



研究与开发

面向工业时敏业务的5G TSN融合网络切片资源调度

管婉青¹, 刘诺言¹, 李卫¹, 付美霞², 张海君¹

(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)

摘要: 5G与时间敏感网络(time sensitive network, TSN)融合部署是实现工业互联网无线化和柔性制造的重要基础, 如何实现多类型工业业务和移动业务的共网高质量传输, 是5G TSN融合网络需要解决的关键问题。为此, 面向工业互联网场景, 依据业务特征差异划分工业业务流的类型, 设计了一种适配周期性时敏业务和突发性时敏业务的网络切片资源调度策略, 提出了基于均匀分布的资源分区调度算法。所提方法通过控制资源预留和资源抢占, 在优化无线资源使用的同时, 保障了工业业务流的时延, 满足了移动业务的传输速率需求。最后, 通过仿真实验验证了所提方法在提升业务需求满足度和资源利用率方面的有效性。

关键词: 5G TSN融合网络; 资源调度; 网络切片; 时延敏感类业务

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024073

Slice scheduling for industrial time-critical services in 5G TSN integration network

GUAN Wanqing¹, LIU Nuoyan¹, LI Wei¹, FU Meixia², ZHANG Haijun¹

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

2. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: The integrated deployment of 5G and time sensitive network (TSN) is an important foundation for realizing wireless industrial Internet and flexible manufacturing. How to guarantee the high-quality transmission simultaneously of diverse industrial services and mobile services is a key issue to be solved for 5G TSN integration. Therefore, the types of industrial services were divided according to the differences in requirement characteristics, a slice scheduling strategy for industrial Internet was designed to satisfy the requirements of periodic time-critical services and sporadic burst services, and a resource partitioning algorithm based on uniform distribution was proposed. By controlling resource reservation and resource preemption, the proposed method can optimize the utilization of wireless resources and guarantee the delay of industrial traffic and the transmission rate of mobile services. Finally, the effectiveness of the proposed method in improving the service requirements satisfaction and resource utilization was verified by simulation experiments.

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No.62101031)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62101031)



Key words: 5G-TSN integration network, resource scheduling, network slicing, time-critical service

0 引言

工业是国民经济的主导,互联网与工业结合产生的工业互联网几乎涵盖了当今各学科的诸多前沿技术,用以处理和承载垂直行业对可靠性、时延、吞吐量等各项指标日益苛刻的各种业务。然而现阶段的传统以太网和工业总线存在标准不一、对接困难等弊端,无法满足一些工业业务的要求,所以能够实现微秒级确定性服务的时间敏感网络(time sensitive network, TSN)技术应运而生。作为一组以太网标准,TSN标准簇提供了实现低延时、流量整形和时间同步的相关技术,使承载确定性工业业务成为可能。

TSN为有线网络提供了确定性和高可靠性的数据传输,但是工业互联网场景中很多新兴工业业务需要支持时延敏感业务流的无线传输^[1]。然而无线传输的不确定性为保障低时延、高可靠带来了挑战,因此,在TSN技术与无线技术融合时需要考虑无线网络的不确定性。5G技术在空口连接、高层协议和整体架构上进行了优化,支持增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)、超高可靠低时延通信(ultra-reliable low-latency communication, URLLC)、大规模机器类型通信(massive machine type communication, mMTC)三大典型应用场景。5G与TSN的融合是工业互联网无线化和柔性制造的重要基础^[2],也是为工业互联网、远程医疗等应用提供确定性网络保障能力的关键^[3]。

然而,5G与TSN的融合部署依然面临挑战,在工业互联网场景下,典型的闭环控制过程亟须保证极致的确定性端到端业务体验,同时还需要实现不同类型业务彼此之间的互联互通与密切协同,为多类型业务流量提供智能化、差异化承载服务,保证全业务承载的传输质量。多样化、动

态化、定制化的服务需求急需开放的网络架构、灵活的网络部署以及智能的资源管理方案^[4]。针对工业业务的需求差异,网络切片技术由于可以在同一物理网络上根据不同业务需求定制包含时延、吞吐量、安全性和带宽特性的独立逻辑虚拟网络,成为了解决上述问题的关键。实现多类型工业业务与移动业务的共网高质量传输需要在5G TSN融合部署中引入高效的切片资源调度算法。

Schmidt等^[5]基于服务质量(quality of service, QoS)的3个关键指标提出了一种支持固定切片、动态切片和按需切片3种类型切片的无线资源调度策略,满足不同业务对QoS的差异需求。但其基于4G网络架构,调度时间间隔长,无法满足低时延工业业务的需求。Anand等^[6]针对5G网络架构进行无线资源分配,在时域上将时隙划分为更小的迷你时隙,将URLLC业务的调度时间间隔缩短至迷你时隙的跨度,同时提出了叠加和穿刺的概念,使URLLC业务可以抢占eMBB业务资源,极大地缩短了URLLC业务的时延并且保证了URLLC业务的可靠性。但这种完全基于抢占的调度算法会对eMBB业务的速率造成较大的影响,并且忽略了不同类型工业业务之间的QoS差异,无法适配多类型工业业务和无线业务共网传输的场景。Ginthör等^[7]提出了一种针对确定性流量的切片资源调度方法,提出了可抢占切片、抢占限制切片和预留资源切片,并且结合一种抢占感知的方法最大化上述3种切片的整体效用。但在工业互联网场景中,工业业务的资源需求复杂多样,且时延敏感类工业业务占比较大,现有研究均没有考虑工业业务的特征差异,难以满足工业制造场景下的多类型工业业务需求。

本文针对工业制造场景的业务特点,提出了一种5G TSN融合网络中的无线电接入网(radio access network, RAN)切片资源调度算法,同时

满足时延敏感类业务（简称时敏业务）的时延需求以及移动业务的传输速率需求。基于时延敏感类工业业务（简称时敏工业业务）特征将业务划分为突发性时敏工业业务和周期性时敏工业业务，设计适配多类型工业业务的5G TSN融合网络切片无线资源调度算法，根据业务需求特征创建切片实例，基于资源预留和资源抢占给出最优的RAN切片资源分配方案，满足多类型工业业务需求的同时优化无线资源使用。

1 5G TSN融合网络系统模型

1.1 工业业务类型划分

根据3GPP TR 22.804标准，工业互联网场景中的工业业务主要可分为控制类、信息采集类、移动应用类3种，控制类应用需要低时延、高可靠的数据传输，信息采集类需要周期性的稳定数据传输，移动应用类对时延要求并不苛刻，但需要高速率数据传输。因此，5G TSN融合网络中基站承载的多类型差异化工业业务流可以划分为3个类别：周期性时敏业务流、零星突发时敏业务流和非时敏业务流。无线侧TSN应用与需求见表1。

零星突发性时敏业务对应的应用通常是由特定的、偶发的事件和错误触发的，数据到达时间具有随机性，业务数据量较小且该业务对时延具有较高的敏感性。如工业互联网场景中机械臂的紧急制动、生产过程的闭环控制等应用对时延的要求一般在10 ms之内，而且可靠性要求极高，业务流的到达具有突发性，难以预测。周期性时敏业务按照固定的周期进行数据传输，在传输时

延期限内完成数据传输。如自动化产线的运动控制、生产设备之间的协调控制等应用，对时延的要求在1~2 ms，可靠性要求较高，且具有一定的周期性和可预测性。除了上述两类时敏业务之外，还存在设备软件更新、状态诊断等尽力而为无特定时延要求的业务，以及园区监控、机器视觉等依赖帧率和采样率的非时敏业务，其流量需求大、并发高，但对时延要求不高。

工业互联网场景中需要针对业务流特征提供差异化承载服务，优先满足时敏业务的需求，为高优先级的突发性时敏业务提供可靠传输，保证全业务共网承载的传输质量。本文基于网络切片技术为不同类型的业务流量提供差异化承载服务，在5G TSN融合网络中为3种类型业务流创建专属切片，提供适配业务需求的无线资源分配方案，在优化无线资源使用的同时实现多类型时敏工业业务的高质量承载。

1.2 5G TSN融合网络架构

5G TSN融合网络架构如图1所示，在5G系统的用户面和控制面嵌入了TSN转换功能。在用户面功能（user plane function, UPF）中部署的网络侧TSN转换器（network-side TSN translator, NW-TT）和在用户设备（user equipment, UE）中部署的设备侧TSN转换器（device-side TSN translator, DS-TT）用于执行QoS映射，执行流过滤和监管功能，并支持流转发。控制面的TSN网络功能（application function, AF）与中央网络配置（centralized network configuration, CNC）实体交互，获取流信息，保障传输可靠性。CNC

表1 无线侧TSN应用与需求

业务类别	应用	时延/ms	可靠性	速率/(Mbit·s ⁻¹)	有效载荷/byte
零星突发时敏业务	紧急制动	<4	99.999 9%~99.999 999%	—	40~250
	闭环控制	<10	99.999 9%~99.999 999%	—	10
周期性时敏业务	运动控制	2	99.99%~99.999 9%	—	20
	协同控制	1	99.999%~99.999 99%	—	40~250
非时延敏感类业务	软件下载	—	—	>1	—
	用户互动	—	—	>5	—

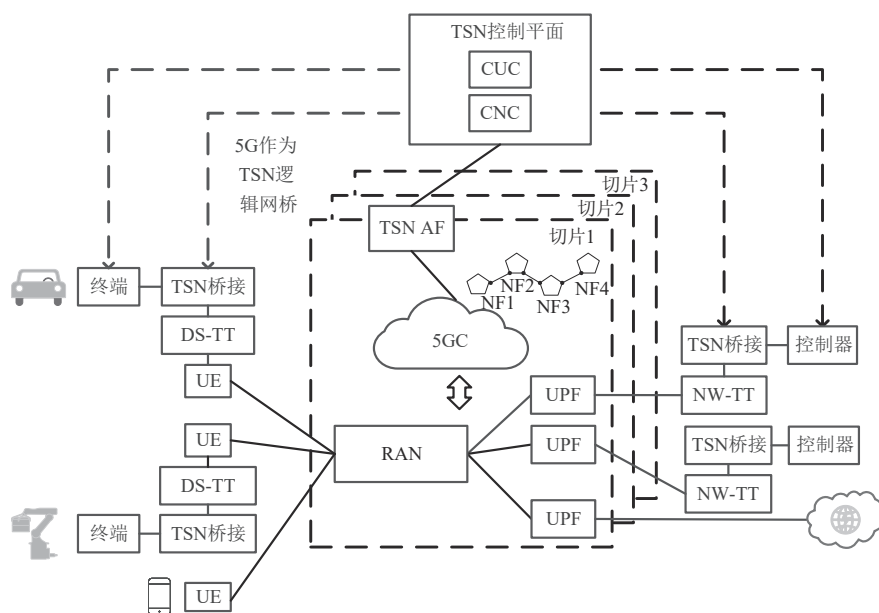


图1 5G TSN融合网络架构

实体将从中央用户配置 (centralized user configuration, CUC) 实体接收的流信息和 5G-TSN 网桥的配置信息发送给 TSN AF, 反过来, TSN AF 将反馈和报告流 QoS 发送给 CNC。此外, NW-TT 和 DS-TT 支持 TSN 时域的时钟, 而其他 5G 系统组件如 UE、基站等则与 5G 系统时钟同步。

网络切片管理编排系统通过接收租户需求、感知网络状态进行资源调配和切片控制,本文面向5G TSN融合场景创建3种类型切片,分别承载非时延敏感类业务、周期性时敏业务和突发性时敏业务,在确保资源与安全隔离的情况下为非时延敏感类业务提供大带宽以及高速率,为两类时延敏感类业务提供确定性时延和高可靠的服务。时延敏感类业务采用基于非时隙(non-slot based)调度,即在更小的时间跨度迷你时隙上进行资源分配,而非时延敏感类业务则使用基于时隙(slot-based)调度,为了保障时敏业务的确定性传输,支持时敏业务对非时敏业务的资源抢占。所提的无线资源调度算法部署在接入网侧的资源调度器中,明确分配给上述3种类型切片的无线资源之后,通过两层MAC调度器^[8]进行无线资源分配,第1层调度面向具体切片,将分配给切片的

虚拟资源块 (virtual resource block, VRB) 分配给用户, 第2层调度将分配给用户的VRB映射到物理资源块 (physical resource block, PRB) 上。

2 5G TSN 无线资源调度问题建模及算法求解

2.1 5G TSN融合网络切片无线资源调度流程

无线侧数据信道可调度的最小物理资源单位为资源块 (resource block, RB), 切片需要的时频资源不仅仅满足带宽或速率需求所需的 RB 数量, 也包括满足切片时延需求必须分配的 RB 的相对位置, 使用 $\varphi_{t,f}$ 表示占用一个时隙内第 t 个迷你时隙上的第 f 个 RB (从下至上计数), 表征时频域中所有 RB 的占用情况。3 种差异化切片的资源分配通常发生在分配窗口期开始时, 可用的资源区域包括不可抢占区域 K_α 、可抢占区域 K_β 和预留资源区域 K_γ , 在频域上分别占总带宽的 α 、 β 和 γ , 时频域划分与资源抢占示意图如图 2 所示。其中预留资源区域 K_γ 为时延敏感类切片独占, 不可抢占区域 K_α 为非时延敏感类业务独占, 以确保非时延敏感类业务的基本速率。可抢占区域 K_β 为

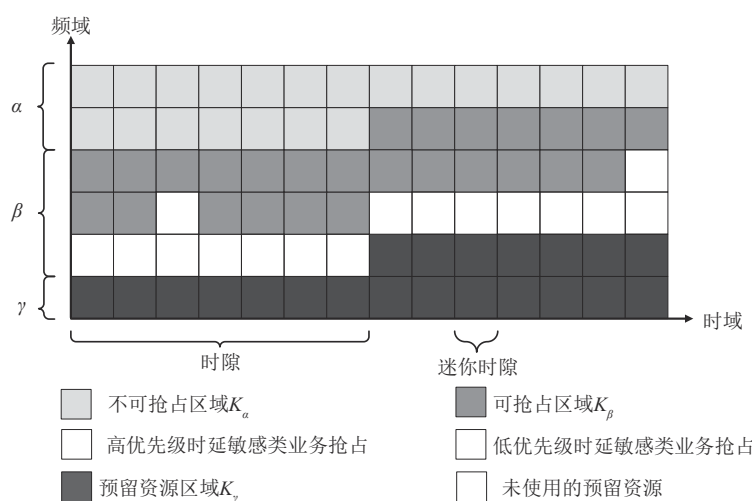


图2 时频域划分与资源抢占示意图

非时延敏感类和时延敏感类业务共同使用，其顺序为优先分配给非时延敏感类业务，如果预留的资源已被全部使用，而又有时延敏感类业务到来，则该时延敏感类业务可以抢占位于可抢占区域的非时延敏感类业务资源。

(1) 若 K_γ 在一个时隙内划分得过大，虽然可以减少对 K_β 部分的抢占，但在迷你时隙上分布不均的时延敏感类并不能充分利用该部分的资源，从而造成资源的浪费。

(2) 如果不划分 K_γ ($\gamma=0$)，时延敏感类业务全部依赖抢占，假设抢占非时延敏感类业务资源存在非理想恢复，将产生非零率损失，影响非时延敏感类业务的传输速率。

以上两种情况会导致资源的浪费、非时延敏感类用户数据传输速率降低和增加额外的控制开销等问题，因此确定 γ 以兼顾非时延敏感类业务的速率和时延敏感类对时延的需求至关重要。

以下行传输为例，工厂 TSN 控制器在向工业终端传输数据时，不同类型网络切片上的差异化工业业务流量会共享 5G TSN 融合网络中 5G 基站的时频资源，经过新空口 (new radio, NR) 传输至终端设备。5G NR 部分的无线资源调度流程大致分为 5 个阶段：时频资源划分、业务需求上传、业务类型判断、时频资源分配、物理资源映射。

切片资源分配窗口期包含 1 个或者 N 个时隙，在分配窗口开始的时候为已经到达的业务请求分配资源，分配给不同切片的资源持续到分配窗口结束，然后在下一个分配窗口开始时进行下一次分配。在分配窗口期开始时，RAN 侧的资源调度器基于业务信息确定每个时隙内周期性时延敏感类业务的数量和大小，基于本文所提方法确定预留多少资源，即划分预留资源 K_γ 。剩余资源分配给非时延敏感类切片，分配给非时延敏感类业务的资源包括不可抢占区域和可抢占区域 K_α 、 K_β 。整个分配窗口持续过程中，如果有突发性时延敏感类业务请求到达，则进行资源抢占，占用可抢占区域的资源。

当业务到达时，首先对业务类型进行以下判断。

- 若为突发性时延敏感类业务，则在预留资源不足的情况下抢占 K_β 的 RB。
- 若为周期性时延敏感类业务，在有足够预留资源的情况下使用 K_γ 资源，否则抢占 K_β 的 RB。
- 若为非时延敏感类业务，则依据业务的速率需求分配资源。

2.2 资源区域划分

用户 UE 若请求资源并上传参数后，5G TSN 融合网络的基站根据接收的参数确定数据块大小，



然后确定调制与编码策略 (modulation and coding scheme, MCS), 选择合适的编码调制方式。本文假设信道质量在任意时刻都足以支持一个符号承载最多的比特数并且该信道为频率非选择性信道, 依照 3GPP 标准, 非时延敏感类业务使用 256QAM 编码, 时延敏感类业务使用 64QAM 编码, 基于 3 种类型业务的数据量大小、时延要求、目标传输速率分别计算业务所需的 RB 数量。

本文所提的调度算法为了保障周期性时敏业务的高可靠性, 基于该业务的数据流到达周期为其预留资源, 避免资源抢占。同时, 考虑突发性时敏业务的数据流到达时间具有不确定性, 且数据量较少, 支持其通过抢占非时延敏感类业务的资源完成数据传输。以下行数据传输为例, 在进行无线资源分配时, 所提方法为每个时隙确定参数 α 、 β 、 γ 的取值。基于每个时间间隔 s 之内的时延敏感类业务需求的平均值 m_s 来确定资源预留参数 γ , 在满足时延要求的前提下将时延敏感类业务的资源需求在一个时隙内均匀分布, 避免资源浪费的同时, 减少时延敏感类业务对非时延敏感类业务的抢占, 降低抢占带来的速率损失。

在时延敏感类业务的数量 N_{TSN} 增多, 或突发性时延敏感类业务的占比 ratio 增加时, 仅仅依靠平均值来确定参数 γ 无法满足时敏业务的传输需求, 资源抢占造成的速率损失无法忍受。因此所提方法通过增加偏置量 N_bias 、 $ratio_bias$ 来根据 N_{TSN} 和 ratio 对预留资源的划分做动态调整, 确定 γ 参数的表达式为:

$$\gamma = (\lceil m_s \rceil + ratio_bias - N_bias) / N_{RB}^{B, \Delta f} \quad (1)$$

其中, $N_{RB}^{B, \Delta f}$ 为在最大传输带宽为 B (MHz)、子载波间隔为 Δf (kHz) 时资源块 RB 的总量。添加偏置量以确保在尽量少抢占非时延敏感类业务资源的同时充分地利用预留资源。参数 α 和 β 与非时延敏感类业务的类型有关, 对数据传输速率要求高的非时延敏感类业务通常无法忍受资源抢占带

来的速率损失, 需要为其分配不可抢占区域 K_α 的资源, 因此 α 的大小由该类业务的数据量和传输速率决定, $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

2.3 基于均匀分布的资源分区调度算法

本文提出一种基于均匀分布的无线资源调度策略, 即在满足周期性时敏业务时延需求的前提下, 使资源需求在时隙内的每个迷你时隙上呈均匀分布, 在避免预留资源浪费的同时最大限度地减少资源抢占的发生。周期性时敏业务的调度流程如图 3 所示, $n_{arrival}$ 为单个业务到达资源调度器的时刻, $n_{scheduled}$ 为调度器为其分配物理资源 RB 并开始传输的时刻, n_{end} 为该业务传输结束的时刻, $n_{deadline}$ 为该业务最大能接受的时延。

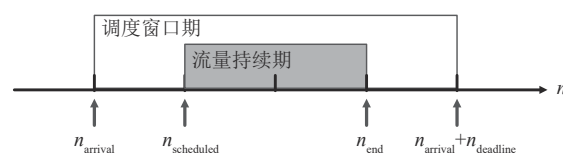


图3 周期性时敏业务的调度流程

基于均匀分布的资源分区调度算法遵循以下 3 个原则。

- 在时延敏感类业务到达之后为其分配资源。
- 时延敏感类业务的传输都必须在最大时延 $n_{deadline}$ 内传输完成。
- 周期性时延敏感类业务可以根据当前的资源使用情况将部分资源需求延后满足, 只要在最大时延要求范围内完成数据传输即可。

针对以上原则, 将所有时延敏感类业务的资源需求分割为需求单元 $r_{id, num}^n$, 其中 n 为时延敏感类业务的时延参数, id 为时延敏感类业务的编号, num 为属于该时延敏感类业务的资源需求单元编号。资源需求单元 $r_{id, num}^n$ 的参数 n 由当前资源使用情况决定, 在最大时延允许的范围内调度无线资源满足所有的需求单元。基于均匀分布的无线资源分区调度算法如算法 1 所示。

算法 1 基于均匀分布的无线资源分区调度算法

根据 n_{deadline} 确定一个数据传输时间窗口，其范围从第 t 个到第 $t + n_{\text{deadline}}$ 个迷你时隙；

for $i = 1, 2, \dots, n_{\text{deadline}}$

找到这个窗口内时延敏感类业务资源需求量第 i 小所在的迷你时隙 $t_{\min}$ ；

对该窗口内的其余资源需求量从大到小进行排序，并且遍历每个迷你时隙上的资源需求单元；

if 无任何资源需求单元在调度后参数 n 满足 $0 \leq n \leq n_{\text{deadline}}$

$i = i + 1$

else 将满足条件的资源需求单元调度到迷你时隙 $t_{\min}$ 上，并修改其参数 n

$i = 1$

end if

end for

until 遍历后无资源需求单元进行调度；

窗口向前移动一个迷你时隙。

3 仿真方法

3.1 仿真环境

本文面向 5G 与 TSN 融合部署的工业互联网场景，5G 系统作为 TSN 的逻辑网桥，5G 空口需要传输时敏工业业务与移动宽带业务，基站侧的无线资源调度器需要面向多个不同类型工业业务的资源需求差异进行高效的资源分配。仿真中考虑由一个基站接收用户请求并承载不同类型业务流的场景，具体仿真参数见表 2，基站最大传输带宽为 50 MHz，子载波间隔设为 60 kHz，子载波配置间隔 μ 值为 2，观察时间为 5 个子帧长度。非时延敏感类业务总量为 10，始终占用除预留资源之外的所有资源，时延敏感类业务总量为 10~50。创建 3 个不同类型切片，一个切片用于承载非时延敏感类业务，另外两个切片分别承载高优先级时延敏感类业务和低优先级时延敏感类业务。

表 2 仿真参数

参数	值
最大传输带宽 B/MHz	50
子载波间隔 $\Delta f/\text{kHz}$	60
资源块 RB 总量 $N_{\text{RB}}^{B, \Delta f}/\text{个}$	65
子载波配置间隔 μ	2
迷你时隙时间间隔 μs	35.7
子帧个数/个	5
可抢占资源比例 α	0.077 (5/65)
非时延敏感类业务总量/个	10
时延敏感类业务总量/个	10~50
时延敏感类业务最大时延 n_{deadline}	3

式 (1) 中的两个偏置量，偏置量 N_{bias} 随 N_{TSN} 变化的取值 (ratio=30) 和偏置量 ratio_bias 随 ratio 变化的取值 ($N_{\text{TSN}}=30$) 分别见表 3 和表 4。

表 3 偏置量 N_{bias} 随 N_{TSN} 变化的取值 (ratio=30)

N_{bias}	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N_{TSN}	2	2	1	1	1	0	0	2	2

表 4 偏置量 ratio_bias 随 ratio 变化的取值 ($N_{\text{TSN}}=30$)

ratio	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
ratio_bias	-1	0	1	2	2	3	3	4	4

本文所提方法针对周期性时敏业务和突发性时敏业务的需求特征提供差异化调度策略，使用基于均匀分布的资源分区调度算法，为周期性业务确定预留资源量，旨在均衡资源预留引起的资源冗余和资源抢占引起的速率损失。为了分析所提方法的性能，本文基于现有研究设置了 3 种对比方法。

(1) 文献[9]针对 URLLC 和 eMBB 共存场景，提出了 URLLC 切片资源抢占方法；本文基于该方法设置对比方法 1，不进行资源预留，周期性时敏业务和突发性时敏业务均依赖抢占非时延敏感类业务的资源进行流量传输。

(2) 文献[7]为了减少资源抢占，提出了基于 URLLC 需求进行资源预分配的方法；本文基于该方法设置对比方法 2，基于周期性时敏业务和突发性时敏业务的需求进行资源预留，预留资源不足时则抢占非时延敏感类业务的资源进行流量传输。

(3) 为了分析所提出的均匀分布算法性能，



设置对比方法3, 对到达的周期性时敏业务和突发性时敏业务都使用均匀分布算法, 并提供一定的资源预留, 所有时敏业务优先使用预留资源, 否则进行抢占。

3.2 性能衡量指标

工业互联网场景下, 各类工业业务对时延、可靠性、速率的要求不尽相同, 5G TSN融合网络需要承载更多的时延敏感类业务, 同时利用有限的时频资源兼顾多类型工业业务的差异化需求。为了验证所提方法能够在最大限度地满足多类型工业时敏业务和非时敏业务需求的同时, 优化无线资源的使用, 本文利用业务需求满足度和资源利用率来衡量所提方法的性能, 通过计算非时延敏感类业务的速率损失来衡量资源抢占带来的负面影响。

满足工业时敏业务的需求只需要在时延期限内完成数据传输, 无须关注传输速率。而非时延敏感类业务需要保障传输速率, 资源抢占造成的速率损失过大则会造成该类型业务的需求无法满足。所提方法需要同时兼顾周期性时敏业务、突发性时敏业务和非时延敏感类业务的需求, 所以定义满足需求的业务量与总业务量的百分比来表示业务需求满足度。时敏工业业务与非时延敏感类业务共享基站的时频资源时, 需要最大限度地避免资源浪费, 因此定义承载业务的资源占用量与总资源量的百分比为资源利用率。

在计算非时延敏感类速率时, 假定在10:0配置下(10D、0S、0U), 使用256QAM调制, 每个迷你时隙包含两个OFDM符号, 且以2T4R终端接收并去除控制面开销(80%)后, 每个非时延敏感类业务 K_m 的理论峰值传输速率 v 为:

$$v = 1.72 \times 10^7 \times \text{Num} \quad (\text{Mbit/s}) \quad (2)$$

$$\text{Num} = \frac{1}{7} \sum_{t=1}^7 \sum_{f=1}^{N_{\text{RB}}^{B, \Delta f}} \varphi_{t,f}(\varphi_{t,f} \in K_m) \quad (3)$$

其中, Num为该非时延敏感类业务在这个时隙内使用RB数量的均值。

同时, 由于存在资源抢占的问题, 只用峰值速率难以对服务质量进行准确衡量, 所以增加速率损失百分比 ρ_{lost} 来衡量调度模型中各非时延敏感类业务的表现。

$$\rho_{\text{lost}} = f(x) \quad (4)$$

$$x = \frac{P_{K_{\text{occupy}}}}{P_{K_m}} \quad (5)$$

$$P_{K_{\text{occupy}}} = \sum_{t=1}^7 \sum_{f=1}^{N_{\text{RB}}^{B, \Delta f}} \theta_{t,f}(\theta_{t,f} \in K_{\text{occupy}}) \quad (6)$$

$$P_{K_m} = \sum_{t=1}^7 \sum_{f=1}^{N_{\text{RB}}^{B, \Delta f}} \varphi_{t,f}(\varphi_{t,f} \in K_m) \quad (7)$$

其中, P_{K_m} 代表一个非时延敏感类业务在一个时隙内所占RB的数量, $P_{K_{\text{occupy}}}$ 代表时延敏感类业务在该时隙内抢占的RB数量, $f(\cdot)$ 表示速率损失函数。常用的损失函数模型有3种类型^[7], 分别是凸模型、线性模型和阈值模型, 其中凸模型是最广泛使用的模型, 本文选择凸模型进行速率损失百分比 ρ_{lost} 的计算。3种类型模型的速率损失函数如图4所示。

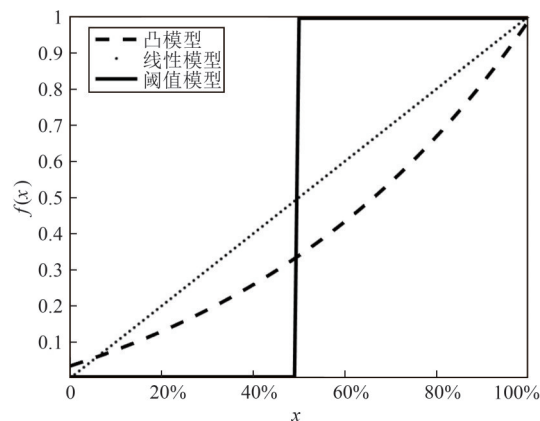


图4 3种类型模型的速率损失函数

4 仿真结果分析

4.1 业务需求满足度对比

业务需求满足度对比如图5所示, 显示了所提方法和3种对比方法在业务需求满足度上的性

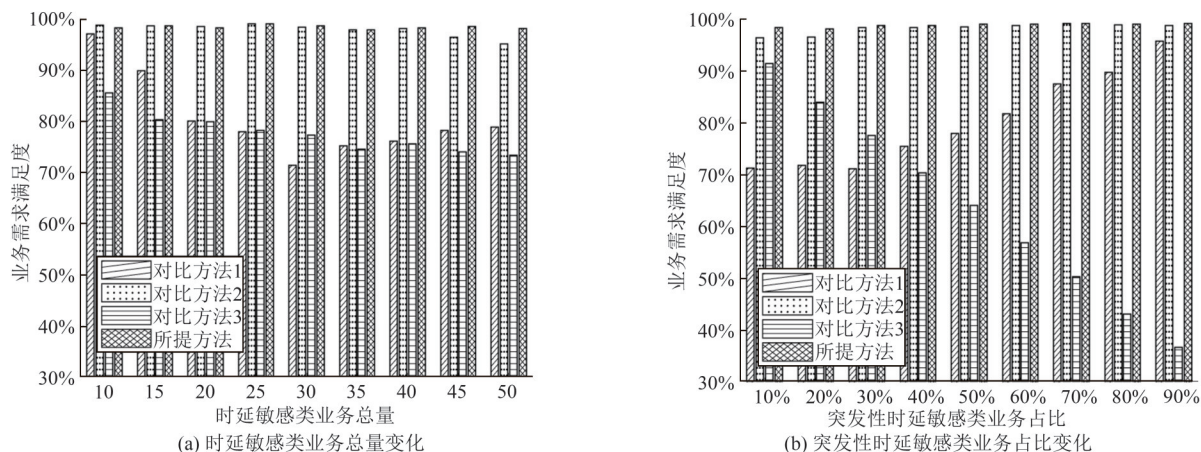


图5 业务需求满足度对比

能对比。结果显示, 所提方法通过预留资源保障了非时延敏感类业务的传输质量, 通过将时延敏感类业务划分为周期性时敏业务和突发性时敏业务, 对前者使用均匀算法, 后者则直接进行资源抢占, 满足了两种类型时敏业务的需求, 基于偏置量的设置, 业务需求满足度在时敏业务总量增加和突发性时敏业务数量增加两种情况下均可以逼近100%。相较于所提方法, 对比方法1和对比方法3的满足度整体偏低。对比方法1中大量时延敏感类业务依赖资源抢占进行数据传输, 导致非时延敏感类业务的速率损失过大, 许多非时敏业务的速率需求无法满足, 服务质量降级严重。对比方法3对所有突发性时延敏感类业务使用了

均匀算法, 导致部分业务的时延需求难以满足。对比方法2采用了资源预留, 能够有效降低资源抢占带来的影响, 较大程度地满足了非时延敏感类业务的需求, 但这种预留方法在时延敏感类业务数量较多时, 会严重挤占非时延敏感类业务的资源。

4.2 资源利用率对比

为了进一步分析所提方法在资源使用方面的性能, 本文将所提方法的资源利用率与3种对比方法进行了对比, 如图6所示。

由图6可知, 由于对比方法1没有预留资源, 所有时延敏感类业务均依靠抢占, 时频资源主要分配给非时延敏感类业务, 资源利用率最高。对

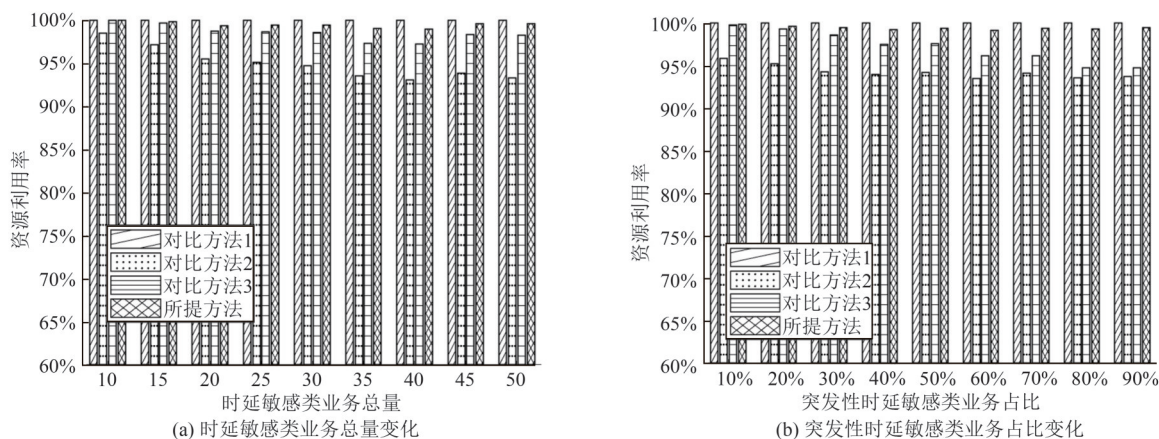


图6 资源利用率对比



比方法2针对时延敏感类业务的需求进行了资源预留,但预留的资源超出预期,造成较大的资源浪费。对比方法3对所有到来的时延敏感类业务进行均匀算法,并预留资源,但取平均值后向上取整的划分方式依然会导致小部分预留资源无法利用;而所提方法对时延敏感类业务做了进一步划分,并只对周期性时延敏感类业务使用均匀算法,突发性时延敏感类业务到来时先使用空余的预留资源,预留资源不足后再进行抢占,这样即使有少量的预留资源剩余,很大概率上也会被即将到来的突发性时延敏感类业务使用;两个偏置量的使用可以更加合理地划分预留资源,进一步提升资源利用率。

4.3 非时延敏感类业务速率损失对比

为了分析资源抢占的影响,本文对所提方法造成的速率损失进行了分析,图7为所提方法和3种对比方法造成的速率损失对比情况。

由图7可知,对比方法1未采用均匀分布算法,致使时延敏感类业务的分布极不均匀,并且没有提前预留资源,所有时延敏感类业务均依靠抢占,导致极大的非时延敏感类业务速率损失;对比方法2未采用均匀分布算法,但预留了一定的资源,极大地缓解了非时延敏感类业务的速率损失,但在时延敏感类业务分布极不均匀的情

况下预留资源会导致较大的资源浪费;对比方法3预留了资源,并且对所有时延敏感类业务均采用均匀分布算法,这样极大地减少了非时延敏感类业务的速率损失,但由于没有对时延敏感类业务做进一步的划分,这样的调度难以满足部分突发性时延敏感类业务的需求。所提方法将时延敏感类业务进一步划分为周期性时延敏感类业务和突发性时延敏感类业务,并只为周期性时延敏感类业务预留资源,突发性时延敏感类业务主要依靠抢占,这样非时延敏感类速率损失虽然略高于对比方法3,但可以极大地保障两类时延敏感类业务的需求。

5 结束语

本文提出了一种面向工业时敏业务的5G TSN融合网络切片资源调度方法。首先分析了不同类型工业业务的资源需求差异,面向时敏工业业务的需求特点创建差异化切片,并设计了基于均匀分布的切片资源分区调度算法,利用资源抢占和资源预留,在满足业务资源需求的同时优化无线资源使用。最后对本文所提的调度算法进行仿真实验。仿真结果表明,本文提出的调度方法能够适配时敏业务占比较高的工业互联网场景,在保障工业业务与移动业务共网高质量传输的同

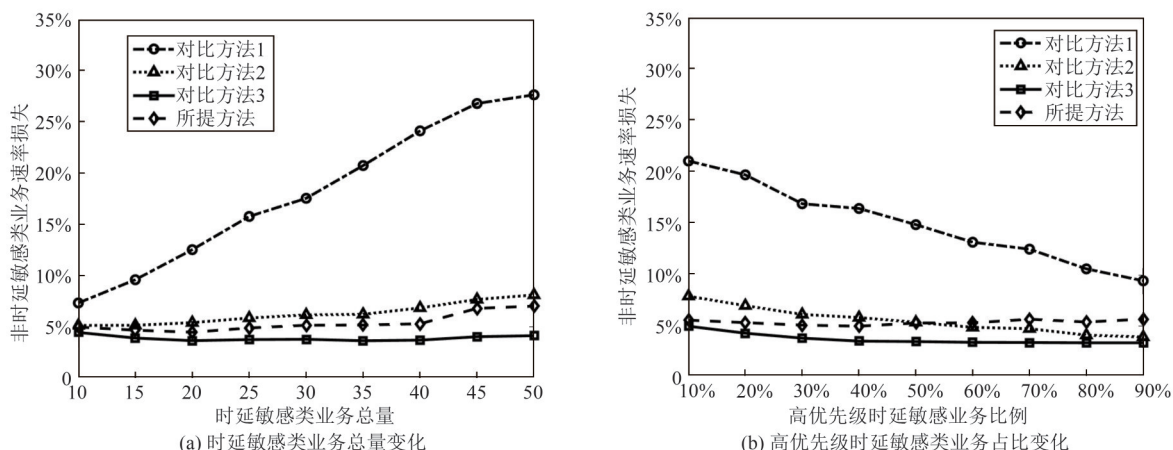


图7 非时延敏感类业务速率损失对比

时,提升无线资源利用率。本文方法为实现5G TSN融合网络承载多类型业务传输提供了一种可行方案。未来将聚焦于研究适配工业时敏业务流动态变化的切片资源智能调度方案,旨在基于机器学习算法建立基于优先级动态调整的资源智能调度机制,为工业用户提供更高效、智能的无线资源分配方案。

参考文献:

- [1] 许方敏,伍丽娇,杨帆,等.时间敏感网络(TSN)及无线TSN技术[J].电信科学,2020,36(8):81-91.
XU F M, WU L J, YANG F, et al. Time-sensitive networking (TSN) and wireless TSN technology[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(8): 81-91.
- [2] 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.
- [3] 张海君,陈安琪,李亚博,等.6G移动网络关键技术[J].通信学报,2022,43(7):189-202.
ZHANG H J, CHEN A Q, LI Y B, et al. Key technologies of 6G mobile network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 189-202.
- [4] 管婉青,张海君,路兆铭.基于DRL的6G多租户网络切片智能资源分配算法[J].北京邮电大学学报,2020,43(6):132-139.
GUAN W Q, ZHANG H J, LU Z M. Intelligent resource allocation algorithm for 6G multi-tenant network slicing based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 132-139.
- [5] SCHMIDT R, CHANG C Y, NIKAEIN N. Slice scheduling with QoS-guarantee towards 5G[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [6] ANAND A, DE VECIANA G, SHAKKOTTAI S. Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(2): 477-490.
- [7] GINTHÖR D, GUILLAUME R, SCHÜNGEL M, et al. 5G RAN slicing for deterministic traffic[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [8] BAKRI S, FRANGOUDIS P A, KSENTINI A, et al. Data-

driven RAN slicing mechanisms for 5G and beyond[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(4): 4654-4668.

- [9] BELIK Aidis I P, GEORGAKOPOULOS A, TSAGKARIS K, et al. 5G radio access network slicing: system-level evaluation and management[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(4): 49-55.

[作者简介]



管婉青(1995-),女,博士,北京科技大学计算机与通信工程学院讲师、硕士生导师,主要研究方向为B5G/6G、无线资源管理、5G与TSN融合等。



刘诺言(2001-),男,北京科技大学计算机与通信工程学院在读,主要研究方向为B5G/6G、无线资源管理、5G与TSN融合等。



李卫(1966-),女,北京科技大学计算机与通信工程学院教授,主要研究方向为时间敏感网络、移动网络与工业互联网等。



付美霞(1990-),女,博士,北京科技大学自动化学院讲师,主要研究方向为智能制造、工业互联网、人工智能、计算机视觉等。



张海君(1986-),男,博士,北京科技大学教授、博士生导师,计算机与通信工程学院副院长,主要研究方向为6G移动通信、B5G+行业应用、数字孪生、通感算存一体化、卫星网络等。