



专题：5G 行业应用

面向时间敏感网络的 5G 无线网增强技术研究

信金灿, 许森, 张化, 熊尚坤, 许话
(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

摘 要: 5G 确定性网络是目前产业界正在积极推动的全新工业通信技术。为了逐步实现确定性传输, 3GPP 引入了时间敏感通信技术, 与超可靠低时延通信技术相比, 进一步在时延抖动和时间同步方面对 5G 网络进行了增强, 从而实现端到端的时间敏感通信服务。介绍了时间敏感通信技术特点和标准进展, 时间敏感通信技术以时间敏感网络与 5G 网络融合的网络架构为基础, 通过精确时间同步机制提高时间同步精度, 通过服务质量和调度增强机制降低业务时延、提高传输可靠性, 通过以太网头压缩技术提高传输效率。

关键词: 5G 确定性网络; 时间敏感网络; 时间敏感通信; 精准时间同步; 服务质量增强

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022085

Study on 5G wireless network enhancement technology for time sensitive networks

XIN Jincan, XU Sen, ZHANG Hua, XIONG Shangkun, XU Hua
Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

Abstract: 5G deterministic network is a new type of industrial communication technology vigorously promoted by the international industry. 3GPP had introduced the time-sensitive communication technology to facilitate deterministic transmission. Compared with ultra-reliable and low-latency communication technology, time-sensitive communication technology further enhanced the 5G network in terms of delay jitter and time synchronization to realize the end-to-end time sensitive communication. Characteristics of time sensitive communication technology were analyzed. Based on the time-sensitive networking and 5G network converged architecture, the time-sensitive communication technology reduces the time synchronization error through the accurate time synchronization mechanism. Additionally, the scheduling enhancement mechanism was introduced to reduce the transmission delay. Furthermore, the Ethernet header compression mechanism was proposed to improve transmission efficiency.

Key words: 5G deterministic network, time-sensitive networking, time-sensitive communication, accurate time synchronization, quality of service enhancement

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1806700)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806700)

0 引言

2019 年中国颁发 5G 牌照后,我国已建成全球最大的 5G 网络,为公众用户和垂直行业用户提供了更高速率、更低时延的业务体验。随着 5G 部署的逐渐深入,5G 的应用场景逐步清晰,产业界的工作开始聚焦,跨行业的场景化需求也开始浮现,远程控制、智能电网、工业制造、移动机器人等新兴业务获得了越来越多的关注。为了获取更好的业务体验,新兴业务场景提出了微秒级端到端时延、时延抖动,以及 99.999 9%以上可靠性的确定性传输需求,工业场景确定性指标要求见表 1。然而,目前 5G 商用网络仅能支持增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)业务,实现 4 ms 时延下 99.9%的可靠性需求,无法满足新兴业务提出的确定性传输需求。因此,为了更好地支持垂直行业应用,能够提供确定性传输的 5G 确定性网络逐渐成为新一代网络通信体系的发展方向。

5G 确定性网络指在 5G 网络中引入确定性网络技术后,利用 5G 网络资源打造的有确定性传输能力的传输专网^[2]。其中,确定性网络技术能够提供具有确定性时延、确定性抖动、确定性带宽、确定性/可靠性的实时数据传输和确定性承载服务^[3]。确定性网络技术包括以下 3 种。

(1) 时间敏感网络技术

时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)技术是由 IEEE 802.1 工作组提出的一组基于以太网协议模型的标准协议,通过高精度时间

同步、网络流量整形和资源预留等机制,解决了 2 层网络的确定性保障问题^[4]。

(2) 确定网技术

确定网(deterministic networking, DetNet)技术由 IETF 提出,通过资源预留、显示路由、抖动消除等技术实现了终端业务流的三层确定性传输。通过将 DetNet 与 TSN 融合,可以打造一个二层和三层的通用确定性网络架构^[5]。

(3) 时间敏感通信技术

时间敏感通信(time-sensitive communication, TSC)技术由 3GPP 提出,通过 TSN 与 5G 网络的融合网络架构、精准时间同步、服务质量(quality of service, QoS)增强和以太网头压缩等技术,实现具有低时延、低抖动、高可用性和高可靠性需求的确定性通信^[6]。

通过将上述 3 种确定性网络技术融合,可以实现一个能够提供确定性通信服务的 5G 确定性网络。然而,基于现有标准,3 种技术无法很好地融合。因此,为了实现确定性传输目标,3GPP 标准开展了无线网增强技术研究,旨在通过 TSN 和 5G 网络的融合,提供具有低时延、低抖动、高可靠和高可用的时间敏感通信服务。其中,TSN 作为实现时间敏感通信的关键标准技术,定义了以太网数据传输的时间敏感机制,TSN 中的时间敏感机制见表 2,提高了数据传输的确定性和可靠性^[7-8]。

1 5G 网络融合架构

IEEE 定义的 3 种 TSN 体系架构如图 1 所示,在 TSN 中,集中式用户配置(centralized user

表 1 工业场景确定性指标要求

用户场景	E2E 时延	抖动	可靠性	时间同步需求	传输间隔	服务区域
闭环控制	<10 ms	0.5 ms	99.999 9%	<1 μ s	10 ms	100 m×100 m×50 m
运动控制	<0.5 ms	0.5 μ s	99.999 9%	<1 μ s	0.5 ms	50 m×10 m×10 m
移动机器人	<10 ms	2.5 ms	99.999 9%	<1 μ s	10 ms	<1 km ²
移动控制面板	≤10 ms	2.5 ms	99.999 9%	<1 μ s	/	50 m×10 m×4 m

注:数据来源于 3GPP SA1 TS22.104^[1]



表 2 TSN 中的时间敏感机制

机制	IEEE 标准	实现功能
时间同步机制	802.1 AS	亚微秒级时间同步
网络流量整形机制	802.1Qav, Qbv, Qch, Qcr	确定性传输时延
资源预留机制	802.1 Qat	时间敏感流量优先调度
配置 TSN 流量	802.1Q	高效路径冗余、动态流量管理

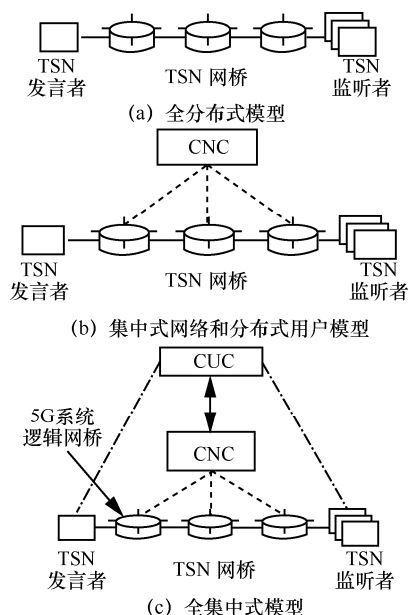


图 1 IEEE 定义的 3 种 TSN 体系架构

configuration, CUC) 控制器基于应用系统的传输需求, 负责网络信息和设备配置的域间协同; 集中式网络配置 (centralized network configuration, CNC) 控制器负责设备监控管理、业务建模及调

度模型下发等功能; TSN 网桥 (TSN bridge) 用于 TSN 转发、全网监控等功能; 两侧的 TSN 发言者 (TSN talker) 和 TSN 监听者 (TSN listener) 分别用于数据流的发送和接收。

在 TSN 和 5G 网络融合的网络架构中, 如图 2 所示, 5G 系统作为一个逻辑网桥集成在具有全集中式模型的 TSN 中, 该网桥具体由支持网络侧 TSN 转换器 (network-side TSN translator, NW-TT) 功能的用户面功能 (user plane function, UPF) 侧端口、用户设备 (user equipment, UE) 和 UPF 之间的用户平面隧道以及设备侧 TSN 转换器 (device-side TSN translator, DS-TT) 侧端口组成, 5G 系统通过 DS-TT 和 NW-TT 与 TSN 进行交互。另外, 5G 系统通过核心网的 TSN 应用功能 (TSN application function, TSNAF) 实现与 TSN CUC 的交互和协同管理, 其中, TSNAF 存储 UE/DS-TT 侧端口、UPF/NW-TT 侧端口以及协议数据单元 (protocol data unit, PDU) 会话之间的绑定关系^[9]。

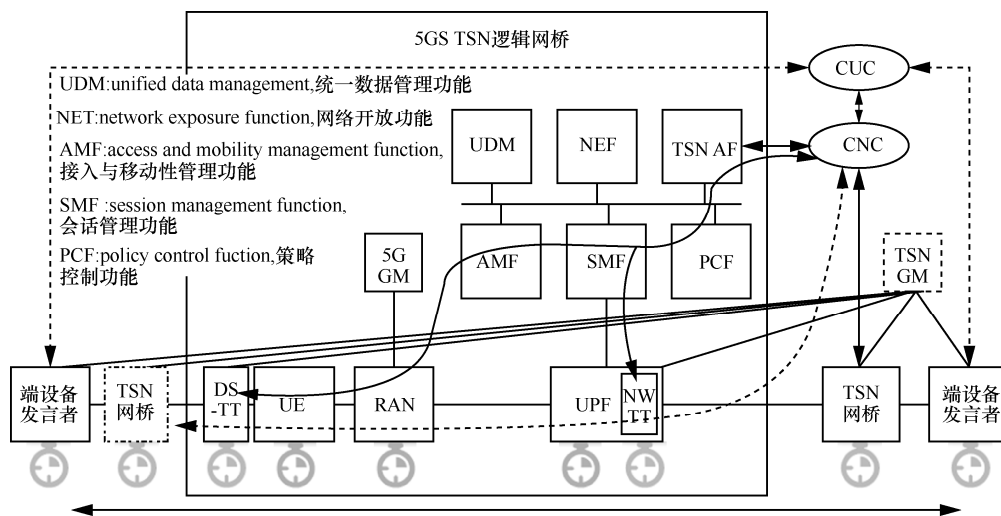


图 2 TSN 与 5G 网络融合架构

2 时间敏感通信技术标准进展

为了支持工业互联网业务, 5G 新空口 (new radio, NR) 从 Release 15 (Rel-15) 开始研究超可靠低时延通信 (ultra-reliable and low-latency communication, URLLC) 技术, 通过引入灵活的帧结构和高优先级传输等机制降低了传输时延, 通过支持分组数据汇聚协议 (packet data convergence protocol, PDCP) 复制和多点传输/接收点 (transmission/reception point, TRP) 传输等机制提高了传输可靠性。为了满足具有更低时延和更高可靠性的业务需求, NR 在 Rel-16 中引入了免授权配置、UE 内优先级和复用, 以及 PDCP 复制增强等机制^[10-11]。

工业领域的时间敏感通信业务在低时延、高可靠需求的基础上, 对时延抖动和时间同步提出了更严苛的要求。为了满足业务需求, Rel-16 研究了 5G 网络与 TSN 的融合网络架构, 通过引入精确时钟传递机制, 控制了基站和终端间的时间同步误差; 通过配置多套免授权调度资源, 解决了无线网配置资源与时间敏感业务周期不匹配的问题, 降低了业务传输的时延和抖动^[12]。在 Rel-16 中终端与基站时间同步机制的基础上, 工业互联网中的终端到终端场景对时间同步和时延抖动提出了更高的要求, 因此, Rel-17 引入了同步时延补偿和 QoS 增强等机制, 进一步满足了终端到终端场景的时间敏感通信需求^[13]。

3 时间敏感通信关键技术

3.1 精准时间同步

在 TSN 和 5G 网络融合的网络架构中, 包含两个独立的时间同步系统: 5G 系统时间同步和 TSN 域时间同步。在 5G 系统内, DS-TT、UE、5G 基站 (next generation node B, gNB)、UPF 和 NW-TT 需要与 5G 内部主时钟 (5G grand master, 5GGM) 进行同步, 其中, 5G 系统边缘的 TSN 转换器需要支持 IEEE 802.1AS 相关功能。对于 TSN 域同步, TSN 终端需要与 TSNGM 进行同步, 时间同步系统如图 3 所示, 首先, TSN 域用于时钟同步的高精度时间同步协议 (precision time protocol, (g)PTP) 消息由 TSN GM 传递到 NW-TT, NW-TT 为其添加一个入口时间戳 (TSi); UPF 将 (g)PTP 消息传递给 gNB 后, 通过空口传递给终端, 终端在收到 (g)PTP 消息后将其转发给 DS-TT, DS-TT 为其创建出口时间戳 (TSe), 其中, TSe 和 TSi 之间的差值即 (g)PTP 消息在 5G 系统中的驻留时间。随后, DS-TT 将 (g)PTP 消息在 5G 系统中的驻留时间转化为 TSN 域时间, 通过在矫正字段中添加所计算驻留时间, 降低 5G 系统时延对 TSN 域终端的影响^[14-15]。

为了实现 TSN 终端和 TSNGM 时钟之间的精确时间同步, 需要控制 5G 系统引入的时延误差。3GPP Rel-16 提出主时钟和终端时钟间的时钟误差不超过 $1\ \mu\text{s}$, 其中, 5G 系统引入的时间同步误差包含以下 3 个因素。

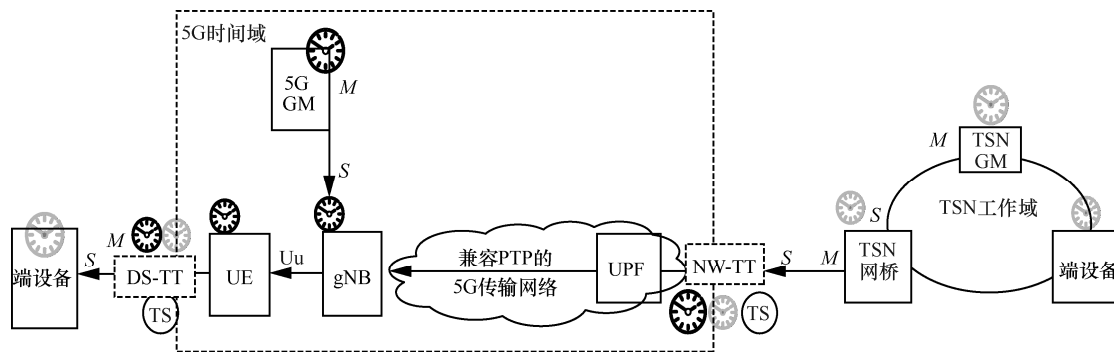


图 3 时间同步系统



表 3 TSN GM 时钟和基站之间的最大绝对时间误差 (TE)

同步源	同步精度
本地站内 GNSS 接收机 (GPS 作为 TSN GM 时钟)	$ TE = 100 \text{ ns}$
本地站内 TSN GM 时钟	TE 可忽略
使用支持 PTP 的级联传输网络连接的远程 TSN GM 时钟	$ TE \sim N \times 40 \text{ ns}$, 其中, N 等于 PTP 的跳数

(1) 网络侧精度

网络侧精度指基站和 TSNGM 时钟之间的同步误差。TSNGM 时钟和基站之间的最大绝对时间误差 (TE) 见表 3, 不同的同步源位置可以实现不同的同步精度。

(2) 空口精度

空口精度指空口传输引入的同步误差。不同站间距下的同步精度见表 4, 当终端到基站的距离较近时, 无须空口传输时延补偿即可满足 $1 \mu\text{s}$ 的同步精度需求; 当终端到基站的距离较远时, 需要对空口传输进行时延补偿, 研究报告 TR 38.825^[12]指出, 当终端应用传播时延补偿后, 无须考虑站间距影响, 在 15 kHz 子载波间隔下均可以达到 470~540 ns 的时间同步精度。

表 4 不同站间距下的同步精度

站间距/m	空口精度/ns
10	130~376
20	215~506
60	315
114	355
250	1 080

(3) 时钟参考信息粒度

时钟参考信息粒度指基站发送的时钟参考信息粒度。空口高精度授时如图 4 所示, 基站可通过广播系统信息块 9(system information block type 9, SIB9)或单播无线资源控制 (radio resource control, RRC) 专用信令两种方式将时钟信息传递给终端, 将 5G 空口授时粒度提升至 10 ns。

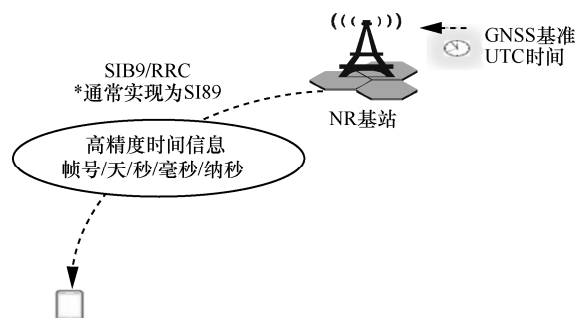


图 4 空口高精度授时

研究报告 TR38.825^[12]指出, 当子载波间隔取 15 kHz 且进行时延补偿时, 空口时间同步误差最大为 540 ns, 此时, 如果 TSNGM 和基站间的时间同步误差取 100 ns、时钟参考信息粒度误差取 25 ns, 则时钟源到终端时钟之间的总同步误差为 665 ns, 可以满足 Rel-16 提出的主时钟和终端时钟间的时钟误差小于或等于 $1 \mu\text{s}$ 的时间同步需求。

在 Rel-16 研究的主时钟与终端时钟同步场景基础上, Rel-17 进一步研究了控制到控制时间敏感业务的时间同步需求, 终端到终端确定性通信如图 5 所示, 在控制到控制场景中, 主时钟位于某个终端, 其他终端从有主时钟的终端上获取时钟, 时间同步误差不超过 900 ns。考虑到时间同步消息需要由终端发往 UPF 后, 再由 UPF 发送给另一个终端, 时间同步过程将引入两次 5G 系统时延误差, 因此, 单程时间同步误差需要小于或等于 450 ns ^[16]。

为了提高时间同步精度, 需要考虑定时同步信息颗粒度引入的 $\pm 5 \text{ ns}$ 的同步误差, 在此基础上, 将 5G 系统引入的时间同步误差分为如表 5 所示的 3 个部分^[17]。

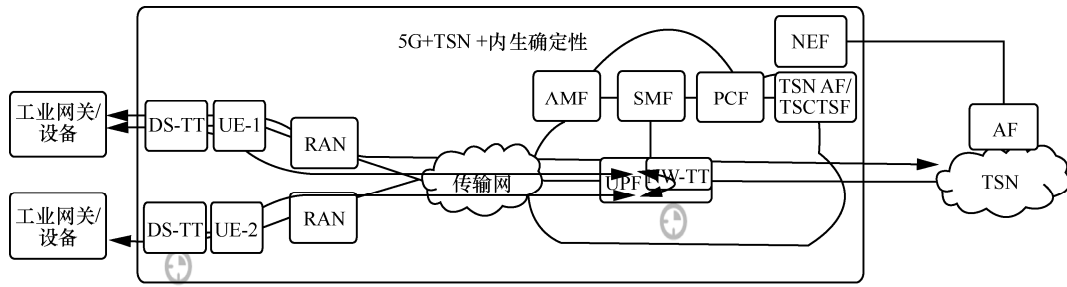


图5 终端到终端确定性通信

表5 时间同步误差

时间同步误差源	同步误差开销
网络部分：主时钟到基站之间的同步误差	$\pm 240 \sim \pm 400$ ns
设备部分：设备实现引入的时间同步误差	$\pm 50 \sim \pm 100$ ns
空口部分：终端与基站间的时间同步误差	$\pm 145 \sim \pm 275$ ns
空口部分 = (总误差 - 2 倍网络部分 - 2 倍设备部分) / 2	

在 Rel-16 中，为了降低空口传输引入的同步开销，采用定时提前量（timing advance, TA）的 1/2 的传播时延补偿机制^[18]。然而，当子载波取 15 kHz 时，TA 粒度将引入 ± 260 ns 的时间同步误差，无法满足控制到控制场景提出的空口时间同步精度需求，因此，Rel-17 需要对时间同步机制进行增强。

为了进一步满足时间敏感通信业务的时间同步精确度需求，Rel-17 重点研究了基于往返时延（round-trip time, RTT）的传播时延补偿方案^[19]，通过计算终端和基站侧的发送接收时间差获取传播时延，基于 RTT 的时延补偿如图 6 所示，总的传播时延表示为 $1/2((t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)) = 1/2((t_4 - t_1) - (t_3 - t_2))$ ，该方案包括以下两种类型。

- 终端侧时延补偿：终端测量终端侧的发送接收时间差，通过下行传输信令获取基站侧的发送接收时间差，计算传播时延并补偿接收到的参考定时信息。
- 基站侧时延预补偿：终端将终端侧的发送接收时间差发送给基站，基站测量基站侧的发送接收时间差，并在发送给终

端之前对参考定时信息进行预补偿；为了避免终端侧和基站侧的重复时延补偿，基站可以通过专用信令控制终端侧的时延补偿。

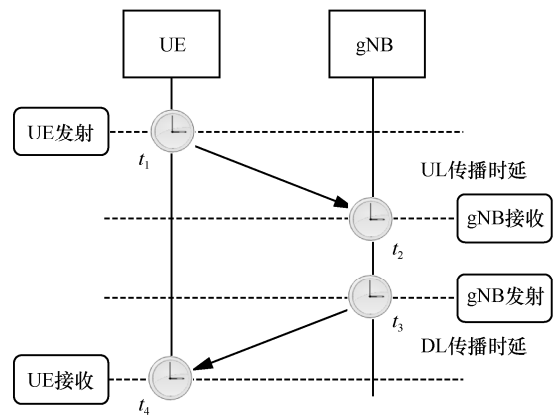


图6 基于RTT的时延补偿

3.2 QoS 和调度增强

在工业互联网的智能电网、远程控制和未来工厂等应用场景中，业务周期以赫兹为单位，其长度可能不是 NR 支持的半持续调度（semi-persistent scheduling, SPS）或配置授权（configured grant, CG）资源的整数倍；而且，单个终端可能会同时



收到多个具有不同周期、不同关键优先级的周期性数据流，部分时间敏感业务提出了端到端时延小于 0.5 ms、可靠性达到 99.99%到 99.999 9%的需求。在 NR Rel-15 标准中，针对单个终端，每个小区的每个带宽部分（bandwidth part, BWP）只能支持一个 SPS 和/或 CG 配置，而且，SPS 周期的最小粒度为 10 ms，无法满足时间敏感业务的需求。

为了满足时间敏感业务需求，3GPP Rel-16 提出了配置更短 SPS/CG 周期，同时配置多套 SPS/CG 资源等方法，解决了时间敏感业务周期与配置资源周期不匹配问题。另外，核心网为基站下发时间敏感通信辅助信息，其中包括时间敏感业务周期、数据包到达时间等业务特性，辅助基站下发更合理、高效的资源配置。

为了保证时间敏感通信业务的可用性，Rel-17 引入了一个新的 QoS 参数——生存时间，该参数用于反映周期性业务的可用性，具体表示从故障中恢复的可用时间。生存时间如图 7 所示，当接收端在生存时间定时器超时前没有收到下一个数据包时，认为该无线过程失败。为了辅助无线侧更好地支持生存时间参数，核心网通过时间敏感通信辅助信息将生存时间参数信息发送给无线侧，基站和终端利用该辅助信息，提高相应链路的可靠性以满足生存时间需求^[20]。

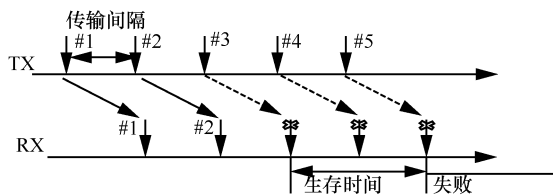


图 7 生存时间

3.3 以太网头压缩

在时间敏感网络中，数据需要封装为以太网帧进行传输。为了在 5G 网络中支持工业互联网应

用，以太网帧在 5G 系统中以以太网类型的 PDU 会话传输。一般来说，工厂自动化、电力分布等业务数据包有效载荷较小，以太网帧头在整个数据包中占比较大，降低了数据传输效率。因此，3GPP Rel-16 协议提出了以太网头压缩方法，通过压缩以太帧头中的源地址、目标地址、长度/类型以及 802.1Q 标签等静态配置降低了以太网报头开销，IEEE 802.3 以太帧格式示例（802.1Q）见表 6。研究表明，以太网帧越小，以太网头压缩技术的增益越大，当以太网帧大小为 64 byte 时，可以获得 20%~27%的增益。

4 结束语

5G 确定性网络技术是当前产业界正在积极推动的全新工业通信技术，通过 TSN、DetNet 和 TSC 技术的融合，可以实现跨广域通信和端到端的极致确定性体验。为了逐步实现 5G 确定性网络，优先开展了 TSN 和 5G 网络融合后的时间敏感通信技术研究。时间敏感通信技术引入高精度时间同步和传输时延补偿机制，降低了业务传输的时延和时延抖动。引入新的 QoS 参数和调度增强机制，配置了更可靠的无线资源，提高了业务传输的可用性和可靠性。另外，考虑频谱资源的稀缺性，引入以太网帧头压缩技术，降低了开销，提高了时间敏感通信业务的数据传输效率。未来，随着技术的发展，考虑将确定性技术与移动边缘服务器进行融合，将通信和计算等资源分配给具有时间敏感通信需求的终端和网络，改善无线侧时间敏感通信业务的服务质量。

参考文献：

- [1] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains: TS 22.104 V18.1.0[S]. 2021.

表 6 IEEE 802.3 以太帧格式示例（802.1Q），单位：八字节（octet）

前导码	帧开始符	MAC 目标地址	MAC 源地址	802.1Q 标签（可选）	以太网类型/长度	负载	冗余校验
7 octet	1 octet	6 octet	6 octet	(4 octet)	2 octet	42~1 500 octet	4 octet

- [2] 5G 确定性网络产业联盟. 5G 确定性网络产业白皮书[R]. 2020.
5G Deterministic Networking Alliance(5GDNA). 5GDN industry white paper[R]. 2020.
- [3] 未来网络白皮书: 确定性网络技术体系白皮书[R]. 2021.
Future network white paper: white paper on deterministic network technology system[R]. 2021.
- [4] 宋华振. 时间敏感型网络技术综述[J]. 自动化仪表, 2020, 41(2): 1-9.
SONG H Z. Summary on time sensitive network technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(2): 1-9.
- [5] 梁雪梅, 叶增炜. 5G 确定性网络的架构与关键技术探讨[J]. 通信与信息技术, 2022(1): 34-38.
LIANG X M, YE Z W. Study on the architecture and key technologies of 5G deterministic network[J]. Communication & Information Technology, 2022(1): 34-38.
- [6] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS 23.501 V17.3.0[S]. 2021.
- [7] NASRALLAH A, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[C]//IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [8] 中国通信标准化协会. 面向低时延高可靠的 NR 高层增强技术研究[R]. 2020.
CCSA. Study on high layer enhancement for NR ultra-reliable low latency[R]. 2020.
- [9] 许森, 信金灿. 面向低时延高可靠的 5G URLLC 增强技术研究[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 62-67.
XU S, XIN J C. Study on 5G URLLC enhancement technology for ultra-reliable and low latency communications[J]. Mobile Communications, 2019, 43(9): 62-67.
- [10] 邵延峰. URLLC 中 PDCP 数据复制传输及增强研究[J]. 移动通信, 2021, 45(3): 44-47.
SHAO Y F. Research on PDCP data duplication transmission and enhancement in URLLC[J]. Mobile Communications, 2021, 45(3): 44-47.
- [11] 3GPP. Study on NR Industrial Internet of Things (IIoT) (Release 16): TR 38.825[S]. 2019.
- [12] 3GPP. RRC running CR for IIoT: R2-2202325[S]. 2022.
- [13] 中国通信标准化协会. 5G 移动通信网时间敏感网络 (TSN) 技术要求[R]. 2020.
CCSA. Technical requirement for TSN[R]. 2020.
- [14] LARRAÑAGA A, LUCAS-ESTAN M C, MARTINEZ I, et al. Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0[C]//Proceedings of 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway:

IEEE Press, 2020: 1111-1114.

- [15] 3GPP. Reply LS on TSN requirements evaluation: R1-1901470 [S]. 2019.
- [16] 3GPP. Propagation delay for TSN: R2-2009755[S]. 2022.
- [17] 3GPP. Medium access control (MAC) protocol specification: TS 38.321 V17.0.0[S]. 2022.
- [18] XU H, XIN J C, XU S, et al. RAN enhancement to support propagation delay compensation of TSN[C]//Proceedings of 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2021: 179-182.
- [19] 3GPP. QoS survival time Huawei, HiSilicon discussion: R2-2109602[S]. 2022.

[作者简介]



信金灿 (1994-), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为 5G/6G 无线网架构和关键技术。



许森 (1982-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G/6G 无线网架构和关键技术。



张化 (1994-), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为 5G/6G 无线网架构和关键技术。

熊尚坤 (1977-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G 移动通信、无线网络演进。

许话 (1997-), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为 5G/6G 无线信道测量与建模。