳。
- 时间关键型应用可以随着时间的推移商定一个网络通信计划，将所有交换机设置为在时间关键型流量预期通过时阻止所有其他通信队列，从而确保控制流量的端到端延迟最低。

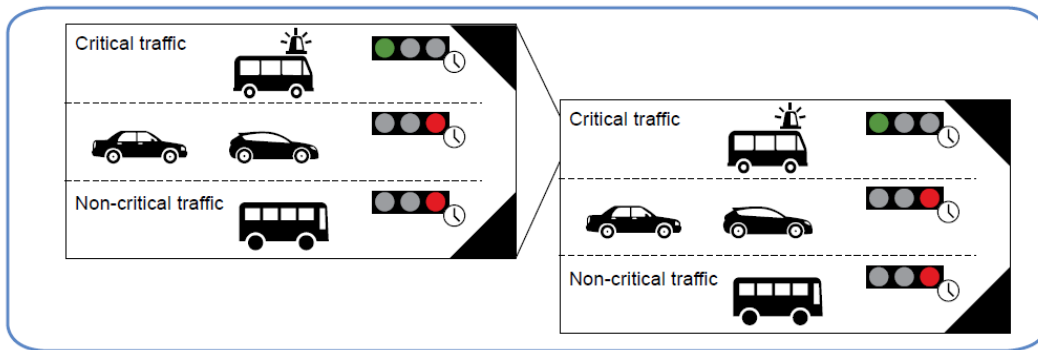


图 2: 利用 IEEE 802.1Qbv，最大限度地降低级联交换机中安全关键型流量的端到端延迟

2. 评估场景和物理网络设置

有多种方法可以配置 IVN，以支持混合关键性流量场景。在本文后续部分，我们评估了四种“如果……会怎样”的相关场景，以重点说明在网络中拥有 IEEE 802.1Qbv 计划流量功能的收益与开销：

1. 如果关键流量源是网络的唯一用户会怎样？
2. 如果关键流量必须与其他用户共享网络会怎样？
3. 如果有无法与网络同步的周期性关键流量源会怎样？
4. 如果需要最大限度地减少计划流量接收端的抖动，该怎么办？

为了评估这四种情况，我们构建了一个物理网络设置，其中包含两个汽车以太网交换机和不同的终端节点，以发送和接收关键性不同的流量。图 3 显示了此设置的框图，表 1 列出了所使用的硬件及其以太网流量特性。

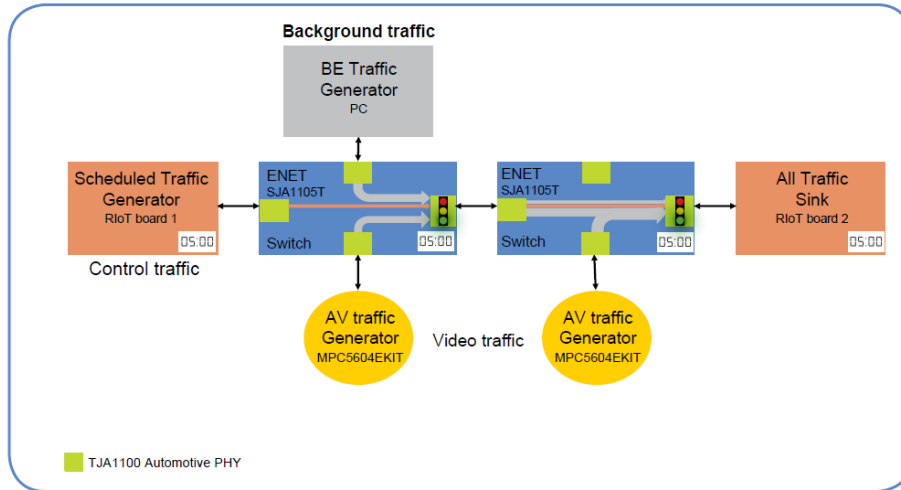


图 3: 为评估 Qbv 功能影响创建的硬件设置框图

组件	用途	流量类型	周期	每周帧数	平均帧大小	平均输出数据传输速率
RIoT板1	源	gPTP	1 s	5	~72 B	3.7 kbit/s
RIoT板1	源	ST	1 s	1	64 B	512 bit/s
PC	源	BE	-	-	1518 B	100 Mbit/s
MPC5604EKIT	源	AV	-	-	1438 B	2 x ~25 Mbit/s
SJA1105T应用板	交换机	混合	-	-	-	100 Mbit/s
RIoT板2	接收	混合	-	-	-	-

表 1: 硬件设置中使用的组件

流量源生成的流量类型包括“尽力而为”(BE)、音频/视频(AV)和计划流量(ST)，以此来构成全部四种场景中的混合关键性流量用例。在此设置中，我们在 PC 上使用 iPerf⁽⁶⁾以产生“尽力而为”流量，其形式为 100 Mbit/s 的最大 UDP 帧。我们使用两个恩智浦 @MPC5604EKIT⁽⁷⁾ 摄像头以大约 25 Mbit/s 的速率生成 AVTP 帧⁽⁸⁾格式的视频流量，并且我们将 RIoT 板⁽⁹⁾ 1 作为工具，从固定时间点开始，以 1 秒间隔发送计划流量以太网报文。

此外，在所有场景下，计划流量生成器均充当 gPTP 主机，使用 IEEE 802.1AS gPTP 协议将计划流量生成器与以太网交换机同步，以调整其 Qbv 计划表。

以太网交换机则采用恩智浦 SJA1105T 汽车以太网交换机⁽¹⁰⁾。在这些交换机中，我们将“尽力而为”流量、视频流量和 gPTP 流量分别分配给优先级为 0、3 和 6 的离开队列。根据评估场景，我们将计划流量映射至优先级为 1 或 7 的离开队列。我们在硬件设置中使用交换机的时间感知整形支持功能，来帮助说明在四个评估场景中使用 IEEE 802.1Qbv 的收益和开销。

3. 评估与结果

使用此硬件设置，我们评估了四种“如果……会怎样”的相关场景，以重点说明在车载网络中拥有计划流量功能的影响。在此评估中，我们查看两个关键的应用性能指标：端到端延迟和抖动。我们将端到端延迟定义为计划帧自源发送出去到接收端收到所需的时间，如图 4 所示。我们将抖动定义为与设置中流量接收端计划流量的预期周期性偏差。

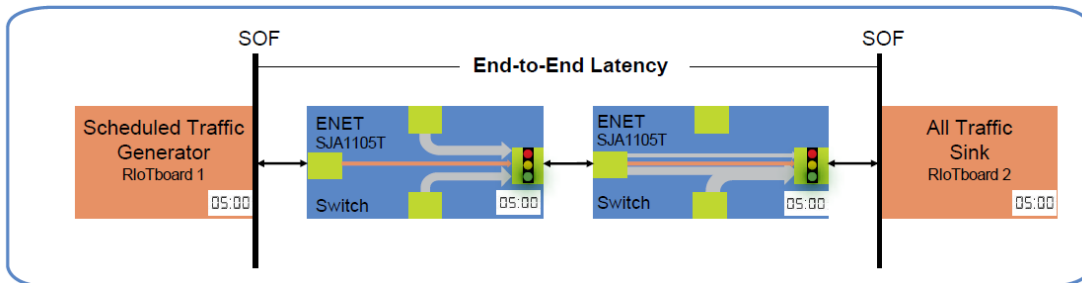


图 4：物理设置中的端到端延迟

图 5 显示了在物理设置中使用的计划流量的循环计划表示例。计划表中间的时隙是计划流量的预期到达时间。该图显示了一个“ooo”计划表，我们定义在该计划中，计划流量的队列在其时隙以内和以外均为打开状态。另外，在第三和第四种场景中，我们评估“CoC”计划表的使用，在该计划中，计划流量的队列在其时隙以外为关闭状态。时隙持续时间设置为 200 μs，以覆盖计划流量生成器中的抖动。

在结果中，我们将所有测得的端到端延迟基于一个参考点进行标准化，即一个 64 字节帧在无竞争流量条件下在网络中传播的延迟测量值。标准化的目的是只观察由竞争流量引起的额外延迟，该延迟是在最低可实现的端到端延迟基础上的附加值。

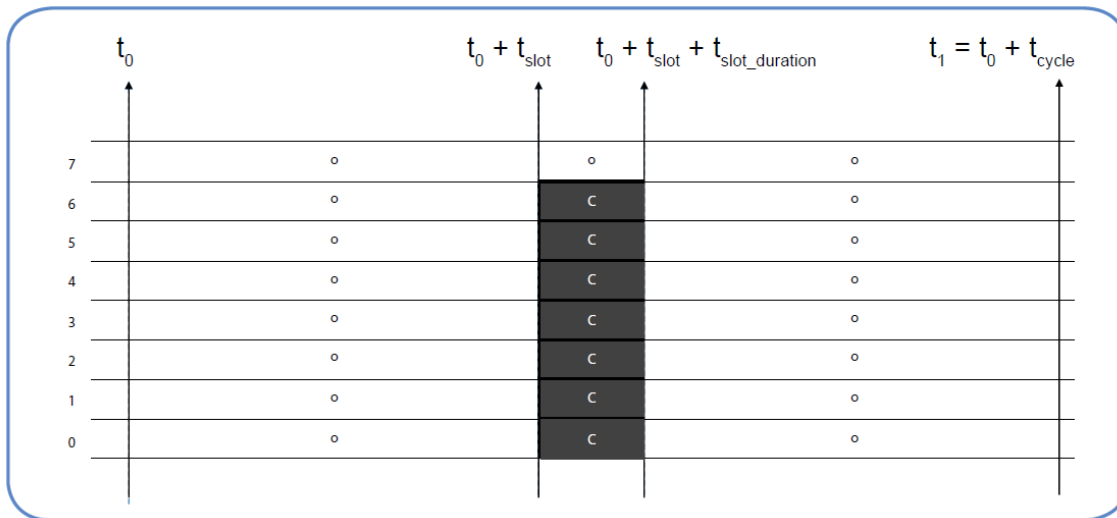


图 5：交换机中“ooo”Qbv 计划表的示例

情况 1：如果关键流量源是网络的唯一用户会怎样？

我们预计，当计划流量没有因为其他流量的存在而在网络中出现延迟时，会出现最佳端到端延迟。应用 Qbv 计划表后，对网络进行了计划安排，以确保按照计划表创建的关键流量具有最佳端到端延迟。当关键流量是网络的唯一用户时，与没有 Qbv 计划表的情况相比，Qbv 计划表对端到端延迟没有影响。图 6 显示了在交换机中不存在任何其他流量时，计划流量在启用和不启用 IEEE 802.1Qbv 支持两种情况下的额外延迟结果。两种情况下的结果均相同，因为不存在由干扰流量而引起的额外延迟。该行为符合预期，因为不存在其他流量会阻止以太网交换机中计划流量的传输，这意味着计划流量将不会经历任何额外延迟。

情况 2：如果关键流量必须与其他用户共享网络会怎样？

图 7 显示了将表 1 中定义的“尽力而为”流量和视频流量添加到网络中时，来自计划流量生成器流量的延迟测量结果。该图显示了在不使用 Qbv 计划表的情况下，存在 0 到 500 μs 左右的额外延迟。未在交换机中使用 Qbv 计划表时，计划流量的延迟变化增量取决于我们分配给计划帧的离开优先级，以及该帧是否在另一个以太网帧的传输过程中到达交换机。与预期的一样，当我们在以太网交换机中使用 Qbv 计划表时，我们再次观察到，未出现因干扰流量而引起的额外延迟。

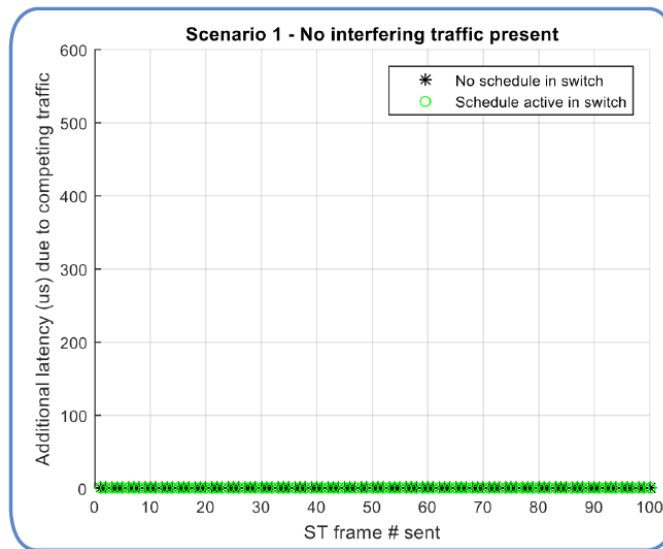


图 6：无干扰流量时计划的影响

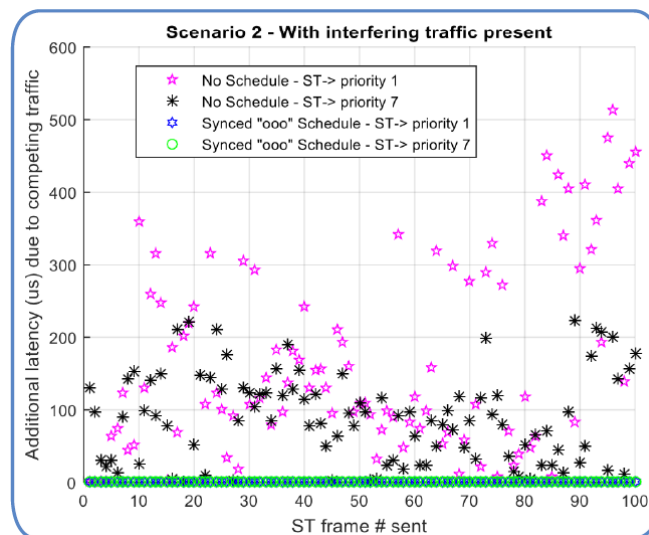


图 7：有干扰流量时计划的影响

我们还查看了源和接收端计划流量的抖动。图 8 和图 9 显示了在交换机中使用和未使用 Qbv 计划表时测得的结果。比较这两个图形，我们发现在交换机中使用 Qbv 计划表，可限制计划流量帧在接收端到达时间的抖动的量，使之与源端计划流量发送时间的抖动量相同。

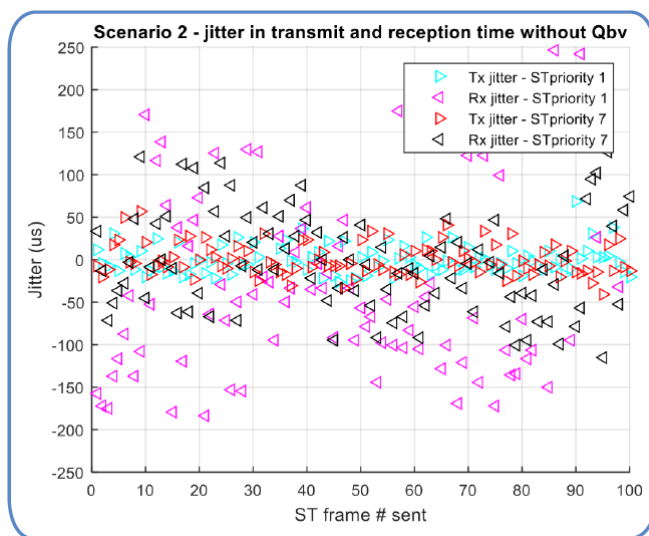


图 8: 未使用 Qbv 的 Rx 抖动

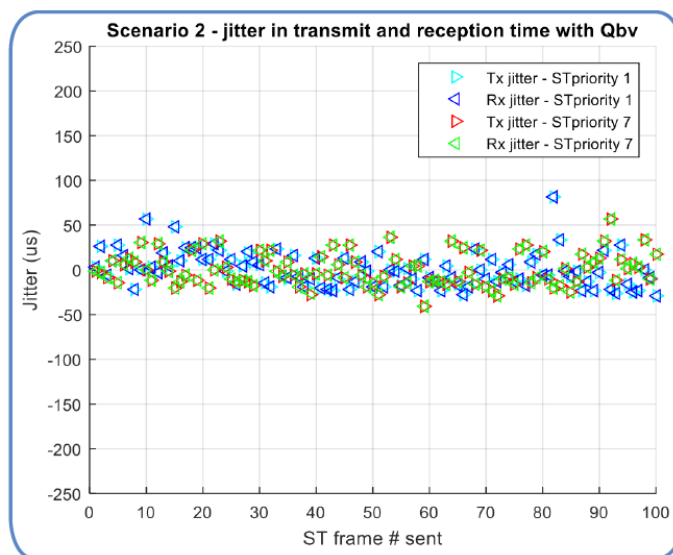


图 9: 使用 Qbv 的 Rx 抖动

情况 3: 如果有无法与网络同步的周期性关键流量源会怎样?

图 10 和图 11 显示了 Qbv 计划表对端到端延迟结果的影响，该计划表的时间感知与计划流量源不相同。图 10 显示了使用“ooo”计划的结果，图 11 则显示了“CoC”计划的结果。

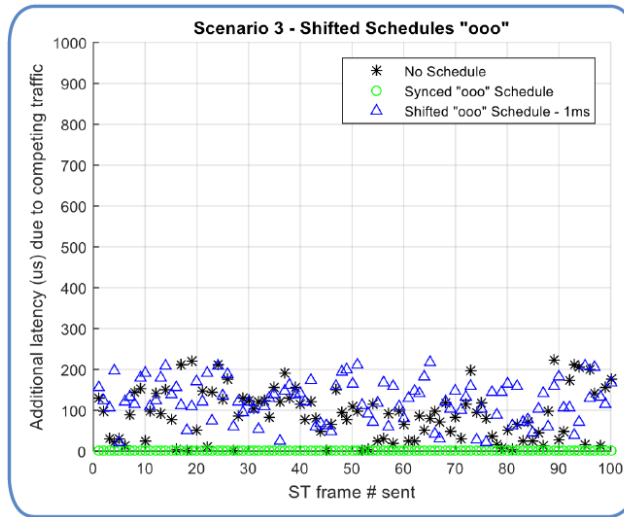


图 10: 计划表始终打开, 影响计划偏移量

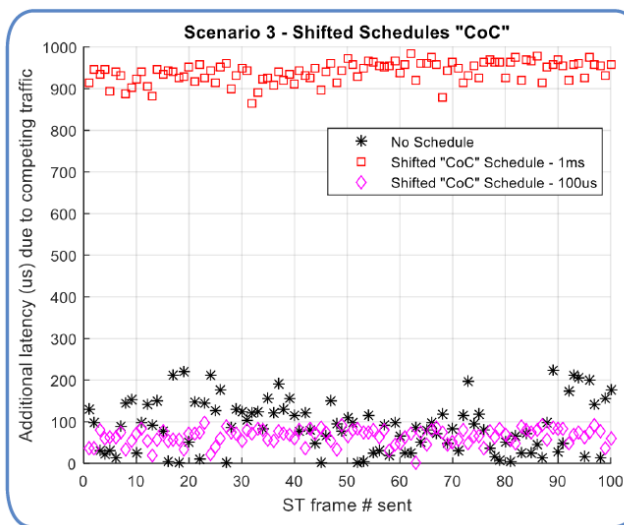


图 11: 计划表在其计划时隙以外关闭

考虑到以太网交换机已与主机同步, 在此评估场景中, 以太网源以固定的时间偏移量提前于计划时隙发送计划业务帧。从图 10 中可以看到, 当计划流量的离开队列配置为始终打开时 (如图 5 所示), 在最坏情况下, 不同步计划表的延迟行为增加将与完全未使用 Qbv 计划表的情况相同。将计划流量的离开队列配置为在计划时隙以外为关闭状态时, 我们可以在图 11 中看到, 延迟结果的增加取决于计划流量源的时间偏移量。在图 11 中还可以观察到, 与未使用 Qbv 计划表的情况相比, 100 μ s 偏移量的端到端延迟增加更为稳定, 并且其最坏情况值更低。这告诉我们, 计划表的特定配置可以限制最坏情况下的延迟增加。根据以上结果, 我们观察到:

- 最坏情况下的端到端延迟很大程度上取决于配置的 Qbv 计划表, 这意味着可以通过 Qbv 配置来控制以太网交换机上计划流量的延迟增加。
- 使用 Qbv 计划表的最坏情况端到端延迟与不使用 Qbv 计划表的最坏情况端到端延迟相当。
- 使用同步 Qbv 计划表的最佳情况端到端延迟与不存在其他流量 (即计划流量专用) 的网络上可实现的最低端到端延迟相当。
- 通常, 延迟行为的增加如表 2 所示。该表假设计划帧是队列中唯一的帧, 并且存在其他优先级流量。

分配给计划流量的优先级	最大延迟增加值		
	无Qbv	Qbv, 始终打开	Qbv, 仅在其间隙内打开
最高优先级, 在其间隙内到达	1帧	无	无
优先级较低, 在其间隙内到达	N*1帧	无	无
最高优先级, 在其间隙外到达	1帧	1帧	1个循环
优先级较低, 在其间隙外到达	N*1帧	1个循环	1个循环

N = 由于优先级高, 可以在计划流量帧之前选择传输的帧数

表 2: 每个以太网交换机在计划流量帧中的最大延迟增加值

情况 4: 如果需要最大限度地减少计划流量接收端的抖动, 该怎么办?

对于某些时间受限的应用, 主要问题可能并不是最低可实现的端到端延迟。相反, 抖动才是主要的应用性能指标。Qbv 计划机制同样也可用来最大限度地减少在接收端的计划流量的抖动。

在场景 2 的结果中, 我们观察到“ooo”计划表将接收端的抖动量限制在源抖动量以内。在这种场景下, 我们评估如何使用一个经过时移的“CoC”时间表来进一步降低抖动。

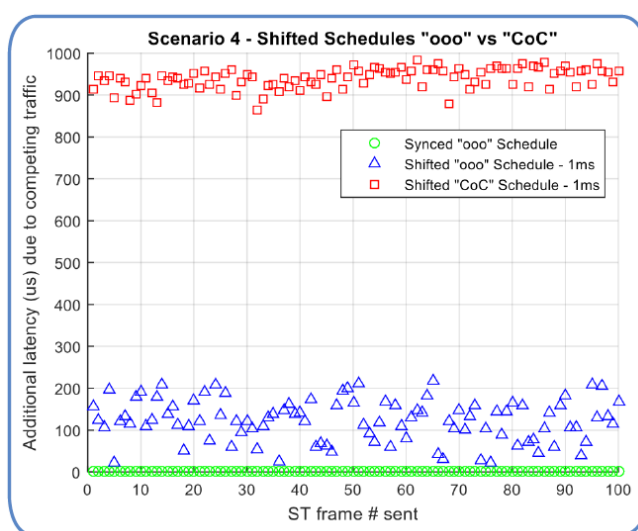


图 12: 经过时移的“CoC”计划表与“ooo”对延迟的影响对比

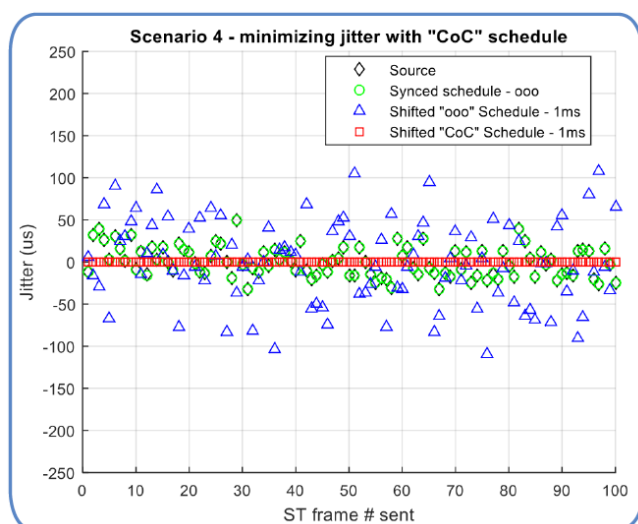


图 13: 经过时移的“CoC”计划表与“ooo”对抖动的影响对比

图 12 显示了我们从场景 3 中已经知道的情况, 即使用经过时移的“CoC”计划表会增加端到端的延迟, 具体取决于时移的偏移量。图 13 现在则显示了经过时移的“CoC”时间表对抖动的影响。从该图可以看出, 现在计划流量接收端的抖动被降到最低, 甚至与源的抖动相比也是如此。

4. 结论

在本白皮书中，我们解释了 IEEE 802.1Qbv 的主要概念，并展示了在时间受限的应用中使用 Qbv 计划机制对端到端延迟和计划流量的抖动性能的收益和开销。我们的实验使用恩智浦和其他市售组件完成。主要评估比较各场景下端到端延迟和抖动结果，包括使用和不使用 Qbv 计划表、是否存在其他关键流量、分配给计划流量的优先级、计划流量源与以太网交换机计划表的同步性以及计划表的配置。

实验表明，使用了 Qbv 计划，可以通过网络针对周期性的计划流量帧实现最低可能的延迟，无论帧的优先级如何以及是否存在其他流量。在没有 Qbv 计划，使用简单严格的优先级仲裁的情况下，帧的端到端延迟会因其他流量的存在而增加，具体增加程度取决于分配的优先级和竞争流量的时序。使用 Qbv 计划作为一种解决方案，可确保在具有混合关键性并发流量的网络中，使时间受限应用的流量帧的端到端延迟降到最低。

为了实现最低可能延迟，有必要在 Qbv 中选择足够大的计划时隙，以便将源的这种抖动考虑在内。此外，还必须将计划流量源与网络中的交换机同步，并且交换机必须在硬件上支持 Qbv 机制。系统的开销还在于，当网络中的其他流量在计划时隙期间受阻时，分配给这些流量的带宽就会减少。

我们还表明，以增加延迟的代价，能够最大限度地减少在接收端接收到的计划流量的抖动。为了最大限度地减少抖动，交换机中计划流量的离开队列将在计划时隙以外关闭，并且交换机计划表中的打开时隙将与计划流量源之间存在一个时间偏移量。由此产生的延迟增加取决于源端的抖动和交换机中的计划表到计划流量源的偏移。计划的周期时间可限制额外的端到端延迟。

如本白皮书所述，预测未来的车载应用需求，随后评估可能的解决方案，对于在不久的将来实现高度连接和自动驾驶车辆至关重要。作为 IVN 和其他汽车解决方案的领导者，恩智浦能够为希望站在创新车载网络前沿的制造商提供产品和技术支持。

5. 参考资料

- ¹ S.B.Carlson、J. Farkas、N. Finn和D. Pannell等, “IEEE 802 Ethernet Networks for Automotive” (面向汽车的IEEE 802以太网网络), 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: http://www.ieee802.org/802_tutorials/2017-07/tutorial-Automotive-Ethernet-0717-v02.pdf
- ² “IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group” (IEEE 802.1时间敏感网络任务组), 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- ³ “IEEE 802.1 Audio Video Bridging Task Group” (IEEE 802.1音频视频桥接任务组), 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: <http://www.ieee802.org/1/pages/avbridges.html>
- ⁴ “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Bridges and Bridged Networks.Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic” (用于局域网和城域网的IEEE标准——桥和桥接网络.修订版25: 计划流量的增强), IEEE Std 802.1Qbv-2015, 2015年12月。
- ⁵ “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks” (用于局域网和城域网的IEEE标准——桥接局域网中时间敏感型应用的定时和同步), IEEE 802.1AS-2011, 2011年2月
- ⁶ “iPerf - The TCP, UDP and SCTP network bandwidth measurement tool” (iPerf——TCP、UDP和SCTP网络带宽测量工具), 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: <https://iperf.fr/en/>
- ⁷ 恩智浦半导体, “NXP MPC5604EKIT: 开发套件”, 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/power-architecture-processors/mpc5xxx-55xx-32-bit-mcus/ultra-reliable-mpc56xx-32-bit-automotive-and-industrial-microcontrollers-mcus/nxp-mpc5604ekitdevelopment-kit-enabling-video-over-ethernet-with-nxp-mpc5604e-mcu:MPC5604EKIT>
- ⁸ “IEEE Standard for a Transport Protocol for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks” (桥接局域网中时间敏感型应用的传输协议的IEEE标准), IEEE Std 1722-2016, 2016年12月
- ⁹ “RIoTboard | element14”, 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: <https://www.element14.com/community/community/designcenter/single-board-computers/riotboard>
- ¹⁰ 恩智浦半导体, “OM14510-SJA1105TJP: 汽车以太网交换机应用板”, 查阅日期: 2018年8月23日, [在线], 网址: <https://www.nxp.com/products/analog/interfaces/in-vehicle-network/ethernet/automotive-ethernet-switches/automotive-ethernet-switch-application-board:OM14510-SJA1105TJP>

如何联系我们:

主页: www.nxp.com

网络支持: www.nxp.com/support

美国/欧洲或未列明区域:

NXP Semiconductors USA, Inc.

Technical Information Center, EL516

2100 East Elliot Road

Tempe, Arizona 85284

+1-800-521-6274或+1-480-768-2130

www.nxp.com/support

欧洲、中东和非洲地区:

NXP Semiconductors Germany GmbH

Technical Information Center

Schatzbogen 7

81829 Muenchen, Germany

+44 1296 380 456 (英语)

+46 8 52200080 (英语)

+49 89 92103 559 (德语)

+33 1 69 35 48 48 (法语)

www.nxp.com/support

日本:

NXP Japan Ltd.

Yebisu Garden Place Tower 24F,

4-20-3, Ebisu, Shibuya-ku,

Tokyo 150-6024, Japan

0120 950 032 (国内免费电话)

www.nxp.com/jp/support/

亚太地区:

恩智浦半导体香港有限公司

Technical Information Center

2 Dai King Street

Tai Po Industrial Estate

Tai Po, N.T., Hong Kong

+800 2666 8080

support.asia@nxp.com

www.nxp.com

恩智浦和恩智浦标志是NXP B.V.的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。© 2018 NXP B.V.

文档编号: QBVSOLUTIONSWPA4 REV 1