

面向工业互联网的 5G-U 与时间敏感网络融合架构与技术

蔡岳平^{1,2,3}, 李栋⁴, 许驰⁴, 王振⁵, 张潇文¹

- (1. 重庆大学微电子与通信工程学院, 重庆 400030;
2. 信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400030;
3. 空天地网络互联与信息融合重庆市重点实验室, 重庆 400030;
4. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
5. 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所, 北京 100055)

摘 要: 工业互联网是工业 4.0 的关键使能技术, 而网络是工业互联网的基础。首先分析了典型工业互联网业务流量类型和需求, 以及时间敏感网络(TSN)和 5G-U 作为工业互联网网络的适配性; 接着探讨了 5G-U 与 TSN 融合的 4 种架构模式: 5G-U 作为 TSN 的网络、链路、网桥/交换机模式, 及 TSN 作为 5G-U 承载网络模式; 然后研究了 5G-U 与 TSN 融合的关键技术, 包括时间同步平面的融合、数据平面流量 QoS 框架与可靠桥接机制的融合以及管控平面的融合; 最后讨论了 5G-U 与 TSN 融合的研究挑战和发展趋势。

关键词: 时间敏感网络; 5G-U; 时间同步; 数据平面; 控制平面

中图分类号: TP393

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021161

Integrating 5G-U with time-sensitive networking for industrial Internet: architectures and technologies

CAI Yueping^{1,2,3}, LI Dong⁴, XU Chi⁴, WANG Zhen⁵, ZHANG Xiaowen¹

1. College of Microelectronic and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China
2. Key Laboratory of Dependable Service Computing in Cyber Physical Society Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China
3. Chongqing Key Laboratory of Space Information Network and Intelligent Information Fusion, Chongqing 400030, China
4. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
5. Instrumentation Technology and Economy Institute (ITEI), Beijing 100055, China

Abstract: Industrial Internet is one of enabling technologies for Industry 4.0. Networking is one indispensable technology of industrial Internet. The traffic types and communication requirements of typical industrial services were analyzed first. TSN (time-sensitive networking) and 5G-U (5G unlicensed) were considered as the promising wireline and wireless solutions for industrial Internet, respectively. The integration network architectures of 5G-U and TSN were presented based on four models, which included 5G-U as TSN networks, links, bridges/switches, and TSN as transport networks of 5G-U. The key technologies of the integrated architectures were integrations of time-synchronization plane, data plane, and control plane. Finally, research challenges and potential research directions in the filed were discussed.

Keywords: time-sensitive networking, 5G unlicensed, time synchronization, data plane, control plane

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-07-29

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2020YFB1710900); 重庆市技术创新与应用发展专项 5G 重大主题专项基金资助项目(No.cstc2019jscx-zdztzxX0023); 重庆市自然科学基金资助项目(No.cstc2019jcyj-msxmX0375)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1710900), Chongqing Technology Innovation and Application Development Key Project on 5G (No.cstc2019jscx-zdztzxX0023), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2019jcyj-msxmX0375)

1 引言

2013 年, 在德国汉诺威工业博览会上提出的“工业 4.0”概念^[1]描绘了制造业的未来愿景, 提出了以信息物理系统为基础的第四次工业革命。企业的数字化转型驱动了以生产高度数字化、网络化与智能化为标志的第四次工业革命的发生。工业互联网是工业 4.0 即第四次工业革命的关键使能技术。工业互联网通过新一代信息技术与制造技术深度融合, 实现人机物的全面互联, 构建起全要素、全产业链、全价值链、全面连接的新型生产制造和服务体系, 是数字化转型的实现途径^[2]。工业互联网已成为实体经济数字化转型的关键, 同时也是实现工业 4.0 的基础。

网络是工业互联网系统互联互通的基础。工业互联网需要确定有界低时延、低抖动、高可靠、高精度、泛在的通信连接, 满足工业控制等生产通信的需要。工业互联网业务流量类型众多, 网络通信需求各异。典型工业互联网业务流量类型及其通信服务质量需求如表 1 所示^[3]。

在离散工厂或过程自动化工厂中, 一般而言, 存在自动化控制设备与工厂级系统和应用程序之间的垂直通信, 以及自动化设备和控制设备之间的水平通信^[3]。垂直通信流量包括控制器、本地工厂管理服务器和云服务数据中心之间的通信, 如报警、控制、操作命令等各种事件。水平通信产生实时流量, 包括实时同步、循环同步、循环异步等流量类型, 可以是控制器到控制器的通信, 也可以是控制器到现场设备的通信。

实时同步流量具有周期性, 要求确定有界低时延、零抖动、零数据分组丢失的通信服务, 属于关键高优先级通信。典型场景包括同步交换中的控制器到控制器、控制器到输入输出设备的通信。循环同步或异步流量也具有周期性, 要求设备间周期性交换大小相同的报文信息, 但是此周期与数据传输的周期无关, 即不要求设备间严格时间同步。典型场景包括离散制造工厂中的执行器、传感器和可编程逻辑控制器之间的输入/输出更新。事件流包括控制事件流、报警和操作命令事件流, 具有偶发性。当系统中发生需要引起注意的输入或输出变量更改时, 将生成事件消息, 需要时延界保证。事件可能是状态更改、操作员命令, 或者是已超过阈值的警报或警告。网络控制流量类型主要包含网络控制相关的周期性消息。虽然该类型消息数量较少, 但是其通信服务质量要求却很高。典型场景包括时钟同步、网络冗余和拓扑检测。配置和诊断流量类型用于传输配置和诊断数据, 例如设备配置和固件下载, 具有偶发性, 需要吞吐量保证。视频或音频流是终端之间的视频或音频数据流, 具有周期性, 需要吞吐量的保证。“尽力而为”流量类型是传输任何应用程序数据的默认类型, 不需提供带宽或时延保证。

传统的有线工业通信基于现场总线和工业以太网技术提供实时可靠的连接服务。常用的现场总线技术包括 Modbus、CAN(controller area network)、Profibus (process field bus) 等^[4], 而工业以太网技术种类繁多, 包括 Sercos (serial realtime communication specification)、PROFINET (process field

表 1 典型工业互联网业务流量类型及其通信服务质量需求

流量类型	周期性/偶发性	典型周期	数据传输保证	抖动容限	数据分组丢失容限	典型数据大小/B	关键度	流量优先级
实时同步	周期性	100 μs~2 ms	最终期限	0	0	固定 30~100	高	6
循环同步	周期性	500 μs~1 ms	时延界(<i>t</i>)	不超过 <i>t</i>	0	固定 50~1 000	高	5
循环异步	周期性	2 ms~20 ms	时延界(<i>t</i>)	不超过 <i>t</i>	1~4 帧	固定 50~1 000	高	5
控制事件	偶发性	10 ms~50 ms	时延界(<i>t</i>)	—	可	可变 100~200	高	4
报警和操作命令事件	偶发性	2 s	时延界(<i>t</i>)	—	可	可变 100~1 500	中	3
网络控制	周期性	50 ms~1 s	吞吐量	是	可	可变 50~500	高	7
配置诊断	偶发性	—	吞吐量	—	可	可变 500~1 500	中	2
视频	周期性	帧速率	吞吐量	—	可	可变 1 000~1 500	低	1
音频/语音	周期性	采样速率	吞吐量	—	可	可变 1 000~1 500	低	1
尽力而为	偶发性	—	无	—	可	可变 30~1 500	低	0

net)、EtherCAT (Ethernet control automation technology) 等^[5]。这些异构的工业通信总线和网络标准兼容性差,数据互通困难,导致形成了工业生产的一座座信息孤岛,无法满足未来工业互联网全面连接的目标。

无线通信为工业自动化系统提供了泛在灵活的通信连接,使其摆脱线缆的束缚,具备移动性支持。常用的工业无线通信技术包括 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 等,但是存在连接的实时性差、可靠性与稳定性差、易受干扰等问题。目前工厂内常用的专用无线通信网络包括 WIA-FA (wireless network for industrial automation-factory automation)^[6]、ISA (international society of automation) 100-11a^[7]、WirelessHART (wireless highway addressable remote transducer)^[7]等,但是它们存在通信距离短、标准不兼容、信号质量不稳定等问题。

时间敏感网络(TSN, time-sensitive networking)与 5G-U (5G unlicensed)是面向工业互联网的关键有线与无线通信网络技术。下面将分析两者融合架构、关键技术及挑战。

2 5G-U 与时间敏感网络的适配性

2.1 时间敏感网络简述

IEEE 802.1 工作组在 2012 年由音视频桥接 (AVB, audio/video bridging) 任务组更名为 TSN 任务组^[8]。时间敏感网络基于以太网,统一扩展时间同步、确定流调度、高可靠无缝冗余、网络管控等功能,提供确定有界低时延、低抖动、高可靠流传输服务,支持多业务流高质量共网传输^[9-14]。时间

敏感网络可应用于工业自动化系统、智能电网、车辆内通信、航空宇航系统、运营商网络等领域。时间敏感网络的标准化有望解决工业现场总线与工业以太网的异构性和兼容性问题,实现有线工业通信网络的统一与互联互通。

2.2 5G 技术演进与生态扩展

3GPP 5G 无线通信网络技术也是工业互联网的重要连接技术之一^[15-16]。5G 的三大典型应用场景包括增强移动宽带、大规模机器类通信以及超高可靠低时延通信。5G 可满足工业互联网不同类型业务的通信需求。5G 通信具备不需要布线、部署灵活以及移动性支持等优势,在自动巡检、机器人等工业领域有着广泛应用前景^[17-18]。图 1 是 3GPP 标准组织关于 5G 技术演进及其应用生态系统扩展的路线图^[19]。已商用的 5G 系统基于 Rel-15,包括非独立组网技术和独立组网技术。Rel-16 主要针对工业物联网、5G 私有网络以及车联网 C-V2X (cellular vehicle-to-everything) 等扩展的生态系统应用^[20]。现在 3GPP 正在研究制定 Rel-17 的 5G 技术,主要是突出垂直行业应用生态全面扩展^[21]。增强的 5G 功能包括免授权/共享频谱的使用、时敏通信、高精度定位、非地面网络的融合等。为解决目前 5G 授权频段频谱资源紧缺的问题,基于新空口的免授权频谱接入 5G-U 技术(包括使用授权频谱与免授权频谱)成为未来工业互联网的关键使能技术之一^[22-23]。

2.3 5G-U 免授权频谱扩展

随着移动网络业务流量的暴增,频谱资源短缺问题凸显,目前主要解决方法是利用更高频段(例

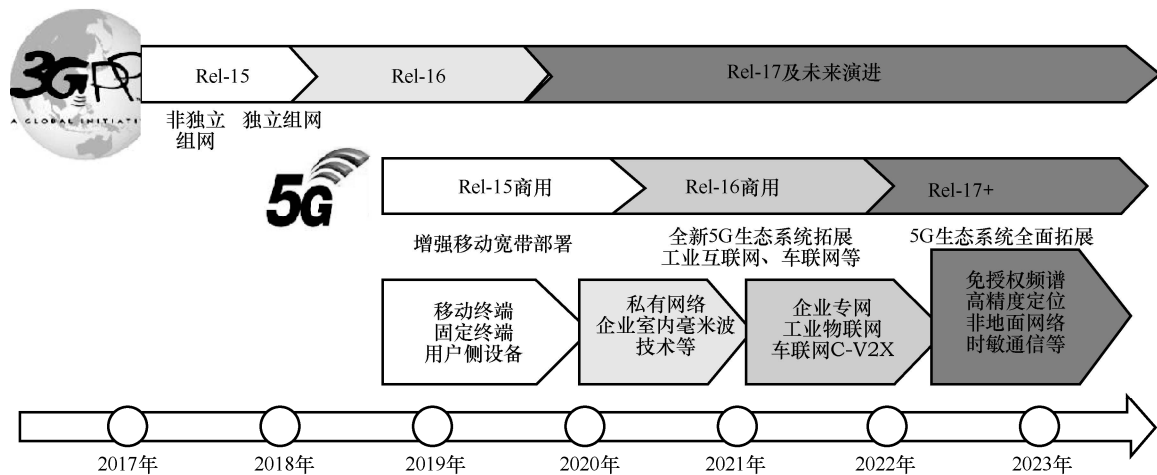
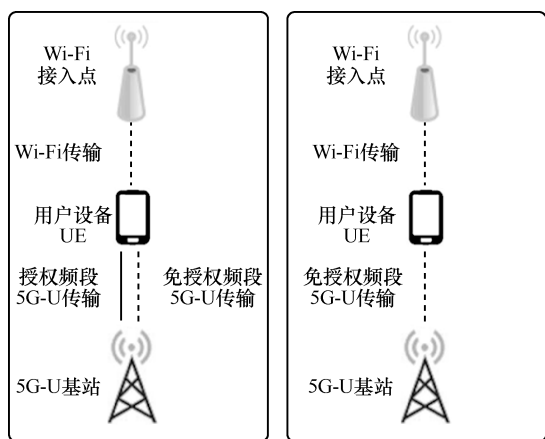


图 1 3GPP 的 5G 技术演进及其生态系统扩展路线

如毫米波频段)和免授权频段。3GPP 提出授权频谱辅助接入 (LAA, licensed assisted access) 技术, 以将长期演进 (LTE, long term evolution) 系统扩展到免授权频段, 即 LTE-U (LTE unlicensed) 系统^[24]。随着 5G 技术的发展, LTE-U 从 5 GHz 以下扩展到 60 GHz 毫米波频段, 向前发展为 5G-U 系统^[25-30]。5G-U 是 LTE-U/LAA 技术从特高频/超高频频段到极高频频段 (即毫米波频段) 的延伸, 通过 LAA 与载波聚合 (CA, carrier aggregation) 技术的演进^[31]以及 5G 新空口技术的扩展, 5G-U 系统使用更可靠的授权频谱作为主载波, 在终端和基站之间建立控制链路连接, 进行控制信令传输、认证和移动性管理, 而数据流量则通过频谱感知, 利用跨授权和免授权频段的聚合无线电资源进行传输^[22]。5G-U 有效提升了系统性能和容量, 解决了目前 5G 系统授权频段频谱资源紧缺的问题。

5G-U 系统工作模式如图 2 所示, 包括授权辅助接入与独立免授权频段操作 2 种模式。



(a) 模式1 (授权辅助接入) (b) 模式2 (独立免授权频段操作)

图 2 5G-U 系统工作模式

1) 授权辅助接入模式

授权辅助接入模式是 5G-U 系统的重点研究模式, 通过载波聚合使用授权频段和免授权频段共同为 5G-U 用户提供通信服务。其主要思想是在更可靠的授权频段上承载网络节点之间的大多数敏感信令和信令, 而数据有效载荷的传送可以根据当前系统的负载由授权频段和免授权频段共同承载。融合使用授权和免授权频段^[27-28]的方式包括: ①以载波聚合方式融合作为主载波的授权频段和作为辅助载波的免授权频段; ②以双连接技术融合作为主载波的授权频段和作为辅助载波的免授权频段; ③上行链路使用授权频段, 下行链路使用免授权频段。在这种授权辅助接入模式下, 用户首先向基站请求免授权资源; 然后基站向 Wi-Fi 系统控制中心查询免授权频段的资源占用情况, 通过频谱感知获取空闲频段, 并通过分配的授权信道向用户指示控制信息, 以保证控制信令的可靠传输; 最后用户使用感知到的空闲免授权频段进行数据传输。

2) 独立免授权频段操作模式

独立免授权频段操作模式下 5G-U 系统只通过免授权频段进行通信^[32-33], 是一种只在毫米波频段工作的蜂窝技术。控制信令和信号都在免授权频谱信道中传输。由于没有授权频谱信道的支持, 信号在不可靠的信道上传输, 可靠性、安全性和资源管理的有效性难以保证。因此, 这种模式需要更稳健的信令结构。

5G 和 Wi-Fi 作为 2 种无线标准, 都不断演进以满足对高级连接的迫切需求, 而 5G-U 作为 5G 的增加免授权频谱版本, 缓解了 5G 授权频谱资源紧缺的压力, 进一步提高了网络的性能和容量。表 2 给出了 5G-U、5G 和 Wi-Fi 在不同指标下的特点对比

表 2 5G-U、5G 和 Wi-Fi 在不同指标下的特点对比

对比项	5G-U	5G	Wi-Fi
频谱	授权频段+免授权频段	授权频段	免授权频段
流量可靠性	较高可靠性	高可靠性	可靠性和可用性无法保证
端到端时延	低时延 (授权频段)	超低时延	超低时延但无法保证
移动性	移动性管理强	无中断移动性	服务中断难以预测
覆盖范围	广域和本地覆盖	广域和本地覆盖	本地覆盖
安全性	较高	高	低
成本	CAPEX、OPEX 较低	CAPEX 高	OPEX 高
业务连续性	可与 5G 无缝切换	—	无法与 5G 交互
应用场景	关键性业务 (授权频段)+非关键性业务 (免授权频段)	关键性机器类通信等	企业非关键性用例

比。Wi-Fi 适用于室内或本地部署以及需要高速和尽力而为流量传输的应用。相较于 Wi-Fi, 5G 结合了中、低频段的优点, 具有良好的覆盖范围, 并且毫米波高频段具有极高的容量、低预测时延和高精度定位能力。5G 在授权频段上运行, 能提供高可靠性和更好的可预测性, 满足关键通信的需求。5G 完全支持大规模机器类通信、增强移动宽带、TSN 等, 可以满足比 Wi-Fi 更广泛 QoS 要求的应用。

5G-U 系统融合使用授权频谱和免授权频谱, 结合了 5G 和 Wi-Fi 的优点。一方面, 5G-U 将 5G 扩展到了免授权频谱, 缓解了授权频谱资源紧缺的压力, 将非关键流量卸载到免授权频谱承载, 提高了系统容量, 降低了部署成本。另一方面, 5G-U 使用授权频谱辅助接入, 关键控制信息、高安全性要求、时间敏感流量通过授权频谱传输, 解决了 Wi-Fi 不可靠、不安全的问题。与 Wi-Fi 相比, 5G-U 可以支持更多用例, 提供具有移动性的广域部署和局域覆盖。但是免授权频谱的引入也带来了 5G-U 与其他免授权系统的频谱竞争问题, 还需进一步研究它们在免授权频谱上的共存解决方案^[34-36]。

综上所述, 5G-U 系统的融合优势可以满足工业自动化领域多种类型流量对时延、可靠性、安全性等指标的不同要求, 并且在经济高效的免授权频谱中承载大部分非关键应用流量, 减少了授权频谱的负载压力, 大大降低了部署和维护成本, 是未来工业互联网经济高效的无线解决方案之一。

3 5G-U 与 TSN 融合架构

基于以太网的 TSN 通过功能增强提供高可靠与确定有界低时延流传送服务, 是面向未来工业互联网、车辆内通信、智能电网等高可靠确定低时延应用的核心网络技术之一。随着 IEEE 802.1 工作组关于 TSN 相关标准工作的推进, TSN 功能不断增强并逐渐得到工业界的广泛支持, 具备在工业互联网中实际部署应用的基础和前景。无线通信技术也是工业互联网的重要连接技术之一。无线通信技术具备不需要布线、部署灵活以及移动性支持等优势, 在自动巡检、机器人等工业领域有着广泛的应用前景。TSN 与 5G-U 分别是未来有线与无线工业互联网网络的关键技术。5G-U 与 TSN 融合是构建未来灵活、高效、柔性、可靠及安全工业互联网的基础。

3.1 5G-U 与 TSN 融合研究现状

如何利用 5G-U 技术实现 TSN 功能并与其无缝

融合是目前产业界与学术界的研究热点之一。高通公司提出并设计了面向工业互联网的利用 5G 实现 TSN 交换机功能的思想和原型系统, 以实现 5G 与 TSN 的互联互通^[37]。英特尔公司阐述了将 TSN 技术能力应用至无线网络面临的技术挑战, 以及如何扩展现有无线网络包括 Wi-Fi 与 5G 的可靠性与低时延能力的相关技术, 并讨论了无线 TSN 与有线 TSN 融合面临的挑战^[38]。德国应用科学大学联合诺基亚贝尔实验室提出了融合 5G 与工业以太网的方案并对相应的融合应用场景进行了分析, 对融合网络的配置管理技术进行了讨论^[39]。同时, 诺基亚公司还发布了面向工业 4.0 的 3GPP 5G 系统与工业以太网融合部署的白皮书^[40], 特别阐述了 5G 支持时间敏感通信的相关标准。爱立信公司发表了 5G-TSN 融合满足工业自动化网络需求的论文^[41], 分析了智慧工厂通信需求, 阐述了 5G 与 TSN 各自满足该通信需求的技术, 以及 5G-TSN 融合的相关技术。文献[42]研究了工业互联网场景下 5G TSN 关键技术, 分析了相关工业互联网应用场景, 以及 5G-TSN 融合的关键技术。

在标准化方面, 3GPP 在 Rel-16 中规定了对 TSN 的 5G 支持, 并在 Rel-17 中进一步增强, 以允许 5G 系统与 TSN 的无缝融合^[43]。另外, 5G 工业互联网与自动化联盟 5G ACIA 也发布了 5G 与 TSN/工业以太网融合的白皮书^[44-45]。该白皮书描述并研究了 5G 与 TSN/工业以太网在典型工业用例中的融合, 即控制器到控制器、控制器到设备和设备到计算的通信, 分析了 5G 系统在 Rel-16 与 Rel-17 版本中支持与 TSN/工业以太网融合所需的所有功能。中国工业互联网产业联盟 AII 也对 5G 与 TSN 融合部署的场景、需求以及技术进行了分析^[46]。

虽然 5G 与 TSN 融合架构的研究已得到业界关注, 但当前研究工作仍存在以下问题与挑战: ①现有技术方案主要考虑 5G 系统作为 TSN 虚拟网桥, 较少考虑其他架构模式; ②5G 系统作为虚拟网桥与 TSN 的协同调度、同步、管控等技术尚处于预研阶段; ③5G 系统使用的授权频段频谱资源有限, 难以满足未来工业互联网业务发展的需求, 特别是超高清视频、虚拟现实与增强现实等大带宽应用。另一方面, 5G-U 与 TSN 融合的研究才刚刚开始。与 5G 系统相比, 5G-U 可更经济高效地同时使用授权频谱与免授权频谱满足工业互联网各种类型业务的通信需求, 同时降低网络资本成本 (CAPEX,

capital expenditure) 和运营成本 (OPEX, operational expenditure) 支出。如何灵活构建 5G-U 与 TSN 融合架构并高效使用授权频谱与免授权频谱满足不同工业互联网业务需求成为亟待解决的关键技术难题之一。

3.2 5G-U 与 TSN 融合架构模式

5G-U 与 TSN 融合架构的 4 种模式包括 5G-U 独立作为 TSN 网络, 5G-U 作为 TSN 链路(单 TSN 域), 5G-U 作为 TSN 网桥/交换机(多 TSN 域), 以及 TSN 作为 5G-U 承载网络。

1) 5G-U 独立作为 TSN 网络

5G-U 独立作为 TSN 网络模式如图 3 所示。5G-U 系统直接互联控制器与 5G-U 终端, 实现控制器与传感器/执行器间通信, 通过 UE (user equipment) 或者 UPF (user plane function) 向 TSN 终端或者控制器提供 TSN 服务。该工作模式具备不用布线、灵活部署、支持终端移动性等诸多优点, 适合移动终端与控制器间的通信。典型应用场景包括无线传感/驱动控制。

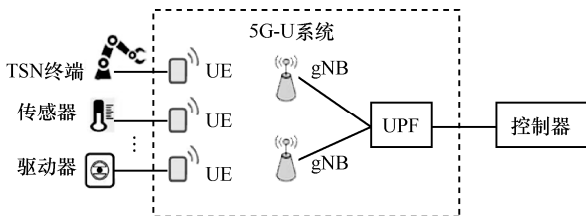


图 3 5G-U 独立作为 TSN 网络模式

2) 5G-U 作为 TSN 链路(单 TSN 域)

5G-U 作为现有 TSN 系统的无线链路实现相应连接功能, 位于单个 TSN 工作域内, 如图 4 所示。TSN 终端直接与无线 UE 相连, 或者通过其他 TSN 网桥或交换机连接, 扩展 TSN 系统, 通过有线与无线网络系统无缝连接, 结合有线通信与无线通信两者优点, 满足各种业务和场景需要。典型应用场景包括自动引导小车(含多 TSN 终端站)。

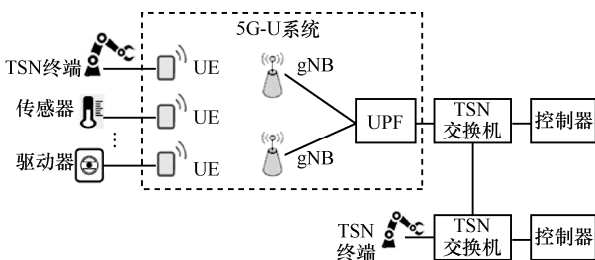


图 4 5G-U 作为 TSN 链路模式

3) 5G-U 作为 TSN 网桥/交换机(多 TSN 域)

如图 5 所示, 5G-U 与多 TSN 域互连网络模型中, 5G-U 系统作为 TSN 网桥/交换机互联多个 TSN 域, 满足不同网络系统间的无线协同, 既能确定可靠传输关键业务数据流, 也可共网传输普通数据流, 不用布线, 部署灵活方便, 满足各种场景需要。典型应用场景包括不同工业产线的协同控制。

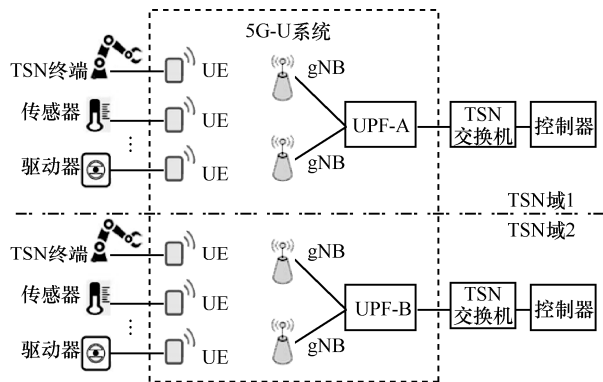


图 5 5G-U 作为 TSN 网桥/交换机(多 TSN 域)模式

4) TSN 作为 5G-U 承载网络

如图 6 所示, 在 TSN 作为 5G-U 的承载网络模式中, TSN 连接 5G-U 基站与 UPF 构建高可靠低时延承载网络, 满足 TSN 终端设备间确定低时延通信业务需求, 同时实现移动承载网络中同相流的时间同步需求。相比基于电路交换的光承载网络, TSN 能实现分组统计复用, 提高带宽利用效率, 降低网络成本。典型应用场景包括移动前传网络。

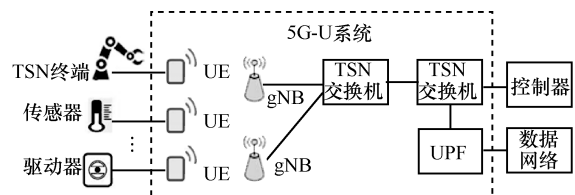


图 6 TSN 作为 5G-U 承载网络模式

3.3 5G-U 与 TSN 融合架构应用与演进路线

5G-U 与 TSN 融合架构的 4 种模式均可按需在工业互联网中应用, 下面以智慧工厂内网为例进行说明, 如图 7 所示^[44]。不同生产单元可使用不同的工业通信网络技术。例如 1 号生产单元使用的是 PROFINET 技术, 2 号生产单元使用的却是 Modbus 技术, 3 号和 4 号生产单元使用的是 5G-U 无线网络技术。在有线工业网络部分, 虽然单个生产单元内部控制器至传感器/驱动器的通信可以由各自技

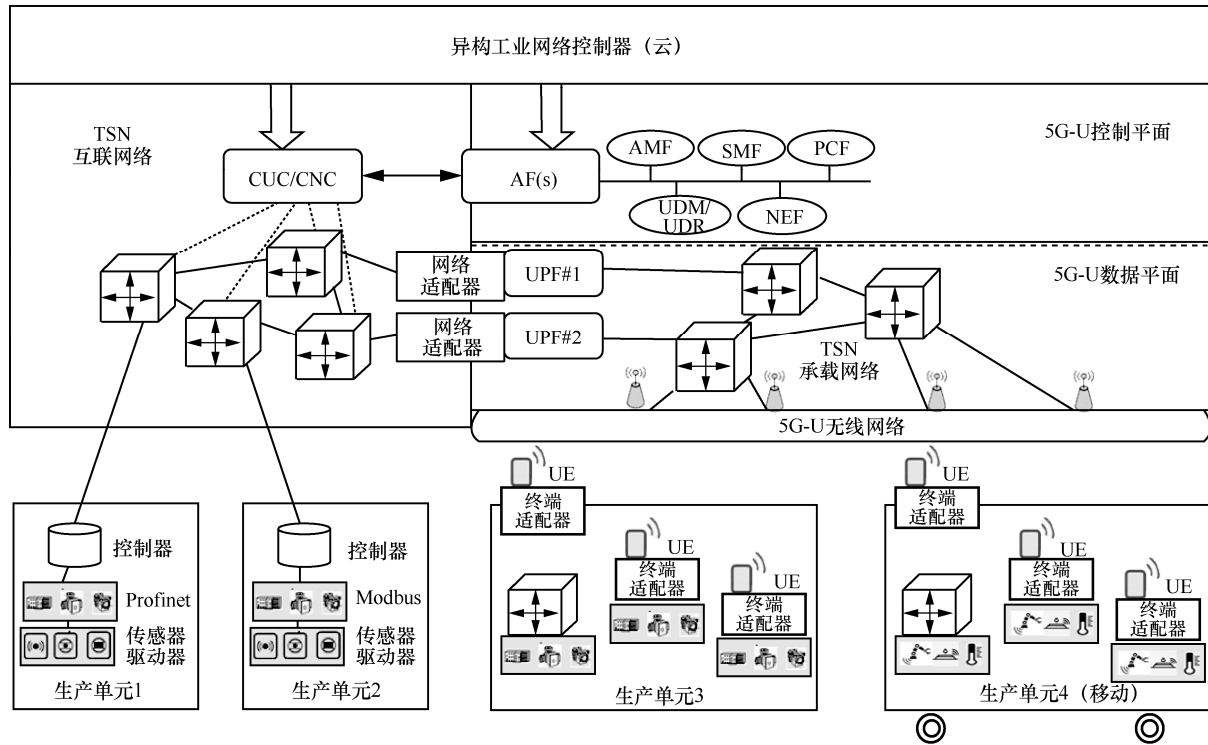


图 7 智慧工厂内 5G-U 与 TSN 融合架构应用示意

术独立解决，但是生产单元间控制器至控制器、控制器至传感器/驱动器的通信，需要通过 5G-U 与 TSN 融合架构实现。由 TSN 核心互联网络实现基于不同现场总线或工业以太网构建的生产单元间互联，而 5G-U 无线网络用于互联具备 5G-U 模组的异构固定终端或者移动终端，并通过终端适配器与各种工业系统实现互通。5G-U 系统数据平面基于 TSN 的承载网络连接无线站点与用户平面功能 UPF，而 UPF 通过网络适配器与 TSN 核心互联网络实现协议适配/转换。5G-U 系统控制平面通过应用功能（AF, application function）模块实现与 TSN 集中网络/用户配置器之间的通信，以及网络配置信息和管理信息的互通和映射。异构工业网络控制器或者云化控制器通过 5G-U 和 TSN 融合网络实现终端/控制器至云化控制器间的通信。

5G-U 与 TSN 融合不可能一蹴而就，将会随着关键技术的突破以及应用场景的需求变化而不断向前演进，为未来工业互联网部署奠定技术基础。

1) 初期：5G-U 实现 TSN 功能

如何使 5G-U 具备 TSN 功能是融合首先需要解决的技术难题，包括 5G-U 与 TSN 实现精确时间同步的能力；5G-U 实现类似 TSN 的流调度与资源分配机制，对关键通信流量保证确定有界低时延和低

抖动的能力等。

2) 中期：5G-U 与 TSN 并行部署

当 5G-U 成为无线 TSN 时，具备实现无线工业以太网的能力，可以与 TSN 并行部署，实现有线与无线网络的冗余部署，可有效提高工业互联网系统的灵活性与可靠性。但是，5G-U 与 TSN 管控等功能尚未完全融合。

3) 后期：5G-U 与 TSN 无缝融合

当 5G-U 与 TSN 无缝融合时，5G-U 可以作为 TSN 网桥/交换机间的无线链路或直接作为 TSN 网桥/交换机系统实现数据交换功能，同时 TSN 作为 5G-U 的承载网络，并且融合网络实现统一网络管控和资源分配。5G-U 与 TSN 融合成为一个整体，作为工业互联网网络连接的解决方案。

4 5G-U 与 TSN 融合关键技术

4.1 时间同步平面融合

有线 TSN 与无线 5G-U 实现时间同步是面向工业应用场景的关键能力需求之一^[47-50]。有线 TSN 采用 gPTP（generalized precise time protocol）实现时间同步，5G-U 系统有自身的时钟同步技术。如何实现 5G-U 与 TSN 融合系统的跨域时间同步是关键技术挑战之一。

目前的时间同步方法主要有透明时钟法，如图 8 所示。针对大规模网络中数量繁多的交换设备往往会带来较大的时间积聚误差问题，基于透明时钟法不需要维持主从时钟状态，也不需要进行时钟同步操作。TSN 作为主时钟，通过 UPF/UE 预测 5G 入口和出口的时延，将消息的时间戳填入 gPTP 事件消息的修正字段，TSN 设备时钟收到 gPTP 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-U 系统与 TSN 跨网时间同步。5G-U 系统各组成部分使用 5G-U 系统内部时钟，通过 NW-TT (network side TSN translator) 与 DS-TT (device side TSN translator) 实现 5G-U 系统时钟与 TSN 系统时钟的转换。

4.2 数据平面融合-流量 QoS 框架

如何将 TSN 业务流量 QoS 准确地映射至 5G-U 流量 QoS，进行相应处理并保证时间敏感流量的性能尤为关键^[51-52]。如图 9 所示，在 5G-U 系统中采用 5G 系统关于流量处理的相关概念。通过时延关键保证比特速率 (DC-GBR, delay critical guaranteed bit rate)，结合时间敏感通信辅助信息 (TSCAI, time-sensitive communication assisted information) 对无线资源进行预约，保证时延性能需求。5QI (5G

QoS indicator) 是 5G 系统定义的服务质量 (QoS, quality of service) 指标。对于工业网络中高实时周期性同步流，如运动控制，将采用 5QI 提高在无线侧调度的优先级，降低传输时延。同时，采用 TSCAI 来描述流量特征，包括通信模式 (周期与非周期)、流量方向 (上行与下行)、流量的时间 (到达与上界) 等。根据业务流特征和模型，采用相应协同的流量调度策略，减少时延抖动，同时保证时间同步。利用 5G-U 的免授权频谱通信，卸载大吞吐量时延不敏感应用流量，满足其应用需求的同时，减少对时间敏感流量的影响。

4.3 数据平面融合-可靠桥接机制

5G-U 系统是连接有线 TSN 与工业以太网或工业总线的候选技术之一。如何使 5G-U 系统实现类似于 TSN 交换机的高可靠桥接功能是实现 5G-U 与 TSN 融合的关键技术之一。如图 10 所示，终端站或者 TSN 网桥可通过不同终端转换器向不同 UPF 构建冗余 PDU (protocol data unit) 会话，从而构建冗余通信连接，实现高可靠桥接功能。TSN 的帧复制与消除可靠性机制可与 5G-U 的可靠桥接机制实现无缝融合，当复制分组进入 5G-U 系统时，通过可靠桥接进行并行转发，提高分组的可靠性。

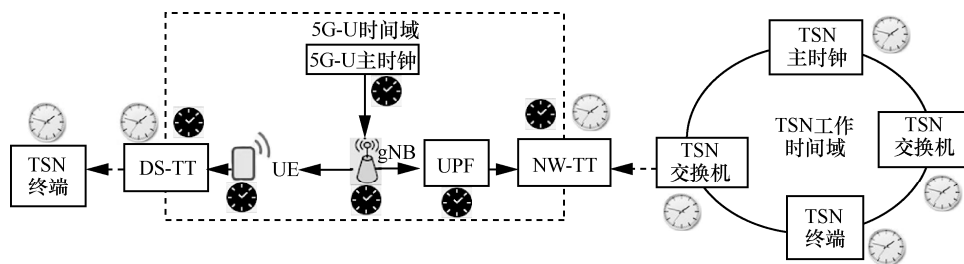


图 8 5G-U 与 TSN 融合的透明时钟同步机制

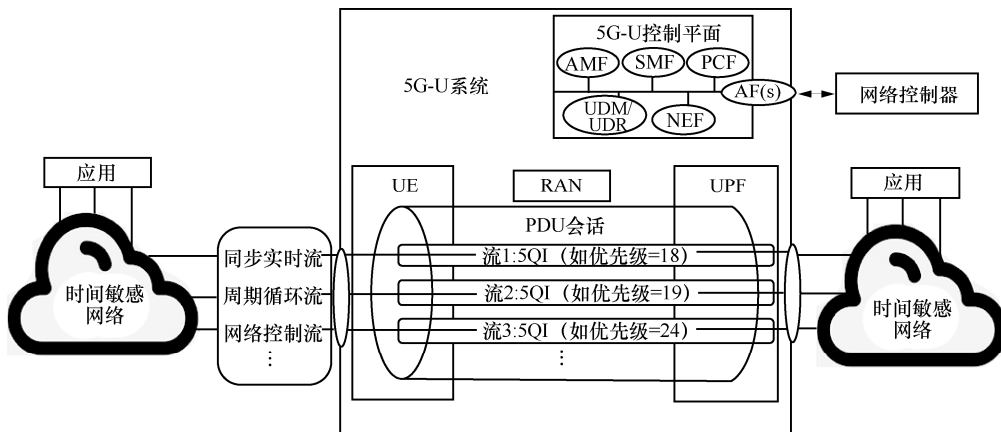


图 9 时间敏感网络业务流量至 5G-U 系统 QoS 映射

4.4 网络管控平面融合

5G-U 系统控制平面的网络暴露功能 (NEF, network exposure function) 通过应用功能 AF 模块与 TSN 集中网络配置器 (CNC, centralized network configuration) 实现通信, 如图 11 所示。通信可以基于 IEEE 802.1AB 的数据链路层发现协议 (LLDP, link layer discovery protocol) 实现邻居发现与链路信息交互。TSN 流的需求信息将映射为 5G-U 的流量 QoS 信息, 通过配置 5G-U 系统以满足流量需求。

简单网络管理协议 (SNMP, simple network management protocol) 基于 IP 用于网桥和终端的监测与管理, 是现在应用最广泛的网络管理协议。因此, 为了确保 5G-U 系统与时间敏感网络无缝融合, 网络管理系统也需要融合。5G-U 虚拟 TSN 网桥需要支持 SNMP 代理功能, 通过连接 UE 和 UPF 的 DS-TT 和 NW-TT 以太网端口, 收集连接设备与端口的相关状态信息, 特别是端口状态的管理。同时,

5G-U 虚拟 TSN 网桥通过端口和 LLDP 收集网络拓扑与网络状态信息, 保存至 MIB (managing information base), 任何端口状态变化或端口间连接变化, 都需通知集中网络配置器 CNC, 以便重新配置该虚拟网桥^[40]。

随着网络管理技术的演进, TSN CNC 集中网络配置器未来将采用 NETCONF (IETF RFC 6241) 或者 RESTCONF (IETF RFC 8040) 协议, 以及 YANG 数据建模语言^[53], 对网络设备与终端进行统一管理。5G-U 虚拟网桥需要支持 MIB、NETCONF、RESTCONF、YANG 等协议, 以便与 TSN 实现管控平面的融合。

5 5G-U 与 TSN 融合研究挑战

5.1 多工作时钟域同步及容错

不同的工厂生产单元各自使用独立的工作时钟, 而整个工厂有一个全局时钟。如何协同工厂内

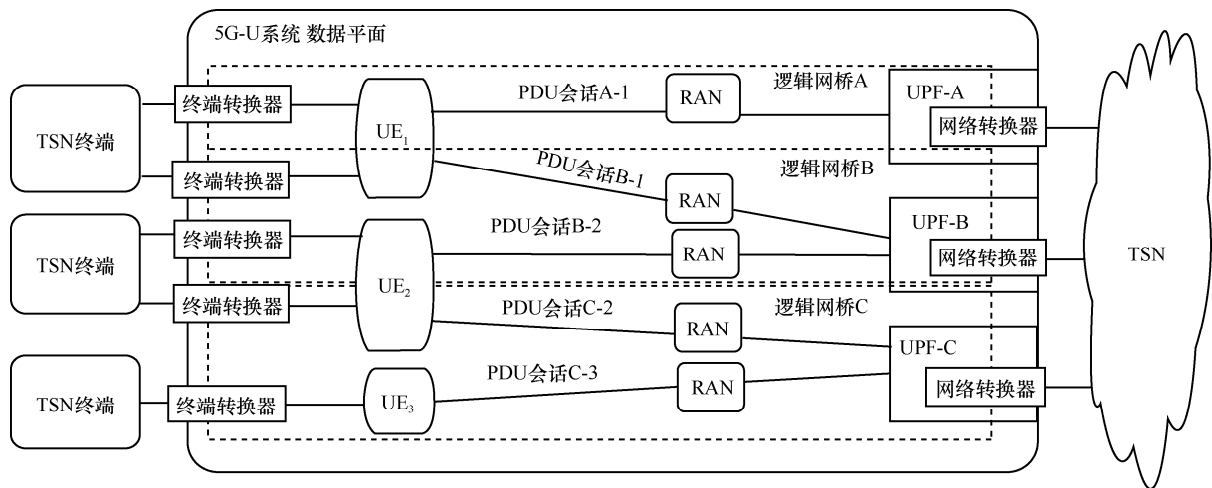


图 10 5G-U 逻辑网桥高可靠桥接功能示意

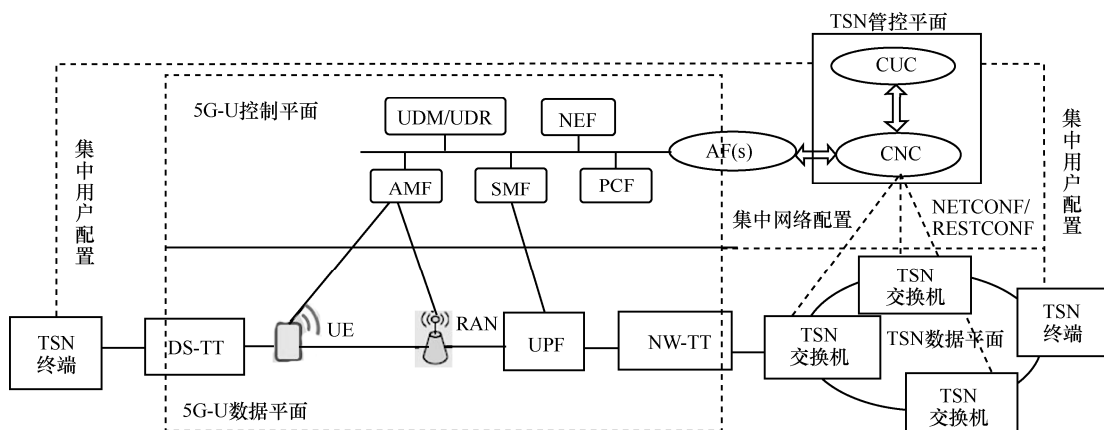


图 11 5G-U 与 TSN 管控平面融合设计

多工作时钟域的同步并实现可靠容错, 是 5G-U 与 TSN 融合的研究挑战之一。TSN 设备包括终端和网桥, 均支持至少 2 个 gPTP 时钟域 (一个工作时钟域、一个全局时钟域), 为了可靠冗余设计, 一般还同时具备至少 2 个冗余的 gPTP 时钟域。5G-U 系统可以支持多达 32 甚至 128 个 gPTP 工作时钟域^[44]。5G-U 与 TSN 融合网络如何进行多工作时钟域的协同及容错设计十分关键。同时, 通过 5G-U 与 TSN 融合网络相连的多个工作时钟域 UE 终端设备间的同步机制和同步精度需进一步研究与提升。因为 UE 终端设备间同步需双向无线电传播或者有线加无线传播, 且时延不确定。另外, 上行链路 TSN 时间同步也是 3GPP 正在研究的难点问题之一。

5.2 端到端协同流量调度

TSN 同步和异步流量调度机制是保证分组有界低时延、低抖动传输的关键技术, 标准化程度较高。5G-U 网络通过 MAC (media access control) 机制按照流量 QoS 需求进行无线资源的分配和调度, 以满足流量的传输需求。5G-U 与 TSN 融合网络如何进行端到端的协同流量调度是研究挑战之一。同时, 如何优化利用 5G-U 网络免授权频谱的流量卸载功能, 且不影响业务流量 QoS 性能仍待进一步研究。端到端协同流量调度相关研究课题包括异构流量 QoS 特征建模与映射机制、有线与无线网络资源协同分配机制、QoS 感知 5G-U 虚拟网桥设计、5G-U 免授权频谱智能流量卸载机制等。

5.3 融合网络无缝冗余

TSN 采用帧复制与消除 (FRER, frame replication and elimination for reliability) 可靠性机制实现可靠服务^[9]。5G-U 网络可通过不同方法实现不同程度的冗余设计^[54]。5G-U 系统可通过为单个 PDU 会话创建冗余独立的 N3 传送网路径 (隧道) 实现 RAN (radio access network) 与锚点 UPF 的可靠传送, 即基于冗余业务流的高可靠传输; 也可通过多天线、多载波及数据复制实现 UE 与 RAN 之间的可靠接入, 即基于冗余接入的可靠传输; 还可通过 RAN 的双连接包括独立的 RAN 节点和 UPF 节点实现双 PDU 会话传递冗余分组, 实现链路和节点的双重冗余, 即基于冗余会话的高可靠传输。最后, 5G-U 系统可通过在 UPF 和 NG-RAN 之间提供 2 条冗余的传输层路径来实现冗余传输, 即基于传输层冗余的高可靠传输。目前 TSN 与 5G-U 的可靠冗余机制各自独立, 如何在 5G-U 和 TSN 融合网络中实现有

线无线网络的无缝冗余是研究挑战之一。

5.4 统一有线无线网络管控

TSN 的控制平面包括集中式、分布式以及网络集中用户分布 3 种模式^[12]。TSN 通常基于集中用户配置 (CUC, centralized user configuration) 和 CNC 实现对用户和网络的配置。5G-U 网络的控制平面基于服务架构 (SBA, service based architecture), 支持包括 AMF (access and mobility function)、SMF (session management function)、PCF (policy control function)、NEF 等多种网络功能的部署。5G-U 与 TSN 融合网络通过 TSN AF 应用功能模块实现 CNC 与 5G-U 控制平面间通信。AF 一方面将 TSN 流量 QoS 和调度配置信息用于 5G-U 虚拟桥的配置, 另一方面将 5G-U 虚拟网桥的能力告知 TSN 集中网络配置器 CNC。虽然通过 AF 可基本实现两者控制平面的互通, 要真正实现 5G-U 与 TSN 内生统一网络管控机制仍面临诸多挑战。

5.5 融合网络安全接入控制

有线 TSN 与无线 5G-U 融合应用至工业互联网场景存在一定安全风险, 特别是无线 5G-U 技术使用了免授权频谱, 可能与 Wi-Fi 网络冲突且容易受到网络攻击。如何在 5G-U 与 TSN 融合的工业互联网场景下对潜在安全因素进行分析并提出相应解决方案, 是 5G-U 与 TSN 融合架构实际部署前必须解决的关键技术挑战之一。

6 结束语

TSN 与 5G-U 分别是未来面向工业互联网的有线与无线网络关键技术。5G-U 与 TSN 融合是构建未来灵活、高效、柔性、可靠及安全的工业互联网的基础。本文分析了 5G-U 与 TSN 融合架构的 4 种模式, 讨论了时间同步平面、数据平面与网络管控平面三大平面 5G-U 与 TSN 融合的关键技术, 并展望了融合架构的五大研究挑战。TSN 有线通信网络技术与 5G-U 无线通信网络技术互为补充、无缝融合, 将为未来工业互联网的蓬勃发展奠定坚实技术基础。

参考文献:

- [1] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: final report of the Industrie 4.0 Working Group[R]. 2013.
- [2] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构 2.0 版[R]. 2020. Alliance of Industrial Internet. Industrial Internet architecture version

- 2.0[R]. 2020.
- [3] Industrial Internet Consortium. Time sensitive networks for flexible manufacturing testbed characterization and mapping of converged traffic types V1.0[R]. 2019.
- [4] THOMESSE J P. Fieldbus technology in industrial automation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(6): 1073-1101.
- [5] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and industry 4.0[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, 11(1): 17-27.
- [6] LIANG W, ZHENG M, ZHANG J L, et al. WIA-FA and its applications to digital factory: a wireless network solution for factory automation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1053-1073.
- [7] PETERSEN S, CARLSEN S. WirelessHART versus ISA100.11a: the format war hits the factory floor[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2011, 5(4): 23-34.
- [8] FINN N. Introduction to time-sensitive networking[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 22-28.
- [9] BELLO L, STEINER W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1094-1120.
- [10] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. *计算机学报*, 2021, 44(7): 1378-1397.
- CAI Y P, YAO Z C, LI T C. A survey on time-sensitive networking: standards and state-of-the-art[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(7): 1378-1397.
- [11] MESSENGER J L. Time-sensitive networking: an introduction[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 29-33.
- [12] 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[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 88-145.
- [13] 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.
- HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(6): 160-176.
- [14] 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.
- [15] VITTURI S, ZUNINO C, SAUTER T. Industrial communication systems and their future challenges: next-generation Ethernet, IIoT, and 5G[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 944-961.
- [16] SIMSEK M, AIJAZ A, DOHLER M, et al. 5G-enabled tactile Internet[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(3): 460-473.
- [17] GUNDALL M, SCHNEIDER J, SCHOTTEN H D, et al. 5G as enabler for industrie 4.0 use cases: challenges and concepts[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1401-1408.
- [18] LUDWIG S, KARRENBAUER M, FELLAN A, et al. A5G architecture for the factory of the future[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1409-1416.
- [19] BERTENYI B. 5G evolution: what's next?[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(1): 4-8.
- [20] BAEK S, KIM D, TESANOVIC M, et al. 3GPP new radio release 16: evolution of 5G for industrial Internet of things[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(1): 41-47.
- [21] GHOSH A, MAEDER A, BAKER M, et al. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 127639-127651.
- [22] LU X, PETROV V, MOLTCHANOV D, et al. 5G-U: conceptualizing integrated utilization of licensed and unlicensed spectrum for future IoT[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(7): 92-98.
- [23] LAGEN S, GIUPPONI L, GOYAL S, et al. New radio beam-based access to unlicensed spectrum: design challenges and solutions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(1): 8-37.
- [24] CUI H X, LEUNG V C M, LI S Q, et al. LTE in the unlicensed band: overview, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4): 99-105.
- [25] HIRZALLAH M, KRUNZ M, KECICIOGLU B, et al. 5G new radio unlicensed: challenges and evaluation[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 1: 1-13.
- [26] CUI Q M, GU Y, NI W, et al. Effective capacity of licensed-assisted access in unlicensed spectrum for 5G: from theory to application[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(8): 1754-1767.
- [27] LU X, SOPIN E, PETROV V, et al. Integrated use of licensed- and unlicensed-band mmWave radio technology in 5G and beyond[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 24376-24391.
- [28] HAMPEL G, LI C, LI J Y. 5G ultra-reliable low-latency communications in factory automation leveraging licensed and unlicensed bands[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(5): 117-123.
- [29] YANG J Y, AI B, YOU I, et al. Ultra-reliable communications for industrial Internet of things: design considerations and channel modeling[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(4): 104-111.
- [30] SUTTON G J, ZENG J, LIU R P, et al. Enabling ultra-reliable and low-latency communications through unlicensed spectrum[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(2): 70-77.
- [31] ZHANG W S, WANG C X, GE X H, et al. Enhanced 5G cognitive radio networks based on spectrum sharing and spectrum aggregation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(12): 6304-6316.
- [32] MEKURIA F, MFUPE L. Spectrum sharing for unlicensed 5G networks[C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [33] CUI Q M, NI W, LI S H, et al. Learning-assisted clustered access of 5G/B5G networks to unlicensed spectrum[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(1): 31-37.
- [34] PATRICIELLO N, LAGÉN S, BOJOVIĆ B, et al. NR-U and IEEE 802.11 technologies coexistence in unlicensed mmWave spectrum: models and evaluation[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 71254-71271.
- [35] NAIK G, PARK J M, ASHDOWN J, et al. Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: opportunities and challenges[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 153027-153056.
- [36] ALI M, QAISAR S, NAEEM M, et al. LTE-U WiFi HetNets: enabling spectrum sharing for 5G/beyond 5G systems[J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2020, 3(4): 60-65.
- [37] KHOSHNEVISAN M, JOSEPH V, GUPTA P, et al. 5G industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network archi-

- ecture[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 947-959.
- [38] 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[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1132-1152.
- [39] NEUMANN A, WISNIEWSKI L, GANESAN R S, et al. Towards integration of Industrial Ethernet with 5G mobile networks[C]//2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [40] ROST M, CHANDRAMOULI D, KOLDING T. 5G plug-and-produce [R]. Nokia White Paper, 2020.
- [41] FARKAS J, VARGA B, MIKLOS G, et al. 5G-TSN integration meets networking requirements for industrial automation[J]. Ericsson Technology Journal, 2019: 2-9.
- [42] 张强, 王卫斌, 陆光辉. 工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 21-26.
ZHANG Q, WANG W B, LU G H. 5G TSN key technologies in industrial Internet scenario[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(6): 21-26.
- [43] 3GPP Technical Specification 23. 501. System architecture for the 5G system: V16.5.1 [S]. 2020.
- [44] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Integration of 5G with time-sensitive networking for industrial communications[R]. 2020.
- [45] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Integration of industrial Ethernet networks with 5G networks[R]. 2019.
- [46] 工业互联网产业联盟. 5G+TSN 融合部署场景与技术发展白皮书(征求意见稿)V1.0[R]. 2020.
Alliance of Industrial Internet. 5G+TSN integrated scenarios and technology development (call for comments) Version 1.0[R]. 2020.
- [47] GUTIÉRREZ M, STEINER W, DOBRIN R, et al. Synchronization quality of IEEE 802.1AS in large-scale industrial automation networks[C]//2017 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 273-282.
- [48] SCHÜNGEL M, DIETRICH S, GINTHÖR D, et al. Analysis of time synchronization for converged wired and wireless networks[C]//2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 198-205.
- [49] SCHÜNGEL M, DIETRICH S, GINTHÖR D, et al. Single message distribution of timing information for time synchronization in converged wired and wireless networks[C]//2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 286-293.
- [50] GUNDALL M, HUBER C, ROST P, et al. Integration of 5G with TSN as prerequisite for a highly flexible future industrial automation: time synchronization based on IEEE 802.1AS[C]//IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2020: 3823-3830.
- [51] GINTHÖR D, VON HOYNINGEN-HUENE J, GUILLAUME R, et al. Analysis of multi-user scheduling in a TSN-enabled 5G system for industrial applications[C]//2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII). Piscataway: IEEE Press, 2019: 190-199.
- [52] GINTHÖR D, GUILLAUME R, VON HOYNINGEN-HUENE J, et al. End-to-end optimized joint scheduling of converged wireless and wired time-sensitive networks[C]//2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 222-229.
- [53] SCHÖNWÄLDER J, BJÖRKLUND M, SHAFER P. Network configuration management using NETCONF and YANG[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(9): 166-173.
- [54] 谭仕勇, 倪慧, 张万强, 等. 5G 标准之网络架构: 构建万物互联的智能世界[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
TAN S Y, NI H, ZHANG W Q, et al. 5G standards of network architecture: building an intelligent world with everything connected[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.

[作者简介]



蔡岳平(1980—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 重庆大学副教授, 主要研究方向为工业互联网、确定性网络、5G/6G 网络、数据中心网络、算力网络等。

李栋(1986—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 主要研究方向为工业控制网络、工业 5G、TSN 等。

许驰(1987—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 中国科学院沈阳自动化研究所副研究员, 主要研究方向为工业无线网络、5G URLLC 等。

王振(1987—), 男, 北京人, 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所高级工程师, 主要研究方向为工业网络、边缘计算、工业测控等。

张潇文(1998—), 女, 山西太原人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络和 5G 网络。