



专题：5G 演进技术

5G-Advanced 端到端确定性传输分析与系统设计

孙海洋, 施艺, 李岩, 范强, 马欣
(华为技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 5G 蜂窝网络因具有部署灵活、线缆成本低、移动性较强、服务质量 (quality of service, QoS) 控制完善和可扩展性强等优势, 在工厂场景中具有很广泛的应用前景。但同时, 工厂中的确定性业务对蜂窝网络控制也提出了一定的要求。所以在 5G-Advanced 的相关讨论中, 业界也提出研究支持超低时延的 5G 蜂窝网络。为了满足 2 ms 的时延要求, 提出了 N3 接口确定性和跨层调度优化两种关键技术以减少在传输网和空口的传输或等待时延。这两种技术在现有的蜂窝网络与确定性网络的互通通信机制和网络协议的基础上进行了改进, 在对现有的网络协议改动不大的前提下, 能很好地满足确定性业务较高的时延要求。

关键词: N3 接口确定性; 跨层调度优化; 确定性低时延; 5G

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022055

5G-Advanced E2E deterministic transmission analysis and system design

SUN Haiyang, SHI Yi, LI Yan, FAN Qiang, MA Xin
Huawei Technologies Co., Ltd., Beijing 100085, China

Abstract: Because of the advantages of flexible deployment, low cable cost, strong support for mobility and comprehensive QoS control and high scalability, cellular networks had been widely used in factory scenarios. At the same time, the deterministic service in the factory also puts forward certain requirements for cellular network control. Therefore, in discussions related to 5G-Advanced, the industry also proposes to research a 5G cellular network that supports ultra-low latency. To meet the delay requirement of 2 ms, two key technologies, deterministic N3 interface and cross-layer scheduling optimization were proposed to reduce the transmission or waiting delay on the transport network and air interface. These two technologies were the enhancement based on the current communication mechanism and network protocol between cellular network and deterministic network. The high delay requirement of deterministic services can be met well without changing the existing network protocol too much.

Key words: deterministic N3 interface, cross-layer scheduling optimization, deterministic low latency, 5G



0 引言

5G 蜂窝网络因具有部署灵活、线缆成本低、移动性较强、服务质量 (quality of service, QoS) 控制完善和可扩展性强等优势, 在工厂场景中具有很广泛的应用前景, 越来越得到学术界和工业界的关注。蜂窝网络已经给现有的工厂通信网络领域带来了重大的变革, 在钢铁工业、港口运输等有人类参与的远程控制方面取得了较为广泛的应用。5G 蜂窝网络是目前和未来工厂网络无线化的主要形式。在 5G-Advanced 的相关讨论中, 业界也提出研究支持超低时延的 5G 蜂窝网络^[1-2]。

在之前的第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 网络协议 (如 3GPP TS 23.501^[3]) 中, 蜂窝网络已经支持与工厂中的确定性网络 (如 IEEE 802.1Q^[4]) 进行互通。随着蜂窝网络的不断发展和成功应用, 人们提出了更高的服务要求, 希望可以从有人参与的远程控制场景进一步深入生产线场景, 如设备间的控制器协同。这就要求网络具有一定的确定性 QoS 保证能力。对于当前的蜂窝网络, 即使使用了 3GPP 网络协议, 当前定义的与确定性网络互通的特性增强, 但由于传输网络中交换机中存在的“多打一”现象以及基站调度的特殊性等问题, 其支持确定性超低时延 (如 2 ms) 的难度也会很大, 所以必须提出新型的适用于确定性超低时延的端到端确定性技术。

目前在确定性网络相关的研究主要有以下几点。

- 3GPP TS 23.501^[3]提出了 5G 蜂窝网络与确定性网络, 如时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN) 互通的架构。它将 5G 系统 (5G system, 5GS) 看作整体, 即将 5G 蜂窝网络当作一个黑盒子, 作为确定性网络中的一个网桥或者节点以支持确定性网络协议。
- IEEE 802.1Q^[4]是现有的一类确定性网络协

议, 可以基于时间队列的调度以保证以太网的确定性, 即可以保证通过交换网络的业务最大时延是有限的。目前和 5G 蜂窝网络互通的主要为其中的集中式模型。

- 3GPP TS 22.104^[5]包含了现有的工厂自动化场景下各类业务的 QoS 需求。

1 背景与挑战

1.1 现有的 5G 蜂窝网络与确定性网络互通技术

根据 3GPP TS 23.501^[3]的定义, 在 3GPP Release 16 (Rel-16) 中, 为实现 5G 系统与 TSN 的互通, 支持 TSN 流的确定性传输, 将 5GS 整体作为一个 TSN 网桥, 其传输 TSN 流时的入端口和出端口分别位于设备端 TSN 转换器 (device-side TSN translator, DS-TT) 网络端 TSN 转换器和 (network-side TSN translator, NW-TT), 5GS 与 TSN 互通系统架构如图 1 所示, 上行流经由 DS-TT 传输到 NW-TT, 下行流从 NW-TT 传输到 DS-TT。TSN 支持 IEEE Std 802.1Qcc-2018^[6]中所定义的完全集中式模型。DS-TT 作为用户设备 (user equipment, UE) 与工厂设备互通的翻译, NW-TT 作为用户面功能 (user plane function, UPF) 与工厂设备互通的翻译。TSN 流的报文在出口 TT 处缓存后, 按照集中网络配置 (centralized network configuration, CNC) 通过应用功能 (application function, AF) 配置的 IEEE 802.1Q^[4]调度参数往下游节点发送报文, 从而解决 5G 蜂窝网络转发时延不确定的问题。当然, 作为实现与 TSN 互通的前提条件, 5GS 整体需要支持作为 IEEE Std 802.1AS-2020^[7]中规定的时间感知系统, 保证 5GS 与 TSN 的时钟同步。另外, NW-TT 要支持 IEEE Std 802.1AB^[8]中描述的链路层连接发现和报告 (link layer connectivity discovery and reporting)。

具体来说, TSN AF 保存业务等级 (traffic class)、UE-DS-TT 驻留时间和网桥时延 (bridge

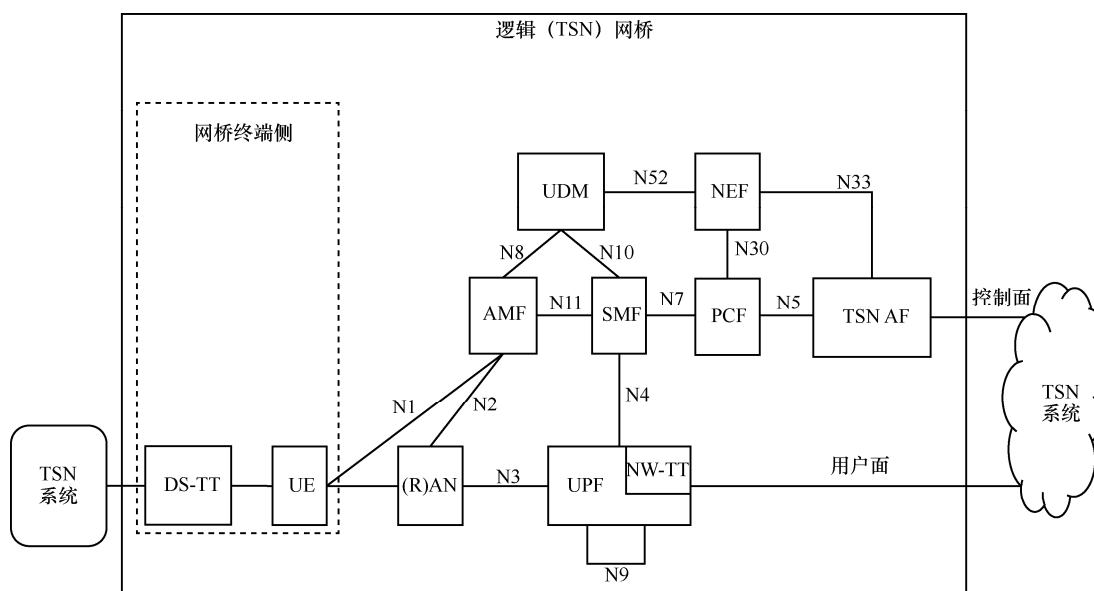


图1 5GS 与 TSN 互通系统架构

delay) 的映射; TSN AF 在接收 CNC 的流调度信息时, 计算时延、优先级、包大小, 并执行流聚合, 通知策略控制功能 (policy control function, PCF) 进行 5GS 确定性传输。另外, TSN AF 还要生成时间敏感通信辅助容器 (time-sensitive communication assistance container, TSCAC) 并发送给 PCF, TSCAC 是基于 TSN 时钟的, 可以包含周期、突发到达时间、业务流方向等信息。其中, 周期指的是两个数据突发开始之间的时间段; 突发到达时间是在给定的流方向上, 数据突发的第一个数据包到达 5GS 的入端口的时间 (上行为 DS-TT, 下行为 NW-TT); 业务流方向指时间敏感通信 (time-sensitive communication, TSC) 流的方向。PCF 基于与 TSN 相关的诉求生成 5G 内部的 QoS 参数。会话管理功能 (session management function, SMF) 会接收 PCF 生成的 5GS 内部的 QoS 参数, 按照 5GS 内部已有的处理方式进行处理。另外, SMF 接收 PCF 透传的 TSCAC, 并生成时间敏感通信辅助信息 (TSC assistance information, TSCAI)。SMF 将 TSCAI 发送给无线电接入网络 (radio access network, RAN), RAN 根据 TSCAI 进行调度。由于 TSCAI 由 RAN 来使用, 所以 SMF 需要根据 UPF 上报的时钟偏移进行校正,

使其映射为 5GS 内部使用的时钟, 并且 SMF 要将到达 5GS 入端口的突发到达时间映射为 RAN 可以控制的突发到达时间。对于下行方向的流量, SMF 根据 UPF 最近一次接收的时间偏移测量值, 校正 TSC 辅助容器中的突发到达时间, 并将 TSCAI 突发到达时间设置为校正值与核心网包时延预算 (core network packet delay budget, CN PDB) 的总和, 表示数据突发的第一个数据包到达 RAN 的最晚可能时间。对于上行方向的流量, SMF 根据从 UPF 接收的最新时间偏移测量值, 校正 TSC 辅助容器中的突发到达时间, 并将 TSCAI 突发到达时间设置为校正值与 UE-DS-TT 驻留时间之和, 表示数据突发的第一个数据包到达 UE 出口的最晚可能时间。如果 UE 没有提供 UE-DS-TT 的驻留时间, SMF 基于实现设置突发到达时间。RAN 可以根据 TSC 流的业务周期以及突发到达时间等为业务流配置更短周期的半静态资源调度的实现方法来辅助调度。其他网元与确定性调度关系不大, 篇幅原因, 本文不做详细介绍, 可以进一步参考 3GPP 标准协议^[3, 9-23]。其中, 文献[3,9-10]是基本的架构功能及流程描述, 文献[11-19]描述了核心网网元提供的具体的服务及其中的信元, 文献[20-23]描述了 5G 无线接入网的功能与流程实现。

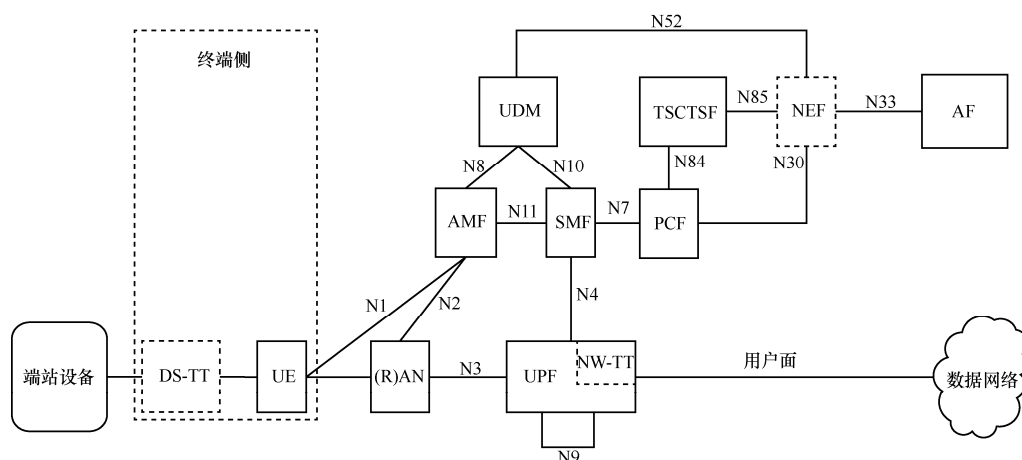


图2 非 TSN 场景下 5GS 支持 TSC 的系统架构

在 3GPP Rel-17 标准中, 5G 蜂窝网络进一步增强支持非 TSN 的 TSC 业务。由于没有限制具体的确定性协议, 所以不要求 AF 可以提供确切的 TSCAC, 而是新引入了一个网元时间敏感通信和时钟同步功能 (time-sensitive communication and time synchronization function, TSCTSF)^[24], 由 TSCTSF 根据 AF/NEF 提供的业务类型参数创建 TSCAC, 提供给 PCF。引入 TSCTSF 的非 TSN 场景下 5GS 支持 TSC 的系统架构如图 2 所示。同时, 5GS 可以进一步支持作为 IEEE Std 1588^[25]中描述的边界时钟、点到点透明时钟或者端到端透明时钟来进行时钟同步。

1.2 超低时延下的挑战

根据 3GPP TS 22.104^[5]的需求, 在工厂自动化场景中, 要求应用层端到端时延可以低至 2~4 ms, 工厂自动化场景需求见表 1。

但是, 当前 3GPP TS 23.501^[3]支持的最低的标准 5GS 内部端到端包时延预算 (packet delay budget, PDB) 为 5 ms。对应的双端无线场景能支持的应用层端到端时延需求为 10 ms。双端无线部署场景示意图如图 3 所示, 可编程逻辑控制器

(programmable logic controller, PLC) 和输入输出 (input/output, I/O) 设备均通过 5G 蜂窝网络的空口进行交互, UPF 直接转发对应的业务数据。在工厂自动化场景中, 使用双端无线部署可以比单端无线部署进一步削减线缆的数量, 并减少 UPF 与数据网络之间的传输时延。在控制器到控制器 (controller to controller) 场景, 默认使用双端无线部署。

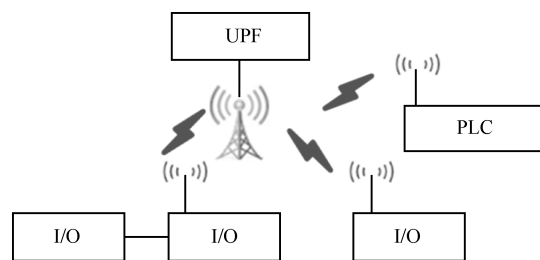


图3 双端无线部署场景示意图

据分析, 当前 5G 蜂窝网络无法支持超低时延的原因主要有如下两个方面。

(1) 传输网时延的拖尾效应

工厂场景实际部署时, 在 RAN 和 UPF 之间 (如图 1 中的 N3 接口) 会经过传输网, 并不是直接相连。传输网中存在一定数量的交换机。对于普通的以太网协议, 传输网中的数据流会存在“多打一”现象。“多

表 1 工厂自动化场景需求

对比项	使用场景	应用层端到端时延/ms	可靠性
1	控制器到控制器	2~10	99.999%~99.999 99%
2	具有安全功能的移动面板	2~4	99.999 9%~99.999 999%

打”现象具体指交换节点的入端口比对应的出端口多, 因而导致必然会有至少两个入端口对应一个出口, 即存在至少两个入端口的流量/数据包都需要一个出端口进行转发的情况。这个端口的交叉会带来潜在的多个入端口的流量/数据包去竞争一个出端口的现象, 从而在出端口出现队列拥塞。拥塞会带来额外不确定的等待时延。这样, 在传输网络中的时延就会出现长尾效应, 如图 4 所示。即在这种情况下, 尽管传输网能够支持的最小时延可以是一个较低的值, 但是其传输数据包的最大时延是一个较高的值, 可能会超过 2 ms。因此, 这样的传输网将无法确定性超低时延。

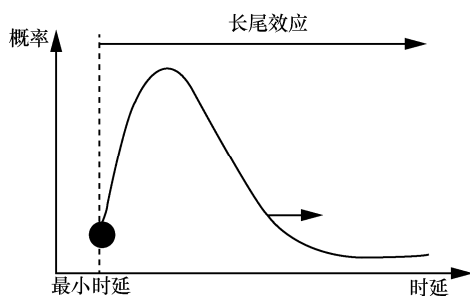


图 4 长尾效应

(2) 空口调度的特殊性

目前, RAN 是按照空口时隙调度, 不能够对业务流进行“随到随发”。例如, 对于时分双工 (time division duplex, TDD) 系统, 如果一个下行的数据包没有在可调度的下行链路时隙到达, 则它必须等到下一个下行链路时隙才可以被传输。TDD 数据包调度示意图如图 5 所示, 矩形数据包和三角形数据包在第一个下行时隙 (downlink slot, DL slot) 到达, 且下一个时隙同为下行时隙。这两个数据包都在 1 个时隙的时间内发出。而圆形的数据包由于在保护带对应的时间段到达, 只能等待 2 个时隙 (其中一个时隙为上行时隙, 无法传递下行数据包)。当 PDB 值低至 2 ms 时, 如果数据包错过了第一个时隙, 则要使 RAN 满足要求是很有挑战性的, 因为每个时隙的典型值为 250 μ s。假设在核心网传递该下行数

据包的传输时延为 1 ms, 那么 RAN 只剩下 1 ms 进行传递。这意味着 RAN 只有 1 个或 2 个时隙可用于满足时延需求。如果 RAN 错过了, 则数据包将以大于端到端 2 ms 的时延传送, 不符合应用的诉求。

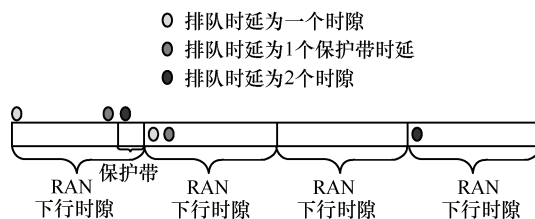


图 5 TDD 数据包调度示意图

另一方面, 同一 RAN 节点中不同 TSC 流的突发到达时间可能会相互冲突。例如, 当不同的流都在同一时间到达时, RAN 可能无法同时调度所有 TSC 流的数据包。这样, 有一部分 TSC 流的数据包就要推迟发送。这就会导致类似的问题。

2 端到端确定性系统设计

为了解决第 1.2 节中提到的挑战, 提出了一种端到端确定性系统, 对 N3 接口确定性和跨层调度优化两个方面进行改进。

对于传输网时延的拖尾效应, 其主要原因是 N3 接口的传输网目前不能配合 5GS 进行确定性传输。所以该端到端确定性系统应使能 5GS 与支持确定性的传输网进行互通来保证 N3 接口的确定性。换一种说法, 5GS 要与 N3 中的确定性网络进行互通。

对于空口调度的特殊性所带来的问题, 其主要原因是 RAN 目前只能接收 TSC 流的 TSCAI 去辅助调度, 但是不能按照自己的调度情况进行反馈, 所以该端到端确定性系统应支持 RAN 按照自己的调度情况进行反馈。核心网可以将 RAN 的反馈进一步提交给应用, 应用要基于 RAN 的反馈调整发包时间。

另外, 由于该端到端确定性系统应依赖于 5G 蜂窝网络以及现有的确定性网络协议, 所以其不应该对现有标准协议 (如 3GPP TS 23.501^[3]、IEEE 802.1Q^[4]等) 做出较大的改动。这是为了避免改动



过大导致无法形成产业共识，将来各厂商的设备没有办法真正互通，为商用带来负面影响。

2.1 N3 接口确定性

为了保证 N3 接口的确定性，可以将 RAN 和 UPF 分别作为现有确定性协议中的终端用户，比如可以作为 IEEE 802.1Q^[4]中所定义的发送者和接收者。对于上行方向的业务流，RAN 作为发送者，UPF 作为接收者。对于下行方向的业务流，UPF 作为发送者，RAN 作为接收者。这样 RAN 和 UPF 就可以利用现有的确定性协议来保证 N3 接口上传输的时延上限。如果 RAN 和 UPF 要基于现有的确定性协议来进行调度，那么要求传输网中的确定性网络控制器匹配在 RAN 和 UPF 之间传递的业务的相关诉求。另一方面，RAN 和 UPF 也要匹配确定性网络控制器的要求。但是，RAN 和 UPF 作为 5GS 内部的网元，尤其是 UPF，作为核心网的用户面，需要由 5G 核心网的控制面网元进行控制，而不宜由传输网的控制器直接进行控制。

基于上述思考，提出了一种 5GS 和确定性传输网互通的架构，如图 6 所示。

其中，RAN 和 UPF 充当最终用户，按照现有的确定性协议支持基于时间窗的调度。5G 核心网控制面与外部确定性传输网控制器交互（当然，也可以由传输网的网络管理员来进行配置），以实现 RAN 和 UPF 之间的确定性通信相关参数的传递。本架构并不限制 N3 接口上确定性协议的种类，可以按照需求尽量重用现有的传输网所支持的确定性协议。5G 核心网控制面根据传输网提供的确定性传输参数为 RAN 和 UPF 配置调度参数。

具体的，5G 核心网控制面可以根据流量模式（如周期、时延要求、流量特征等）确定业务流在 RAN 或 UPF 上排队和调度的时间。5G 核心网控制面仍然重用第 1.1 节中描述的 5G 核心网架构中的控制面网元即可，没有必要引入新的控制面网元。

引入图 6 所述的架构，传输网中的交换机可以按照现有的确定性协议进行工作。RAN 和 UPF 也可以根据现有的 5GS 架构获取确定性传输所需要的参数配置。而且 N3 接口的确定性网络与当前架构中数据网络里与 5GS 互通的确定性网络可以相互独立。这样，最大程度上重用了现有的机制，避免了对现有的 5GS 架构和确定性协议产生过大的影响。但是 RAN 和 UPF 却可以按照确定性网络中的终端用户进行数据包传递，从而保证了 N3 接口的确定性，消除了“多打一”带来的长尾效应。

2.2 跨层调度优化

为了解决空口调度的特殊性所带来的两个问题，即业务数据流的到达时间与 RAN 的调度时机不匹配，以及多流的调度冲突，可以考虑让 RAN 根据自己的调度进行合适的反馈。如第 2.1 节所述，现有技术中 TSNAF 或 TSCTSF 已经可以向 5G 核心网提供 TSCAC，并且 SMF 会将 TSCAC 转化为 TSCAI 并交由 RAN 进行相关 TSC 流的调度。但正如第 2.1 节提到的，RAN 目前只是被动地接受各个 TSC 流的 TSCAI，并且依照 TSCAI 进行调度。如果出现了业务数据流的到达时间与 RAN 的调度时机不匹配，或者多个 TSC 流的调度冲突问题，RAN 也只能让对应的 TSC 流的数据包进行等待。那么，假如 TSC 流的数据包恰好在匹配 RAN 的调度时机的时间窗到达，而且到达时与其他的 TSC 流之间没有不可调和的冲

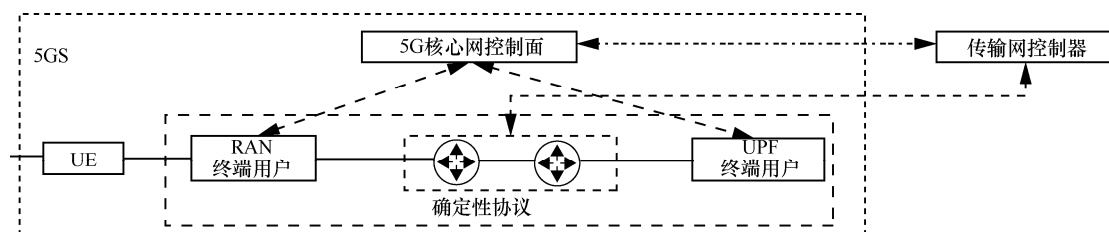


图 6 5GS 和确定性传输网互通的架构

突, 则第 1.2 节中提到的问题就可以规避掉。那么可以让 RAN 基于现有技术中各个 TSC 流的 TSCAI 以及本身的调度情况进行反馈, 从而使对应的应用可以调整其发包时间。

基于上述思考, 提出了基于 RAN 反馈的数据包发送时间调整流程, 具体如图 7 所示。

步骤 1 AF (或者 TSCTSF) 按照现有技术向 5G 核心网控制面提供 TSCAC。

步骤 2 5G 核心网控制面 (具体为 SMF) 将 TSCAC 转化为 TSCAI 发送给 RAN。

步骤 3 RAN 根据自己的调度情况可以作出判断。若 TSC 流的数据包恰好在匹配 RAN 的调度时机的时间窗到达, 而且到达时, 与其他的 TSC 流之间没有不可调和的冲突, 那么 RAN 就不必对该 TSC 流对应的数据包的发送时间反馈调整请求。在其他情况下, RAN 需要找到一个合适的时机, 使对应 TSC 流的数据包达到上述效果, 并且向 5G 核心网控制面发送对应的到达时间调整请求。具体地, RAN 可以反馈给 SMF, SMF 可以按照现有的架构再上报给 PCF。

步骤 4 5G 核心网控制面 (具体为 PCF), 将到达时间调整请求发送给 AF (或者 TSCTSF)。

步骤 5 AF (或 TSCTSF) 根据应用侧的一些手段, 调整应用服务器的数据包发送时间。

步骤 6 AF (或 TSCTSF) 根据调整后的数据包发送时间更新发送给网络侧的 TSCAC。

本流程既可以用于第 2.2 节中的 5GS 和确定性传输网互通架构, 又可以用于第 1.2 节中的 5GS 与

TSN 互通系统架构或非 TSN 场景下 5GS 支持 TSC 的系统架构。当本流程用于 5GS 和确定性传输网互通架构中时, RAN 可以根据 TSCAI 较为准确地知道对应 TSC 流的突发到达时间。图 7 中带阴影的小方块部分代指用户面数据包, 只给出了下行作为例子。但由于 TSCAC 中包含的突发到达时间本身就可以包含上行方向和下行方向, 所以本流程可以既用于下行的业务流, 又用于上行的业务流。

引入图 7 所述的流程, 对现有技术中 TSC 流调度的机制并未作出大的改变, 如步骤 (1)、步骤 (2) 和步骤 (6) 均可以重用现有的机制, 只在步骤 (3)、步骤 (4) 和步骤 (5) 引入了必要的反馈和调整机制, 从而避免了对现有的协议流程产生过大的影响。但是应用发送数据包的时机和 RAN 的调度时机却可以较好地匹配, 并且可以避免多个 TSC 流之间的冲突, 从而减少了由于 RAN 调度的特殊性所引入的等待时延。

3 结束语

本文提出的端到端确定性系统, 基于 5GS 和确定性传输网互通的架构和基于 RAN 反馈的数据包发送时间调整流程, 消除了传输网中“多打”导致的长尾效应, 减少了由于 RAN 调度的特殊性所导致的等待时延, 从而保证了端到端的确定性超低时延。并且基于 5GS 和确定性传输网互通的架构和基于 RAN 反馈的数据包发送时间调整流程可以相互独立, 将来可以独立演进。另外, 本系统模型引入的技术对现有协议的改动较小,

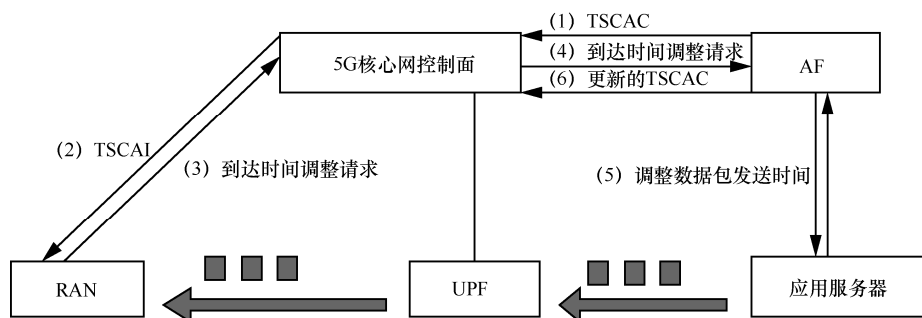


图 7 基于 RAN 反馈的数据包发送时间调整流程



与现有技术的结合较好，从而增加了该系统模型的可实施性和可部署性。

进一步地，考虑除了工厂场景，生产与生活中还有一些其他超低时延要求的业务，比如增强现实（augmented reality, AR）、虚拟现实（virtual reality, VR）业务等，本系统也可以用于这些业务场景，从而降低这些业务在 5GS 中传递的时延。

参考文献：

- [1] 3GPP. Discussion on enhancement for URLLC and deterministic network: S2-2104144[S]. 2021.
- [2] 3GPP. Study on 5G timing resiliency and TSC & URLLC enhancements: SP-211634[S]. 2021.
- [3] 3GPP. System architecture for the 5G system; stage 2: TS 23.501[S]. 2021.
- [4] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks—bridges and bridged networks: Std 802.1Q[S]. 2018.
- [5] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; stage 1: TS 22.104[S]. 2021.
- [6] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks—bridges and bridged networks—amendment: stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements: Std 802.1Qcc-2018[S]. 2018.
- [7] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks—timing and synchronization for time-sensitive applications: Std 802.1AS-2020[S]. 2020.
- [8] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- station and media access control connectivity discovery: Std 802.1AB-2016[S]. 2016.
- [9] 3GPP. Procedures for the 5G system; stage 2: TS 23.502[S]. 2021.
- [10] 3GPP. Policy and charging control framework for the 5G system: TS 23.503[S]. 2021.
- [11] 3GPP. 5G system; session management policy control service; stage 3: TS 29.512[S]. 2021.
- [12] 3GPP. Interface between the control plane and the user plane nodes; stage 3: TS 29.244[S]. 2021.
- [13] 3GPP. 5G system; session management services; stage 3: TS 29.502[S]. 2021.
- [14] 3GPP. Policy and charging control signalling flows and QoS parameter mapping; stage 3: TS 29.513[S]. 2021.
- [15] 3GPP. 5G system; policy authorization service; stage 3: TS 29.514[S]. 2021.
- [16] 3GPP. 5G system; access and mobility management services; stage 3: TS 29.518[S]. 2021.
- [17] 3GPP. Non-access-stratum (NAS) protocol for 5G system (5GS); stage 3: TS 24.501[S]. 2021.
- [18] 3GPP. 5G system; network function repository services; stage 3: TS 29.510[S]. 2021.
- [19] 3GPP. 5G system; network exposure function northbound API; stage 3: TS 29.522[S]. 2021.
- [20] 3GPP. NG-RAN; NG application protocol (NGAP): TS 38.413[S]. 2021.
- [21] 3GPP. NR; NR and NG-RAN overall description: TS 38.300[S]. 2021.
- [22] 3GPP. NR; radio resource control (RRC); protocol specification: TS 38.331[S]. 2021.
- [23] 3GPP. PDU session user plane protocol: TS 38.415[S]. 2021.
- [24] 3GPP. Introduction of architecture for AF requested support of time sensitive communication and time synchronization: S2-2105082[S]. 2021.
- [25] IEEE. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems: Std 1588[S]. 2019.

[作者简介]



孙海洋（1994—），男，现就职于华为技术有限公司，3GPP SA2（System Aspects 2）标准代表，主要研究方向为确定性网络、策略控制、QoS 管理、网络切片等。



施艺（1984—），男，现就职于华为技术有限公司，负责 5G-Advanced URLLC 研究工作和产业推动，主要研究方向为确定性网络、toB 物联网、工业大上行等。



李岩（1976—），男，华为技术有限公司移动宽带网络架构研究技术专家，主要研究方向为移动边缘计算、低时延高可靠、网络切片。

范强（1990—），男，华为技术有限公司标准研究工程师，主要研究方向为 IIoT/URLLC、XR、移动性管理等。

马欣（1982—），男，华为技术有限公司主任工程师，主要研究方向为工业控制领域的 5G 技术与产业推动。