

面向 5G TSN 的网络架构演进及增强技术研究

吴欣泽¹, 信金灿², 张化²

(1.北京邮电大学 信息与通信工程学院,北京 100876;2.中国电信股份有限公司研究院,北京 102209)

摘要:近年来,时间敏感网络技术(TSN)的发展逐步引起工业界的广泛关注,其凭借低抖动、低延时、确定性传输等优势,为对传输时延有较高要求的应用场景提供了有力支撑,成为下一代工业网络承载技术的重要演进方向之一。为了在端到端的层面上满足某些垂直行业业务对低时延、高可靠的需求,5G网络在R15 URLLC的基础上对QoS、空口同步、头压缩等方面进行了增强,以满足TSN网络对于5G设备的严苛要求。首先从垂直行业需求入手,分析了5G网络与TSN融合的必要性,最后结合3GPP R16标准进展研究了TSN对于5G商用网络改造需求以及面临的挑战。

关键词: 时间敏感网络;5G网络架构;高可靠低时延通信;QoS

中图分类号: TN915

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200791

中文引用格式: 吴欣泽,信金灿,张化. 面向5G TSN的网络架构演进及增强技术研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 8-13.

英文引用格式: Wu Xinze, Xin Jincan, Zhang Hua. Study on network architecture evolution and enhancement technology for 5G TSN[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(10): 8-13.

Study on network architecture evolution and enhancement technology for 5G TSN

Wu Xinze¹, Xin Jincan², Zhang Hua²

(1.School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Communication, Beijing 100876, China;

2.China Telecom Corporation Limited Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Recent years, the development of Time Sensitive Network(TSN) technology has gradually attracted widespread attention from industry. Characterized by low jitter, low delay and deterministic transmission, TSN has provided strong support for scenarios with high requirements of transmission delay. It has become one of the important evolution directions of the next-generation industrial network bearer technology. In order to meet the low-latency and high-reliability requirements of vertical industry services at the end-to-end level, 5G network has enhanced QoS, air interface synchronization, header compression and other aspects to meet the strict requirements of TSN network for 5G equipment on the basis of R15 URLLC. Starting from the demands of vertical industries, this article analyzes the necessity of the integration of TSN and 5G network. The needs and challenges of TSN for 5G commercial network transformation has also been studied based on the 3GPP R16 standardization progress in the end.

Key words: time sensitive network; 5G network architecture; URLLC; QoS

0 引言

作为新一代移动通信系统,5G开启了全连接、全业务的时代,实现一网万用,使能行业数字化转型。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对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^[1]。

表1给出了工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)领域部分场景对时延和可靠性的需求。具体来说,在5G初期,URLLC主要应用于VR/AR等领域,需满足1ms用户面时延下 10^{-5} 的可靠性需求。随着IIoT的进一步发展,URLLC业务应用领域愈加广泛,这些场景对

时延和可靠性提出了更高的要求,例如,远程驾驶要求在5ms用户面时延下实现 10^{-5} 的可靠性;电力分配系统的要求是2ms用户面时延下实现 10^{-6} 的可靠性;而工厂自动化场景的要求2ms用户面时延下实现 10^{-6} 的可靠性。

为了实现对这一应用场景的支持,3GPP在R15/R16标准针中对空口技术、协议层和架构设计等多方面进行优化设计,其中3GPP R16版本聚焦URLLC场景,增加了对垂直行业功能需求的支持,在R16正式确定的15个研究方向中,除了对虚拟现实(Virtual Reality, VR)/增强现实(Augmented Reality, AR)等业务进行增强之外,明确对智能电网、工厂自动化等IIoT更多场景,以及基于

5G R16 演进技术 5G R16 Evolution Technology

表 1 3GPP R16 定义的 URLLC 用户场景需求

场景	用例	可靠性/%	端到端时延/ms
智能电网	电力分配	99.9999	2
	配电网故障与断电管理	99.9999	5
工厂自动	运动控制	99.9999	2
AR/VR	—	99.999	1
车联网	远程驾驶	99.999	5
	高级驾驶	99.999	10

5G NR 的 V2X 场景, 在时延和可靠性方面提出了更高的要求:

(1)进一步降低空口时延:5G 新空口在上行链路中引入了无授权访问的概念,减少了上行链路资源请求和授权过程;还支持 eMBB 业务和 URLLC 业务在资源冲突时的优先级处理,以进一步降低在公网和垂直行业共存场景中用户传输等待的时间。

(2)数据传输可靠性增强:5G 支持多 TRP 传输机制,基于空分、频分、时分的方式重复发送传输块,以提高分集增益;同时支持多连接机制,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,其中 PD CP 层复制增强配置多达 4 个传输通道,可以根据信道质量动态选择激活其中的任意两路,从而实现 99.9999% 的可靠性^[2]。

标准以太网采用基于竞争的信道接入方式,数据传输由于排队等因素具有不确定性,只能提供“尽力而为”的服务。虽然传统的工业以太网协议(如 Profinet、EtherCAT、Ethernet/IP、CC-Link 等)也提出了各自的确定性时间传输解决方案,但不同协议之间的兼容性低,阻碍了实时网络的发展^[3]。随着大数据、云计算与工业信息领域的融合发展,上述协议更不能满足工业控制和自动驾驶等场景对网络超低时延、高可靠的传输服务。为此,IEEE802.1 时间敏感网络任务组为工业互联网的时间敏感型数据制定了低时延、低抖动的确定性数据传输标准,以构建一个统一的数据链路层协议,即时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN)。

TSN 技术通过网络时钟同步、高精度的流量调度和智能化的网络管控等,为时间敏感应用提供可靠的数据传输保障^[4]。TSN 技术可以同时解决标准以太网的不确定性和工业以太网的复杂性,代表了标准化和高质量的工业通信演进方向,成为目前国际产业界广泛聚焦的关键技术。

以工业为代表的垂直行业对 5G 网络提出了严苛的业务体验、效率及性能要求,然而 TSN 技术凭借其优势使能 5G 网络安全可靠的确定性数据传输^[5]。首先,TSN 技术在现有的以太网 QoS 功能基础上,根据业务流量的特点增加了包括时间片调度、抢占、流监控及过滤等流量调度特性,可以确保 5G 网络流量的高质量确定性传

输;其次,TSN 技术基于标准的以太网协议体系,具备互操作性强、开放性好、性能佳的优势,可以更好地支持 5G 网络设备间的精密协作与互联互通;最后,TSN 遵循 SDN 体系架构,可实现设备及网络的灵活配置、管理及按需调度,为 5G 网络业务流量提供智能化、差异化承载服务。由此可见,TSN 与 5G 网络融合将成为 5G 网络系统向确定化演进的重要技术方向。

本文介绍了 TSN 整体架构以及与 5G 融合部署技术思路,重点分析了 TSN 对于 5G 网络升级的需求,分别从 QoS 调度、头压缩等方面介绍了无线侧的增强需求,并归纳了 3GPP R16 对于无线网络架构的标准化工作。

1 TSN 架构与 5G 融合

工业互联网领域下,要实现以云端服务器远程管控跨区域工业系统,必须依靠 TSN。TSN 是一种两层网络技术,其数据转发依靠以太网数据帧的包头信息,数据帧的负载信息不受上层网络协议限制,所以 TSN 能够在标准以太网络上建立分布式、可同步化的实时系统,实现异构性网络的实时性数据交换与控制。

1.1 TSN 架构模型

TSN 相对于之前的工业网络技术在网络管控能力上做了多维度的增强,可以支撑更大规模、更复杂流量模型下网络的自动化配置,降低人为配置和运维的复杂度^[6]。在 IIOT 领域中,TSN 的功能架构遵循 SDN 技术思路,其网络管理以 IEEE std802.1 Qcc-2018 为基础,采用集中式控制模型,整体架构如图 1 所示,由中心用户控制器(Central User Controller, CUC)、中心网络控制器(Central Network Controller, CNC)、网管以及网络节点组成。

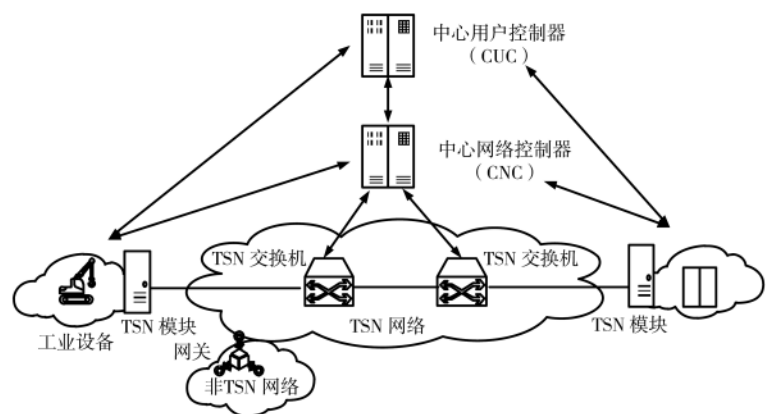


图 1 TSN 与工业互联网整体架构

(1)CUC 节点:作为网络系统用户侧界面,用于管理工业应用系统并通过 UNI 接口向 CNC 提供端到端应用系统之间网络业务配置要求。

(2)CNC 节点:具备 IEEEstd802.1Q-2018 所定义的时间敏感网络相关特性的综合配置能力,通过南向接口向网络节点下发相关配置。

(3)转发设备节点:负责进行实际的报文转发,并支

5G R16 演进技术 5G R16 Evolution Technology

持相关 TSN 特性的执行;根据应用场景及网元在网络中的位置,将 TSN 转发设备分为网关、桥设备、端设备 3 种类型:

①网关设备:主要部署于时间敏感网络域边缘,支持在数据链路层、网络层及应用层实现跨 TSN 域、TSN 域与非 TSN 域之间的互通。

②网桥设备:主要部署于 TSN 域内部,实现 TSN 域内部业务单元(车间、产线、设备)的互联互通。工厂内部建议以三层架构部署网桥设备,即核心、汇聚、接入层设备。核心层设备部署于工厂级机房,实现工厂内部各车间之间的互联互通;汇聚层设备部署于车间级机房实现车间内部不同产线之间、集中式控制器与设备之间的互联互通;接入设备部署于生产现场实现现场设备、传感器等通信接口的通信协议转换并与控制器、检测监控装置进行互联互通。

③端设备:指具备 TSN 功能的工业设备,包括控制器、PLC、伺服、I/O 等设备。

(4)网管节点:可以与 CNC 节点物理上合设,负责网络设备的故障监控及资源管理。

1.2 TSN 与 5G 融合部署

TSN 与 5G 分别是未来有线与无线工业互联网的关键技术,二者融合部署是构建未来灵活、高效、可靠及安全的工业互联网的技术基础。3GPP R16 23.501^[7]中已经明确提出 TSN 与 5G 深度融合的技术思路,如图 2 所示。在 5G TSN 架构中,5GS 相对于业务系统被视为 TSN 中的网桥(5GS Bridge),支持 TSN 集中式架构和时间同步机制,并具有精准的流量调度能力,可以实现 UPF 与 UE 之间的确定性多种业务流量的共网高质量传输。

5GS 网桥由 UPF/NW-TT 侧的端口、UE 和 UPF 之间的用户面隧道以及 UE/DS-TT 侧的端口组成。对于 TSN 网络的每个 5GS 网桥,NW-TT 上的端口支持与 TSN 网络的连接,DS-TT 侧的端口与 PDU 会话相关联,为 TSN 网络提供连接。对于给定的 UPF,每个 DS-TT 端口只有

一个 PDU 会话。所有通过特定 UPF 连接到同一个 TSN 网络的 PDU 会话被分组到一个 5GS 网桥中。UE/DS-TT 侧和 UPF/NW-TT 侧的每个端口的功能作为 5GS 网桥配置的一部分进行集成,并通知 TSN AF 交付给 CNC 进行 TSN 网桥注册和修改。

2 5G 网络升级需求分析

相比 URLLC 技术在可靠性和时延方面的保障,TSN 技术进一步在时延抖动和时间同步方面对 5G 网络进行增强,对包括核心网在内的各个环节进行性能优化,以实现端到端极致的低时延高可靠。

2.1 TSN 对 5G 核心网需求

为了支持 TSN 应用,3GPP R16 对 5G 核心网提出了如下的需求:

(1)支持确定性传输

对于 NW-TT 和 DS-TT,应支持 IEEE802.1 Qbv 调度机制、IEEE802.1 QCI 流粒度的过滤和策略以及报文缓存和转发机制,以满足多种类别流量对网络可用带宽和端到端时延不同的要求;另外,SMF 通过 PCF 与 TSN AF 建立连接,交互 5GS Bridge 信息,包括时延、与相邻 TSN 节点的拓扑关系等,以及端口配置信息,转发给对应的 UE 和 UPF,以保证业务流量的共网高质量传输。

(2)支持时钟同步

为了实现 TSN 同步机制,整个端到端 5G 系统可看作是一个 IEEE 802.1AS 时间感知系统。如图 3 所示,有两个时间同步域,分别为 5G 时间域和 TSN 时间域。5GS 内部的节点同步到 5G 时钟;UE/DS-TT 通过高精度授时方式、UPF/NW-TT 通过底层 PTP 承载网实现与 5G 时钟的同步。

对于 TSN 时钟传递,需要支持 gPTP 和时间戳等功能;NW-TT 接收来自 TSN 系统的 gPTP 报文,并在 gPTP 报文头中加上时间戳,通过 UPF 将 gPTP 报文发送给 DS-TT;DS-TT 则根据接收到 gPTP 报文的时间以及时间戳信息,计算 gPTP 报文在 5GS 内的驻留时间,并设置 gPTP 报文头进行时延补偿,完成本地和 TSN 时钟的同

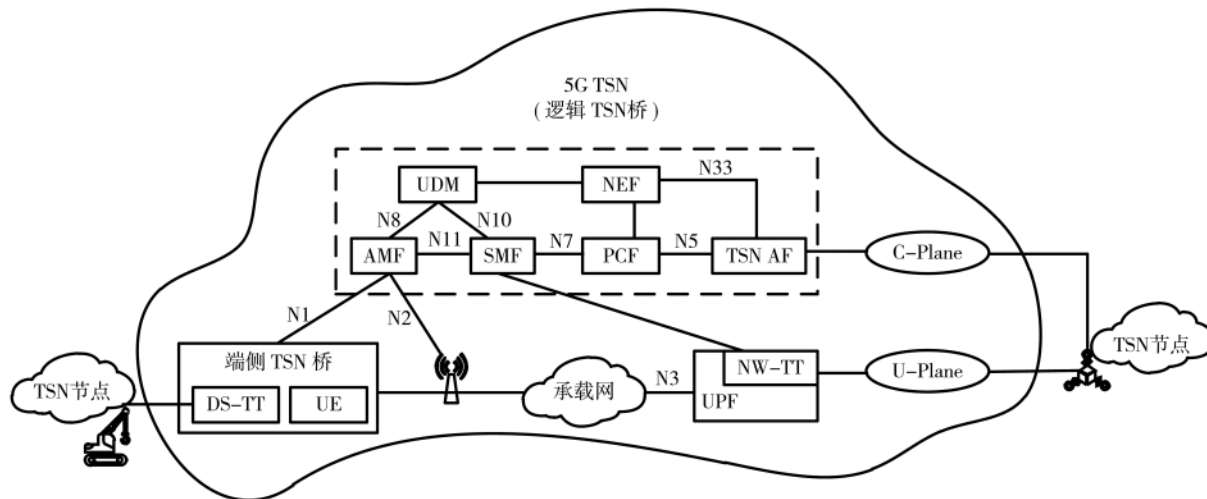


图 2 TSN 与 5G 融合部署架构

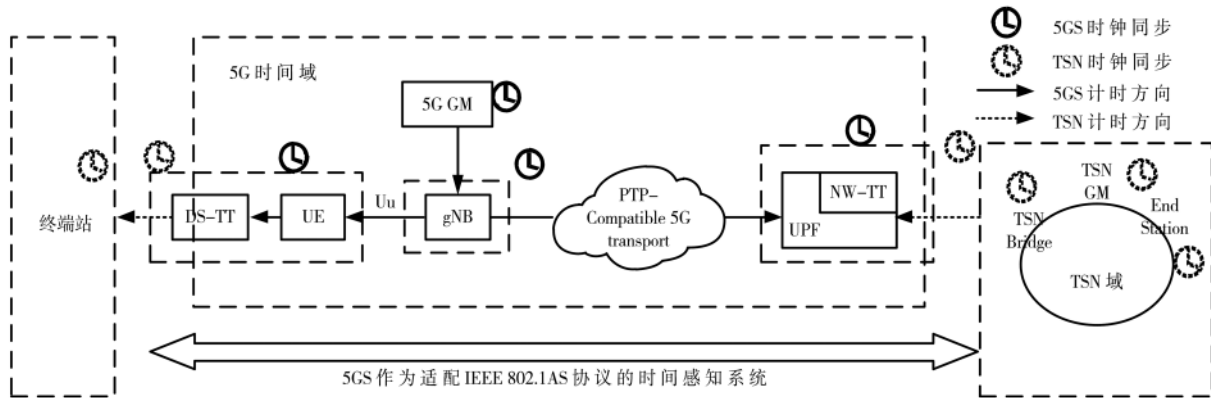


图3 5GS支持TSN时间同步

步以及 TSN 时钟到 TSN 终端站的授时。

2.2 QoS 控制

在 5G TSN 架构中,5GS 中的 DS-TT 和 NW-TT 支持 802.1Qbv 的存储转发机制,TSN 业务流的 QoS 需求,如带宽要求、时延要求等,将由时延敏感 GBR(Guaranteed Bit Rate)来保障。QoS 参数中的 PDB(Packet Delay Budget)来自于 TSN 业务要求,PCF 会按照网络时延测量的结果,将 PDB 分解为 CN-PDB 和 AN-PDB,分别被用来指导核心网和无线侧处理时延^[8]。QoS 参数中的 MDBV(Maximum Data Burst Volume)来自于一个周期内 TSN QoS 流传输的突发数据块的大小。在 QoS 的 GBR 机制保障下,5GS 可以按时完成 TSN 系统要求的数据流调度传输。

3 无线网侧相关增强分析

3.1 以太网头压缩(EHC)

TSN 为有线网络提供了确定性和高可靠性的数据传输,但很多场景中离不开支持时延敏感型通信业务的无线网络。无线信道由于衰落、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关键数据传输的要求,限制了工业无线网络的发展^[9]。

以太网头压缩(Ethernet Header Compression, EHC)技术是一种减少以太网报头传输开销的方法。在基于以太网的工业物联网中通常有效负载的大小在总体帧中占比较小,会导致无线资源的浪费。通过 EHC 减少包头信息的传输量,不仅可以提高 NR 空中接口上以太网帧的传输效率,同时也降低了无线的传输时延,带来较大的收益^[10]。

EHC 会压缩在 gNB 与 UE 之间传输的以太网报头字段,包括:目的地址、源地址、802.1Q tag 以及长度/类型,共 18 B^[11]。

EHC 压缩器和解压缩器将原始头字段信息存储为“EHC Context”,由一个称为 Context ID(CID)的唯一标识符标识。EHC 压缩侧和解压侧将一个 CID 关联到以太网帧的内容上。发送侧传输携带完整帧头的以太网帧以及 CID,以便于解压侧建立 EHC 上下文;解压侧建立一条

上下文后通过 PDCP control PDU 向压缩侧指示反馈,其中携带 CID 信息。压缩侧接收到反馈后,相应 CID 对应的 EHC 上下文可以用于以太网头压缩操作。

3.2 基站侧 QoS 和调度增强

在 TSN 的用例(例如在未来的工厂环境)中,UE 需要处理如下不同业务的混合情况:

- (1)具有关键优先级的不同周期的多个数据流,例如来自不同应用的多个 TSN 数据流;
- (2)非周期性的关键优先业务,如警报、需要通知紧急事件发生的安全探测结果上报等;
- (3)尽力而为的流量业务,如 eMBB 业务、Internet 业务或支持工厂操作的任何其他业务。

由于 TSN 通信业务模式的特殊性,为满足 QoS 的需求,3GPP RAN2 研究聚焦对于不同业务调度增强方面的内容^[10]:

(1)确定性 TSN 业务

如 TS 22.104 所述,TSN 业务通常是周期性、确定性的,消息大小固定或在指定范围内。对于这类业务,通过核心网提供相关信息(消息周期、消息大小和参考时间/偏移量),了解 TSN 流量模式有助于 gNB 通过 CG/SPS 或动态授权更有效地调度。

(2)短周期 TSN 消息

对于短周期 TSN 消息,需要在 NR 上支持 TSN 流的周期性可低至 0.5 ms。目前,配置的授权可以设置为低至 2 个符号的周期,根据子载波间隔的不同,该周期在 18 μ s 和 143 μ s 之间。因此,在 UL 方向,可以支持业务的低周期性。而对于 DL 方向,SPS 配置的最小周期是 10 ms,这不足以支持周期性的 TSN 业务。3GPP R16 确定,为了支持 DL 方向上周期非常短的 TSN 业务流,需要支持额外的、较短的 SPS 周期。与动态调度相比,使用 SPS 可以通过避免控制信道阻塞来减少 PDCCH 开销并提高可靠性。

(3)支持多个 TSN 流

对于 NR R15 系统,每个小区一个传输方向上仅支持一个激活的预配置授权,为了同时服务多个 TSN 数据

5G R16 演进技术 5G R16 Evolution Technology

流,对于 NR R16 及之后的系统,一个服务小区的指定带宽部分,单个 UE 支持多套 SPS 配置,最大数量为 8。

(4)非整数倍的 TSN 消息

在 TSN 用例中,发送的数据包的周期性取决于应用,多数情况下不可能对其进行修改,所以可能存在周期值与 NR 支持的 SPS 配置周期不是整数倍对应的情况,此问题的严重性取决于通信量的延迟要求和失调发生的频率。网络侧通过配置如下解决:

- ①通过 RRC 重配调整 SPS 资源;
- ②使用更短的 SPS 周期或多个 SPS 配置;
- ③在 5GS 边缘应用去抖动缓冲器。

(5)支持 TSN 的移动性

在许多工厂自动化用例中,设备(以及 UE)是移动的。对于运动控制用例,时速可达 75 km/h。如何确保使用 CG 或 SPS 配置为周期性和确定性流量提供服务的 UE 在切换到相邻小区后,仍然能够满足延迟/抖动和周期性方面的服务要求,给出如下解决方案:

①在资源预留方面,协调目标节点与源节点。切换期间在源和目标 gNB 之间交换 QoS 和 TSN 流量模式信息。目标 gNB 可以使用此类信息来提供 HO 命令中已经存在的 CG/SPS 配置。

②从目标节点和源节点进行高层或物理层重复,直到成功完成切换。

3.3 无线网架构增强

为了适配 TSN 业务特性,在 3GPP R16 阶段完对于无线网架构也进行相应的增强。

3.3.1 F1 接口增强

gNB-CU 与 gNB-DU 之间采用 F1 接口连接,F1 接口支持 gNB-CU 与 gNB-DU 之间的信令交换和数据传输、分离无线网络层和传输网络层,F1 接口主要用于传输控制面配置信息、用户信令以及用户面数据等信息。在 F1AP 过程中添加冗余序号信息(Redundancy Sequence Number,RSN)^[12]:

对于在一个 NG-RAN 节点或两个 NG-RAN 节点中的双连接性以支持两个冗余 PDU 会话的情况,似乎不需要通过 F1 指示 RSN 信息。但是,如果在基于本地 RAN 配置的一个 NG-RAN 节点上建立冗余 PDU 会话的情况下,利用从 CU 获得的 RSN 信息,DU 可以灵活地将不同的服务小区与属于相关冗余 PDU 会话的 DRB 相关联,从而可以确保通过 Uu 实现不相交的用户平面路径。因此,在 F1AP 过程中添加 RSN 信息,包括:

(1)UE 上下文设置请求:建立 UE 上下文,其中包括 SRB 和 DRB 配置。

(2)UE 上下文修改请求:修改已建立的 UE 上下文,例如,建立、修改和释放无线电资源。

此外,还增加时间参考信息上报的过程,从而将准确的参考时间信息从 DU 报告给 CU。

3.3.2 E1 接口增强

E1 接口定义为 gNB-CU-CP(Control Plane)和 gNB-CU-UP (User Plane)之间的接口,主要支持以下功能:E1 接口管理功能、E1 承载上下文管理功能、跟踪功能、TEID 分配。在 E1AP 过程中添加 RSN 信息^[13]。与 F1 接口类似,在一个 NG-RAN 节点上使用 RSN 信息建立 PDU 会话后,如果进行 CU-CP UP 拆分,则应将指示传播到 E1 承载上下文设置,以使 gNB-CU-UP 能够确定在一个 CU-UP 中分离 UP 资源以服务相关的 PDU 会话。因此,在 E1AP 过程中添加 RSN 信息。鉴于 RSN 是根据 AF 对 TSC 流量的 QoS 要求配置的,看不到修改/删除冗余的明显好处。所以,承载上下文修改过程不应包括 RSN。

3.3.3 NG 接口增强

由于 5G QoS 模型基于 QoS 流,并支持需要保证流比特率的 QoS 流(GBR QoS 流)和非 GBR QoS 流。因此在 NAS 层,QoS 流是 PDU 会话中 QoS 区分的最佳粒度。在 PDU 会话中,QoS 流通过在 NG-U 上的封装头中携带的 QoS 流 ID(QFI)进行标识^[14]。

NG-RAN 和 5GC 通过将数据包映射到适当的 QoS 流和 DRB 来确保服务质量(例如可靠性和目标延迟)。因此,存在 IP 流到 QoS 流以及从 QoS 流到 DRB 的两步映射。NG 接口通过引入以下增强功能来支持 TSC QoS 流:

(1)基于双连接的冗余用户平面路径

UE 可以通过 5G 网络发起两个冗余 PDU 会话。5GS 将两个冗余 PDU 会话的用户平面路径设置为不相交。当启动 PDU 会话设置或修改时,RAN 可以根据从 5GC 接收到的冗余信息,在一个 NG-RAN 节点或两个 NG-RAN 节点中为两个冗余 PDU 会话配置双连接,以确保用户平面路径不相交。RAN 必须确保两个冗余 PDU 会话的数据无线电承载资源是隔离的。如果 RAN 不能满足不相交的用户平面要求,则根据 RAN 本地配置,可以保留或不保留冗余 PDU 会话。在切换的情况下,冗余信息被传送到目标 NG-RAN 节点。

(2)通过单个 UPF 与单个 RAN 节点进行冗余数据传输

在单个 UPF 与单个 NG-RAN 节点之间建立两个 NG-U 隧道,用于在启动 PDU 会话建立或修改时冗余传输 QoS 流,两条 NG-U 隧道通过不相连的传输层路径传输。5GC 将每个 QoS 流的指示符提供给 NG-RAN,以进行冗余传输。对于下行链路,NG-RAN 节点在每个 QoS 流中消除重复的数据包。对于上行链路,NG-RAN 节点复制数据包并通过两个 NG-U 隧道传输它们。在切换的情况下,用于冗余传输的每个 QoS 流的指示符将传输到目标 NG-RAN 节点。

3.3.4 Xn 接口增强

Xn 接口对于 TSN 业务引入的增强功能^[15]如下:

(1)PDCP 复制扩展到支持最多 4 个 RLC,PDCP 主节点和辅助节点之间针对重复的 DRB 支持最多 4 个 NR-U tunnel 的建立;

(2)PDCP 复制情况下支持 UL RLC 的动态选择和协调(FFS);

(3)对主 NG-RAN 节点(M-NG-RAN)和辅 NG-RAN 节点(S-NG-RAN)的交互引入 3 个过程:S-NG-RAN 节点添加准备、S-NG-RAN 节点修改准备、启动 S-NG-RAN 节点修改。

4 结论

时间敏感网络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,广泛应用于时延敏感性工业互联网场景。本文分析了 TSN 架构以及与 5G 网络系统融合部署演进,研究归纳了包括以太网头压缩、QoS 调度在内的无线侧的增强需求。最后梳理总结了 3GPP 对于 5G TSN 融合网络架构增强的标准化工作。总体而言,随着 5G 技术的发展及建设的深入,TSN 关键技术的增强以及新型网络架构的标准化工作将成为未来确定性传输网络的重点研究方向。

参考文献

- [1] 3GPP TR 38.824, study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case(URLLC)(Release 16)[S]. 2019.
- [2] 3GPP TR 22.804 V16.2.0, study on Communication for automation in vertical domains[S]. 2018.
- [3] 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.
- [4] NASRALLAH A, AKHILESH S, ZIYAD T. 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.
- [5] 朱瑾瑜,张恒升,陈洁. TSN 与 5G 融合部署需求及网络架构演进[J/OL]. 中兴通讯技术: 1-11[2020-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200630>.

(上接第 7 页)

R16 标准通过对 R15 增强和扩展,使得 5G 技术方案体系更加完整,技术能力体系更加完善,行业赋能体系更加完美,成为 5G 商用进程中的重要里程碑。特别是 URLLC、NR V2X、TSN 等技术标准的增强,将会极大地促进 5G 与工业互联网、车联网等垂直行业的融合发展,从而在夯实基础设施能力的同时,也将极大推动社会经济的数字化转型。

参考文献

- [1] 3GPP TR 21.916, technical specification group services and system aspects; release 16 description; summary of release 16 work items[R]. 2020.
- [2] 3GPP RP-191584, revised WID: physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency communication (URLLC)[R]. 2019.
- [3] 3GPP RP-200293, WID: additional enhancements for NB-

1413.004.html.

- [6] 工业互联网产业联盟.时间敏感网络(TSN)产业白皮书(征求意见稿)[R]. 2019.
- [7] 3GPP TS 23.501, system architecture for the 5G system[S]. 2019.
- [8] 王丹,孙滔,段晓东,等.面向垂直行业的 5G 核心网关键技术演进分析[J].移动通信, 2020, 44(1): 8-13.
- [9] 许方敏,伍丽娇,杨帆,等.时间敏感网络(TSN)及无线 TSN 技术[J/OL].电信科学: 1-13[2020-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2103.TN.20200604.1031.012.html>.
- [10] 3GPP TR 38.825, study on NR industrial Internet of Things (IoT)(release 16)[S]. 2019.
- [11] 3GPP TS 38.323 V16.0.0, packet data convergence protocol specification(release 16)[S]. 2020.
- [12] R3-202321, (TP for NR_IOT BL CR for TS 38.423): PDCP duplication with more than 2 entities[C]. 3GPP TSG-RAN3 Meeting #107b-e, Huawei, 2020.
- [13] R3-203076, introduction of NR_IOT support to TS 38.463[C]. 3GPP TSG-RAN WG3 #108-e, 2020.
- [14] R3-204467, NRIOT higher layer multi-connectivity[C]. 3GPP TSG-RAN WG3 #108-e, 2020.
- [15] R3-201665, enabling coordination for DL and UL multi-plication over up to 4 RLCs[C]. 3GPP TSG-RAN WG3 Meeting #107, Nokia, Shanghai Bell, 2020.

(收稿日期: 2020-07-30)

作者简介:

吴欣泽(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:5G V2X 和 URLLC 关键技术。

信金灿(1994-),女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向:无线通信系统协议与技术。

张化(1994-),女,硕士,助理工程师,主要研究方向:移动通信技术。

IoT[R]. 2020.

- [4] 3GPP TS 23.287: architecture enhancements for 5G system (5GS) to support Vehicle-to-Everything(V2X) services; release 16[S]. 2020.
- [5] IEEE. IEEE 802.1Qbv-2015: IEEE standard for local and metropolitan area networks--bridges and bridged networks--amendment 25: enhancements for scheduled traffic[S]. 2015.
- [6] IEEE. IEEE P802.1Qcc: standard for local and metropolitan area networks--bridges and bridged networks--amendment: stream reservation protocol(SRP) enhancements and performance improvements[S]. 2015.
- [7] 3GPP TS 23.501, system architecture for 5G system; release 16, stage 2[S]. 2020.

(收稿日期: 2020-09-10)

作者简介:

朱雪田(1975-),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:5G/6G 无线通信技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所