

# 时间敏感以太网技术应用研究

孔祥明 李长龙 梁贵友 周时莹 高长胜

(中国第一汽车集团有限公司, 长春 130013)

【欢迎引用】孔祥明, 李长龙, 梁贵友, 等. 时间敏感以太网技术应用研究[J]. 汽车文摘, 2024(7): 37-43.

【Cite this paper】KONG X M, LI C L, LIANG G Y, et al. Research on Application of Time Sensitive Ethernet Technologies[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(7): 37-43.

【摘要】随着车内网络对实时性和大容量数据传输的双重需求逐步增加,时间敏感以太网(TSN)成为以车载以太网为骨干网的电子电气架构中必不可少的技术。为了验证TSN协议对车载以太网的延时影响,通过对TSN主要协议族的技术特点和应用场景进行分析,使用RTaW软件建模,通过Zonal架构网络对4种不同情况的车载以太网流量进行仿真。结果表明,采用TSN协议的车载以太网在干扰流量占主要链路为80%带宽时,最差端到端时延约增加0.1 us,接近无干扰情况延时。仿真表明TSN对车载以太网传输队列延迟有可靠保证,TSN将在音视频传输、高等级自动驾驶、安全备份等方面发挥更大的作用。

关键词:智能网联汽车;时间敏感以太网;车载以太网

中图分类号:TP393.11 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220281

## Research on Application of Time Sensitive Ethernet Technologies

Kong Xiangming<sup>1,2</sup>, Li Changlong<sup>1,2</sup>, Liang Guiyou<sup>1,2</sup>, Zhou Shiyang<sup>1,2</sup>, Gao Changsheng<sup>1,2</sup>

(China FAW Group Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】With the increasing demand for real-time and large capacity data transmission in the in-vehicle network, Time Sensitive Networking (TSN) has become an essential technology in the electronic and electrical architecture with vehicle ethernet as the backbone network. In order to verify the delay effect of TSN protocol on vehicle ethernet, this paper analyzes the technical characteristics and application scenarios of the main TSN protocol family, uses RTaW software modeling, and simulates the traffic of vehicle ethernet under 4 different conditions through the Zonal architecture network. The results show that when the interference traffic accounts for 80% of the main link bandwidth, the worst end-to-end delay of vehicle ethernet using TSN protocol increases by about 0.1 us, which is close to no-interference case delay. Simulation results show that TSN can guarantee the delay of vehicle ethernet transmission queue reliably. TSN will play a greater role in audio and video transmission, high-level automatic driving, security backup and other aspects.

Key words: Intelligent and Connected Vehicle(ICV), Time Sensitive Networking(TSN), Vehicular ethernet

## 0 引言

当前车内网络对于通信带宽、速率要求逐步增加,传统的分布式架构难以同时满足汽车对实时性、可靠性的需求。传统以太网虽技术成熟但最初并非用于车载网络,只解决了带宽和速率的需求,没有过多涉及时序且没有充分考虑时延,导致传统以太网在车载网络应用中出现延时增加和抖动情况。时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)是电气和电

子工程师学会(IEEE)802.1工作组中的TSN工作组制定的系列标准,即在非确定性的以太网中实现确定性的最小时延的协议族,其定义了以太网数据传输的时间敏感机制,为传统标准以太网增加了确定性和可靠性,以确保数据实时、准确、可靠地传输。北京理工大学邹渊<sup>[1]</sup>提出了以端口数均匀、负载均衡和信息流端到端延时最低为优化目标的网络架构多目标优化框架。国汽(北京)智能网联汽车研究院李群<sup>[2]</sup>提出了一种新型车载以太网TSN时间敏感网络测试原理。

吉林大学杨浩<sup>[3]</sup>对TSN网络运行过程中的技术特点和性能进行归纳总结。当前国内外学者围绕TSN的研究主要集中在协议综述、优化分析、算法设计、测试原理等方面。

针对缺少实际应用研究和真实仿真的问题,本文提出了时间敏感以太网技术应用研究。首先介绍TSN主要协议,对车载典型应用场景进行说明;然后使用RTaW软件建立实车仿真拓扑,对部分TSN协议不同场景分别进行仿真;对目标流量经过的主要链路添加干扰流量,按照链路总带宽的20%、40%、60%、80%添加干扰;在Qbv整型下,对比制动踏板传感器流量和制动踏板执行器流量的最差端到端时延,旨在验证TSN协议对车载以太网延时的影响。

## 1 主要协议介绍

TSN是一系列标准,TSN协议族(见图1)非常庞大,也非常灵活,可以按需求选择。它从时间同步、延迟、可靠性、资源管理4个方面考虑扩展传统以太网标准,以满足不同系统在时效性方面的需求,本章介绍主要的TSN协议内容。

TSN网络功能				
时间	调度	容错	时延	安全
同步	计划安排	错误处理	确定转发	规则
<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1AS (gPTP)</li> <li>802.1AS-2020</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1Qav</li> <li>802.1Qbv</li> <li>802.1Qch</li> <li>802.1Qcr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1CB(FRER)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1Qbu</li> <li>802.3br</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1Qci (FSFP)</li> </ul>
TSN网络管理				
<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1Qcc (SRP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1Qcp (YANG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1Qcw/cx (YANG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>802.1DG</li> </ul>	

图1 TSN协议族

### 1.1 IEEE 802.1AS

时间敏感应用的定时和同步(IEEE 802.1AS)通常被称为广义的精确时间协议(generalized Precision Time Protocol, gPTP)。最新版IEEE 802.1AS-2020取代了2011年发布的IEEE801.AS-2011。该协议的主要作用是实现高精度时钟同步和主时钟备份,确保连接在网络中的各个设备节点时钟同步,并达到 $\mu\text{s}$ 级甚至 $\text{ns}$ 级精度。汽车领域典型的应用场景为:雷达、激光雷达、超声波、摄像头等环境感知传感器数据融合;不同执行部件间的步调协调;前后排主机音视频同步。

IEEE 801.1 AS-2011的主要规范如下:

- (1)只支持一个时间域;
- (2)传输:gPTP假设通信是在2层完成;
- (3)单一链路延迟(Propagation delay, Pdelay)机制

旨在对等连接(Peer-to-Peer, P2P);

(4)不允许使用精确时间协议中继(Precision Time Protocol relays, PTP relays):网络中主端口(Master)和从端口(Slave)之间所有的节点都必须具备精确时间同步协议(Precision Time Protocol, PTP);

(5)同步是硬性要求;

(6)时间戳分辨率必须 $\geq 40\text{ ns}$ 。

IEEE 801.1 AS中的可选配置项和规范旨在实现网络中规定的性能,当传输过程被分成6个或更少的时间感知系统时,网络中各节点的同步精度能达到 $1\mu\text{s}$ 之内。

IEEE 802.1AS-2020相比于IEEE 802.1AS-2011有很多增强的规范,其中最重要的新规范如下:

(1)支持多个时间域;

(2)不需要最佳主时钟算法(Best Master Clock Algorithm, BMCA),可以选择静态配置Master,Slave。

只要不使用这些新的增强规范,IEEE 802.1AS-2020就可以兼容IEEE 801.1 AS-2011。

### 1.2 IEEE 802.1Qav

IEEE 802.1Qav为时间敏感流的转发和排队增强协议,其定义了一个利用优先级、基于“漏桶”信用公平排队的流量整形器。IEEE 802.1Qav第一次发布在2009年,随后被合并到IEEE 802.1Q-2014中。之后在IEEE 802.1Qbv中关于流量调度的增强(Enhancements for Scheduled Traffic, EST)的相关内容中,对IEEE802.1Qav做了进一步修订,并将其合并到IEEE 802.1Q-2018中。

由于流量突发经常发生在出现拥塞的网桥端口和终端网络端口上,所以需要使用IEEE 802.1Qav协议。终端网络端口利用流量突发的方式达到可能的最高数据吞吐量。这赋予了终端网络较好的性能,但是流量突发可能是一个网络中(对网桥而言)发生的最坏流量情况。单一来源的流量突发不一定造成问题,但是同一时间多个来源的流量突发造成的拥塞将成为问题。如果网桥设备中出现拥塞,就会出现数据包丢失的情况。近年来,网桥通过数据重传的方式来解决数据包丢失的问题。然而,数据重传不能满足低时延和保证传输到达的需求。通过增加一个网桥的存储空间来提高其缓存能力也并不可取,因为其只能解决特定网络的配置问题,无法解决根本问题。如图2所示,在通过以上方法解决网络配置问题的网络中增加一条额外的数据流,缓存容量可能不再满足要求,同时额外的存储空间也会增加时延。IEEE 802.1Qav队列传输见图3。

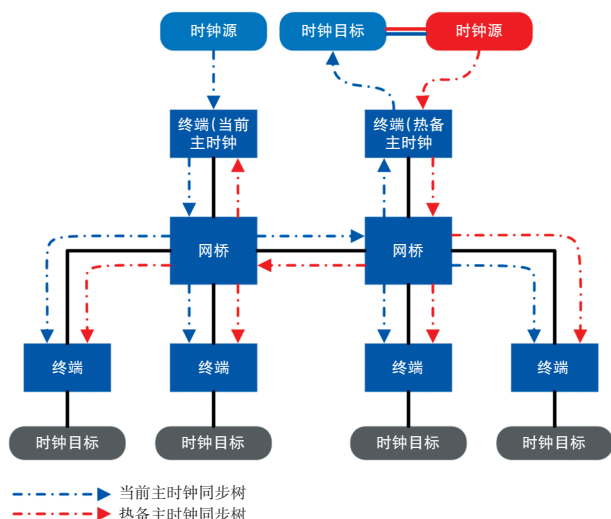


图2 时钟同步拓扑示意

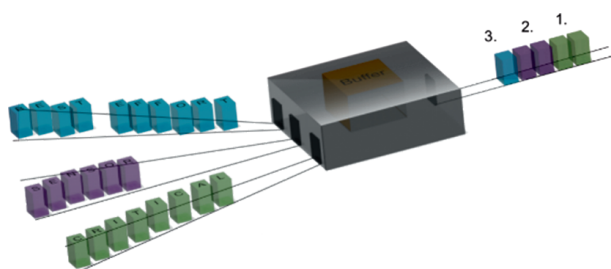


图3 IEEE Qav 队列传输示意

基于信用的整形器(Credit Based Shaper, CBS)通过抑制硬件上的流量突发,解决了在网络拥塞点和网卡处的丢包问题。它可以在划分流量等级的基础上进行配置,对于不支持CBS的队列上的数据流,会按它们原来的方式正常发送;对于支持CBS的队列上的数据流,会自动消除流量突发,而不需要对优化的网卡驱动器或者网桥的排队在硬件上做出任何改变。这使突发性的流量得以平滑,并且使“尽力而为(Best-Effort)”流量的传输不会产生明显中断,即高优先级的流量不完全扼制那些低优先级的Best-Effort流量。简单来说,CBS用于平滑流量并在时间上均匀分发数据包。否则,大量的数据包或者突发的流量会造成缓冲区溢出。可使用CBS的场景如下:

(1) 音视频或其他类似的应用;

(2) AVB网桥的流量整形器:音视频流量优先于Best-Effort流量进行转发,使用服务质量(Quality of Service, QoS)参数的AVB流量传输;

(3) 常规流量突发的平滑处理;

(4) 提供良好的QoS保证,配置复杂度低的网络。

### 1.3 IEEE 802.1Qbv

IEEE 802.1Qbv为计划流量的增强协议,第一次发布于2015年,随后被合并到桥接网络整形器标准

IEEE 802.1Q-2018中。严格优先级整形器(IEEE 802.1p)和基于信用的整形器(IEEE 802.1Qav)的共同缺点是它们不能严格保证在所有应用中具有确定性的低时延。为了解决该问题并完成理论上可能的最低时延,时间感知整形器(IEEE 802.1Qbv)被开发出来。IEEE 802.1Qbv整形器最好在有周期性数据发送的应用中工作,其中关键的传感器数据应该在固定周期的固定时间间隔内发送和处理,以达到非常低和确定性的时延,IEEE 802.1Qbv门控调度见图4。

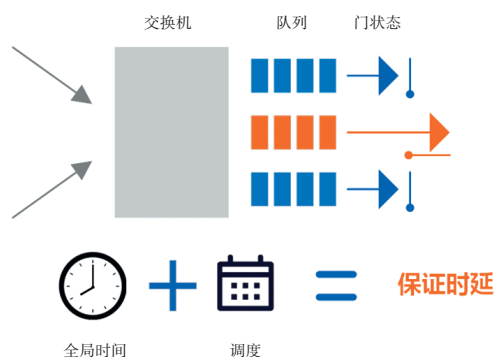


图4 IEEE Qbv 门控调度示意

IEEE 802.1Qbv通过在关键流计划出去端口期间,确保端口处于空闲状态,从而将时延最小化,保证时间关键流的最小时延。因为关键流可以在计划时间精确地发送数据,且确保端口在这个时间点不会发送其他任何数据(比如一个最大干扰帧)。数据包发送时间是通过定义一个对每个流量等级(Traffic Class, TC)门的开/关时间表来确定。流量被引导到合适的流量等级上,以确保其在要求的时间发送。如果一个队列上的门是关闭的,其对应的TC就不能发送任何数据,当门是开放状态时TC才能发送数据。

为了确保IEEE 802.1Qbv正常工作,网络中的传输设备需要具备“时间感知”能力,也就是说,传输设备需要运行某种形式的精确时间协议(IEEE 802.1AS)来同步时间。除此之外,在支持计划流量的网络中,每个结点的门开/关时间表都必须配置在网络中的传输设备上。

IEEE 802.1Qbv使用一个门驱动器机制(图5),根据一个网桥上每个端口已知的、商定的时间表来进行开和关的操作。门控列表(Gate Control List, GCL)包含门控条目(Gate Control Entries, GCEs),这些门控条目指明哪个队列现在是开门状态并且有资格发送数据。

根据GCL中的GCEs和每个队列的传输选择算法来发送帧。每个单独的队列都有自己的传输选择算法,比如,严格优先级或者基于信用的整形器。

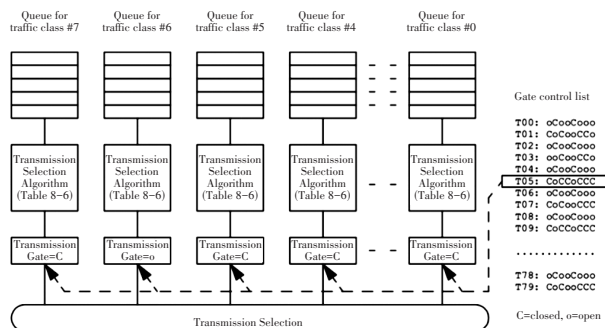


图5 IEEE Qbv 门控调度队列原理

### 1.4 IEEE 802.1Qci

IEEE 802.1Qci 协议包含单流过滤和控制策略 (Per-Stream Filtering and Policing, PSFP), 第一次发布时间为 2017 年, 随后被合并到用于网桥和桥接网络的协议 IEEE 802.1Q-2018 中。

如图 6 所示, IEEE 802.1Qci 通过对单一通信流量进行过滤和控制, 以提升网络健壮性。防止出现由于故障或拒绝服务 (Denial of Service, DoS) 攻击造成的流量过载, 对网桥和接收终端的正常工作带来的影响。PSFP 主要包含 3 部分: 流过滤器、门控机制和流量计。流过滤器对于符合规则且具有特定流标识和优先级的报文准予通过, 对于不符合规则的流量采取控制策略, 比如带宽限制规则会限制超出带宽的流量。而流量计根据预定义的带宽信息计量每个流量。

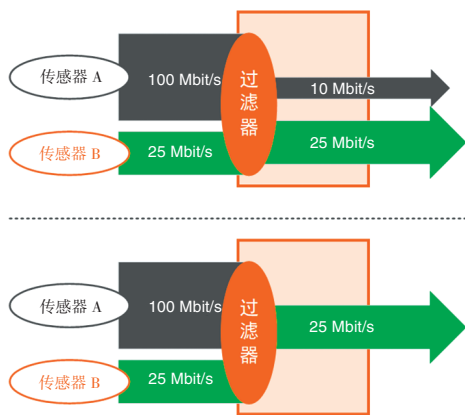


图6 IEEE Qci 流过滤控制原理

为了解决“胡言傻瓜(Babbling Idiot)”的问题, 需要使用 IEEE 802.1Qci 协议中的 PSFP 策略。解决这一问题不仅可以有效地降低故障率, 同时能解决一些安全问题。一个故障的发送端或交换机发送流量太多, 或在错误时间发送, 会占用其他流的带宽, 导致这些流量带宽和时延无法得到保证, 引发故障。因此一个具有 Babbling Idiot 问题的节点, 会影响整个网络中的多个流, 进而影响整个网络。如图 7 所示, 网络设备 Talker 1 (红色路径) 为发送了过多数据的故障流。这

造成网络设备 Talker 2 (绿色路径) 超出带宽要求和时延保证。绿色路径的节点都没有故障, 但其传输的数据流却发生了故障。

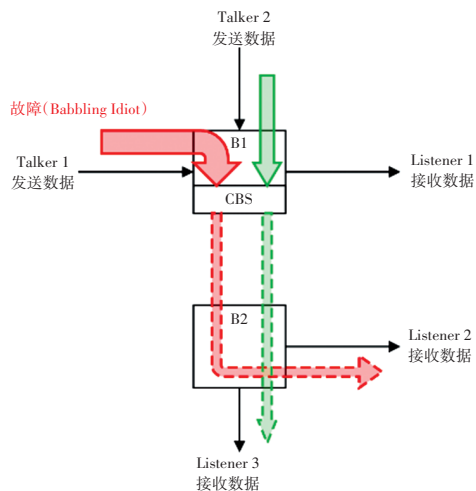
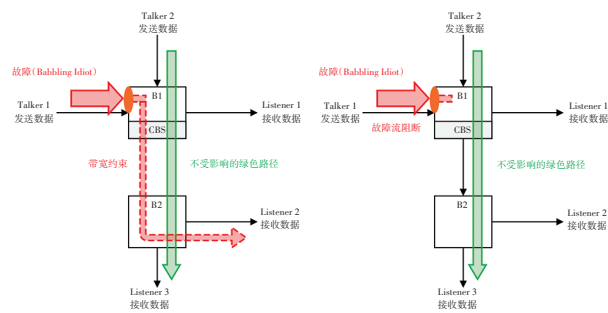


图7 未进行 IEEE Qci 流过滤

为了解决 Babbling Idiot 的问题, 流入控制策略引入了能够关断或限制超出带宽数据量的过滤器。如图 8a 所示, Talker 1 的带宽被限制, 使得绿色路径下传输的数据流能遵循其带宽要求和时延保证。

如图 8b 所示, 没有采用限制 Talker 1 传输速率的方式, 而是完全关闭 Talker 1, 同样的绿色路径下传输的数据流能遵循其带宽要求和时延保证。



(a) 进行 IEEE 802.1Qci 流过滤-限速 (b) 进行 IEEE 802.1Qci 流过滤-限流

图8 进行 IEEE 802.1Qci 流过滤

PSFP 不适合 Best Effort 流量, 因为 Best Effort 流量没有确定性, 所以如何界定发送 Best Effort 流量节点是否故障是未知的。超出带宽限制的 Best Effort 流量会在流出端口时被丢弃, 因此不会对其他流量类造成影响。PSFP 适用于以下流量:

- (1) AVB 预留的流量 (Class A&B, Qav);
- (2) 灵活控制的流量类 (如: 蠕动整形器, 基于紧急性的调度器, 发送速率限制整形器);
- (3) 调度性流量类 (Qbv)。

## 1.5 IEEE 802.1CB

IEEE 802.1CB 是汽车以太网冗余协议,其主要目标是通过确保数据完整性来提供功能安全。此项必须保持在 TSN 网络的严格延迟和抖动容限内。

一些典型的失效情况如下:

(1)设备失效:传感器因老化或环境原因(如热或水污染)而损坏或出现故障;

(2)链路失效:线缆破损或短路;

(3)接插件失效:因机械应力或接触腐蚀而脱节。

在有严格时序和功能安全需求的 TSN 网络中,以下目标必须通过冗余机制来满足:零丢包、保证端到端时延、低抖动。

IEEE 802.1CB 的基本工作原理是在源头对每个数据包进行编序和复制。多个副本通过多条路线发送到目的地。然后在目的地或中继站消除重复,以减少网络过载,也就是将一个流划分为多个链接的成员流,因此原始流被称为复合流。最后重新加入成员流并消除重复,以提供重构的原始流,见图 9。

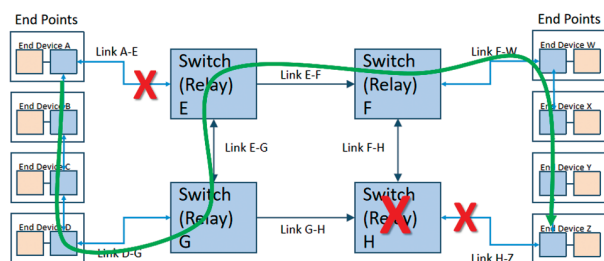


图9 IEEE 802.1CB原理

如图 10 所示的网络,有 7 种可能的单链路故障和 21 种可能的双链路故障。如果 7 条链路中的任何一条出现故障,并且在 21 条可能的双链路故障路径中的 16 条中出现故障,网络仍能够传输数据。

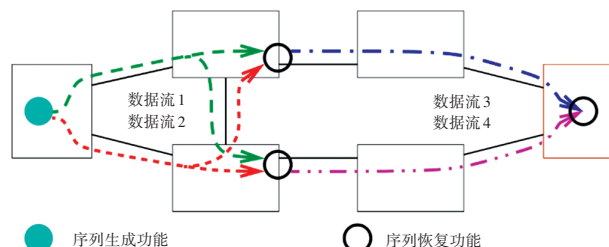


图10 IEEE 802.1CB故障失效分析

IEEE 802.1CB 针对传输错误提供了保护。通过预防性复制帧并通过不同路径将冗余副本传输到目的地来解决这些问题。

## 2 车载以太网仿真验证

使用 RTaW 软件,针对部分 TSN 协议进行仿真,建立 3 个命名为 HPC1、HPC2、HPC3 的控制器,这 3 个控制器与各交换机之间链路为千兆以太网,各电子控制单元 (Electromechanical Control Unit, ECU) 与交换机之间链路为百兆以太网。

为了综合考虑不同整形方式、干扰流量对目标流量的影响,分 4 种情况分析。

(1)仅有目标流量,分析目标流量最差情况下的端到端时延,以及目标流量之间是否存在影响。

(2)干扰流量与目标流量无优先级区别,分析目标流量与干扰流量具有相同优先级时,最差情况下的端到端时延。

(3)目标流量具有较高优先级,分析采用严格优先级整形时,目标流量及干扰流量最差情况下的端到端时延变化。

(4)目标流量采用 TSN 整形,分析对目标流量采用适合的 TSN 整形时,目标流量最差情况下的端到端时延变化。

在上述情况中,干扰流量将按照链路总带宽的 20%、40%、60%、80% 的比例逐步增加。

### 2.1 仅有目标流量

使用 RTaW 软件进行仿真时,所有目标流量均在同一优先级时,最差端到端时延分析见图 11。

Name	Priority	MinDistance	MaxSize	Sender	Receiver	BCTT	Min	Average	Max	WCTT	Constraint	Slack	Jitter
Video	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU2	ECU4	9.002 ms				0.199 ms	10 ms	0.801 ms	0.197 ms
Video	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU2	ECU5	9.002 ms				0.199 ms	10 ms	0.801 ms	0.197 ms
Camera	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	HPC3	8.929 ms				0.035 ms	10 ms	0.965 ms	0.106 ms
Camera	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	HPC3	8.935 ms				0.080 ms	10 ms	0.940 ms	0.125 ms
B_Sensor	1	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms				0.053 ms	0.5 ms	0.917 ms	0.077 ms
B_Sensor	1	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms				0.108 ms	0.5 ms	0.392 ms	0.102 ms
B_Actuator	1	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms				0.039 ms	0.5 ms	0.361 ms	0.033 ms
B_Actuator	1	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms				0.105 ms	0.5 ms	0.395 ms	0.099 ms
Audio	1	0.125 ms	82 byte	ECU2	ECU1	0.014 ms				0.036 ms	2 ms	0.930 ms	0.022 ms
Audio	1	0.125 ms	82 byte	ECU2	ECU3	0.014 ms				0.096 ms	2 ms	0.906 ms	0.892 ms

图11 仅有目标流量仿真结果

(1)从仿真结果可以看出当目标流量均处于同一优先级时,目标流量之间会出现干扰。

(2)以音、视频流为例,由于音、视频流均由 ECU2 发送,因此最差情况下音、视频流同时发送数据,此时对于音频而言将引入视频流一个周期内最大总长度的时延,即  $133 \times 842 \times 8 / 100 = 8958.88 \mu\text{s}$ ,所以应当对不同类型的目标流量设置不同优先级。

### 2.2 干扰流量与目标流量无优先级区别

在同一优先级下,对目标流量经过的主要链路添加干扰流量,按照链路总带宽的 20%、40%、60%、80%

添加干扰。

以干扰流量占主要链路带宽80%为例,软件仿真结果分析见图12。

Name	Priority	MinDistance	MacSize	Sender	Receiver	BCTI	Min	Average	Max	WCTI	Constraint	Slack	Jitter
Video	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU2	ECU4	9.002 ms	8.972 ms	10 ms	24.972 ms	10 ms	24.972 ms	25.770 ms	
Video	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU2	ECU5	9.002 ms	8.972 ms	10 ms	24.972 ms	10 ms	24.972 ms	25.770 ms	
Camera	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	HPC3	8.929 ms	8.903 ms	10 ms	7.063 ms	10 ms	-7.063 ms	8.134 ms	
Camera	1	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	HPC3	8.935 ms	8.909 ms	10 ms	7.070 ms	10 ms	-7.070 ms	8.135 ms	
B_Sensor	1	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms	0.111 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	8.105 ms	
B_Actuator	1	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms	0.111 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	8.112 ms	
B_Actuator	1	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms	0.105 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.039 ms	
B_Actuator	1	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms	0.119 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	16.129 ms	
Audio	1	0.125 ms	82 byte	ECU2	ECU1	0.014 ms	0.125 ms	2 ms	0.125 ms	2 ms	-1.875 ms	18.000 ms	
Audio	1	0.125 ms	82 byte	ECU2	ECU1	0.014 ms	0.125 ms	2 ms	0.125 ms	2 ms	-1.875 ms	8.902 ms	
Interrupt_BE87	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock7	7.788 ms	8.031 ms	10 ms	1.999 ms	10 ms	1.999 ms	0.243 ms	
Interrupt_BE45	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock5	7.788 ms	8.031 ms	10 ms	1.999 ms	10 ms	1.999 ms	0.256 ms	
Interrupt_BE52	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock3	Clock2	7.788 ms	8.030 ms	10 ms	1.970 ms	10 ms	1.970 ms	0.242 ms	

图12 干扰流量与目标流量无优先级区别仿真结果

(1)从仿真结果可以看出,干扰流量与目标流量处于同一优先级时,会极大地影响目标流量的端到端时延,特别是对于带宽需求高的流量。

(2)以视频流为例,由于在链路 Bridge3→Bridge2以及 Bridge4→Bridge5,各添加了80%带宽的干扰流量,在此最差情况下,视频流将引入干扰流量一个周期内最大总长度的时延,即  $649 \times 1542 \times 8 / 1\ 000 = 8\ 006.064\ \mu\text{s}$ 。

## 2.3 目标流量具有较高优先级

使用严格优先级区分目标流量和干扰流量,干扰流量仍以链路总带宽的20%、40%、60%、80%添加以干扰流量占主要链路80%带宽为例软件仿真结果分析见图13。

Name	Priority	MinDistance	MacSize	Sender	Receiver	BCTI	Min	Average	Max	WCTI	Constraint	Slack	Jitter
B_Sensor	7	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms	0.119 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.075 ms	
B_Actuator	7	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms	0.119 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.033 ms	
B_Actuator	7	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms	0.111 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.105 ms	
B_Sensor	7	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms	0.097 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.091 ms	
Camera	6	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	HPC3	8.929 ms	8.909 ms	10 ms	8.903 ms	10 ms	8.903 ms	0.120 ms	
Camera	6	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	HPC3	8.935 ms	8.915 ms	10 ms	8.929 ms	10 ms	8.929 ms	0.126 ms	
Audio	3	0.125 ms	82 byte	ECU2	ECU1	0.014 ms	0.127 ms	2 ms	0.125 ms	2 ms	-1.875 ms	0.113 ms	
Audio	3	0.125 ms	82 byte	ECU2	ECU3	0.014 ms	0.099 ms	2 ms	0.125 ms	2 ms	-1.875 ms	0.085 ms	
Video	2	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	ECU4	9.002 ms	8.970 ms	10 ms	8.921 ms	10 ms	8.921 ms	0.877 ms	
Video	2	33.333 ms	133 x 822 byte	ECU8	ECU5	9.002 ms	8.970 ms	10 ms	8.921 ms	10 ms	8.921 ms	0.877 ms	
Interrupt_BE32	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock2	7.788 ms	8.977 ms	10 ms	8.925 ms	10 ms	8.925 ms	1.189 ms	
Interrupt_BE45	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock5	7.788 ms	8.978 ms	10 ms	8.982 ms	10 ms	8.982 ms	1.130 ms	
Interrupt_BE87	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock7	7.788 ms	8.919 ms	10 ms	1.081 ms	10 ms	1.081 ms	1.131 ms	

图13 目标流量具有较高优先级仿真结果

(1)从仿真结果可以看出,设置目标流量拥有更高优先级后,继续增加干扰流量的带宽至总带宽60%,最差情况下目标流量的端到端时延不会发生改变。

(2)分析最差情况下干扰流量的端到端时延,以 Bridge3和 Bridge2之间的 Interrupt\_BE32为例,可以计算出基本的传输时延为  $649 \times 1\ 542 \times 8 / 1\ 000 = 8\ 006.064\ \mu\text{s}$ ,再考虑音、视频流对干扰流量的影响,基本与软件仿真结果  $8\ 977\ \mu\text{s}$ 一致,可以看出这一影响随着干扰流量的带宽增加而被放大。设置了严格优先级后,较低优先级的干扰流量不会影响到高优先级的目标流量,

但是随着使用带宽的增加,Best-Effort 流量的端到端延时成比例增加。

## 2.4 目标流量采用TSN整形

对高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System,ADAS)控制流量设置时间意识整形器(Time Awareness Shaper, TAS)整形器(IEEE 802.1Qbv),对音、视频流及摄像头数据流设置CBS整形器(IEEE 802.1Qav),同时采用多时钟域的时间同步机制(IEEE 802.1AS),由于ADAS控制流量存在冗余路径,因此原设计文档中TAS整形器根据冗余路径进行设计,同时设置主路径和冗余路径的门控列表。

以干扰流量占主要链路80%带宽为例,软件仿真结果分析见图14所示。

Name	Priority	MinDistance	MacSize	Sender	Receiver	BCTI	Min	Average	Max	WCTI	Constraint	Slack	Jitter	Losses	Route
Actuator	7	10 ms	64 byte	HPC3	ECU6	0.006 ms	0.119 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.075 ms		HPC3   B	
Sensor	7	10 ms	64 byte	ECU7	HPC3	0.006 ms	0.111 ms	0.5 ms	0.202 ms	0.5 ms	-0.202 ms	0.102 ms		ECU7   B	
Camera	6	0.25 ms	822 byte	ECU8	HPC3	0.091 ms	0.277 ms	10 ms	0.277 ms	10 ms	0.277 ms	0.186 ms		ECU8   B	
BE54	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock4	7.788 ms	8.970 ms	10 ms	8.921 ms	10 ms	8.921 ms	0.992 ms		Bridge5	
BE87	1	10 ms	649 x 1522 byte	Clock4	Clock7	7.788 ms	8.978 ms	10 ms	8.982 ms	10 ms	8.982 ms	0.735 ms		Bridge6	

图14 目标流量采用TSN整形仿真结果

从仿真结果可以看出,在IEEE 802.1Qbv整形器下,制动踏板传感器流量和制动踏板执行器流量的最差端到端时延分别为  $71\ \mu\text{s}$ 和  $87\ \mu\text{s}$ ,均接近无干扰情况下的软件仿真值  $70\ \mu\text{s}$ 和  $86\ \mu\text{s}$ ,不会受到干扰流量增加的影响,可见IEEE 802.1Qbv门控列表设计有效保护了目标流量的传输。此外,IEEE 802.1Qav整形器为摄像头数据流量预留足够的带宽,也保证其传输不受干扰流量增加的影响。

## 3 结束语

时间敏感以太网是解决智能网联汽车以以太网为骨干网时,传输时间敏感类数据的一项有效的技术,也是未来汽车发展中一种必然趋势,这将对传统汽车的整车网络架构设计和实现产生颠覆性的影响。本文描述了时间敏感网络的主要协议族的技术特点及典型应用场景的考量。通过一个基于Zonal架构的网络,进行仿真验证,证明了时间敏感以太网对传输队列延时的保证。时间敏感以太网将在音视频传输、高等级自动驾驶、安全备份等方面发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 邹渊,孙文景,张旭东,等.面向时间敏感网络的车载以太网网络架构多目标优化[J].汽车工程,2023,45(5):746-758.
- [2] 杨浩,秦贵和,于赫,等.车载时间敏感网络技术综述[J].

- 计算机应用与软件, 2015, 32(8): 1-5+10.
- [3] 李群, 唐风敏, 杨光, 等. 一种车载以太网TSN时间敏感网络测试方法[C]// 2022 中国汽车工程学会年会论文集(4), 2022: 7.
- [4] IEEE. 802.1AS-2011-IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks[S/OL]. (2011-03-30) [2023-11-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5741898>.
- [5] Avnu Automotive Technical Working Group. Automotive Ethernet AVB Functional and Interoperability Specification [EB/OL]. (2019-11-07)[2023-11-15]. [https://avnu.org/wp-content/uploads/2014/05/Auto-Ethernet-AVB-Func-Interop-Spec\\_v1.6.pdf](https://avnu.org/wp-content/uploads/2014/05/Auto-Ethernet-AVB-Func-Interop-Spec_v1.6.pdf).
- [6] AVNU. 802.1AS Recovered Clock Quality Testing[S/OL]. (2016-10-18) [2023-11-10]. [https://avnu.org/wp-content/uploads/2014/05/Avnu-Testability-802.1AS-Recovered-Clock-Quality-Measurement-1.0\\_Approved-for-Public-Release.pdf](https://avnu.org/wp-content/uploads/2014/05/Avnu-Testability-802.1AS-Recovered-Clock-Quality-Measurement-1.0_Approved-for-Public-Release.pdf).
- [7] AVNU ALLIANCE. Best Practice Stream Registration Protocol[S/OL]. (2014-11-03) [2023-11-10]. [https://avnu.org/wp-content/uploads/2014/05/AVnu\\_Stream\\_Reservation-Protocol-v1.pdf#:~:text=Stream%20Reservation%20Protocol%20%28SRP%29%20is%20an%20amendment%20to,of%20Service%20%28QoS%29%20in%20Local%20Area%20Networks%20%28LANs%29](https://avnu.org/wp-content/uploads/2014/05/AVnu_Stream_Reservation-Protocol-v1.pdf#:~:text=Stream%20Reservation%20Protocol%20%28SRP%29%20is%20an%20amendment%20to,of%20Service%20%28QoS%29%20in%20Local%20Area%20Networks%20%28LANs%29).
- [8] IEEE. 802.1BA-2021-IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Audio Video Bridging (AVB) Systems [S/OL]. (2021-12-17) [2023-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9653970>.
- [9] IEEE. 802.1CB-Frame Replication and Elimination for Reliability [S/OL]. (2017-08-31) [2023-11-10]. <https://grouper.ieee.org/groups/802/1/pages/802.1cb.html>.
- [10] IEEE. 802.1Q-2022-IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Bridges and Bridged Networks [S/OL]. (2022-12-22) [2023-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10004498>.
- [11] IEEE. 802.1Qav-2009-IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams [S/OL]. (2010-01-05) [2023-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5375704>.
- [12] IEEE. 802.1Qbv-2015 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Bridges and Bridged Networks - Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic[S/OL]. (2016-03-18) [2023-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8613095>.
- [13] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Bridges and Bridged Networks Amendment: Per-Stream Filtering and Policing[S/OL]. (2011-03-30) [2024-05-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5741898>.
- [14] 许方敏, 伍丽娇, 杨帆, 等. 时间敏感网络(TSN)及无线TSN技术[J]. 电信科学, 2020, 36(8): 11.
- [15] 丛培壮, 田野, 龚向阳, 等. 时间敏感网络的关键协议及应用场景综述[J]. 电信科学, 2019, 35(10): 12.
- [16] 徐骁麟. 时间敏感网络技术及其在工业互联网中的应用[J]. 电信网技术, 2018(5): 1-5.
- [17] 李英. 时间敏感网络(TSN)及无线TSN技术研究[J]. 数字通信世界, 2021 (5): 88-89.
- [18] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.

(责任编辑 明慧)