

面向工业自动化的 5G 与 TSN 协同关键技术

李 卫¹⁾, 孙 雷^{2)✉}, 王健全²⁾, 马彰超²⁾

1) 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学自动化学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: sun_lei@ustb.edu.cn

摘 要 面向工业制造领域数字化、网络化及智能化转型需求, 简要介绍了时间敏感网络的起源及发展现状, 并针对第三代合作伙伴计划 (3GPP) 中 5G 支持 TSN 的标准研究进行了阐述, 重点针对 5G 与 TSN 协同面临的技术挑战进行了分析, 进一步阐述两种异构网络间协同所需的时间同步、连接增强及统一资源管理等关键技术, 最后给出 5G-TSN 协同网络在智能工厂中的应用场景, 旨在深化推动 5G 融入工业控制领域, 实现 5G 先进信息通信技术与工业应用的深度融合。

关键词 第五代移动通信网络; 时间敏感网络; 工业互联网; 5G 与 TSN 协同传输; 智能工厂

分类号 TN915.03; TP393.03

Key technologies to enable 5G and TSN coordination for industrial automation

LI Wei¹⁾, SUN Lei^{2)✉}, WANG Jian-quan²⁾, MA Zhang-chao²⁾

1) School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Automation and Electromechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: sun_lei@ustb.edu.cn

ABSTRACT Applying fifth-generation mobile communication networks (5G) and time-sensitive networking (TSN) has become a new trend in industrial automation. As the new generation of mobile communication technology, 5G is featured with a large bandwidth, low latency, ultrareliable connection, and multiservice slicing capacities. As the evolution goal of industrial ethernet, TSN is featured with a deterministic transmission with bounded latency and jitter and guaranteed high reliability. Both technologies have been designed to provide converged communication for various services on common network infrastructure. 5G and TSN coordination can effectively promote the integration of Information Technology (IT) and operational technologies (OT), which will be a key enabler of the industrial internet. Therefore, the collaborative transmission of 5G and TSN has become a focus for the industry and academe. “5G + TSN” is envisioned to be the basic communication network for future smart factories, which can integrate various field-level industrial communication technologies and ensure end-to-end industrial data transmission reliability. However, 5G and TSN networks are different in the transmission methods, protocols, control and management mechanisms, etc. How to realize an efficient interconnection and coordination of 5G and TSN is a hot topic and difficult task currently. Following the general requirements of digital, digital-networked, and new-generation intelligent manufacturing, this article first introduced the state-of-the-art of time-sensitive networks, and it also elaborated on the standardization progress of 5G supporting TSN in 3GPP. This work then emphasized the main challenges for the coordinated transmission of 5G and TSN networks and analyzed key technologies such as time synchronization, connection enhancement, and unified resource management to support the coordination of 5G and TSN heterogeneous networks. Finally, the application scenarios of “5G + TSN” in a smart factory were given, aiming to deepen the integration of 5G into industrial control and

收稿日期: 2021–04–08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB1708800); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (FRF-MP-20-37); 广东省重点领域研发计划基金资助项目 (2020B0101130007)

flourish 5G-based industrial applications.

KEY WORDS the 5th generation mobile communication system; time-sensitive networking; industrial internet; 5G and TSN coordination; smart factory

工业制造业是5G的重要应用领域,如何利用5G先进信息通信技术打造组织灵活、生产高效的智能工厂,助力制造业数字化、智能化升级转型,成为当前产业界及学术界共同关注的热点话题^[1-3]。然而,工业业务对传输时延、抖动及可靠性等具有严格的要求,尤其是工业控制类业务,需由支持有界的时延和抖动、极其严苛的丢包率和可靠性保证的网络承载。网络具有确定性时延这一特征对工业业务传输尤为重要,意味着整个系统的可行与可靠,是工业系统安全可控的基础。虽然5G在R16版本中针对低时延和超高可靠技术方面做了较大提升,但在满足工业实时类、工业自动控制类业务确定性传输需求方面仍面临诸多挑战^[4-6]。

时间敏感网络(Time-sensitive networking, TSN)是由国际电子电气工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.1工作组在802.3标准以太网及802.1Q虚拟局域网基础上对媒体接入控制层机制进行增强的一系列标准协议^[7]。TSN是二层桥接网络,在实现节点间高精度时间同步基础上,实现域内数据传输的时延和抖动的有界性及确定性;此外,由于TSN能兼容以太网协议,因此受到了工业、航天电子及音视频传输领域的广泛关注,成为了工业网络的重要趋势之一,诸多工业企业对在工厂内部引入时间敏感网络技术表现出极大的兴趣,西门子等工业巨头也纷纷开展了时间敏感网络实验床的建设验证工作^[8]。

本文基于工业互联网中信息技术(Information technology, IT)与生产技术(Operation technology, OT)融合需求,面向构建统一、开放工业网络目标,重点针对构建5G与TSN协同的端到端确定性网络所面临的挑战、关键技术体系、时间同步机制、联合资源管理模型等进行了阐述,并结合5G-TSN协同网络在智能工厂中的应用场景进行了介绍。文章组织结构如下:第1部分重点介绍时间敏感网络技术及5G+TSN的标准化现状;第2部分主要介绍5G+TSN的关键技术特征,并对当前研究面临的挑战进行分析;第3部分简要介绍5G+TSN在工业领域的应用场景;第4部分对全文进行了总结。

1 研究现状

1.1 时间敏感网络标准现状

TSN并不是近年兴起的新技术和新网络,只是随着近年来工业互联网的普及而被通信领域所熟知。IEEE 802.1工作组围绕TSN的架构、时间同步、流管控、流整形及资源预留等多项关键技术进行了标准化,形成802.1系列协议族,其目的是意图构建一个开放、统一的物理层和数据链路层协议,并通过标准化为不同应用领域的实时数据传输提供网络协议支持。其中,IEEE802.1AS、802.1Qcc、802.1Qbv、802.1Qbu、802.3Qbr、802.1Qci等是TSN较为基础核心的协议^[9-11]。

时间同步是TSN实现精准时延转发及时延有界性的基础,IEEE 802.1AS在1588V2基础上采用通用精准时间协议(General precise time protocol, gPTP),通过在主时钟与从时钟之间传递时间事件消息(带有精准时间戳的消息),并通过计算点对点的链路传输时延、驻留时延等信息后完成时间补偿,从而实现两个节点间的时钟同步^[12-13]。

IEEE802.1Qcc提出了中心化配置模式,网络中由1个或多个集中用户配置中心(Centralized user configuration, CUC)和1个集中网络控制器(Centralized network configuration, CNC)组成。当接收到来自CUC的数据传输需求后,CNC基于各节点时间同步信息的基础上,完成资源预留、调度等决策,并将相关信息配置到相应交换节点,基于集中式的TSN架构如图1所示。此外,IEEE802.1Qcc也支持分布式的TSN网络结构^[14-15]。

IEEE802.1Qbv是在多业务环境下保障强实时需求时延敏感业务传输需求的业务流调度增强机制。802.1Qbv提出了时间感知整形器(Time aware shaper, TAS),使TSN交换机能够来控制队列流量,通过时间感知门,只有在规定时间内窗口才能传输相应队列的报文,保证了高优先级队列的传输不会被突发性的低优先级业务所打断,实现端到端传输的确定性^[16]。

IEEE 802.1 Qbu/802.3Qbr是针对高优先级业务传输的队列转发保障机制,提出了帧抢占机制,允许在数据传输过程中,可让高优先级的数据帧打断低优先级的帧,优先发送高优先级队列数据,

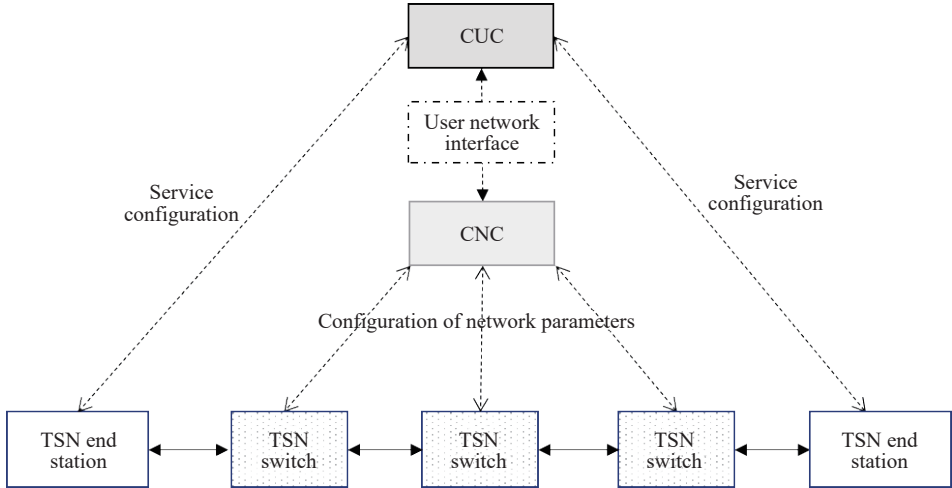


图 1 IEEE802.1 Qcc 集中管理架构图

Fig.1 IEEE 802.1Qcc centralized management architecture

最大限度地降低高优先级信息流的延迟^[17].

IEEE802.1Qci 提出了基于 TSN 流的入口过滤与监管,能够用来防止出现因数据重传及 DDOS 攻击等造成的业务过载情况,从而提升网络的健壮性^[18].

IEEE 针对 TSN 的标准还在不断的演进及扩展,现有标准为工业数据的传输、TSN 网络的部署及配置提供了多样化的功能选择,从而支持在已有工业以太网等工业网络基础上实现确定时延及可靠性的数据传输^[19].

1.2 5G+TSN 标准化现状

如图 2 所示,该图是 3GPP R16 定义的 5G 支持 TSN 的网络架构^[20].在该架构中,将 5G 系统看作是 TSN 交换机,嵌入到 IEEE 802.1 Qcc 的 TSN 集中化管控整体架构下.为了使得 5G 网络能够支持 TSN 的基本协议,5G 核心网及终端侧对用户面和控制面两个层面进行了相应的功能增强^[21-25].

在用户面,在 UPF 中扩展支持网络侧 TSN 转换器 (Network TSN translator, NW-TT)、在 5G 终端

侧增加了设备侧 TSN 转换器 (Device side TSN translator, DS-TT) 功能, NW-TT 及 DS-TT 支持 IEEE802.1AS、802.1AB 及 802.1Qbv 协议,实现了将 TSN 功能暴露给 5G 网络而不对现有 5G 系统内部网元造成影响.另一方面,在时间同步基础上,5G 用户面功能 UPF 需实现 TSN 基于精准时间的调度转发机制,这是 5G 网络支持 TSN 的最核心功能.5G 系统作为 TSN 网络中的透明桥梁,由 DS-TT 和 NW-TT 提供 TSN 数据流的驻留和转发机制.

在控制面,提出了 TSN 应用功能实体 (TSN-application function, TSN-AF),与 5G 核心网中策略控制功能 (Policy control function, PCF)、会话管理功能 (Session management function, SMF) 等实体模块的交互,实现 TSN 业务流关键参数在 5G 时钟下的修正与传递,让 5G 基站实现对 TSN 业务流确定性时间要求的感知,实现 5G 网络中对于 TSN 业务数据的精准时延传输;另一方面,TSN-AF 与 5G 边界网关用户面功能实体 (User plane function, UPF) 及终端侧转换网关 DS-TT 交互,实现 5G TSN 网桥

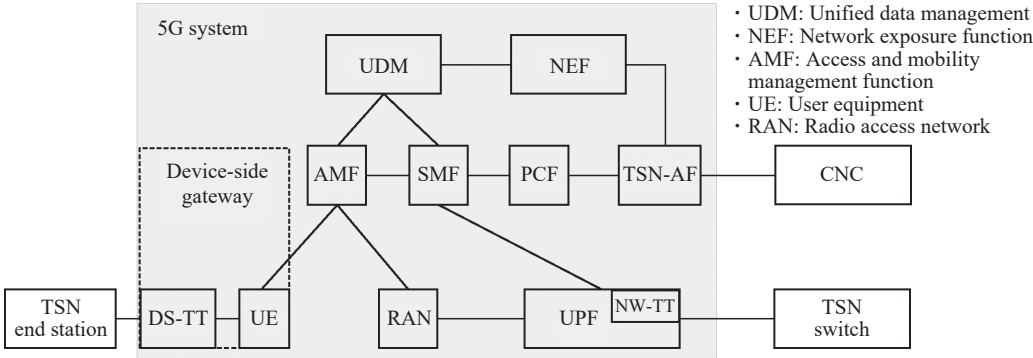


图 2 3GPP R16 定义的 5G TSN 网桥架构

Fig.2 5G TSN bridge architecture defined by 3GPP R16

端口配置管理等功能。

2 5G 与 TSN 协同传输关键技术

在 3GPP 提出的 5G TSN 桥接网络架构基础上,本节将针对跨 5G 与 TSN 端到端确定性传输需求,对 5G 与 TSN 协同传输面临的技术挑战进行分析,结合当前业界在该领域的研究现状,重点针对时间同步机理、5G 超高可靠低时延连接模型、5G 与 TSN 联合调度算法与资源映射模型等方面的关键技术方案进行了分析和探讨。

2.1 问题与挑战

时间敏感网络要确保传输路径上所有节点都在同一时间基准上,并且能“感知”信息的传输时间,从而确保信息在一个精准的、确定的、可预测的时间范围内从源节点发送到目标节点^[20]。然而,TSN 基于以太网架构,采用有线的方式进行信息传输,有线信道变化较小,信道特征对于信息传输时间的影响较小,具有较好的“可控性”,而 5G 蜂窝移动通信系统重要的特征是空口无线传输,因此,如何在 5G 与 TSN 协同网络中实现强实时业务的确定性传输,面临如下的关键技术难题:

首先,如何克服无线信道时变带来的不确定性。无线信道是时变信道,并且由于无线终端的移动特性,无线信道中快衰落和慢衰落同时存在,这对数据传输的可靠性造成了极大的影响。终端移动、无线信道变化会带来数据的丢失,并进而带来数据重传,这将对确定性低时延、低抖动等指标的

实现带来挑战。

其次,如何提升 5G 网络中核心网设备及基站设备的时间感知能力,实现基于精准时间的资源调度与数据转发。传统蜂窝移动通信系统中的资源分配是基于业务优先级、队列情况进行综合调度,虽然也强调对实时业务传输时延的优化,但并未严苛的按照精准时间进行资源调度及数据发送。如何在 5G 网络中将 TSN 的机制进行引入增强,成为 5G 与 TSN 协同传输面临的另一个挑战。

最后,跨 5G 与 TSN 网络的联合资源优化难题。混合工业业务环境下如何统筹跨网状态信息以针对 TSN 业务进行端到端资源优化决策,实现跨网跨域的确定性调度。在当前 3GPP 提出的 5G TSN 桥接方案中,是通过在终端和网络侧构建网关,将 TSN 的参数特性传递给 5G 网络;但对于端到端的优化传输来说,如何让 TSN 中的决策节点了解 5G 网络信息,从而实现端到端的资源优化决策。

2.2 跨网高精度时间同步机制

网络中设备节点间的时间同步是实现确定性时延传输的基础和关键。然而,5G 和 TSN 属于不同的时间域,两个网络均有各自域内的主时钟,因此,如何实现两者的时间同步成为 5G 与 TSN 协同传输的首要关键问题^[26]。

对于如何实现跨网时间同步,主要有两种方案,一种是边界时钟补偿方案,另外一种就是时钟信息透明传输方案。两种方案的示意图如图 3 和图 4 所示。

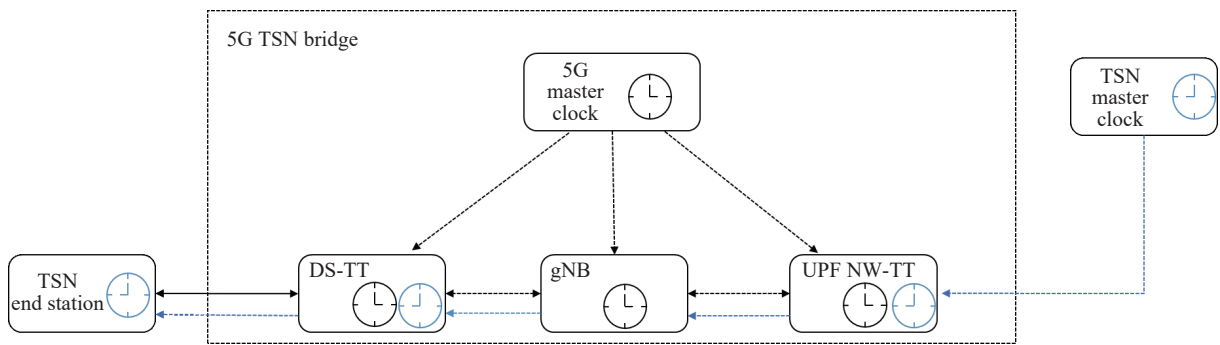


图 3 边界时钟补偿方案示意图

Fig.3 Mechanism of the boundary time synchronization

对于边界时钟补偿方案,5G 网络中终端侧及网络侧的网关处将能同时感知到两个时间域的时钟消息,边界网关将对两个时钟间的误差进行测量,通过将测量值补偿到 5G 时钟信息上,使得 5G 和 TSN 两个不同的网络能够处于同样的时间基础,实现 5G 核心网设备及 5G 基站 (gNB, Next generation node B) 的精准时延转发功能。对于该方

案而言,两个时钟间误差测量的精度及误差更新的频度,成为跨网时钟同步的关键。

对于时钟信息透明传输方案,将 TSN 域内时间同步消息,即 PTP 消息,在 5G 域内进行透明传输。但是,在传输链路上经过每一个节点时,都需要将在该节点的停留时间进行标记,即记录进入该节点入口和离开该节点出口时的时间戳,并将

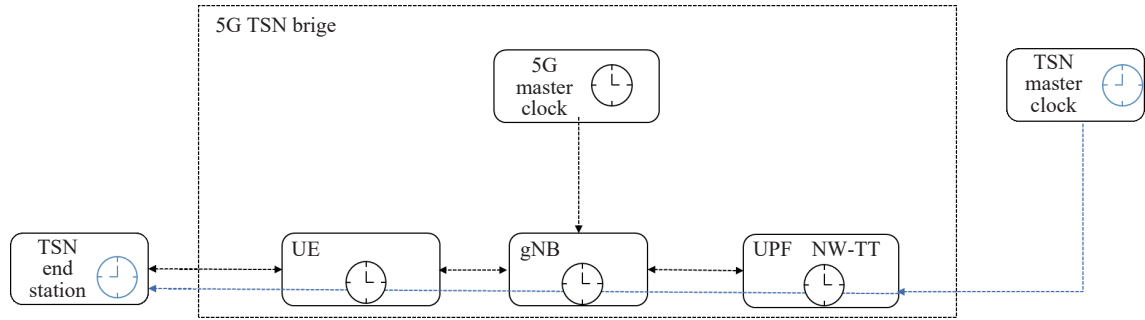


图 4 时钟信息透明传输方案示意图

Fig.4 Mechanism of the transparent mode of clock information

时间戳消息填入 PTP 事件消息的修正字段, TSN 网络设备时钟收到 PTP 消息后可根据驻留时间对积聚误差进行误差补偿, 从而实现 5G-TSN 跨网时间同步。对于 5G 网络而言, 空口时间同步的精度将影响其时间戳的精度, 进而影响端到端时间同步的精度。因此, 目前在跨 5G-TSN 的时间同步方案研究中, 仍然以边界时钟补偿方案为主。

2.3 适配 TSN 的 5G 高可靠连接增强技术

终端移动及无线信道时变是 5G 与 TSN 协同传输面临的首要关键难题。在 R15 和 R16 版本中, 针对低时延和高可靠保证, 5G 在支持更大子载波间隔配置、mini-slot 设置、更低频谱效率的 MCS 等物理层技术及免授权调度、快速接入、双连接等高层协议等方面做了较多的增强和改进, 进一步降低无线网络接入时延和调度等待时延^[27-29]。文献 [30] 针对无线网络中的时延敏感通信业务流的资源分配机制进行了研究, 基于物理层信道质量信息 (Channel quality indicator, CQI), 对 5G 无线接入网的半静态调度 (Semi-persistent scheduling, SPS) 和动态分组调度机制 (Dynamic packet scheduling, DPS) 支持时延敏感通信业务流数目的情况进行了分析。

为了让 5G 无线接入网更有效的适配确定性传输机制, 5G 引入了时延敏感通信辅助信息 (Time sensitive communication associate information, TSCAI), 5G 核心网将通过 N2 接口向 gNB 进行传递 TSCAI 参数, 用于描述 gNB 入口和 UE 出口接口上的 TSC 流业务模式, 分别用于下行链路和上行链路方向的业务^[31-32]。TSCAI 来自于 AF, 经由 PCF/SMF/AMF 发送给 gNB, 以便 NG-RAN 预知 TSN 业务流的到达时间, 提前预留网络资源, 以便对 TSN 业务流进行更有效的周期性调度:

(1). 突发到达时间: 用于指示在给定流向(上行为 DS-TT 到 NW-TT, 下行为 NW-TT 到 DS-TT)

下 5G 网络入口端口的突发到达时间, 以帮助在 5G 空口上传输 TSN 业务流。

(2). 周期时间: 用于指示突发之间的时间, 以协助 5G 空口上 TSN 业务流的传输。

(3). 流方向: 以指示上述参数对应的是上行流还是下行流。

在针对 TSN 业务流的无线资源分配方面, 5G 基站引入了半静态调度方法, 以更好应对周期性的时间敏感业务流; 此外, 5G 基站应根据分配给 5G 系统的整体时延预算, 结合当前终端的信道状况反馈, 在信道状况较差时, 选择频谱效率较低但可靠性更高的调制编码方式 (MCS), 从而保证空口数据的可靠传输。总而言之, TSCAI 为 5G 空口的调度提供了时延限制和要求, 但并未实现 5G 空口的确定性调度机制, 仅限制了 5G 系统 (含核心网和无线接入网) 应保证 TSN 数据的处理和传输时延应尽可能的低, 并保证空口的数据传输的可靠性。

2.4 5G-TSN 统一资源管理模型

关于 5G 与 TSN 联合调度及联合管理的研究从 2019 年才兴起, 目前主要集中在对于 5G-TSN 联合网络的部署场景、针对时间敏感通信的 5G 空口调度机制框架开展研究, 还欠缺对 5G 与 TSN 统一资源管理方面的系统研究。

对于 5G 与 TSN 协同传输而言, 并非只将 5G 网络作为 TSN 网桥, 而应该从系统全局角度实现 5G 与 TSN 的联合管理和联合资源优化, 因此, 软件定义网络 (Software defined network, SDN) 成为实现端到端统一管理的关键技术, 并开始被引入到 TSN 的研究中^[33]。如图 5 所示, 该图展示了基于软件定义网络的 5G 与 TSN 集中化管控架构, 以便实现 5G 和 TSN 跨域信息的统一管理、统一配置。

5G 与 TSN 在网络架构、通信机理、协议机制、数据格式等各方面均存在明显的差异, 而 5G-TSN 的协同融合, 其本质就是实现实时或强实时

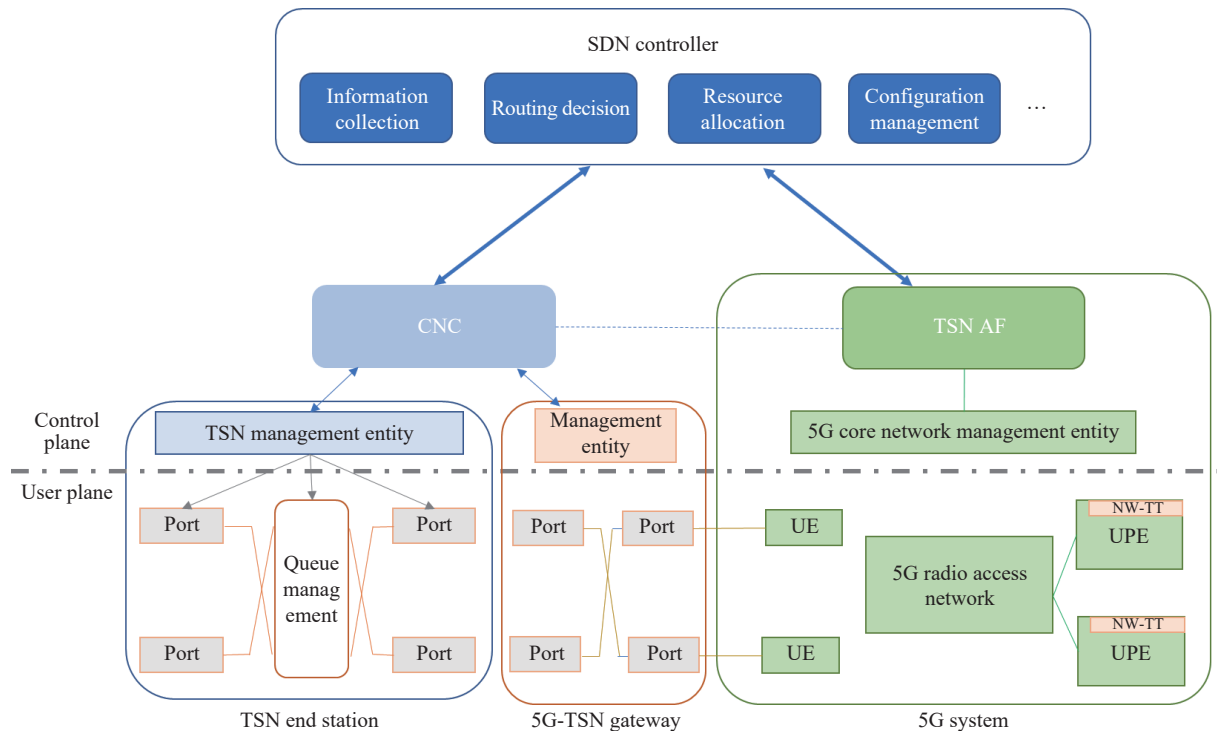


图 5 基于 SDN 的 5G-TSN 管控架构
Fig.5 SDN-based 5G-TSN management architecture

业务的跨网精准时延转发,关键在于两张异构网络资源的映射与配合,只有高效的资源协同,才能实现柔性的异构网络适配及无缝的跨网高可靠承载.

TSN 是在以太网架构上对二层机制的增强,从而实现端到端的确定性时延保障及高可靠传输,其物理层机制仍然是以太网帧结构,以时分的方式实现资源的复用.在控制层面,则通过资源预留、流量整形、时间感知的调度、帧抢占、帧复制与删除等机制来保证传输的实时性、确定性及可靠性.

5G 在资源属性及资源管控层面与 TSN 存在较大不同^[34-35].在资源属性层面,5G 的资源属性相比 TSN 而言更加多维化,除了时间维度(时隙)属性外,还增加了空域(多入多出)和频域(载波)两个维度的资源,从而为业务的承载提供了更多的资源选择;在资源管控层面,由于 5G 系统的传输瓶颈在空口,而空口资源是多用户共享,需要通过调度策略来进行资源的分配;基于 5G 服务质量索引(5G quality of service index, 5QI)为相应业务配置服务质量(Quality of service, QoS)模板,实现业务到 QoS 流的映射,并通过 PCF 完成不同流的 QoS 策略制定,基于不同 QoS 策略来完成空口资源的预留、抢占,从而保证高优先级业务的可靠传输^[36].

因此,针对 TSN 与 5G 在资源维度、调度控制

等方面的差异性,如何突破 TSN 信息向 5G 网络的单向传递,实现跨网信息的相互感知和共享,从而实现两者在资源分配、调度策略方面的协同,成为当前研究的重点^[37-39],文献[40]针对 5G 与 TSN 在资源方面的差异性,分析了 5G 无线链路呈现的丢包、设备移动性、上下行时延不对称的特征对确定性传输机制带来的影响,重点关注 5G 与 TSN QoS 等级划分的差异性.如图 6 所示,其中, $\lambda_i, i \in [0, n]$ 表示进入时间敏感网络交换节点出口不同队列的数据帧速率,即单位时间的数据帧个数; μ 是时间敏感网络针对高优先级业务的服务速率,即单位时间可发送的高优先级业务数据帧个数.而 $\lambda'_j, j \in [0, n]$ 表示通过时间敏感网络流量调度整形后,进入 5G 网络不同队列的数据帧速率, μ' 是 5G 空口的服务速率,即单位时间可服务的高优先级业务帧个数.若 5G 和 TSN 在 QoS 映射、资源调度等方面未能联动分析,将会造成数据的积压或传输时延的上升.因此,针对 TSN 数据流的协同管理机制、基于 5G 传输时延反馈的 TSN 链路层流量整形和帧抢占机制增强机制、5G 与 TSN 协同资源分配等关键技术方面需开展进一步研究.

3 5G+TSN 在工业控制领域的应用场景

工业控制领域是“5G+TSN”的重要应用场景,结合未来智能工厂中跨产线、跨车间实现多设备

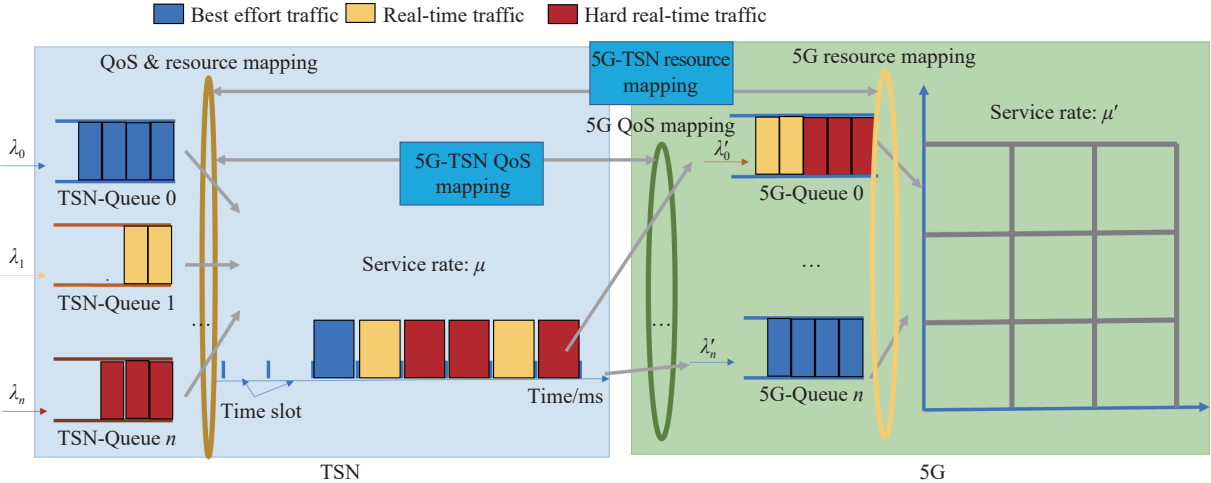


图 6 5G-TSN 联合资源管理及 QoS 映射示意图

Fig.6 Key technologies for 5G-TSN joint management and QoS mapping

协同生产需求, 集中控制需求将变得更为迫切, 原先分布式的控制功能将集中到具有更强大计算能力的控制云中, 一方面更加有利于生产协同, 另一方面是智能化发展的需要^[41-45].

少人化、无人化是未来智能工厂的典型特征, 随着机器视觉等人工智能技术的发展和成熟, 大量的重复性劳动将会由机械臂、移动机器人来承担. 在复杂生产环境中, 则需要多个机械臂及移动机器人间相互配合才能完成产品的装配及生产.

然而, 传统的工业控制大多在设备边缘进行直接控制, 竖井式特征导致多设备间的协同协作难以实现, 不能满足智能工厂的生产需求. 借助“5G+TSN”协同传输技术, 网络不仅能支持移动类型智能工业设备, 并且还能实现工业数据的确定性低时延传输与高可靠保障, 能实现感知、执行与控制的解耦, 实现了控制决策的集中, 为大规模设备间的协同协作提供了有力的技术支撑, 具体场景如图 7 所示.

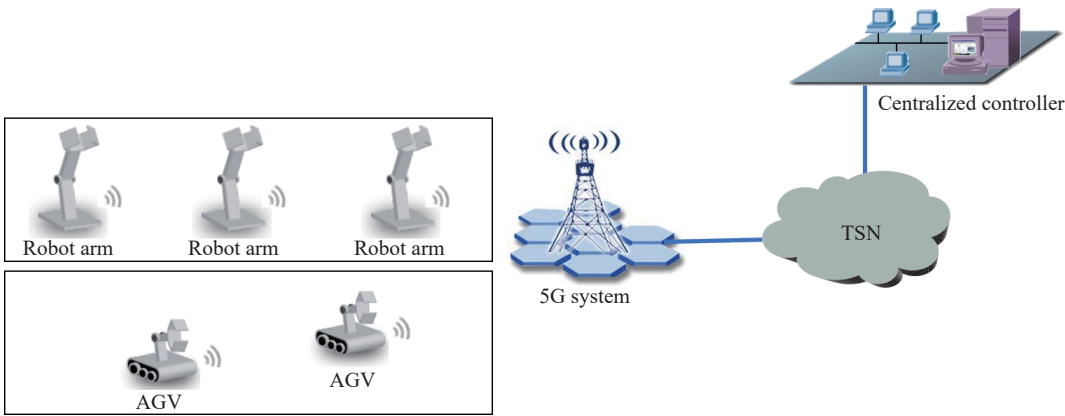


图 7 5G-TSN 网络在智能工厂中的应用场景示意图

Fig.7 Scenarios for 5G-TSN applied in a smart factory

此外, 由于设备间无需进行有线组网, 能够较好的根据生产需求进行设备组合, 从而实现跨车间、跨产线的生产协同, 为智能工厂柔性生产提供了扎实的网络基础支撑条件.

4 总结

先进信息通信技术与行业应用的融合将成为 5G 及后续移动通信系统演进的重要主题, 确定性

网络也将成为其演进的重要方向之一. 5G+TSN 网络在关键技术及适配工业应用两个维度也将持续的深化研究, 一方面是 5G 与 TSN 协同传输如何与当前工业场景、工业流程和工业现场网络进行适配; 另一方面是 5G+TSN 如何与确定性网络 (Deterministic network, DetNet) 进行协同融合, 实现数据的广域确定性传输, 支持智能工厂边界的不断延伸和扩展. 随着 5G 与 TSN 协同传输技术的

不断完善和演进,未来移动确定性网络将会在工业互联网领域发挥出更大的价值。

参 考 文 献

- [1] Wang J W. Technical requirement of future industrial internet. *Telecommun Sci*, 2019, 35(8): 26
(王俊文. 未来工业互联网发展的技术需求. 电信科学, 2019, 35(8): 26)
- [2] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. 5G for connected industries and automation (second edition) [R/OL]. *5G-ACIA* (2019-02)[2021-04-08]. https://5g-acia.org/wp-content/uploads/5G-ACIA_WP_5G-for-Connected-Industries-and-Automation-Second-Edition_SinglePages.pdf
- [3] Lu P, Li J H, Zhao W D. Applications of 5G in vertical industry. *ZTE Technol J*, 2019, 25(1): 67
(陆平, 李建华, 赵维铎. 5G在垂直行业中的应用. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67)
- [4] 3GPP. Service requirements for the 5G system [S/OL]. *3GPP* (2019-09-27)[2021-04-08]. <https://portal.3gpp.org/desktop-modules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107>
- [5] Zhu J Y, Zhang H S, Chen J. TSN and 5G integrated deployment requirements and network architecture evolution. *ZTE Technol J*, 2021, 27(6): 47
(朱瑾瑜, 张恒升, 陈洁. TSN与5G融合部署的需求及网络架构演进. 中兴通讯技术, 2021, 27(6): 47)
- [6] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Key 5G use cases and requirements [R/OL]. *5G-ACIA* (2020-05)[2020-04-01]. https://5g-acia.org/wp-content/uploads/5G-ACIA_WP_Key-5G-Use-Cases-and-Requirements_SinglePages.pdf
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Time sensitive networking task group [J/OL]. *Sciencepaper Online* (2017-05-03) [2021-04-08]. <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [8] Cong P Z, Tian Y, Gong X Y, et al. A survey of key protocol and application scenario of time-sensitive network. *Telecommun Sci*, 2019, 35(10): 31
(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. 电信科学, 2019, 35(10): 31)
- [9] Finn N. Introduction to time-sensitive networking. *IEEE Commun Stand Mag*, 2018, 2(2): 22
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineering. IEEE Std 802.1Q-2018 *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks*. New York: IEEE, 2018
- [11] Wang Y, Chen J D, Ning W, et al. A time-sensitive network scheduling algorithm based on improved ant colony optimization. *Alex Eng J*, 2021, 60(1): 107
- [12] Institute of Electrical and Electronics Engineering. IEEE Std 802.1AS-2020 *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Timing and Synchronization for Time-sensitive Applications*. New York: IEEE, 2020
- [13] Ulbricht M, Acevedo J. Integrating time-sensitive networking. *Computing Commun Networks*, 2020: 401
- [14] Nasrallah A, Balasubramanian V, Thyagaturu A, et al. Reconfiguration algorithms for high precision communications in time sensitive networks // 2019 *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Waikoloa, 2019: 1
- [15] Institute of Electrical and Electronics Engineering. P802.1Qcc/D2.0, Oct 2017 – IEEE draft standard for local and metropolitan area networks—media access control (MAC) bridges and virtual bridged local area networks amendment: Stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements [J/OL]. *Sciencepaper Online* (2017-01-01) [2021-04-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8118313>
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineering. IEEE Std 802.1Qbv-2015 *IEEE standard for local and metropolitan area networks—bridges and bridged networks - amendment 25: enhancements for scheduled traffic*. New York: IEEE, 2015
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineering. 802.1Qbu-2016 – IEEE standard for local and metropolitan area networks — bridges and bridged networks — Amendment 26: Frame preemption [J/OL]. *Sciencepaper Online* (2016-08-30) [2021-04-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7553415>
- [18] Institute of Electrical and Electronics Engineering. 802.1Qch-2017 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks —Bridges and bridged networks —Amendment 29: Cyclic queuing and forwarding [J/OL]. *Sciencepaper Online* (2017-06-28) [2021-12-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7961303>
- [19] Nasrallah A, Thyagaturu A S, Alharbi Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2019, 21(1): 88
- [20] 3GPP. System Architecture for the 5G System (5GS) [S/OL]. *3GPP* (2020-03-27)[2021-04-08]. <https://portal.3gpp.org/desktop-modules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>
- [21] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Integration of 5G with time-sensitive networking for industrial communications [R/OL]. *5G-ACIA* (2019-11)[2021-04-01]. <https://www.5g-acia.org/publications/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications>
- [22] 3GPP. Policy and charging control framework for the 5G system (5GS); stage 2 [S/OL]. *3GPP* (2019-12-22)[2021-04-08]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3334>
- [23] 3GPP. Procedures for the 5G System (5GS) [S/OL]. *3GPP* (2019-12-22)[2021-04-08]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3145>
- [24] Zhang P Y, Pang X, Bi Y X, et al. DSCD: Delay sensitive cross-domain virtual network embedding algorithm. *IEEE Trans Network Sci Eng*, 2020, 7(4): 2913

- [25] Larrañaga A, Lucas-Estañ M C, Martinez I, et al. Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0 // 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, 2020: 1111
- [26] Thomas L, Le Boudec J Y. On time synchronization issues in time-sensitive networks with regulators and nonideal clocks. *SIGMETRICS Perform Eval Rev*, 2020, 48(1): 51
- [27] Anand A, de Veciana G, Shakkottai S. Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2020, 28(2): 477
- [28] Ghosh A, Maeder A, Baker M, et al. 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE Access*, 2019, 7: 127639
- [29] Jiang X L, Luvisotto M, Pang Z B, et al. Reliable minimum cycle time of 5G NR based on data-driven channel characterization. *IEEE Trans Ind Inform*, 2021, 17(11): 7401
- [30] Abreu R B, Pocovi G, Jacobsen T H, et al. Scheduling enhancements and performance evaluation of downlink 5G time-sensitive communications. *IEEE Access*, 2020, 8: 128106
- [31] Godor I, Luvisotto M, Ruffini S, et al. A look inside 5G standards to support time synchronization for smart manufacturing. *IEEE Commun Stand Mag*, 2020, 4(3): 14
- [32] 3GPP. Architecture enhancements for non-3GPP access [S/OL]. 3GPP (2019-06-11)[2021-04-08].<https://portal.3gpp.org/desktop-modules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=850>
- [33] Liu J D, Li D, Zeng P. Research on future industrial network architecture based on SDN and TSN. *Autom Panor*, 2018, 35(10): 56 (刘金娣, 李栋, 曾鹏. 基于SDN&TSN的未来工业网络架构探究. 自动化博览, 2018, 35(10): 56)
- [34] Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.1CB-2017 - IEEE Standard for local and metropolitan area networks—Frame replication and elimination for reliability [J/OL]. *Sciencepaper Online* (2017-10-27) [2021-04-08].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8091139>
- [35] Belden Inc. Time sensitive networking [J/OL]. *White Paper Online* (2019-10) [2021-11-29].<https://www.belden.com/dfsmedia/f1e38517e0cd4caa8b1acb6619890f5e/7897-source>
- [36] Shu Z G, Taleb T. A novel QoS framework for network slicing in 5G and beyond networks based on SDN and NFV. *IEEE Netw*, 2020, 34(3): 256
- [37] Khoshnevisan M, Joseph V, Gupta P, et al. 5G industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network Architecture. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2019, 37(4): 947
- [38] Vitturi S, Zunino C, Sauter T. Industrial communication systems and their future challenges: Next-generation Ethernet, IIoT, and 5G. *Proc IEEE*, 2019, 107(6): 944
- [39] Cavalcanti D, Perez-Ramirez J, Rashid M M, et al. Extending accurate time distribution and timeliness capabilities over the air to enable future wireless industrial automation systems. *Proc IEEE*, 2019, 107(6): 1132
- [40] Striffler T, Michailow N, Bahr M. Time-sensitive networking in 5th generation cellular networks - current state and open topics // 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Dresden, 2019: 547
- [41] Cai Y K. *Research on Production Scheduling Optimization of Intelligent Factory* [Dissertation]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020 (蔡跃坤. 智能工厂生产调度优化研究[学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2020)
- [42] Tao F, Zhang M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 2017, 5: 20418
- [43] Bruckner D, Stănică M, Blair R, et al. An introduction to OPC UA TSN for industrial communication systems. *Proc IEEE*, 2019, 107(6): 1121
- [44] Zhao W D, Jiang B Z. Thoughts and practice of 5G+ industrial Internet. *ZTE Technol J*, 2020, 26(5): 57 (赵维铎, 蒋伯章. 5G+工业互联网的思考与实践. 中兴通讯技术, 2020, 26(5): 57)
- [45] Moreno A, Velez G, Ardanza A, et al. Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. *Int J Interact Des Manuf (Ijidem)*, 2017, 11(2): 365