



研究与开发

时间敏感网络 (TSN) 及无线 TSN 技术

许方敏, 伍丽娇, 杨帆, 赵成林

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 时间敏感网络 (TSN) 在以太网的基础上提供端到端极低时延和高可靠性的数据传输, 适用于时延敏感型应用, 广泛应用于自动驾驶、工业互联网等场景。首先总结了 TSN 的特点, 并详细阐述了 TSN 标准的工作原理和特性, 重点介绍了在无线网络中提供确定性时延和可靠数据传输的网络技术, 即无线 TSN 技术。此外, 通过 TSN 的应用场景简要分析了 TSN 的应用案例。最后探讨了 TSN 和无线 TSN 技术及其在工业场景中应用存在的挑战和问题, 并展望了未来的研究方向。

关键词: 时间敏感网络; 低时延; 高可靠性; 无线 TSN; 5G uRLLC

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020178

Time-sensitive networking (TSN) and wireless TSN technology

XU Fangmin, WU Lijiao, YANG Fan, ZHAO Chenglin

School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications,
Beijing 100876, China

Abstract: Time-sensitive networking (TSN) provides end-to-end data transmission with extremely low-latency and high-reliability over ethernet, which is suitable for time-sensitive applications, widely used in automatic driving, industry of internet and other scenarios. Firstly, the characteristics of TSN were summarized, the working principles and features of TSN standards were elaborated in detail, the network technology that provided deterministic and reliable data transmission in wireless network was especially introduced, as wireless TSN technology. In addition, the application cases of TSN were briefly analyzed. The challenges and problems of TSN and wireless TSN technology and their application in industrial scenarios were discussed, and the future research directions were prospected.

Key words: TSN, low-latency, high-reliability, wireless TSN, 5G uRLLC

1 引言

随着网络技术和垂直行业应用的拓

展, 越来越多的应用程序需要网络提供极低的端到端时延, 工业控制和自动驾驶等应用则更需要网络提供低至几毫秒的传输时延和高可靠传输服

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-05-28

基金项目: 工业与信息化部智能制造新模式应用资助项目; 2019 年工业互联网创新发展工程资助项目

Foundation Items: The Application of New Model of Intelligent Manufacturing in Ministry of Industry and Information Technology, The Industrial Internet Innovation and Development Project 2019



务。传统以太网采用基于竞争的信道接入方式无法满足实时性要求,时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)技术提供基于时间同步的周期性流量整形及调度、数据无缝冗余传输、路径预留和网络配置等,从而能够满足时间敏感型应用的要求。因此,近年来 TSN 技术得到了广泛关注和应用,并且目前出现了支持 TSN 的芯片和产品。TSN 技术结合应用层的 OPC-UA(OLE for process control-unified architecture)技术,能够提供实时、高确定性并真正独立于设备厂商的工业通信网络,实现工业网络的 IT 与 OT 融合,为边缘计算、大数据分析打通数据链路。

传统的 IEEE 802.1 TSN 技术主要针对有线以太网提供低时延和可靠性保障,而以 5G 为代表的新型无线网络也在沿着保障低时延和高可靠传输的方向演进,在 5G 标准化过程和学术界研究中有一系列的无线 TSN 技术涌现。

2 TSN 简介

TSN 是由 IEEE 802.1 TSN 任务组制定的一系列 IEEE 802 以太网子标准集,该任务组成立于 2012 年,由 IEEE 802.1 AVB(audio video bridging, 音视频桥接)任务组改名而成。AVB 工作组致力于解决音频视频数据在以太网介质上传输时的时延较高、抖动较大、传输不确定等问题。TSN 通过无缝冗余等机制扩展了 AVB 技术的性能,为网络提供有界低时延、低抖动和极低数据丢失率的能力,使得以太网能适用于可靠性和时延要求严苛的时间敏感型应用场景。

2.1 TSN 的主要特点

(1) 时间同步

全局时间同步是大多数 TSN 标准的基础,用于保证数据帧在各个设备中传输时隙的正确匹配,满足通信流的端到端确定性时延和无排队传输要求。TSN 利用 IEEE 802.1AS 在各个时间感知系统之间传递同步消息,提供精确的时间同步。

(2) 确定性传输

在数据传输方面,对于 TSN 而言,重要的不是“最快的传输”和“平均传输时延”,而是在最坏情况下的数据传输时延。TSN 通过对数据流量的整形、无缝冗余传输、过滤和基于优先级调度等,实现对关键数据的高可靠、低时延、零分组丢失的确定性传输。

(3) 网络的动态配置

大多数网络的配置需要在网络停止运行期间进行,这对于工业控制等应用来说几乎是不可能的。TSN 通过 IEEE 802.1Qcc 引入集中网络控制器(centralized network configuration, CNC)和集中用户控制器(centralized user configuration, CUC)来实现网络的动态配置,在网络运行时灵活地配置新的设备和数据流。

(4) 兼容性

TSN 以传统以太网为基础,支持关键流量和尽力而为(best-effort, BE)的流量共享同一网络基础设施,同时保证关键流量的传输不受干扰。同时 TSN 是开放的以太网标准而非专用协议,来自不同供应商的支持 TSN 的设备都可以相互兼容,为用户提供了极大的便利。

(5) 安全

TSN 利用 IEEE 802.1Qci 对输入交换机的数据进行筛选和管控,对不符合规范的数据帧进行阻拦,能及时隔断外来入侵数据,实时保护网络的安全,也能与其他安全协议协同使用,进一步提升网络的安全性能。

2.2 TSN 的典型应用场景

TSN 由于能提供确定性的端到端时延和高可靠的数据传输而被广泛应用于自动驾驶和工业控制之中^[1]。在工业控制的场景下,TSN 多用于实现工厂自动化,提供各设备间的时间同步和关键数据及时可靠的传输,以满足工厂控制程序对关键数据的严苛要求^[2]。车联网推动汽车面向智能化快速发展,无人驾驶和智能交通等需求使得车

内外传感器产生的数据量不断地扩大^[3], 实时可靠地进行车内外分组数据传输和交换变得尤为重要。TSN 标准能满足未来汽车对于数据传输的实时性和高可靠性需求, 尤其适用于传输高级辅助驾驶系统数据、车载娱乐设备数据、车载诊断系统数据等。

3 IEEE TSN 标准组

TSN 流从发送端到接收端一般要经历流量整形、流管理和完整性检测等过程。流量整形对输入 TSN 交换机的数据流通过流识别重新赋予不同的优先级并送至相应的输出队列, 然后基于优先级利用传输选择算法在对应的传输窗口选择输出; 流管理用于在网络中动态配置流, 重新调度新加入的流或设备; 完整性检测用于保证网络的高可靠性和安全性。TSN 的主要标准如图 1 所示。

3.1 流识别

TSN 设备必须准确区分时间敏感流与其他流。IEEE 802.1Q^[4]标准描述了识别和区分时间敏感类型与其他类型流量的基本原理。以太网帧结构和 IEEE 802.1 VLAN 标记如图 2 所示, 以太网帧头中 IEEE 802.1Q VLAN 标签内的优先级代码点 (PCP) 字段和 VLAN 识别符 (VID) 定义了 TSN 流的标识。PCP 字段和 VID 是根据与流关联的应用程序分配的。

3.2 流同步

TSN 标准中由 IEEE 802.1AS^[5]提供全局精准时间同步。IEEE 802.1AS 标准是 IEEE std 1588^[13]精准时间协议 (precision time protocol, PTP) 的特定配置文件, 定义了广义精准时间协议 (generalized PTP, gPTP), 并拥有更简洁易操作的选项和功能。IEEE 802.1AS 通过在 gPTP 域的时间感知系统之间传递相关时间事件消息来完成网络设备间的同步。

gPTP 与 PTP 的同步机制类似, 利用最佳主时钟算法 (best master clock algorithm, BCMA) 在网络中选择主时钟并建立同步时钟树, 然后利用对等路径时延测量机制计算主从时钟端口间的时间误差来进行同步。近期修订的 IEEE P802.1AS rev 改进了 gPTP, 为主时钟故障提供了更快的反应时间, 极大提升了系统可用性和容错性。IEEE P802.1 AS rev 在网络中提供冗余主时钟和多个时钟同步路径, 当前主时钟出现故障时, 设备可快速切换至冗余主时钟, 冗余主时钟与网络节点间的冗余同步路径还能在网络链路甚至网桥丢失时依然提供同步时基, 实时保证网络的正常运行。

3.3 流管理

IEEE 802.1Qcc^[6]提供了对 IEEE 802.1Qat 流预留协议 (stream reservation protocol, SRP) 的增强和全局管理与控制网络的工具, 支持静态或动态

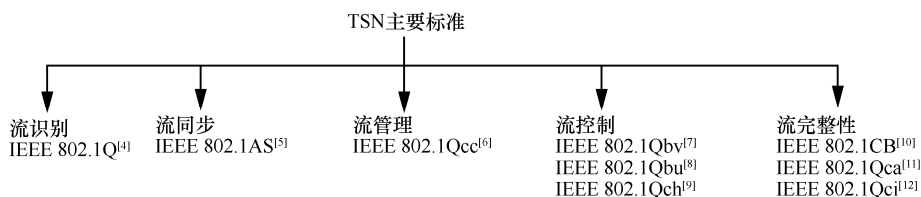


图1 TSN 的主要标准

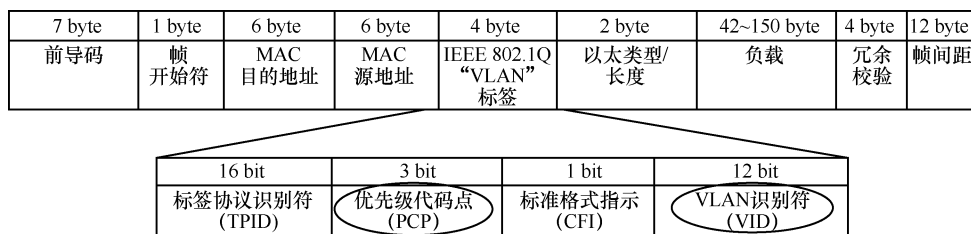


图2 以太网帧结构和 IEEE 802.1VLAN 标记



网络配置,通过减少预留消息的大小和频率改善原有的 SRP,仅通过链路状态或预留变化来触发更新。

IEEE 802.1Qcc 提供了 TSN 应用程序与网络组件之间的用户网络接口 (user network interface, UNI)。完全集中式的网络管理模型如图 3 所示,网络开始运行之前,集中用户配置 (CUC) 会向网络集中控制器 (CNC) 发起检索网络物理拓扑请求, CNC 遍历网络拓扑后将结果返回至 CUC。CUC 接收网络拓扑后开始收集网络资源需求,如哪些终端设备之间要进行通信、TSN 流的周期、大小和时延界限等,并发送至 CNC。CNC 根据网络物理拓扑和网络需求计算每个 TSN 帧的调度表并发送至每个网桥,同时 CUC 将调度表分发至每个终端设备并要求终端设备依据调度表进行数据传输。至此, CUC 和 CNC 分别通过代理的方式完成了网络的配置。当有新的设备加入网络或有新的 TSN 流产生时,依然可以用此方式在网络运行时重新配置。

3.4 流控制

流控制定义了关键数据流在 TSN 网桥内的处理方式,保证 TSN 流确定性端到端超低时延传输。

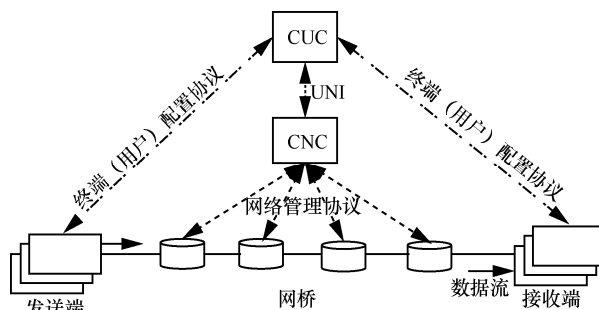


图 3 完全集中式的网络管理模型

TSN 通过以下标准为不同的需求场景提供不同程度的确定性低时延传输方案。

(1) IEEE 802.1Qbv 排队与转发

TSN 标准的核心是基于全局时间的流量调度,精准时间同步由 IEEE 802.1AS 提供, IEEE 802.1Qbv^[7] 则提供了基于服务等级的流量调度,能够避免不同等级流量间的相互干扰,为时间关键的流量提供确定的端到端时延。

IEEE 802.1Qbv 中定义了时间感知整形器 (time-aware shaper, TAS), 利用时间周期的概念来调度数据流。时间感知整形器如图 4 所示, 进入 TSN 交换机的数据流根据其帧头中的信息会被重新赋予优先级并送至输出端口的指定队列, 每

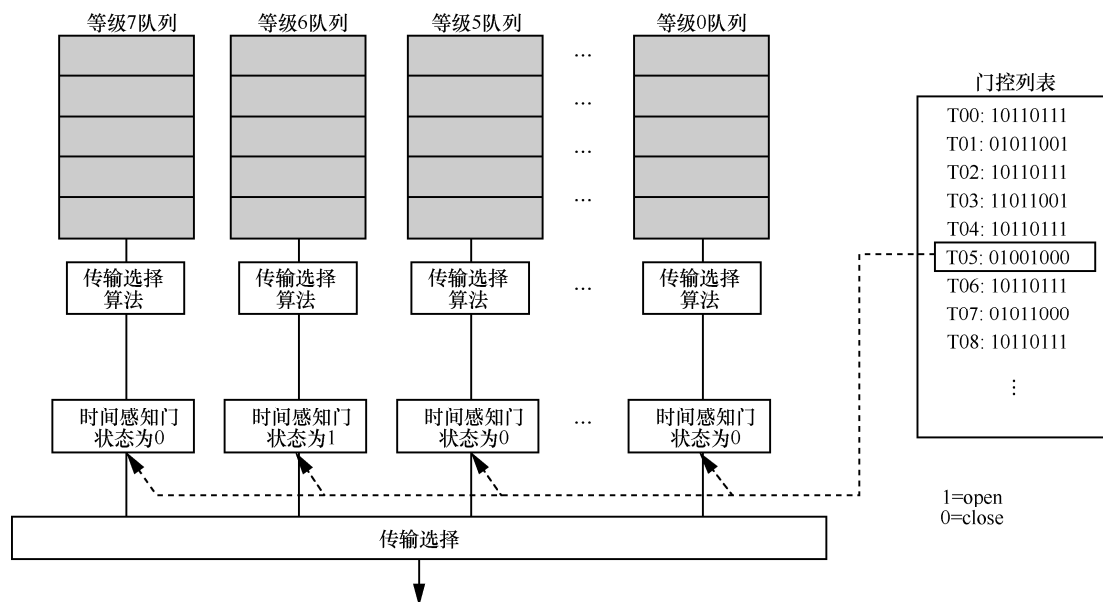


图 4 时间感知整形器

个队列都有一个控制传输的时间感知门。当门的状态为开 (open) 时, 传输选择算法会在相应的时间窗口根据优先级选择数据流进行传输; 当门的状态为关 (close) 或者当前时间窗口的剩余时间不足以传输整个帧, 则不允许传输。时间感知门的状态由基于 IEEE 802.1AS 的门控列表 (gate control list, GCL) 指定, 门控列表周期性地调度每个队列的流量, 并控制每个队列传输时间窗口的长度。

为了避免已传输的非关键流量干扰即将传输的关键流量, 通常会在非关键流量的时间窗口后加入保护带, 保护带的长度为非关键流量中的最大帧的传输时间。保护带如图 5 所示, 在关键流量开始传输时, 上一个周期传输的非关键数据帧 (干扰帧) 还没发送完并占用后续时隙, 导致关键流量不能在其传输窗口完成全部的数据传输。加入保护带后, 在保护带时间段内不允许非关键帧的传输, 从而保证了关键帧的及时传输。

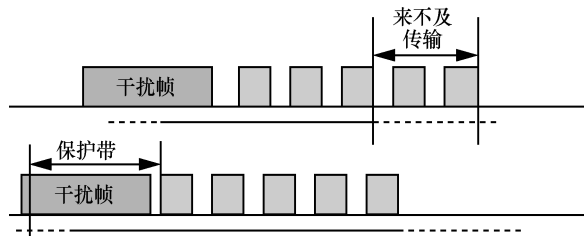


图 5 保护带

(2) IEEE 802.1Qbu 帧抢占

IEEE 802.1Qbu^[8]和 IEEE 802.3br 协同制定标准化的抢占机制。IEEE 802.1Qbv 虽然能保护关键流量免受其他网络流量的干扰, 但不一定带来最佳的带宽利用率和最小的通信时延。在支持 IEEE 802.1Qbu 帧抢占的链路上, 允许中断非关键的标准以太网帧或者巨型帧的传输 (如图 6 中的 (1) 和 (2) 所示), 并优先传输时间关键帧, 然后在不丢弃先前传输的非关键帧片段的情况下恢复传输中断的数据, 一个非关键的数据帧可以被多次抢占。在应用保护带机制时, 帧抢占能有效

减小保护带的最大长度 (如图 6 中 (3) 和 (4) 所示), 缩短信道空闲时间。帧抢占机制在保证关键型数据确定性低时延的同时, 也提供了更细粒度的服务质量, 提高了带宽利用率。

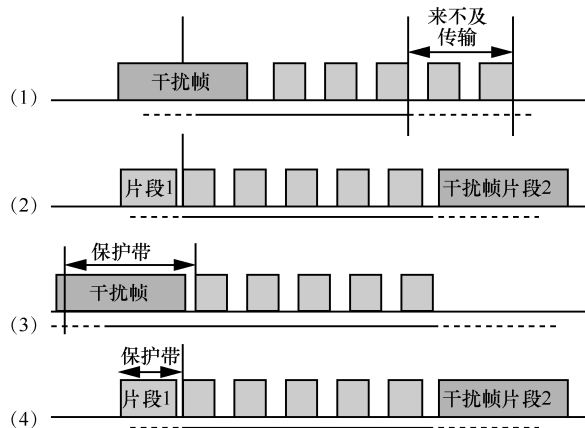


图 6 帧抢占

(3) IEEE 802.1Qch 循环排队和转发

IEEE 802.1Qch^[9]循环排队与转发 (cyclic queuing and forwarding, CQF) 是一种流量整形方法, CQF 循环地协调网桥内关键流量的出队和入队的操作, 旨在为时间敏感流量提供确定性且易于计算的时延, 并实现零拥塞丢失。

CQF 基于全局的时间同步, 以循环的方式在每个传输周期将关键流量沿着其网络路径逐跳传输。非抢占网络中的 CQF 如图 7 所示, 在每个网桥中, 一个传输周期到达的流量会在下一个周期转发至其传播路径上的下一个网桥, 依次循环直至到达目的地。循环操作导致帧的网络传输时延完全由周期间隔和通信双方间端到端跳数来表征, 且独立于拓扑参数和其他非 TSN 的流量。为了使 CQF 正常工作, 所有数据帧必须严格在其分配的周期内到达或离开指定网桥, 以确保实现数据要求的时延范围。为此, CQF 可以结合 IEEE 802.1Qci 和 IEEE 802.1Qbv 确保所有帧保持在确定性时延内并保证在其分配的周期时间内传输。

3.5 流完整性

TSN 在关注关键数据确定性超低时延传输的

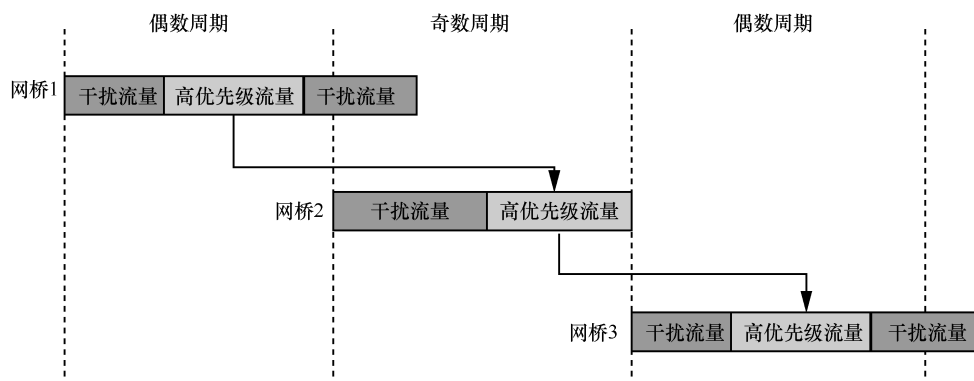


图7 非抢占网络中的CQF

同时，也注重关键数据传输的可靠性和安全性。网络的恶意参与者、网络组件或物理链路故障导致的数据分组丢失等也可能导致关键数据传输的中断。TSN 提供了以下标准以保证关键数据流的完整性。

(1) IEEE 802.1CB 帧复制和消除

IEEE 802.1CB^[10]中定义的帧复制和消除 (frame replication and elimination for reliability, FRER) 实现了与高可用性无缝冗余 (high-availability seamless redundancy, HSR) 和并行冗余协议 (parallel redundancy protocol, PRP) 类似的无缝冗余机制，目的是增加给定数据分组的交付概率，防止拥塞丢失并降低由于设备故障导致数据分组丢失的概率。帧复制和消除过程如图8所示，FRER 在发送端将需要传输的数据帧复制多个副本并生成序列号，然后在不相交的冗余网络路径 A-B-C 和 D-E-F 上传送，在目的地或者目的地附近（如 B、E）依据数据帧的序列号检查并丢弃重复的副本，以实现无缝冗余传输。

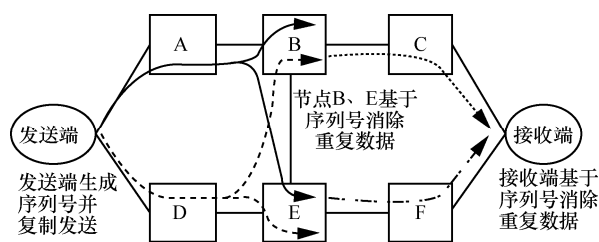


图8 帧复制和消除过程

FRER 机制适用于任何网络拓扑，为降低分组丢失概率，IEEE 802.1CB 可以使用许多条在 IEEE 802.1Qca 路径控制和预留协议中定义的冗余路径，也可与 IEEE 802.1Qcc 等协议结合，实现网络的无缝冗余和快速恢复。

(2) IEEE 802.1Qca 路径控制和预留

IEEE 802.1Qca^[11]的路径控制和预留 (path control and reservation, PCR) 机制基于中间系统到中间系统 (intermediate system to intermediate system, IS-IS) 的扩展承载时间同步和调度控制信息，为数据流提供显式路径转发控制，并允许使用非最短路径。PCR 提前为每个流预定义受保护路径的设置、带宽预留和冗余 (保护或恢复)，为数据流提供弹性的控制机制。

IEEE 802.1Qca 标准基于最短路径桥接 (shortest path bridging, SPB) 协议并结合软件定义网络 (software-defined network, SDN) 来完成路径控制和预留。位于数据平面的 IS-IS 协议用于发现网络拓扑和计算基本路径等，位于控制平面中的路径计算元件 (path computation element, PCE) 用于管理显式路径，PCE 与资源预留协议 (SRP) 交互以沿着显式路径预留资源。此外 PCE 可以管理显式路径的冗余，从而利用备用路径在现实路径上提供保护和恢复。

(3) IEEE 802.1Qci 逐流过滤和监管

当输入 TSN 交换机的数据帧不符合要求时，

不仅会影响关键数据的传输,还可能危害网络设备的安全。IEEE 802.1Qci^[12]定义的逐流过滤和监管(per-stream filtering and policing, PSFP)基于规则匹配过滤和监控每个输入设备的流,防止端点或网桥上的软件错误,抵御恶意设备和攻击(如DOS等)。

PSFP 根据每个数据帧所携带的流识别号和优先级信息来匹配流过滤器,由流过滤器执行逐流过滤和监管操作;流门用于协调所有的流,确定流的服务等级并有序确定地处理流。流量计用于执行流的预定义带宽配置文件,规定最大信息速率和突发流量大小等。PSFP 处理的步骤如图 9 所示。

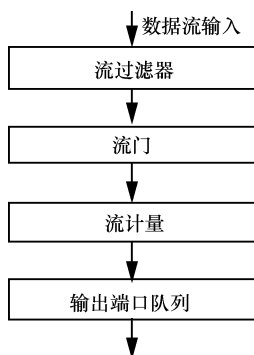


图 9 PSFP 处理步骤

4 无线 TSN 技术

TSN 为有线网络提供了确定性和高可靠性的数据传输,但是很多场景中离不开支持时延敏感型通信业务的无线网络。和有线网络相比,无线网络传输的不确定性导致其时延较高、可靠性较低。因此,将 TSN 功能扩展至无线网络,进一步提高无线网络的时效性和确定性很有必要。此外,5G 在其 uRLLC (ultra reliable low latency communication) 应用场景中考虑工业等垂直领域对低时延和高可靠性的需求,在空口技术、高层协议和网络架构设计上通过优化设计,取得了较好的性能指标。

4.1 无线 TSN

以工业场景无线 TSN 为例进行介绍。工业

无线网络部署环境状况较复杂,无线信道由衰落、干扰、环境变化等因素导致的信道容量随机变化,多用户的信道接入和与其他系统共存及相互干扰等问题,导致现有无线网络不能满足硬实时应用程序中的关键数据传输要求,限制了工业无线网络的发展。如何实现时间关键和确定可靠的无线网络技术也成为研究的热点问题之一。

工业无线网络应用广泛的标准技术如 WirelessHART、WIA-PA 和 ISA100.11a,都不能同时提供工业控制所需的极低时延和高可靠性通信。为使无线网络满足时间敏感业务的传输要求,目前主流的方法是设计无线网络中的实时传输调度方法^[14],将端到端的实时传输时延问题建立成具有时延限制的数学模型,再进行求解和分析;此外,在多跳网状网络中采用灵活高效的实时路由算法^[15],将冲突时延、数据传输成功率等纳入路由决策也能在一定程度上实现数据的实时可靠传输。在工业安全监测等实时性要求严苛的场景中,对 MAC (medium access control) 协议的改进设计来满足非周期关键性数据的及时接入信道与立即传输^[16-17],能在大幅缩短关键数据的端到端时延;设备间的相互协作通信是提高通信可靠性的有效方法,协作通信结合改进的 MAC 协议能有效实现时间敏感数据的低时延和高可靠传输^[18]。另外,对现有的 IEEE 802.11 协议进行改进,使其具有可靠性和实时性能以适用于时间敏感的高速工业应用^[19];由 IEEE 802.11ax 定义的下一代 Wi-Fi 更是引入了一些确定性关键数据传输增强功能,以提高对时间敏感的工业自动化应用的支持。

此外,无线网络和有线 TSN 结合起来部署,可以发挥各自的长处。在工业闭环控制系统广泛部署的无线传感器与执行器网络中,传感器周期性地读取时间敏感的控制类数据传送至控制器,再由控制器计算输出并传送至执行器完成相应的执行动作,这个控制周期通常需要在 1 ms 的时间



内完成。使用基于有线 TSN 与具有低时延特性的无线网络的混合新架构^[20]来完成周期性关键数据的传输能满足严苛的时间界限和可靠性要求。混合网络架构如图 10 所示。

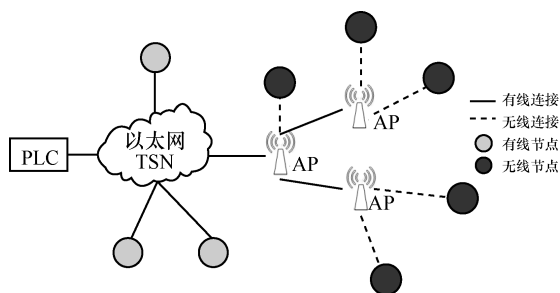


图 10 混合网络架构

4.2 5G uRLLC

uRLLC 作为 5G 的应用场景之一，旨在为工业自动化、自动驾驶等领域通过无线连接的方式提供端到端的超高可靠性和极低时延的通信，满足实时应用对关键数据传输的严苛要求。为了尽快完成这一应用场景的支持，5G 在空口技术、协议层和架构设计多方面进行优化设计以实现低时延和高可靠性。

为了实现极低时延，在物理层方面进行了空口重构，5G 新空口（new radio, NR）引入了比 LTE（long term evolution）更加灵活的帧结构，帧时隙的长度不再固定，最短可低至 0.125 ms。此外，5G NR 的自包含子帧允许数据传输和 ACK/NACK 反馈在同一个子帧内进行，对要求极低时延的应用程序非常有用。在协议方面，5G NR 在上行链路中引入了无授权访问的概念，避免了耗时上行链路资源请求和授权过程；5G 还将支持 UE（user equipment）资源冲突时的优先级设置和多路复用来满足关键数据的低时延传输^[21]。

为增强数据传输的可靠性，5G NR 的编码方案利用极化码和 LDPC（low density parity check）码来实现高可靠性和稳定性。5G 标准能更好地支持大规模 MIMO（multiple-input and multiple-output）技术，可利用超过 32 个天线的空间

分集，大幅提高传输可靠性。5G NR 物理层支持 28 GHz 高频带毫米波通信，其更高的信道带宽和定向通信能在提供极高可靠性的同时满足极低时延。在协议层面，5G 将支持在网络上建立冗余 PDU 会话和框架复制，在 UPF（user plane function）和 RAN（radio access network）节点间传输冗余数据，PDCP（packet data convergence protocol）层复制增强将支持多达 4 个副本，并利用高层多连接在用户平面建立冗余的数据传输路径来提高可靠性。

5G NR 在无线接入网（RAN）和核心网络中引入了架构增强功能^[22]。基于 C-RAN（centralized-RAN）的 5G 接入网络设计引入了灵活动态分配的计算和通信资源，以便根据流量混合、网络负载和无线信道条件动态调整策略，从而持续提供低时延和高可靠服务。在核心网络中，基于 SDN 的控制和数据平面划分允许在控制平面和数据平面中提供较低时延。此外，网元功能虚拟化和网络切片允许在网络拥塞和负载波动期间为硬实时应用配置所需的网络资源。通过在客户端设备附近提供计算能力和缓存，利用移动边缘计算能有效解决时延过长、核心网汇聚流量过大等问题，为实时性和带宽密集型业务提供更好的支持。5G 技术报告^[21]中指出，在大多数场景下，5G 物理层能实现单向时延 0.5 ms 的目标，通过 PDCP 复制增强可实现 99.99%~99.999 9% 的可靠性。为支持 TSN 用例中多种不同周期、不同优先级流量混合特性，5G NR 将支持更短的半持久调度周期以实现 QoS（quality of service）和调度增强。

5 应用案例

最早期的 AVB 网络致力于在以太网的基础上提供确定性的实时视频/音频数据传输，为比赛同步直播、汽车娱乐系统等提供实时可靠的数据传输服务。随着 AVB 的快速发展和广泛应用，工业界开始关注并深入研发这项技术，TSN 便作为

AVB 的后继者而出现,其应用场景也从音视频数据传输延伸至汽车、工业领域,各大厂商也在加速研发和生产 TSN 产品和解决方案。

随着自动驾驶和车联网的兴起,车载设备的大量数据交互、传统车载网络技术的多样复杂性及高成本等问题对车载网络的传输带宽、互操作性及成本提出严格要求。这种行业性的迫切需求推动着基于以太网的 TSN 技术在汽车领域的应用不断扩展。早在 2016 年,Innovasic 便推出支持 TSN 的车载以太网网络解决方案和 TSN 评估套件。Marvell 在 2018 年推出以安全吉比特以太网交换机芯片 88Q5050 为核心的汽车以太网解决方案,并首次完成基于 TSN 汽车芯片的实际应用。与此同时,各大芯片供应商如 Xilinx、瑞萨、NXP 等也相继完成了 TSN 芯片开发并有了汽车测试应用系统。

工业 4.0 的到来和工业互联网的崛起推动着工业应用面向数字化、网络化和智能化迅速发展,同时要求实现不同设备间的互操作、信息数据的安全自由流动;智能制造要求网络互联、信息互通,IT (information technology)、OT (operational technology)、CT (communication technology) 三体融合也是大势所趋。而工业网络现状却是 IT 与 OT 信息隔离无法互相交流,产业碎片化、个性化无法实现技术开放共享。TSN 的引入让标准以太网具有确定性地传输实时数据的能力,加速了 IT 与 OT 的融合,成为工业互联网的助推器。IEC 与 IEEE 联合定义了 TSN 工业应用行规 IEC/IEEE60802,用于指导用户选择和使用 IEEE 802 标准和特性,以实现 OT 通信和其他通信融合的工业网络。

工业通信协议如 EtherCAT、PROFINET、CC-Link IE 等已开始融合 TSN 技术以顺应工业 4.0 彻底互联互通的趋势。2017 年, EtherCAT 组织发表了关于 TSN 技术的白皮书; Simens 在 2018 年德国汉诺威展工业博览会发布了 PROFINET over

TSN 的产品,展示了 TSN 在高网络负载条件下依然能实现机器和工厂之间强大可靠的以太网通信,并在 2019 年发布了第一批与 TSN 技术相关的产品。PI 组织 (PROFIBUS & PROFINET 协会) 于 2019 年 7 月发布基于 TSN 的 PROFINET 规范,将 TSN 作为第二层的技术集成到 PROFINET 架构中。CLPA (CC-Link Partner Association) 也于 2019 年 2 月发布开放式工业网络协议标准 CC-Link IE TSN,在全球率先将吉比特以太网带宽与 TSN 相结合。Moxa 在 2019 年德国电气自动化展会 (SPS) 上展示基于 Moxa TSN 技术的解决方案,该方案可整合各类设备和协议并提供支持高带宽、实时通信、高可靠性和高性能应用的统一网络基础设施。ADI 推出的 fid5000 系列交换平台宣称能支持当今所有主要工业协议,可将产品规划过渡至 TSN 并同时满足当前需求。

TSN 与 OPC UA 的结合所提供的安全、可靠、实时、独立于设备厂商的互操作特性也将使其成为重要的工业互联网标准。贝加莱在 2016 年德国 SPS 展上发布了基于 OPC UA over TSN 的测试系统,并积极推动 TSN 与 OPC UA 的融合为整个工业界构建统一的通信架构,也陆续发布支持 OPC UA over TSN 的控制器及 TSN 交换机等产品。华为联合 30 多家合作伙伴 (包括思科、施耐德、NI 等) 构建了国内首个基于边缘计算的 OPC UA 和 TSN 测试床,旨在为制造业及其他工业市场基于 OPC UA over TSN 的开放互联网络与边缘计算基础设施提供测试验证与创新的平台环境。

TSN 与 5G、Wi-Fi 等技术的无缝融合以实现端到端的互联互通也是目前产业界和学术界的研究热点之一。Avun 组织发布了无线 TSN 白皮书,介绍了在无线网络上扩展 TSN 功能的用例和标准。将工业设备以无线的方式连接至 TSN, 5G 无疑是最合适的解决方案, 3GPP 在 5G 系统开展 TSN 服务,并在 3GPP R16 规范中提出整合 5G 与 TSN 的工具,增强 5G 系统对 TSN 的支持。高通、



英特尔等公司也开始尝试将 5G 与 TSN 融合。工业互联网产业联盟也发布了 TSN 产业白皮书,并概述了 TSN 与 5G 融合关键技术挑战和演进路线展望。

6 问题与挑战

TSN 在为诸如工业控制、自动驾驶等领域带来福音的同时,自身也面临着一些挑战。TSN 是基于有线以太网提供的低时延、高可靠和低抖动等性能,始终不能摆脱线缆的束缚,如何在无线网络上部署和拓展 TSN 协议的功能就成为一大技术难点。TSN 是公开的协议标准,如何在为不同的应用场景提供低成本、互操作便利的同时提供优于传统专用协议的高性能和效率也有待解决。

无线 TSN 在无线网络上提供高可靠和低时延服务,但大多数技术只关注某一个方面(如时延或可靠性等)的性能,而同时实现低时延、高可靠性、高可用性、低时延和节能等性能,使其在无线链路上提供可媲美于有线链路特性的技术却极其少见。传统的基于 IEEE 802.11 和基于 IEEE 802.15 物理层的无线 TSN 大都只能提供软实时性能,在时延和可靠性要求极其苛刻的运动控制等场景的部署增益并不大,基于 5G 物理层的无线 TSN 技术的研发是一个不错解决方案,但面临着棘手的兼容问题。关于无线 TSN 中的数据隐私、用户信息篡改、非授权用户假冒等安全问题也是一个很大的挑战。

7 结束语

本文介绍了当前在工业控制和自动驾驶领域迅猛发展的时间敏感网络(TSN)技术和无线 TSN 技术,总结了 TSN 技术的特点、工作原理和性能及其工作场景,介绍了为时间关键型应用提供支持的无线 TSN 技术,并分析了 TSN 和无线 TSN 技术的应用案例和面临的一些问题及挑战。TSN 在有线以太网的基础上为时间敏感型应用提供端

到端极低时延和高可靠性通信服务;无线 TSN 旨在解决传统无线网络可靠性差、时延高且不确定性等问题,在无线网络上提供类似于 TSN 的功能。未来的工作将致力于研究无线 TSN 网络技术及其性能提升。

参考文献:

- [1] 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): 31-42.
CONG P Z, TIAN Y, GONG X Y, et al. A survey of key protocol and application scenario of time-sensitive network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(10): 31-42.
- [2] FINN N. Introduction to time-sensitive networking[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 22-88.
- [3] SAMII S, ZINNER H. Level 5 by layer 2: time-sensitive networking for autonomous vehicles[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 62-68.
- [4] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks: 802.1Q[S]. 2014.
- [5] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks--timing and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks-corrigendum 2: technical and editorial corrections: 802.1AS-2011/Cor 2-2015[S]. 2016.
- [6] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 31: stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements: 802.1Qcc-2018[S]. 2018.
- [7] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 25: enhancements for scheduled traffic: 802.1Qbv-2015[S]. 2016.
- [8] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 26: frame preemption: 802.1Qbu-2016[S]. 2016.
- [9] IEEE. IEEE standard for Local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 29: cyclic queuing and forwarding: 802.1Qch-2017[S]. 2017.
- [10] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-frame replication and elimination for reliability: 802.1CB-2017[S]. 2017.
- [11] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 24: path control and reservation: 802.1Qca-2015[S]. 2016.
- [12] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 28: per-stream filtering and policing: 802.1Qci-2017[S]. 2017.
- [13] IEEE. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems: 1588-2008[S]. 2008.

- [14] MODEKURTHY V P, SAIFULLAH P, MADRIA A, et al. DistributedHART: a distributed real-time scheduling system for wirelessHART networks[C]//Proceeding of 2019 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 216-227.
- [15] WU C, GUNATILAKA D, SHA M, et al. Real-time wireless routing for industrial internet of things[C]//Proceeding of 2018 IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI). Piscataway: IEEE Press, 2018: 261-266.
- [16] FARAG H, GIDLUND M, OSTERBERG P. A delay-bounded MAC protocol for mission-and time-critical applications in industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(6): 2607-2616.
- [17] SHEN W, ZHANG T, BARAC F, et al. PriorityMAC: a priority-enhanced MAC protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 824-835.
- [18] SERROR M, VAABEN S, WEHRLE K, et al. Practical evaluation of cooperative communication for ultra-reliability and low-latency[C]//Proceedings of 2018 IEEE 19th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 14-15.
- [19] TRAMARIN F, MOK A K, HAN S. Real-time and reliable industrial control over wireless LANs: algorithms, protocols, and future directions[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1027-1052.
- [20] SEIJO O, FERNANDEZ Z, VAL I, et al. SHARP: towards the integration of time-sensitive communications in legacy LAN/WLAN[C]//Proceedings of 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [21] 3GPP. Study on NR industrial internet of things (IoT)(R16)[S]. 2019.
- [22] 3GPP. System architecture for the 5G system (R15)[S]. 2017.

[作者简介]



许方敏 (1982—)，男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为未来网络架构及关键技术、大数据分析及应用、工业物联网。



伍丽娇 (1996—)，女，北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生，主要研究方向为无线网络、时间敏感网络。



杨帆 (1995—)，女，北京邮电大学信息与通信工程学院博士生，主要研究方向为区块链、边缘计算。



赵成林 (1964—)，男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信及信号处理、认知无线电、软件定义网络、物联网技术及其应用。