

# 联合物理层与MAC层的multi-TRP上行重叠传输处理机制

景小荣<sup>1,2</sup>, 熊杰<sup>1</sup>, 孙健<sup>3</sup>, 陈前斌<sup>2</sup>

(1.重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2.移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;  
3.重庆两江卫星移动通信有限公司, 重庆 401135)

**摘要:** 针对非理想回程下现有协议难以有效处理多传输接收节点 (multi-TRP) 场景中多定时提前 (multi-TA) 导致的严重上行链路 (UL) 重叠传输问题, 联合改进物理层复用技术和介质访问控制 (MAC) 令牌桶技术, 提出了一种新型的UL重叠传输处理机制。该新型机制通过改进物理层重叠信道识别流程、复用要求及复用规则, 将物理层复用信息与重叠信息反馈至MAC层, 并对MAC层令牌桶技术进行优化。通过仿真实验对所提机制与现有协议机制进行对比, 结果表明, 在逻辑时隙不可重叠和可重叠2种情形下, 物理上行控制信道 (PUCCH) 实际复用数量性能平均提升了57.58%和49.40%, 物理上行共享信道 (PUSCH) 实际可用资源数量性能平均提升了12.09%和26.03%; 优先级最高逻辑信道实际占用资源数量性能平均提升了33.33%和45.48%。

**关键词:** 多传输接收节点; 上行链路; 重叠传输; 信道复用; 令牌桶

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024123

## Mechanism of joint physical layer and MAC layer for handling multi-TRP UL overlapping transmissions

JING Xiaorong<sup>1,2</sup>, XIONG Jie<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>3</sup>, CHEN Qianbin<sup>2</sup>

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China  
2. Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China  
3. Chongqing Liangjiang Satellite Mobile Communication Co., Ltd., Chongqing 401135, China

**Abstract:** To address the severe uplink (UL) overlapping transmission problem caused by multi-timing advance (multi-TA) in multiple transmission reception point (multi-TRP) scenario with non-ideal feedback, where existing protocols were difficult to handle effectively, a novel UL overlapping transmission handling mechanism was proposed by jointly improving physical layer multiplexing technology and medium access control (MAC) layer token bucket technology. The novel mechanism enhanced the identification process of overlapping channels at the physical layer, revised the multiplexing requirements and rules, and fed the multiplexing and overlapping information from the physical layer back to the MAC layer. Simultaneously, it optimized the token bucket technique in the MAC layer. Comparative simulations between the proposed mechanism and the processing mechanisms in existing protocols show that, in non-overlapping and overlapping logical slot scenarios, the actual number of the reused physical uplink control channel (PUCCH) performance has improved by an average of 57.58% and 49.40%, the actual available resource quantity performance of the physical uplink shared channel (PUSCH) has improved by an average of 12.09% and 26.03%, the actual occupied resource quantity of the highest priority logical channel has improved by an average of 33.33% and 45.48%.

**Keywords:** multi-TRP, uplink, overlapping transmission, multiplex channel, token bucket

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-06-15

通信作者: 景小荣, jingxr@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.U23A20279)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.U23A20279)

## 0 引言

社会经济、科技的高速发展,给移动通信带来严峻挑战的同时也带来巨大机遇<sup>[1]</sup>。从长期演进(LTE, long term evolution)引入多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)技术以来,在各类业务需求驱动下, MIMO技术不断增强,并在5G新空口(NR, new radio)中作为核心技术发挥作用<sup>[2]</sup>。在实际的MIMO增强技术演进过程中,上/下行发展并不平衡,特别在3GPP Release 16/17中,主要针对下行MIMO技术进行增强;与下行MIMO技术不断取得突破相比,受业务需求和移动设备功耗等因素所限,上行MIMO技术发展有些“停滞不前”<sup>[3]</sup>。此外,为了解决5G用户服务质量不均衡问题, MIMO增强技术在演进过程中, 5G NR中引入了多传输接收节点(multi-TRP, multiple transmission reception points)技术<sup>[4]</sup>,但该技术导致原本存在的上行链路(UL, uplink)重叠传输问题变得更为严重;然而,现有协议机制却难以有效地解决该问题。为此,在3GPP#102会议上,再次将MIMO增强技术确定为3GPP标准的立项主题<sup>[5]</sup>,而multi-TRP场景下的UL重叠问题为该主题中的重点研究内容。

现有5G NR标准协议中,针对用户设备(UE, user equipment)在单一传输接收节点(single-TRP, single transmission reception point)场景下的UL重叠问题已经有较好的解决方案<sup>[6]</sup>;然而,对于UE因single-TRP定时提前(TA, timing advance)更新而引起的UL重叠,以及UE在multi-TRP下的UL重叠的处理机制,仍存在许多问题,亟须深入研究<sup>[7]</sup>。现有协议中,对于因TA更新引起的UL重叠传输问题,采取了一种简单粗暴的解决方法,即丢弃后一个时隙的前几个符号<sup>[8]</sup>。这种处理方法导致复用在物理上行共享信道(PUSCH, physical uplink shared channel)中的上行控制信息(UCI, uplink control information)被丢弃<sup>[9]</sup>。由于后一时隙的TA更精确,因而该时隙内的符号可靠性更高<sup>[10]</sup>,因此,当前协议采取固定丢弃可靠性更高符号的处理机制亟须改进。在multi-TRP场景下,UE对不同TRP需设置不同TA值,即使逻辑时隙不可重叠,仍极有可能导致实际传输时隙发生重叠<sup>[11]</sup>;当逻辑时隙重叠时,会进一步加剧UL重叠程度<sup>[12-13]</sup>。当前协议不允许由

不同下行控制信息(DCI, downlink control information)调度的PUSCH在时域上发生重叠<sup>[14]</sup>,即只能依赖基站调度来规避UL重叠传输;然而,多DCI下的multi-TRP具有非理想回程,同时,UE还需对不同TRP赋予特定TA,使基站难以完美协调UL调度<sup>[15]</sup>,即通过基站调度难以规避UL重叠传输问题。

为解决UL重叠传输问题,3GPP各成员单位对现有协议机制提出了许多改进方案,例如,引入UL传输间的时间间隔<sup>[16-18]</sup>、丢弃UL传输的一部分<sup>[19-20]</sup>、引入基站UL调度限制<sup>[21]</sup>和引入UE侧UL重叠传输处理方案<sup>[22]</sup>等。文献[16]为不同TA的UL传输引入时间间隔,但如何确定具体的时间间隔仍有待进一步研究<sup>[23]</sup>。文献[17]对UL重叠传输进行分类讨论,基站向UE指示具体的UL重叠传输处理方案。文献[18]根据UE最大接收时间差对时间间隔进行分析,将时间间隔固定为1个或2个符号。文献[19]从资源利用率角度考虑,提出丢弃UL传输的一部分以解决UL重叠传输问题,但仍需对丢弃规则进一步研究。文献[20]为重叠信道设置不同的优先级,以处理UL重叠传输。文献[21]从对当前协议影响角度考虑,建议引入基站UL调度限制。文献[22]中基站基于UE的配置确定UL传输方案,进而UE基于UL传输方案、PUSCH调度信息与重叠信息进行实际UL传输。总体来说,当前研究可分为基于UE处理和基于基站调度处理2类。前者面临如下难题:当前丢弃规则难以高效灵活地处理UL重叠传输<sup>[19]</sup>;采用固定的UL传输时间间隔将带来性能损失,但又难以在动态变化的UL传输中确定具体的传输时间间隔<sup>[23]</sup>。后者则面临如下难题:不同TRP可能采用独立的参考时序,导致基站难以确定重叠部分长度<sup>[24-25]</sup>;非理想回程导致基站难以协调multi-TRP调度<sup>[26]</sup>,以及无法确定UE对每个TRP的确切TA导致难以避免UL重叠<sup>[27]</sup>。

针对上述难题,本文提出一种新型UL重叠传输处理机制,其主要创新点如下。

1) 针对当前物理层协议中UL重叠处理仅考虑single-TRP场景,且存在复用效率低和被迫丢弃UCI等问题,提出新型物理层UL重叠传输处理机制。该机制对UL重叠信道识别流程、复用规则和要求进行改进,进而对满足和不满足复用要求的信

道分类处理, 最后将物理层复用信息与重叠信息反馈至介质访问控制 (MAC, medium access control) 层, 以完成物理层对 UL 重叠传输的处理。新型物理层 UL 重叠传输处理机制依据改进后的复用规则和要求, 化整为零, 分别针对每个 TRP 处理 UL 重叠信道, 提高了复用技术的有效性。

2) 针对当前 MAC 层组包未考虑 UL 重叠信息的问题, 提出新型 MAC 层令牌桶机制。在该机制中, MAC 层根据物理层反馈的复用信息与重叠信息进行 MAC 组包。在处理过程中, 对于因 single-TRP TA 更新导致的 UL 重叠, MAC 层仅需根据 single-TRP 逻辑信道优先级及对应令牌桶变量确定 UL 传输的资源分配; 对于 multi-TRP UL 重叠, MAC 层需联合 multi-TRP 逻辑信道优先级及对应令牌桶变量来确定 UL 传输的资源分配。利用物理层反馈信息, 新型 MAC 层令牌桶机制实现了更高效的 MAC 组包。

3) 基于 UL 重叠传输模型, 通过仿真对新型 UL 重叠传输处理机制和现有协议机制进行比较, 结果表明, 所提机制在实际复用的物理上行控制信道 (PUCCH, physical uplink control channel) 数量、PUSCH 实际可用资源数量及逻辑信道实际占用资源数量 3 个方面具有显著优势。

## 1 现有协议 UL 重叠传输处理机制

对因 TA 更新导致的 UL 重叠, 当前协议通过丢弃后一个时隙的重叠符号来处理 UL 重叠传输部分<sup>[7]</sup>。根据现有协议的复用规则, UCI 被复用在 PUSCH 前几个符号中<sup>[10]</sup>, 如果后一个时隙的 PUSCH 中恰好存在被复用的 UCI, 这将导致 UCI 被丢弃; 由于后一个时隙采用的 TA 更为精确, 即后一个时隙相对更加可靠, 因此, 现有协议通过固定丢弃后一个时隙的重叠符号来处理 UL 重叠传输问题并非良策<sup>[10]</sup>。

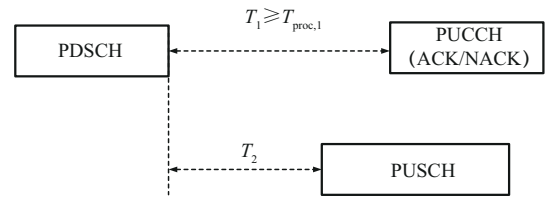
在 single-TRP 传输场景中, 如果 UE 在一个时隙内对 TRP 传输多个 PUCCH 而发生重叠, 按照当前协议规则, 将多个 PUCCH 复用到一个 PUCCH 上, 或将部分 PUCCH 丢弃; 当复用后的 PUCCH 和 PUSCH 在时域发生重叠时, 支持将 UCI 复用到 PUSCH 上或将 PUSCH 丢弃。具体重叠传输处理机制步骤如下, 其中, 集合  $Q$  代表 UE 对该 TRP 传输时重叠的 PUCCH 集合。

**步骤 1** 确定集合  $Q$ , 并在集合  $Q$  中确定能复用 UCI 的 PUCCH。

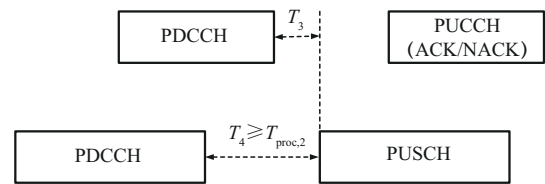
**步骤 2** 判断步骤 1 确定的 PUCCH 是否可复用到 PUSCH。

**步骤 3** 若步骤 1 确定的 PUCCH 可复用到步骤 2 确定的 PUSCH, 则进行具体的 UCI 复用; 否则, 丢弃 PUSCH 或 PUCCH。

在步骤 2 中, 要将 PUCCH 复用到 PUSCH 中, 需满足图 1 所示现有协议机制的复用要求, 其中,  $T_{\text{proc},1}$  代表物理下行共享信道 (PDSCH, physical downlink shared channel) 处理时间,  $T_{\text{proc},2}$  代表 PUSCH 准备时间。



(a) 与 PDSCH 处理时间相关的复用要求



(b) 与 PUSCH 准备时间相关的复用要求

图 1 现有协议机制复用要求

在图 1(a) 中, PUCCH 包含对 PDSCH 的混合自动重传请求确认字符 (HARQ-ACK, hybrid automatic repeat request acknowledge character) 信息, 若 PDSCH 与 PUSCH 之间的间隔时间  $T_2 < (T_{\text{proc},1} + 1)$ , 则根据现有协议复用要求, 不能将承载 PDSCH HARQ-ACK 信息的 PUCCH 复用到该 PUSCH。在图 1(b) 中, PDCCH 与其调度的 PUSCH 的间隔时间  $T_4 \geq T_{\text{proc},2}$ , PUCCH 包含对另一个 PDCCH 的 HARQ-ACK 信息, 若 PUSCH 与起始时间靠后 PDCCH 之间的间隔时间  $T_3 < (T_{\text{proc},2} + 1)$ , 根据现有协议复用要求, 则不能将 PUCCH 复用到 PUSCH。

在 multi-TRP UL 传输场景中, 现有协议通过约束基站调度来避免 UE 处 UL 重叠传输<sup>[14]</sup>, 但这属于较为理想的处理机制; 实际中, 基站可能无法确

定 UE 是否存在 UL 重叠问题<sup>[24-27]</sup>, 因此, 现在协议处理方式无法有效解决 UL 重叠问题。

## 2 新型 UL 重叠传输处理机制

### 2.1 总体设计思路

新型机制总体设计如图 2 所示。

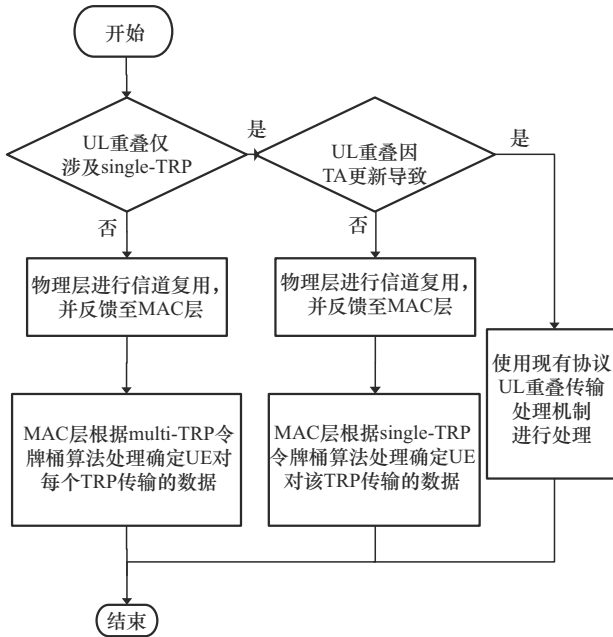


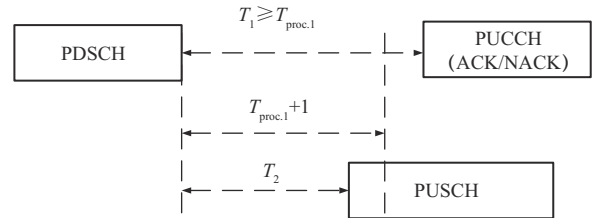
图 2 新型机制总体设计

对于 UL 重叠传输问题, 根据其涉及 single-TRP 还是 multi-TRP 分别进行处理。对于涉及 single-TRP 的 UL 重叠传输, 若该 UL 重叠传输因 TA 更新导致, 则使用新型物理层 UL 重叠传输处理机制与新型 MAC 层令牌桶机制进行处理; 否则, 使用现有协议 UL 重叠传输处理机制进行处理。对于涉及 multi-TRP 的 UL 重叠传输, 新型物理层 UL 重叠传输处理机制确定重叠与实际复用结果, 并反馈至 MAC 层, 新型 MAC 层令牌桶机制根据重叠与复用信息确定实际要传输的逻辑信道。

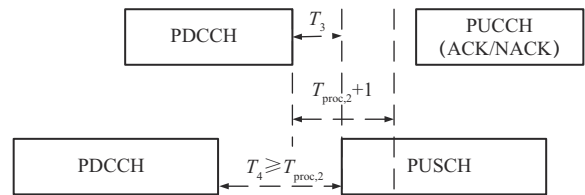
### 2.2 新型物理层 UL 重叠传输处理机制

对于 single-TRP 场景下 UL 重叠传输问题, 在现有协议 UL 重叠传输处理机制基础上, 新型物理层 UL 重叠传输处理机制将物理层复用信息与重叠信息反馈至 MAC 层作为新增步骤 (即将该步骤作为第 1 节中的步骤 4); 同时新型物理层 UL 重叠传输机制还对复用要求和复用规则进行了改进, 具体改进如下。

按照当前协议, 若 PUCCH 不满足复用要求, 丢弃该 PUCCH 将无法保证 PUCCH 正常传输, 而保证该 PUCCH 传输势必造成时频资源浪费。为此, 对复用要求和复用规则进行改进, 以复用更多 PUCCH, 从而达到提高时频资源利用率的目的。新型机制物理层复用要求如图 3 所示。对于 PUSCH 中存在时域符号到 PDSCH 结束符号之间时间间隔大于  $(T_{proc,1} + 1)$  的情况, 则将包含该 PDSCH HARQ-ACK 信息的 PUCCH 复用到该 PUSCH 中, 如图 3(a) 所示; 图 3(b) 中, PUSCH 中存在时域符号, 满足其与起始时间靠后的 PDCCH 结束符号之间的时间间隔大于  $(T_{proc,2} + 1)$ , 则将另一个 PDCCH 对应的 HARQ-ACK 信息复用到该 PUSCH 中。



(a) 新型机制 PDSCH 处理时间相关复用要求



(b) 新型机制 PUSCH 准备时间相关复用要求

图 3 新型机制物理层复用要求

在实际复用中, 由于 TRP 需确定复用 UCI 具体位置才能正确解调 UCI, 因此需要规范 UCI 复用到 PUSCH 的具体复用规则。新型复用规则如下: 若多个 PUCCH 需复用到 PUSCH 中, 对于起始时间在该 PUSCH 之前或与该 PUSCH 起始时间相同的 PUCCH, 均满足复用要求, 将这些 PUCCH 按照起始时间从前到后顺序复用到 PUSCH 中, 可占用除解调参考信号 (DM-RS, demodulation reference signal) 和相位跟踪信号 (PT-RS, phase-tracking reference signal) 所占时频资源之外的其余时频资源, 且时域上从第一个

未被占用的符号开始, 频域上从频率最高处开始; 对于起始时间在 PUSCH 之后的 PUCCH, 可能不满足当前协议的复用要求, 但满足改进后的复用要求, 可将这些 PUCCH 按照起始时间从后到前的顺序依次复用到 PUSCH, 可占用除 DM-RS 和 PT-RS 所占时频资源之外的其余时频资源, 且时域上从最后一个未被占用的符号开始, 频域上从频率最低处开始; 若存在多个起始时间相同的 PUCCH, 则按照持续时间从短到长进行排序; 若存在多个起始时间和持续时间都相同的 PUCCH, 则按照其所使用 PUCCH 频域资源起始位置从高到低顺序进行排序。具体复用时, 若 UCI 所占时频资源小于或等于当前 PUSCH 符号剩余可用时频资源的一半, 则将该 UCI 均匀复用到该符号; 否则, 将 UCI 连续复用到该符号。

对于 multi-TRP 场景下 UL 重叠传输问题, 首先需确定重叠信道集合, 针对每个 TRP 确定 PUCCH 复用情况, 对不满足复用要求的信道进行处理; 然后对原本满足复用要求的信道进行判断和处理; 最后将物理层复用信息与重叠信息反馈至 MAC 层。令  $Q_{all}$  代表 UE 对 multi-TRP UL 传输时的重叠信道集合, 并令信道 A 代表重叠信道中起始时间最早的信道。

对于不满足复用要求的 PUCCH, 若采取保证该 PUCCH 传输但缩短与其重叠的 PUSCH 持续时间的方式进行处理, 则在缩短 PUSCH 持续时间后, 可能导致原本可复用到该 PUSCH 的 PUCCH 实际无法复用到, 即处理不满足复用要求的 PUCCH 后, 可能对原本满足复用要求的 PUCCH 的实际复用情况产生影响; 因此, 需对原本满足复用要求的 PUCCH 进行判断和处理。multi-TRP 场景下新型物理层 UL 重叠处理机制流程如图 4 所示。

### 2.3 新型 MAC 层令牌桶机制

新型机制中, 物理层将重叠信息与复用情况反馈至 MAC 层后, MAC 层根据实际可用资源进行 UL 资源分配。当前协议定义优先比特率 (PBR, prioritised bit rate) 和令牌桶桶身范围 (BSD, bucket size duration) 2 个参数, 通过这 2 个参数确定逻辑信道对应的令牌桶最大容量, 且为每个逻辑信道单独维护一个变量  $B_j$ 。

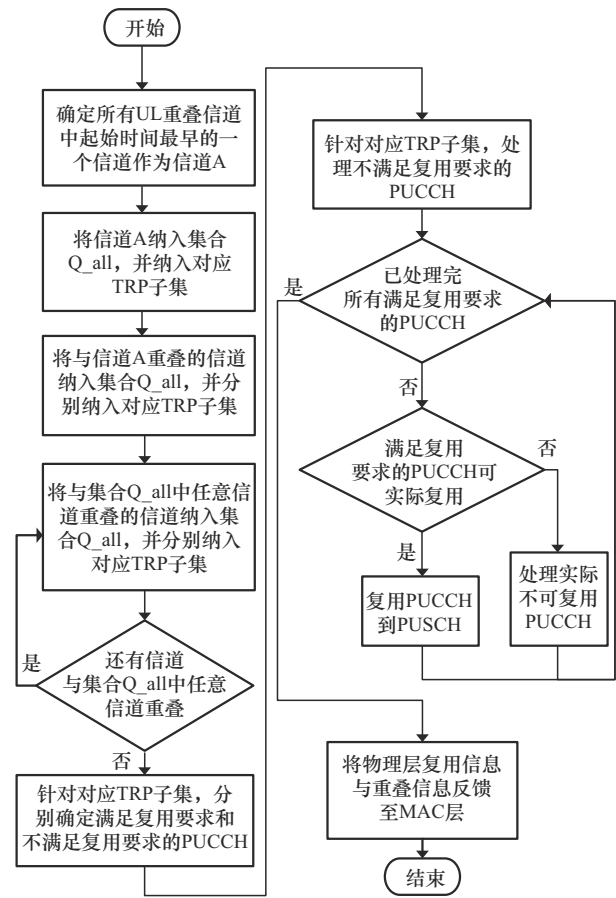


图 4 新型物理层 UL 重叠处理机制流程

对于 TA 更新导致的 UL 重叠传输问题, 将逻辑信道对应变量  $B_j$  初始化为 0 后, 每间隔时间  $T$ , 循环执行如下步骤。

**步骤 1** 当  $B_j$  小于对应最大容量时, 每间隔时间  $T$ ,  $B_j$  增加  $PBR \times T$ 。

**步骤 2** 对  $B_{j,new}$  赋值  $B_{j,new} = B_j$ , 按优先级依次处理  $B_j > 0$  的逻辑信道并更新  $B_{j,new}$ 。根据物理层反馈, 若  $B_j > 0$  逻辑信道均被处理后仍有 UL 资源可用, 进入步骤 3; 若 UL 资源耗尽, 进入步骤 4。

**步骤 3** 按优先级从高到低依次处理  $B_j < 0$  逻辑信道, 直到  $B_j < 0$  逻辑信道都被处理或 UL 资源耗尽, 进入步骤 4。

**步骤 4** 对  $B_j$  赋值  $B_j = B_{j,new}$ 。

对于 multi-TRP 场景下 UL 重叠传输问题, 以 UE 向 2 个 TRP (标识为  $TRP_1$  和  $TRP_2$ ) 传输为例, 将与不同 TRP 逻辑信道对应的变量  $B_{j,1}$  和  $B_{j,2}$  (分别对应  $TRP_1$  和  $TRP_2$ ) 均初始化为 0 后, 根据逻辑信道优先级进行资源分配, 即对于重叠符号处, 优先将时频资源分配给满足条件的优先级更高的逻辑信

道,直至重叠符号处无可用时频资源。multi-TRP场景下UL重叠处理机制如图5所示,其中服务数据单元(SDU, service data unit)表示经上层协议处理后的数据单元,协议数据单元(PDU, protocol data unit)表示经本层协议处理后的数据单元,即来自上层协议的SDU经本层协议处理后形成本层协议的PDU,对下一层协议而言,本层的PDU为下一层协议的SDU。

每间隔时间 $T$ ,循环执行如下步骤。

**步骤1** 对于小于对应最大容量的 $B_{j,1}$ 和 $B_{j,2}$ ,每间隔时间 $T$ ,增加 $\text{PBR} \times T$ 。

**步骤2** 若仅涉及single-TRP UL传输,则回退至single-TRP令牌桶机制来处理UL传输;否则,执行步骤3。

**步骤3** 对 $B_{j,1,\text{new}}$ 和 $B_{j,2,\text{new}}$ 赋值,按照优先级从高到低顺序依次处理 $B_{j,1} > 0$ 和 $B_{j,2} > 0$ 逻辑信道,并更新 $B_{j,1,\text{new}}$ 或 $B_{j,2,\text{new}}$ 值。根据物理层反馈的信息,若对应TRP UL资源耗尽,则回退至single-TRP令牌桶机制。若所有 $B_{j,1} > 0$ 和 $B_{j,2} > 0$ 的逻辑信道均被处理且每个TRP均有UL资源可用,则执行步骤4。

**步骤4** 按优先级从高到低依次处理 $B_{j,1} < 0$ 和 $B_{j,2} < 0$ 的逻辑信道,并更新 $B_{j,1,\text{new}}$ 或 $B_{j,2,\text{new}}$ 值。根据物理层反馈信息,若对应的TRP UL资源耗尽,则回退至single-TRP令牌桶机制。若所有 $B_{j,1} < 0$ 和 $B_{j,2} < 0$ 的逻辑信道均被处理或所有TRP UL资源耗尽,则结束步骤4。

**步骤5** 对 $B_{j,1}$ 和 $B_{j,2}$ 赋值。

### 3 性能评估

#### 3.1 UL重叠传输模型建立

为便于对本文所提新型UL重叠处理机制进行性能评估,以UE与2个TRP通信为例,建立UL重叠传输模型。根据文献[8]协议,共设置5种PUCCH格式:PUCCH格式0时域占据1或2个符号,频域占据1个物理资源块(PRB, physical resource block);PUCCH格式1时域占据4~14个符号,频域占据1个PRB;PUCCH格式2时域占据1或2个符号,频域占据1~16个PRB;PUCCH格式3时域占据4~14个符号,频域占据1~16个PRB;PUCCH格式4时域占据4~14个符号,频域占据1个PRB。为便于仿真性能的对比,设置PUSCH时域占据8个符

号,频域占据100个PRB。此外,为保证仿真的普适性,每次仿真将随机生成UE与2个TRP通信的TA值<sup>[8,28-29]</sup>。针对不同PUCCH格式,分别生成UE向2个TRP传输的PUCCH,在生成过程中,按时间顺序对每个时域符号进行判断:若已被相同格式PUCCH占据,则跳过该符号,对后一个符号进行判断;若未被相同格式PUCCH占据,则以 $a_{i,1}$ 概率产生PUCCH格式 $i$ 对应的第 $k$ 个PUCCH,其在时域占据 $\text{len}_c(i,k)$ 个符号、在频域占据 $\text{PRB}_c(i,k)$ 个PRB,其中, $i = 0,1,2,3,4$ ,由 $a_{i,2}$ 确定 $\text{len}_c(i,k)$ ,由 $a_{i,3}$ 确定 $\text{PRB}_c(i,k)$ 。对于生成PUSCH,则根据逻辑时隙是否可以重叠分情况处理:对于逻辑时隙不可重叠情况,按时间顺序对每个时域符号进行判断,若未被PUSCH占据,则以 $a_1$ 概率生成PUSCH,且以50%的概率与第 $j$ 个TRP的第 $k$ 个PUSCH相对应,其在时域占据 $\text{len}_s(j,k)$ 个符号,具体由 $a_2$ 确定其时域长度, $j = 1,2$ ;对于逻辑时隙可重叠情况,分别产生UE向2个TRP传输的PUSCH,且按时间顺序对每个时域符号进行判断,若未被PUSCH占据,则以 $a_1$ 概率生成PUSCH,其占据时域 $\text{len}_s(j,k)$ 个符号,并由 $a_2$ 确定 $\text{len}_s(j,k)$ 取值。

与PUCCH格式 $i$ 对应的相邻2个PUCCH间隔 $\Delta s$ 个符号的概率为

$$P_{k,k+1}^{\text{cch},i}(\Delta s) = \begin{cases} 0, & \Delta s < \text{len}_c(i,k) \\ a_{i,1}(1 - a_{i,1})^{\Delta s - \text{len}_c(i,k)}, & \Delta s \geq \text{len}_c(i,k) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{0,1}^{\text{cch},i}(\Delta s)$ 代表PUCCH格式 $i$ 中第1个PUCCH从第 $\Delta s$ 个符号开始的概率。

若逻辑时隙可重叠,UE向同一TRP传输的2个相邻PUSCH之间间隔 $\Delta s$ 个符号的概率为

$$P_{k,k+1}^{\text{sch},j}(\Delta s) = \begin{cases} 0, & \Delta s < \text{len}_s(j,k) \\ a_1(1 - a_1)^{\Delta s - \text{len}_s(j,k)}, & \Delta s \geq \text{len}_s(j,k) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_{0,1}^{\text{sch},j}(\Delta s)$ 代表UE向第 $j$ 个TRP传输的第1个PUSCH从第 $\Delta s$ 个符号开始的概率。

对于逻辑时隙不可重叠的情形,假设在UE向某一个TRP传输的2个PUSCH之间存在 $n$ 个UE向另一个TRP传输的 $n$ 个PUSCH(假设这 $n$ 个PUSCH对应的编号为 $b, b+1, \dots, b+n-1$ ),则这 $n$ 个PUSCH的总符号长度为

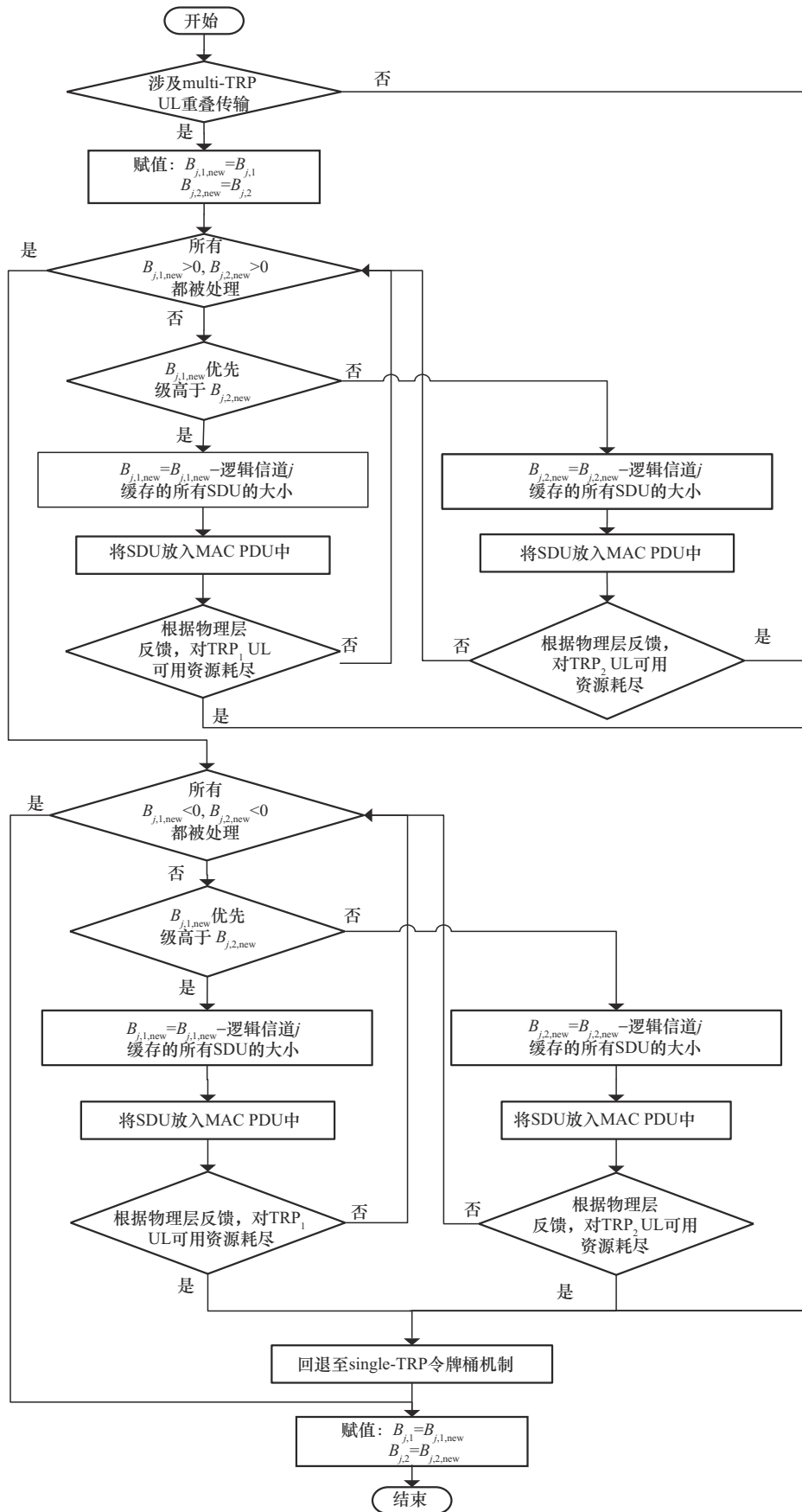


图5 multi-TRP 场景下 UL 重叠处理机制

$$\text{len}(j,b,n) = \sum_{k=b}^{b+n-1} \text{len}_s(j,k) \quad (3)$$

当逻辑时隙不可重叠时, UE向TRP<sub>j</sub>传输的2个相邻PUSCH间隔 $\Delta s$ 个符号的概率为

$$P_{k,k+1}^{\text{sch}_j}(\Delta s) = \begin{cases} 0, & \Delta s < \text{len}(j,b,n) \\ \text{pr}, & \Delta s \geq (\text{len}(j,b,n) + \text{len}_s(3-j,k)) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\text{pr} = a_1^{n+1}(1-a_1)^{\Delta s - \text{len}(j,b,n) - \text{len}_s(3-j,k)}$ 。由于假设UE与2个TRP通信, 即对应TRP<sub>1</sub>和TRP<sub>2</sub>, 因此TRP<sub>j</sub>和TRP<sub>3-j</sub>分别对应这2个TRP。

PUCCH格式*i*占据第*s*个符号的概率为

$$P^{\text{cch},i}(s) = \sum_{k=1}^K P^{\text{cch},i,k}(s) \quad (5)$$

其中,  $P^{\text{cch},i,k}(s)$ 代表第*k*个PUCCH格式*i*占据第*s*个符号的概率; *K*代表从第1个符号开始到第*s*个符号能生成PUCCH格式*i*对应PUCCH的最大数量, 即 $K = \lfloor \frac{s}{\min(\text{len}_c(i))} \rfloor$ ,  $\lfloor x \rfloor$ 代表对*x*向下取整,  $\text{len}_c(i)$ 代表PUCCH格式*i*中符号所占据的时域长度。

由此, 可确定*k*=1占据第*s*个符号的概率为

$$P^{\text{cch},i,1}(s) = \begin{cases} \sum_{l=1}^s P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l), & \text{range(1)} \\ s - \min(\text{len}_c(i)) \sum_{l=1}^{s - \min(\text{len}_c(i))} [P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(s,l) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l)] + \sum_{l=s}^{s - \min(\text{len}_c(i)) + 1} P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l), & \text{range(2)} \\ \sum_{l=s - \max(\text{len}_c(i)) + 1}^{s - \min(\text{len}_c(i))} [P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(s,l) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l)] + \sum_{l=s}^{s - \min(\text{len}_c(i)) + 1} P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l), & \text{range(3)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, range(1)代表 $s \leq \min(\text{len}_c(i))$ ; range(2)代表 $\min(\text{len}_c(i)) < s \leq \max(\text{len}_c(i))$ ; range(3)代表 $\max(\text{len}_c(i)) < s$ ;  $P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l)$ 代表生成PUCCH格式*i*中符号*l*的概率, 即 $P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l) = a_{i,1}(1-a_{i,1})^{l-1}$ ;  $P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(s,l)$ 代表以符号*l*为起点生成PUCCH格式*i*覆盖第*s*个符号的概率, 即 $P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(s,l) = (1-a_{i,2}(s - \min(\text{len}_c(i)) + 1 - l))$ 。

当*k*>1时, 有

$$P^{\text{cch},i,k}(s) = \begin{cases} \sum_{l=1}^{s - \min(\text{len}_c(i))} [P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(s,l) \sum_{m=s_{\text{cch},i,k-1}}^{l-1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l-m)] + \sum_{l=s}^{s - \min(\text{len}_c(i)) + 1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l-m), & \text{range(2)} \\ \sum_{l=s - \max(\text{len}_c(i)) + 1}^{s - \min(\text{len}_c(i))} [P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(s,l) \sum_{m=s_{\text{cch},i,k-1}}^{l-1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l-m)] + \sum_{l=s}^{s - \min(\text{len}_c(i)) + 1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(l-m), & \text{range(3)} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m)$ 代表到第*m*个符号为止包含(*k*-1)个PUCCH格式*i*的概率;  $s_{i,k-1}$ 代表包含(*k*-1)个PUCCH格式*i*所需的最少符号数, 即 $s_{\text{cch},i,k-1} = (k-1) \min(\text{len}_c(i))$ 。  $P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m)$ 计算式为

$$P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) = \sum_{l=s_{\text{cch},i,k-2}+1}^{m - \min(\text{len}_c(i)) + 1} \left[ \sum_{l'=\min(\text{len}_c(i))}^{\max(\text{len}_c(i))} a_{i,2} \right] \cdot \sum_{m'=s_{i,k-2}}^{l-1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-2}(m') P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(m-l'-m'+1) \quad (8)$$

根据式(8),  $P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k}(m)$ 可递归求解。

PUCCH格式*i*占据第*s*个符号的概率与相邻PUCCH间隔 $\Delta s_k$ 个符号的概率关系为

$$P^{\text{cch},i}(s) = \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{\Delta s_1} \sum_{\Delta s_2} \dots \sum_{\Delta s_k} P_{0,1}^{\text{cch},i}(\Delta s_1) P_{1,2}^{\text{cch},i}(\Delta s_2) \dots P_{k-1,k}^{\text{cch},i}(\Delta s_k) \right] \quad (9)$$

同理, 当逻辑时隙可重叠时, 由 $P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k}(m)$ 可得向TRP<sub>j</sub>传输的第*k*个PUSCH占据第*s*个符号的概率 $P_{\text{on}}^{\text{sch},j,k}(s)$ , 下标on对应逻辑时隙可重叠的情况。

当逻辑时隙不可重叠时, 向TRP<sub>j</sub>传输的第1个PUSCH占用第*s*个符号的概率为 $P_{\text{off}}^{\text{sch},j,1}(s) = \frac{P_{\text{on}}^{\text{sch},j,1}(s)}{2}$ 。当*k*>1且 $\min(\text{len}_s\text{all}) < s \leq \max(\text{len}_s\text{all})$ 时, 占用符号*s*的概率为

$$P_{\text{off}}^{\text{sch},j,k}(s) = \sum_{l=1}^{s - \min(\text{len}_s, \text{all})} \left[ \frac{1}{2} P_{\text{len}}^{\text{sch},j}(s,l) \sum_{m=s_{\text{sch},j,k}-1}^{l-1} P_{\text{pro}}^{\text{sch},j}(l-m) \sum_{n_1=0}^{k-1} \sum_{n_2=0}^{k-1-n_1} P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) \right] + \sum_{l=s}^{s - \min(\text{len}_s, \text{all}) + 1} \left[ \sum_{m=s_{\text{sch},j,k}-1}^{l-1} P_{\text{pro}}^{\text{sch},j}(l-m) \sum_{n_1=0}^{k-1} \sum_{n_2=0}^{k-1-n_1} P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) \right] \quad (10)$$

其中，下标off对应逻辑时隙不可重叠的情况； $\text{len}_s$ 代表PUSCH时域符号长度范围； $P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m)$ 代表到第 $m$ 个符号为止，包含 $n_1$ 个UE向TRP<sub>1</sub>传输的PUSCH和 $n_2$ 个UE向TRP<sub>2</sub>传输的PUSCH的概率，且 $n_1$ 和 $n_2$ 满足 $(n_1 + n_2) = (k - 1)$ ， $P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m)$ 计算式为

$$P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) = \sum_{l=s_{\text{sch},j,k-2}+1}^{m - \min(\text{len}_s, \text{all}) + 1} \left[ \frac{1}{2} \sum_{\text{len}=\min(\text{len}_s, \text{all})}^{\max(\text{len}_s, \text{all})} a_1 a_2 \sum_{m'=s_{\text{sch},j,k-2}}^{l-1} P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-2}(n_1 - 1, n_2, m') (1 - a_1)^{m - \text{len} - m'} \right] + \sum_{l=s_{\text{sch},j,k-2}+1}^{m - \min(\text{len}_s, \text{all}) + 1} \left[ \frac{1}{2} \sum_{l'=\min(\text{len}_s, \text{all})}^{\max(\text{len}_s, \text{all})} a_1 a_2 \sum_{m'=s_{\text{sch},j,k-2}}^{l-1} P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-2}(n_1, n_2 - 1, m') (1 - a_1)^{m - l' - m'} \right] \quad (11)$$

当 $k > 1$ 且 $\max(\text{len}_s, \text{all}) < s$ 时， $P_{\text{off}}^{\text{sch},j,k}(s)$ 为

$$P_{\text{off}}^{\text{sch},j,k}(s) = \sum_{l=s - \max(\text{len}_s, \text{all}) + 1}^{s - \min(\text{len}_s, \text{all})} \left[ \frac{1}{2} P_{\text{len}}^{\text{sch},j}(s_j, l) \sum_{m=s_{\text{sch},j,k}-1}^{l-1} P_{\text{pro}}^{\text{sch},j}(l-m) \sum_{n_1=0}^{k-1} \sum_{n_2=0}^{k-1-n_1} P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) \right] + \sum_{l=s}^{s - \min(\text{len}_s, \text{all}) + 1} \left[ \frac{1}{2} \sum_{m=s_{\text{sch},j,k}-1}^{l-1} P_{\text{pro}}^{\text{sch},j}(l-m) \sum_{n_1=0}^{k-1} \sum_{n_2=0}^{k-1-n_1} P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) \right] \quad (12)$$

由此可得PUSCH占据第 $s$ 个符号的概率为

$$P_{\text{on}}^{\text{sch},j}(s) = \sum_{k=1}^K P_{\text{on}}^{\text{sch},j,k}(s) \quad (13)$$

$$P_{\text{off}}^{\text{sch},j}(s) = \sum_{k=1}^K P_{\text{off}}^{\text{sch},j,k}(s)$$

相应地，PUCCH和PUSCH在第 $s$ 个符号重叠的概率分别为

$$P_{\text{overlap,on}}^{ij}(s) = P^{\text{cch},i}(s) P_{\text{on}}^{\text{sch},j}(s)$$

$$P_{\text{overlap,off}}^{ij}(s) = P^{\text{cch},i}(s) P_{\text{off}}^{\text{sch},j}(s) \quad (14)$$

对于是否可以将PUCCH复用到PUSCH，需要先确定PUCCH与PUSCH起始符号关系。PUCCH格式 $i$ 从第 $s$ 个符号开始的概率为

$$P_{\text{start}}^{\text{cch},i}(s) = \sum_{k=1}^K P_{\text{start}}^{\text{cch},i,k}(s) \quad (15)$$

其中， $P_{\text{start}}^{\text{cch},i,k}(s)$ 代表PUCCH格式 $i$ 中第 $k$ 个PUCCH从第 $s$ 个符号开始的概率。

当 $k = 1$ 时，可得

$$P_{\text{start}}^{\text{cch},i,1}(s) = a_{i,1} (1 - a_{i,1})^{s-1} = P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(s) \quad (16)$$

当 $k > 1$ 时，可得

$$P_{\text{start}}^{\text{cch},i,k}(s) = a_{i,1} \sum_{m=s_{\text{cch},i,k}-1}^{s-1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) (1 - a_{i,1})^{s-m-1} = \sum_{m=s_{\text{cch},i,k}-1}^{s-1} P_{\text{include}}^{\text{cch},i,k-1}(m) P_{\text{pro}}^{\text{cch},i}(s-m) \quad (17)$$

由 $P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k}(m)$ 可得当逻辑时隙可重叠时，向TRP<sub>1</sub>传输的第 $k$ 个PUSCH从第 $s$ 个符号开始的概率 $P_{\text{start,on}}^{\text{sch},j,k}(s)$ 。

当逻辑时隙不可重叠时，向TRP<sub>1</sub>传输的第1个PUSCH从第 $s$ 个符号开始的概率为 $P_{\text{start,off}}^{\text{sch},j,1}(s) = \frac{P_{\text{start,on}}^{\text{sch},j,1}(s)}{2}$ 。

当 $k > 1$ 时，可得

$$P_{\text{start,on}}^{\text{sch},j,k}(s) = \frac{1}{2} a_1 \sum_{m=s_{\text{sch},j,k}-1}^{s-1} \sum_{n_1=0}^{k-1} \sum_{n_2=0}^{k-1-n_1} \left[ P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) (1 - a_1)^{s-m-1} \right] = \frac{1}{2} \sum_{m=s_{\text{sch},j,k}-1}^{s-1} \sum_{n_1=0}^{k-1} \sum_{n_2=0}^{k-1-n_1} \left[ P_{\text{include}}^{\text{sch},j,k-1}(n_1, n_2, m) P_{\text{pro}}^{\text{sch},j}(s-m) \right] \quad (18)$$

结合TA影响，假设2个TRP对应TA分别为 $q_1$

和  $q_2$  个符号, 以实际传输时靠前时间线为基准, 则 PUCCH 实际占据第  $s$  个符号的概率、PUCCH 实际从第  $s$  个符号开始的概率、逻辑时隙可重叠和不可重叠情形下 PUSCH 实际占据第  $s$  个符号的概率、逻辑时隙可重叠和不可重叠情形下 PUSCH 实际从第  $s$  个符号开始的概率分别为

$$\begin{aligned} P_{\text{reality}}^{\text{cch},ij}(s) &= P^{\text{cch},i}(s + q_j - \max(q_1, q_2)) \\ P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(s) &= P_{\text{start}}^{\text{cch},i}(s + q_j - \max(q_1, q_2)) \\ P_{\text{reality,on}}^{\text{sch},j}(s) &= P_{\text{on}}^{\text{sch},j}(s + q_j - \max(q_1, q_2)) \\ P_{\text{reality,off}}^{\text{sch},j}(s) &= P_{\text{off}}^{\text{sch},j}(s + q_j - \max(q_1, q_2)) \\ P_{\text{start,on,reality}}^{\text{sch},j}(s) &= P_{\text{start,on}}^{\text{sch},j}(s + q_j - \max(q_1, q_2)) \\ P_{\text{start,off,reality}}^{\text{sch},j}(s) &= P_{\text{start,off}}^{\text{sch},j}(s + q_j - \max(q_1, q_2)) \end{aligned} \quad (19)$$

假设要满足现有协议复用要求, PUCCH 符号起点  $q_3$  与 PUSCH 符号起点  $q_4$  需满足  $q_3 - q_4 \leq 2$ , 且 PUCCH 和 PUSCH 在时域上重叠, 则现有协议机制下可复用概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{Mul,legacy,on}}^{ij}(q_4) &= \frac{q_4 - \max(\text{len}_c(i)) + 1}{q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1} \sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1}^{q_4 + 2} P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(q_4, q) P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) + \\ &\sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 2}^{q_4 + 2} P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) \\ P_{\text{Mul,legacy,off}}^{ij}(q_4) &= \frac{q_4 - \max(\text{len}_c(i)) + 1}{q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1} \sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1}^{q_4 + 2} P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(q_4, q) P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) + \\ &\sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 2}^{q_4 + 2} P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) \end{aligned} \quad (20)$$

假设要满足新型复用要求, PUCCH 符号起点  $q_3$  与 PUSCH 符号起点  $q_4$  需满足  $q_3 - q_4 \leq 6$ , 且 PUCCH 和 PUSCH 在时域上需重叠, 对应的新型机制下可复用概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{Mul,legacy,on}}^{ij}(q_4) &= \frac{q_4 - \max(\text{len}_c(i)) + 1}{q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1} \sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1}^{q_4 + 6} P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(q_4, q) P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) + \\ &\sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 2}^{q_4 + 6} P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) \\ P_{\text{Mul,legacy,off}}^{ij}(q_4) &= \frac{q_4 - \max(\text{len}_c(i)) + 1}{q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1} \sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 1}^{q_4 + 6} P_{\text{len}}^{\text{cch},i}(q_4, q) P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) + \\ &\sum_{q=q_4 - \min(\text{len}_c(i)) + 2}^{q_4 + 6} P_{\text{start,reality}}^{\text{cch},ij}(q) \end{aligned} \quad (21)$$

### 3.2 实际复用的 PUCCH 数量性能评估

UE 需要传输的 PUCCH 格式及数量与采用现有协议机制还是新型机制无关, 因此, 现有协议机制与新型机制处理后的 PUCCH 数量满足如下关系

$$n_{\text{pro}}^{\text{cch},ij} = n_{\text{rule,legacy}}^{\text{cch},ij} + n_{\text{tr,legacy}}^{\text{cch},ij} + n_{\text{dr,legacy}}^{\text{cch},ij} = n_{\text{rule,new}}^{\text{cch},ij} + n_{\text{tr,new}}^{\text{cch},ij} + n_{\text{dr,new}}^{\text{cch},ij} \quad (22)$$

其中,  $n_{\text{pro}}^{\text{cch},ij}$  代表 UE 向 TRP<sub>j</sub> 传输的 PUCCH 格式  $i$  的 PUCCH 数量;  $n_{\text{rule,legacy}}^{\text{cch},ij}$  代表满足现有协议复用要求的 PUCCH 数量,  $n_{\text{tr,legacy}}^{\text{cch},ij}$  代表不满足现有协议复用要求而以缩短 PUSCH 为代价直接传输的 PUCCH 数量,  $n_{\text{dr,legacy}}^{\text{cch},ij}$  代表不满足现有协议复用要求而丢弃的 PUCCH 数量;  $n_{\text{rule,new}}^{\text{cch},ij}$  代表满足新型复用要求的 PUCCH 数量,  $n_{\text{tr,new}}^{\text{cch},ij}$  代表不满足新型复用要求而以缩短 PUSCH 为代价直接传输的 PUCCH 数量,  $n_{\text{dr,new}}^{\text{cch},ij}$  代表不满足新型复用要求而丢弃的 PUCCH 数量。

假设对不满足复用规则的 PUCCH, 以  $\alpha$  概率丢弃, 以  $(1 - \alpha)$  概率直接传输。直接传输不满足复用要求的 PUCCH 将导致与其重叠的 PUSCH 被缩短, 从而导致原本满足复用规则的 PUCCH 实际可能无法复用。实际可复用的 PUCCH 数量和原本可复用的 PUCCH 数量关系为

$$\begin{aligned} n_{\text{rule,legacy}}^{\text{cch},ij} &= n_{\text{Mul,legacy,reality}}^{\text{cch},ij} + n_{\text{dr,legacy,extra}}^{\text{cch},ij} \\ n_{\text{rule,new}}^{\text{cch},ij} &= n_{\text{Mul,new,reality}}^{\text{cch},ij} + n_{\text{dr,new,extra}}^{\text{cch},ij} \end{aligned} \quad (23)$$

其中,  $n_{\text{Mul,legacy,reality}}^{\text{cch},ij}$  代表满足现有协议复用要求并且实际可复用的 UE 向 TRP<sub>j</sub> 传输的 PUCCH 格式  $i$  的 PUCCH 数量;  $n_{\text{dr,legacy,extra}}^{\text{cch},ij}$  代表原本满足现有协议复用要求但实际无法复用, 从而额外丢弃的 PUCCH 数量;  $n_{\text{Mul,new,reality}}^{\text{cch},ij}$  代表满足新型复用要求并且实际可复用的 UE 向 TRP<sub>j</sub> 传输的 PUCCH 格式  $i$  的 PUCCH 数量;  $n_{\text{dr,new,extra}}^{\text{cch},ij}$  代表原本满足新型复用要求但实际无法复用, 从而额外丢弃的 PUCCH 数量。

鉴于逻辑时隙是否重叠将导致生成的 PUSCH 数量和位置存在差异, 因此, 为保证仿真中现有协议机制与新型机制公平对比, 对于逻辑时隙不可重叠情形, 其生成的 PUCCH、PUSCH 数量和位置完全相同; 对于逻辑时隙可重叠的情形, 则与之类似。

图 6 为在逻辑时隙不可重叠和可重叠情形下, 现有协议机制与新型机制 PUCCH 数量对比。由图 6 可知, 在这 2 种情形下, 新型机制和现有协议机制



现有协议机制在实际复用PUCCH数量上具有显著优势。

### 3.3 PUSCH实际可用资源性能评估

对于PUSCH资源,满足如下关系式

$$RE_{all}^{sch} = RE_{assignment}^{sch} + RE_{reduce}^{sch} \quad (24)$$

其中,  $RE_{all}^{sch}$  代表UE总资源数量;  $RE_{assignment}^{sch}$  代表TRP为UE分配的PUSCH资源数量;  $RE_{reduce}^{sch}$  代表因与PUSCH重叠,直接传输PUCCH导致PUSCH缩短而减少的资源数量,计算式为

$$RE_{assignment}^{sch} = RE_{overlap}^{sch} + RE_{remain}^{sch} \quad (25)$$

其中,  $RE_{overlap}^{sch}$  代表与UE对应的不同TRP的重叠资源数量,  $RE_{remain}^{sch}$  代表UE实际可用资源数量。

UE实际可用资源既包含用于传输复用的UCI资源,还包含传输数据信息的资源,计算式为

$$RE_{remain}^{sch} = RE_{data}^{sch} + RE_{multi}^{cch} + RE_{RS} \quad (26)$$

其中,  $RE_{data}^{sch}$  代表数据信息所占资源数量,  $RE_{multi}^{cch}$  代表复用UCI所占资源数量,  $RE_{RS}$  代表参考信号所占资源数量。

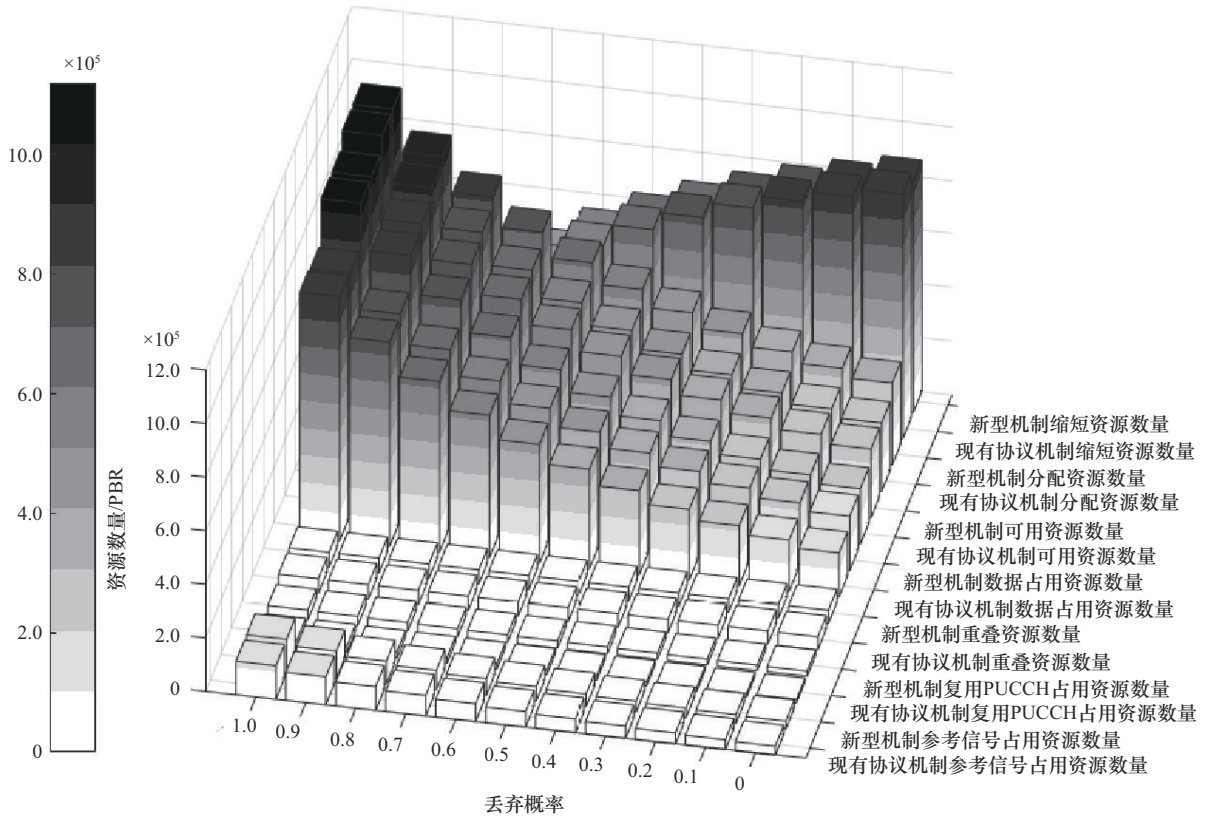
为保证现有协议机制与新型机制公平对比,基于3.2节PUCCH与PUSCH的生成条件进行仿真。图7为逻辑时隙不可重叠和可重叠情形下,新型机制与现有协议机制PUSCH资源数量对比,各子图以各自PUSCH资源数最大值为基准,根据各类PUSCH资源数与其比例关系,分别绘制三维灰度柱状图(图中分别以新型机制和现有协议机制标识)。由图7可知,在这2种情形下,新型机制和现有协议机制均具有以下特征。1) 随 $\alpha$ 递增,PUSCH实际可用资源数量、分配的PUSCH资源数量、PUSCH重叠资源数量、数据占用资源数量与参考信号占用资源数量均递增,被缩短的PUSCH占用资源数量则递减。2) 在逻辑时隙可重叠情形下,PUSCH实际可用资源数量、分配的PUSCH资源数量、PUSCH重叠资源数量、数据占用资源数量、参考信号占用资源数量及被缩短的PUSCH占用资源数量上具有明显优势。3) 当 $\alpha < 1$ 时,新型机制PUSCH实际可用资源数量均高于现有协议机制PUSCH实际可用资源数量,说明新型机制与现有协议机制相比,在PUSCH实际可用资源数量具有明显性能优势,这是因为经新型机制处理后,更多的PUCCH满足复用要求,则直接传输的PUCCH数量将减少,导致被缩短的PUSCH占用资源数量更少,从而使PUSCH分配的资源数量(包括

PUSCH重叠资源数量和PUSCH实际可用资源数量)更多。4) 当 $\alpha = 1$ 时,新型机制与现有协议机制PUSCH分配的资源数量、PUSCH重叠资源数量和PUSCH实际可用资源数量相同,这是由于不满足复用要求的PUCCH全被丢弃,因而不会影响PUSCH可用的资源数量,导致新型机制与现有协议机制具有相同参考信号占用资源数量。由于在新型机制中,实际复用了更多PUCCH数量,因而新型机制复用PUCCH占用资源数量多于现有协议机制,新型机制数据占用资源数量少于现有协议机制,即优先保证了更为重要的控制信息的传输。

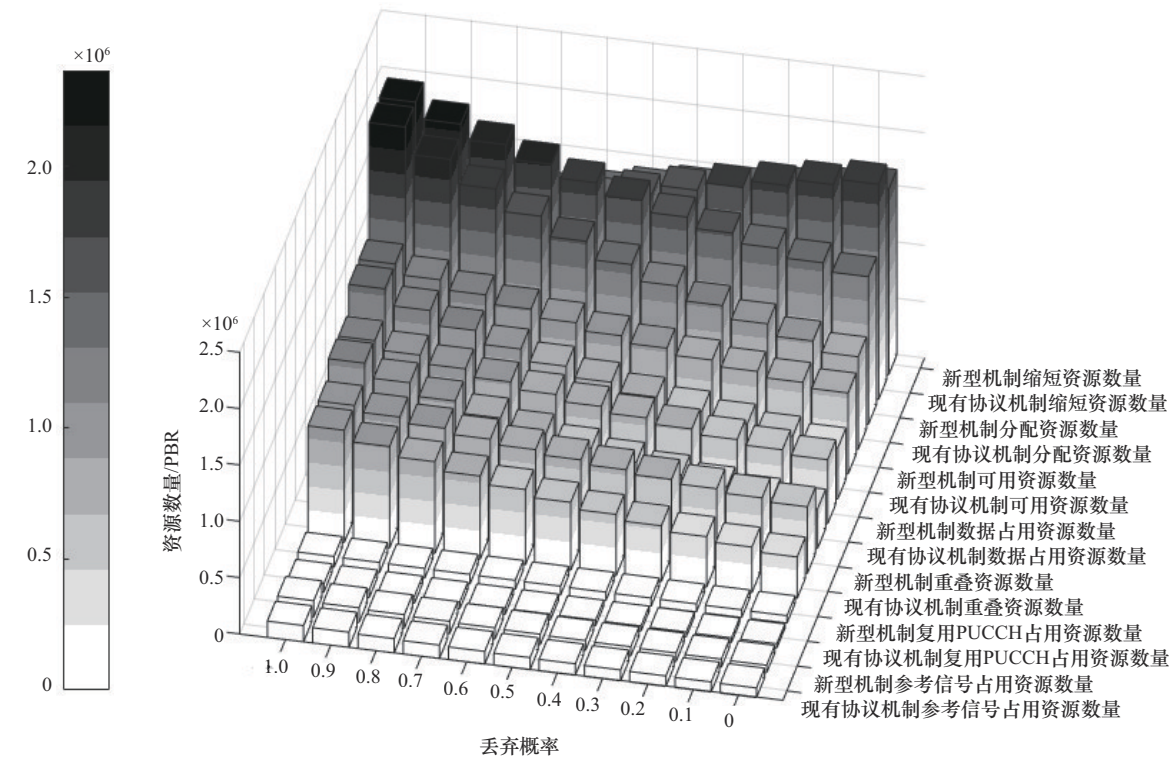
### 3.4 逻辑信道所占资源性能评估

PUSCH中数据信息所占资源数量 $RE_{data}^{sch}$ 包含所有不同逻辑信道对应的数据信息,根据令牌桶机制,需满足每个逻辑信道对应的最低传输速率。为方便对比,为所有逻辑信道配置了相同的最低传输速率。

为保证现有协议机制与新型机制公平对比,基于3.2节PUCCH与PUSCH的生成条件进行仿真。图8展示了逻辑时隙不可重叠和可重叠情形下新型机制与现有协议机制逻辑信道占用资源数量对比,各子图以各自逻辑信道资源数最大值为基准,根据各逻辑信道资源数与其比例关系,绘制灰度饼图。限于篇幅,图8仅给出优先级前三的逻辑信道占用资源数量情况,其中B1、B2和B3分别对应优先级最高、次高和第三的逻辑信道。根据图8(a)与图8(b),新型机制和现有协议机制都具有以下特征。1) 随 $\alpha$ 递增,优先级最高和次高的逻辑信道实际占用资源数量将显著增加,这是因为MAC层需要对逻辑信道上数据进行组包,组包后将使用PUSCH数据占用资源来传输逻辑信道的数据,当PUSCH数据占用资源数量显著增加后,即可传输更多的逻辑信道数据,而根据令牌桶机制,将优先传输满足条件的高优先级逻辑信道,因此优先级最高和次高的逻辑信道实际占用资源数量将显著增加,而优先级第三的逻辑信道实际占用资源数量则几乎保持不变。2) 无论是新型机制还是现有协议机制,与逻辑时隙不可重叠情形相比,逻辑时隙可重叠情形下逻辑信道实际占有资源数量更多。3) 当 $\alpha < 1$ 时,新型机制对应优先级最高和次高的逻辑信道占用资源数均高于现有协议机制,而第三优先级逻辑信道占用资源数几乎相同,这说明新型机制在逻辑信道实际占用资源数量上具有明显优势。4) 当 $\alpha = 1$ 时,所有



(a) 逻辑时隙不可重叠情形



(b) 逻辑时隙可重叠情形

图7 新型机制与现有协议机制PUSCH资源数量对比

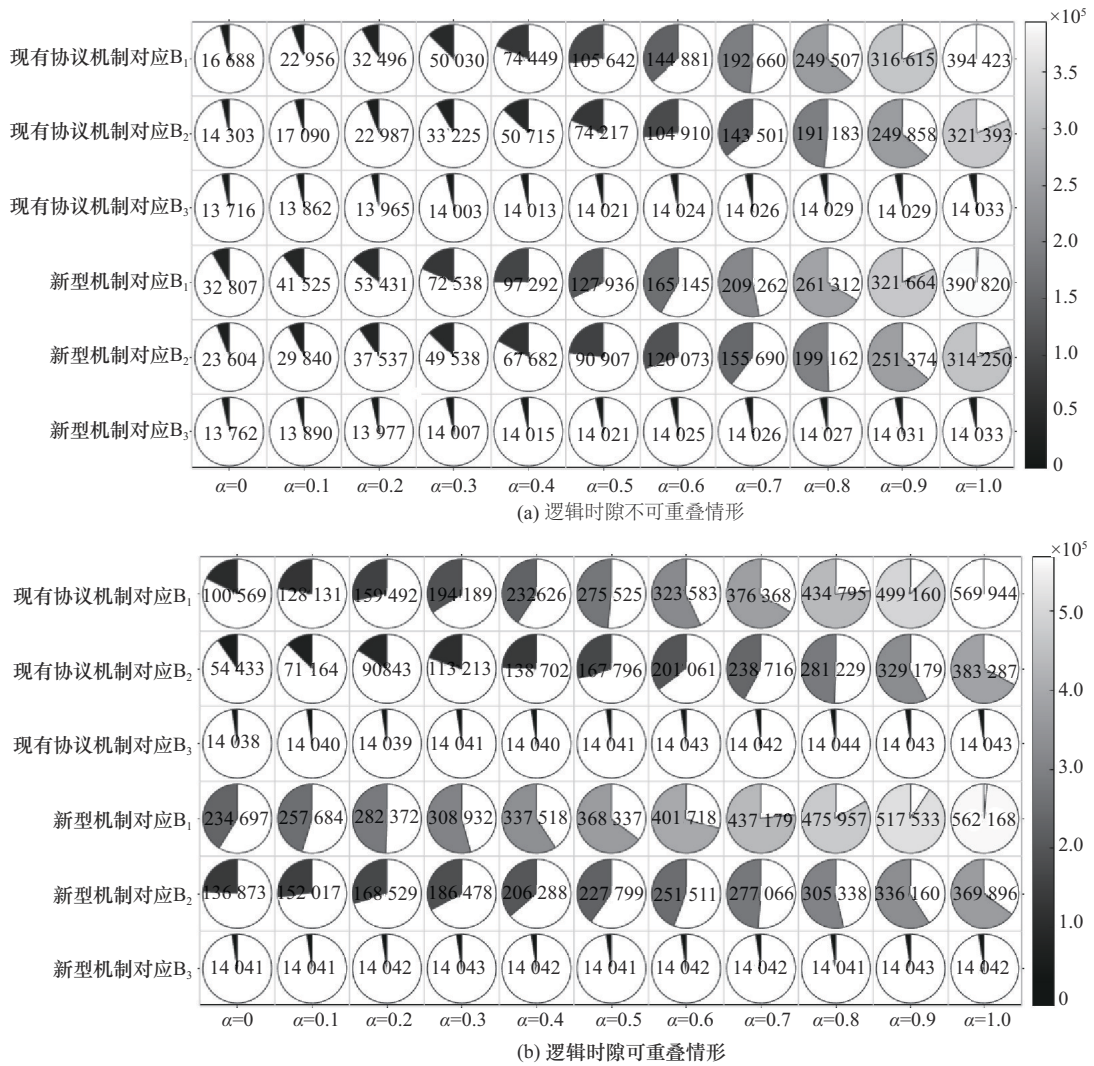


图8 新型机制与现有协议机制逻辑信道(前三)占用资源数量对比

无法被复用的PUCCH均被丢弃,因此新型机制和现有协议机制实际可用资源数和参考信号占用资源数量相同,但新型机制复用了更多PUCCH,导致逻辑信道占用资源数量反而小于现有协议机制,即优先保证了更重要的控制信息的传输。

#### 4 结束语

在移动通信领域,UL重叠传输问题一直备受关注,随着MIMO增强演进技术multi-TRP的引入,这一问题更加突出。为此,本文针对该问题展开了深入研究,提出了一种新型的UL重叠传输处理机制,包括改进物理层重叠信道识别流程、复用要求及复用规则等,并结合物理层反馈的复用信息与重叠信息,对MAC层令牌桶机制进行优化。数值仿真结果验证了新型机制在处理UL重叠传输问题的

有效性和优越性。因此,本文所提UL重叠传输处理机制为解决该问题提供了一种可行有效的方案。

#### 参考文献:

- [1] 张平,牛凯,田辉,等. 6G移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.  
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 141-148.
- [2] 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.
- [3] JIN H P, LIU K P, ZHANG M, et al. Massive MIMO evolution toward 3GPP release 18[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6): 1635-1654.
- [4] KHOSHNEVISAN M, JAYASINGHE K, CHEN R H, et al. Enhanced reliability and capacity with multi-TRP transmission[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(1): 13-19.

- [5] 3GPP. RP-233090 new WID: NR MIMO phase 5[R]. 2023.
- [6] 3GPP. Multiplexing and channel coding (release 17): TS 38.212 V17.2.0 [R]. 2022.
- [7] ERICSSON. R1-2210468 Moderator summary #2 on two TAs for multi-DCI[R]. 2022.
- [8] 3GPP. Physical layer procedures for control (release 17): TS 38.213 V17.2.0[R]. 2022.
- [9] ZTE. R1-2205919 TA enhancement for multi-DCI[R]. 2022.
- [10] ZTE. R1-2203264 TA enhancement for multi-DCI [R]. 2022.
- [11] QUALCOMM INCORPORATED. R1-2209968 Supporting two TAs for multi-DCI based mTRP[R]. 2022.
- [12] TCL COMMUNICATION LTD. R1-2208460 Discussion on two TAs for multi-DCI based on multi-TRP operation[R]. 2022.
- [13] ZTE. R1-2208503 TA enhancement for multi-DCI[R]. 2022.
- [14] 3GPP. Physical layer procedures for data (release 17): TS 38.214 V17.2.0[R]. 2022.
- [15] CMCC. R1-2204288 Discussion on two TAs for multi-DCI[R]. 2022.
- [16] SHARP. R1-2303179 Two TAs for multi-DCI[R]. 2023.
- [17] 李芳, 樊波, 袁世通. 一种上行调度方法及装置: CN117596682A[P]. (2024-02-23)[2024-03-07].  
LI F, FAN B, YUAN S T. An uplink scheduling method and device: CN117596682A[P]. (2024-02-23)[2024-03-07].
- [18] XIAOMI. R1-2302960 Discussion on two TAs for multi-TRP operation [R]. 2023.
- [19] SPREADTRUM. R1-2302586 Discussion on two TAs for multi-DCI based M-TRP operation[R]. 2023.
- [20] M·霍什内维桑, 张晓霞, 骆涛, 等. 针对多个发送接收点(TRP)的上行链路信道传输: CN115412133A[P]. (2022-11-29)[2024-03-07].  
HOSHNEVISAN M, ZHANG X X, LUO T, et al. Uplink channel transmission for multiple transmission reception points (TRP): CN115412133A[P]. (2022-11-29)[2024-03-07].
- [21] LENOVO. R1-2302724 Discussion of two TAs for multi-DCI UL transmission [R]. 2023.
- [22] 张志荣, 侯佳, 李鼎, 等. 上行发送方法、终端、TRP、系统和存储介质: CN117560129A[P]. (2024-02-13)[2024-03-07].  
ZHANG Z R, HOU J, LI J, et al. Uplink transmission method, terminal, TRP, system, and storage medium: CN117560129A[P]. (2024-02-13) [2024-03-07].
- [23] ERICSSON. R1-2304055 Moderator summary #1 on two TAs for multi-DCI[R]. 2023.
- [24] HUAWEI, HISILICON. R1-2208440 Study on TA enhancement for UL mTRP transmission[R]. 2022.
- [25] SAMSUNG. R1-2301246 Views on two TAs for m-DCI[R]. 2023.
- [26] CMCC. R1-2209321 Discussion on two TAs for multi-DCI[R]. 2022.
- [27] APPLE INC. R1-2209569 Two TAs for multi-DCI uplink transmissions [R]. 2022.
- [28] 3GPP. Physical channels and modulation (release 17): TS 38.211 V17.1.0[R]. 2022.
- [29] 3GPP. Medium access control (MAC) protocol specification (release 17): TS 38.321 V17.0.0[R]. 2022.

## [作者简介]



景小荣 (1974-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信理论、通信信号处理等。



熊杰 (1999-), 男, 四川德阳人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为通信信号处理、5G 通信协议。



孙健 (1985-), 男, 重庆人, 重庆两江卫星移动通信有限公司工程师, 主要研究方向为卫星终端通信、无线通信等。



陈前斌 (1967-), 男, 四川营山人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、通信网络理论、软件定义网络、多媒体技术等。