



专题：数据网络技术与应用

时间敏感网络的关键协议及应用场景综述

丛培壮, 田野, 龚向阳, 阙喜戎, 王文东

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 随着信息技术的发展, 以物与物作为通信主体的场景需求不断增加, 如工厂自动化控制、自动驾驶等, 这类通信对数据传输时延的要求远远超出了传统以太网的可控范围, 时间敏感网络应运而生。时间敏感网络是以标准以太网为网络基础, 提供确定性信息传输的标准化技术, 通过时间感知的调度机制最小化抖动, 并为时间敏感应用提供可靠的数据传输保障。通过对时间敏感网络相关国际标准的说明, 介绍了其核心特性及机制, 并在车载网络、工业互联网、航空电子网络和移动前传网络等应用场景进行了分析和研究。

关键词: 时间敏感网络; 低时延网络; 确定性传输; 应用场景

中图分类号: TN915.03

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019227

A survey of key protocol and application scenario of time-sensitive network

CONG Peizhuang, TIAN Ye, GONG Xiangyang, QUE Xirong, WANG Wendong

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: With the development of information technology, the demand for scenarios with objects as the main body of communication is increasing, such as factory automation control, automatic driving, etc. The time delay requirements of such communication for data transmission far exceed the controllable range of traditional ethernet, then time-sensitive network have emerged. Time-sensitive network is a standardized technology that provides deterministic information transmission based on standard ethernet. It minimizes jitter through time-aware scheduling mechanism and provides reliable guarantee of data transmission for time-sensitive applications. The core characteristics and mechanism of time-sensitive network were introduced through the description of IEEE standards and its application scenarios were analyzed in vehicle network, industrial internet, aircraft data network and mobile fronthaul network.

Key words: time-sensitive network, low latency network, deterministic transmission, application scenario

1 引言

在传统音/视频设备传输网络中, 音频、视频

信号使用独立的物理链路进行点对点的传输, 这导致设备的线路复杂度高, 此外随着数字音/视频的发展, 需要传输的音/视频数据的质量要求越来越

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-10-10



越高,传统的音/视频传输标准已经难以满足使用需求。自1982年12月IEEE 802.3标准发布以来,以太网技术在30多年的时间内有了突破性发展,在有线网络中逐渐占据主导地位。据统计以太网占据整个局域网市场的85%,并且基于以太网的网络设备如网桥、集线器、交换机和路由器等部署广度和深度极高,于是IEEE组织开始考虑如何基于以太网技术进行音/视频数据传输。

传统以太网的设计主要是为了解决非实时数据的可靠性传输,并没有涉及过多的顺序和时延等需求。虽然传统二层网络已经引入了优先级机制,三层网络也已内置了服务质量(quality of service, QoS)机制,但实时流量和传统TCP流量的资源竞争导致时延和抖动过多,致使传统的以太网不能满足实时数据的传输需求^[1]。

因此,IEEE组织于2005年成立AVB(Audio Video Bridging,音/视频桥)小组来专门研究并制定相关协议来解决对应问题,欲对传统以太网进行功能扩充,以建立高质量、低抖动、低时延、时间同步的以太网网络,AVB协议应运而生。AVB协议是对传统以太网协议的改进,在保持完全兼容现有以太网体系的基础上,对其功能进行扩展,满足了音/视频传输中实时性、低时延、去抖动的需求。AVB网络建立在速度为100 Mbit/s以上的全双工以太网链路上,形成AVB“云”,能够提供同步化与低时延的实时流媒体服务。在AVB网络中,AVB交换机和终端设备能够保障传输时延,而IEEE 802.1AB——LLDP(link layer discovery protocol,逻辑链路发现协议)则可以用于设备间交换支持AVB的协议信息。同时AVB网络可以兼容传统以太网,连接到传统的交换机、集线器和终端设备,能够提供高质量的流媒体服务。

2012年IEEE 802.1任务组正式将AVB更名为TSN(time-sensitive network,时间敏感网络),当前所提及的AVB更像是TSN的一个应用。目前TSN应用于专业音/视频(ProAV)、汽车控制、

商用电子等领域,但在未来更为广泛的应用场景是需要实时监控或实时反馈的工业领域,如机器人工业、深海石油钻井等。全球的工业已经进入了物联网(internet of things, IoT)时代,TSN将会极大提高物联网的互联效率。

2 时间敏感网络概述

随着信息技术的飞速发展,通信主体不再仅限于人与人或人与物,以物与物为实体的通信业务日趋增加。面对通信主体的演进,各业务对时间的敏感程度也愈加严格,实时以太网的概念应运而生,在此概念范围内的应用场景都将确定性时延作为基本需求,如工厂自动化控制、自动驾驶和电力自动化等。在上述领域,对数据流传输的时延要求远远超出了传统以太网的可控范围,为满足传输需求许多行业提出如HSE、Profinet、EtherCAT、TCnet等标准并得以应用^[2-4],但遗憾的是不同协议之间的兼容性低,阻碍了实时网络的发展。为解决这一问题,IEEE 802工作组提出了时间敏感网络的概念,以构建一个统一的数据链路层协议,通过标准化使其在不同的领域都可以同构运行,提供实时数据的传输保障^[5]。

总体来看,时间敏感网络是以标准以太网为网络基础、提供确定性信息传输的标准化技术,通过时间感知的调度机制最小化抖动,并为时间敏感应用提供可靠的数据传输保障。时间敏感网络是一种二层网络技术,其数据转发依靠以太网数据帧的分组头部信息,数据帧的负载信息不受上层网络协议限制,所以时间敏感网络可以根据需求部署在任何使用以太网技术的网络环境中。

顾名思义,时间是时间敏感网络的主要专注点,其旨在提供一种机制来确保信息能够在确定的、可预测的时间范围内完成源目的节点之间的传输。详细来讲,TSN具有以下目标:针对交换网络的报文时延得到保障;时间敏感数据流和非时间敏感数据流可以混合传输,并且非时间

敏感数据流的传输不会影响时间敏感数据流的传输时延；多种高层协议可以共享网络基础设施，即多种协议的负载可以同时在网络中传输；网络错误可以通过在源头获得精确的信息，从而快速地确诊和修复。

3 时间敏感网络的协议及说明

TSN 处于 OSI 7 层模型的数据链路层，以处理数据的调度、以太网数据帧的封装与分组任务，其网络架构如图 1 所示。发送者的数据传输至接收者需要经过若干节点，其中每个节点都有对应的数据队列和同步时钟，而每个节点都根据分布式时钟进行时间同步计算，通过队列处理数据的优先级，包括快速通道方式和抢占机制等。

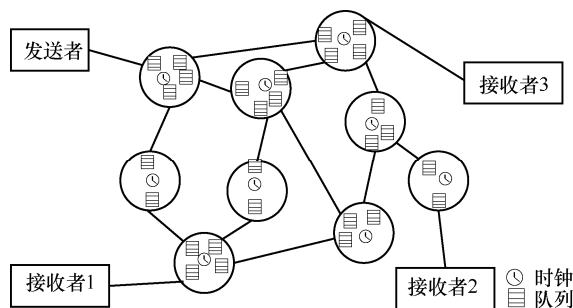


图1 TSN网络架构

下面从时间同步、调度和流量整形、流预留等方面对 TSN 及其相关的标准进行进一步的解释说明。

3.1 时间同步

传统的网络链路采用网络时间协议（network time protocol, NTP）来实现时间同步，虽然该协议已经得以广泛的应用和发展，但是其只能达到微秒（ms）级的时间精度，这对于当前所需要的纳秒（ns）级精度是远远不够的。

另一种常用的时间同步方法是使用全球定位系统（global position system, GPS），通过接收卫星发射的时间信息进行时间同步。虽然同步信号稳定、精度高，但是设备的安装和维护成本高，并且对使用环境要求苛刻，如在室内等有遮挡的

地方会影响同步效果。

TSN 使用 IEEE 802.1AS 广义精准时间同步协议，该协议基于 IEEE 1588V2 产生。IEEE1588，全称网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准，又称精确时间协议（precise time protocol, PTP），主要用于以太网和分布式网络的各节点的时钟同步^[6]。IEEE 1588V2 是该协议的第二个版本，其采用双向信道，授时精度为 100 ns，与传统时间同步技术相比具有费用低、使用场景广泛等明显优势。IEEE 802.1AS 并非 IP 路由的协议且完全基于二层网络，但是其工作模式与 PTP 协议保持一致，下面通过对 PTP 协议同步过程的介绍，说明时间同步的基本原理。

PTP 协议主要将报文分成事件报文和通用报文，其中事件报文在收发时需要记录精确时间戳，如同步报文（sync）和时延请求报文（delay_req），通用报文在收发时不需要记录精确时间戳，如跟随报文（follow_up）和时延请求响应报文（delay_resp）。此协议提出的时延响应机制报文收发流程如图 2 所示。

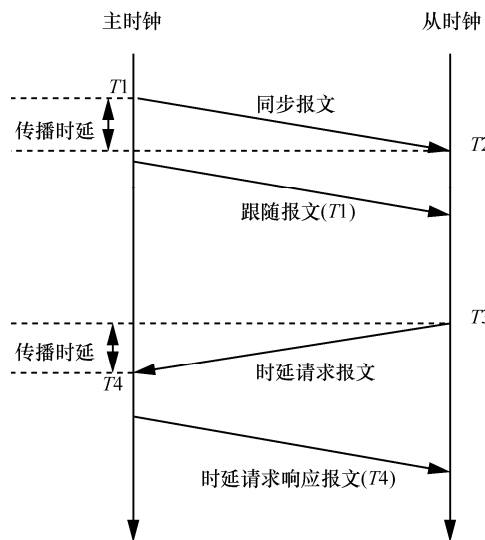


图2 时延响应机制报文收发流程

主时钟周期性地发送 sync 报文，并根据主时钟记录下精确发送时间 T_1 ，从时钟在接收到 sync 报文时记录到达时间 T_2 。PTP 可以通过两种机制



来让从时钟获取到 $T1$ 的值,一种是单同步时间机制, sync 报文里含有本报文发送的时间戳信息,从时钟通过解析报文获得 $T1$ 的值;另一种是两步同步机制, sync 报文中不包含时间戳信息,而是通过后继发送的 follow-up 把 $T1$ 的值传送给从时钟,即本例中采用的方法。两步同步机制具有较高的兼容性,在不支持给报文打时间戳的设备之间也可以正常使用。

从时钟发送 delay-req 报文,并记录发送时间 $T3$,主时钟记录下 delay-req 报文的到达时间 $T4$,然后把该时间信息通过 delay-resp 报文发送给从时钟。至此,从时钟就获得到了 $T1 \sim T4$ 4 个精确的收发时间。

假设传播路径一致,即两次的传播时延相等,则在此同步过程中满足:

$$T2 = T1 + T_Delay + E \quad (1)$$

$$T4 = T3 + T_Delay - E \quad (2)$$

其中, E 是从主时钟的偏差, T_Delay 是两节点之间的传播时延。根据式 (1) 和式 (2) 可得 T_Delay 和 E 分别为:

$$T_Delay = \frac{T2 - T1 + (T4 - T3)}{2} \quad (3)$$

$$E = \frac{T2 - T1 - (T4 - T3)}{2} \quad (4)$$

从时钟经过本地计算得到时间偏差 E 后,即可以通过修改本地时钟进行时间同步。

3.2 调度和流量整形

不同类别的流量对网络的可用带宽和端到端时延有不同的要求,调度和流量整形使得不同类别的流量在同一网络上得以共存。IEEE 802.1Q 标准中使用了 8 个不同级别的优先级,这些优先级分别用来标记网络流量的重要程度。在传统以太网交换中,如果一个交换机已经开始在其一个端口上传输以太网帧,即使是最高优先级的帧也必须在交换机的缓冲区内等待正在传输的帧传输完成。由于这种以太网交换机内的缓冲效应,端到

端传递时延的非确定性是无法避免的。

3.2.1 IEEE 802.1Qbv 门控制调度

在工业自动化和汽车环境中,可靠和及时的信息交付是必不可少的,为此 TSN 工作组在 IEEE 802.1Q 的基础上提出了 IEEE 802.1Qbv 标准^[7]。IEEE 802.1Qbv 标准中定义了时间感知调度器,旨在优化以太网帧的传输优先级,保证信息在规定时间内送达。时间感知调度的基本思想是采用时分多址 (time division multiple access, TDMA),将以太网的通信分为固定长度、重复的时间片,称为周期;每个周期又划分为多个更细粒度的时间片,称为时间槽。每个时间槽可以分配给 8 个以太网优先级中的一个或多个,即在特定时间段内形成了虚拟通信信道,使特定的实时数据能够在非实时数据负载中穿插传输,减小了其他突发或异常的发送请求对实时数据传输的影响。IEEE 802.1Qbv 标准约束下的通信设备需要时间同步,并且要配置相同的调度表,即所有的设备都了解每个时间槽应该发送什么优先级的流量帧。IEEE 802.1Qbv 调度示例如图 3 所示。

在该示例中,每个周期被分成两个时间槽,时间槽 1 规定只能传输优先级为 7 的流量,时间槽 2 可以传输其他优先级的流量,并且在时间槽 2 内流量的帧的发送将严格按照优先级来处理。

但是该种模式存在明显的缺陷,比如,假设在某周期时间槽 2 的某一个时间点传输的帧较大且传输过程不允许中断,即无法在该时间槽内传输完成,则会占用下一周期的时间槽 1。这就造成了类似传统以太网交换机中的缓冲效应,实时数据的传输可能会延迟甚至失败。为解决这一问题,TSN 工作组又在此基础上提出了保护带机制。带有保护带的 IEEE 802.1Qbv 如图 4 所示。

在每个周期结束前设置规定一个时间段,称之为保护带,通过这一操作来确保在周期切换中不存在有帧正在传输的现象。规定在保护带内,不允许有新的帧开始传输,但是在保护带前已经

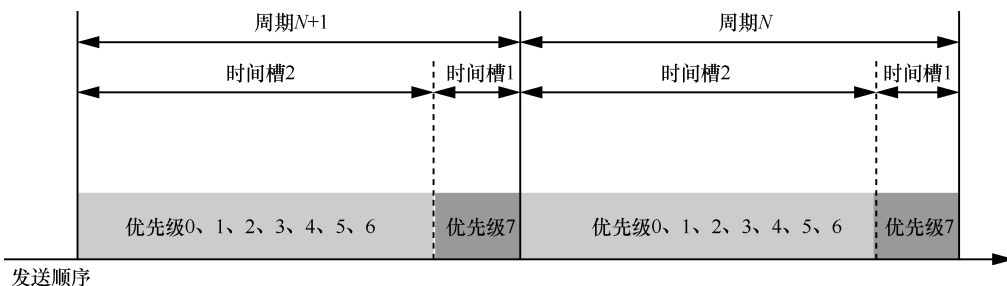


图3 IEEE 802.1Qbv 调度示例

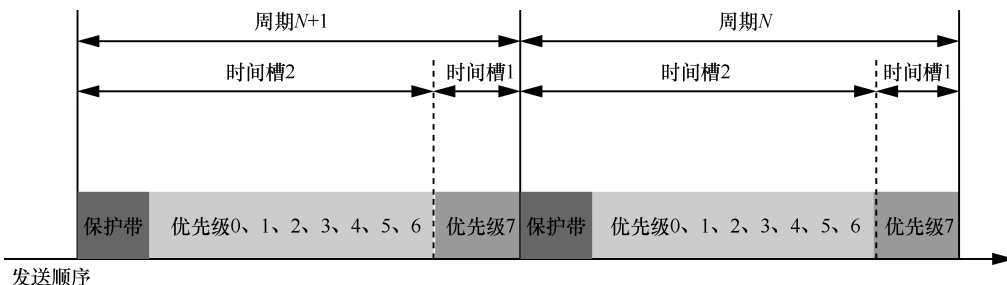


图4 带有保护带的 IEEE 802.1Qbv 调度示例

开始传输的帧可以在保护带内继续完成传输工作。如果端口无法确认下一帧的传输时间,则保护带的时长应足够覆盖当前链路中最长帧的传输时长。

3.2.2 IEEE 802.1Qbu 和 IEEE 802.3br 帧抢占功能

保护带机制保障了实时数据帧的传输不受其他流量的影响,但是不合适的保护带长度必定造成带宽浪费。为了进一步完善时间敏感网络的传输机制,IEEE 802.1Qbu^[8]和 IEEE 802.3br^[9]两个标准共同约定了帧抢占功能。其中,IEEE 802.1Qbu 主要面向传送设备提供了抢占接口及模块级别的定义,IEEE 802.3br 中规划了 Mac Merge 子层,定义了帧抢占的切片操作、切片还原以及验证等功能的具体流程。

在帧抢占中,时延要求敏感的帧称为高速帧(express),其余的帧称为低速帧或可抢占帧(preemptable),帧抢占的原理可类比于计算机操作系统中抢占式 CPU 调度。假设当线路中有低速帧正在传输时,一个高速帧提出传输请求,则首先需要判断当前状态下是否允许切片操作,如果允许切片,则在适当的位置中断低速帧的传输,

续接一个 MCRC 作为校验和,并把该低速帧已经传输的部分作为一个完整的以太网帧。在间隔一个间隔帧间隙(interval frame gap, IFG)后开始传输高速帧,待高速帧传输完成后,被中断的低速帧后半部分会被外加适当的前导码继续传输。接收端根据前导码来判断帧的类型,并根据前导码把分割的帧重新组装后才正式接收下来。抢占帧功能原理示例如图 5 所示。

图 5 中低速帧 1.1 和低速帧 1.2 是被中断分片的同一个低速帧的两部分负载,这是同一个低速帧被抢占一次的情况,只要满足抢占条件在恢复传输后仍可以继续被抢占。需要注意的是抢占不能嵌套,即抢占的高速帧不允许被其他高速帧抢占。

对于帧抢占机制还需要满足以下两个约束条件。

(1) 该项功能只能应用在全双工点对点的链路中。全双工是要求两端点必须都具有发送和接收的处理设备,而且在执行抢占之前确认两端是否都支持抢占功能,如有一端不支持,则另一端所有的待发送帧都被视为高速帧并从高速帧发送模块中发出;被切片的帧在继续被发送时没有添

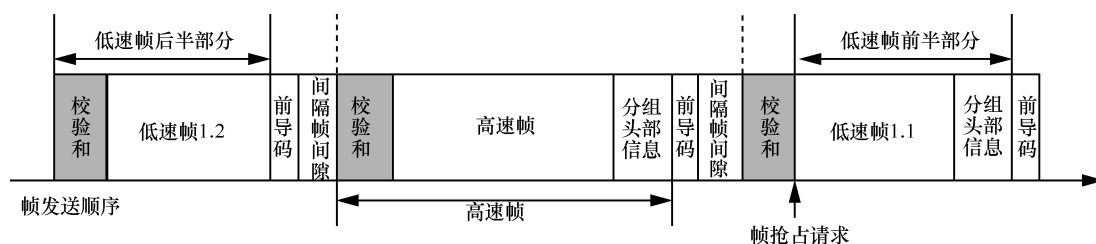


图5 抢占帧功能原理示意图

加源目的 MAC 地址, 所以必须满足点对点的传输条件。

(2) 需满足传统以太网中的最小帧限制, 即每个独立传输的切片需要大于或等于 64 byte。已经传输的部分满足 60 byte 长度即可, 因为在该切片尾部会自动增补一个 4 byte 长度的校验和 MCRC, 等待传输的部分须至少为 64 byte, 其中包括了帧末尾的 4 byte 长度的校验和 FCS。

针对以上的约束条件, 所有的帧抢占的切片操作可归类为以下 4 种情况。

(1) 帧抢占请求在低速帧中间提出

当前已经传输的部分和剩余的部分都能满足以太网帧的最小帧限制, 可以执行切片操作, 在给前半帧添加 MCRC 后再等待一个 IFG 即可开始高速帧的传输, 如图 6 所示。这种情况产生的时延 (此处及以下如未特殊说明, 时延指与立即传

输高速帧相比产生的时间延迟) 为:

$$T = T_{MCRC} + T_{IFG} \quad (5)$$

(2) 帧抢占请求在低速帧末尾处提出

当前该低速帧剩余的部分已经不能满足以太网的最小帧限制, 如图 6 所示。低速帧帧未传输的部分小于 60 byte, 即便是加上 FCS 也不能达到 64 byte, 此时需要等待整个帧传输完成后才能开始高速帧的传输, 实际上并没有执行任何切片操作。这种情况产生的最长时延为:

$$T = T_{60 \text{ byte}} + T_{FCS} + T_{IFG} \quad (6)$$

(3) 帧抢占请求在低速帧开始处提出

当前低速帧传输的部分不满足以太网最小帧的要求, 须等待传输部分达到 60 byte 后才能执行切片操作, 如图 7 所示。这种情况产生的最长时延为:

$$T = T_{\text{pre}} + T_{60 \text{ byte}} + T_{MCRC} + T_{IFG} \quad (7)$$

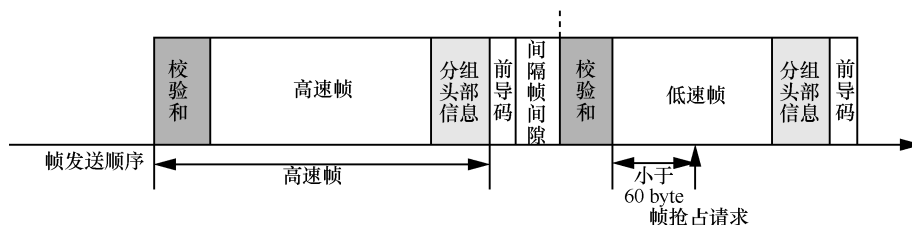


图6 帧抢占请求在低速帧末尾示例

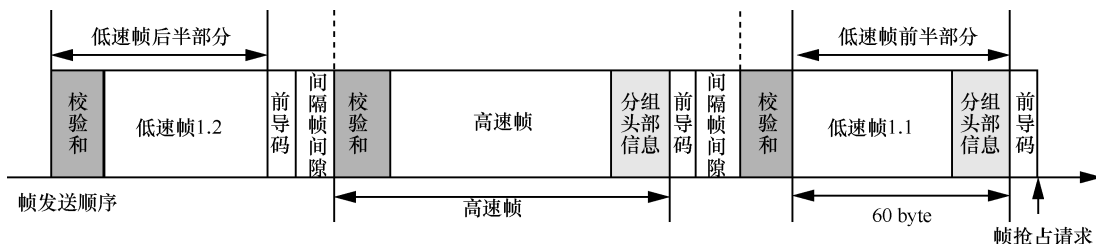


图7 帧抢占请求在低速帧开始示例

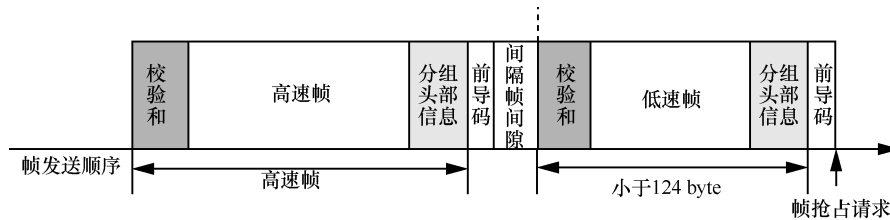


图8 低速帧小于124 byte 示例

(4) 低速帧小于124 byte

在当前低速帧的任何位置切片都不能使前后两片同时满足以太网最小帧的要求,如图8所示,这种情况下产生的最长时延为:

$$T = T_{\text{pre}} + T_{123 \text{ byte}} + T_{\text{IFG}} \quad (8)$$

帧抢占功能对高速帧带来的好处显而易见,但为此低速帧需要付出一定的时间代价。被抢占的低速帧产生的额外开销和阻塞时间为:

$$T = \left[(T_{\text{MCRC}} + T_{\text{IFG}})_{\text{额外开销}} + (T_{\text{Express}} + T_{\text{IFG}})_{\text{阻塞时间}} \right] \times \text{被抢占次数} \quad (9)$$

3.2.3 IEEE 802.1Qav 队列及转发协议

IEEE 802.1Qav 标准的全称为“Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams”,即时间敏感流的转发和排队。此标准允许网桥为时间敏感、损失敏感的实时音/视频数据传输提供保证,规定了每类优先级的入口计量、优先级再生和处理时间感知队列的算法^[10]。此标准利用了 IEEE 802.1AS 标准生成的定时信息,并使用 VLAN 标签编码的优先级值来隔离受控和非受控队列之间的帧,同时支持时间敏感流量和有线或无线局域网之间的其他桥接流量^[11]。

IEEE 802.1Qav 的作用是保障传统异步以太网流量对时间敏感流不会产生干扰,通过使用 SRP 提供的预留带宽和 PTP 提供的同步时钟服务,时间敏感流采用伪同步模式进行转发。同时,为了避免传统以太网流量的干扰,交换机对时间敏感数据流帧和普通数据流帧进行了分类处理,

并将时间敏感数据流帧的优先级设置为最高。以上,在保证时间敏感流正常传输的条件下,继续提供普通异步传输的服务,这就是 IEEE 802.1Qav 的优先级管理及流量整形。尽管终端及交换机设备都需要相应机制保障 75% 的带宽资源用于时间敏感流应用,但 IEEE 802.1Qav 的大部分实现将由交换机负责。

3.3 流预留

IEEE 802.1Qat 最先提出流预留协议 (stream reservation protocol, SRP) 的概念,旨在解决网络中传统异步流量与实时流量之间的资源竞争问题^[12]。IEEE 802.1Qat 中规定,时间敏感流在传输中所经过的交换机和终端等设备需要为其预留出部分带宽资源,以提供端到端传输的时延保障。TSN 工作组在 SRP 的基础上加以改进,制定了 IEEE 802.1Qcc 标准。

3.3.1 IEEE 802.1Qat 介绍

即使划分了不同的优先级,传统的 IEEE802 标准也不能区分出普通的异步数据流和实时流量,SRP 的提出解决了这一问题。流预留相关协议如图9所示。

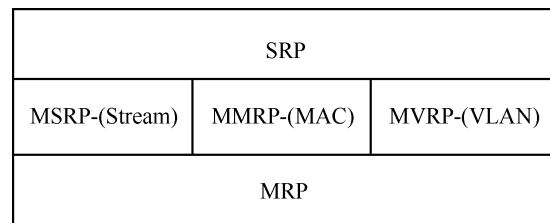


图9 流预留相关协议^[13]

SRP 以 MRP (multiple registration protocol, 多注册协议) 为基础提供 MSRP (multiple stream



registration protocol, 多流预留协议)应用, MSRP 能够管理与带宽预留相关的属性参数。MRP 协议能够使参与传输的设备注册参数并通过 LAN 进行传输, 其同时也是 MVRP (multiple VLAN registration protocol, 多 VLAN 注册协议) 与 MMRP (multiple MAC registration protocol, 多 MAC 注册协议) 的基础协议。MSRP、MVRP 与 MMRP 为 SRP 协议提供所有与网络相关的信号。

SRP 协议有注册 (registration) 和预留 (reservation) 两部分功能。作为流服务的提供者, 其协商预留时间敏感的流媒体流量所需要的带宽资源; 流服务的接收者注册并接受流媒体流。符合 SRP 协议的交换机能够预留出高达 75% 的带宽资源用于时间敏感流, 其余用于传统以太网流, 并且该协议能够保障从提供者到接收者的单项数据流流动, 只要确定从提供者到多个接收者间任意一条路径能够协商并锁定, 提供者就可以开始提供服务。为适应网络拓扑的动态变化, SRP 中具有周期性的状态机监控各节点的状态信息并实时更新各节点的注册信息, 所以提供者和接

收者可以不影响网络的功能随时接入或撤出网络。

3.3.2 IEEE 802.1Qcc 介绍

IEEE 802.1Qcc 标准的全称为 “Stream Reservation Protocol Enhancements and Performance Improvements”, 即流保留协议的增强与性能改进, 此标准以 IEEE 802.1Qat 标准为基础, 对第一代流预留协议进行了改进与增强^[14-15]。主要体现在以下几方面: 支持更多类型的流; 可配置的流预留 (stream reservation, SR) 类与流; 更好地描述了流的特性; 对第三层流的支持; 确定性流预留收敛 (deterministic stream reservation convergence); 为路由选择与预留提供了用户界面 UNI (user network interface) 等。

4 标准现状

时间敏感网络使用需求促进着其技术的飞速发展, IEEE 802.1 工作组下的 TSN 任务组以及其他组织在不断推进着有关草案和标准的制定与发布。本文对部分相关标准的现状进行了调研, 其各主要功能、状态和更新日期见表 1。

表 1 常用 TSN 相关标准功能及状态

标准	标准主要功能	状态	更新日期
IEEE 802.1AS-Rev	时钟同步	草案 8.1	2019/9/9
IEEE 802.1Qbv	门控制调度标准	发布	2016/3/18
IEEE 802.1Qbu	帧抢占标准	发布	2016/8/30
IEEE 802.1Qca	路径控制和预留	发布	2016/3/11
IEEE 802.1CB	路径冗余标准	发布	2017/9/28
IEEE 802.1Qcc	流预留协议	草案 2.3	2018/5/3
IEEE 802.1Qci	入口流检测标准	发布	2017/9/28
IEEE 802.1Qch	循环队列转发标准	发布	2017/6/28
IEEE 802.1CM	TSN 在移动前传网的标准	发布	2018/6/8
IEEE 802.1Qcr	异步流量整形标准	草案 1.1	2019/6/21
IEEE 802.1CS	链路本地注册协议	草案 2.2	2019/9/18

5 时间敏感网络的应用场景

5.1 车载网络

传统的车载网络中,各设备和应用对带宽的要求相对较低,如 CAN (controller area network, 控制器局域网络)、LIN (local interconnect network, 局域互联网络) 和 FlexRay 等协议被广泛使用。在引入 MIS (multimedia infotainment system, 多媒体信息娱乐系统) 和基于高清摄像头的高级驾驶辅助系统后,大量视音频流的传输对网络的带宽和时延有了新的要求。为解决这一需求, MOST (multimedia oriented system transport, 面向多媒体的系统传输) 随之被开发并得以应用,但是对于应对越发严格的网络需求仍显得力不从心。

汽车朝着自动驾驶的方向发展,大量精密的传感器被融合进系统之中,产生了新应用场景,如 GPS 坐标和当前道路状况及发动机的控制器进行信息交互、大灯的亮度可随周围环境的变化而变化以节约能源等。为了满足日益增加的高带宽、低时延、可跨域通信和安全性的网络需求,发展下一代车载网络技术被提上日程。对于近几年兴起的车用无线通信技术 (vehicle to X, V2X), 以太网的可移植性和可扩展性可以使得汽车与外界的连接技术平滑过渡衔接。以太网在 TSN 的一系列标准协议支持下,能够在二层网络提供高带宽、高可靠、低时延和时间同步的音/视频流服务,这些特征都能符合车载网络的发展需求。所以,在 TSN 的支持下基于以太网发展下一代车载网络已经成为了一种不可避免的趋势。

5.2 工业互联网

对于传统的工业网络,不同的总线有不同的物理接口、传输机制、对象字典等,如果想要将相关的工业设备连接到以太网,需要根据不同的底层设备来编写接口和应用层配置工具,这些工作的复杂性和任务量会消耗大量的人力物力,大大增加生产成本。工业界和信息技术的发展,产

生了远程系统管理和维护、工业大数据分析的数据收集和各机器之间的协作等现实需求,这就使得工业网络 and 标准以太网的融合变得刻不容缓,但是传统以太网并不能满足工业领域对网络时延和抖动的要求^[16]。

TSN 标准的应用可以解决上述的问题,如与 OPC (object linking and embedding (OLE) for process control, 用于过程控制的对象连接与嵌入)、UA (unified architecture, 统一架构) 结合实现单一网络解决复杂性问题,支持时间敏感的控制流量和非时间敏感的标准以太网流量的共存传输,并能保证控制流量的低时延、低抖动的传输要求。

如在电力行业,把 TSN 应用到发电厂后,不同系统之间将其作为一个标准的通信平台,不同的协议可以在同一个网络之间传输,大大降低了加入或撤出部分应用的各方面的成本,增加了整个系统的灵活性;此外时间敏感网络可以快速定位网络故障的位置并修复,提高了整个网络的稳健性。时间敏感网络给电力行业更为专业的优化以及更低的生产维护成本,带来的巨大经济效益显而易见。

5.3 航空电子网络

航空电子网络需要提供高质量、低时延、低抖动、时间同步的消息传输,如 ARINC664 Part 规范定义的确定性网络航空电子全双工交换以太网 (avionics full-duplexswitchedethernet, AFDX) 已经成功运用于一些大型客机的主干交换网中^[16]。AFDX 由端系统、交换机和连接链路组成,以引进虚拟链路 (virtual-link, VL) 对带宽资源进行有效的分隔和冗余路径来提高网络的可用性,通过以上机制在端系统中实现性能的保障^[17]。AFDX 网络中包含时间敏感的航空流和传统以太网尽力而为 (best effort, BE) 流,时间敏感的航空流又被分成高优先级和低优先级两类。在时间敏感航空流的优先级高于 BE 流的前提下,调度

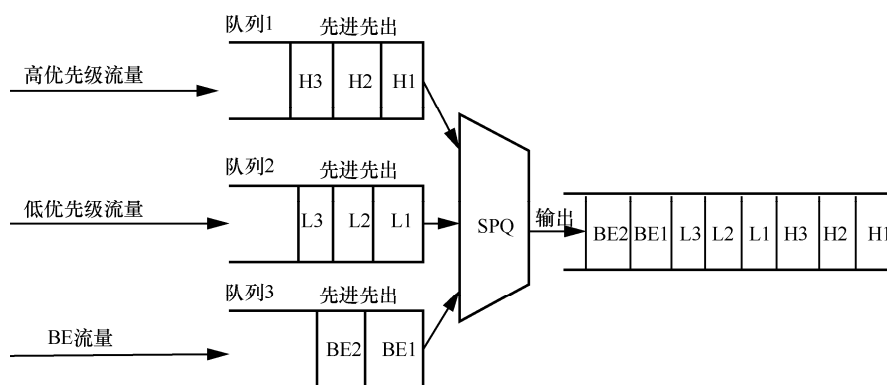


图 10 AFDX 流调度示意图

过程严格流量严格遵循先进先出 SPQ 规则，如图 10 所示^[18]。

TSN 同样可以满足航空电子行业对网络的需求，而且在某些方面性能要优于 AFDX。参考文献[18]通过标准对比、理论分析消息传输实时性的干扰要素和利用仿真方法验证，得出结论：AFDX 高优先级流量的端到端时延优于 TSN，对于低优先级流量端到端时延，则 TSN 和 AFDX 各有优劣，并且时间敏感流在 TSN 中传输的抗干扰能力高于 AFDX。参考文献[19]中对流量整形效益进行建模分析，结果表明：与 AFDX 相比，TSN 中高优先级流量的高负载会使中间优先级流量具有更好的性能。

5.4 移动前传网络

第一代和第二代移动通信系统，即 1G 和 2G 网络，使用传统的无线接入网（radio access network, RAN）架构，天线模块和射频模块同轴电缆连接并部署在同一个基站中，这种架构限制了基站的部署。在部署 3G 网络时提出了 D-RAN（distributed-RAN）架构，其由 RRH（remote radio head，远程无线头）和 BBU（base band unit，基带单元）构成分布式基站。4G 网络采用了 C-RAN（centralized-RAN）架构，该架构分离了 RRH 和 BBU，得以多个分布式的 RRH 共享集中部署的 BBU，以便优化重负载和轻负载基站之间 BBU 的利用均衡的问题。BBU 和 RRH 之间的距离可以

扩展到 40 km，它们连接的部分称为前传（fronthaul）^[21]。

前传中广泛使用 CPRI（common public radio interface，通用公共无线接口）标准作为接口规范，在射频控制设备（radio equipment control, REC）和射频设备（radio equipment, RE）之间传输数字化的基带信号，其中 REC 中包含 BBU，RE 中包含 RRH。另外其他常用的接口规范还有 ORI（open radio equipment interface，开放无线设备接口）和 OBSAI（open base station architecture initiative，开放式基站架构联盟）等。

5G 进一步提高了终端的传输速率，带宽的消耗预计为 4G 的 1 000 倍，移动网络面临着更大的数据传输压力^[20]。CPRI 对端对端的时延、抖动、吞吐量和比特错误率都有严格的要求，目前只有基于光网络的设备能够满足这些性能要求，但是支持 CPRI 的光设备造价高昂、维护难度较大，基于各方面来考虑 CPRI 并不能满足 5G 的需求。爱立信、华为、NEC 和诺基亚合作在 CPRI 的基础上创建了更加适应 5G 网络的 eCPRI，但通信界要求一种基于以太网的方法，相比 CPRI 而言以太网具有高带宽、扩展性高、设备成本低等优势，并且可以更好地与光传送网相匹配。

2018 年 11 月，IEEE 和 IEEE-SA 发布了针对前传时效性网络的 IEEE802.1CM-2018 标准。新标准解决了使用以太网将蜂窝无线电设备连接到

远程控制器的问题,有望在支持 5G 小型蜂窝网络以及未来基于云的无线接入网络的技术设计中发挥重要作用。

6 结束语

本文从 TSN 的起源切入,以其主要的标准为基础,对该技术的工作原理进行了系统性的阐述,然后对 TSN 各协议的现状进行了简要的调研和汇总,最后举例 TSN 在不同领域的应用场景,并概述 TSN 相对于该领域现有技术存在的优势和未来应用的展望。

TSN 在传统以太网上提供确定性网络传输保障,相关技术在 ProAV、汽车控制、电子领域都得以应用,并随着 5G 网络、汽车自动驾驶技术和工业互联网等领域的发展,TSN 的应用广度和深度都将会有更大的发展。时间敏感网络的协议也在逐渐的推进和完善,将会为网络服务及业务提供无限可能。

参考文献:

- [1] 何东, 黄晟, CHARLES W. AVB-下一代网络音视频实时传输技术[EB]. 2019.
HE D, HUANG S, CHARLES W. AVB- the next generation real-time transmission technology of network audio and video[EB]. 2019.
- [2] SCHUMACHER M, JASPERNEITE J, WEBER K. A new approach for increasing the performance of the industrial ethernet system PROFINET[C]//2008 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, May 21-23, 2008, Dresden, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2008: 159-167.
- [3] PRYTZZ G. A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT[C]//2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Sep 15-18, 2008, Hamburg, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2008: 408-415.
- [4] LIMA D F, AMAZONAS J R. Tcnet: trellis coded network-implementation of qos-aware routing protocols in WSN[J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11(3): 969-974.
- [5] 徐晓麟. 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, 287(5): 8-12.
XU X L. Time-sensitive network technology and its application in industrial Internet [J]. Telecommunications Network Technology, 2018, 287(5): 8-12.
- [6] 何沐曦. 无线传感器网络环境下基于 MATLAB 和 OMNet++ 的 IEEE 时间同步仿真[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
HE M X. The simulations of MATLAB and OMNet++ for IEEE 1588 precious time protocol in WSN[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [7] IEEE. 802.1Qbv-2015-IEEE standard for local and metropolitan area network - bridges and bridged networks - amendment 25: enhancements for scheduled traffic[S]. 2016
- [8] IEEE. 801.1Qbu-2016-IEEE standard for local and metropolitan area network - bridges and bridged networks - amendment 26: frame preemption[S]. 2016.
- [9] IEEE. 802.3br-2016-IEEE standard for Ethernet - amendment 5: specification and management parameters for interspersing express traffic[S]. 2016.
- [10] 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]. 2010.
- [11] THIELE D, ERNST R. Formal worst-case performance analysis of time-sensitive Ethernet with frame preemption[C]//2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sep 6-9, 2016, Berlin, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-9.
- [12] IEEE. 801.1Qat-2010-IEEE standard for local and metropolitan area networks - virtual bridged local area networks - amendment 14: stream reservation protocol(SRP)[S]. 2010.
- [13] AVnu Alliance. AVnu Alliance best practices stream reservation protocol revision 1.0 [S]. 2014.
- [14] DITZEL G A, DIDIER P. Time sensitive network (TSN) protocols and use in ethernet/IP systems[C]//2015 ODVA Industry Conference & 17th Annual Meeting, Oct 13-15, 2015, Frisco, Texas, USA. [S.l.: s.n], 2015: 3-23.
- [15] IEEE. 801.1Qav-2009-IEEE standard for local and metropolitan area networks - virtual bridged local area networks - amendment 12: forwarding and queuing enhancements for time-sensitive stream[S]. 2010.
- [16] 王俊文. 未来工业互联网发展的技术需求[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 26-38.
WANG J W. Technical requirement of future industrial internet[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 26-38.
- [17] ARINC. Aircraft data network, part 7: avionics full duplex switched Ethernet(AFDX) network[S]. 2005.
- [18] 熊华钢, 李峭, 黄永葵. 航空电子全双工交换式以太网标准研究[J]. 航空标准化与质量, 2008(1): 25-28.



XIONG H G, LI Q, HUANG Y K. Study on the standards of full duplex switched Ethernet in avionics[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2008(1): 25-28.

- [19] 赵琳, 何锋, 熊华钢. 航空电子AFDX与AVB传输实时性抗干扰对比[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(12): 2359-2369.

ZHAO L, HE F, XIONG H G. Real-time anti-jamming comparison between avionics AFDX and AVB transmission[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12): 2359-2369.

- [20] HE F, ZHAO L, LIE. Impact analysis of flow shaping in Ethernet-AVB/TSN and AFDX from network calculus and simulation perspective[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1181.

- [21] 王丽莉, 姚军. 5G传输网络承载方案分析[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 145-151.

WANG L L, YAO J. Scheme analysis of transmission network for 5G mobile communication system[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 145-151.

- [22] CHECKO A, CHRISTIANSEN H L, YAN Y, et al. Cloud RAN for mobile networks—a technology overview[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(1): 405-426.

[作者简介]



丛培壮(1994—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室博士生, 主要研究方向为网络体系结构、移动互联网创新服务应用等。



田野(1981—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室讲师、硕士生导师, 主要研究方向为下一代互联网、数据挖掘、知识发现等。



龚向阳(1970—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机体系结构、宽带通信网、下一代互联网、网络安全、互联网体系结构和服务质量等。



阚喜戎(1972—), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副教授、硕士生导师, 主要研究方向为通信网的理论及应用、网络安全、网络体系结构、网络和业务的服务质量控制与管理, 创新网络架构与应用等。



王文东(1963—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为网络体系结构、网络和业务的服务质量控制与管理、机器学习与移动互联网网络与应用等。